T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNLEYİCİ KORUMA KAPSAMINDA TARİHİ YAPI BİLGİ MODELİ TABANLI İZLEME VE ERKEN KONTROL SİSTEMİ ÖNERİSİ

Sezer ORHAN

DOKTORA TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı

Danışman

Doç. Dr. Togan TONG

Mart, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNLEYİCİ KORUMA KAPSAMINDA TARİHİ YAPI BİLGİ MODELİ TABANLI İZLEME VE ERKEN KONTROL SİSTEMİ ÖNERİSİ

Sezer ORHAN tarafından hazırlanan tez çalışması 02.03.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Bilgisayar Ortamında Mimarlık Doktora Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Togan TONG
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Togan TONG, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Meral ERDOĞAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Fulya ÖZSEL AKİPEK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Uzay YERGÜN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. B. Onur TURAN, Üye
Mimar Sinan Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Togan TONG sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Önleyici Koruma Kapsamında Tarihi Yapı Bilgi Modeli Tabanlı İzleme ve Erken Kontrol Sistemi Önerisi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim.

Bu tez çalışması süresince, tez sahibinin kontrolü altında dil ve ifade bütünlüğünü güçlendirmek amacıyla Üretken Yapay Zeka (ÜYZ) araçlarından Open AI tarafından sunulan ChatGPT 5.0 ve Google tarafından sunulan Gemini 3 Flash AI, literatür taraması amacıyla Elsevier tarafından sunulan Scopus AI kullanılmıştır.

ÜYZ araçlarının yanlış veya gerçek dışı bilgi (halüsinasyon) üretebilme riski taşıdığının bilincinde olarak, bu araçlardan elde edilen tüm çıktıları doğruluk, bütünlük, güvenilirlik ve etik standartlar açısından dikkatle kontrol ettiğimi beyan ederim.

ÜYZ kullanımı hiçbir aşamada araştırmanın entelektüel katkısının, bilimsel muhakemesinin ve özgün fikir üretiminin yerine geçmemiştir. Tez çalışmasında yer alan tüm bilgi, veri, analiz, iddia ve referansların doğruluğu, güncelliği ve bilimsel geçerliliğine ilişkin sorumluluk tamamen tarafıma aittir.

Beyanımın aksinin tespiti hâlinde doğabilecek her türlü idari ve hukuki sorumluluğu kabul ederim.

Sezer ORHAN

İmza

Vazgeçmememi sağlayan sabır ve inançla…

“Babama”

TEŞEKKÜR

Mimarlık eğitimimin başından doktora sürecinin sonuna kadar, çalışmanın her aşamasında bilgisi ve tecrübesiyle yol gösteren, sabrı, yapıcı eleştirileri ve ilham veren yaklaşımı sayesinde bilimsel niteliğini güçlendirmemi sağlayan, sadece akademik değil, kişisel yolculuğumun her döneminde bana rehberlik eden, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde büyük rol oynayan, danışmanım **Doç. Dr. Togan TONG**'a;

Tez izleme süreçlerinin her aşamasında, değerli görüş ve katkılarıyla bu çalışmanın gelişimine destek veren; bilgi ve birikimlerini benimle cömertçe paylaşarak bilimsel yaklaşımımın şekillenmesinde rehberlik eden, tezime değer katan kıymetli hocalarım **Prof. Dr. Meral ERDOĞAN** ve **Doç. Dr. Fulya ÖZSEL AKİPEK**'e;

Tüm bu süreç boyunca akademik ve psikolojik desteklerini esirgemeyen, her zorlukta yanımda olup moral ve motivasyonumu yüksek tutarak bu yolculuğu tamamlamamı sağlayan sevgili arkadaşlarım **Doğan TÜRKKAN** ve **Eylem ÖNAL ŞAHİN**'e;

Mimarlık eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan tüm hocalarıma;

Meslek hayatımda yıllar içinde beraber çalışma fırsatı bulduğum, işbirliği ve dayanışmalarıyla bu süreci verimli ve anlamlı kılan tüm mesai arkadaşlarıma;

Kişisel hayatımın en zor dönemlerini içeren doktora sürecinde, maddi ve manevi her koşulda yanımda olan, cesaret veren, bilgilerini paylaşan, hiçbir zaman vazgeçmeme izin vermeyen değerli dostlarım **Arbil ÖTKÜNÇ, Bahar SAKA, Erdal D. AYDIN, Evren Ş. KAYA, Özlem ERTUNA, Şeyma TİRYAKİOĞLU**, **Timur AKKURT** ve **Ünsal ÜNLÜ**'ye;

Hayatımın her döneminde, koşulsuz sevgisi, desteği ve anlayışıyla yanımda olan, var gücüyle elimi tutan, sabrı ve fedakarlığı ile karşılaştığım zorlukların üstesinden gelebilmemi sağlayan, "ömrümün cesaret anası" canım annem **Sema ORHAN**'a;

Mesleği dahil her şeyini taklit ettiğim, oyun arkadaşım, hocam, yol göstericim, ilham ve gurur kaynağım, akademik ve kişisel yolculuğumun en kıymetlisi, bu süreçte içinde beni bırakıp uzaklara gitmiş olsa bile bir yerlerden hala takip ettiğini bildiğim canım babam **Mimar Sezgi ORHAN**'a minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Sezer ORHAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xvi
ÖZET xvii
ABSTRACT xix
1 GİRİŞ 1
1.1 Giriş ve Genel Yaklaşım 1
1.2 Amaç, Kapsam, Yöntem 2
1.2.1 Araştırmanın Amacı……... 2
1.2.2 Araştırmanın Kapsamı……..... 3
1.2.3 Araştırmanın Yöntemi……..... 4
2 KORUMA KAVRAMI ve ÖNLEYİCİ KORUMA YAKLAŞIMI 6
2.1 Koruma Kavramının Tanımı ve Gelişimi 6
2.2 Risk Altındaki Kültür Mirası 9
2.3 Türkiye'de Kültür Mirasını Tehdit Eden Riskler: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Örneği 13
2.4 Önleyici Koruma: Kavram ve Yaklaşım 17
3 MİRAS YAPILARINDA BELGELEME, SAYISAL YÖNTEMLER VE TYBM YAKLAŞIMI 21
3.1 Miras Yapılarında Belgeleme ve Sayısal Yöntemler 21
3.2 Miras Yapılarında Bilgi Modeli 24
3.2.1 YBM Boyutları……..... 27
3.2.2 YBM Gelişim Düzeyleri – LOD……. 28
3.2.3 YBM Sisteminde Kullanılan Standartlar…….. 29
3.3 Tarihi Yapı Bilgi Modeli 31
3.3.1 TYBM Çalışma Yöntemi…….. 32

3.3.2 TYBM Boyutları……..... 36

3.3.3 TYBM Bilgi Düzeyleri…….. 37

3.3.4 Literatürde TYBM Uygulamaları ve Mevcut Durum…… 40

3.4 Yapısal Sağlık İzleme ve Nesnelerin İnterneti (IoT) Teknolojileri 45

3.4.1 IoT Teknolojilerinin YBM Ortamına Entegrasyonu……. 48

3.4.2 Sensör Türleri……..... 51

3.4.3 Veri Analizi ve Hasar Tespit Yöntemleri……. 51

3.4.4 YBM Ortamına Veri Transferi…… 52

3.4.5 Literatürdeki Sensörlü İzleme Örnekleri…….. 54

4 OSMANLI CAMİ MİMARİSİ BAĞLAMINDA TYBM YAKLAŞIMI 60

4.1 Osmanlı Cami Mimarisinde Plan Şemasının Gelişimi 62

4.2 Yığma Camilerde Yapısal Kırılganlık Noktaları 66

4.2.1 Baldaken Sistem ve Üst Örtü Geçiş Elemanları…….....66

4.2.2 Ayaklar, kemerler ve tonoz – kubbe geçişleri……. 68

4.2.3 Düşey Taşıyıcılar ve Beden Duvarlarındaki Süreksizlikler……. 69

4.2.4 Minareler……..... 70

4.2.5 Mekan Kurgusu ve Kütle Etkileşimi…….. 72

4.2.6 Yanlış Müdahaleler ve Malzeme Uyumsuzlukları……..... 73

5 KILIÇ ALİ PAŞA CAMİSİ ÖRNEĞİNDE KAVRAMSAL TYBM ÇERÇEVESİ 76

5.1 Kavramsal Çerçeve: Miras Yapılarında Veri Akış Mimarisi.....76

5.2 Kılıç Ali Paşa Camisi.....77

5.3 Vaka Analizi: Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri 82

5.3.1 Dijital İkiz Yaklaşımı Bağlamında Modelin Konumu……85

5.3.2 Ölçüm Verilerinin Yorumlanması…….. 85

5.3.3 Metodolojik Çerçeve ve Sistem Kurgusu……..86

5.3.4 Prototip Modelin Hazırlanması ve Veri Akışı Testi……88

5.3.5 Son Cemaat Yeri Modellemesi…… 93

5.3.6 Son Cemaat Yeri Modelinin Analitik Değerlendirmesi..... 97

5.3.7 İzleme Parametrelerinin Belirlenmesi ve Sensör Sisteminin Planlanması.....99

5.4 Son Cemaat Yeri Model Değerlendirmesi ve Risk Çerçevesi 119

6 SONUÇLAR **123**

6.1 Çalışmanın Özgün Katkıları ve Metodolojik Kazanımlar 123

6.2 Önleyici Koruma Yaklaşımı Bağlamında Değerlendirme 124

6.3 Sınırlılıklar 125

6.4 Gelecek Çalışmalar 126

KAYNAKÇA **127**

A LİTERATÜRDEKİ YAYGIN KULLANILAN YBM YAZILIMLARI **143**

B LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ TABLOLARI **144**

C REVİT MODEL SENARYOLARI İÇİN HAZIRLANAN PYTHON KODLARI **155**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **163**

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AIA	American Institute of Architects – Amerikan Mimarlar Enstitüsü
API	Application Programming Interface – Uygulama programlama arayüzü.
BEP	BIM Executation Plan – YBM Uygulama Planı
BIM	Building Information Modeling – Yapı Bilgi Modellemesi
DSP	Dijital Sinyal İşleme
EIR	Employers Information Requirement – İşveren Bilgi Gereksinimleri
GOA	Grade of Accuracy – Doğruluk Derecesi
GOG	Grade of Generation – Üretim Derecesi
GOI	Grade of Information – Bilgi Derecesi
HBIM	Historical Building Information Modeling
ICOMOS	International Council on Monuments and Sites – Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi
JSON	Javascript Object Nation – Metin tabanlı ve insan tarafından okunabilir veri formatı.
KAİP	Koruma Amaçlı İmar Planı
KTB	Kültür ve Turizm Bakanlığı
KTVKK	Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulu
LOD	Level Of Detail – Detay Seviyesi
LOK	Level Of Knowledge – Bilgi Seviyesi
NBIMS-US	United States National BIM Standart – Amerika Birleşik Devletleri Ulusal YBM Standartları
SWOT	Strength, Weakness, Opportunity, Threat – Güçlü yönler, Zayıf yönler, Fırsatlar, Tehditler
REST	Representational State Transfer – Temsili durum transferi
TMMOB	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TYBM	Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi

UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü
VGM	Vakıflar Genel Müdürlüğü
YBM	Yapı Bilgi Modellemesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kültür mirasını koruma döngüsü (Önge, 2020). 7

Şekil 2.2 BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve 11/4 "Kültürel Miras ve Sürdürülebilirlik" Logosu (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar, 2026). 8

Şekil 2.3 2024 yılı sonu itibariyle Türkiye genelindeki korunması gerekli taşınmaz kültür varlığı istatistiği (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2026). 10

Şekil 2.4 Kültür mirasına yönelik bütünleşik afet risklerinin yönetimi döngüsü (Kültür Varlıklarına Yönelik Afet Risklerinin Yönetimi, 2019). 11

Şekil 2.5 Hatay Habib-i Neccar Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023). 15

Şekil 2.6 Hatay Sarımıye Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023). 15

Şekil 2.7 Malatya Ulu Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023). 16

Şekil 2.8 Adıyaman Ulu Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023). 16

Şekil 3.1 (a) Nokta bulutu oluşturmak için lazer tarama prensibi, (b) coğrafi referanslı nokta bulutu (Lopez ve diğerleri, 2018, s. 8). 23

Şekil 3.2 Fotogrametri sonucunda elde edilmiş nokta bulutları (Bastem S., 2021, s. 48) 23

Şekil 3.3 Miras binalarının belgeleme verilerinin ve ilgili veri yakalama araçlarının önerilen kategorizasyonu (Khalil ve diğerleri, 2021, s. 35). 24

Şekil 3.4 YBM Süreçleri (Atabay & Öztürk, 2019, s. 419). 25

Şekil 3.5 YBM Boyutları 3B-8B (Bastem S. , 2021, s. 13). 27

Şekil 3.6 LOD 100 ile 500 arasındaki seviyelerin şematik gösterimleri. 28

Şekil 3.7 Ülkeler ve YBM Standartları (Tekin, 2017, s. 37). 29

Şekil 3.8 Farklı ülkelerde YBM standartlarının kabulü – yazar tarafından çevrilmiş ve düzenlenmiştir (Ganah & Lea, 2021, s. 56). 30

Şekil 3.9 TYBM çalışma aşamaları ve bilgi düzeyi ayrıştırması (Kömürcü & Yıldız, 2021, s. 593). 32

Şekil 3.10 Nokta bulutundan model oluşturma (Bastem S. , 2021, s. 50). 33

Şekil 3.11 Nokta bulutundan Revit programıyla üretilmiş TYBM model ve objeler – Santa Maria Kilisesi (Quattrini ve diğerleri, 2015, s. 370). 33

Şekil 3.12 TYBM yöntemiyle yapının farklı yapım dönemlerini gösterme - Castor and Pollux Tapınağı (Simeone ve diğerleri, 2014, s. 687). 34

Şekil 3.13 Basilica di Collemaggio TYBM modelinde, kuzey duvarı için çalışılmış malzeme ve bozulma analizi: a) plan düzleminde duvar geometrisi b) ortofoto görüntüsü c) 3B ortofoto görüntülere entegre edilmiş 2B malzeme ve çürüme analizi (Brumana ve diğerleri, 2018, s. 561). 35

Şekil 3.14 TYBM Boyutları – yazar tarafından çevrilmiştir (Castellano-Roman & Pinto-Puerto, 2019). 36

Şekil 3.15 TYBM LOK seviyeleri – yazar tarafından çevrilmiştir (Castellano-Roman & Pinto-Puerto, 2019). 37

Şekil 3.16 Vaka çalışmalarında vurgulanan faydalar. 42

Şekil 3.17 Vaka çalışmalarında vurgulanan kısıtlar. 44

Şekil 3.18 Kültürel Miras Yapı Alanlarında "Dijital İkizler" – yazar tarafından çevrilmiştir. (Lucchi, 2023). 49

Şekil 3.19 IoT tabanlı izleme sistemi prensibi (Maksimović & Ćosović, 2019)... 49

Şekil 3.20 Mevcut bir yapıda IoT tabanlı verilerin model ortamına aktarılmasına yönelik veri akış şeması. 53

Şekil 3.21 İvmeölçer Sensörlerinin ve Pozitif Yön Kanallarının Konumları (Vestroni ve diğerleri, 2020, s. 4) 54

Şekil 3.22 Kolezyum'daki sensörlerden örnekler (Wireless Structural Health Monitoring of the Colosseum, 2024). 55

Şekil 3.23 Pisa kulesi sensörleri: a) Telekoordinometre, b)Rüzgar hızı ve yönü, c) Deformemetre (Parola ve diğerleri, 2025). 56

Şekil 3.24 Çoklu Sensör Sistemi (Parola ve diğerleri, 2025). 56

Şekil 3.25 Sensör yerleşim önerisi - yazar tarafından çevrilmiştir (O'Shea & Murphy, 2020). 58

Şekil 3.26 Revit programı içindeki sensör bilgi ekranı (O'Shea & Murphy, 2020). 58

Şekil 4.1 a) İznik Hacı Özbek Camisi, b) Bursa Ulu Cami, c) Edirne Eski Cami, d) Edirne Muradiye Camisi (Benian, 2011, s. 42-43). 62

Şekil 4.2 Mekansal gelişimin soyut modüler geometrisi: Edirne Üçşerefeli, Fatih, Bayezid, Şehzade Camileri (Kuban D. , 2021, s. 258). 64

Şekil 4.3 Dört, altı ve sekiz ayaklı baldaken üzerinde yük aktarım hiyeraşisi gösterimi (Tuluk, 2006'dan uyarlanmıştır). 65

Şekil 4.4 Sinan Paşa Camisi ve altıgen baldaken örneği(solda), Rüstem Paşa camisi ve sekizgen baldaken örneği (sağda) (Kuban D. , 2021, s. 258-259).... 65

Şekil 4.5 Kurtuluş Camisi – Gaziantep (Ataş, 2023). 67

Şekil 4.6 Şeyh Ali Camisi deprem sonrası fotoğrafları (IRCICA, 2023)..... 68

Şekil 4.7 Şeyh Ali Camisi deprem sonrası fotoğrafları (IRCICA, 2023). 69

Şekil 4.8 Minare bölümleri 70
Şekil 4.9 Hatay Sarımıye Camisi minaresi deprem sonrası (IRCICA, 2023). 71
Şekil 4.10 Payas Sokollu Mehmet Paşa Külliyesi deprem sonrası (IRCICA, 2023). 71
Şekil 4.11 Kahramanmaraş Ulu Camisi'nin minaresi yıkılmış ve son cemaat mahali ağır hasar almıştır (TMMOB Mimarlar Odası, 2023). 72
Şekil 4.12 Kılıç Ali Paşa camisi kesiti üzerinde şematik yapısal kırılganlık alanları gösterimi. 74
Şekil 5.1 Kılıç Ali Paşa Külliyesi. 77
Şekil 5.2 Ali Saim Ülgen tarafından hazırlanmış Kılıç Ali Paşa Camisi vaziyet planı (Köroğlu, 2010, s. 23). 78
Şekil 5.3 Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri üstten görünüşü (Köroğlu, 2010). 78
Şekil 5.4 Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri kuzeybatı görünüşü. 79
Şekil 5.5 Beyazid, Süleymaniye, Kılıç Ali Paşa ve Ayasofya planları (Kuban D. , 2021) 80
Şekil 5.6 Kılıç Ali Paşa Camisi plan şeması (Benian, 2011, s. 46). 80
Şekil 5.7 Kılıç Ali Paşa Camisi zemin kat planı (Alioğlu & Köroğlu, 2011, s. 335) 81
Şekil 5.8 Zemin katıı taşıyıcı sistem dilimleri (Alioğlu & Köroğlu, 2011, s. 337) 81
Şekil 5.9 Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat yeri. 83
Şekil 5.10 Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat yeri. 83
Şekil 5.11 Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri ön görünüş. 84
Şekil 5.12 İzleme sistemi veri akış mimarisi. 87
Şekil 5.13 Prototip taşıyıcı kolon modeli. 88
Şekil 5.14 Shared Parameter / Sensor_Status eklenmesi. 89
Şekil 5.15 API / JSON temsili sensör verisi olarak kullanılan CSV dosyası Notepad içeriği. 89
Şekil 5.16 Dynamo ortamına CSV dosyasının çekilmesi ve işlenmesi. 90
Şekil 5.17 Dynamo aracılığıyla CSV dosyasında tanımlı riskli sütunların modelde işlenmesi. 91
Şekil 5.18 CSV dosyasında "Riskli" olarak tanımlı S-02 ve S-04 kolonlarının Revit ID bilgilerinin sağlaması 91
Şekil 5.19 Riskli S-02 kolonunun Revit ID bilgisinin Dynamo ID bilgisi (346586) ile kontrolü 91
Şekil 5.20 Python Dynamo işbirliği ile Revit modeldeki elemanların risk durumuna göre renk değiştirmesi / Uyarı mekanizması. 92

Şekil 5.21 Çatı strüktürü hariç son cemaat yeri Revit modeli görünüşü. 93

Şekil 5.22 Kılıç Ali Paşa Camisi plan ve Ali Saim Ülgen tarafından çizilmiş kesit-Levha No.125 (Orbeyi, 2016). 94

Şekil 5.23 Revit modeli başlıklı mermer kolon elemanı. 94

Şekil 5.24 Kiriş niteliğinde "structural framing" kullanılarak modellenmiş kemer elemanları. 95

Şekil 5.25 Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat bölümü Revit modeli. 96

Şekil 5.26 Analitik Model 98

Şekil 5.27 Sensörler için izleme alanı parametresi tanımlanması 102

Şekil 5.28 Sensör elemanı oluşturulması ve ilgili parametrelerin girilmesi.....105

Şekil 5.29 K1 Kubbe kasnağını izlemek için yerleştirilen ACC sensörü.....106

Şekil 5.30 Senaryo 1 için sensörlerden çekildiği öngörülen verilerin CSV dosyası Notepad içeriği. 106

Şekil 5.31 Senaryo 1 için hazırlanan Dynamo arayüzü. 107

Şekil 5.32 Dynamo aracılığıyla Revit modelde ilgili parametrelere otomatik olarak veri girişi sağlanması. 108

Şekil 5.33 Dynamo ve Python ile alarm sistemi kurulması.....108

Şekil 5.34 Kurulan alarm sisteminin Revit ortamında görsel ifadesi. 109

Şekil 5.35 Çatlak sensörlerinin Revit ortamında yerleşimi. 111

Şekil 5.36 Senaryo 2 için sensörlerden ölçüm zamanlarına göre çekildiği varsayılan verilerin CSV dosyası Notepad içeriği. 112

Şekil 5.37 Senaryo 2 için ölçüm zamanlarına göre geliştirilen Python sistemi. .112

Şekil 5.38 Sensör listesi üzerinde ölçüm zamanlarına göre risk takibi. 113

Şekil 5.39 İlişkilendirilmiş sensör parametreleri. 116

Şekil 5.40 Senaryo 3 için sensörlerden ölçüm zamanlarına göre çekildiği varsayılan verilerin CSV dosyası Notepad içeriği. 117

Şekil 5.41 Senaryo 3 için ölçüm zamanlarına göre geliştirilen Python sistemi. .118

Şekil 5.42 Farklı tarihlere ait verilerin Revit modeldeki sensörlere aktarılması. 119

Şekil 5.43 TYBM tabanlı yapısal sağlık izleme ve risk temelli karar döngüsü. Sensör verilerinin eşik ve korelasyon analizleriyle risk seviyesine dönüştürülerek bakım kararlarına entegre edildiği kapalı sistem yapısı. 122

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Hasar alan camilerin hasar türü ve sayısal oranı (IRCICA verilerine göre hazırlanmıştır). 15

Tablo 3.1 TYBM Boyutları ve Bilgi Seviyeleri (LOK) ilişkisi (Castellano-Roman, vd., 2019'dan uyarlanmıştır). 38

Tablo 4.1 Klasik Osmanlı Cami yapıları için yapısal kırılganlık alanları ile ilişkili izleme elemanları önerileri 73

Tablo 5.1 Planlanan senaryolar ve ilgili sensörlerin yerleşimi 100

Tablo 5.2 Risk Matrisi 121

Tablo A.1 Kullanılan yazılımlar – yazar tarafından Türkçe'ye çevrilmiş ve güncellenmiştir ((Lopez ve diğerleri, 2018). 143

Tablo B.1 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (1-10) 145

Tablo B.2 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (11-20) 146

Tablo B.3 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (21-29) 147

Tablo B.4 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (30-39) 148

Tablo B.5 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (40-50) 149

Tablo B.6 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (51-61) 150

Tablo B.7 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (62-71) 151

Tablo B.8 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (72-82) 152

Tablo B.9 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (83-92) 153

Tablo B.10 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (93-100) 154

ÖZET

Önleyici Koruma Kapsamında Tarihi Yapı Bilgi Modeli Tabanlı İzleme ve Erken Kontrol Sistemi Önerisi

Sezer ORHAN

Mimarlık Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Togan TONG

Bu tez çalışması, miras yapılarının korunmasında "Önleyici Koruma" yaklaşımını destekleyen veri temelli izleme yöntemlerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Geleneksel koruma uygulamaları çoğunlukla hasarın ortaya çıkmasının ardından gerçekleştirilen müdahalelere dayanmaktadır. Bu durum ise yapıların özgün niteliklerinin korunması açısından önemli riskler doğurmaktadır. Bu nedenle, miras yapılarında düzenli yapısal izleme yoluyla önleyici yaklaşımların önemi giderek artmaktadır. Aynı zamanda, sayısal teknolojilerin koruma süreçlerine dahil edilmesi, kültürel mirasın sürdürülebilir biçimde korunmasında önemli bir araştırma alanına dönüşmüştür. Bu çalışmada, Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi, Yapısal Sağlık İzleme ve Nesnelerin İnterneti teknolojilerinin birlikte kullanıldığı bir izleme yaklaşımı metodolojik bir çerçeve olarak kurgulanmıştır. Araştırma TYBM ortamının yalnızca geometrik bir belgeleme aracı olarak değil, sensör verileri ile ilişkilendirilebilen dinamik bir izleme ve değerlendirme arayüzü olarak kullanılabileceği varsayımını doğrulamaktadır. Bu doğrultuda yapılarının geometrik, tipolojik ve yapısal verileri dijital model ortamında temsil edilmiş, sensör verilerinin model elemanlarıyla ilişkilendirilmesine yönelik bir entegrasyon

yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen metodolojinin uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla Mimar Sinan'ın İstanbul'daki son külliyesi Kılıç Ali Paşa Camisi vaka örneği olarak seçilmiştir. Caminin son cemaat yeri TYBM ortamında modellenmiştir. Yapının taşıyıcı sistem özellikleri ve potansiyel deformasyon riskleri dikkate alınarak sensör yerleşim noktaları tanımlanmış, titreşim, çatlak genişliği, sıcaklık ve nem gibi parametrelerin izlenmesine yönelik izleme kurgusu oluşturulmuştur. Geliştirilen prototip modelde sensör verilerinin TYBM ortamına aktarılması Dynamo ve Python tabanlı veri işleme süreci aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Model içerisinde sensör parametreleri tanımlanmış ve veri akışı model elemanları ile ilişkilendirilmiştir. Bu çerçevede üç farklı izleme senaryosu geliştirilmiştir. Bu senaryolar yapının dinamik davranışındaki değişimlerin belirlenmesi, yapısal deformasyonların izlenmesi ve çevresel parametreler ile yapısal davranış arasındaki ilişkinin analiz edilmesi amacıyla kurgulanmıştır. Oluşturulan model aracılığıyla sensör verilerinin dijital model ortamında izlenebildiği ve risk göstergelerinin yapı elemanlarıyla ilişkilendirilebildiği kanıtlanmıştır. Çalışma sonucunda TYBM ortamının sensör verileri ile ilişkilendirilebilen etkin bir izleme arayüzü olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın kültürel miras yapılarında veri temelli değerlendirme süreçlerini destekleyebilecek ve pasif veri yönetimini aktif bir karar destek sistemine dönüştürecek metodolojik bir çerçeve sunduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yapı bilgi modeli, önleyici koruma, risk altındaki kültür mirası, dijital ikiz, yapısal sağlık izleme.

ABSTRACT

An H-BIM Based Monitoring and Early Intervention Framework Within The Context of Preventive Conservation

Sezer ORHAN

Department of Architecture
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Togan TONG

This doctoral study focuses on the development of data-driven monitoring methodologies that support the "Preventive Conservation" approach in the preservation of heritage structures. Conventional conservation practices are predominantly based on interventions carried out after the occurrence of damage, which poses significant risks in terms of safeguarding the authenticity and integrity of historic fabric. For this reason, preventive approaches grounded in the continuous monitoring of structural behavior are gaining increasing importance. In parallel, the integration of digital technologies into conservation processes has emerged as a critical research domain for ensuring the sustainable preservation of cultural heritage. Within this context, the study proposes a methodological framework for a monitoring approach that integrates Historic Building Information Modeling (HBIM), Structural Health Monitoring (SHM), and Internet of Things (IoT) technologies. The study demonstrates that the HBIM environment extends beyond being merely a geometric documentation tool and can function as a dynamic monitoring and evaluation interface associated with sensor data. Accordingly, the

geometric, typological, and structural characteristics of heritage buildings are represented within a digital model environment, and an integration approach is developed to associate sensor-derived data with model components. To evaluate the applicability of the proposed framework, the Kılıç Ali Paşa Mosque, the last külliye designed by Mimar Sinan in Istanbul, was selected as the case study. The *son cemaat yeri* (last prayer hall) was modeled in the HBIM environment as a representative structural component. Considering the structural system characteristics and potential deformation risks, sensor locations were defined, and a monitoring framework was established to track parameters such as vibration, crack width, temperature, and humidity. In the developed prototype model, the transfer of sensor data into the HBIM environment was achieved through a Dynamo- and Python-based data processing workflow. Sensor parameters were defined within the model, and data flows were systematically associated with corresponding building elements. Within this framework, three distinct monitoring scenarios were developed: the identification of changes in dynamic structural behavior, the monitoring of structural deformations, and the analysis of relationships between environmental parameters and structural responses. The results demonstrate that sensor data can be effectively monitored within the digital model environment and that risk indicators can be directly associated with building elements. Consequently, the study establishes that the HBIM environment can serve as an effective monitoring interface integrated with sensor data, and that the proposed approach provides a methodological framework capable of supporting data-driven assessment processes in cultural heritage conservation while transforming passive data management into an active decision-support system.

Keywords: Heritage building information modeling, preventive conservation, cultural heritage at risk, digital twin, structural health monitoring.

1
GİRİŞ

1.1 Giriş ve Genel Yaklaşım

Kültürel miras yapılarının özgün değerlerini koruyarak geleceğe aktarılması, koruma ve bakım süreçlerinin sürekliliği ve niteliği ile doğrudan ilişkilidir. Geleneksel koruma uygulamaları çoğunlukla yapıdaki hasar veya bozulmanın ortaya çıkmasının ardından gerçekleştirilen müdahalelere dayanan reaktif yaklaşımlar olarak gelişmiştir. Ancak bu tür müdahaleler, yapısal sorunların erken aşamada tespit edilememesi nedeniyle miras yapılarının özgün niteliklerinin korunması açısından önemli riskler doğurabilmektedir. Bu nedenle, yapı davranışının düzenli olarak izlenmesine dayalı önleyici yaklaşımlar kültürel mirasın sürdürülebilir korunması açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Son yıllarda sayısal teknolojilerin gelişmesi, kültürel mirasın korunmasına yönelik yeni yöntem ve araçların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu kapsamda mimarlık ve koruma disiplinlerinde yaygınlaşan Yapı Bilgi Modellemesi[1] (YBM) yaklaşımı, tarihi yapılara uyarlanarak Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi[2] (TYBM/HBIM) olarak adlandırılan bir çalışma alanını ortaya çıkarmıştır. TYBM yaklaşımı, miras yapılarına ait geometrik, tipolojik ve yapısal bilgilerin dijital ortamda modellenmesine ve bu bilgilerin disiplinler arası veri yönetimi çerçevesinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bununla birlikte literatürdeki TYBM uygulamalarının büyük ölçüde geometrik belgeleme ve sayısal arşivleme aşamasında yoğunlaştığı görülmektedir. Yapı

[1] Yapı Bilgi Modeli : "Building Information Modeling" kavramının Türkçe karşılığıdır. Tezin geri kalanında YBM olarak ifade edilecektir.

[2] Tarihi Yapı Bilgi Modeli: "Heritage Building Information Modeling" kavramının Türkçe karşılığıdır. Tezin geri kalanında TYBM olarak ifade edilecektir.

davranışına ilişkin ölçüm verilerinin dijital model ortamına entegre edilmesi ve bu verilerin izleme süreçlerinde kullanılması konusunda ise yöntemsel açıdan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu durum, TYBM ortamının yalnızca statik bir belgeleme aracı olarak kullanılmasına yol açmakta ve modelin yapısal davranış verileriyle ilişkilendirilen dinamik bir izleme arayüzüne dönüşmesini sınırlandırmaktadır.

Bu çalışmada, TYBM, YSİ ve Nesnelerin İnterneti teknolojilerinin entegrasyonuna dayanan veri temelli bir izleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen metodolojik çerçevede sensörlerden elde edilen ölçüm verilerinin Dynamo ve Python tabanlı bir veri işleme süreci aracılığıyla TYBM modeline aktarılması ve model elemanlarıyla ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. Bu veri akışı sayesinde TYBM ortamı yalnızca geometrik bir model değil, sensör verileri ile ilişkilendirilebilen bir izleme ve değerlendirme arayüzü olarak kullanılabilmektedir. Bu çalışma, sensör verilerinin TYBM modeline entegrasyonunu sağlayan veri akışı kurgusu ve analiz süreçleri aracılığıyla model ortamında yapısal davranışların izlenmesini mümkün kılan ve TYBM'yi bir karar destek mekanizmasına dönüştüren özgün bir metodoloji önermektedir.

1.2 Amaç, Kapsam, Yöntem

1.2.1 Araştırmanın Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, sensör tabanlı YSİ verilerinin TYBM ortamına entegrasyonunu sağlayan bir veri işleme ve ilişkilendirme kurgusu geliştirerek, TYBM modelinin yapısal davranışın izlenmesine yönelik bir karar destek arayüzü olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktır.

Bu doğrultuda çalışma, sensör verilerinin TYBM modeli ile bütünleştirilmesine yönelik veri akışı, parametre tanımlama ve model - veri eşleştirme süreçlerinin sistematik bir çerçevede kurgulanmasına odaklanmaktadır. Geliştirilen yaklaşım ile sensörlerden elde edilen nicel verilerin model ortamında anlamlı ve yorumlanabilir göstergelere dönüştürülmesi ve bu göstergelerin yapısal davranışın değerlendirilmesinde kullanılabilirliği incelenmektedir.

Araştırma, aşağıdaki temel sorular çerçevesinde yapılandırılmıştır:

- Sensör verilerinin TYBM modeline entegrasyonu, model elemanları ile ilişkilendirilmesi hangi veri işleme ve parametre tanımlama süreçleri ile gerçekleştirilebilir?
- Geliştirilen veri akışı kurgusu, yapısal davranışların izlenmesi açısından ne ölçüde anlamlı ve yorumlanabilir çıktılar üretmektedir?
- Çevresel ve yapısal verilerin birlikte değerlendirilmesi, TYBM ortamının karar destek aracı olarak kullanılabilirliğini hangi koşullar altında ortaya koymaktadır?

Bu çalışma, TYBM ve YSİ entegrasyonunun, miras yapılarında pasif veri yönetimini, yapısal risklerin erken tespitine olanak sağlayan ve müdahale süreçlerini destekleyen veri temelli bir değerlendirme yaklaşımına dönüştürebileceği hipotezi üzerine kurgulanmıştır. Bu bağlamda araştırma, önerilen veri entegrasyonu ve izleme yaklaşımının, sensör verilerini model ortamında anlamlı göstergelere dönüştürme ve yapısal davranışın yorumlanmasına katkı sağlama kapasitesini değerlendirmektedir.

1.2.2 Araştırmanın Kapsamı

Bu çalışma, taşınmaz kültür mirası yapılarında veri temelli izleme yaklaşımlarının geliştirilmesine odaklanmakta olup, kapsamı kavramsal, tipolojik ve uygulama düzeylerinde belirli sınırlar içerisinde tanımlanmıştır.

Tipolojik Kapsam: Araştırma, yığma yapım tekniği ve karmaşık yük aktarım mekanizmaları nedeniyle yapısal davranışın izlenmesi açısından yüksek potansiyele sahip Osmanlı klasik dönem cami mimarisi ile sınırlandırılmıştır. Bu tipoloji, önerilen metodolojik çerçevenin yapısal karakteristikler üzerinden test edilmesi için uygun bir temsil alanı olarak seçilmiştir.

Vaka Çalışması ve Uygulama Ölçeği: Metodolojik kurgunun doğruluğunu test etmek amacıyla İstanbul'daki Kılıç Ali Paşa Camisi vaka örneği olarak belirlenmiştir. Araştırma sensör yerleşimi ve dijital model ile veri eşleştirme süreçlerinin kontrollü bir ölçekte yürütülebilmesi için "Son Cemaat Yeri" mekanı ile sınırlandırılmıştır.

Teknik Kapsam: Çalışmanın teknik sınırı, sensörlerden elde edilen ölçüm verilerinin TYBM ortamına aktarılması ve bu verilerin model elemanlarıyla ilişkilendirilmesine yönelik Dynamo ve Python tabanlı iş akışlarını kapsamaktadır. Bu araştırma, tüm yapı sistemini kapsayan bir dijital ikiz uygulaması sunmaktan ziyade, sensör verilerinin model ortamında anlamlı göstergelere dönüştürülmesine yönelik yaklaşımın uygulanabilirliğini ortaya koyan bir kavram kanıtı niteliğindedir.

Bu bağlamda geliştirilen model, tek bir yapının belirli bir bölümüne odaklanarak kurgulanmış olmakla birlikte, taşınmaz kültür mirası yapılarında uygulanabilecek veri temelli izleme yaklaşımlarına yönelik genellenebilir bir metodolojik şablon sunmaktadır. Bu şablonda izleme bölgesinin tanımlanması, sensör yerleşim stratejilerinin belirlenmesi, dinamik veri akışı kurgusunun oluşturulması ve verilerin TYBM elemanları ile ilişkilendirilerek anlamlı değerlendirme göstergelerine dönüştürülmesi aşamalarını kapsamaktadır. Bu metodolojik yaklaşımın geçerliliği, seçilen örnek alan üzerinde yapılan uygulamayla doğrulanmıştır. Çalışma, farklı yapı tipleri ve koruma senaryoları için ölçeklenebilir ve uyarlanabilir bir metodolojik temel sunmaktadır.

1.2.3 Araştırmanın Yöntemi

Bu çalışmanın metodolojisi, literatür analizi, kavramsal çerçeve tasarımı ve metodolojik kurgunun bir vaka örneği üzerinden doğrulanması olarak üç temel aşamadan oluşmaktadır.

Literatür Analizi ve Kavramsal Çerçevenin Belirlenmesi: Çalışmanın ilk aşamasında, uluslararası TYBM uygulamalarının sağladığı olanaklar, karşılaşılan teknik kısıtlar ve risk temelli uygulama yaklaşımları analitik olarak değerlendirilmiştir. Bu incelemeler sonucunda, önleyici koruma odaklı TYBM çerçevesinin temel bileşenleri ve veri entegrasyon gereksinimleri tanımlanmıştır.

Metodoloji ve İş Akışı: Çalışmada statik modelleri dinamik izleme arayüzlerine dönüştüren bir iş akışı geliştirilmiştir. Bu akış izleme bölgelerinin yapısal risk analizleri doğrultusunda belirlenmesi, IoT tabanlı veri toplama kurgusunun oluşturulması ve bu verilerin Dynamo ve Python tabanlı algoritmalar aracılığıyla TYBM parametrelerine aktarılması süreçlerini kapsamaktadır.

Vaka Çalışması ve Doğrulama: Önerilen yöntemin geçerliliğini test etmek amacıyla, Osmanlı klasik dönem cami mimarisinin strüktürel karmaşıklığını temsil eden Kılıç Ali Paşa Camisi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Yapının yük aktarım mekanizması açısından kritik öneme sahip bileşenleri (minare, kubbe kuşakları vb.) "öncelikli izleme bölgeleri" olarak tanımlanmış, yöntemin doğrulanması ise bu karmaşık sistemin bir parçasını oluşturan son cemaat yeri modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Veri Analizi ve Risk Tahmini: İzleme sürecinden elde edilen veriler, yapısal davranış şekillerinin çözümlenmesi amacıyla değerlendirilmiştir ve TYBM arayüzünde anlamlandırılması amacıyla değerlendirilmiştir. Geliştirilen bu metodolojik çerçeve, elde edilen verilerin ileride Makine Öğrenmesi[3] algoritmalarıyla işlenebilmesine olanak tanıyacak bir veri yapısı sunmaktadır. Bu bağlamda çalışma, sensör verilerini modelle ilişkilendirerek, gelecekteki risk tahmin algoritmalarına temel oluşturacak dinamik bir karar destek katmanı kurgulanmıştır. Böylelikle önerilen model, sadece mevcut durumu izlemekle kalmayarak, ileri veri analizi yöntemlerine entegre edilebilir proaktif bir koruma altyapısı ortaya koymaktadır.

[3] Makine Öğrenmesi – Machine Learning (ML): Makine öğrenimi, eğitim verilerinin kalıplarını "öğrenebilen" ve ardından yeni veriler hakkında doğru *çıkarımlar* yapabilen algoritmalara odaklanan yapay zekânın (YZ) bir alt kümesidir . Bu kalıp tanıma yeteneği, makine öğrenimi modellerinin açık ve kodlanmış talimatlar olmadan kararlar almasını veya tahminlerde bulunmasını sağlar (IBM, 2025).

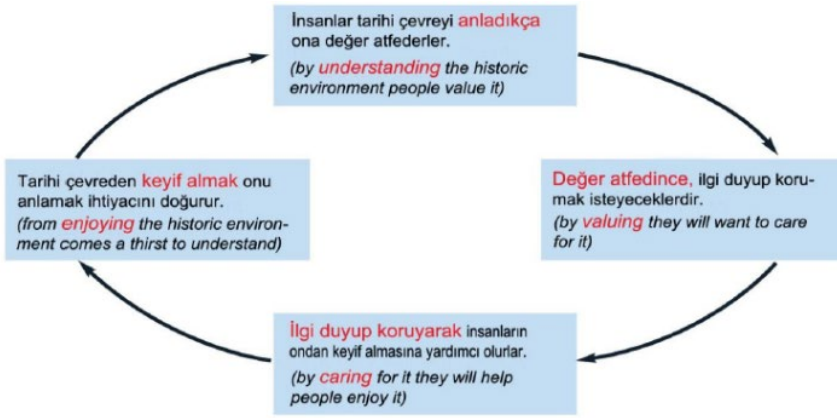
2
KORUMA KAVRAMI ve ÖNLEYİCİ KORUMA YAKLAŞIMI

2.1 Koruma Kavramının Tanımı ve Gelişimi

Kültür varlıklarının korunması, yapının fiziksel formunun yanı sıra taşıdığı estetik, tarihsel ve kültürel değerlerin gelecek nesillere ulaştırılmasını hedefleyen stratejik müdahaleler bütünüdür. Bu süreç, belgeleme, periyodik bakım ve yapısal izleme gibi teknik operasyonları bünyesinde barındıran disiplinler arası bir yapıyı gerektirir. Mimariden sosyolojiye, mühendislikten sanat tarihine kadar geniş bir uzmanlık yelpazesini gerektiren bu faaliyetler, aynı zamanda yasal mevzuat ve idari denetim mekanizmalarıyla (koruma kurulları, yerel idareler vb.) şekillenmektedir. Bu yönüyle modern koruma pratiği, farklı aktörlerin birlikte hareket ettiği karmaşık bir yönetim modeli olarak ele alınmaktadır.

Koruma kavramı, zaman içerisinde fiziksel müdahalelerle sınırlı bir yaklaşım olmaktan çıkmış, sürdürülebilirlik, risk yönetimi ve bütüncül koruma ilkeleri doğrultusunda yeniden tanımlanmıştır. Günümüzde koruma anlayışı, yapıların mevcut durumlarının korunmasının ötesinde değişen çevresel ve yapısal koşullara karşı dirençli hale getirilmesini de kapsamaktadır. Bu bağlamda koruma, süreklilik gerektiren ve zaman içinde güncellenen bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Bu noktada korumanın sürekliliğinden bahsedebilmek için mirasın bulunduğu toplum tarafından anlaşılması, sahiplenilmesi ve toplumsak koruma bilincinin de oluşturulması gereklidir. Özetle, toplumsal farkındalık koruma sürecinin önemli bir parçasıdır. Toplum tarafından değer görmeyen bir miras yapısının zamanla işlevsizleşerek yıkılma riskiyle karşı karşıya kalacağı görülmektedir[4] (Şekil 2.1).

[4] Şekil 2.1: İngiliz sanat tarihçisi Simon Thurley' nin English Heritage için stratejik program olarak sunduğu kültür mirası koruma döngüsü.



Şekil 2.1 Kültür mirasını koruma döngüsü (Önge, 2020).

Kültürel miras ise geçmişten günümüze ulaşan ve toplumların kimliğini oluşturan somut ve somut olmayan değerlerin bütünü olarak ele alınmaktadır (Mimari Mirası Koruma Bildirgesi, 2013). Bu kapsamda mimari miras, kültürel mirasın önemli bir bileşeni olarak, fiziksel varlıkların yanı sıra tarihsel bilgi ve yapısal özellikleri de içeren çok katmanlı bir yapı sunmaktadır.

Miras kavramının bir diğer başlığı ise uluslararası tüzüklerle de çerçevesi belirlenmiş olan "sayısal miras" tır.

Sayısal miras, Uluslararası koruma literatüründe kullanımı yaygınlaşan bir kavram olarak, kültürel varlıkların dijitalleştirilmesi sonucu ortaya çıkan veya doğrudan sayısal platformlarda üretilmiş olan bilgi varlıklarının tümü olarak kabul edilmektedir (Töre, 2018, s. 1). UNESCO (2003) Sayısal Mirasın Korunması Tüzüğü bu verilerin dijital ortamda sürdürülebilir biçimde korunmasının önemine işaret etmektedir.

Kültürel miras çalışmalarında mevcut mirasın üç boyutlu olarak sayısallaştırılması, bozulmuş kısımlarının tamamlanması için model üretilmesi, geleneksel koruma yöntemlerinin devamı olarak üretilen bu üç boyutlu görselleştirmelerin benzeri amaçlarla daha önceden üretilen 2 boyutlu belgeleme tekniklerine göre üstünlüğü sebebiyle, koruma alanında sayısal teknolojiler yaygın kullanım alanına sahip hale gelmiştir (Töre, 2018, s. 10).

Bu kapsamda, kültürel mirasın korunması sürecinde dijital teknolojilerin kullanımı giderek önem kazanmıştır. Sayısal ortamlarda üretilen ve saklanan veriler, yapıların belgelenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesi açısından önemli olanaklar

sunmaktadır. Özellikle üç boyutlu modelleme ve sayısal veri üretim teknikleri, yapıların mevcut durumlarının doğru ve bütüncül biçimde kayıt altına alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu gelişmeler, koruma süreçlerinin yalnızca geçmişe yönelik bir belgeleme faaliyeti olmaktan çıkarak, veri temelli ve sürekli güncellenebilir bir yapıya dönüşmesine zemin hazırlamaktadır.

Literatürde yer alan koruma tanımları, korumanın yalnızca fiziksel müdahalelerle sınırlı olmayan, süreklilik gerektiren bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Kültürel mirasın yaşam döngüsü bağlamında ele alınması, koruma eyleminin sürekliliği ve sürdürülebilirliğini bir gereklilik haline getirmektedir. Bu kapsamda, yapıların mevcut durumlarının kayıt altına alınması, elde edilen verilerin sistematik biçimde dokümante edilmesi, arşivlenmesi ve zaman içinde güncellenebilmesi önem kazanmaktadır. Kültürel mirasın sürdürülebilir kalkınma gündemi ile ilişkilendirilmesi ise, Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında ilan edilen "Gündem 2030" belgesi ile uluslararası ölçekte kurumsal bir çerçeveye kavuşturulmuştur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve 11/4[5] "Kültürel Miras ve Sürdürülebilirlik" Logosu (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar, 2026).

[5] Küresel Amaçlar 11/4: Dünya kültürel ve doğal mirasının korunması ve gözetilmesi çabalarının artırılması (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar, 2026).

Bu gelişmelere paralel olarak, kültürel miras çalışmaları da diğer disiplinlerde olduğu gibi giderek dijital ortamlarda yürütülmeye başlanmıştır. Sayısal teknolojilerin sağladığı olanaklar, koruma disiplininde hem kuramsal hem de uygulamaya yönelik yeni yöntemlerin gelişmesini mümkün kılmıştır. Nitekim çağdaş koruma ilkeleri bağlamında uluslararası bir metin olan 1964 tarihli Venedik Tüzüğü'nün 2 ve 10 nolu[6] maddeleri, kültürel mirasın korunması ve restorasyon süreçlerinde çağdaş teknolojilerin izlenmesi ve kullanılması gerekliliğine vurgu yapmaktadır.

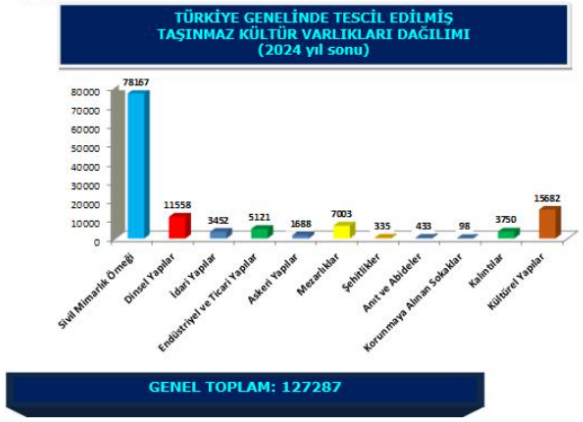
2.2 Risk Altındaki Kültür Mirası

"Risk Alındaki Kültür Mirası" kavramı, doğa ve insan kaynaklı tehditler, savaş veya çatışmalar, terörizm, büyük ölçekli altyapı ve kentsel projeler, kitle turizmi ve uygunsuz müdahaleler gibi etkenler nedeniyle zarar görme veya yok olma tehlikesi altında olan kültür ve tabiat varlıklarını ifade etmektedir. Bu bağlamda koruma, yalnızca fiziksel müdahalelerle sınırlı bir eylem olarak değil, taşınmaz kültür mirası yapılarının maruz kaldığı risklerin tanımlanması, değerlendirilmesi ve yönetilmesini içeren bütüncül bir süreç olarak ele alınmaktadır.

Kültür ve Turizm Bakanlığı verilerine göre, Türkiye genelinde korunması gerekli **127.287** adet taşınmaz kültür varlığı bulunmaktadır. Bu veriler 2024 yılı sonu itibariyle güncellenmiştir (Şekil 2.3). Türkiye'nin kültürel miras kapasitesi, karmaşık jeolojik yapısı, aktif tektonik zonları ve hızla değişen sosyo-ekonomik dinamikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, kültürel mirasın doğal ve insan kaynaklı afetler karşısında yüksek düzeyde risk altında bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, kültürel mirasın korunmasında yalnızca müdahale odaklı yaklaşımların yeterli olmadığını ve risklerin önceden belirlenmesine yönelik sistematik yöntemlere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

[6] ICOMOS Venedik Tüzüğü (Ahunbay Z. , 2019).
Madde 2: Anıtların korunması ve onarımı için, mimari mirasın incelenmesine ve korunmasına yardımcı olabilecek bütün bilim ve tekniklerden yararlanılmalıdır.
Madde 10: Geleneksel tekniklerin yetersiz kaldığı yerlerde, koruma ve inşa için bilimsel verilerle ve deneylerle geçerliliği saptanmış herhangi çağdaş bir teknik kullanılarak anıt sağlamlaştırılabilir.

TÜRKİYE GENELİNDE TESCİLLİ TAŞINMAZ KÜLTÜR VARLIKLARI (2024 yıl sonu)	TAŞINMAZ SAYISI
Sivil Mimarlık Örneği	78167
Dinsel Yapılar	11558
İdari Yapılar	3452
Endüstriyel ve Ticari Yapılar	5121
Askeri Yapılar	1688
Mezarlıklar	7003
Şehitlikler	335
Anıt ve Abideler	433
Korunmaya Alınan Sokaklar	98
Kalıntılar	3750
Kültürel Yapılar	15682
TOPLAM	127287



Şekil 2.3 2024 yılı sonu itibariyle Türkiye genelindeki korunması gerekli taşınmaz kültür varlığı istatistiği (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2026).

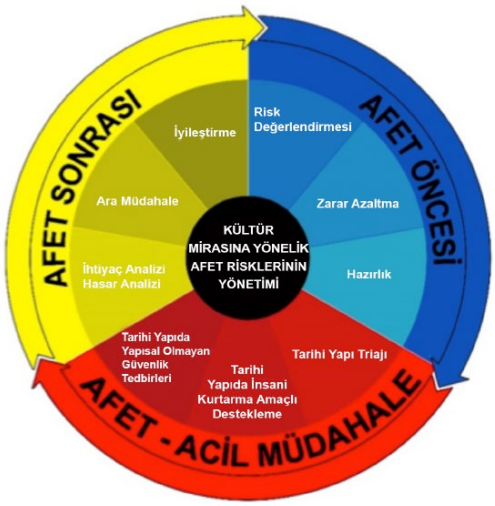
ICOMOS' un ülkeler bazında yaptığı risk altındaki kültürel miras araştırmalarına göre, miras öğelerine en fazla hasar yaratan risklerin:

- Deprem, sel, yangın, toprak kayması gibi doğal afetleri
- Savaş, vandalizm, terörizm gibi insan yapısı afetler,
- Düzenli bakım eksikliği,
- Ekonomik ve sosyal değişimin etkileri,
- Yetersiz koruma standartları veya kontrolsüz uygulamalar,
- Turizm kaynaklı hasarlar
- İklim değişikliği gibi nedenlerden kaynaklandığı görülmektedir (Oktay ve diğerleri, 2020, s. 313).

Uluslararası ölçekte afet risklerinin kültürel miras üzerindeki etkilerine yönelik geliştirilen yaklaşımlar, risk yönetiminin yalnızca afet sonrası müdahalelerle sınırlı kalmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede ***UNESCO Afet Risk Yönetimi Rehberi,*** kültürel mirasın korunmasına yönelik afet risk yönetiminde aşağıdaki temel ilkeler benimsenmektedir:

- Gelişmiş bir hazırlık ve planlama yapılması,
- Planlama yapılırken kültür varlıklarının somut ve somut olmayan tüm boyutlarıyla bir bütün olarak ele alınması,
- Kültürel mirasın değerlerine en az etkide bulunacak önlemlerin alınması,
- Kültür mirasında risk yönetiminin geçmişte yaşadığı risklere yönelik performansı dikkate alınarak yapılması,
- Bakım ve onarım programlarında risk altındaki mirasın öncelikli olması,
- Acil önlem planlarında kullanıcıların doğrudan yer alması,
- Acil durumlarda kültür varlığı unsurlarının korunmasının öncelikli olması,
- Afet sonrasında kültür varlığının iyileştirilmesi ve onarılmasında gerekli her türlü tedbirin alınması,
- Koruma ilkelerinin her aşamada risk planlama, karşılık verme ve iyileştirme çalışmalarıyla bütünlüklü olması, ana yaklaşım prensipleri olarak kabul edilmektedir.

Bu bağlamda kültürel mirasın korunması, afet öncesi risklerin belirlenmesi, hazırlık ve zarar azaltma çalışmaları, afet sırasında müdahale ile afet sonrasında iyileştirme ve yeniden hazırlık aşamalarını kapsayan döngüsel bir süreç olarak ele alınmaktadır. ICORP tarafından önerilen afet yönetim döngüsü hazırlık, zarar azaltma, müdahale, iyileştirme ve yeniden hazırlık aşamalarından oluşmaktadır (Kültür Varlıklarına Yönelik Afet Risklerinin Yönetimi, 2019, s. 16).



Şekil 2.4 Kültür mirasına yönelik bütünleşik afet risklerinin yönetimi döngüsü (Kültür Varlıklarına Yönelik Afet Risklerinin Yönetimi, 2019).

Türkiye'de kentlerin tarihsel karakterlerini korumak amacıyla yapılan bilinçli çabalar, 1960'lı yılların ikinci yarısında başlatılmıştır. 1970'li yılların başında 1710 sayılı Eski Eserler Yasası etkin olmuştur. Kültürel mirasın korunmasına ilişkin yasal zemin 1983 yılında yürürlüğe giren 2863 sayılı "Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu" ile oluşturulmuştur. 2004 yılı sonrası yapılan değişikliklerle 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu ile tanımlanan koruma süreci taşınmaz kültür varlıkları ve tarihi çevrelerin;

- Yasal olarak koruma statülerinin belirlenmesini (tespit-tescil, hak ve kısıtlamalar),
- Belgeleme, projelendirme ve planlama çalışmalarının yapılmasını (rölöve, restitüsyon ve restorasyon projeleri, KAİP[7], yönetim planları),
- Koruma, bakım, onarım uygulamalarının gerçekleşmesini (yapı esasları, nakil)
- Tüm aşamaların yönetimsel boyutu (yetki, ödenek vb.) ve yaptırımların tanımlanmasını kapsamaktadır (Oktay ve diğerleri, 2020, s. 315).

2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu:

Bu kanun, kültürel miras varlıklarının korunmasını esas almakla birlikte, afet risk analizleri konusunda kapsamlı bir yönlendirme sunmamaktadır. Özellikle koruma amaçlı imar planlarının hazırlanması sürecinde risk değerlendirmelerinin nasıl ele alınacağına dair açık ifadeler bulunmamaktadır.

- Yapıların afetlere karşı dayanıklılığına dair spesifik değerlendirme kriterleri belirlenmemiştir.
- Deprem, sel veya yangın gibi afet türlerine yönelik bilimsel temelli analiz süreçleri detaylandırılmamıştır.

2863 sayılı kanuna ilave olarak 5366 sayılı Yenileme Kanunu, kültürel mirasların korunmasına yönelik yasal düzenlemeler sunmaktadır. Ancak bu düzenlemeler, kültür mirası alanlarında afet risk analizlerinin zorunluluğunu net bir çerçeveyle belirlenmiş değildir. 2863 sayılı kanun, koruma amaçlı imar planlarında risk değerlendirmelerine atıfta bulunsa da, uygulamada afet risk analizlerinin nasıl yapılacağına dair bir metodoloji tanımlamamaktadır. 5366 sayılı kanun ise

[7] KAİP: Koruma Amaçlı İmar Planı.

yenileme alanlarının belirlenmesi sürecinde afet risklerinin dikkate alınmasını öngörmekle birlikte, afet risk analizlerini zorunlu kılmamaktadır. Dolayısıyla, Türkiye'deki mevcut yasal çerçeve, kültürel miras alanlarında afet risk analizlerinin sistematik ve bağlayıcı bir şekilde yapılmasına imkan vermemektedir.

5366 Sayılı Yenileme Kanunu ve Yönetmeliği:

Bu kanun, temel olarak yenileme alanlarının oluşturulmasını düzenlemektedir ve kültürel mirasın afet riskleri karşısında korunmasına yönelik bazı hükümler içermektedir. Ancak bu hükümler, afet risk analizlerinin nasıl yapılması gerektiğine dair metodolojik bir çerçeve sunmamaktadır.

Tüm bu değerlendirmeler, kültürel mirasın korunmasına yönelik mevcut yaklaşımların, risklerin erken aşamada tespit edilmesi ve yapı davranışlarının süreklilik içinde izlenmesi konusunda yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu durum, yalnızca müdahale odaklı değil, aynı zamanda veri üretimi, izleme ve analiz süreçlerini içeren bütüncül ve dinamik bir koruma yaklaşımına ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3 Türkiye'de Kültür Mirasını Tehdit Eden Riskler: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Örneği

Türkiye'nin kültürel miras alanları, karmaşık jeolojik yapısı, aktif tektonik zonları ve hızla değişen sosyo-ekonomik dinamikleri nedeniyle çok boyutlu tehditlerle karşı karşıyadır. Bu tehditler yalnızca doğal afetlerle sınırlı kalmayıp, insan kaynaklı tahribat, teknik uygulama eksiklikleri, yönetimsel zafiyetler ve iklim değişikliğinin artan etkileriyle daha da derinleşmektedir.

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkez olmak üzere yaşanan ve 11 ilde ağır hasara yol açan deprem felaketinde, taşınmaz kültür envanterinin büyük kısmının ağır hasar almış veya bütünüyle yok olmuştur. TMMOB Mimarlar Odası'nın bölgede yürüttüğü hasar tespit çalışmaları sonucunda, tarihi kent merkezlerindeki dini yapılar, kamu ve savunma yapıları gibi anıtsal kültür varlıklarının yanı sıra birçok sivil mimarlık yapısının da ciddi şekilde zarar gördüğü ve bazı yapıların yıkıldığı belirlenmiştir. Türkiye'nin ulusal kültür varlıkları envanteri henüz tamamlanmamış olduğu için ve özellikle kırsal mimarlık örnekleri ile ilgili tescil kayıtlarının sınırlı olmasından ötürü, yaşanan kaybın gerçek boyutunun anlaşılması zordur (TMMOB Mimarlar Odası, 2023, s. 60). İncelenen

saha raporlarında, depremden etkilenen 11 ildeki tarihi camilerin yarısından fazlasının ağır hasar aldığı ya da tamamen yıkıldığı görülmektedir (IRCICA, 2023).

Yakın tarihlerde onarım görmüş pek çok anıt eserin depremin yıkıcı etkisine dayanamadığı tespit edilmiştir. Bu durumun yanı sıra yıllara dayalı ihmal ve bakımsızlık nedeniyle depreme daha kırılgan şekilde yakalanan sivil mimarlık eserlerinde büyük boyutlu yıkımların gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum kültür varlıklarının korunmasında "sürekli bakımın" önemini bir kez daha göstermektedir. Öte yandan daha çok "Dünya Mirası" alanlarının korunmasında kurumlar arasında koordinasyon ve eşgüdümü sağlamak üzere hazırlanan yönetim planlarında afet risklerine hazırlık ve acil müdahalelere ilişkin tanımlanan eylemlerin gereğinin yerine getirilemediği ve pek çok kültür mirasının özellikle depremin ertesindeki ilk günlerde savunmasız bırakıldığı gözlenmiştir (TMMOB Mimarlar Odası, 2023, s. 60).

Hasar görmüş yapı grupları içerisinde yer alan tarihi camiler, hem strüktürel organizasyonları hem de sürekli kullanım durumları nedeniyle afetlere karşı en yüksek risk taşıyan tipolojiler arasında yer almaktadır. Saha gözlemleri ile hasar tespit raporları, camilerdeki tahribatın çoğunlukla belirli yapısal elemanlarda yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Özellikle minare gövdeleri, kubbe-kasnak geçiş bölgeleri, ayaklar ve payandalar deprem etkisiyle en fazla zarar gören unsurlar arasında bulunmaktadır. Bu bulgular, camilerde oluşan hasarın tesadüfi olmadığını, aksine yapısal tipolojiden kaynaklanan davranışlara bağlı olarak geliştiğini göstermektedir.

Minareler, ince ve uzun yapıları nedeniyle yatay sismik yüklere karşı genellikle yeterli dayanıklılık göstermez. Bu tür yapılarda yatay yüklere karşı dayanımın düşük olmasının başlıca sebebi, yığma yapıların çekme gerilmelerine karşı yeterince dirençli olmamasıdır (Soyluk & Demircan, 2023, s. 334).

Büyük camilerde ana örtü sistemleri tamamen çökmüş veya kasnak seviyesinden ağır hasar almıştır. İlaveten, geçmiş onarımlarda yapılan betonarme müdahalelerin, yığma sistemle birlikte çalışmaması ve hasarı artırdığı da raporlanmıştır (IRCICA, 2023, s. 14).

IRCICA tarafından hazırlanan raporda Hatay'da 13, Kilis'te 11, Gaziantep'te 12, Şanlıurfa'da 5, Adıyaman'da 6, Diyarbakır'da 2, Malatya'da 7, Kahramanmaraş'ta

18 ve Osmaniye'de 1 olmak üzere, toplamda 69 cami hasar almış ya da yıkılmış olarak tespit edilmiştir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Hasar alan camilerin hasar türü ve sayısal oranı (IRCICA verilerine göre hazırlanmıştır).

Hasar Kategorisi	Hasar Tanımı	Yüzde
I	**Yüzeysel / Hafif Hasarlı** (Önemsiz yapısal hasar, çökme riski yok)	%15.71
II	**Durumu Stabil / Orta Hasarlı** (Kısmi yapısal hasar, genel olarak stabil kabul edilir)	%21.43
III	**Durumu Stabil Değil / Ağır Hasarlı** (Orta yapısal hasar, ciddi riskler tanımlar)	%12.86
IV	**Geri Döndürülemez / Çok Ağır Hasarlı** (Ağır yapısal hasar, özgün karakteristiklerin tespiti zorlaşmıştır)	%40.00
V	**Bütünüyle Çökmüş / Yıkılmış** (Yapının tamamen veya büyük kısmının çöktüğü durum)	%10.00



Şekil 2.5 Hatay Habib-i Neccar Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023).



Şekil 2.6 Hatay Sarımıye Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023).



Şekil 2.7 Malatya Ulu Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023).



Şekil 2.8 Adıyaman Ulu Camisi (TMMOB Mimarlar Odası, 2023).

Yıllara yayılan ihmal ve yetersiz bakım nedeniyle sivil mimari örneklerinin depreme karşı artan kırılganlığı sonucunda ciddi ölçekte yıkımlar gözlenmiştir. Bu durum, kültür varlıklarının korunmasında "sürekli bakım" ilkesinin afetlere dirençlilik açısından temel bir unsur olduğunu açıkça göstermektedir.

Araştırma sonuçları, anıtsal camilerde yapısal riskin yalnızca afet sonrası yapılan hasar tespitlerine dayanarak değerlendirilmesinin yeterli olmadığını göstermektedir. Özellikle, bazı yapı elemanlarında zamanla oluşan deformasyonların ve davranış değişikliklerinin düzenli olarak izlenmesine dayalı önleyici yaklaşımların gerekli olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır. Yapı tipine özel hasar senaryolarının belirlenmesi, izleme noktalarının seçimi ve müdahale

eşiklerinin oluşturulması alanında yapılan değerlendirmeler önemli bir çerçeve sunmaktadır. Bu kapsamda, sensör temelli izleme sistemlerinin Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM) ile entegre edilmesi, anıtsal camilerdeki risklerin erken aşamada tespit edilmesini sağlayan tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmektedir.

Öte yandan, yetersiz restorasyon uygulamaları, mevzuatın eksik ya da tutarsız şekilde uygulanması, tescilli kültür varlıkları envanterinin tamamlanmamış olması ve önleyici koruma mekanizmalarının gelişmemesi gibi faktörler, doğal afetler karşısında kültürel mirasta geri dönüşü olmayan kayıpların meydana gelmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle, kültürel mirasın korunmasına ilişkin stratejilerin envanter hazırlama ve tescil süreçleriyle sınırlı tutulmaması; afet risk analizlerine dayalı entegre yönetim planlarını, yapısal güvenliğin değerlendirilmesini, dijital tabanlı risk senaryolarını, düzenli izleme ve bakım protokollerini, yerel ve toplumsal kapasiteyi güçlendiren katılımcı müdahale modellerini kapsayan çok yönlü ve disiplinler arası bir koruma yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir.

2.4 Önleyici Koruma: Kavram ve Yaklaşım

Önleyici koruma, kültürel mirasın gelecekte bozulmasını veya kaybını engellemek için dolaylı önlemler ve uygulamalar içeren disiplinler arası bir yaklaşımdır. Taşınmaz kültür mirasının fiziksel, yapısal ve çevresel tehditlere karşı uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamayı amaçlayan bu yaklaşım, müdahale öncesi risk temelli stratejilere dayanan proaktif bir model sunar. Günümüzde miras yapılarının fiziksel ve tarihsel bütünlüğünün korunmasına yönelik artan ihtiyaçlar doğrultusunda, önleyici koruma hasar ortaya çıkmadan önceki riskleri kontrol altına almaya odaklanan bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Geleneksel restorasyon uygulamalarından farklı olarak önleyici koruma, müdahalenin kendisinden ziyade potansiyel risklerin henüz gerçekleşmeden önce değerlendirilmesini esas alır. Yapıya fiziksel müdahalede bulunmadan önce risklerin sistematik biçimde analiz edilmesi ve bu risklere yönelik planlı koruma önlemlerinin geliştirilmesi, hem müdahale sıklığını azaltmakta hem de kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle önleyici koruma,

periyodik bakım, izleme ve erken müdahale mekanizmaları aracılığıyla kültürel mirasın sürekliliğini sağlamayı amaçlayan sürdürülebilir bir koruma yaklaşımıdır.

Önleyici koruma yaklaşımlarının kuramsal çerçevesi, akademik çalışmaların yanı sıra uluslararası kurumlar tarafından geliştirilen ilke ve politikalarla şekillenmiştir. Bu kapsamda, 2007'de kurulan UNESCO Kürsüsü (PRECOM³OS-UNESCO Chair on Preventive Conservation, Monitoring and Maintenance of Monuments and Sites - Önleyici Koruma, Anıt ve Sitlerin İzlenmesi ve Bakımı UNESCO Kürsüsü) önleyici koruma çalışmalarına yönelik araştırmaların ve işbirliklerinin artırılması yönündeki çalışmaları tüm dünya genelinde teşvik etmeyi hedeflemektedir. PRECOM³OS, önleyici koruma çalışmalarının modeli olarak 2003 tarihli ICOMOS Tüzüğü'nü (Mimari Mirasın Analizi, Korunması ve Strüktürel Restorasyonu İçin İlkeler - Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage) temel almaktadır (Pekmezci, 2018, s. 16).

Literatürde önleyici korumanın temel bileşenleri ***"Risk Yönetimi, Toplumsal Katılım, İzleme ve Belgeleme"*** başlıkları altında ele alınmaktadır. Risk yönetimi, tehditlerin tanımlanması, analiz edilmesi ve azaltılmasını kapsayarak önleyici korumanın temelini oluşturmaktadır. Toplumsal katılım, koruma sorumluluğunun yerel paydaşlarla paylaşılmasını sağlayarak sürecin sürdürülebilirliğini güçlendirmektedir. İzleme ve belgeleme ise, analiz, teşhis, müdahale ve kontrol aşamalarını kapsayan sürekli bir sistem aracılığıyla koruma sürecinin dinamik ve güncel tutulmasını sağlamaya çalışmaktadır (Van Balen, 2017).

Bu yönetsel izleme çerçevesinin ötesinde, son yıllarda önleyici koruma yaklaşımları teknolojik olarak Yapısal Sağlık İzleme[8] sistemleriyle derinleşmiştir. Bu sistemler, yapıların taşıyıcı elemanlarında meydana gelen bozulmaları erken aşamada tespit edebilme özelliği sayesinde, önleyici koruma stratejilerinin önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Sensör tabanlı izleme uygulamaları aracılığıyla çatlak oluşumlar ve genişlemeleri, deformasyonlar, oturmalar ve titreşim davranışları sürekli olarak izlenebilmektedir. Bu veriler yalnızca mevcut durumun değerlendirilmesine değil, aynı zamanda gelecekte oluşabilecek risk senaryolarının öngörülmesini de sağlamaktadır.

[8] Yapısal Sağlık İzleme / YSİ : Structural Health Monitoring / SHM

Görsel tespitler, titreşim ölçümleri, lazer tarama, ultrasonik testler, GPR ve fiber optik sensörler gibi tahribatsız test yöntemleri, yapının hem yüzey hem de iç yapısındaki sorunların nicel biçimde analiz edilmesini sağlar. Bu izleme yaklaşımı, yüksek çözünürlüklü sensör sistemleri, yapısal dinamik veri analitiği, tahribatsız test yöntemleri ve makine öğrenimi destekli teşhis algoritmalarını içeren bütüncül bir teknolojik çerçeve içinde ele almaktadır. Bu sistemler gerçek zamanlı veri üretme kapasitesine sahiptir ve mühendislik temelli risk analizlerine olanak tanır. YSI sistemleri yalnızca taşıyıcı sistem bileşenlerine değil malzeme düzeyindeki (nem etkisi, tuz kristalizasyonu, çürüme vb.) bozulmalara da odaklanarak fiziksel hasarların erken tespitinde etkin rol oynar. Bu yaklaşım, kültürel mirasın yapısal ve malzeme bütünlüğünün korunmasında entegre bir izleme ve teşhis imkanı sunar (Chik ve diğerleri, 2024).

Önleyici koruma çerçevesinde risk değerlendirmesi, geçmiş müdahalelerin yapısal etkilerinin analiz edilmesini ve mevcut durumun statik ve dinamik yöntemlerle yorumlanmasını içermektedir. Güncel dijital araçlar, özellikle yapay zeka destekli analizler, algoritmik modelleme ve otomasyon sistemleri aracılığıyla belgeleme süreçlerini hızlandırmakta ve nesnel karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ancak önleyici koruma uygulamalarında çeşitli zorluklar bulunmaktadır:

- Miras yapılarının katmanlı yapısının değerlendirilebilmesi için detaylı analizler gereklidir.
- Belgelerin uzun vadede erişilebilir ve güncellenebilir olması gereklidir.
- Farklı kaynaklardan sağlanan bilgilerin entegrasyonunda süreçlerin dikkatle yönetilmesi gerekmektedir (Van Balen, 2017, s. 716).

Türkiye özelinde önleyici korumanın uygulanabilmesi adına literatürde üç aşamalı bir yaklaşım önerilmektedir:

Hazırlık Aşaması: Eserlerin mevcut durumlarının ayrıntılı olarak yapı hasar tespit belgelerine kaydedilmesi ve yapı elemanlarının birden beşe kadar güvenlik seviyelerinin oluşturulması.

İzleme Aşaması: Eserlerin hasar durumuna ve enderlik derecelerine göre izleme aralığı belirlenmesi, düzenli aralıklarla hasar durumlarındaki değişimlerin takip edilmesi.

Müdahale Aşaması: Tehlike seviyesi birinci derece olan yapı elamanları tespit edilerek anında müdahale sisteminin uygulanması şeklindedir (Koşan, 2020, s. 1).

Güncel yaklaşımlar ışığında önleyici koruma, yalnızca geleneksel bakım onarım uygulamalarıyla sınırlı olmayan, çok katmanlı veri analitiği, parametrik modelleme, çevresel izleme ve yapısal analiz gibi çok disiplinli süreçlerin dijital platformlarla entegre edildiği sistematik bir yaklaşıma dönüşmüştür. Bu dönüşüm, kültürel mirasın risklere arşı çağdaş biçimde korunmasına yönelik stratejilerin temelini oluşturmaktadır.

3
MİRAS YAPILARINDA BELGELEME, SAYISAL YÖNTEMLER VE TYBM YAKLAŞIMI

3.1 Miras Yapılarında Belgeleme ve Sayısal Yöntemler

Taşınmaz kültür mirasının korunması ve onarım kararlarının sağlıklı biçimde alınabilmesi için, yapının bir bütün olarak doğru algılanması temel bir gerekliliktir. Bu doğrultuda, yapının arkeolojik, mimari ve sanat tarihi açısından geçirdiği dönemlerin incelenmesi, mevcut durumunun analitik rölöve çalışmalarıyla belgelenmesi ve taşıyıcı sistem ile malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Müdahale kararlarının doğru biçimde tanımlanabilmesi için tarihsel bilginin yanı sıra, yapıya ilişkin tüm çizimlerin hazırlanması ve yapısal durum analizlerinin raporlanması belgeleme sürecinin parçasıdır.

Kültürel mirasın korunmasına yönelik çalışmalar; belgeleme, veri toplama, veri işleme ve tarihsel araştırma gibi aşamaları kapsayan bütüncül bir süreci ifade etmektedir. Bu bağlamda belgeleme, bir yapının yalnızca fiziksel olarak kayıt altına alınmasını değil; aynı zamanda tarihsel geçmişinin, strüktürel kurgusunun, malzeme özelliklerinin ve zaman içerisinde oluşan bozulmalarının sistematik biçimde belgelenmesini içermektedir. Bu süreç, kültür mirası envanterinin oluşturulması ve korunmasına yönelik kararların bilimsel temellere dayandırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Belgeleme bir yapının gelecekteki yaşam döngüsünde kilit rol oynar. Gelişen teknolojiler, belgeleme sürecinin doğruluğunu, hızını ve kapsamını artırarak, kültürel mirasın analiz, korunma, güçlendirme, yenileme ve yönetim süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu yönüyle belgeleme, koruma sürecinin başlangıç noktası olup hem niceliksel hem de niteliksel verilerin bütüncül biçimde ele alınmasını sar (Khalil ve diğerleri, 2021, s. 30).

Kültürel mirasta belgeleme çalışmaları, yapıların fiziksel özelliklerinin kayıt altına alınmasıyla sınırlı olmayıp aynı zamanda yapının tarihsel gelişim sürecinin anlaşılması, mevcut durumunun değerlendirilmesi ve gelecekte planlanan koruma,

restorasyon ve yeniden işlevlendirme süreçlerine veri oluşturması açısından çok boyutlu bir görev üstlenmektedir. Ayrıca elde edilen veriler aracılığıyla kültürel mirasa yönelik toplumsal farkındalığın arttırılması da belgeleme sürecinin önemli çıktıları arasında yer almaktadır (Güleç Korumaz ve diğerleri, 2011, s. 68).

Mimari belgeleme, en temel düzeyde ölçme ve fotoğraflama yöntemleriyle yapının tüm fiziksel özelliklerinin kayıt altına alınması olarak tanımlanabilir. Mimari ve arkeolojik alanlarda kullanılan ölçüm teknikleri genel olarak *doğrudan ölçüm*, *standart topografik ölçüm, fotogrametri* ve *lazer tarama* olmak üzere dört ana grupta ele alınmaktadır. Doğrudan ölçüm yöntemi, düşük maliyetli olması ve özel donanım gerektirmemesi nedeniyle günümüzde hâlen yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemle elde edilen veriler çoğunlukla iki boyutlu çizimlerle sınırlı kalmakta ve karmaşık geometrilere sahip yapılarda doğruluk sorunları ortaya çıkabilmektedir.

Standart topografik ölçümler, *total station* kullanılarak yapı üzerindeki referans noktalarının ölçülmesine dayanmakta ve sınırlı sayıda noktadan oluşan üç boyutlu veri setleri üretmektedir. Bu yöntem, dikkatli uygulandığında yüksek doğruluk sağlamakla beraber referans noktalarının belirlenmesinin güç olduğu arkeolojik alanlar ve harabe durumundaki yapılar için yetersiz kalmaktadır. Fotogrametri yöntemi ise özellikle yapı cephelerinin ve detaylı yüzeylerin üç boyutlu olarak belgelenmesinde etkin biçimde kullanılmaktadır ve farklı ölçeklerdeki nesnelerin modellenmesine olanak tanımaktadır.

Bu tekniklerin yanında lazer tarama teknolojileri, kısa sürede ve düşük hata paylarıyla yüksek yoğunluklu üç boyutlu ölçümler gerçekleştirebilme kapasitesi nedeniyle kültürel miras belgelenmesinde yaygınlaşmıştır (Korumaz, 2016, s. 141). Günümüzde rölöve çalışmalarında, fotogrametri ve lazer tarama yöntemlerinin birlikte kullanıldığı *bütünleşik belgeleme yaklaşımları* tercih edilmektedir. Böylelikle sahadan elde edilen veriler, bilgisayar destekli yazılımlar aracılığıyla daha işlenebilir ve analiz edilebilir veri setlerine dönüştürülmektedir. Lazer tarama yöntemleri, mimari ve arkeolojik alanlarda *yersel* ve *havadan* olmak üzere iki ana başlık altında incelenir. Bu teknoloji, taranan objeye gönderilen ve geri dönen lazer ışınlarının mesafe ve açı bilgilerinin milimetre düzeyinde doğrulukla ölçülmesi prensibine dayanır. Yersel ve havadan gerçekleştirilen taramalar sonucunda, coğrafi koordinatlara sahip yoğun nokta bulutu verileri elde edilir; böylelikle

yapının geometrik özelliklerinin yüksek hassasiyetle belgelenmesini mümkün kılar (Şekil 3.1, Şekil 3.2).



Şekil 3.1 (a) Nokta bulutu oluşturmak için lazer tarama prensibi, (b) coğrafi referanslı nokta bulutu (Lopez ve diğerleri, 2018, s. 8).

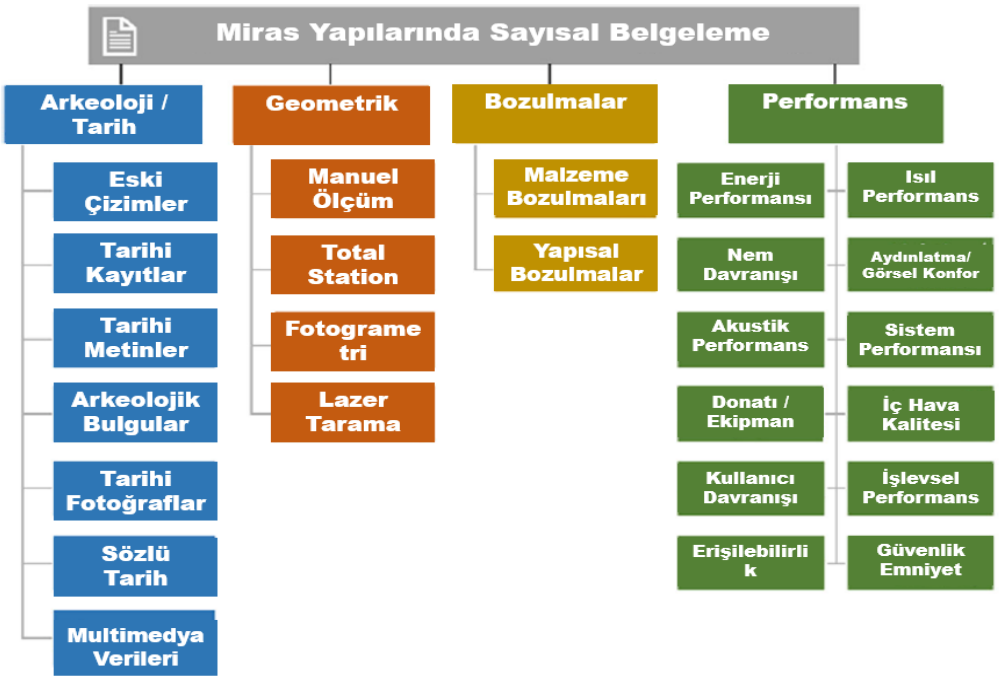


Şekil 3.2 Fotogrametri sonucunda elde edilmiş nokta bulutları (Bastem S. , 2021, s. 48)

Lazer tarama sonucu elde edilen nokta bulutları, bilgisayar yazılımları sayesinde temizlenir ve kullanılabilir hale getirilir. Alternatif olarak, poligon örme sistemi ve işleme yöntemi olarak kullanılabilir. Böylelikle nokta bulutu üzerinde üçgenlerden oluşan yüzeyler oluşturulur. Her iki durumda da nokta bulutu üzerindeki bu ayıklama ve temizleme işlemleri verilerin doğruluğu açısından yüksek önem taşır (Lopez ve diğerleri, 2018, s. 7-8).

Nokta bulutu verilerinin temizlenmesi ve işlenmesiyle, yapıların 3 boyutlu analitik modellerine ulaşılır. Üretilen modellere malzeme bilgilerinin girilmesi, strüktür durumunun işlenmesi, yapının zaman içinde uğradığı bozulmaların işlenmesi sonucunda, yapının 3 boyutlu analitik rölövesi elde edilir. Bu modeller rölöve, restitüsyon ve restorasyon projeleri için önemli dijital altlıklar olduğu gibi, çevresel koşullar, kullanıcıdan kaynaklanan tahribatlar, strüktürel davranışlar, yapının karşı

karşıya olduğu muhtemel risklerin sayısal ortamda gözlemlenmesine ve olasılıklara karşılık önlem alınmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.3 Miras binalarının belgeleme verilerinin ve ilgili veri yakalama araçlarının önerilen kategorizasyonu (Khalil ve diğerleri, 2021, s. 35).

3.2 Miras Yapılarında Bilgi Modeli

2000'li yılların ortalarında yeni yapı üretimi ve mimarlık dünyasında projelendirme, disiplinler arası koordinasyon, belge yönetimi, süreç yönetimi, bütçe yönetimi ve yapılan uygulamaların takibinde BIM[9] / YBM – Yapı Bilgi Modeli adı verilen yeni bir yöntem ortaya çıkmıştır. YBM, yalnızca üç boyutlu modelleme değil, tasarım, yapım ve işletme süreçlerini kapsayan veri temelli ve yaşam döngüsü odaklı bir yönetim modelidir.

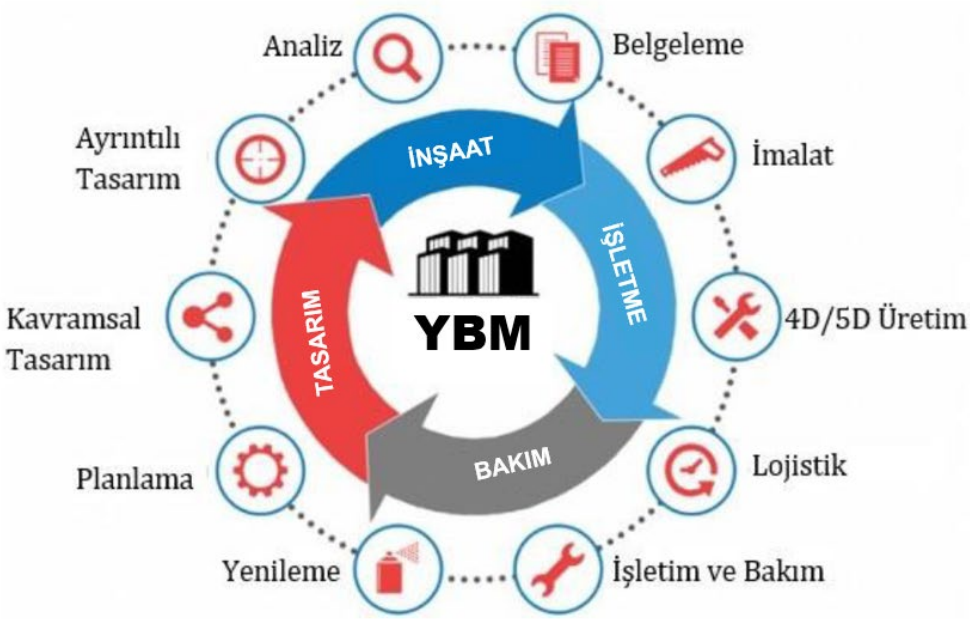
YBM, akıllı üç boyutlu bir dijital modelin oluşturulmasıyla başlayan, bu modelin koordinasyon, simülasyon ve görselleştirme amaçlarıyla kullanılması yoluyla, yapı ve altyapı projelerinin planlanması, tasarlanması, inşa edilmesi ve işletilmesine yönelik karar süreçlerini destekleyen bir yaklaşımdır (Atabay & Öztürk, 2019, s. 419). Bu yönüyle YBM, farklı disiplinler arasında ortak bir veri ortamı oluşturarak

[9] BIM: Building Information Modelling – Yapı Bilgi Modeli (BIM Dictionary, 2022).

bilgi paylaşımını kolaylaştırmakta ve proje süreçlerinde bütüncül bir yönetim anlayışı sağlamaktadır.

YBM felsefesi, bir yapıyı fiziksel olarak inşa etmeden önce dijital dünyada dinamik ve sürekli gelişen bir bilgi yönetim ekosistemi kurmayı hedefler. Sadece bir yazılım veya 3D modelleme aracı olmanın ötesinde , tasarımın ilk aşamasından yıkım sürecine kadar tüm paydaşların ortak bir "anlamsal veritabanı" üzerinden iş birliği yapmasını sağlayan bir metodolojidir.

YBM yaklaşımı, yapı bileşenlerine ait verilerin ilişkisel bir yapı içinde tanımlandığı ve paydaşlar arasında eş zamanlı olarak paylaşılabildiği bir anlamsal veri ortamı sunmaktadır. Bu sistem, yapının tasarımından işletme sürecine kadar uzanan yaşam döngüsü boyunca disiplinler arası koordinasyonu destekleyen bütüncül bir yönetim modeli olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.4 YBM Süreçleri (Atabay & Öztürk, 2019, s. 419)**.**

Amerikan Ulusal BIM Standartı[10], Yapı Bilgi Modellemesini, bir tesisin fiziksel ve işlevsel özelliklerinin dijital bir temsili olarak tanımlamaktadır. YBM, yapıya ilişkin bilgilerin paylaşılan bir bilgi kaynağı olarak depolandığı ve yapının tüm

[10] NBIMS-US: United States National BIM Standart – Amerika Birleşik Devletleri Ulusal YBM Standartları

yaşam döngüsü boyunca alınacak kararlar için güvenilir bir temel oluşturur. Bir yapının nasıl tasarlanacağı, nasıl inşa edileceği, nasıl işletileceği ve nasıl bakım göreceğine ilişkin bilgilerin dijital ortamda bütüncül biçimde yönetilmesini sağlamaktadır (Ganah & Lea, 2021, s. 53).

Yapı Bilgi Modellemesi, geometrik ve alfa-sayısal verilerin (materyal özellikleri, maliyet kalemleri, çevresel performans verileri vb.) entegre edildiği kapsamlı bir dijital model aracılığıyla, tüm proje ekibinin eş zamanlı çalışmasına olanak tanıyan bir metodolojidir. Tasarımdan işletme aşamasına dek yapının tüm yaşam evrelerini kapsayan bu üç boyutlu platform, bilginin tek bir kaynak üzerinden yönetilmesini sağlar. Paydaşların ortak bir veri seti üzerinden hareket etmesi, sunumda sürekliliği korumakta, güncellemeleri hızlandırmakta ve verilerin mükerrer üretimini minimize ederek proje dokümantasyonu arasındaki koordinasyonun niteliğini artırmaktadır (Ofluoğlu, 2016).

YBM platformundaki yazılımlar güncel koşullara göre sürekli gelişim göstermektedir. Bu yazılımlar kullanım alanlarına göre sınıflandırıldığında 3 ana grupta toplanmaktadır:

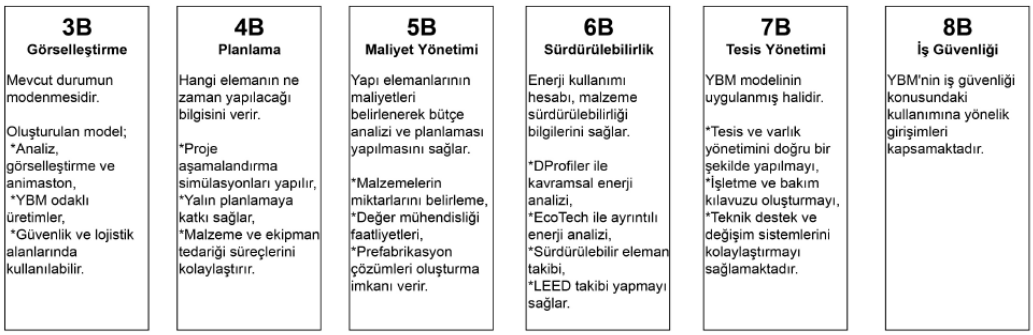
- **3B Modelleme Yazılımları:** Parametrik katı modelleme temelli bu yazılımlar, yapının geometrik ve işlevsel özelliklerinin dijital ortamda oluşturulmasını sağlar. Autodesk Revit, Bentley Architecture, Graphisoft Archicad gibi yazılımlar bu grupta yaygın olarak kullanılmakta olup Rhino, SketchUp ve Allplan gibi yazılımlar da modelleme süreçlerini desteklemektedir.
- **Model Analiz Yazılımları:** YBM verilerini kullanarak yapısal analiz, enerji performansı, gün ışığı analizi ve çakışma kontrolü gibi işlemleri gerçekleştiren yazılımlardır. Navisworks, Robot Structural Analysis ve Ecotect gibi araçlar model doğrulama ve performans değerlendirme süreçlerinde öne çıkmaktadır.
- **İş Birliği Platformları:** Modelleme ve analiz süreçlerinde üretilen verilerin paylaşımı, koordinasyonu ve yönetimi amacıyla kullanılan dijital platformlardır. BIM 360, ProjectWise ve Trimble Connect gibi sistemler, proje paydaşları arasında veri sürekliliğini ve eş zamanlı çalışmayı sağlamaktadır (Tablo A.1).

Son yıllarda YBM yaklaşımı yalnızca yeni yapı üretiminde değil, mevcut ve tarihi yapıların belgelenmesi, izlenmesi ve yönetilmesine yönelik çalışmalarda da uyarlanarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönüşüm, miras yapılarının özgünlük, yapısal ve tarihsel verilerdeki belirsizlikler ve katmanlılık gibi özellikleri doğrultusunda YBM yaklaşımının yeniden ele alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, tarihi yapıların özelliklerini dikkate alan ve mevcut yaklaşımı yeniden tanımlayan Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi kavramı öne çıkmaktadır.

3.2.1 YBM Boyutları

YBM sisteminde oluşturulan modeller boyut, bilgi, detay seviyesi, gelişim seviyesi gibi kavramlarla tanımlanır. Bu durum planlanan son modelin niteliğine göre değişkenlik göstermektedir.

YBM Boyutları 3B, 4B, 5B, 6B ve 7B olarak adlandırılır. Boyut seviyesi arttıkça modele daha fazla derinlik ve bilgi eklendiğini temsil eder. 3B temel model seviyesi, 4B modele zaman faktörünün yani planlama aşamasının eklendiği seviye, 5B ise maliyet ve bütçe analizlerinin modele eklendiği seviyedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 YBM Boyutları 3B-8B (Bastem S. , 2021, s. 13)**.**

Güncel literatürde YBM boyutları görselleştirme, planlama, maliyet kontrolü, sürdürülebilirlik, tesis yönetimi ve iş – saha güvenliği (inşaat güvenliği) gibi temel boyutların yanı sıra, yeni eklenen 9B yalın inşaat (atık yönetimi) ve 10B sanayileşmiş inşaat başlıklarını da içerecek şekilde toplamda 10 farklı boyut ile tanımlanmaktadır.

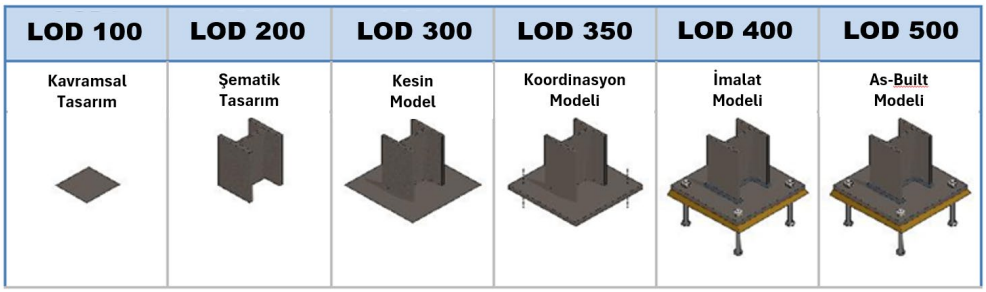
3.2.2 YBM Gelişim Düzeyleri – LOD

Yapı Bilgi Modelleme (YBM) süreçlerinde, model bileşenlerinin içermesi gereken grafiksel ve teknik verilerin derinliği "LOD" (Level of Development / Gelişim Düzeyi) kavramıyla standardize edilmiştir. İlk olarak 2008 yılında AIA[11] tarafından belirlenen bu kavram, projenin farklı aşamalarında modelden elde edilecek bilginin niteliğini ve güvenilirliğini tayin eder.

Literatürde sıklıkla birbirinin yerine kullanılan "Detay Düzeyi" (Level of Detail) ve "Gelişim Düzeyi" (Level of Development) arasında temel bir fark bulunmaktadır: Detay düzeyi, nesnenin görsel/geometrik yoğunluğunu ifade ederken gelişim düzeyi, nesneye atanan bilginin ne kadar doğrulanmış olduğunu ve projenin hangi aşamasına hizmet ettiğini tanımlar. Bu standartlaşma, model paydaşları için verinin hangi aşamada ne ölçüde kullanılabilir olduğuna dair ortak bir dil oluşturur (LOD Kavramı, 2022).

LOD hiyerarşisi güncel durumda 6 aşamada tanımlanmaktadır:

- **LOD 100:** Elemanların kütlesel ve kavramsal tasarımı.
- **LOD 200:** Yaklaşık boyut ve konumlara sahip şematik gösterim.
- **LOD 300:** Kesin geometrik verilerin ve detayların modellendiği aşama.
- **LOD 350:** Bileşenin diğer sistemlerle olan bağlantı ve montaj detaylarını içeren seviye.
- **LOD 400:** İmalat ve kurulum için gerekli olan spesifik detay seviyesi.
- **LOD 500:** Yapının inşa edilmiş (as-built) mevcut durumunu tüm doğruluğuyla yansıtan nihai model.



Şekil 3.6 LOD 100 ile 500 arasındaki seviyelerin şematik gösterimleri.

[11] AIA: American Instute of Architects – Amerikan Mimarlar Enstitüsü.

3.2.3 YBM Sisteminde Kullanılan Standartlar

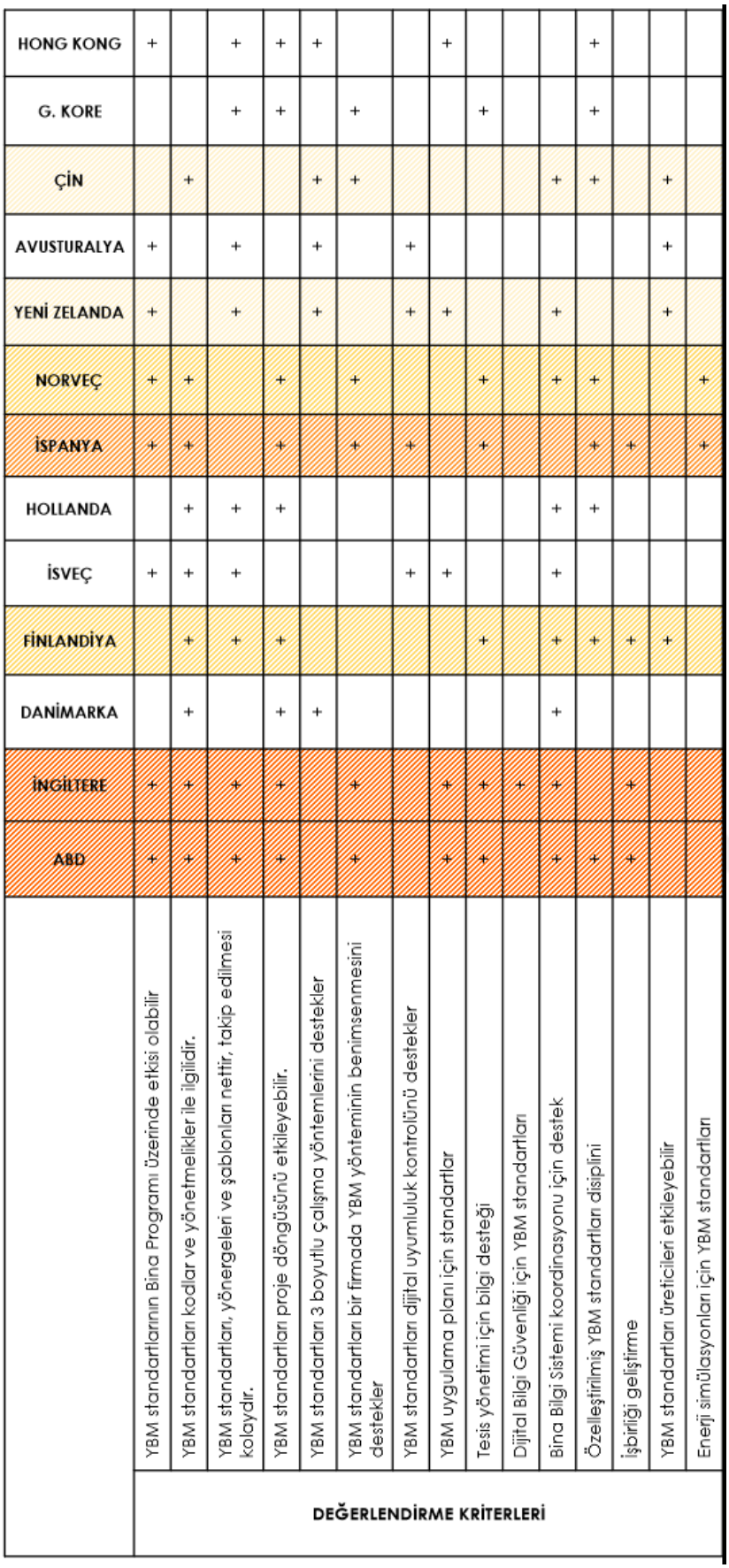
YBM sisteminin en yaygın kullanıldığı ülkelerin başında ABD ve İngiltere gelmektedir. Bunun yanı sıra Singapur ve Kuzey Avrupa ülkeleri olmak üzere, pek çok ülke YBM alanında kendi standartlarını ve uygulama kılavuzlarını geliştirmiştir (Tekin, 2017, s. 36).

ABD ve İngiltere YBM standartlarının geliştirilmesinde öncü rol üstlenmiştir; Avustralya, Kanada gibi diğer ülkeler de geliştirilen standartların bir kısmını YBM çerçevelerinde benimsemişlerdir. İngiltere sözleşme, EIR, BEP ve tasarım[12]dahil olmak üzere, tüm alanlar için eksiksiz YBM standardına sahip olan tek ülkedir. YBM süreçlerinin planlanması, tasarlanması ve uygulanmasında tam bir standart setine sahip olmak başarılı bir şekilde planlama, tasarlama ve teslim etme konusunda güven sağlar (Ganah & Lea, 2021, s. 57).

Ülke	**Standart**
Amerika	**NBI** **MS V1, NBIMS V2, NBIMS V3** **GSA YBM Rehber Serileri** **Üniversite ve Diğer Kurumların Rehber ve Şablonları**
Finlandiya	**Senate Properties (2007)** **COBIM 2012**
Singapur	**Singapur YBM Rehberi V1** **Singapur YBM Rehberi V2**
Norveç	YBM Kılavuzu (Stattsbygg) 4 sürüm YBM Kılavuzu (Norveç Konut Üreticileri Kurumu) 2 sürüm
İngiltere	AEC UK Protokolü BS 1192:2013 ve değişik sürümleri PAS 1192:2:2013 ve değişik sürümleri BS 8541 ve sürümleri YBM Protokolü

Şekil 3.7 Ülkeler ve YBM Standartları (Tekin, 2017, s. 37).

[12] EIR: Employers Information Requirement – İşveren Bilgi Gereksinimleri
BEP: BIM Executation Plan – YBM Uygulama Planı (BIM Dictionary, 2022)



DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ	ABD	İNGİLTERE	DANİMARKA	FİNLANDİYA	İSVEÇ	HOLLANDA	İSPANYA	NORVEÇ	YENİ ZELANDA	AVUSTURALYA	ÇİN	G. KORE	HONG KONG
YBM standartlarının Bina Programı Üzerinde etkisi olabilir	+	+			+		+	+	+	+			+
YBM standartları kodlar ve yönetmelikler ile ilgilidir.	+	+	+	+	+	+	+	+			+		
YBM standartları, yönergeleri ve şablonları nettir, takip edilmesi kolaydır.	+	+		+	+	+			+	+			+
YBM standartları proje döngüsünü etkileyebilir.	+	+	+	+		+	+	+				+	+
YBM standartları 3 boyutlu çalışma yöntemlerini destekler			+						+	+	+		+
YBM standartları bir firmada YBM yönteminin benimsenmesini destekler	+	+					+	+			+	+	
YBM standartları dijital uyumluluk kontrolünü destekler					+		+		+	+			
YBM uygulama planı için standartlar	+	+			+				+				+
Tesis yönetimi için bilgi desteği	+	+		+			+	+				+	
Dijital Bilgi Güvenliği için YBM standartları		+											
Bina Bilgi Sistemi koordinasyonu için destek	+	+	+	+	+	+		+	+		+		
Özelleştirilmiş YBM standartları disiplini	+			+		+	+	+			+	+	
İşbirliği geliştirme	+	+		+			+				+		
YBM standartları üreticileri etkileyebilir				+					+	+	+		
Enerji simülasyonları için YBM standartları							+	+					

Şekil 3.8 Farklı ülkelerde YBM standartlarının kabulü – yazar tarafından çevrilmiş ve düzenlenmiştir (Ganah & Lea, 2021, s. 56).

3.3 Tarihi Yapı Bilgi Modeli

2007 yılından itibaren yeni yapıların üretiminde kullanılmaya başlanan YBM yöntemi, 2009 yılında Dublin Teknoloji Enstitüsü'nden Maurice Murphy ve ekibi tarafından H-BIM[13] / TYBM – Tarihi Yapı Bilgi Modeli olarak tanımlanmış ve mevcut tarihi yapılara uygulanabilir hale getirilmiştir (Lopez ve diğerleri, 2018, s. 14).

TYBM yönteminde bütünleşik ölçme ve belgeleme teknikleriyle elde edilen üç boyutlu rölöve verileri, YBM yazılımları aracılığıyla işlenerek parametrik bilgi modellerine dönüştürülmektedir. Bu yönüyle TYBM, yalnızca geometrik veri üretimini değil, aynı zamanda tarihi yapıların korunması, projelendirilmesi ve yönetimi süreçlerinde disiplinler arası veri paylaşımını ve koordinasyonunu sağlayan bütüncül bir yöntemdir.

YBM ve TYBM arasındaki temel fark, modelleme yaklaşımının nesne yapısında ortaya çıkar. YBM genellikle standartlaştırılmış yapı elemanları üzerinden yeni yapı üretim süreçlerine odaklanırken TYBM, mevcut bir yapının özgün geometrisini, tarihsel katmanlarını, yapım tekniklerini ve malzeme özelliklerini dijital ortamda tanımlamayı hedefler. Bu nedenle TYBM modelleri, geometrik verinin ötesine geçerek yapıya ilişkin farklı bilgi katmanlarını bütüncül bir veri yapısı içinde ele alır. Ancak tarihi mimariye özgü karmaşık geometrilerin ve düzensiz biçimlerin "akıllı parametrik nesneler" olarak tanımlanması, bu yöntemin temel zorluklarından biridir (Allegra ve diğerleri, 2020, s. 1355).

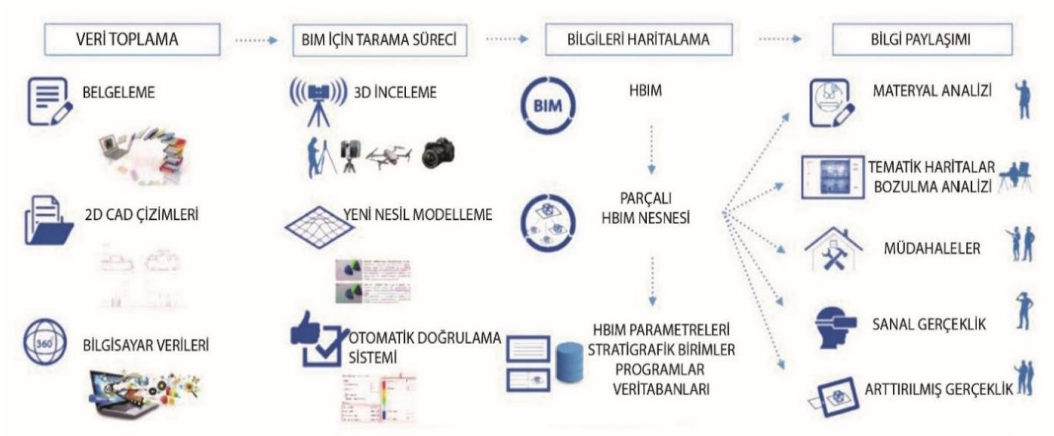
TYBM yalnızca görselleştirme aracı olmanın ötesinde, farklı disiplinlere ait verilerin bütünleşik yönetildiği kapsamlı dijital modelleme yaklaşımıdır. Mimarlık, yapı mühendisliği, malzeme bilimi ve restorasyon gibi uzmanlık alanlarından gelen veriler, tekil bir yapı bilgisi veri tabanında birleştirilir. Bu yapı sayesinde strüktürel davranışlar, malzeme karakteristikleri, bozulma haritaları gibi bilgiler tek bir model üzerinden erişilebilir ve sürdürülebilir koruma politikalarıyla ilişkilendirilebilir hale gelir. TYBM'nin bu çok boyutlu veri organizasyonu, yöntemin önleyici koruma stratejileriyle entegrasyonuna imkân tanıyarak taşınmaz kültür varlıklarının yönetiminde etkin bir karar destek aracı oluşturur.

[13] H-BIM: Historical Building Information Modelling – Tarihi Yapı Bilgi Modeli (Murphy ve diğerleri, 2009).

3.3.1 TYBM Çalışma Yöntemi

İlk adım **"Bilgi ve veri toplama"** olarak adlandırılan anlamsal, grafik ve tipolojik verilerle ilgili bilgilerin toplanmasıdır. Grafik veriler, lazer tarama ve fotogrametrik çalışmalardan elde edilir. Bu yöntemle, bir binanın ham nokta bulutu verisi oluşturulur. Anlamsal ve tipolojik veriler, binanın teknik analizinden ve tarihi belgelerden elde edilir. Bu sayede, TYBM kütüphanesindeki parametrik bileşenleri modellemek için tarihsel verilerin kullanılması, detayların geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Aynı zamanda, zamansal parametreler ile yapının yaşam döngüsü boyunca geçirdiği değişimleri sunmak mümkündür.

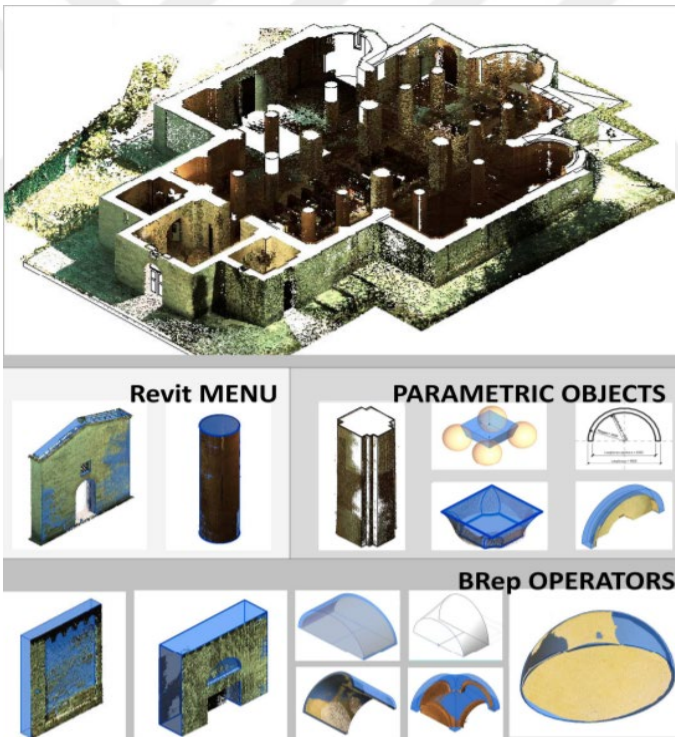
İkinci adım, **"Filtreleme"** olarak adlandırılan, toplanan anlamsal bilgilerin bir veri tabanı olarak kullanıldığı süreçtir. Bu aşamada, bilgiler 3 boyutlu nesneler üzerine entegre edilir. Bununla birlikte, elde edilen nokta bulutu verisi kullanım kolaylığı sağlamak için **temizlenir, hizalanır** ve **filtrelenir**. Temizlenen nokta bulutları doğrudan BIM ortamına entegre edilir. Üçüncü adım ise, "3 Boyutlu Parametrik Modelleme" olarak tanımlanır. Bu aşamaları geçiren nokta bulutları BIM ortamına aktarılır. Modellenecek nesneler, tarihsel dokuya ve kurallara göre bölümlenir (Lopez ve diğerleri, 2018, s. 14).



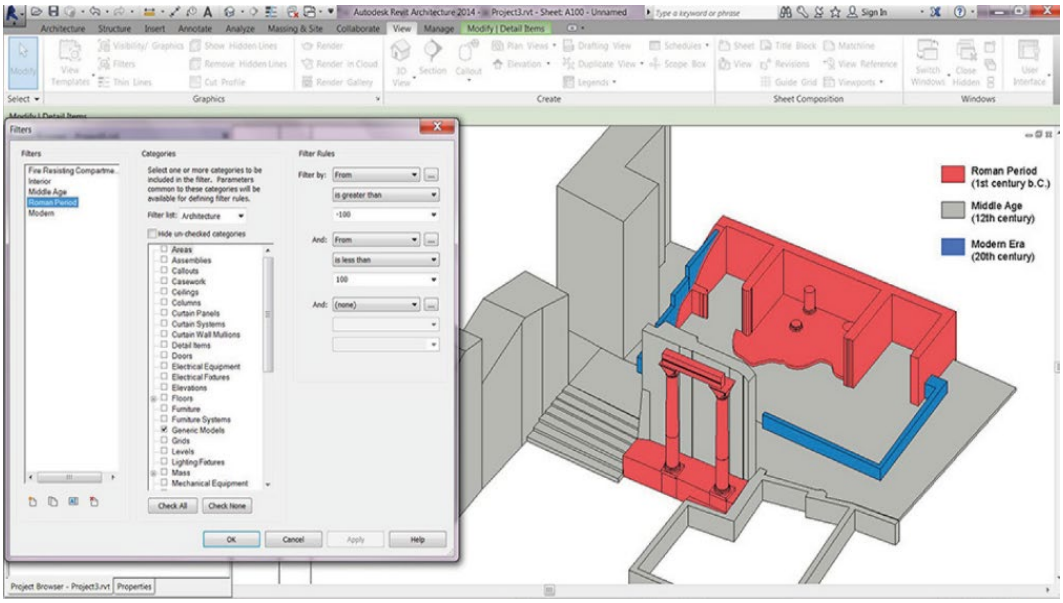
Şekil 3.9 TYBM çalışma aşamaları ve bilgi düzeyi ayrıştırması (Kömürcü & Yıldız, 2021, s. 593).



Şekil 3.10 Nokta bulutundan model oluşturma (Bastem S. , 2021, s. 50).



Şekil 3.11 Nokta bulutundan Revit programıyla üretilmiş TYBM model ve objeler – Santa Maria Kilisesi (Quattrini ve diğerleri, 2015, s. 370).

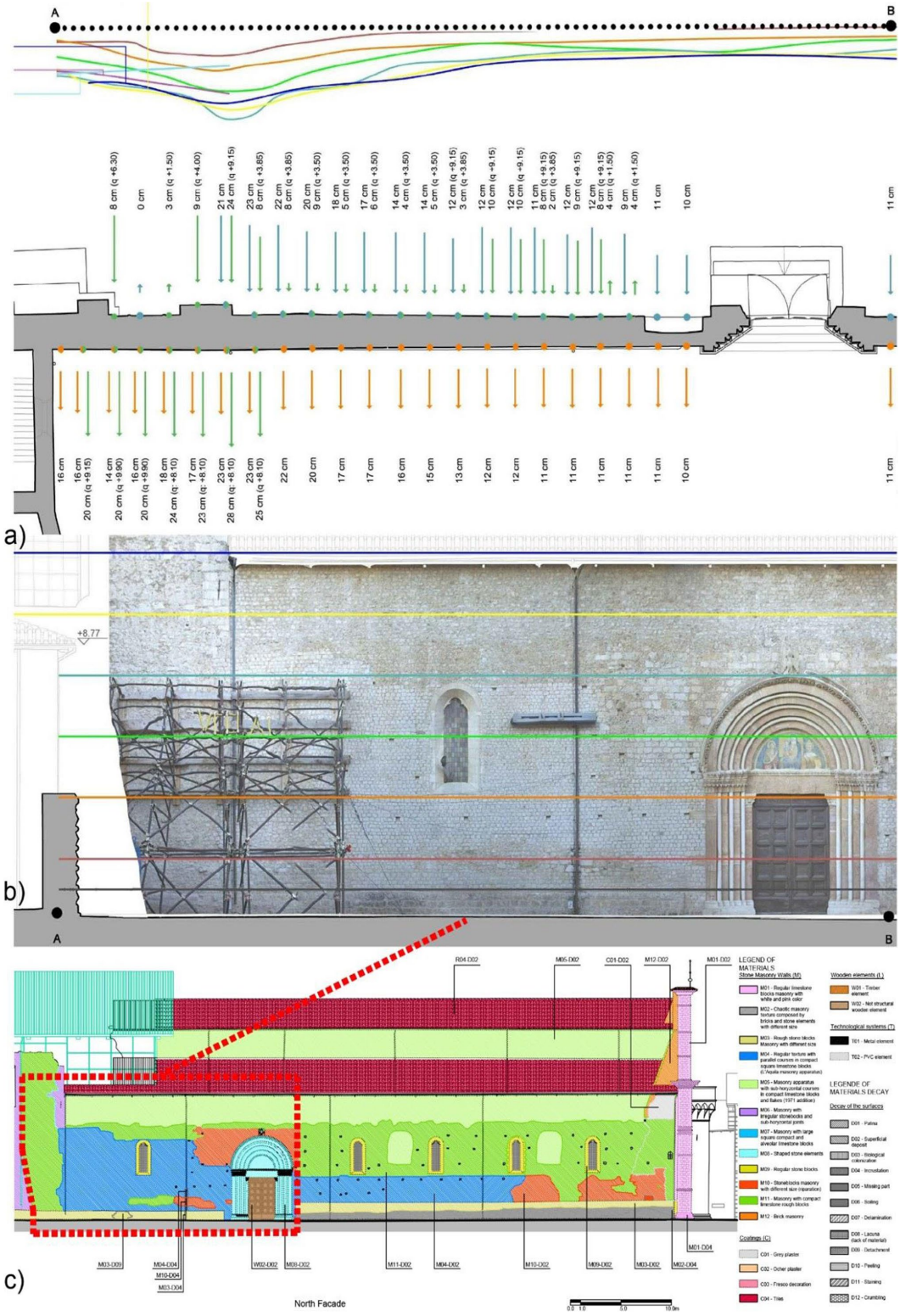


Şekil 3.12 TYBM yöntemiyle yapının farklı yapım dönemlerini gösterme - Castor and Pollux Tapınağı (Simeone ve diğerleri, 2014, s. 687).

Sürecin son aşaması elde edilen bilgilerin paylaşımı ve kullanımı olarak tanımlanabilir. Yapıyla ilgili strüktürel analizler, malzeme analizleri, enerji analizleri, uygulamaya yönelik zaman ve maliyet analizleri, bakım onarım süreçleri ile ilgili çalışmalar yapılabilir. 2 boyutlu çizimlerle tematik eşleşmeler yapılarak 3B TYBM ortamına entegre edilebilir, malzeme analizleri, bozulmalar, çürümeler gibi bilgilere sahip nesneler oluşturulabilir (Şekil 3.13).

TYBM'nin temel faydaları; yapıya ait geometrik ve anlamsal verilerin tek bir dijital ortamda bütünleştirilerek kapsamlı bir veri tabanı oluşturulması, model üzerinde yapılan değişikliklerin ilgili dokümanlara tutarlı biçimde yansıtılması ve koruma süreci boyunca üretilen bilgilerin gelecekteki müdahaleler için arşivlenebilir bir veri altyapısına dönüştürülmesidir.

Bu çerçeveden değerlendirildiğinde, tarihi yapıların da yapı bilgi sistemi içinde yer alması önemlidir. Böylelikle yapıların envanterinden, dönemsel değişikliklere kadar tüm verileri içeren veri tabanını elde edilebilir ve arşivlenebilir.



Şekil 3.13 Basilica di Collemaggio TYBM modelinde, kuzey duvarı için çalışılmış malzeme ve bozulma analizi: a) plan düzleminde duvar geometrisi b) ortofoto görüntüsü c) 3B ortofoto görüntülere entegre edilmiş 2B malzeme ve çürüme analizi (Brumana ve diğerleri, 2018, s. 561).

3.3.2 TYBM Boyutları

TYBM yaklaşımında "boyut" kavramı, dijital modelin yalnızca geometrik veriyi değil, farklı bilgi katmanlarını da içermesini öngörür. Bu çerçevede dijital modelleme; çeşitli bilgi katmanlarının birlikte yönetildiği çok boyutlu bir veri organizasyonu anlamına gelir. TYBM'nin katmanlı yapısı, hem mekânsal hem de işlevsel açıdan veri üretimini ve yönetimini mümkün kılar. Böylece kültür mirasının belgelenmesi, analiz edilmesi ve korunmasına yönelik süreçler bütüncül bir biçimde ele alınır. Amaç, tüm yönetim paydaşlarının katkı sağlayabileceği dijital bir bilgi modeli oluşturup tüm bilgileri bir arada koordine etmektir. YBM kavramlarından bahsederken tanımlanan “boyut” kavramı, TYBM için aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:



Şekil 3.14 TYBM Boyutları – yazar tarafından çevrilmiştir (Castellano-Roman & Pinto-Puerto, 2019).

- 3D Analitik Rölöve: Mevcut durumun modellenmesi, ön veri işleme,
- 4D Tarihsel Süreç: Yapının tarihi ile ilgili bilgilerin değerlendirilmesi, fazların belirlenmesi, süreç yönetimi,
- 5D Teşhis / Tanı: Yapıya ilişkin hasar, bozulma ve müdahale gereksinimlerinin analiz edilmesi,
- 6D Kültürel Bağlam: Çevre, bölgesel alt yapı, ilişkili varlıklar, kültürel peyzaj ile olan ilişkisi,
- 7D Önleyici Koruma: Yapının izlenmesi, bakım süreçleri ve önleyici koruma projeleri biçiminde açıklanabilir.

3.3.3 TYBM Bilgi Düzeyleri

YBM gelişim düzeyi olarak tanımlanan LOD kavramlarının TYBM süreçlerinde karşılaşılan yapısal karmaşıklıkları modellemeye yansıtmakta yetersiz kaldığı, "karma ve tersine LOD" stratejilerinin geliştirilmesinin önemi belirtilmektedir (Brumana ve diğerleri, 2018, s. 547). Bu bağlamda, TYBM süreçlerinde LOD kavramı "Bilgi Düzeyi" LOK[14] olarak yeniden tanımlanmış olup, bilgi düzeyinin sağladığı yeterli veri ile miras yönetimine referans oluşturulması amaçlanmaktadır.

LOK, modellerde yer alan bilginin kapsamı, güvenilirliği ve karar destek süreçlerinde kullanılabilirliği açısından sınıflandırılmasını belirlemektedir. Bilgi Düzeyi kavramı, modelin içerdiği bilgilerin güvenilirliği, doğruluk düzeyi ve kullanılabilirlik oranı gibi ölçütlerle sınıflandırılmasını sağlamaktadır. Buna göre TYBM süreçlerinde tanımlanan bilgi düzeleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:



Şekil 3.15 TYBM LOK seviyeleri – yazar tarafından çevrilmiştir (Castellano-Roman & Pinto-Puerto, 2019).

- LOK 100: Miras varlığının tanımlanması ve temel karakteri ile ilişkilidir,
- LOK 200: Basit taşıyıcı ve yapısal gelişim modeli seviyesi,
- LOK 300: Kapsamlı araştırma içeren karmaşık yapısal modelleme seviyesi,

[14] LOK: Level Of Knowledge – Bilgi Düzeyi

- LOK 400: Varlık nesnelerine ait koruma ve müdahale eylemlerini içeren seviye,
- LOK 500: Verimli kulanım ve farklı eylemlerin sistematik biçimde kaydedildiği seviyedir.

Tablo 3.1 TYBM Boyutları ve Bilgi Seviyeleri (LOK) ilişkisi (Castellano-Roman, vd., 2019'dan uyarlanmıştır).

TYBM Boyutları	TYBM Bilgi Seviyeleri (LOK)	Kapsam ve Teknik İçerik
3D: Analitik Rölöve	**LOK 100 & 200**	Mevcut durumun modellenmesi, ön veri işleme ve basit taşıyıcı sistem/yapısal gelişim modeli seviyesi.
4D: Tarihsel Süreç	**LOK 300**	Yapının tarihi ile ilgili bilgilerin değerlendirilmesi, evre yönetimi ve kapsamlı araştırma içeren karmaşık yapısal modelleme.
5D: Teşhis / Tanı	**LOK 400**	Bilgi durumunun karakterizasyonu, koruma ve müdahale eylemlerini içeren detaylı modelleme seviyesi.
6D: Kültürel Bağlam	**LOK 400**	Çevre, bölgesel alt yapı ve kültürel peyzaj ile olan ilişkilerin sistematik biçimde modele entegre edilmesi.
7D: Önleyici Koruma	**LOK 500**	Verimli kullanım, periyodik bakım programları ve koruma projelerinin yönetim seviyesi.

Bu çerçevede bir TYBM modeli, 7D boyutuyla önleyici koruma projelerinin planlanmasını, LOK 500 seviyesiyle ise yapıya ilişkin verimli kullanım, bakım ve müdahale eylemlerinin bütüncül ve izlenebilir biçimde kayıt altına alınmasını hedeflemektedir.

TYBM süreçlerinde zaman boyutu,da önemli bir faktördür. Bu bağlamda "diachronic HBIM" yaklaşımı, bir yapının farklı tarihsel dönemlerine ait mekânsal, yapısal ve müdahale verilerinin tek bir dijital model içerisinde zamansal katmanlar veya fazlar aracılığıyla birlikte temsil edilmesini ifade etmektedir. Yapının farklı dönemlerde geçirdiği değişimlerin, kullanım evrelerinin ve müdahale süreçlerinin model içinde fazlar aracılığıyla tanımlanabilmesi, çok katmanlı bir okuma imkânı sunmaktadır. Bu yaklaşım yapının zamana bağlı dönüşümünü izleyebilen ve farklı tarihsel katmanları birlikte değerlendirebilen bir bilgi sistemi haline gelmesini sağlamaktadır (Currà ve diğerleri, 2022).

Bu kavramlara ek olarak, TYBM süreçlerinde modelleme doğruluğu ve bilgi yoğunluğunun sistematik biçimde yönetilebilmesi amacıyla Üretim Derecesi (Grade of Generation – GoG), Bilgi Derecesi (Grade of Information – GoI) ve

Doğruluk/Kesinlik Derecesi (Grade of Accuracy – GoA) tanımlamaları geliştirilmiştir.

Üretim Derecesi (GoG): Bir yapının modelleme seviyesini, geometrik karmaşıklık ve detay seviyesini tanımlar.

Bilgi Derecesi (GoI): Model bileşenlerine işlenen bilgi yoğunluğunu belirler. Malzeme özellikleri, yapım teknikleri, bozulma durumu gibi içeriklerin modelin bilgi düzeyini nasıl etkilediğini belirler.

Doğruluk / Kesinlik Derecesi (GoA): Nokta bulutu verisi ile üretilen 3B model arasındaki hassasiyet oranını belirler. TYBM süreçlerinde doğru analiz ve karar süreçleri için yüksek kesinlik derecesine ihtiyaç duyulmaktadır (Banfi F. , 2017, s. 61).

Bu yaklaşımlara ek olarak, TYBM uygulama aşamalarında "bilişsel faz (cognitive phase)" olarak tanımlanan bir aşama geliştirilmiştir. Bu sayede yapının mevcut durumunun ayrıntılı biçimde belgelenmesi, malzeme analizlerinin yapılması, bozulma haritalarının oluşturulması ve müdahale geçmişinin parametrik olarak modellenmesi yoluyla bir "yaşayan bilgi sistemi" kurgulanmasını hedeflemektedir (Ciuffreda ve diğerleri, 2024, s. 1335-1336).

TYBM'nin yaşayan bir bilgi sistemi olarak ele alınabilmesi, yapının yalnızca mevcut durumunu temsil etmesiyle değil; fiziksel davranışlarını zaman içinde izleyebilmesi, meydana gelen değişimleri kaydedebilmesi ve bu veriler üzerinden dinamik değerlendirmeler yapılabilmesiyle mümkündür. Yapının taşıyıcı sistemi ve malzeme bileşenlerinde gelişen hasar, deformasyon ve davranış değişimlerinin gerçek zamanlı ya da periyodik olarak izlenmesi, TYBM'nin karar destek ve erken uyarı kapasitesini

TYBM uygulamaları nicel tahribatsız test (NDT) verilerinin model ortamına dahil edilmesini, malzeme durumu, yapısal bozulma ve çevresel etkilerin daha bütüncül biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu tür verilerin TYBM iş akışlarına entegrasyonu, farklı veri türlerinin birlikte okunabildiği çok katmanlı bir analiz ortamı oluşturmakta; buna karşın mevcut çalışmalarda bu entegrasyonun sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, TYBM'nin yalnızca belgeleyici bir model değil, tanı ve izleme verilerini bütünleştiren bir bilgi sistemi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Artopoulos ve diğerleri, 2024).

Bu bağlamda, yapının strüktürel davranışını sensörler aracılığıyla izlemeyi amaçlayan Yapısal Sağlık İzleme (SHM) yaklaşımları ile sensörlerden elde edilen verilerin kablosuz ağlar üzerinden toplanmasını, aktarılmasını ve işlenmesini mümkün kılan Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı teknolojilerin TYBM sistemine entegre edilmesi, proaktif ve risk temelli bir koruma yaklaşımının geliştirilmesi açısından önemlidir.

3.3.4 Literatürde TYBM Uygulamaları ve Mevcut Durum

Bu çalışma kapsamında, Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi alanındaki güncel eğilimlerin, yöntemsel yaklaşımların ve uygulama pratiklerinin bütüncül bir çerçevede değerlendirilebilmesi amacıyla kapsamlı bir literatür vaka incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, farklı coğrafyalarda ve çeşitli yapı tipolojileri üzerinde uygulanmış toplam 100 adet TYBM vaka çalışması ele alınmış ve sistematik bir yaklaşımla incelenmiştir (Ekler Tablo B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9, B.10).

İncelenen çalışmalar, veri toplama yöntemleri, modelleme yaklaşımları ve amaçları, varsa yapılan analiz türleri, ağırlıklı olarak kullanılan yazılım altyapıları ve elde edilen çıktıların niteliği açısından karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu süreçte her bir çalışma, belirlenen parametreler doğrultusunda sınıflandırılarak bütüncül bir veri seti oluşturulmuş, alanın genel yöneliminin okunması hedeflenmiştir.

Elde edilen veri seti, TYBM uygulamalarının ağırlıklı olarak hangi aşamalarda yoğunlaştığını, hangi tekniklerin öne çıktığını ve hangi konularda sınırlılıkların bulunduğunu ortaya koymaya yönelik bir analiz altyapısı sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışmaların önemli bir bölümünün geometrik modelleme ve sayısal belgeleme odaklı ilerlediği görülmektedir.

Bu veri setine ilişkin hazırlanan tablolar, literatürdeki çalışmaların araştırma boşluklarının ve gelişim potansiyellerinin daha net biçimde ortaya konmasını sağlayan analitik bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Vaka çalışmaları kapsamında belirlenen faydalar ve kısıtlar, literatürde tekrar eden konuları daha sistematik biçimde izleyebilmek amacıyla sayısal kodlar üzerinden sınıflandırılmıştır. Bu doğrultuda oluşturulan tablo, TYBM uygulamalarının öne

çıkan katkı alanlarını ve karşılaşılan temel sınırlılıkları ortak bir referans çerçevesinde bir araya getirmektedir.

Bu kodlama yaklaşımı sayesinde, farklı çalışmalar arasında doğrudan karşılaştırma yapılabilmekte, belirli fayda ve kısıt başlıklarının hangi sıklıkla tekrar ettiği izlenerek alanın genel eğilimleri daha görünür hale getirilebilmektedir. Aynı zamanda bu sınıflandırma, TYBM uygulamalarının yoğunlaştığı araştırma alanları ile henüz sınırlı kalan konuların birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.3.4.1 TYBM Metodolojisinin Sağladığı Kazanımlar

TYBM, geleneksel belgeleme yaklaşımlarından farklı olarak, miras yapıyı yalnızca statik bir veri temsili olarak ele almak yerine, çok katmanlı veri ilişkilerinin tanımlanabildiği dinamik bir bilgi sistemine dönüştürmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca geometrik modelleme düzeyinde kalmayıp, yapıya ilişkin farklı veri türlerinin bütüncül biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır.

Literatürde incelenen 100 vaka çalışmasına dayalı olarak yapılan sınıflandırmada, TYBM uygulamalarının sağladığı kazanımların belirli başlıklar altında yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle 3 boyutlu görselleştirme ve anlamlandırma (%83), veri toplama ve veri yönetimi kolaylığı (%76), yüksek hassasiyet ve doğruluk (%74) ile veri entegrasyonu (%71) en belirgin faydalar olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, TYBM'nin mevcut kullanım pratiğinde ağırlıklı olarak sayısal belgeleme, veri organizasyonu ve model doğruluğu ekseninde konumlandığını göstermektedir. Birlikte çalışabilirlik ve semantik zenginleştirme (%60), kapsamlı dokümantasyon ve sürekli erişim (%57) ile dijital ikiz oluşturma (%45) gibi başlıklar, modelin yalnızca bir temsil aracı olmaktan çıkıp daha bütüncül bir bilgi altyapısına evrildiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, kullanıcı deneyimi (%2), kültürel miras turizmi ile entegrasyon (%5) ve sürdürülebilirlik odaklı performans değerlendirmeleri (%12) gibi alanların literatürde sınırlı düzeyde ele alındığı görülmektedir.

Bu dağılım, TYBM'nin özellikle veri üretimi ve modelleme aşamalarında güçlü bir araç olarak konumlandığını; ancak karar destek mekanizmaları, kullanıcı etkileşimi ve uzun vadeli performans değerlendirmeleri gibi daha ileri düzey uygulama alanlarında henüz yeterince gelişmediğini göstermektedir.

Bu sınıflandırma literatürdeki mevcut eğilimleri ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda TYBM metodolojisinin hangi alanlarda yoğunlaştığını ve hangi başlıklarda gelişime açık olduğunu gösteren bir çerçeve sunmaktadır (Şekil 3.16).

	VAKA ÇALIŞMALARINDAVURGULANAN FAYDALAR	
1	3 Boyutlu Görselleştirme ve Anlamlandırma	83%
2	Farklı Dönem Modellerinin Üretimi ve Simülasyonu	21%
3	Teknik Çizimlerin Otomatik Üretimi	18%
4	Yüksek Hassasiyet ve Doğruluk	74%
5	Zaman ve Maliyet Verimliliği	23%
6	Veri Toplama ve Veri Yönetimi Kolaylığı	76%
7	Veri Entegrasyonu	71%
8	Uzmanlık Gerektiren Çok Disiplinli Veri Yönetimi - Disiplinlererası Koordinasyon ve işbirliği	29%
9	Bütüncül Yapısal Analiz ve Yönetim	27%
10	Yapısal Teşhis	29%
11	Yapısal Hasar Haritalama	28%
12	Restorasyon Öncesi Planlama	31%
13	Müdahale Tasarımı ve Simülasyonlar	15%
14	Restorasyon Süreçlerinin İyileştirilmesi ve Simülasyonu	14%
15	Koruma ve Bakım Stratejilerinin Planlanması	41%
16	Birlikte Çalışılabilirlik (Interoperabilite) ve Semantik Zenginleştirme	60%
17	Parametrik Tekrarlı Eleman Modelleri	48%
18	Dijital İkiz Oluşturma	45%
19	Kapsamlı Dokümantasyon ve Sürekli Erişim	57%
20	Yaşam Döngüsü Yönetimi ve Sürekli İzleme	41%
21	Sürdürülebilirlik ve Performans İyileştirmeleri	12%
22	Kültür Miras Turizminin Geliştirilmesi ve Yönetimi	5%
23	İnsan Merkezli Konfor Takibi	2%
24	Kültür Mirası İle Etkileşim ve Kullanıcı Deneyimi	12%
25	Dijital Arşiv Oluşturma	42%
26	Kültürel Mirasın Geleceğe Taşınması	24%
27	Yapısal Tipolojilerin Belirlenmesi	20%
28	Risk Yönetimi ve Önleyici Koruma	35%

Şekil 3.16 Vaka çalışmalarında vurgulanan faydalar.

3.3.4.2 TYBM Uygulama Sürecindeki Temel Kısıtlar

TYBM'nin faydalarının yanında literatürde yer alan vaka çalışmalarında yöntemin uygulama sürecinde karşılaşılan teknik ve operasyonel kısıtlar da bulunmaktadır. Bu kısıtlar yalnızca kullanılan yazılım ve donanım altyapısıyla ilgili olmaktan ziyade miras yapılarının kendine özgü fiziksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

İncelenen vaka çalışmalarında dayalı yapılan değerlendirmede, özellikle veri yönetimi ve modelleme süreçlerine ilişkin zorlukların öne çıktığı görülmektedir. Veri yoğunluğu ve yönetim zorlukları (%74), zaman ve efor gereksinimi (%73) ile modelleme süreçlerindeki teknik güçlükler (%70'e varan oranlarda) en sık karşılaşılan sorunlar arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra, karmaşık geometrilerin modellenmesi (%52), yazılımsal sınırlamalar (%52) ve veri toplama süreçlerindeki zorluklar da (%57) uygulama sürecini doğrudan etkileyen temel faktörlerdir.

Birlikte çalışabilirlik sorunları, yazılımlar arası uyumsuzluk (%36) ve veri entegrasyonu süreçlerindeki aksaklıklar (%37) ile birlikte değerlendirildiğinde TYBM'nin henüz standartlaşmış bir iş akışına sahip olmadığını ortaya koymaktadır. Parametrik eleman kütüphanelerinin yetersizliği (%39) ve LOD sınırlamaları (%46), modelin detay seviyesi ile doğruluk seviyesi arasındaki dengeyi zorlaştıran faktörler olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte veri temelli kısıtlar, tarihsel verilerin yetersizliği veya güvenilirlik sorunları (%25), bu verilerin yorumlanmasında uzmanlık gereksinimi (%24) ve veri entegrasyonundan kaynaklanan problemler (%37) TYBM'nin analitik potansiyelini sınırlayan faktörler arasındadır.

Bu sınıflandırma TYBM'nin uygulama sürecinde karşılaşılan zorlukların yalnızca teknik boyutla sınırlı olmadığını, veri yönetimi ve entegrasyonu, disiplinler arası koordinasyon ve metodolojik standartlaşma eksiklikleriyle ilişkili olduğunu gösteren bir çerçeve sumaktadır (Şekil 3.17).

	VAKA ÇALIŞMALARINDA VURGULANAN KISITLAR	
1	Karmaşık Geometriler ve Uyum Sorunları	69%
2	Modelleme Zorlukları	71%
3	Yazılımsal Sınırlar	52%
4	Yazılımlar Arası Uyumsuzluk	36%
5	Donanımsal Sınırlar	16%
6	Bölünmüş Modelleme İhtiyacı	20%
7	Standartlaşma Sorunları ve Eksiklikleri	26%
8	Yüksek Maliyet ve Uzmanlık Gereksinimi	43%
9	Veri Toplama Zorlukları	57%
10	Veri Yoğunluğu ve Yönetim Zorlukları	74%
11	Tarihsel Verilerin Yetersizliği, Erişim Sorunları ve Güvenilirliği	25%
12	Tarihsel Verilerin Yorumlanmasında Uzmanlık Gereksinimi	24%
13	TYBM Yönteminin Sınırlı Yaygınlığı ve Uygulama Deneyimi	7%
14	Parametrik Eleman Kütüphanesi Eksikliği	39%
15	LOD Sınırlamaları	46%
16	Deformasyon ve Hasarların Modellenmesindeki Sınırlamalar	22%
17	Tahribat Yüzünden Bazı Yapısal Testlerin Eksikliği (karot vb)	4%
18	Disiplinlerarası İş Birliğinde Zorluklar	10%
19	Uzun Vadeli Koruma ve Arşivleme Zorlukları	3%
20	Manuel Müdahale Gereksinimi	31%
21	Belge Ekleme Sınırlamaları	5%
22	Sınırlı Özelleştirme Alanları	13%
23	Zaman ve Efor Gereksinimi	73%
24	Tipolojik Çeşitliliğin Yönetimi	23%
25	Veri Çeşitliliği ve Entegrasyon Zorlukları	37%
26	Model Güncelliğinin Sağlanması	30%
27	Birlikte Çalışılabilirlik (Interoperabilite) Eksikliği	23%
28	Çevresel Koşullar	5%
29	Şartname gerekliliği	1%

Şekil 3.17 Vaka çalışmalarında vurgulanan kısıtlar.

3.3.4.3 Literatürdeki Araştırma Boşlukları ve Gelecek Projeksiyonları

Mevcut çalışmaların sentezi, TYBM alanında akademik araştırmaların yoğunlaşması gereken kritik alanları şu şekilde işaret etmektedir:

Otomasyon ve Veri İşleme: Nokta bulutlarından modele geçiş (Scan-to-BIM) süreçlerindeki manuel iş yükünü azaltacak ve anlamsal bilgileri (semantic data) modele otomatik entegre edecek yazılımsal eklentilerin geliştirilmesi.

İleri Teknolojilerle Entegrasyon: Yapay zekâ (AI) tabanlı analizlerin TYBM modellerine uygulanması, VR (Sanal Gerçeklik) kullanımının yanı sıra AR (Artırılmış Gerçeklik) ve MR (Karma Gerçeklik) teknolojilerinin şantiye yönetimi ve koruma süreçlerine dahil edilmesi.

Akıllı Kent ve Yönetişim: TYBM modellerinin "Akıllı Şehir" ekosistemlerine entegrasyonu; yangın, sağlık ve güvenlik yönetimi gibi alanlarda hazır modeller sunan bölgesel ve evrensel kütüphanelerin oluşturulması.

Sonuç olarak, dünyada BS 7913 ve COTAC gibi rehber dökümanlarla çerçevesi çizilen TYBM standartlarının, yerel koruma yaklaşımlarımızı ve ulusal mevzuatımızı referans alacak şekilde ülkemizde de geliştirilmesi bir zorunluluk arz etmektedir (Bastem S. , 2021).

3.4 Yapısal Sağlık İzleme ve Nesnelerin İnterneti (IoT) Teknolojileri

Yapısal Sağlık İzleme (YSİ), yapıların kullanım ömürleri boyunca sergiledikleri davranışların ve performans değişimlerinin sensör tabanlı sistemler aracılığıyla izlenmesini sağlayan bütüncül bir yaklaşımdır. Bu sistemler, yapıya yerleştirilen sensörler aracılığıyla elde edilen verilerin toplanması, işlenmesi ve yorumlanması süreçlerini kapsayarak, yapı davranışının zaman içerisindeki değişimini ortaya koymayı amaçlamaktadır (Banfi F. , 2017).

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri ise fiziksel nesnelerin sensörler, iletişim altyapısı ve veri işleme yetenekleri aracılığıyla birbirleriyle ve merkezi sistemlerle bağlantılı hale gelmesini sağlayan dijital bir ekosistem sunmaktadır. Bu sayede, yapıdan elde edilen çevresel ve yapısal verilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi, iletilmesi ve değerlendirilmesi mümkün hale gelmektedir. IoT kavramı ilk olarak

1999 yılında Kevin Ashton tarafından, tedarik zinciri süreçlerinde nesnelerin tanımlanması ve izlenmesi amacıyla ortaya konmuştur. Gelişen kablosuz iletişim teknolojileri, gömülü sistemler ve bulut bilişim altyapıları ile birlikte IoT, günümüzde farklı disiplinlerde yaygın olarak kullanılan siber-fiziksel sistemlerin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir (Cicioğlu & Çalhan, 2020).

YSİ ve IoT teknolojilerinin kültür mirası ve afet yönetimi alanlarında kullanımı, tarihi yapıların korunmasında önleyici yaklaşımların geliştirilmesine olanak sağlayan önemli bir sistemdir. Özellikle deprem, sel ve yangın gibi afetler öncesinde ve sonrasında yapı davranışındaki değişimlerin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi, yapısal bütünlüğün değerlendirilmesi açısından kritik bir avantaj sunmaktadır. IoT tabanlı kablosuz sensör ağları yapıya müdahale etmeyen yapısı sayesinde, erişimi güç ve hassas tarihi yapılarda uzun süreli ve sürekli gözlem yapılmasını mümkün kılmaktadır.

Bu sistemler aracılığıyla elde edilen veriler, çevresel etkiler ve dinamik yüklerin yapı üzerindeki etkilerinin izlenmesini sağlayarak, potansiyel hasarların erken aşamada tespit edilmesine ve müdahale süreçlerinin zamanında planlanmasına katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, elde edilen verilerin yalnızca sayısal veya grafiksel çıktılar olarak değerlendirilmesi yeterli olmayıp, bu verilerin yapının mekânsal ve yapısal bileşenleri ile ilişkilendirilerek anlamlandırılması gerekmektedir.

Bu bağlamda, Yapısal Sağlık İzleme ve IoT teknolojileri, fiziksel ortamdan elde edilen verilerin dijital model ortamına aktarılmasını sağlayarak, TYBM tabanlı modellerin statik bir belgeleme aracı olmanın ötesine geçip dinamik bir karar destek sistemine dönüşmesini mümkün kılmaktadır.

Tarihi yapılarda izleme amaçlı sensörler kullanımlarına göre 4 kategoride toplanabilir:

i. **Mikroiklim ve Çevresel İzleme:** Tarihi yapıların ve içindeki eserlerin korunmasında en temel faktör çevresel koşulların stabil tutulmasıdır.
   Sıcaklık ve nem sensörleri, termal değişimler ve nem dengesizliklerini izleyerek malzeme bozulmalarının erken tespitini sağlar. Hava kalitesi sensörleri ise hava kirliliği, duman ve çeşitli gazların varlığını izleterek tarihi eserler üzerindeki kimyasal etkilerin belirlenmesini sağlar.

ii. **Yapısal Sağlık ve Stabilite İzleme:** Özellikle yoğun kentsel alanlarda bulunan anıtsal yapılar, trafik yükü ve sismik hareketler gibi dinamik etkiler altında sürekli bir stres altındadır.

Tarihi yapılar, trafik ve sismik etkiler gibi dinamik yükler altında sürekli izlenmelidir. Titreşim sensörleri yapının dinamik davranışını değerlendirirken, ultrasonik sensörler iç boşluk ve çatlakları tespit eder. Eğim ve deformasyon ölçümleri ise yapıdaki geometrik değişimleri hassas şekilde izler.

iii. **Biyolojik Bozulmalar ve Zararlıların Takibi:** Tarihi yapılardaki ahşap bileşenlerin (kirişler, tavanlar, mobilyalar) korunması, gözle görülmesi zor olan biyolojik tehditlerin erken teşhisine bağlıdır.

Ahşap ve organik bileşenlerin korunması, biyolojik bozulmaların erken tespiti ile mümkündür. Akustik veya titreşim tabanlı sensörler böcek varlığını belirlerken, nem verilerine dayalı analizler mantar ve küf oluşumuna yönelik riskli koşulları ortaya koyar.

iv. **Güvenlik ve Afet Önleme:** Kültür mirası alanlarında meydana gelen yangın ve gaz sızıntısı gibi afetler, geri dönüşü olmayan kayıplara sebep olabilmektedir. Yangın ve gaz sensörleri ani risklere karşı erken uyarı sağlar. Su seviyesi ve basınç sensörleri ise özellikle kıyı yapılarında çevresel etkilerin izlenmesine ve bakım stratejilerinin geliştirilmesini sağlar (Maksimović & Ćosović, 2019).

Kültürel miras alanlarında sensörler aracılığıyla elde edilen veriler, salt olarak sayısal değer kümesinden ibarettir. Bu verilerin tarihi yapıların korunmasında etkin bir karar destek mekanizmasına dönüşebilmesi için, mekânsal bağlamla ilişkilendirilmesi ve yapı elemanları bazında görselleştirilmesi gerekmektedir. Bu noktada, Nesnelerin İnterneti (IoT) ile Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) entegrasyonu, sahadan gelen dinamik veri akışını dijital bir arayüzle buluşturarak "Dijital İkiz[15]" kavramının temelini oluşturur. Statik modellerin yaşayan, bilgi veren ve muhtemel riskleri öngörebilen akıllı modellere dönüşümü, bu iki

[15] Dijital İkiz: Dijital ikiz kavramı ilk olarak 2003 yılında Michael Grieves tarafından tanıtılmıştır. Dijital ikiz, potansiyel veya gerçek bir fiziksel varlık, söz konusu fiziksel varlığın dijital bir temsili ve fiziksel ile dijital varlıkları birbirine bağlayan dinamik veri akışı olmak üzere 3 bileşenden oluşur. Yapı Bilgi Modellemesi, nesnenin statik bir modelini oluşturmaya odaklanırken dijital ikiz gerçek zamanlı değişiklikleri ve etkileşimleri yakalayabilen dinamik, uyarlanabilir bir model sağlamayı amaçlamaktadır (Tokdemir & Orhan, 2026).

teknolojinin yöntemsel bir iş akışı çerçevesinde birleşmesiyle mümkündür (Şekil 3.18).

3.4.1 IoT Teknolojilerinin YBM Ortamına Entegrasyonu

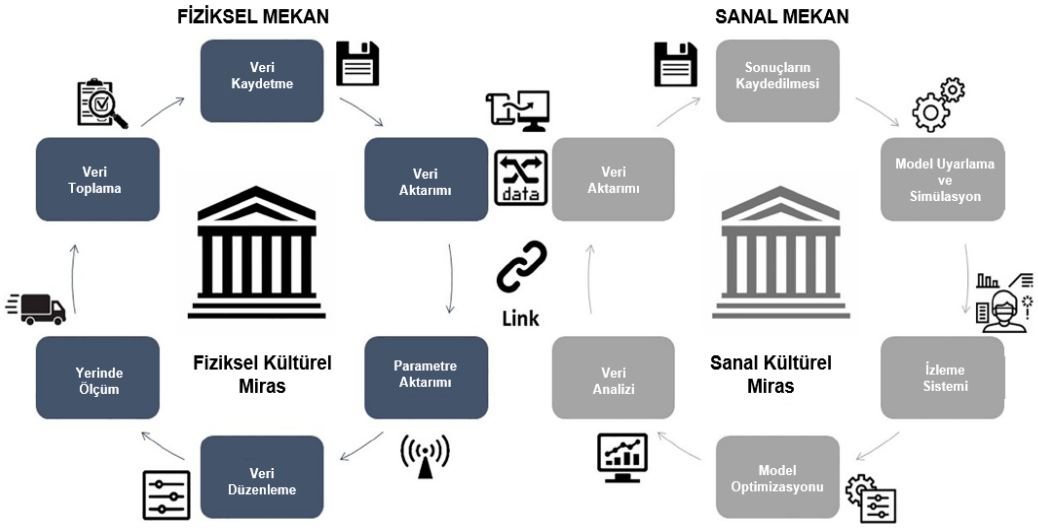
IoT ve YBM entegrasyonu, fiziksel modelden toplanan verilerin dijital modelin parametrelerine entegre edilmesi sürecidir. Bu entegrasyon, tarihi yapıların yönetimini geleneksel hasar sonrası müdahaleden, veriye dayalı proaktif korumaya taşır.

Veri Senkronizasyonu ve Zaman Serisi Analizi

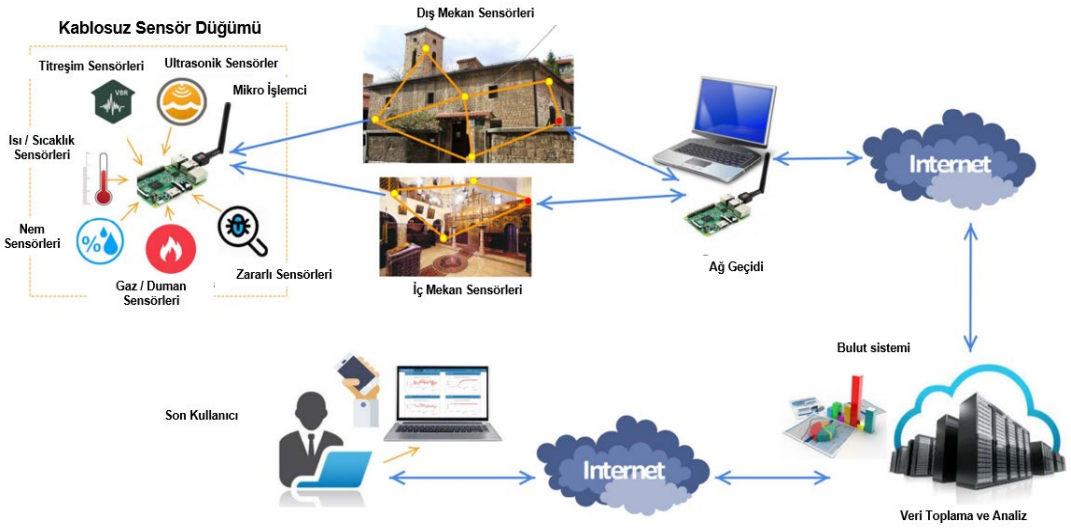
Bu entegrasyonun temel hedefi, sensör ağlarından elde edilen zaman serisi verilerinin YBM ortamında tanımlı yapı bileşenleri ile ilişkilendirilmesidir. Sürecin başarısı, gerçek zamanlı veri aktarımının etkinliğine bağlıdır. Özellikle çevresel koşullardaki değişimlerin yapı malzemesi üzerindeki etkilerinin izlenebilmesi için veri ile model arasındaki gecikmelerin en aza indirilmesi ve yapı bileşenlerine ait performans verilerinin düzenli olarak güncellenmesi gerekmektedir (Desogus ve diğerleri, 2021).

Statik Modelden Dinamik Canlı Model Yönetimine Geçiş

Geleneksel YBM modelleri, yapının inşa edildiği dönemde sahip olduğu geometrik ve teknik özellikleri yansıtan modellerdir. IoT entegrasyonu sayesinde bu modellere dinamik parametreler eklenerek, yapının dijital ortamda yaşayan bir kopyası oluşturulmaktadır. Bu bağlamda, modelde yer alan bir kolon yalnızca "taş" veya "yük taşıyıcı" olarak tanımlanmakla kalmaz; aynı zamanda IoT ile birlikte, ilgili kolonun anlık titreşim değerleri, yüzey nem oranı ve eğilme açısı gibi canlı verilere de erişim sağlanır. Bu yaklaşım, yapıların operasyonel aşamalarındaki performanslarının dijital modeller üzerinde simüle edilmesini mümkün kılar (Ehab ve diğerleri, 2024).



Şekil 3.18 Kültürel Miras Yapı Alanlarında "Dijital İkizler" – yazar tarafından çevrilmiştir. (Lucchi, 2023).



Şekil 3.19 IoT tabanlı izleme sistemi prensibi (Maksimović & Ćosović, 2019).

Sinyal İşleme, Veri Temizleme ve Doğruluk

Fiziksel ortamdan elde edilen ham sensör verileri; elektromanyetik parazitler, sensör hataları ve kablosuz iletim sırasında oluşan veri kayıpları nedeniyle çoğu zaman “yüksek gürültü” içerebilir. Bu nedenle verilerin YBM ortamına entegre edilmeden önce doğruluğunu sağlamak amacıyla bir ön işleme sürecinden geçirilmesi gerekmektedir.

Dijital sinyal işleme[16] teknikleri ve gelişmiş filtreleme algoritmaları kullanılarak aykırı değerler temizlenir ve sinyal-gürültü oranı optimize edilir. Bu süreç, modelin dijital ikiz olarak güvenilirliğini ve yapısal sağlık analizlerinin hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Doğruluğu onaylanmış ve anlamlandırılmış veri, YBM modelindeki "analitik model" katmanına aktarılarak, yapının dinamik karakteristiklerindeki ve yapısal kapasitesindeki sapmaların gerçek zamanlı olarak teşhis edilmesine olanak tanır (Hu ve diğerleri, 2024).

Semantik Zenginleştirme ve Veri Eşleme

IoT sensörlerinden elde edilen dinamik verilerin YBM modelindeki dijital nesnelerle entegre edilerek anlamlandırılması sağlanır. Bu süreçte "veri eşleme", sensörlerden gelen zaman serisi verilerinin, görsel programlama araçları ve özel API[17]'lar aracılığıyla model içerisindeki ilgili yapısal bileşenlere otomatik olarak aktarılmasıyla gerçekleştirilir. Veriler, modeldeki nesnelere tanımlanan "paylaşılan parametreler" üzerinden aktarıldığı için, sayılar binanın dijital ikizinde mekânsal bir karşılık bularak "semantik" bir değer kazanır. Bu entegrasyon sayesinde, binaya ait toplanmış veriler sadece grafiksel tablolar olarak değil, doğrudan binanın yapısal organizasyonuyla ilişkilendirilmiş, analiz edilebilir ve yönetilebilir bilgi setlerine dönüşür (Desogus ve diğerleri, 2021).

[16] Dijital sinyal işleme (DSP): Ses, video, sıcaklık, basınç veya konum sinyalleri gibi gerçek dünya sinyallerini dönüştüren ve özel çipler tarafından matematiksel olarak işlenebilmeleri için dijitalleştiren sistemdir (Horn, 2024).

[17] API (Application Programming Interface): Uygulama programlama arayüzü. Bir yazılımın başka bir yazılımda tanımlanmış işlevlerini kullanabilmesi için oluşturulmuş bir tanım (Wikipedia, 2026).

3.4.2 Sensör Türleri

IoT tabanlı Yapısal Sağlık İzleme sistemlerinde kullanılan sensör tipleri, taşıyıcı sistem analizlerinin kapsamı doğrultusunda, yapıların izlenebileceği fiziksel parametreler çerçevesinde başlıklar halinde sınıflandırılmaktadır.

i. İvmeölçerler: Yapının titreşim, frekans ve dinamik davranışlarını ölçer. Rijitlik kaybı, taşıyıcı sistemde görünmeyen hasarlar gibi hasarları yakalar. Deprem, rüzgar gibi dinamik etkenlerle ilişkilendirilebilir. Erken uyarı ve performans izleme için çok uygun sensörlerdir. Ancak hasarın tek başına nerede olduğunu belirlemekte yeterli değildir. Yapının dinamik elemanlarındaki değişimlerde erken hasar tespiti için uygundur.
ii. Gerinim ve Sıcaklık Ölçerler (Fiber Optik Sensörler): Yapı malzemesindeki şekil değiştirmeleri ölçer. Çatlak başlangıçlarını, aşırı yüklenmeleri tespit eder. Ancak bağlı bulunduğu bölüme dair noktasal veri üretir, tüm yapıyı takip etmek noktasında maliyetlidir. Yapıya müdahale etmeden kritik elemanlarda lokal hasar izleme için uygundur.
iii. Akustik Emisyon Sensörleri: Malzeme içindeki mikro çatlaklardan çıkan ses dalgalarını ölçümler. Malzeme yorulması, kılcal çatlaklar gibi hasarları oluştuğu anda algılar. Ancak ses dalgalarıyla çalıştığı için gürültüye karşı çok duyarlı ve karmaşık veri analizi gerektiren sensörlerdir. Hasarın oluşmasına dair zaman verisini sağlamak için uygundur (Deng & Chen, 2023).

3.4.3 Veri Analizi ve Hasar Tespit Yöntemleri

Literatürdeki örneklerde incelenen veri analizi yaklaşımları, bu tez kapsamında yapısal davranışın yorumlanma biçimlerine göre 3 ana kategoride gruplandırılmıştır:

i. Fiziksel ve İstatistik Temelli Analizler:

Bu gruptaki yöntemler, yapısal davranışın fiziksel prensiplere dayalı olarak yorumlanmasına odaklanmaktadır. Sensörlerden elde edilen ivme, frekans veya gerinim verileri üzerinden modal parametrelerdeki değişimler analiz edilerek hasar tespiti yapılmaktadır. Özellikle doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekillerindeki sapmalar, taşıyıcı sistemde meydana gelen rijitlik kayıplarının göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Bu yaklaşımın temel avantajı, elde edilen sonuçların mühendislik açısından yorumlanabilir ve fiziksel olarak açıklanabilir olmasıdır. Ancak karmaşık yapı sistemlerinde ve çevresel etkilerin yoğun olduğu durumlarda, bu yöntemlerin hasarın yeri ve şiddeti konusunda sınırlı bilgi sunduğu belirtilmektedir. Bu nedenle fiziksel temelli analizler, çoğunlukla ileri veri odaklı yöntemler için bir referans veya ön değerlendirme aracı olarak kullanılmaktadır.

ii. Makine Öğrenmesi Tabanlı Analizler:

Makine öğrenmesi tabanlı yöntemler, sensör verilerinden elde edilen belirli özelliklerle hasar durumlarını sınıflandırır. Ancak, uzmanlık gereksinimi ve karmaşık senaryolarda genelleme zorluğu bu yöntemin başlıca sınırlamalarıdır.

iii. Derin Öğrenme Tabanlı Analizler:

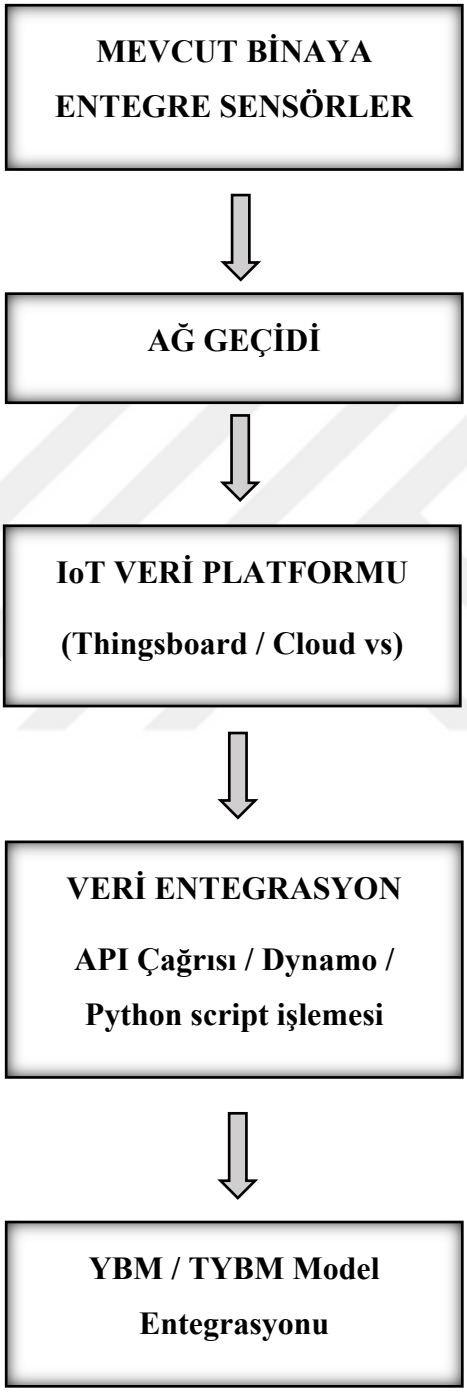
IoT tabanlı YSİ sistemlerinde sensör verilerini analiz etmek için derin öğrenme yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, veri içindeki karmaşık ilişkileri tespit ederek erken hasar belirtilerini belirlemeye yardımcı olur; ancak fazla veri gereksinimi ve yüksek hesaplama maliyetleri önemli sınırlamalardır.

3.4.4 YBM Ortamına Veri Transferi

IoT tabanlı sistemlerden elde edilen verilerin YBM ortamına entegrasyonu, literatürde farklı veri aktarım yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, IoT platformunda depolanan sensör verileri, REST[18] tabanlı bir API aracılığıyla dijital ortama çekilir. IoT platformundan çekilen veriler, bir entegrasyon katmanı (Dynamo / Pyhton vb) üzerinden işlenir; JSON[19] formatındaki yanıtlar ayrıştırılarak YBM modelindeki sensör / obje parametrelerine güncel değerler olarak yazılır. Bu sayede mekân ya da obje bazlı güncel performans verileri YBM ortamına dinamik olarak aktarılabilmektedir. Bu bağlamda, YBM modeli zaman serisi verilerin depolandığı bir platform olmaktan ziyade, anlık veya özet performans bilgilerini sunan bir karar destek arayüzü olarak kullanılmaktadır. Böylece sensör verilerinin yönetimi IoT platformunda sürdürülürken, YBM ortamı mekân / yapı / eleman bazlı

[18] REST: Representational State Transfer iki farklı yazılım sisteminin internet üzerinden standart ve basit kurallarla veri alışverişi yapmasını sağlayan bir mimari yaklaşımdır (Codecademy, 2026).
[19] JSON: Java Script Object Nation verileri hem insan tarafından okunabilir hem de makine tarafından karşılaştırılabilir bir şekilde depolamak ve değiştirmek için kullanılan metin tabanlı bir formattır (Erickson, 2024).

performans izleme, görselleştirme ve dijital ikiz temelli analizler için etkin bir araç olarak kullanılabilmektedir (Desogus ve diğerleri, 2021).

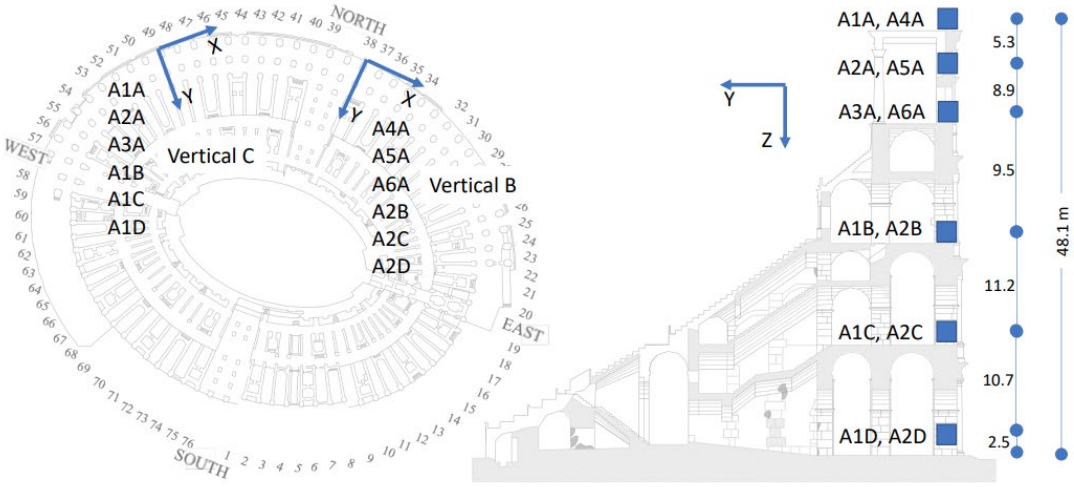


Şekil 3.20 Mevcut bir yapıda IoT tabanlı verilerin model ortamına aktarılmasına yönelik veri akış şeması.

3.4.5 Literatürdeki Sensörlü İzleme Örnekleri

Roma'daki Kolezyum yapısı, önleyici koruma kapsamında gerçekleştirilen sensör tabanlı izleme çalışmaları açısından literatürde kritik örneklerden biridir. Özellikle metro hattı inşaatı sonrasında yapının maruz kaldığı çevresel etkilerin izlenmesi ve 2016–2017 İtalya depremlerine verdiği yapısal tepkilerin değerlendirilmesi amacıyla kapsamlı bir izleme sistemi kurulmuştur. Araştırmanın temel metodolojisi, sahadan toplanan ortam titreşimi ve sismik veri çıktılarını, yapının karmaşık geometrisini ve malzeme heterojenliğini temsil eden bir sonlu elemanlar modeli ile entegre etmeye dayanmaktadır.

Elde edilen veriler üzerinden yapılan modal analizler, anıtın dinamik davranışlarının zaman içinde stabil kaldığını ve çevresel etkilerin yapısal bütünlükte belirgin bir bozulmaya yol açmadığını doğrulamıştır. Bu çalışma, sensör tabanlı sürekli izlemenin, tarihi yapıların risk analizlerinde kullanılan sayısal modellerin güncellenmesi ve olası hasarların erken safhada tespiti için sunduğu potansiyeli somut bir şekilde ortaya koymaktadır (Vestroni ve diğerleri, 2020).

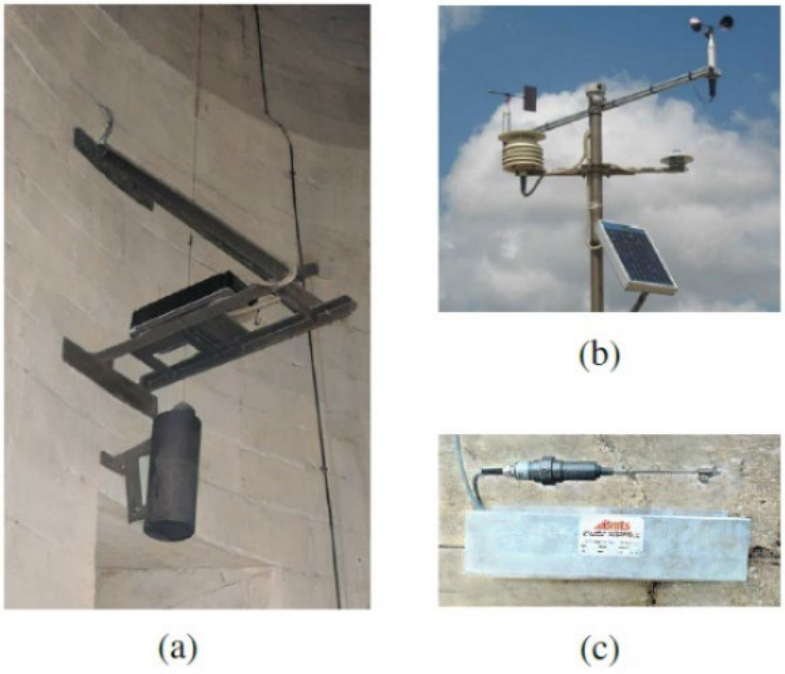


Şekil 3.21 İvmeölçer Sensörlerinin ve Pozitif Yön Kanallarının Konumları (Vestroni ve diğerleri, 2020, s. 4).

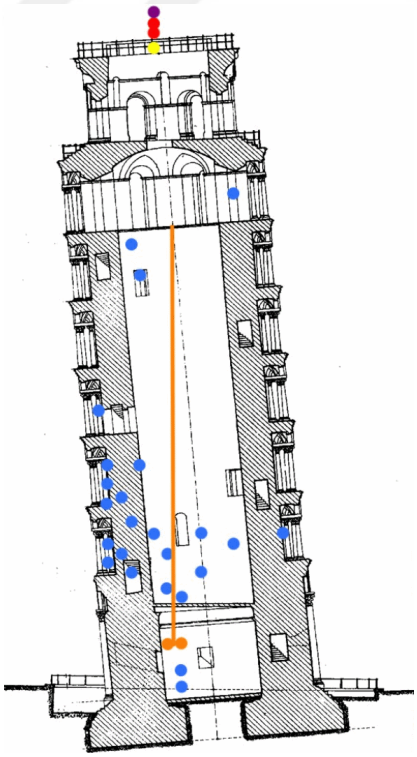


Şekil 3.22 Kolezyum'daki sensörlerden örnekler (Wireless Structural Health Monitoring of the Colosseum, 2024).

İtalya'daki Pisa Kulesi, yapısal sağlık izleme (SHM) teknolojilerinin tarihsel evrimi ve modern derin öğrenme (DL) yaklaşımlarının uzun dönemli veri setlerine uygulanabilirliği açısından literatürdeki en dikkat çekici örneklerden biridir. Kulede 2000-2002 yılları arasında gerçekleştirilen stabilizasyon müdahalelerinin (toprak altı kazı çalışmaları) yapısal etkilerini analiz etmek amacıyla, geleneksel deterministik yöntemlerin ötesine geçen "agnostik derin öğrenme" modelleri tercih edilmiştir. Analizlerde, 1993-2006 yıllarını kapsayan 13 yıllık bir veri seti kullanılmıştır. İzleme sistemi, mekanik değişimleri ölçen 25 adet deformometre ve hassas dönme hareketlerini takip eden 2 adet telekoordinometrenin yanı sıra rüzgar ve sıcaklık gibi çevresel sensörlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada, yapısal davranışın geometrik bir model yerine doğrudan veri ile öğrenildiği "agnostik" (yapı bilgisinden bağımsız) bir metodoloji benimsenmiştir. Elde edilen bulgular, Transformer modelinin yapısal davranış tahmininde en yüksek doğruluğu sağladığını, LSTM modelinin ise yapıdaki değişimleri tespit etmede daha hassas sonuçlar verdiğini göstermektedir (Parola ve diğerleri, 2025).



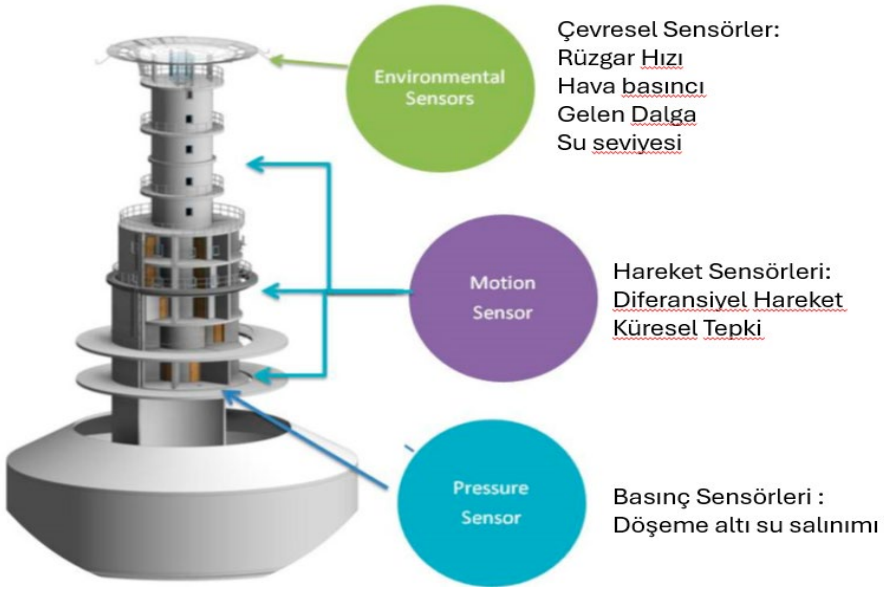
Şekil 3.23 Pisa kulesi sensörleri: a) Telekoordinometre, b)Rüzgar hızı ve yönü, c) Deformemetre (Parola ve diğerleri, 2025).



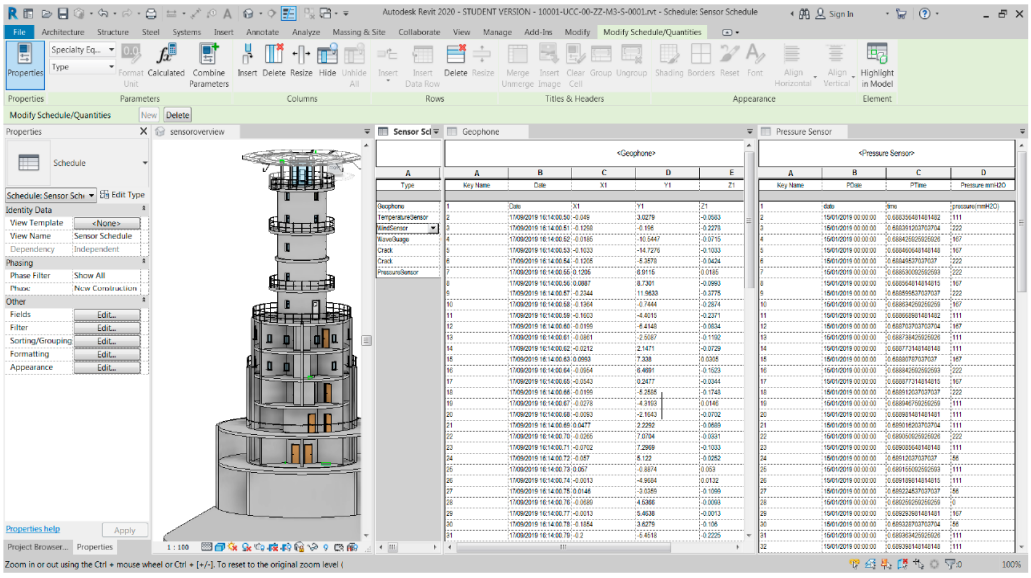
Şekil 3.24 Çoklu Sensör Sistemi (Parola ve diğerleri, 2025).

İrlanda'nın Dublin kıyısı açıklarında bulunan Kish Bank Deniz Feneri, mevcut açık deniz yapılarının varlık yönetimi ve yapısal sağlık izleme (SHM) süreçlerine entegrasyonu açısından literatürdeki kritik örneklerden biridir. O'Shea ve Murphy (2020) tarafından sunulan çalışmada, 1965 yılında inşa edilen bu betonarme teleskopik yapı için statik bir Revit modelini dinamik bir izleme aracına dönüştüren bir çerçeve geliştirilmiştir. Çalışmanın metodolojik merkezinde, açık denizin zorlu koşullarında toplanan verilerin YBM (BIM) ortamına Dynamo görsel programlama aracı kullanılarak otomatik transferi yer almaktadır. İzleme ağı; kule ve kaisson arasındaki olası bağıl hareketleri tespit etmek için ivmeölçer ve geofonlardan, kule tabanındaki açıklanamayan su basıncını izlemek için basınç sensörlerinden ve rüzgar hızı ile dalga yüksekliği gibi çevresel değişkenleri takip eden harici sensörlerden oluşmaktadır (O'Shea & Murphy, 2020).

Sistemin kurulumu ve sürdürülebilirliği aşamasında, özellikle teknolojik altyapı ve çevresel faktörlerden kaynaklanan zorluklarla karşılaşılmaktadır. Mevcut IFC şemalarının, karmaşık sensör ağlarını ve özel YSİ bileşenlerini tanımlamadaki yetersizliği, farklı BIM platformları arasındaki "birlikte çalışabilirlik" kapasitesini kısıtlamakta ve veri kaybı riskini artırmaktadır. Bu kısıtlılığa rağmen, geliştirilen özel kodlar sayesinde sensör verileri Excel formatından Revit ortamına aktarılmış ve yapısal sağlık verileri model üzerinde görselleştirilmiştir. Özellikle kule tabanındaki su basıncı verileri ile Dublin Limanı'ndaki gelgit sinyalleri arasında kurulan korelasyon, yapının geçirgenliği ve içsel su akış yolları hakkında kritik bilgiler sağlamıştır. Bu çalışma, TYBM'nin sadece bir görselleştirme aracı değil, aynı zamanda operasyonel aşamada dinamik bir karar destek sistemi olarak kullanılabileceğini kanıtlamaktadır (O'Shea & Murphy, 2020).



Şekil 3.25 Sensör yerleşim önerisi - yazar tarafından çevrilmiştir (O'Shea & Murphy, 2020).



Şekil 3.26 Revit programı içindeki sensör bilgi ekranı (O'Shea & Murphy, 2020).

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerine ilişkin araştırmaların büyük oranda akıllı yapılar, kentsel sistemler ve erken uyarı altyapıları üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Güncel literatür örnekleri, Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) ve IoT teknolojilerinin kültür mirası ile afet yönetimi alanlarındaki kullanımının artış eğiliminde olduğunu doğrulamaktadır. Bu sistemler, özellikle afet ve acil durum

süreçlerinde yapının mevcut durumuna ilişkin gerçek zamanlı veri üretimi sağlayarak mimarlık ile kriz yönetimi arasında önemli bir kesişim kümesi oluşturmaktadır.

Ancak mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunun bu verilerin mimari bilgi modelleriyle bütünleştirilmesi ve yapı elemanı ölçeğinde karar destek mekanizmalarına dönüştürülmesi konusunda yeterli yöntemsel çerçeve ortaya koymadığı anlaşılmaktadır. Literatürde ayrıca, IoT verilerinin (örneğin sıcaklık, nem gibi parametreler) YBM modellerine genellikle elle girilen yöntemlerle, CSV dosyaları aracılığıyla aktarıldığı; bunun ise veri güncelliğinde gecikmelere ve aktarım hatalarına yol açabildiği ifade edilmektedir. Öte yandan, son dönemdeki bazı çalışmalarda sensör verilerinin herhangi bir müdahale olmaksızın doğrudan model ortamına aktarılmasını sağlayan otomatik veri akış şemaları görülmektedir.

IoT, mimarlık ve afet yönetimi ilişkisi çoğunlukla kavramsal düzeyde tartışılmakta olup, bu üç alanı tarihi yapılar bağlamında bütüncül ve uygulamaya dönük bir sistem içinde değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, YSİ sistemlerinden elde edilen verilerin Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi kapsamında yapı bileşenleriyle ilişkilendirildiği, sensör tabanlı izleme ve IoT teknolojileriyle bütünleşik aktif izleme altyapılarının geliştirilmesine yönelik önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir (Özdemir ve diğerleri, 2025).

Literatürde tespit edilen yöntemsel eksiklikler ve güncel teknolojik imkanlar birlikte değerlendirildiğinde; önerilen entegrasyon modelleri, benzer yapısal karakteristiklere ve sismik hassasiyete sahip anıtsal yapılar için kritik bir operasyonel çerçeve sunmaktadır. Özellikle yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde yer alan tarihi dokunun korunmasında, bu tür dijital ikiz tabanlı sistemler, yapısal risklerin proaktif yönetimi, hasar kestirimi ve müdahale stratejilerinin optimizasyonu için dinamik bir sayısal zemin oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, kültürel mirasın korunmasını fiziksel müdahalelerle sınırlı kalmaktan kurtararak, yapısal sağlığın sürekli denetlendiği ve verilerin yapı bileşeni ölçeğinde analiz edildiği "yaşayan" bir dijital veri tabanı modeline dönüştürmektedir. Sonuç olarak, geliştirilen aktif izleme altyapıları, anıtların sadece fiziksel bütünlüğünün korunmasına değil, aynı zamanda bilimsel ortamda sürdürülebilir bir dijital veri varlığı olarak temsil edilmesine olanak tanımaktadır.

4
OSMANLI CAMİ MİMARİSİ BAĞLAMINDA TYBM YAKLAŞIMI

Bu çalışma, sürdürülebilir ve önleyici koruma kavramının teknik paydaşlar tarafından daha iyi anlaşılmasını ve teşvik edilmesini sağlamak amacıyla, önceki bölümde tanımlanan araştırma boşluklarına çözüm üretmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda, mimarlık tarihindeki önemi ve deprem riski altındaki yapısal karmaşıklığı nedeniyle Osmanlı camileri odak nokta olarak ele alınmıştır.

İncelenen örnekler ve bu örnekleri sistematik bir biçimde sınıflandıran çalışmalar bağlamında izlenen sonuçlar, çalışmaların ağırlıklı olarak tek yapı modelleme, belgeleme, görselleştirme ve arşivleme kapsamında kaldığını göstermiştir. Kültür varlıklarının korunmasında ve restorasyonunda, TYBM yönteminin sağladığı analiz araçlarını da kapsayan bir güncellenebilir uygulama planı oluşturulması, alanın profesyonellerinin vaka özelinde doğru müdahale kararları vermesini sağlayacağı gibi sürdürülebilir koruma bağlamında kültür mirasının korunmasına katkı sağlayacaktır.

Camiler hem mimari tipolojileri hem de strüktürel özellikleri bakımından İslam dünyasının en önemli yapıları arasında yer alır. Günümüzde birçok tarihi cami hala aktif şekilde kullanılmakta olup, özellikle Türkiye gibi deprem kuşağında bulunan ülkelerde bu yapılar yüksek sismik risk altındadır. Bu yapı tipinin seçilme nedenleri arasında Osmanlı camilerinin mimari temsil gücünün yüksek olması, camilerin İslam kültüründe yalnızca dini değil sosyal olarak da önemli bir konumda bulunması, sismik açıdan incelenmeye değer örnekler sunmaları ve farklı dönemlerdeki müdahalelerle katmanlı yapılar oluşturarak TYBM uygulamaları için zengin veri kaynakları sağlamaları bulunmaktadır.

Bu tez, klasik Osmanlı Camilerinde sıkça görülen dönemsel müdahaleleri, özgün malzeme kullanımlarını ve çevresel etkileri dijital analiz yöntemleriyle değerlendirerek, bu tipolojiye özgü koruma sorunlarına yönelik çok katmanlı bir yaklaşım önermektedir.

Tarihsel ve Kültürel Anlam Olarak Camiler: Osmanlı camileri, kültürel mirasın ayrılmaz bir parçası olarak, mimari kimlik ve dini yaşamın temsilcisi konumundadır. Farklı plan tipolojileri, dönemin estetik, yapısal ve mühendislik yaklaşımlarını yansıtmaktadır. Bu bağlamda tipolojik incelemeler, mimari evrimi ve sosyokültürel bağlamı anlamada temel bir araç sağlar.

Risk ve Yapısal Dayanıklılık Açısından Camiler: Osmanlı camilerinin plan tipolojileri, yapısal sistemler ve dayanıklılık açısından farklılık göstermektedir. Merkezi kubbeli planlar, yük aktarımı ve sismik dayanım açısından optimize edilmiş tasarımlar sunarken, çok kubbeli veya T-planlı yapılar daha karmaşık yük dağılımı sergiler. Bu tipolojik çeşitlilik, deprem ve diğer afetlere karşı değerlendirilmesi gereken farklı risk profilleri sunmaktadır. Dolayısıyla, bu analizler restorasyon stratejilerinin güçlendirilmesi ve güvenlik önlemlerinin geliştirilmesi için kritik veriler sağlar.

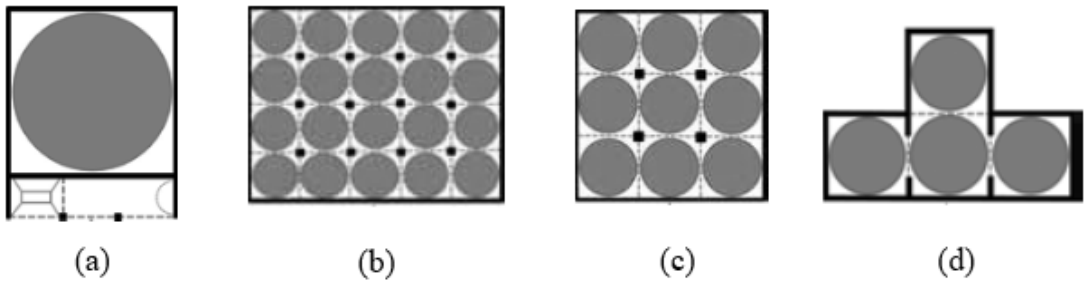
Koruma Stratejilerinin Yöntemsel Gelişimi: Osmanlı camilerinde gözlemlenen farklı yapısal düzenlemeler, koruma stratejilerinin özelleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Merkezi kubbeli camilerde kubbenin taşıyıcı unsurlarla ilişkisi, güçlendirme çalışmalarında öncelikli bir konu olarak ele alınmalıdır. TYBM gibi dijital araçlar, bu tipolojik özellikleri modelleyerek, analiz ve simülasyonlar yoluyla sistematik bir planlama süreci sunmaktadır. Böylelikle restorasyon projelerinde doğruluk, hız ve sürdürülebilirlik sağlanabilir. Ayrıca oluşturulacak modeller, yapıların deprem karşısındaki sismik davranışlarını test etme ve güçlendirme senaryolarını değerlendirmek için önemli araçlar olacaktır.

Planlama ve Uygulama Verimliliği: Farklı tipolojilere dayalı sınıflandırmalar, restorasyon projelerinde sistematik ve disiplinli bir yaklaşım sunar. TYBM tabanlı modeller aracılığıyla yapıların ortak ve özgün nitelikleri dijital ortamda analiz edilerek, tasarım ve uygulama aşamalarında veri temelli karar süreçleri desteklenmektedir. Bu yöntem, zaman yönetiminde optimizasyon sağlamakla birlikte uygulama esnasında stratejik yönlendirme imkânı verir. Modeller sayesinde potansiyel riskler önceden tespit edilerek koruma stratejileri daha etkin biçimde geliştirilebilir. Ayrıca, TYBM'nin sensör teknolojileri ve IoT (Nesnelerin İnterneti) ile entegrasyonu, yapının strüktürel sağlığını gerçek zamanlı izlemeye olanak tanıyan Dijital İkiz oluşturma kapasitesine sahiptir. Bu dinamik modelleme

yöntemi, yüksek riskli anıtsal yapılarda müdahale sonrası yapısal davranışın takibi açısından kritik bir altyapı sunmaktadır.

4.1 Osmanlı Cami Mimarisinde Plan Şemasının Gelişimi

Osmanlı cami mimarisi, beylikten imparatorluğa dönüşüm sürecinde toplumun ihtiyaçlarına cevap verecek nitelikte gelişmiş ve devletin ekonomik gücünün bir göstergesi olarak ön plana çıkmıştır. 14.yydan itibaren evrilen anıtsal yapı kültürünün bir ürünü olarak, 16.yyda Mimar Sinan'ın mimari yaklaşımıyla klasikleşmiş bir yapısal tipolojiye dönüşmüştür. Özellikle kubbe, mekân tasarımın temel bir elemanı olmuştur (Benian, 2011, s. 42).



Şekil 4.1 a) İznik Hacı Özbek Camisi, b) Bursa Ulu Cami, c) Edirne Eski Cami, d) Edirne Muradiye Camisi (Benian, 2011, s. 42-43).

15. yüzyıl ortalarına kadar Osmanlı erken dönem cami mimarisinde, plan kurgusu ve taşıyıcı sistem organizasyonuna göre üç temel tipoloji öne çıkmaktadır: tek kubbeli camiler, çok ayaklı/çok kubbeli ulucami tipi yapılar ve zaviyeli (tabhaneli) camiler. Bu sınıflandırma, yalnızca mekânsal organizasyonu değil, aynı zamanda yük aktarım sistemlerindeki farklılaşmayı da ortaya koymaktadır.

Tek kubbeli camilerde, ibadet mekânı tek bir kubbe ile örtülmekte ve bu kubbenin yükü doğrudan beden duvarları aracılığıyla zemine iletilmektedir. İznik Hacı Özbek Camisi ve İznik Yeşil Camisi bu tipolojinin erken örnekleri arasında yer almaktadır. Bu yapılarda yük aktarım sistemi görece basit ve doğrudan olup, taşıyıcı sistem sınırlı sayıda eleman üzerinden çalışmaktadır.

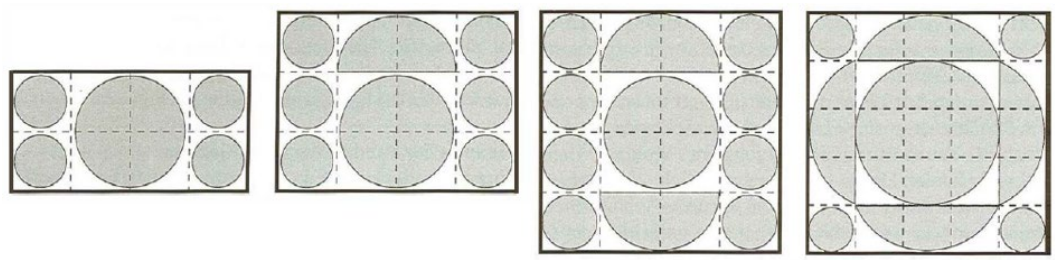
Çok ayaklı ve çok kubbeli Ulucami tipinde ise, iç mekân çok sayıda ayak veya sütunla bölünmekte ve her bir birim ayrı bir kubbe ile örtülmektedir. Bursa Ulu Cami ve Edirne Eski Camisi bu plan tipinin karakteristik örnekleridir. Bu yapılarda

yükler, çok sayıda taşıyıcı eleman aracılığıyla parçalı biçimde zemine aktarılmakta, dolayısıyla yük aktarımı daha yayılı ve modüler bir sistem üzerinden gerçekleşmektedir.

Zaviyeli ya da tabhaneli camiler ise merkezi ibadet mekânının yanlarına eklenen hacimlerle ters "T" formunda plan şemasına sahiptir. Bursa Orhan Gazi Camisi ve Edirne Muradiye Camisi bu tipolojiye örnek olarak verilebilir. Bu yapılarda mekânsal organizasyon, ibadet işlevinin yanı sıra sosyal ve yarı kamusal kullanımları da içerecek şekilde çeşitlenmiş olup, bu durum taşıyıcı sistemde de farklılaşmalara neden olmaktadır.

15.yüzyıl ortalarından itibaren, Osmanlı cami mimarisinde daha bütüncül ve merkezi bir mekân arayışı doğrultusunda belirgin bir dönüşüm yaşanmıştır. Bu sürecin en önemli eşiği olan Edirne Üç Şerefeli Camii (1437-1447), klasik döneme geçiş yapısı olarak tanımlanır. Yapıda merkezi kubbe, mihrap önünde bir duvardan diğerine uzanan büyük bir açıklığa kavuşturulmuş; taşıyıcı ayak sayısı ikiye indirilerek iç mekândaki parçalı yapı aşılmaya başlanmıştır. Bu özellikleriyle yapı, klasik cami mimarisinin temel prensiplerini ortaya koyan öncü bir niteliktedir (Benian, 2011, s. 43).

Benzer şekilde, İstanbul'daki ilk Fatih Camisi de bu dönüşüm sürecinin önemli bir parçası olarak ele alınmaktadır. Bu yapıda ana mekâna girişle birlikte doğrudan merkezi kubbe altına ulaşılması, mekânsal kurguda merkezileşmenin belirgin bir göstergesidir. Mihrap önündeki açıklığın yarım kubbe ile örtülmesi ise, yük aktarımının daha kontrollü biçimde yönlendirilmesini sağlayan önemli bir strüktürel ve mekânsal yenilik olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, Bayezid Camisi'nde daha gelişmiş bir biçimde devam ettirilmiş ve orta kubbeye simetrik eklemlenen yarım kubbeler aracılığıyla mekân bütünlüğü daha ileri bir seviyeye taşınmıştır (Kuban D. , 1997, s. 52-53).

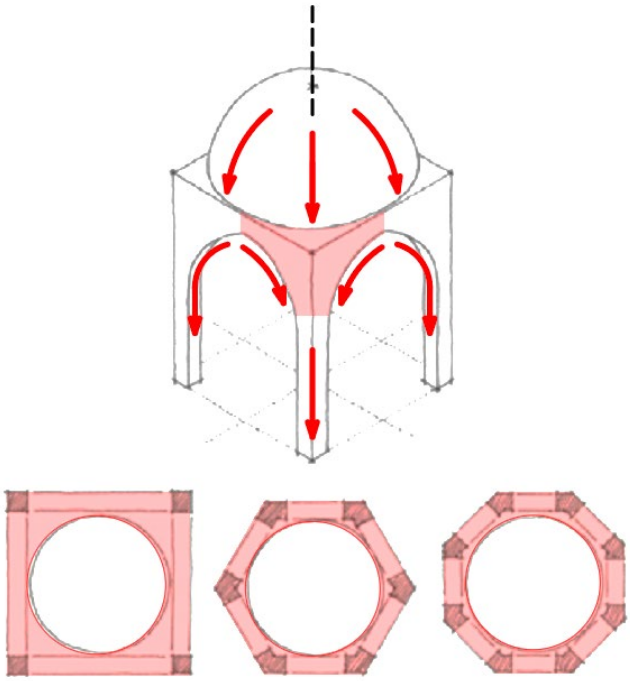


Şekil 4.2 Mekansal gelişimin soyut modüler geometrisi: Edirne Üçşerefeli, Fatih, Bayezid, Şehzade Camileri (Kuban D. , 2021, s. 258).

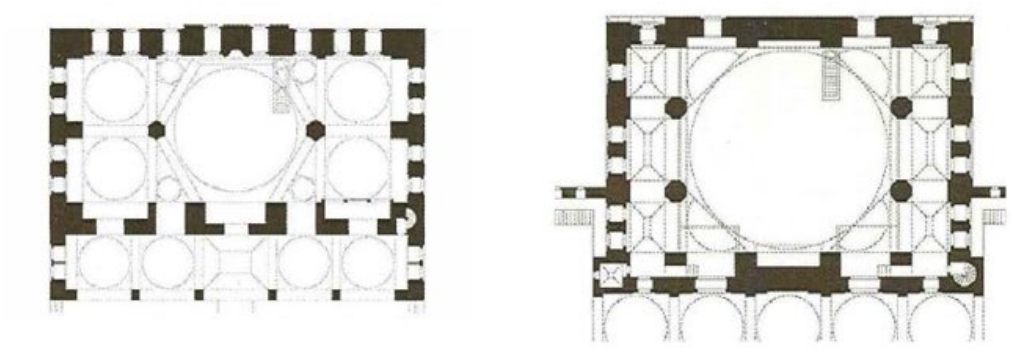
Osmanlı cami mimarisindeki bu gelişim süreci, yük aktarım sistemlerinin parçalı ve yayılı bir düzenden, merkezi ve hiyerarşik bir sisteme evrildiğini göstermektedir. Kubbe, kasnak, kemer ve taşıyıcı ayaklar arasında kurulan bu bütünleşik ilişki, yapının davranışını belirleyen temel strüktürel çerçeveyi oluşturmaktadır. Bu durum, klasik dönem camilerinde yük aktarımının belirli kritik düğüm noktalarında yoğunlaştığını ve yapısal davranışın bu bölgelerde daha hassas hale geldiğini ortaya koymaktadır.

Klasik dönem cami mimarisinde mekânsal kurgu ve taşıyıcı sistemin hiyerarşik bir düzene evrildiği bir mühendislik başarısını temsil eder. Bu dönemde öne çıkan baldaken (çardak) [20] sistemi, ana kubbenin yükünü dört, altı veya sekiz bağımsız taşıyıcı ayak üzerine toplar. Mimar Sinan'la birlikte bu sistem, sadece bir taşıyıcı iskelet olmaktan çıkmış, iç mekânda geometrik sürekliliği ve estetik hiyerarşiyi kuran temel mimari öğe haline gelmiştir. Kubbenin, mekanı çevreleyen beden duvarlarından bağımsız ayaklar üzerine yerleştirilmesi merkezi mekanın daha geniş, açık ve akıcı biçimde kurgulanmasına olanak tanımıştır (Tuluk, 2006, s. 275-276).

[20] Baldaken, Osmanlı cami tasarımının morfolojik temelini teşkil eden bir yapı sistemidir. Bu sistemde ana kubbenin farklı sayıdaki bağımsız taşıyıcı desteğe oturtulmasıyla, merkezi mekân kurgusu biçimlenir (Tuluk, 2006, s. 276).



Şekil 4.3 Dört, altı ve sekiz ayaklı baldaken üzerinde yük aktarım hiyerasisi gösterimi (Tuluk, 2006'dan uyarlanmıştır).



Şekil 4.4 Sinan Paşa Camisi ve altıgen baldaken örneği(solda), Rüstem Paşa camisi ve sekizgen baldaken örneği (sağda) (Kuban D. , 2021, s. 258-259).

Sonuç olarak, klasik dönem plan şeması, yalnızca mekânsal düzenlemeyi değil, aynı zamanda taşıyıcı sistemin tasarımına ilişkin prensipleri de ortaya koymaktadır. Merkezi kubbenin konumu ile ana taşıyıcı ayakların yerleşimi arasındaki ilişki, yükün belirli akslar boyunca aktarıldığını göstermektedir. Bu durum, yapının taşıyıcı sisteminin belli düğüm noktalarında yoğunlaşan strüktürel bir organizasyon üzerinden çalıştığını ortaya koymaktadır (Şekil 4.3).

4.2 Yığma Camilerde Yapısal Kırılganlık Noktaları

Yığma camilerde depreme karşı gösterilen tepki, taşıyıcı sistemin tekil parçalarından ziyade bütünsel strüktürel yapı, malzeme sürekliliği ve geometrik oranlar tarafından şekillenir. Bu tür yapılarda kubbe, kemer, duvar, ayak ve minare gibi elemanlar ayrı ayrı değerlendirilmez; bunun yerine, yük aktarımı ve rijitlik sürekliliğiyle birbirine bağlı olan entegre bir yapısal ağ meydana getirirler.

Cami yapıları, kullanılan malzemeler ve geometrik şekilleri nedeniyle deprem yükleri altında kendine özgü bir yapısal davranış sergiler. Bu tür yapıların kırılganlık noktalarını tespit etmek için yığma malzemenin düşük çekme direnci ile yapının geometrik tasarımı arasındaki bağlantı önemlidir. Geleneksel yığma sistemlerde ana yük taşıma mekanizması basınç kuvvetlerinin aktarılmasıdır. Ancak, yatay kuvvetler gibi sismik etkiler karşısında yapı gevrek davranış göstererek, belirli bölgelerde hasar görmeye eğilimli hale gelir. Kırılganlık noktaları genellikle yapının kütle dağılımındaki düzensizlikler ve farklı geometrik formların birleşim yerlerinde yoğunlaşır (Ataş, 2023).

4.2.1 Baldaken Sistem ve Üst Örtü Geçiş Elemanları

Baldaken sistemi, klasik Osmanlı cami mimarisinin temel taşıyıcı unsuru olup, ana kubbenin yükünü askı kemerleriyle fil ayaklarına aktaran bir yapısal düzendir. Bu bölüm; geometri, malzeme ve taşıyıcı sistem parametrelerinin koordineli çalıştığı kabuk sistem olarak tanımlanır. Kare tabandan dairesel kubbe formuna geçişi sağlayan pandantif ve tromp gibi elemanlar, yapısal süreksizliğin gözlendiği kritik noktalardır. Klasik Osmanlı cami mimarisinin temelini oluşturan bu baldaken strüktür, yükleri kademeli olarak çevre elemanlara aktaran yapısı sayesinde sismik enerjinin yapı üzerinde homojen dağılımına olanak tanır. Sistemin sahip olduğu bu esneklik kapasitesi, deprem enerjisinin sönümlenmesinde önemli bir rol oynayarak ana kubbenin bütünlüğünü korumaya yardımcı olur.

Kubbe eteğindeki gerilmeler, söz konusu geçiş elemanları üzerinde düzensiz yük birikimine yol açar. Özellikle ana kemerlerin kilit taşı ve üzengi bölgeleri, yatay açılma eğilimleri nedeniyle yapısal bütünlük açısından hassas noktalar olarak öne çıkar. Bu özellikler kubbe kırılganlığının yalnızca kabuk ile sınırlı kalmadığını; taşıyıcı ayak-kemer sistemi, geçiş elemanları ve mesnet bölgeleriyle birlikte

bütüncül şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Sancak & Alaçam, 2021).

Yığma camilerde yapısal kırılganlık, tekil eleman hasarlarından ziyade taşıyıcı elemanlar arasındaki ilişkisel sürekliliğin zayıflaması üzerinden tanımlanmalıdır. Üst örtü sisteminde ortaya çıkan her yerel ayrışma veya çatlak, kubbe-kemer-ayak hattında ilerleyen bir gerilme yeniden dağılımına neden olmakta, bu durum ise deprem sırasında yapının bütünsel stabilitesini tehdit eden ilerleyici bir hasar sürecine dönüşebilmektedir. Dolayısıyla yapısal kırılganlığın değerlendirilmesinde, özellikle birleşim bölgelerinin davranışı ve yük yolu sürekliliği temel analiz parametreleri olarak ele alınmalıdır (Ataş, 2023).



Şekil 4.5 Kurtuluş Camisi – Gaziantep (Ataş, 2023).



Şekil 4.6 Şeyh Ali Camisi deprem sonrası fotoğrafları (IRCICA, 2023)

4.2.2 Ayaklar, kemerler ve tonoz – kubbe geçişleri

Kemer, tonoz ve taşıyıcı ayak birleşimleri, yığma camilerin deprem performansının incelenmesinde kritik öneme sahip başlıca yapısal düğüm noktaları arasında bulunmaktadır. Bu bölgeler, üst örtüden kaynaklanan düşey yüklerin kemerler vasıtasıyla ayaklara iletildiği ve yatay itme kuvvetlerinin dengelendiği geçiş alanları olarak, yük aktarım mekanizmasının sürekliliği açısından en hassas bileşeni teşkil etmektedir. Özellikle bazı tarihi camilerde merkezi kubbenin dört ana ayak tarafından taşındığı, yan kubbe ve tonozlarla yapısal bütünlüğün sağlandığı örtü kurgusunda, söz konusu birleşim noktalarında ortaya çıkabilecek göreli yer değiştirmelerin, tüm üst örtü sisteminin toplu davranışını önemli ölçüde etkileyebileceği değerlendirilmektedir. Kemer tonoz ayak birleşimleri yalnız yerel çatlak oluşumlarının gözlendiği bölgeler değil, deprem sırasında gerilme yeniden dağılımının tetiklendiği ve ilerleyici hasarın başlayabildiği kritik kırılganlık odakları olarak değerlendirilmelidir.

4.2.3 Düşey Taşıyıcılar ve Beden Duvarlarındaki Süreksizlikler

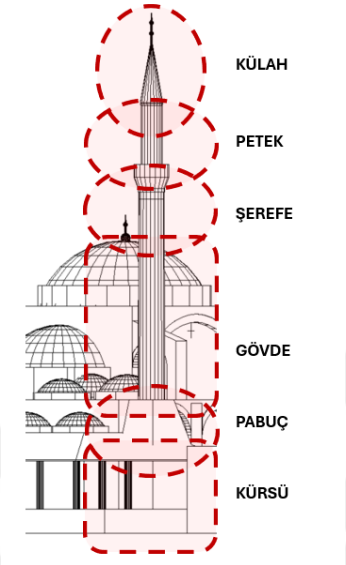
Yığma camilerde beden duvarları ve yükleri zemine aktaran fil ayakları, sistemin ana yük taşıyıcı elemanlarıdır ve deprem davranışı büyük ölçüde duvar örgüsünün sürekliliği ile ilişkilidir. Yapısal elemanlar arasındaki kesit değişimleri ile başlık ve pabuç birleşimlerinde meydana gelen geçişler, özellikle sismik yükler altında mafsallaşma riski taşımaktadır. Buna ek olarak, beden duvarlarında yer alan pencereler, duvarların kesme kapasitesini azaltarak bu bölgeleri çatlak oluşumuna yatkın hale getirmektedir (Köroğlu, 2010).



Şekil 4.7 Şeyh Ali Camisi deprem sonrası fotoğrafları (IRCICA, 2023)**.**

4.2.4 Minareler

İnce ve uzun geometrileri nedeniyle minareler, cami yapısı içinde sismik sarsıntılardan en hızlı etkilenen ve yapısal izleme için öncelik gerektiren elemanlardır.



Şekil 4.8 Minare bölümleri

i. Pabuç (Küp) Bölgesi:

Kürsü ile gövde arasındaki bu bölge, ani bir kesit daralmasının ortaya çıktığı geçiş elemanı olarak yüksek gerilme etkilerine maruz kalmaktadır. Bu nokta, minarenin devrilme veya kırılma riskinin en yüksek olduğu kritik bölgelerden biridir.

ii. Şerefe ve Kapı Boşlukları:

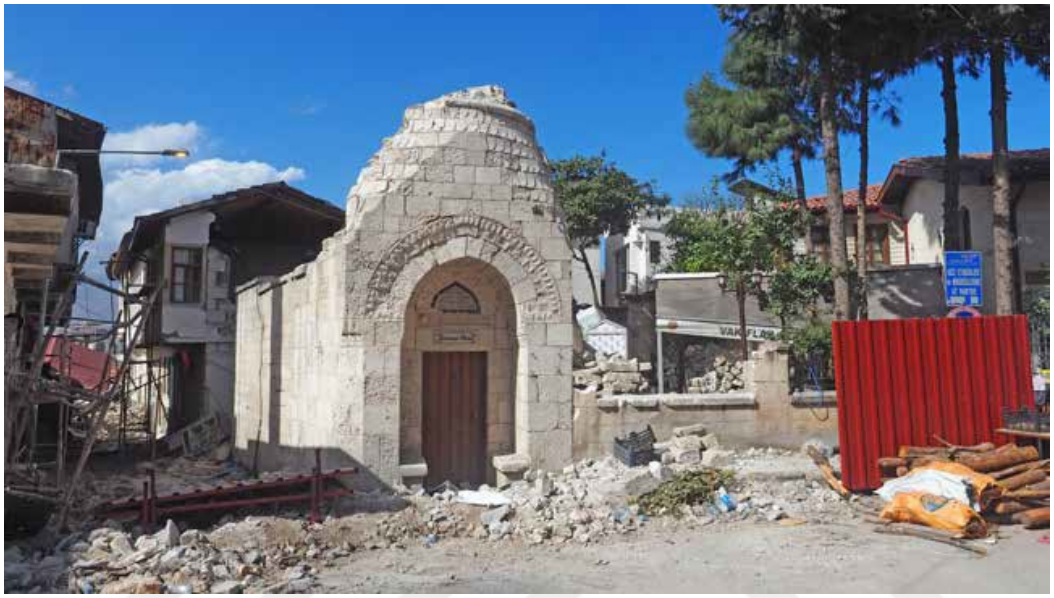
Şerefeye açılan kapı boşlukları, minare gövdesinin rijitliğini ve kesme mukavemetini yerel olarak zayıflatır. Şerefe ağırlığının yarattığı ek kütle etkisi, bu seviyedeki gerilmelerin sınır değerleri aşmasına neden olur.

iii. Petek Bölümü:

Minarenin merdivenlerinin sona erdiği petek bölgesinde rijitliğin azalması, sismik kamçı etkisinin bu nokta üzerinde yıkıcı sonuçlara yol açmasına neden olmaktadır (Soyluk & Demircan, 2023).

6 Şubat raporlarında da olduğu gibi deprem sonrası saha verileri, minarelerin yalnızca yüksek ve narin elemanlar oldukları için hasar gören bağımsız yapısal

bileşenler olarak değil, devrilmeleri halinde ana yapıya hasar yaratan risk unsurları olarak da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Gaziantep örneklerinde bazı minarelerin harim üzerine devrildiği, son cemaat yeri duvarlarında yıkıma neden olduğu veya beden duvarlarında ikincil hasar oluşturduğu saptanmıştır. Bu nedenle minareler hem kendi strüktürel yapıları hem de ikincil hasar aktarma potansiyelleri açısından kritik izleme elemanları olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 4.9 Hatay Sarımıye Camisi minaresi deprem sonrası (IRCICA, 2023).



Şekil 4.10 Payas Sokollu Mehmet Paşa Külliyesi deprem sonrası (IRCICA, 2023)**.**

4.2.5 Mekan Kurgusu ve Kütle Etkileşimi

Camilerdeki mekan kurgusunda merkezi kubbeyi destekleyen yan mekanlar (yarım kubbeler, tonozlar) ana baldakenin yanal stabilitesine katkı sağlasa da, bu farklı kütlelerin birleşim ara kesitleri diferansiyel hareketlere maruz kalır. Kare tabanlı baldakenin varyasyonlarına göre yük aktarım biçimleri değişmekte, ayak sayısının artmasıyla yükler daha fazla noktaya dağılsa da bağlantı elemanlarındaki karmaşıklık yapısal hassasiyeti arttırabilmektedir (Köroğlu, 2010).

Son cemaat yeri gibi ekler, farklı dönem, malzeme ve işçiliklerle oluşmuş birleşimlerde, yapısal oturma veya deprem gibi yükler altında ayrışmaya yatkın arayüzler oluşturmaktadır. 6 Şubat depremleri sonrasında hazırlanan raporlarda camilerin son cemaat mahallerinde ana yapıdan ayrışmalar ve yıkılmalar gözlenmiştir (IRCICA, 2023).

Gaziantep örneklerinde de minarelerin, avlu duvarı, son cemaat yeri ya da ana yapı ile konumlanma biçimlerinin deprem hasarını etkilediği görülmektedir. Bu durum, ek yapı ve bağlantı bölgelerinin yalnızca işlevsel değil, aynı zamanda farklı dönemlere ait yapım tekniklerinin karşılaştığı yapısal ara kesitler olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Ataş, 2023).



Şekil 4.11 Kahramanmaraş Ulu Camisi'nin minaresi yıkılmış ve son cemaat mahali ağır hasar almıştır (TMMOB Mimarlar Odası, 2023).

4.2.6 Yanlış Müdahaleler ve Malzeme Uyumsuzlukları

Tarihi yapılara zaman içerisinde yapılan niteliksiz ekler ve uygun olmayan malzeme seçimi, ayrı ve önemli bir sorun teşkil etmektedir. Özellikle çimento esaslı harçların, geleneksel Horasan harcına göre daha yüksek elastisite modülü ve rijitlik değerlerine sahip olması, deprem sırasında yapısal uyumsuzluklara yol açmaktadır. Bu rijitlik farklılığı, sismik yükler altında gerilmelerin, geleneksel ve modern malzemelerin birleştiği ara yüzeylerde birikmesine neden olurken nem tutucu etkileri nedeniyle taş ve tuğla malzemelerde hızlı fiziksel bozulmaları da beraberinde getirmektedir. (IRCICA, 2023, s. 242).

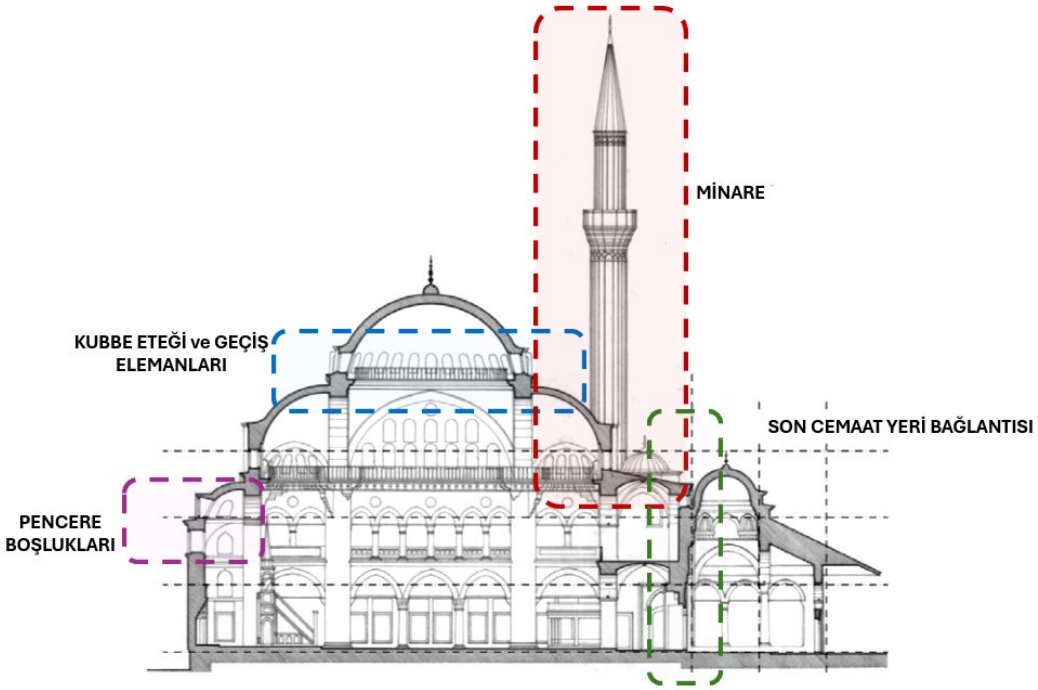
Deprem sonrası saha gözlemleri, özellikle yeniden inşa edilen veya müdahale görmüş elemanların, geleneksel yapım teknikleriyle inşa edilen örneklere kıyasla daha yüksek hasar oranı gösterebildiğini ortaya koymakta; bu durum, malzeme ve yapım tekniği sürekliliğinin yapısal performans açısından belirleyici olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.1 Klasik Osmanlı Cami yapıları için yapısal kırılganlık alanları ile ilişkili izleme elemanları önerileri

Kırılgan düğüm noktası	Olası hasar/bozulma davranışı	İzlenebilir fiziksel gösterge	TYBM'de temsil edilen eleman
Aktarma elamanları – Ayak birleşimleri	Çekme ve kesme çatlakları, relatif kayma	Çatlak genişliği, yer değiştirme sensörü verisi	Taşıyıcı kemer ve ayak elemanları, taşıyıcı sütunlar
Kubbe geçiş elemanları	Gerilme yoğunlaşması, mikro çatlak oluşumu	Titreşim frekansı değişimi, çatlak genişliği	Kubbe geçiş bölgesi yapısal düğümü
Beden duvarlarındaki boşluklar	Kesme çatlakları, duvar ayrışması	Eğilme, deplasman, çatlak haritası değişimi	Yığma duvar elemanları
Minare gövdesi ve şerefe altı	Eğilme, rijitlik kaybı, devrilme riski	İvme, titreşim modu değişimi, eğim ölçümü, çatlak oluşumu	Minare yapısal bileşenleri
Sonradan ilave bölümler	Ayrışma, diferansiyel oturma	Derz açılması, düşey deplasman	Ek yapı / ana kütle birleşimi
Malzeme uyumsuzluğu görülen müdahale bölgeleri	Rijitlik farkına bağlı çatlak ve ayrışma	Nem, sıcaklık, çatlak gelişimi	Müdahale katmanları / onarım bölgeleri

Yapısal kırılganlık analizinin sonucu olarak, söz konusu düğüm noktalarının yapısal performansı temsil edecek izleme bölgeleri olarak temsil edilmesi planlanmıştır. İzleme noktalarının belirlenmesi yük aktarım yolları, kesitlerin birleşim davranışı, malzeme süreksizlikleri ve geçmiş hasar örüntülerinin birlikte değerlendirilmesine dayanan bütüncül bir yaklaşıma ihtiyaç duymaktadır. Böylece yapının deprem etkisi altındaki davranışını erken evrede okuyabilen, ilerleyici hasarı tespit edebilen ve koruma kararlarını veri temelli biçimde yönlendirebilen bir

izleme kurgusunun oluşturulması mümkün hâle gelmektedir. Bu kuramsal çerçeve Kılıç Ali Paşa Camisi özelinde izleme noktalarının belirlenmesine yönelik metodolojik bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 4.12 Kılıç Ali Paşa camisi kesiti üzerinde şematik yapısal kırılganlık alanları gösterimi.

Kılıç Ali Paşa Camisi özelinde tanımlanan bu yapısal riskler ve kırılganlık alanları, çalışmanın ilerleyen safhalarında test edilecek olan temel yapısal hipotezlerin ve TYBM tabanlı analiz süreçlerinin çerçevesini belirlemektedir. Bu bağlamda, tezin uygulama aşamasına temel teşkil eden yapısal kabuller şu şekilde önceliklendirilmiştir:

- Merkezi kubbe plan tipolojisinin sunduğu optimize yük transferi sayesinde diğer plan tipolojilerine göre daha iyi sismik performans gösterir (Kıvılcım & Duran, 2021). TYBM destekli dinamik analizler, bu teorik avantajın malzeme yorulmaları ve zemin-yapı etkileşimleri altındaki gerçek davranışını ölçmeyi mümkün kılar. Bu çalışmada, geometrik veriler sismik simülasyonlarla birleştirilerek yapının özgün davranışı dijital ikiz üzerinden simüle edilmektedir.
- TYBM tabanlı restorasyon yaklaşımlarında, özellikle kubbe ve minare gibi kritik bileşenlerin izlenebilmesi için yapısal modellerin kullanımı esastır.

Bu modelleme yaklaşımı, sadece müdahale yöntemini belirlemekle kalmaz, aynı zamanda saha verileriyle sürekli karşılaştırma yaparak deformasyon izleme süreçlerinin hassasiyetini doğrular.

- TYBM entegrasyonu, veri kayıplarını minimize ederek yapıların dokümantasyonunda en üst düzeyde geometrik ve bilgi odaklı (LOD/LOI) doğruluk sağlar. Sisteme entegre edilen çevresel izleme araçları ise, sürdürülebilir koruma için kapsamlı bir veri tabanı oluşturarak erken uyarı mekanizmalarına veri sağlar ve yapının yaşam döngüsünü uzatır.

Yukarıda özetlenen yapısal riskler, kırılganlık alanları ve yapısal kabuller, Osmanlı cami mimarisinin sismik davranışını anlamak için kavramsal bir çerçeve çizmektedir. Tanımlanan bu kuramsal altyapı, tezin Kılıç Ali Paşa Camisi özelinde yürütülen TYBM uygulamasının ortaya konulmasında temel bir işlev üstlenmektedir. Bu çerçeve, uygulamanın gerekçelendirilmesi ve yöntemsel tutarlılığının sağlanması açısından teorik bir zemin sunmaktadır. Söz konusu yaklaşım, dijital ikiz modelinin yalnızca geometrik bir temsil aracı olmasının ötesine geçerek, yapısal davranışı esas alan seçici bir izleme kurgusu olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda belirlenen kırılganlık alanları, Kılıç Ali Paşa Camisi için önerilen pilot izleme modelinde sensör yerleşimlerinin belirlenmesinde temel parametreler olarak kullanılacaktır.

r

5
KILIÇ ALİ PAŞA CAMİSİ ÖRNEĞİNDE KAVRAMSAL TYBM ÇERÇEVESİ

5.1 Kavramsal Çerçeve: Miras Yapılarında Veri Akış Mimarisi

Tarihi yapıların korunmasına yönelik "statik envanter" anlayışının yerine, yapının sürekli olarak izlenmesini sağlayan "dinamik izleme" yaklaşımı öne çıkmaktadır. Bu değişim, YBM'nin kapsamlı bir felsefe ve bilgi sistemi olarak kabul edilmesini de beraberinde getirir. Literatür incelemesine göre, YBM kavramı yalnızca teknik bir modelin ötesinde, organizasyonel süreçleri de kapsayan hibrit bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Borkowski A. S., 2023).

Bu çalışma, TYBM'yi bu dönüşüm bağlamında yeniden ele almakta ve modeli yalnızca bir temsil aracı olarak değil, sensör verilerinin yapı bileşenleri ile ilişkilendirilmesi yoluyla yapısal davranışı izleyen ve yorumlayan bir karar destek arayüzü olarak tanımlamaktadır. Bu doğrultuda önerilen yaklaşım, veri üretiminden karar üretimine uzanan süreci "Veri–Bilgi–Karar" zinciri üzerinden tanımlayarak sensörlerden elde edilen ham ölçümlerin eşik temelli sınıflandırma ve görselleştirme katmanları aracılığıyla müdahale önceliklerine dönüştürülmesini sağlayan bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

Literatürde dijital ikiz ve izleme kurgusu, *Veri–Bilgi–Karar* zinciri üzerinden kurgulanmıştır (Borkowski A. S., 2023):

i. Veri (Ham Ölçüm): Sensörlerden elde edilen çatlak açıklığı, eğim veya titreşim gibi ölçümler, yapısal bağlamdan bağımsız olarak yalnızca nicel veri niteliğindedir.
ii. Bilgi: Veri, belirli eşik değerler ve yapısal bağlam çerçevesinde değerlendirildiğinde anlam kazanmakta ve "Normal", "Uyarı" ve "Kritik" gibi sınıflandırmalara dönüştürülmektedir.
iii. Karar: Sınıflandırılmış veriler, model ortamında görselleştirilerek uzman kullanıcının dikkatini belirli bölgelere yönlendirmekte ve müdahale önceliklerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Ham ölçüm → Sınıflandırılmış durum → Görsel uyarı → Müdahale önceliği & kararı

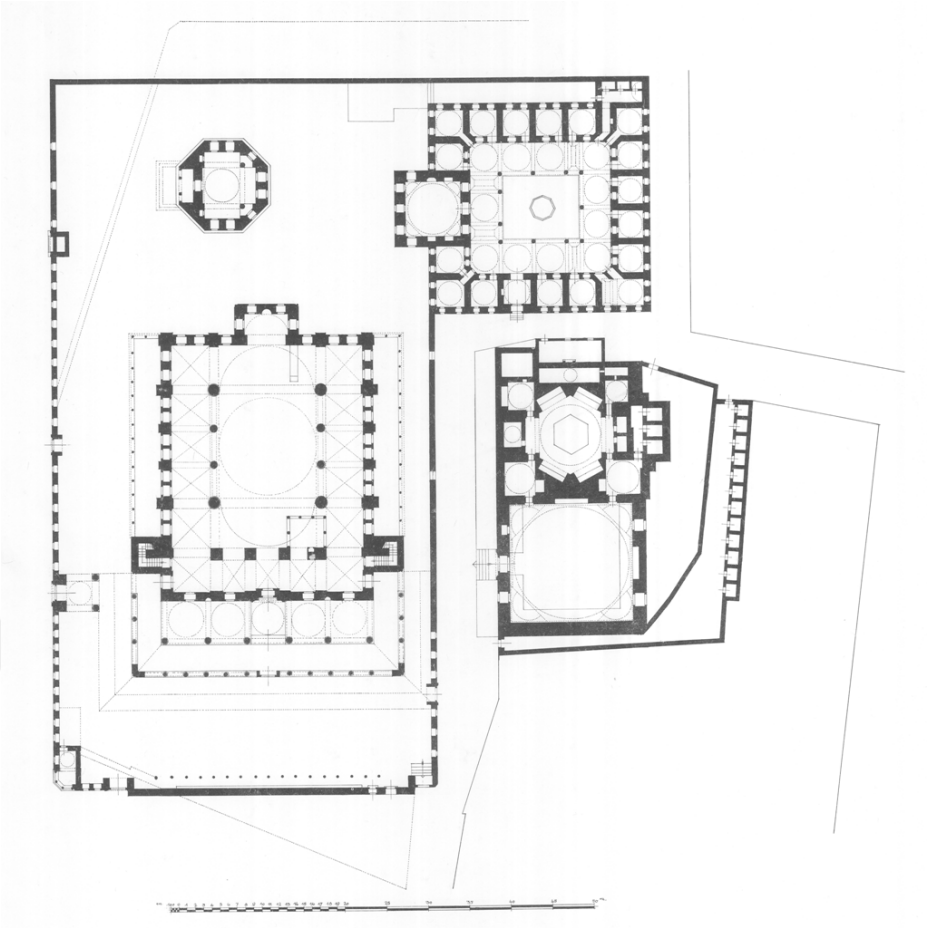
Bu bağlamda sistem, sensörlerden gelen verilerin TYBM ortamında yapısal elemanlarla ilişkilendirilerek yapısal davranışın izlenmesine yönelik bir sistem kurgusu içinde ele alınmaktadır. Böylelikle model yapısal davranışı *anlamlandıran* ve müdahale önceliklerini tanımlayan bir *karar destek mekanizması* olarak kurgulanmıştır.

5.2 Kılıç Ali Paşa Camisi

Kılıç Ali Paşa Camisi, İstanbul'un Tophane semtinde, Tophane meydanının güney batısında, 1581 yılında, Mimar Sinan tarafından Kaptan-ı Derya Kılıç (Uluç) Ali Paşa için yapılmış klasik Osmanlı cami örneklerinden biridir. Külliye'nin Osmanlı mimari tarihindeki özel yeri, Türkiye'de bazilikal bir kilise görüntüsüne en çok yaklaşan cami olmasıdır. Hiçbir Osmanlı camisinde olmayan yüksek galeri katı, yan sahınların örtüsünün kubbe yerine çapraz tonozla geçilmiş olması bu yaklaşımı destekleyen ögelerin başında gelir (Kuban D. , 2021, s. 331-332).



Şekil 5.1 Kılıç Ali Paşa Külliyesi.



Şekil 5.2 Ali Saim Ülgen tarafından hazırlanmış Kılıç Ali Paşa Camisi vaziyet planı (Köroğlu, 2010, s. 23).



Şekil 5.3 Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri üstten görünüşü (Köroğlu, 2010).

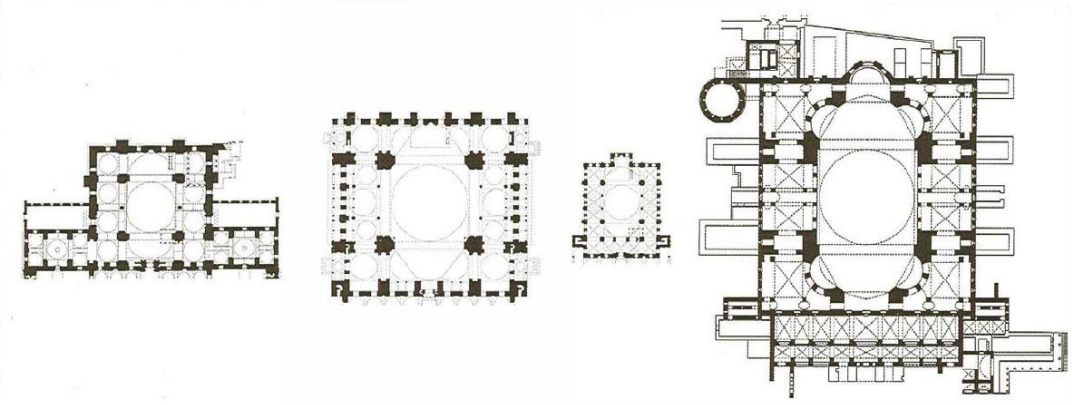


Şekil 5.4 Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri kuzeybatı görünüşü.

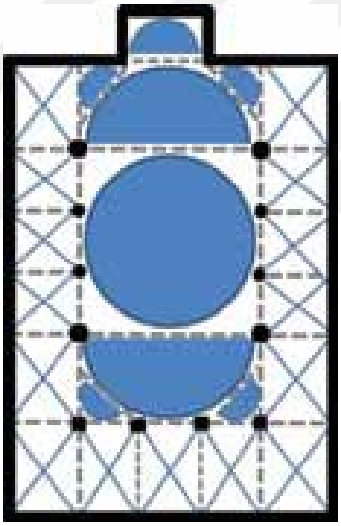
Kılıç Ali Paşa Külliyesi, cami, sebil, türbe, medrese ve hamamdan oluşur. Cami, türbe ve sebil duvarlarla çevrili avlu içerisinde yer alır. Kılıç Ali Paşa'ya ait olan sekizgen plan şemalı türbe caminin güneyinde, sebil ve sekizgen planlı şadırvan ise kuzeyinde bulunmaktadır. Hamam ve medrese ise avlu dışında yer alır. Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat yeri beş kubbeli revak ile geçilmiştir. Dış revak ise "U" şeklinde camiyi sarmaktadır (Köroğlu, 2010, s. 22-23).

Kılıç Ali Paşa Camisi, Mimar Sinan'ın İstanbul'da inşa ettiği son külliye olmakla birlikte, Ayasofya'ya olan mekânsal benzerliği ile de önem taşımaktadır. Plan ve kütle düzeni bakımından kareye yakın plan geometrisine sahip, merkezi mekanın üzeri de tek ana kubbe ile örtülüdür. Ana kubbe 12.70m çapındadır ve dört ana kemer üzerine oturan pandantiflerle taşınmaktadır. Pandantifli bu geçiş sistemi Ayasofya'nın ana kubbesindeki taşıyıcı kurgusunun küçük ölçekli bir modeli olarak yorumlanmaktadır. Mekan, kıble yönü ekseninde, Ayasofya'da, Beyazıt ve Süleymaniye camilerinde de olduğu gibi, iki yarım kubbe ile örtülüdür (Şekil 5.5).

Ayrıca, iki yanda bulunan destek payandaları da Ayasofya ile benzerlik gösteren unsurlarındandır (Eyice, 1999, s. 411).



Şekil 5.5 Beyazid, Süleymaniye, Kılıç Ali Paşa ve Ayasofya planları (Kuban D. , 2021).

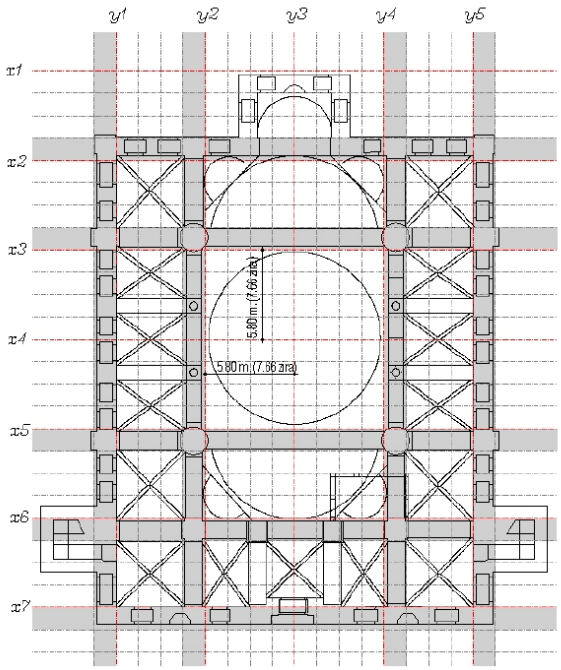


Şekil 5.6 Kılıç Ali Paşa Camisi plan şeması (Benian, 2011, s. 46).

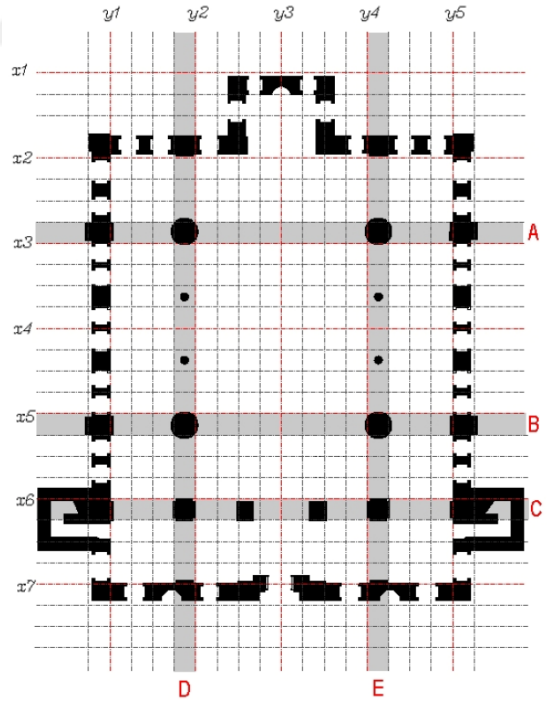
Mekânsal kurgusu modüler bir düzene sahip olan caminin ana kubbe mekanında 5.80 m x 5.80 m ölçülerinde, 4 modül görülmektedir. Caminin kapalı mekanı kuzey-güney aksında 5 modül, doğu-batı aksında ise 4 modülden oluşmaktadır (Şekil 5.7). Modüler sistemle birlikte planlanan taşıyıcı sistem dilimleri[21], caminin ana strüktürünü oluşturur. Kılıç Ali Paşa Camisi'nde beş adet taşıyıcı sistem dilimi bulunur ve bu dilimler ana kubbe merkezli olarak, kuzey – güney aksı boyunca simetrik biçimde yerleştirilmiştir. A-B ve D-E dilimlerinin kesişim noktalarında fil

[21] Taşıyıcı sistem dilimleri: Yapının ana strüktürünü meydana getiren fil ayağı, ayak, sütun, payanda, kemer vb. taşıyıcı sistem yapı elemanlarını kapsayan, doğu-batı ve kuzey-güney doğrultularında biçimlenmiş 1/16 modül kalınlık sunan sistem (Köroğlu, 2010).

ayaklar, C ve D-E dilimlerinin kesişim noktalarında ise ayaklar konumlanmıştır (Alioğlu & Köroğlu, 2011, s. 335).



Şekil 5.7 Kılıç Ali Paşa Camisi zemin kat planı (Alioğlu & Köroğlu, 2011, s. 335)



Şekil 5.8 Zemin katıı taşıyıcı sistem dilimleri (Alioğlu & Köroğlu, 2011, s. 337)

Kılıç Ali Paşa Camisi günümüzde aktif olarak kullanılan bir ibadethane olması sebebiyle, mimari açıdan olduğu kadar turistik ve dini açıdan da önemli bir yapıdır. Ancak yapı, tarihsel süreçte İstanbul'un sismik hareketliliğinden ve çevresel müdahalelerden önemli ölçüde etkilenmiştir. Örneğin, Robertson'ın 1855 tarihli arşiv fotoğraflarında minarede görülen kapsamlı iskele kurulumu, minarenin geçmişte bir yıkıma maruz kaldığını ve bu noktada bir rekonstrüksiyon sürecinden geçtiğini belgelemektedir. Ayrıca, 1956 yılındaki Tophane Meydanı düzenlemeleri sırasında avlu duvarlarının türbe yönünde daraltılması ve şadırvan tarafında geri çekilmesi, yapının özgün çevre dokusunda geri dönülemez bir bozulmaya yol açmıştır (Eyice, 1999).

2011 yılındaki restorasyon çalışmaları sırasında ahşap saçaklarda çıkan yangın, yapının yangın güvenliği konusundaki hassasiyetini tekrar gündeme getirmiştir. Bununla birlikte, ana cadde üzerindeki konumu ve hemen yanından geçen tramvay hattının yarattığı sürekli vibrasyonun, zemin stabilitesi ve taşıyıcı sistem üzerinde ciddi bir tahribat oluşturduğu gözlemlenmektedir (Özgür Yıldız & Doğan, 2023).

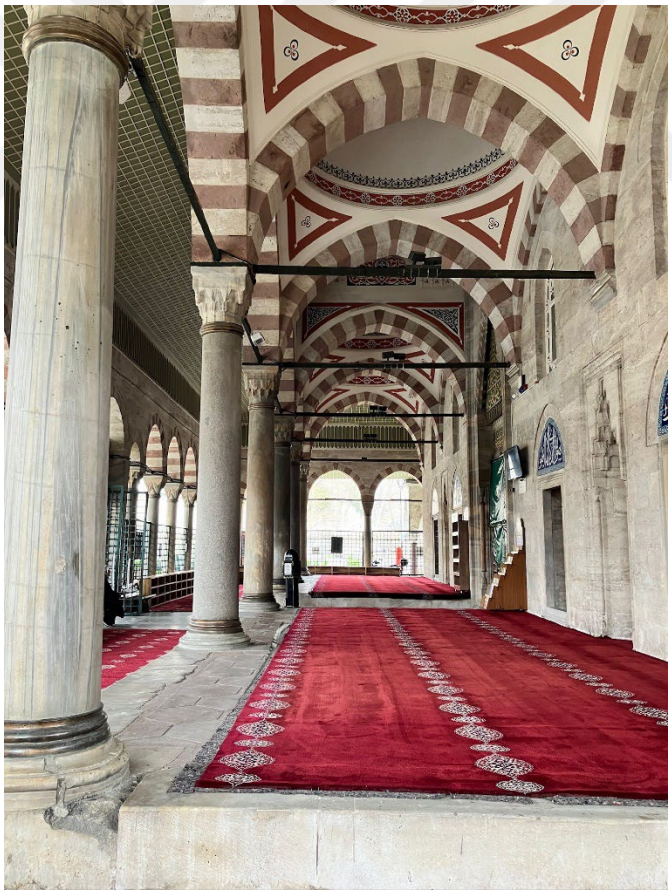
5.3 Vaka Analizi: Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri

Kılıç Ali Paşa Camisi; modüler mimari kurgusu, strüktürel bütünlüğü ve zengin malzeme çeşitliliğinin yanı sıra, yığma yapılara özgü birleşim süreksizlikleri, narin taşıyıcı elemanlar ve üst örtü–taşıyıcı sistem etkileşimleri üzerinden tanımlanabilen çok katmanlı bir yapısal kırılganlık potansiyeli barındırması nedeniyle, izleme temelli koruma yaklaşımları için uygun bir prototip oluşturmaktadır. Özellikle son cemaat yeri, aktarma elemanları ve ayakların ilişkisi, dış çevre koşullarına doğrudan maruz kalması ve ana ibadet mekânı ile kurduğu yarı açık geçiş niteliği nedeniyle, deprem etkisi altında göreli ötelenmelerin, çatlak oluşumlarının ve malzeme ayrışmalarının erken evrede gözlenebileceği kritik bir eşik bölge olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda çalışma, son cemaat yeri özelinde geliştirilen sensör-temelli veri akış kurgusunun TYBM ortamında nasıl işlediğini mikro ölçekte test etmektedir. Önerilen yaklaşım, yapısal davranışın yalnızca hasar sonrası değil, hasar öncesi deformasyon süreçleri üzerinden okunabildiği bir izleme modelinin kavramsal doğrulamasını sunmaktadır.



Şekil 5.9 Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat yeri.



Şekil 5.10 Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat yeri.

Yapının son cemaat yeri için önerilen TYBM / sensör tabanlı izleme altyapısı, yalnızca mevcut durumun dijital envanterini üretmekle sınırlı kalmayıp, sismik etkiler, çevresel değişkenler ve kullanıcı yoğunluğuna bağlı yüklenmeler sonucunda ortaya çıkabilecek mikro-ölçekli yer değiştirme, titreşim ve çatlak gelişimlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini mümkün kılmıştır. Böylece yapısal kırılganlığın zamana bağlı değişimi sayısal veriler üzerinden kullanıcı tarafından okunabilmektedir, erken uyarı ve önleyici koruma kararları veri temelli bir zemine taşımaktadır.

Bu sistem kurgusunda veri akışı, sensörlerden elde edilen ölçümlerin bağımsız veri katmanına aktarılması, bu verilerin işlenerek TYBM modeline entegre edilmesi ve model bileşenleri üzerinden görselleştirilmesi şeklinde tanımlanmaktadır.



Şekil 5.11 Kılıç Ali Paşa Camisi Son Cemaat Yeri ön görünüş.

5.3.1 Dijital İkiz Yaklaşımı Bağlamında Modelin Konumu

Literatürde "dijital ikiz" kavramı, fiziksel bir varlığın dijital ortamdaki karşılığının sensör verileri aracılığıyla sürekli ve eş zamanlı olarak güncellenmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, kültürel miras yapıları söz konusu olduğunda, tam anlamıyla gerçek zamanlı bir dijital ikiz kurulumunun teknik altyapı gereksinimleri, ekonomik sürdürülebilirlik sorunları ve koruma etiğine ilişkin sınırlılıklar nedeniyle çoğu durumda uygulanabilir olmadığı bilinmektedir.

Bu bağlamda geliştirilen model, ölçüm verilerinin belirli zaman aralıklarıyla modele entegre edildiği yarı dinamik bir dijital temsil olarak ele alınmakta olup, veri entegrasyonunun model üzerindeki etkisini değerlendirmeye yönelik bir kavramsal doğrulama çerçevesi sunmaktadır. Veri akışının kesintisiz olmamasına karşın, periyodik güncellemeler modelin statik bir temsil olmaktan çıkarak veriyle güncellenen bir yapıya dönüşmesini sağlamaktadır. Model artık yalnızca geçmişe ait bir durumun sayısal temsili değil, ölçüm verileriyle güncellenen, zamana bağlı değişimi yansıtan yaşayan bir sistem niteliği kazanmaktadır. Bu dönüşüm, kültürel miras koruma pratiğinde envanter temelli yaklaşımdan veri odaklı izleme yaklaşımına geçişi temsil etmektedir.

5.3.2 Ölçüm Verilerinin Yorumlanması

Sensör tabanlı her ölçüm verisi, kendi koşullarında bir yorumlama sistemi içinde anlam kazanmaktadır. Ölçümler için tanımlanan eşik değerleri mutlak doğrular değil, yapının malzeme özellikleri, çevresel koşulları ve tarihsel müdahale geçmişiyle ilişkili bağlamsal kabuller olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle önerilen sistem, kesin teşhis üretmeyi amaçlamak yerine olasılık temelli bir risk tahmini sunmaktadır. Bu kapsamda ölçüm verileri, tanımlı eşik değerler doğrultusunda sınıflandırılarak model bileşenleri üzerinden görselleştirilmektedir.

Tarihi yığma yapılarda yapısal davranış çoğu zaman doğrusal değildir ve malzeme heterojenliği yüksek düzeyde belirsizlik üretmektedir. Dolayısıyla modelin çıktısı, "hasar vardır" biçiminde kesin bir yargıdan ziyade, "bu bölge izlenmelidir" şeklinde temkinli ve önleme odaklı bir değerlendirme ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda sistem çıktısı, kesin hasar tespitinden ziyade, izlenmesi gereken bölgelerin belirlenmesine yönelik bir değerlendirme sunmaktadır. Söz konusu epistemolojik sınırlılık, sistemi zayıflatan bir unsur değil, aksine kültürel mirası

koruma pratiğiyle uyumu güçlendiren bir yöntemdir. Çünkü bu alanda karar süreçleri çoğu zaman sadece mühendislik verilerine değil, mimarlık, mühendislik, malzeme bilimi ve koruma kuramını bir araya getiren çok disiplinli değerlendirmelere dayanmaktadır. Bu bağlamda oluşturulan yarı dinamik dijital model, kesinlik iddiası taşımayan, ancak erken uyarı, izleme ve önleyici müdahale süreçlerini destekleyen bir karar-destek aracı olarak konumlanmaktadır.

5.3.3 Metodolojik Çerçeve ve Sistem Kurgusu

Bu bağlamda son cemaat yeri, hem ana yapı ile kurduğu yapısal ilişki hem de dış çevresel etkilere açıklığı nedeniyle kontrollü bir test alanı olarak seçilmiştir. Aynı zamanda bu mekân, yapısal birleşim davranışının okunabildiği bir ara kesit niteliği taşıması bakımından izleme çalışması için uygun bir odak alanı sunmaktadır. Bu kapsamda amaç, tüm yapının kapsamlı bir dijital izleme sistemini kurmak değil, önerilen veri akış mimarisinin belirli bir yapı bileşeni üzerinden test edilmesidir.

Bu doğrultuda çalışma aşağıdaki araştırma sorusuna odaklanmaktadır:

Tarihi bir yapının belirli bir alt bileşeninde, sensör verilerinin TYBM ortamına entegrasyonu yoluyla yapısal davranışın erken evrede izlenmesi ne ölçüde mümkündür?

Vaka çalışması, son cemaat yerinin mevcut rölöve çizimlerinin referans alınması suretiyle Autodesk Revit ortamında modellenmesi ve bu modele sensör verilerinin entegre edilerek bir takip senaryosunun uygulanmasına dayanmaktadır. Söz konusu çalışma, önerilen izleme altyapısının etkinliğini değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır.

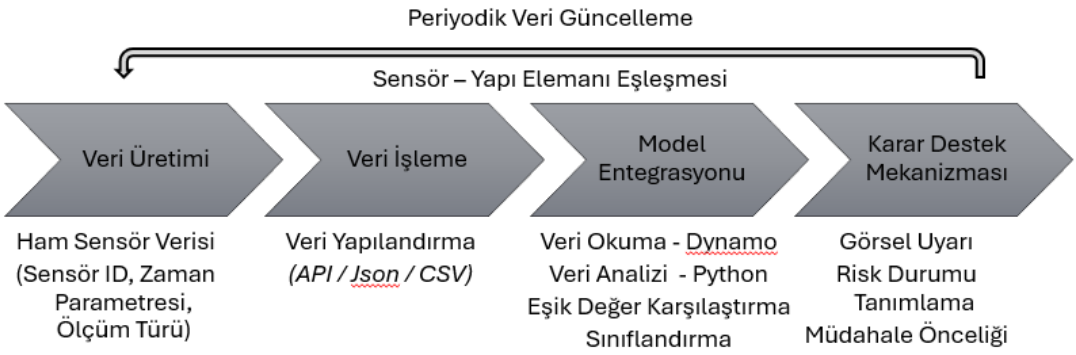
Sistem kurgusu üç temel bileşen üzerinden yapılandırılmıştır:

i. **Parametrik TYBM modeli hazırlanması:** Çalışmanın ilk aşamasında, Kılıç Ali Paşa Camii'nin son cemaat yerine ait geometrik, yapısal ve tipolojik özellikleri esas alınarak parametrik bir Tarihi Yapı Bilgi Modeli (TYBM) oluşturulmuştur. Bu model, yapı elemanlarının LOD 300 seviyesinde kimlik bilgileri, malzeme özellikleri, ölçüleri, birleşim ilişkileri ver izleme noktalarına ait verilerini içeren katmanlı bir bilgi alt yapısı olarak kurgulanmıştır. Bu detay düzeyiyle yapısal bileşenlerin ve izleme verilerinin model ile ilişkilendirilmesi sağlanmıştır.

ii. **Bağımsız veri katmanı (API temsili CSV kullanımı):** Vaka çalışmasında fiziksel sensör sistem kurulamadığı için, sensör ağından elde edilecek ölçümlerin modele doğrudan gömülmesi yerine, veri akışının TYBM'ye ulaştırıldığı bağımsız bir veri katmanı tasarlanmıştır. Bu kapsamda gerçek zamanlı API bağlantısını temsil eden CSV tabanlı veri yapısı, sensör kimliği, konumu, ölçüm türü, zaman verisi ve eşik değer bilgilerini içerecek biçimde kurgulanmıştır. Bu ayrıştırma, sistemin hem farklı veri kaynaklarına uyarlanabilmesini hem de model bütünlüğünün korunmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda veri katmanının bağımsızlığı, dijital ikiz yaklaşımında kritik olan ölçüm–temsil ayrımını mümkün kılarak modelin yarı dinamik karakterini desteklemektedir.

iii. **Veri işleme ve model güncelleme mekanizması (Dynamo / Python / Revit entegrasyonu):** Sistemin üçüncü bileşeni, bağımsız veri katmanından gelen ölçümlerin işlenerek TYBM ortamına aktarılmasını sağlayan hesaplamalı entegrasyon sürecidir. Bu süreçte Dynamo görsel programlama altyapısı, Python eklentileri ve Revit model ortamı birlikte kullanılarak sensör verilerinin "okunması", önceden belirlenmiş eşik değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir, risk durumlarının sınıflandırılması ve sonuçların model üzerinde görsel olarak temsil edilmesi sağlanmıştır. Böylece TYBM modeli, belgeleme aracı niteliğinden çıkarak veriyle güncellenen, risk durumunu görselleştiren ve karar alıcılara veri üreten yarı dinamik bir izleme platformuna dönüşmüştür.

Bu üç bileşen birlikte çalışarak veri üretimi, veri aktarımı ve model güncelleme süreçlerinden oluşan bütüncül bir veri akış mimarisi oluşturmaktadır

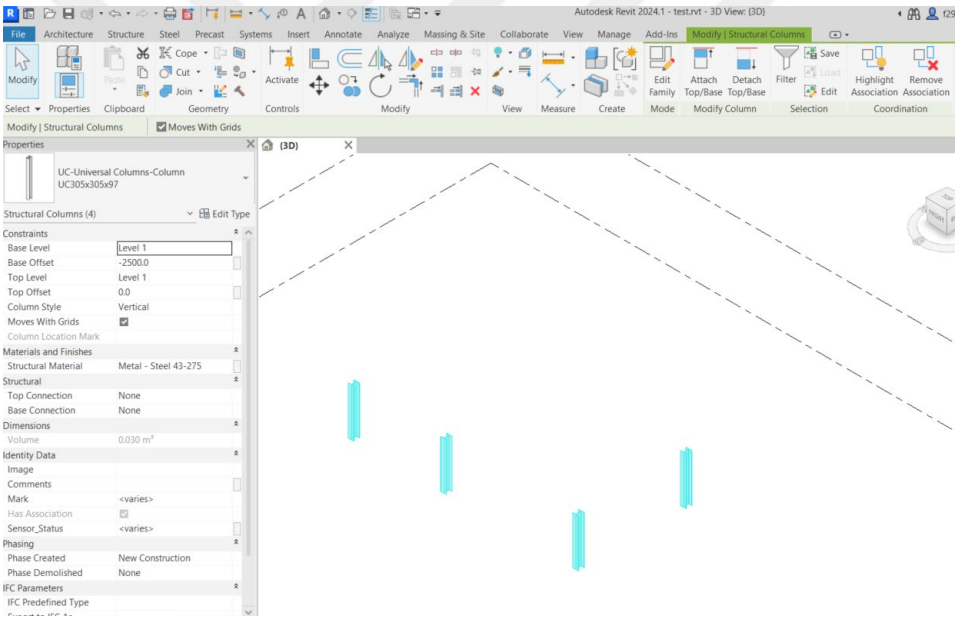


Şekil 5.12 İzleme sistemi veri akış mimarisi.

İzleme sistemi için planlanan veri akış mimarisi, sensörlerden elde edilen ham verinin yapılandırılması, işlenmesi ve TYBM model bileşenleri ile ilişkilendirilmesi sürecini tanımlamaktadır. Sistem, periyodik veri güncellemeleri ile yarı dinamik bir yapı sergileyerek model çıktılarının izleme sürecine geri beslenmesini sağlayan döngüsel bir çalışma prensibine sahiptir.

5.3.4 Prototip Modelin Hazırlanması ve Veri Akışı Testi

Son cemaat yeri modeli için önerilen senaryoları test ortamına almadan önce, planlanan akış şeması çalışmasını test etmek amacıyla bir prototip YBM modeli oluşturulmuştur. Bu akış, veri formatlarının dönüşümünü göstermenin ötesinde, sensör verisinin yapı elemanları ile ilişkilendirilerek model tabanlı bir karar destek sürecine dönüştürülmesini ifade etmektedir. Bu yapı sayesinde veri ile model arasındaki ilişki tek yönlü, kontrollü ve tekrarlanabilir hale getirilmiştir.

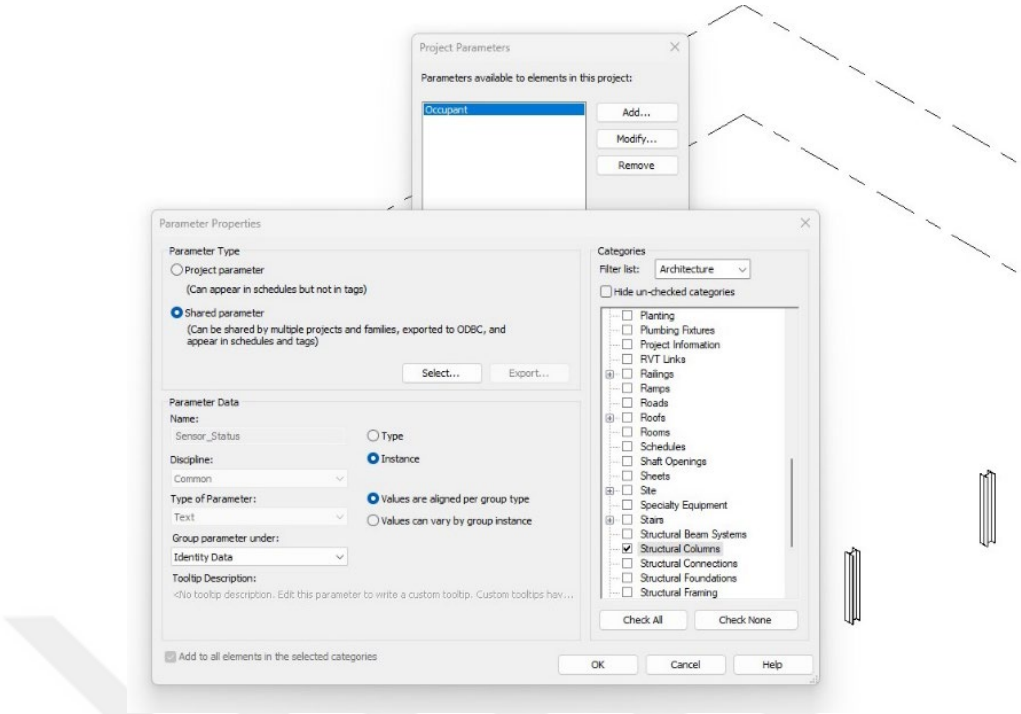


Şekil 5.13 Prototip taşıyıcı kolon modeli.

Prototip Modelin Oluşturulması:

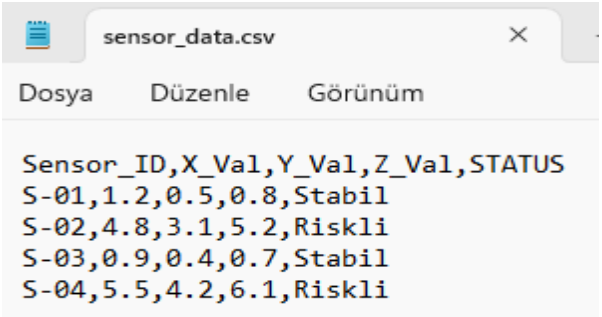
i. Revit ortamında 4 adet çelik kolon eklenmiştir. Bu kolonlara "S-01, S-02, S-03 ve S-04" olacak şekilde "Mark" değeri verilmiştir.

ii. Gerçek yapı üzerinde yerleştirildiği varsayılan sensörler, model üzerinde "Mark" değerleri verilmiş çelik kolonlar ile eşleştirildiği planlanmıştır. Buna göre ilgili kolonların izlendiği varsayılarak, sensörlerden gelen verilerin ilgili elemanlarla eşleşebilmeleri için, model ortamında **"Shared Parameter"** olarak **"Sensor_Status"** parametresi tanımlanmıştır.



Şekil 5.14 Shared Parameter / Sensor_Status eklenmesi.

iii. İlk olarak, kolonların yapısal sağlık durumunu takip edecek bir izleme sistemi tasarlanmıştır. Her sensör için varsayılan "Eşik Değeri", ölçülen parametrelerin en kritik seviyesini temsil edecek şekilde planlanmıştır. Böylece model, tek bir okunabilir durum parametresi üzerinden yapısal sağlık bilgisini sunabilmektedir. Dışarıda bir veri kaynağından, REST / API çıktısı varsayımıyla JSON formatında sensör dataları oluşturulmuş ve CSV formatına dönüştürülerek, **sensor_data.csv** dosyası adıyla Dynamo ortamında çekilmiştir. CSV yapısı, sensör kimliği, X-Y-Z yönlerindeki varsayılan ölçüm değerleri ve bu ölçüm değerlerine göre belirlenmiş olan "stabil" ve "riskli" bilgisini içermektedir.



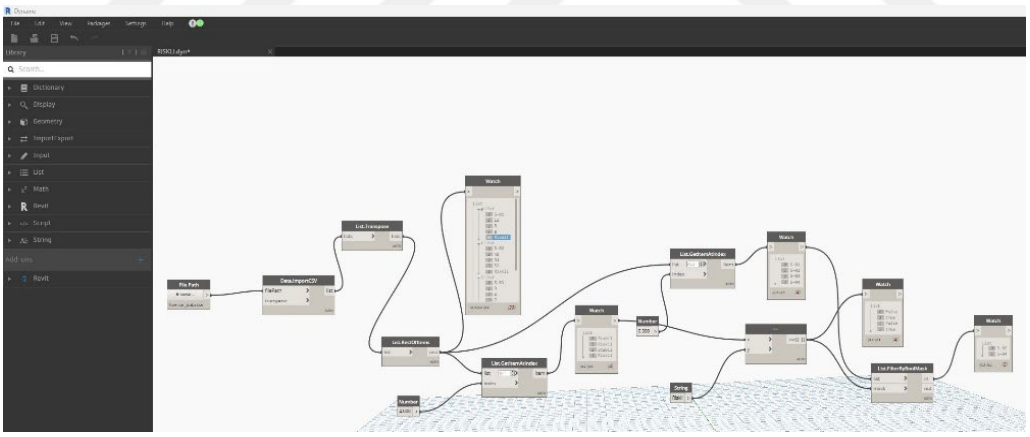
Şekil 5.15 API / JSON temsili sensör verisi olarak kullanılan CSV dosyası Notepad içeriği.

iv. Sensör Verisinin Revit Elemanına Aktarılması:

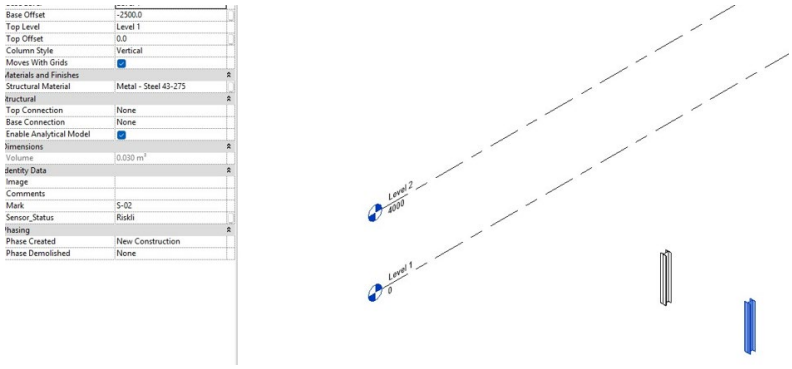
Bu veri kümesi, Dynamo görsel programlama ortamında **Data.ImportCSV** düğümü kullanılarak okunmuş ve satır-tabanlı veri yapısına dönüştürülmüştür. Ardından başlık satırı ayrıştırılarak kalan veri listesi satır bazında işlenebilir hâle getirilmiştir. Dynamo aracılığıyla işlenen sensör verileri, Revit modelindeki ilgili sensör nesnelerine yazdırılmış ve bu parametre değişimleri görünüm filtreleri aracılığıyla görselleştirilmiştir.

Belirlenen sensör kimlikleri, Revit ortamındaki taşıyıcı kolon elemanlarının Mark parametresi üzerinden modellenmiş kimlik bilgileriyle eşleştirilmiştir. Böylece "Sensör verisi → model elemanı" ilişkisi kurulmuştur.

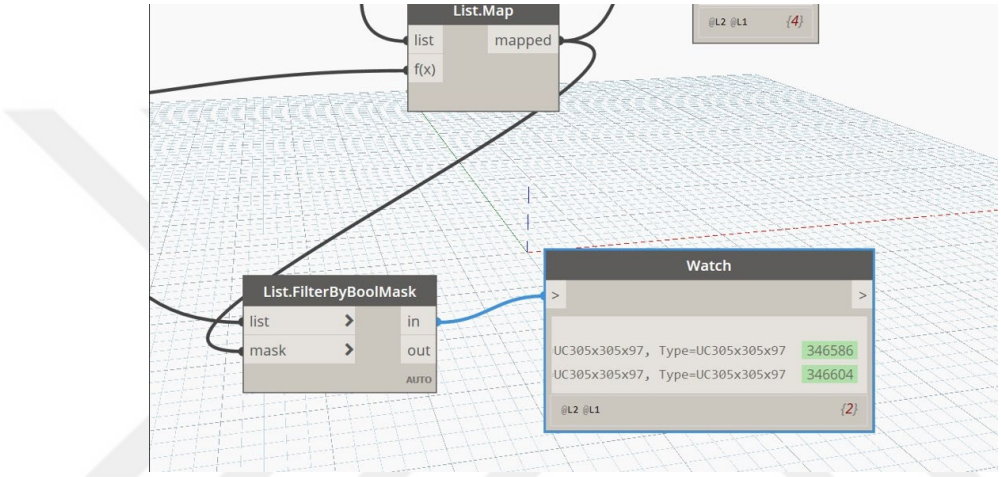
"Sensor_Status" parametresi, paylaşımlı kimlik parametresi olarak taşıyıcı kolonlara otomatik olarak adapte edilmiştir. Dynamo aracılığıyla CSV dosyası içindeki aynı isimli veri, aynı isimli parametre ile eşleştirilerek, hangi kolonlar riskli değere sahipse Revit ortamında S-02 ve S-04 kolonları, "Riskli" olarak tespit edilmiştir. Revit ortamında elemanların ID bilgilerini kullanarak, Dynamo ile eşleşmenin doğruluğu test edilmiştir.



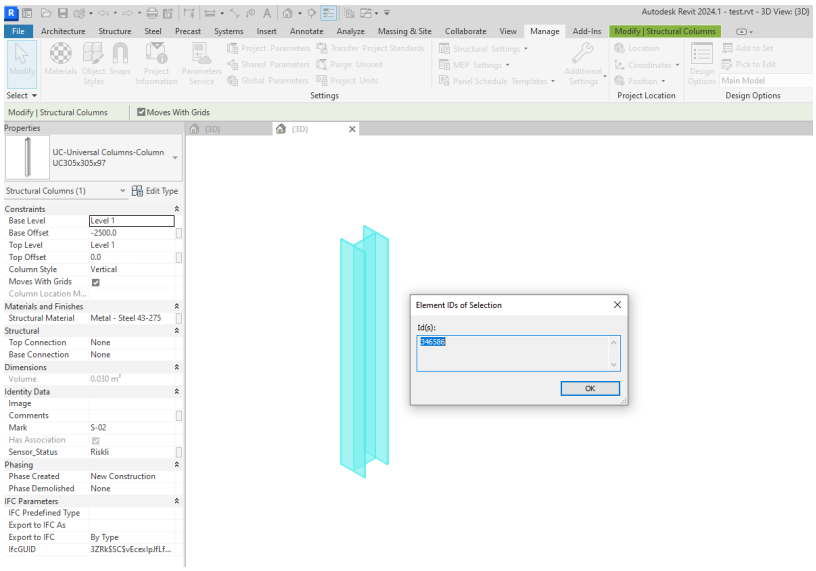
Şekil 5.16 Dynamo ortamına CSV dosyasının çekilmesi ve işlenmesi.



Şekil 5.17 Dynamo aracılığıyla CSV dosyasında tanımlı riskli sütunların modelde işlenmesi.



Şekil 5.18 CSV dosyasında "Riskli" olarak tanımlı S-02 ve S-04 kolonlarının Revit ID bilgilerinin sağlaması



Şekil 5.19 Riskli S-02 kolonunun Revit ID bilgisinin Dynamo ID bilgisi (346586) ile kontrolü

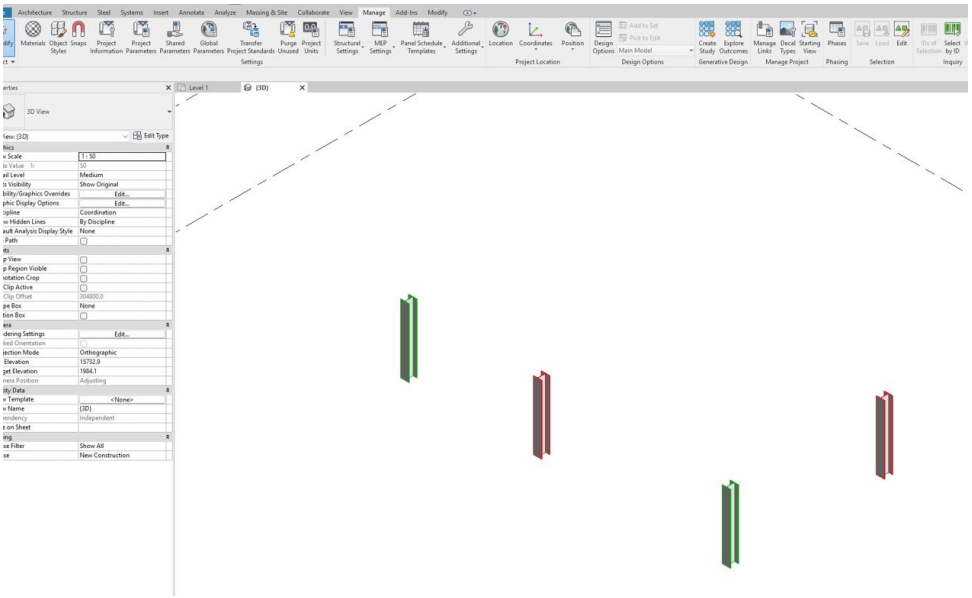
iv. Görsel Betimleme / Uyarı Sistemi

Bu aşama, fiziksel izleme verilerinin doğrudan HBIM veri yapısına entegrasyonunu sağlamaktadır. Revit ortamında S-02 ve S-04 kolonlarının "Riskli" olarak tespit edilmesinden sonra, çalışmanın en önemli kısmı; sensör verisinin yalnızca sayısal bir bilgi olarak kalmayıp model üzerinde anlık görsel uyarı olarak sunulmasıdır. Bu amaçla, Dynamo platformunda Revit API ile bir Python eklentisi geliştirilmiştir.

Geliştirilen eklenti:

- Riskli ve stabil kolon listelerini girdi olarak almaktadır.
- Model ortamındaki aktif görünüşte ilgili elemanlara "OverrideGraphicSettings" uygulamaktadır.
- Dynamo yeni veri alıp çalıştırıldığı zaman, "Riskli" elemanları kırmızı, stabil elemanları yeşil renk ile temsil etmektedir.

Bu sayede sensör verisindeki değişim, model üzerinde doğrudan algılanabilir bir "uyarı" mekanizması durumuna dönüşmektedir. Elde edilen görselleştirme, yapısal sağlık izleme verisinin karar vericiye hızlı ve sezgisel biçimde aktarılmasını mümkün kılmaktadır.

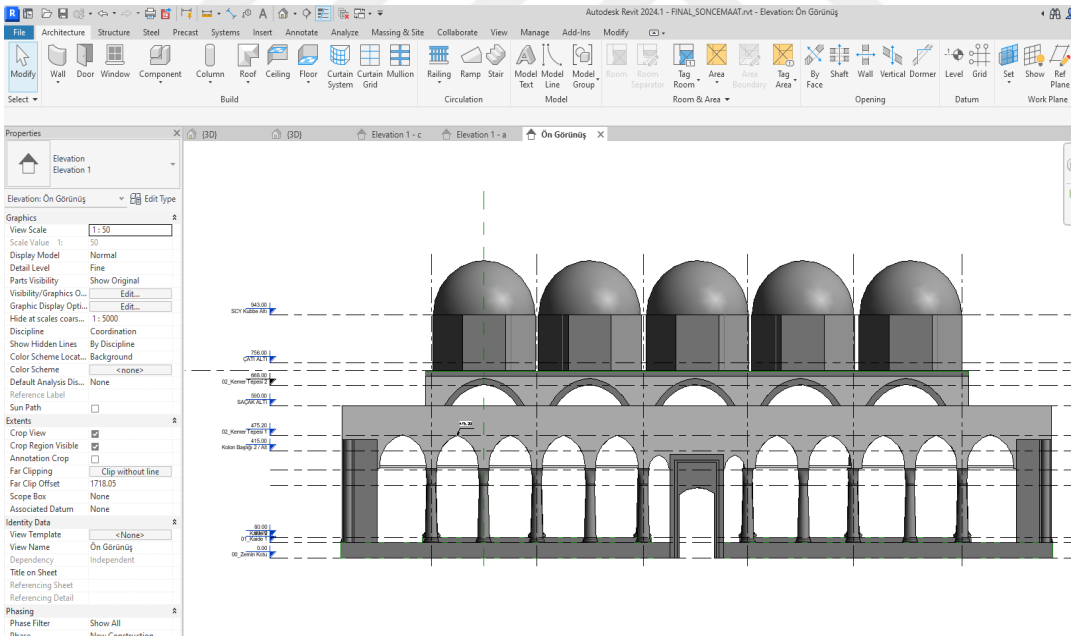


Şekil 5.20 Python Dynamo işbirliği ile Revit modeldeki elemanların risk durumuna göre renk değiştirmesi / Uyarı mekanizması.

5.3.5 Son Cemaat Yeri Modellemesi

Bu çalışma kapsamında Kılıç Ali Paşa Camisi'nin tamamının üç boyutlu olarak modellenmesi yerine, yapının strüktürel davranışını temsil edebilecek örnek bir alt sistem seçilmiş ve pilot modellemede test edilen metodolojinin, uyarı mekanizmasının geçerliliğini ve sürekliliğini doğrulamak amacıyla son cemaat yeri odak alan olarak belirlenmiştir. Bu tercih, hem model karmaşıklığını yönetilebilir düzeyde tutmak hem de yapısal kırılganlıkların yoğunlaştığı bir mekânsal birim üzerinden izleme senaryolarının sınanabilmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Aynı zamanda veri büyüklüğünü de kontrol altında tutmayı sağlamıştır.

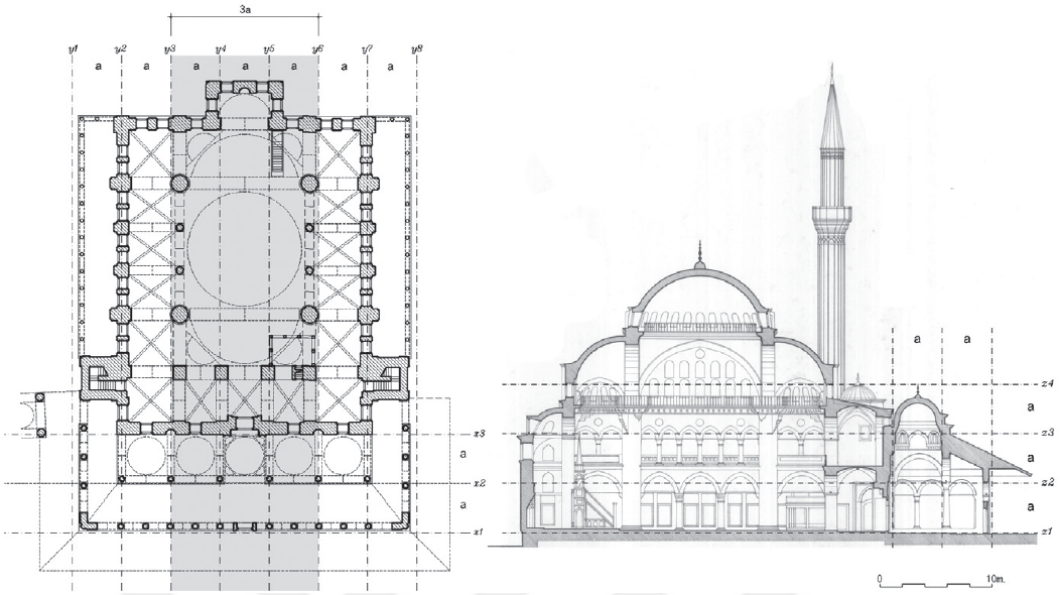
Son cemaat yeri, çatı örtüsü hariç, ardışık kemer dizileri, taşıyıcı kolonlar, örtü elemanları ve kubbe geçiş bileşenlerinden oluşan modüler strüktürel kurgusu nedeniyle, Osmanlı klasik dönem cami mimarisinin yük aktarım prensiplerini küçük ölçekte temsil eden bir alt sistem niteliğindedir. Bu özellik, söz konusu mekânın hem yapısal davranışın okunabilirliği hem de planlanan izleme senaryolarının uygulanabilirliği açısından uygun model büyüklüğü sunmuştur.



Şekil 5.21 Çatı strüktürü hariç son cemaat yeri Revit modeli görünüşü.

Model çalışması Kılıç Ali Paşa Camisi ile ilgili yapılmış mevcut rölöve çizimleri ve tarihsel belgeler esas alınarak Autodesk Revit ortamında gerçekleştirilmiştir ve veri ile ilişkilendirilebilir parametrik bir izleme altyapısı oluşturulmuştur. Bu

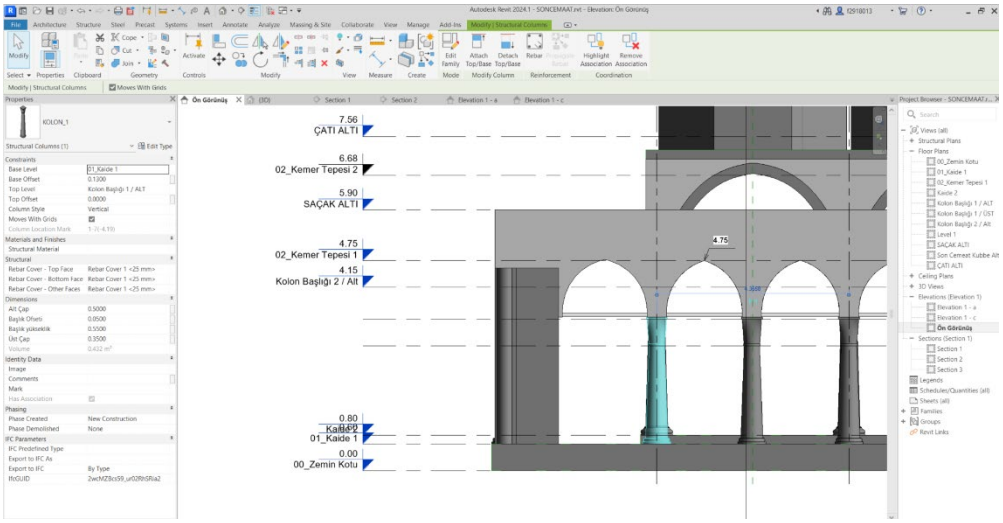
doğrultuda model sensör verisinin okunabildiği, eşik değerlerin tanımlanabildiği ve görsel geri bildirim üretebilen bir dijital temsil katmanı olarak kurgulanmıştır.



Şekil 5.22 Kılıç Ali Paşa Camisi plan ve Ali Saim Ülgen tarafından çizilmiş kesit- Levha No.125 (Orbeyi, 2016).

Model kapsamında Revit ortamında aşağıdaki yapısal bileşenler oluşturulmuştur:

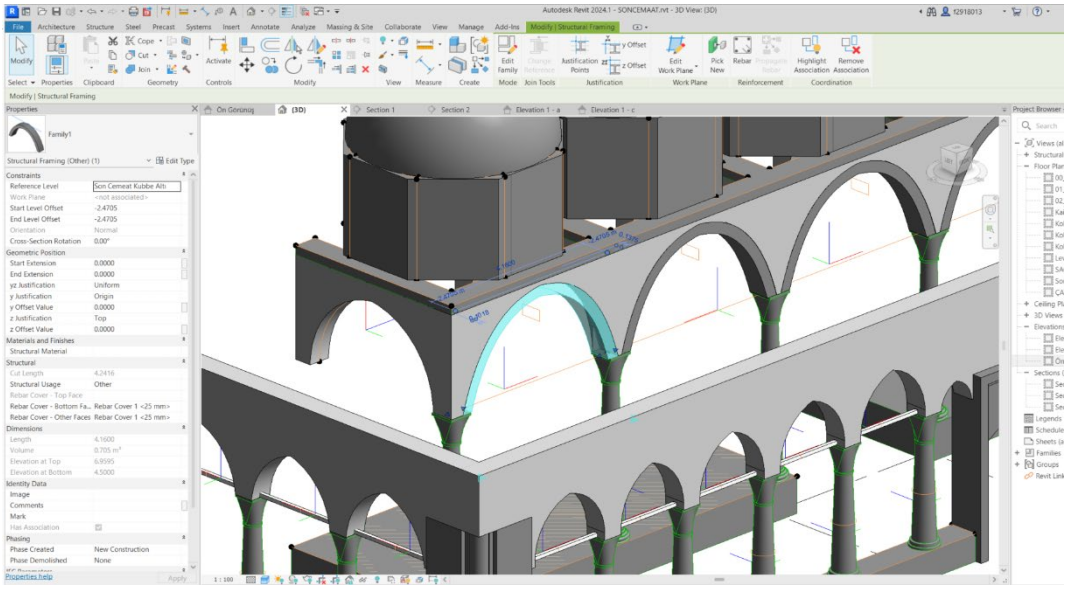
i. Taşıyıcı sütunlar ve başlıklar: Mermer taşıyıcılar, rölöve kotlarına göre yukarıya doğru daralan (blend) formda kurgulanmıştır. Klasik Osmanlı mimarisinin karakteristik öğesi olan "baklavalı" başlıklar, yığma taşıyıcı kolon (Structural Column) kategorisinde, statik yük aktarımını karşılayacak parametrelerle sisteme dahil edilmiştir.



Şekil 5.23 Revit modeli başlıklı mermer kolon elemanı.

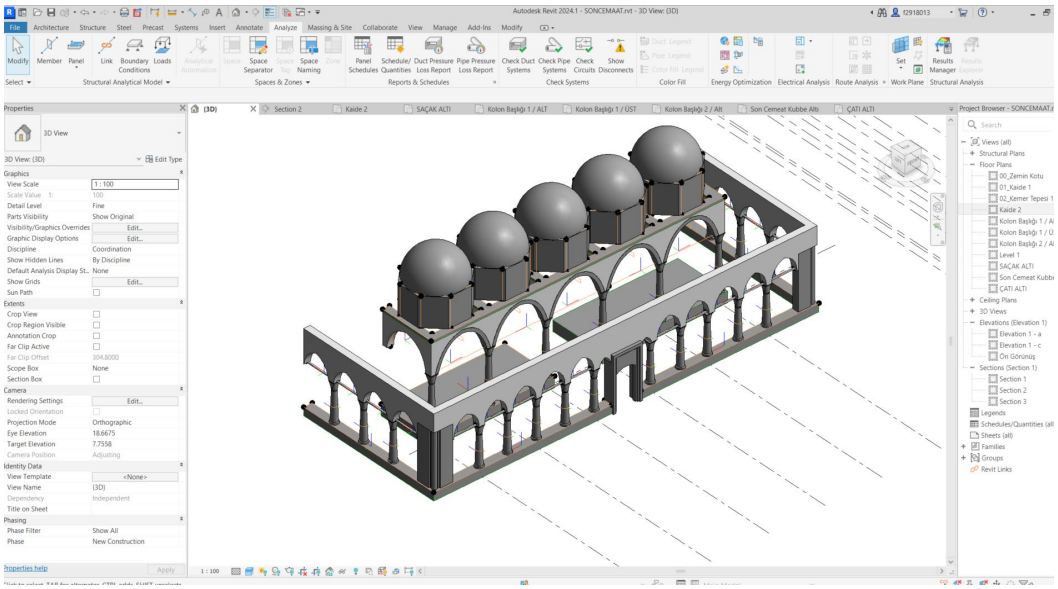
ii. Kemer elemanları ve birleşim bölgeleri: Yük aktarım mekanizmalarının doğru temsil edilebilmesi için kemer geometrileri, yapısal duvar (Structural Wall) ve çerçeve (Structural Framing) bileşenleri kullanılarak rölöve akslarına uygun şekilde entegre edilmiştir.

iii. Üst örtü sistemi ve kubbe kasnak bileşenleri: Beşli kubbe dizisi, "In-Place Mass" yöntemiyle türetilmiş ve ardından yapısal yüzeylere (Analytical Surface) dönüştürülmüştür. Kubbe ağırlığının alt taşıyıcılara aktarımını sağlayan kasnak elemanları ise “Structural Wall” tipinde modellenmiştir. Pandantifler ve çatı örtüsü modele işlenmemiştir.



Şekil 5.24 Kiriş niteliğinde “structural framing” kullanılarak modellenmiş kemer elemanları.

iv. Döşeme ve platform elemanları: Mermer sütunların oturduğu platform “Structural Floor” olarak modellenmiştir.



Şekil 5.25 Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat bölümü Revit modeli.

Yapısal bileşenlerin oluşturulmasında geometrik doğruluk ve biçimsel temsilden ziyade elemanlar arası ilişkilerin tanımlanabilir olması ve sensör verisiyle eşleştirilebilecek mantıksal referans noktalarının üretilebilmesi esas alınmıştır.

Son cemaat yerinin üç boyutlu modeli, yapının strüktürel organizasyonunu okunabilir kılacak düzeyde detaylandırılmıştır. Gereksiz geometrik ayrıntılardan kaçınılarak modelin izleme ve veri işleme performansını düşürmeyecek bir sadelikte tutulmasına dikkat edilmiştir. Dijital ikiz sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan yüksek model karmaşıklığı ve düşük veri işlenebilirliği sorununa karşı bilinçli olarak bu yaklaşım tercih edilmiştir.

Elde edilen model, sensör yerleşimlerinin tanımlanmasına, veri akışının simüle edilmesine ve risk durumlarının görsel olarak izlenmesine olanak sağlayan deneysel bir dijital ikiz prototipi niteliği taşımaktadır. Bu model izleme senaryolarının uygulanacağı veri altyapısının kurulmasına temel oluşturmuştur ve bir sonraki aşamada sensör konumlarının, eşik değerlerin ve veri akış kurgusunun tanımlanmasına imkân vermektedir.

Bu bağlamda son cemaat yeri modeli, veri temelli önleyici koruma yaklaşımının mekânsal arayüzü olarak değerlendirilmiştir. Modelin asıl işlevi, yapısal davranışın dijital ortamda izlenmesini mümkün kılan bir karar destek altyapısının temelini oluşturmasıdır.

5.3.5.1 Modelin LOD / LOK Düzeyinin Tanımlanması

Son cemaat yeri için oluşturulan modelin değerlendirilmesi yalnızca LOD (Level of Development) kavramı üzerinden değil, miras yapılarında bilginin güvenilirliği, doğru yorumlanması ve karar süreçlerine katkısı üzerinden tanımlanan LOK (Level of Knowledge) yaklaşımıyla birlikte ele alınmıştır.

Geometrik temsil doğruluğu, taşıyıcı sistem ilişkilerinin kurulumu ve sensör verisiyle eşleşebilecek parametrik veri alanlarının tanımlanmış olması dikkate alındığında, model **LOD 300** seviyesinde bir detay gelişim düzeyine sahiptir.

Model, yapısal elemanların konumunu, ilişkilerini ve tipolojik özelliklerini güvenilir şekilde temsil ederek; sensör yerleşimleriyle bağlantılı referans noktalarını içermekte ve izleme verilerinin eşik değerler üzerinden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, koruma ve müdahale kararlarına veri sağlayan bir bilgi içeriği sunmakta olup, TYBM literatüründe tanımlanan bilgi düzeylerine göre **LOK 400** (koruma ve müdahale süreçlerini destekleyen bilgi seviyesi) kategorisi içerisindedir.

Bununla birlikte çalışmanın saha uygulaması ve uzun dönemli yönetim süreçlerini kapsamaması nedeniyle modelin, bütüncül yönetim ve sürekli izleme düzeyini ifade eden **LOK 500** seviyesine ulaşmadığı, ancak bu seviyeye geçiş için gerekli veri altyapısını ve metodolojik çerçeveyi kurduğu kabul edilmiştir.

5.3.6 Son Cemaat Yeri Modelinin Analitik Değerlendirmesi

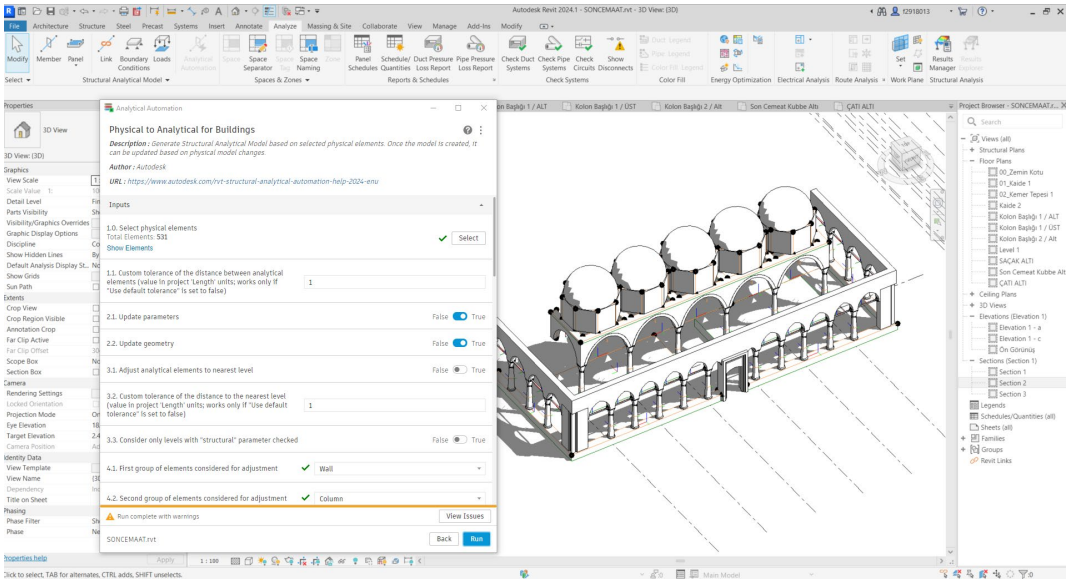
Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat yeri modeli, Revit 2024 ortamındaki **"Physical to Analytical for Buildings"** otomasyonu kullanılarak fiziksel formdan analitik bir sisteme dönüştürülmüştür. Bu işlem yalnızca bir format değişikliği olarak değerlendirilmemekte, aynı zamanda özgün yığma geometrisinin yanı sıra taşıyıcı sistemde yer alan strüktürel bileşenlerin (düğüm noktaları, çubuk elemanlar ve yüzeyler) birbirleriyle olan sürekliliğinin denetlenmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir. Böylelikle, fiziksel modelin analitik olarak çalışabilir bir strüktür oluşturduğu doğrulanmıştır; sensörlerden gelecek verilerin hangi yapısal elemanlar üzerinde ne tür bir mekanik karşılık bulacağının simüle edilebileceği teknik altyapı tamamlanmıştır.

Dönüşüm sürecinde modeldeki taşıyıcı elemanların geometrik temsilleri, analiz ortamında çalışabilir çizgisel (frame) ve yüzeysel (shell) analitik bileşenlere

aktarılmış; eleman eksenlerinin doğruluğu, düğüm noktalarının çakışma toleransları, birleşim bölgelerindeki topolojik süreklilik ve yük aktarım zincirinin kesintisizliği kontrol edilmiştir. Böylece modelin yalnızca biçimsel değil, yapısal tipoloji açısından da tutarlı bir dijital karşılık ürettiği doğrulanmıştır.

Son cemaat yerinin kolon–kemer sistemi, özellikle yatay yükler altında moment aktarımı ve kesme gerilmeleri bakımından kritik bir alt sistem oluşturduğundan, analitik modelde kolon–kemer birleşim bölgelerinin düğüm sürekliliği ve eleman bağlantı kurgusu ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Bu değerlendirme, sensör temelli izleme verilerinin mühendislik disiplinleriyle gerçekleştirilebilecek yük senaryosu tanımlamaları, performans karşılaştırmaları ve davranış analizleri ile ilişkilendirilebilecek bir yapısal referans sistemine dayandığını göstermektedir.

Bu aşamada ayrıntılı bir sonlu eleman çözümlemesi gerçekleştirilmemiş olmakla birlikte, modelin analitik modele uygunluğu, TYBM altyapısının ileri mühendislik analizlerine, yük kombinasyonlarına ve performans değerlendirmelerine imkân verebilecek teknik yeterliliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Böylece sensör verisi ile yapısal çözümleme arasında yalnızca kavramsal değil, model düzeyinde tanımlanmış bir süreklilik sağlanmış, izleme sistemi ile mühendislik değerlendirmeleri arasında çift yönlü çalışabilecek bir dijital omurga kurgulanmıştır.



Şekil 5.26 Analitik Model

5.3.7 İzleme Parametrelerinin Belirlenmesi ve Sensör Sisteminin Planlanması

Son cemaat yeri için hazırlanan modelin dijital ikiz prensibinde karar destek üretme kapasitesinin değerlendirilebilmesi, yapıda izlenmesi hedeflenen davranış türlerinin sistematik biçimde tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda izleme yaklaşımı, son cemaat yerinin taşıyıcı iskeletinde kritik rol oynayan elemanların maruz kalabileceği dinamik tepkiler, geometrik deformasyonlar ve çevresel etkiler ekseninde planlanmıştır Amaç, yapısal bozulma süreçlerini yalnızca gözlemsel değerlendirmelerle değil, ölçülebilir fiziksel büyüklüklere dayalı olarak erken aşamada tespit edebilen bütüncül bir izleme çerçevesi oluşturmaktır.

Bu doğrultuda izleme sistemi kapsamında üç ana davranış eğilimi esas alınmıştır:

i. **Dinamik davranış değişimleri:** Yapının doğal frekansında, titreşim genliğinde veya ivme tepkilerinde meydana gelebilecek sapmalar, örtü sistemi ve taşıyıcı elemanlardaki rijitlik kaybının en erken göstergeleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle dinamik parametrelerin izlenmesi, hasarın görünür hâle gelmesinden önce müdahale edilebilmesine olanak tanıyan kritik bir erken uyarı bileşenidir.

ii. **Yapısal deformasyon ve hasar gelişimi:** Kolon eğilmeleri, kemer–kolon birleşimlerinde yer değiştirmeler, çatlak açıklıklarının zaman içerisindeki değişimin takibi diferansiyel oturma, yük aktarımındaki düzensizlikler veya malzeme zayıflamaları hakkında doğrudan bilgi üretmektedir. Bu tür ölçümler, önleyici koruma yaklaşımının gerektirdiği bakım kararlarının oluşturulmasına temel teşkil etmektedir.

iii. **Çevresel etkiler ve davranış korelasyonu:** Sıcaklık ve nem gibi çevresel parametreler, malzeme genleşmesi, nem hareketleri ve uzun dönemli bozulma süreçleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Çevresel verilerin yapısal ölçümlerle birlikte değerlendirilmesi, yanlış alarm durumlarının azaltılmasına ve ölçülen davranışın gerçek nedeninin yorumlanmasına katkı sağlamaktadır.

Bu üçlü izleme yaklaşımı, kültürel miras yapılarında önleyici koruma anlayışının gerektirdiği **erken uyarı, risk değerlendirme ve müdahale planlama** süreçlerinin dijital ortamda temsil edilmesine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla sensör sistemi, yalnızca veri toplayan bir teknik donanım olarak değil; dijital ikiz modelinin **anlamlandırma ve karar üretme katmanını** oluşturan temel bileşen olarak ele alınmaktadır.

Bu model için planlanan izleme altyapısı dinamik davranışın belirlenmesine yönelik **ivmeölçerleri**, bağıl hareketlerin ve deformasyonların ölçülmesine yönelik **yer değiştirme sensörlerini**, çatlak gelişiminin izlenmesine yönelik **çatlak ölçerleri** ve çevresel koşulların değerlendirilmesine yönelik **sıcaklık–nem sensörlerini** içermektedir. Söz konusu sensörler, yapısal kırılganlık potansiyelinin yoğunlaştığı kemer–kolon birleşimleri, kubbe kasnakları, taşıyıcı kolonlar ve örtü sistemi gibi kritik bölgelerle ilişkilendirilerek konumlandırılmıştır.

Tablo 5.1 Planlanan senaryolar ve ilgili sensörlerin yerleşimi

Sensör Kodu	Sensör Türü	Ölçülen Parametre	Birim	Konum	Amaç	Senaryo
ACC-01	İvmeölçer	Titreşim, ivme, doğal frekans değişimi	g, Hz	Kubbe kasnağı, örtü sistemi	Rijitlik kaybı ve dinamik davranış sapmalarının erken tespiti	Senaryo 1
LVD-01	Yer Değiştirme Sensörü (LVDT)	Bağıl yer değiştirme, açıklık değişimi	mm	Kemer–kolon birleşimleri	Diferansiyel hareket ve yük aktarım düzensizliklerinin belirlenmesi	Senaryo 2
CRK-01	Çatlak Ölçer	Çatlak açıklığı değişimi	mm	Tonoz, kubbe, kemer ayakları, duvarlar.	Hasar gelişiminin zaman içindeki takibi ve bakım ihtiyacının belirlenmesi	Senaryo 2
TILT-01	Eğim Sensörü (Tiltmetre)	Açısal dönme, eğilme	°	Taşıyıcı kolon başlıkları	Oturma ve dönme etkilerinin saptanması	Senaryo 2
TEM-01	Sıcaklık Sensörü	Ortam sıcaklığı	°C	İç mekân, kubbe altı	Malzeme genleşmesi ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi	Senaryo 3
HUM-01	Bağıl Nem Sensörü	Nem oranı	%RH	İç mekân, duvar yüzeyleri	Nem kaynaklı bozulma süreçlerinin izlenmesi	Senaryo 3

Sensörlerin konumlandırılmasındaki ana prensip, ölçüm noktalarının yapının yük aktarım zinciri üzerindeki kritik düğüm noktalarıyla çakıştırılmasıdır. Bu doğrultuda kemer–kolon birleşimleri, kubbe kasnakları ve taşıyıcı kolon başlıkları hem gerilme birikiminin yoğunlaştığı hem de deformasyonların ilk gözlendiği bölgeler olması nedeniyle öncelikli izleme alanları olarak belirlenmiştir. Çevresel sensörler ise yapısal ölçümlerin yorumlanmasını destekleyecek biçimde mekânsal olarak dağıtılmıştır.

Tanımlanan sensör sistemi, dijital ikiz modelinde geliştirilen senaryolar için ölçülebilir veri altyapısını oluşturmuş ve izleme sonuçlarının eşik değerler üzerinden değerlendirilmesini sağlamıştır. Bu sensör seti temel alınarak geliştirilen üç senaryonun kurgulanma ve uygulanma süreçleri, Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3 başlıkları altında ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

5.3.7.1 Senaryo 1: Dinamik Davranış Sapmalarının Belirlenmesi

Senaryo 1 kapsamında izleme, Tablo 5.1'de tanımlanan **ACC-01 ivmeölçer** sensörü üzerinden yürütülmektedir. Sensörün kubbe kasnağı ve örtü sistemiyle ilişkili bir konumda ele alınması, bu bölgenin yapının genel titreşim davranışını temsil edebilecek duyarlılığa sahip olmasıyla ilişkilidir. Örtü sistemi, taşıyıcı elemanlar arasındaki yük aktarım zincirinin tepe noktasını oluşturması ve rijitlik değişimlerine karşı hassas tepki vermesi nedeniyle, dinamik karakteristiklerde meydana gelen küçük ölçekli değişimlerin dahi izlenebileceği kritik bir ölçüm noktası olarak değerlendirilmektedir.

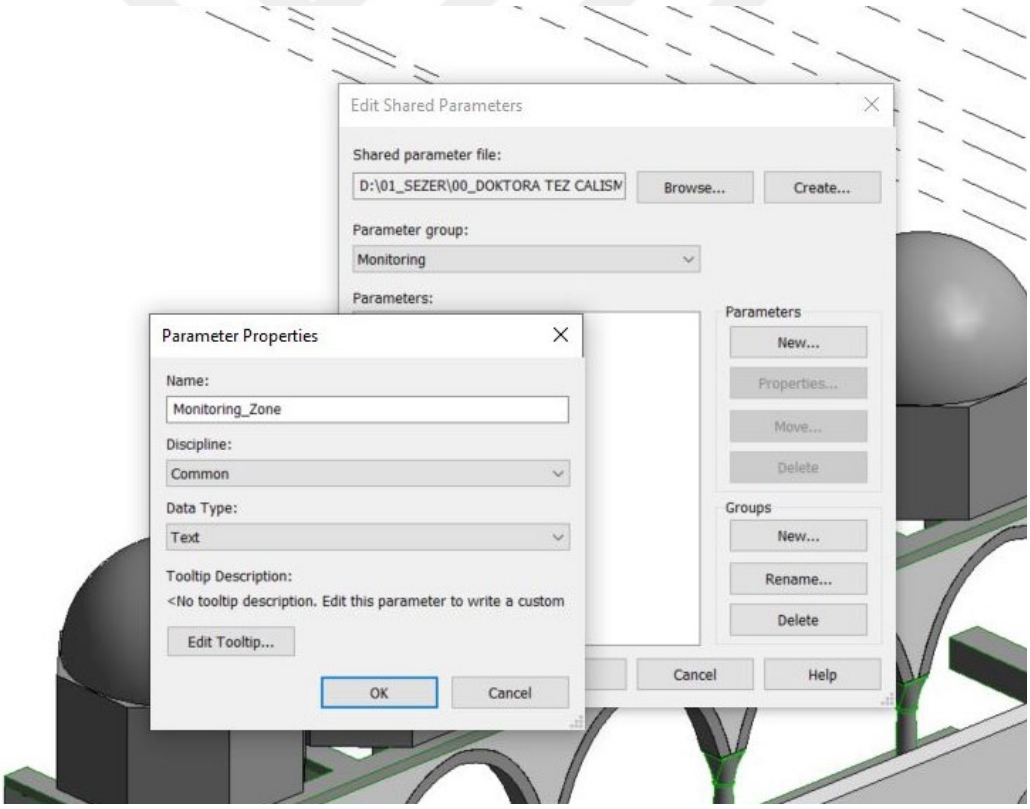
Dinamik izleme yaklaşımı, yapısal sistemde ortaya çıkabilecek rijitlik kaybı, bağlantı zayıflaması ya da malzeme bütünlüğündeki değişimlerin doğal frekans değerlerinde azalma ve titreşim tepkisinde farklılaşma şeklinde kendini göstereceği varsayımına dayanmaktadır. Bu doğrultuda senaryoda risk değerlendirmesi, ivme verilerinden türetilen frekans değişimi ile ivme genliğindeki artışın birlikte ele alınması ve bu değerlerin tanımlanan eşiklerle karşılaştırılması üzerinden kurulmuştur. Böylelikle gözle görünür bir hasar oluşmadan önce ortaya çıkan davranış farklılıklarının sayısal olarak belirlenmesi ve model ortamında yorumlanabilmesi sağlanmıştır.

ACC-01 sensöründen elde edildiği varsayılan zaman bağımlı ivme verileri, referans frekans değeri ile karşılaştırılarak frekans sapma oranının hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Frekans sapması ile ivme genliğinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda ise **normal, uyarı ve kritik** olmak üzere üç kademeli bir risk sınıflaması üretilmektedir. Tanımlanan bu eşik temelli değerlendirme yaklaşımı, SCY modelinde dinamik davranış değişimlerinin ölçülmesini ve yorumlanarak karar üretim sürecine aktarılmasını mümkün kılan temel mekanizma olarak ele alınmıştır.

Senaryo 1 kapsamında kullanılan ACC-01 ivmeölçer sensörünün son cemaat yeri modeliyle ilişkilendirilmesi, örtü sisteminin dinamik davranışını temsil edebilecek

yapısal bölgelerin belirlenmesiyle başlamıştır. Bu aşamada, sensör ölçümlerinin tekil bir yapı elemanına değil, örtü sisteminin bütüncül titreşim tepkisini yansıtabilecek bir bölgeye karşılık gelmesi gerektiği kabul edilmiştir. Bu doğrultuda ilk adım olarak kubbe altı etek duvarları ile kasnak bileşenleri, dinamik davranışın izlenmesine uygun alanlar olarak belirlenmiştir.

i. İzleme kapsamındaki yapısal elemanların ortak bir "izleme bölgesi" kimliği altında gruplanabilmesi için öncelikle bir shared parameter tanımlanmıştır. Bu işlem Revit'te Manage → Shared Parameters menüsü üzerinden yürütülmüş, parametre dosyası oluşturularak "Monitoring" grubu altında "Monitoring_Zone" adlı Text tipinde bir parametre tanımlanmıştır. Bu parametre, sensör verisinin tekil eleman yerine bölgesel davranış düzeyinde modellenebilmesini destekleyen temel referans alanı olarak kurgulanmıştır.



Şekil 5.27 Sensörler için izleme alanı parametresi tanımlanması

ii. Oluşturulan shared parameter'ın modeldeki hedef elemanlara uygulanabilmesi için parametre proje ortamına aktarılmıştır. Bu amaçla Manage → Project Parameters → Add yolu izlenmiş, Monitoring_Zone parametresi Shared Parameter olarak seçilerek proje parametresi hâline getirilmiştir. Parametre, kasnak/etek duvarlarının modelde bulunduğu kategoriye karşılık gelecek şekilde Categories bölümünde Structural Walls seçilerek atanmış ve Instance parametre olarak tanımlanmıştır. Böylece izleme bölgesi bilgisi her bir duvar elemanı için ayrı ayrı yazılabilir ve Dynamo tarafından çözümlenebilir hale getirilmiştir.

iii. ACC-01 sensörünün dinamik davranışı temsil ettiği kabul edilen bölge, kubbe altındaki etek duvarları ve kasnak bileşenleri olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, her kubbe altında bulunan kasnak duvarları Revit 3B görünümünde seçilerek Monitoring_Zone alanına ilgili bölge kimliği girilmiştir. Bu işlemde amaç, sensör ölçümünün tek bir duvara indirgenmemesi, bunun yerine, ölçümün temsil ettiği örtü sistemi davranışının modelde bölgesel bir izleme alanı üzerinden okunabilir hâle getirilmesidir. Böylece aynı kubbeye ait kasnak/etek duvarları, ortak bir Monitoring_Zone değeriyle ilişkilendirilmiştir.

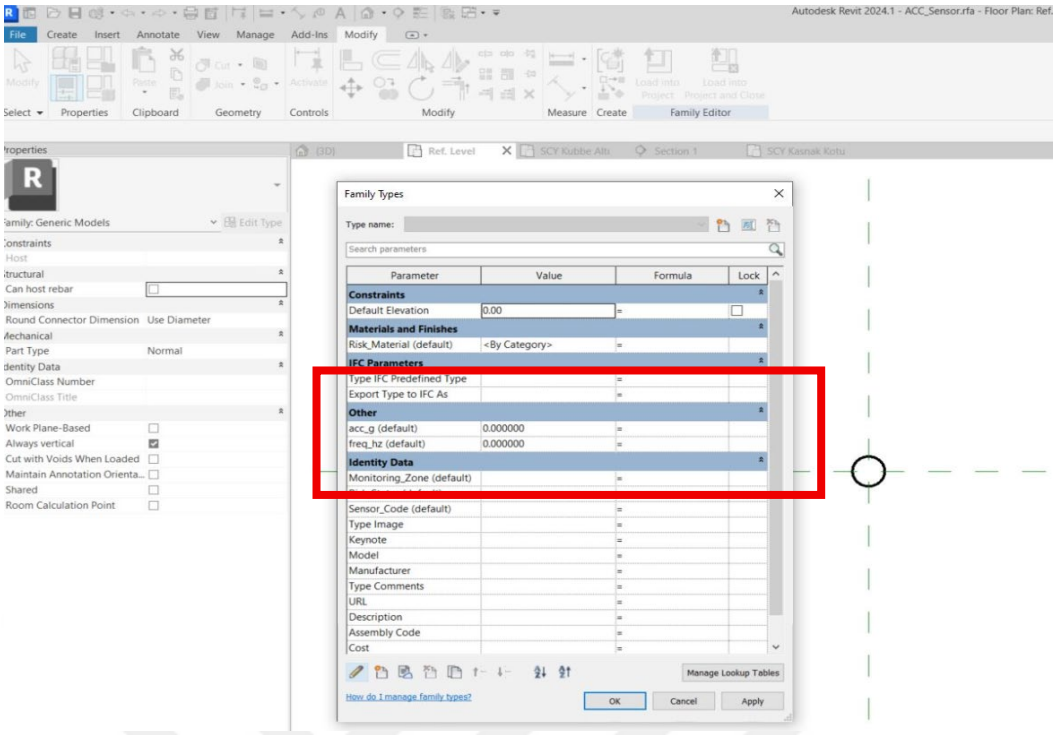
iv. Sensörün modelde veri taşıyan bir nesne olarak temsil edilebilmesi için ayrı bir sensör family oluşturulmuştur. Sensörün geometrik detayından ziyade veri entegrasyonu hedeflendiği için sensörü temsil eden basit bir sembolik geometri kullanılmıştır. Böylelikle görsel karmaşıklığı artırmadan sensör–veri–model ilişkisi kurulmuştur.

v. Sensör family'sinin, CSV veri setlerinden gelen ölçüm değerlerini alabilecek ve risk değerlendirme çıktısını modelde taşıyabilecek bir parametre yapısı ile donatılması için eşleşecek parametreler eklenmiştir. Familyde sensör kimliği ve bölge eşleştirmesi için Sensor_Code ve Monitoring_Zone (Text), ölçüm değerleri için acc_g ve freq_hz (Number) parametreleri tanımlanmıştır. Ayrıca senaryo sonuçlarının model üzerinde izlenebilmesi amacıyla Risk_Status (Text) parametresi eklenmiştir. Tanımlanan bu parametreler veri aktarımın sağlamak ve izlenen yapısal davranışın fiziksel karşılığını modelde temsil edebilmek amacıyla kullanılmıştır.

Freq_Hz parametresi, yapısal sistemin baskın doğal titreşim frekansını ifade etmektedir. Doğal frekans değeri, taşıyıcı sistem rijitliği ve kütle dağılımı ile doğrudan ilişkili olduğundan, malzeme zayıflaması, çatlak oluşumu veya bağlantı gevşemesi gibi yapısal değişimler çoğu durumda frekans değerinde azalma şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu değişimin izlenmesi, görünür hasar oluşumundan önce yapısal durum hakkında bilgi verebilen güvenilir bir erken uyarı göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Acc_g parametresi ise sensör tarafından ölçülen titreşim ivmesini yerçekimi ivmesi cinsinden temsil etmektedir. İvme değeri, yapının dinamik yükler altındaki anlık tepkisini ve titreşim şiddetini ortaya koyan tamamlayıcı bir değer niteliğindedir. Artan ivme değerleri, sistemde oluşabilecek zorlanmaların ve enerji aktarımının büyüklüğüne işaret edebildiğinden, frekans değişimi ile beraber değerlendirilmesi gerekmektedir.

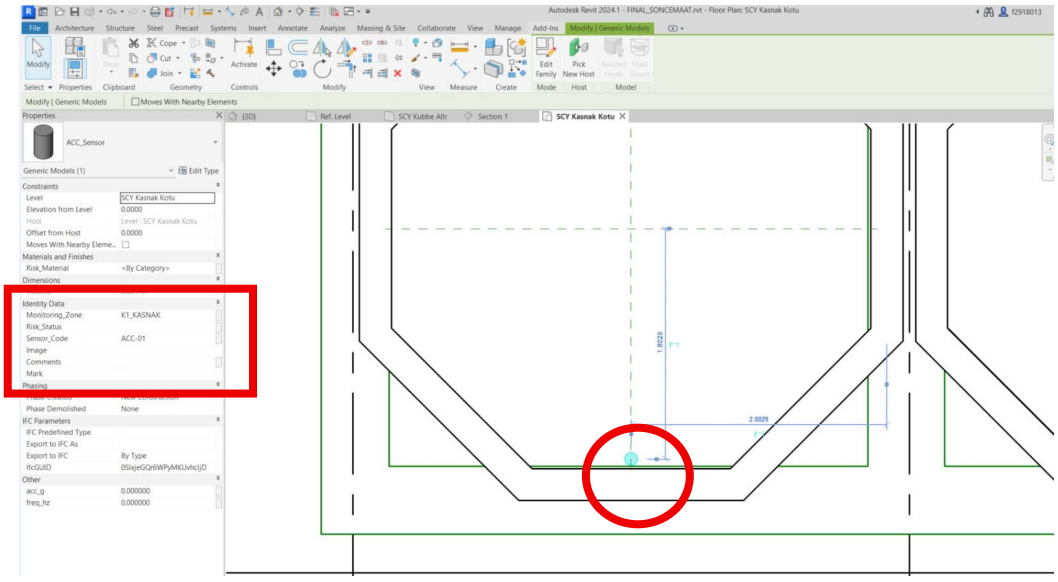
Bu iki parametrenin birlikte yorumlanmasıyla, yapısal davranışın ölçülmesi ve aynı zamanda risk düzeyine dönüştürülerek karar süreçlerine aktarılması mümkündür. Sensör family'sinde tanımlanan Risk_Status parametresi, doğal frekanstaki azalma oranı ile ivme büyüklüğüne dayalı eşik değerler kullanılarak belirlenen **normal, uyarı ve kritik** durumlarını temsil edecek biçimde kurgulanmıştır. Böylece sensör verisi model içerisinde görsel ve analitik olarak yorumlanabilir bir karar destek bileşenine dönüşmüştür.



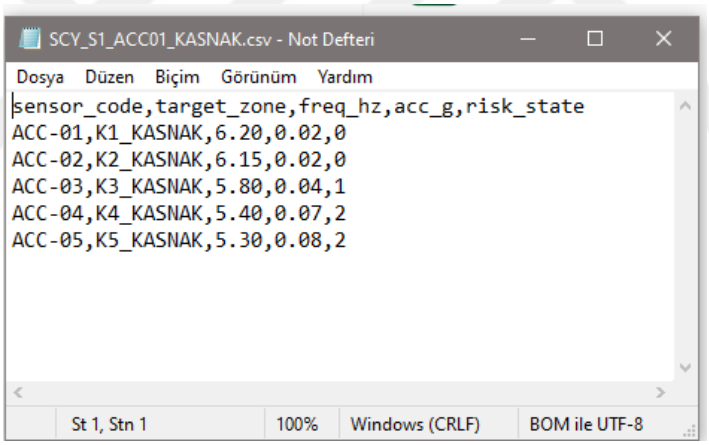
Şekil 5.28 Sensör elemanı oluşturulması ve ilgili parametrelerin girilmesi

vi. Senaryo 1'in görsel çıktısı olarak model üzerinde "normal/uyarı/kritik" risk durumlarının görsel olarak ayrıştırılabilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle sensör family'sinde, görselleştirme kontrolüne temel oluşturmak üzere Risk_Material adlı Material tipinde bir parametre tanımlanmış ve sensör geometrisine malzeme parametresi olarak atanmıştır. Böylece Dynamo aracılığıyla risk durumuna bağlı olarak malzeme/renk değişimi yapılabilecek bir uyarı altyapısı hazırlanmıştır.

vii. Parametreleri tanımlanan sensör family'si SCY modelinin bulunduğu proje ortamına aktarılmıştır. Sensörler, senaryo kurgusuna uygun şekilde kubbe altı kasnak/etek duvarlarını temsil eden bölgeye yakın olacak biçimde yerleştirilmiştir. Her sensöre Sensor_Code ve Monitoring_Zone değerleri girilmiştir. Böylece sensör nesnesi ile izleme bölgesi arasında doğrudan bir ilişki kurulmuş, sonraki aşamada CSV veri setlerinin Dynamo ile modele aktarılmasına hazır bir entegrasyon zemini oluşturulmuştur.



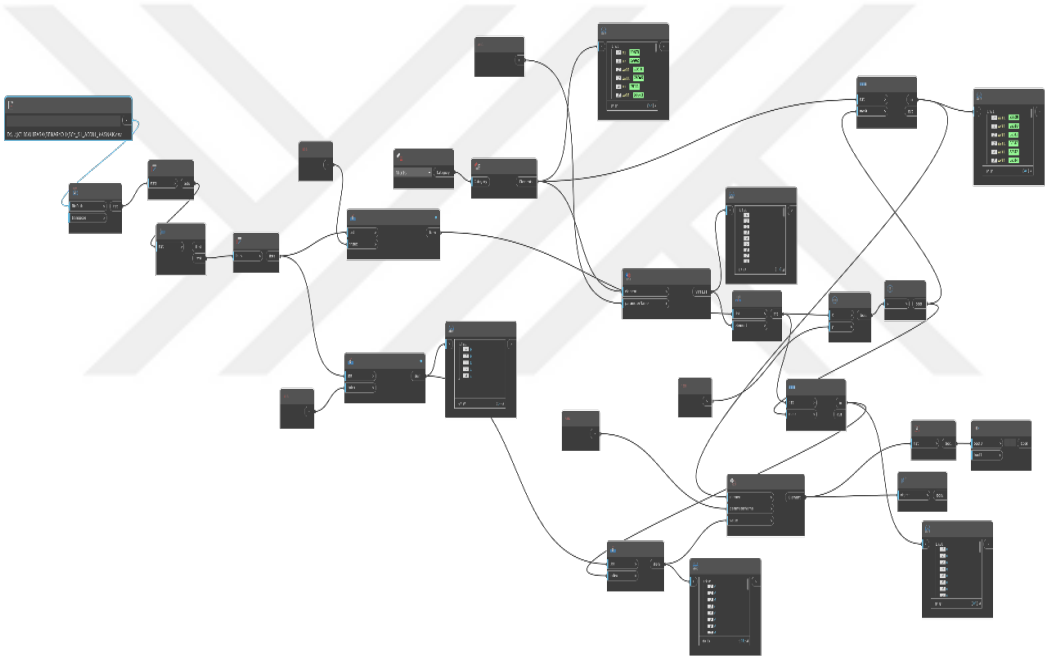
Şekil 5.29 K1 Kubbe kasnağını izlemek için yerleştirilen ACC sensörü



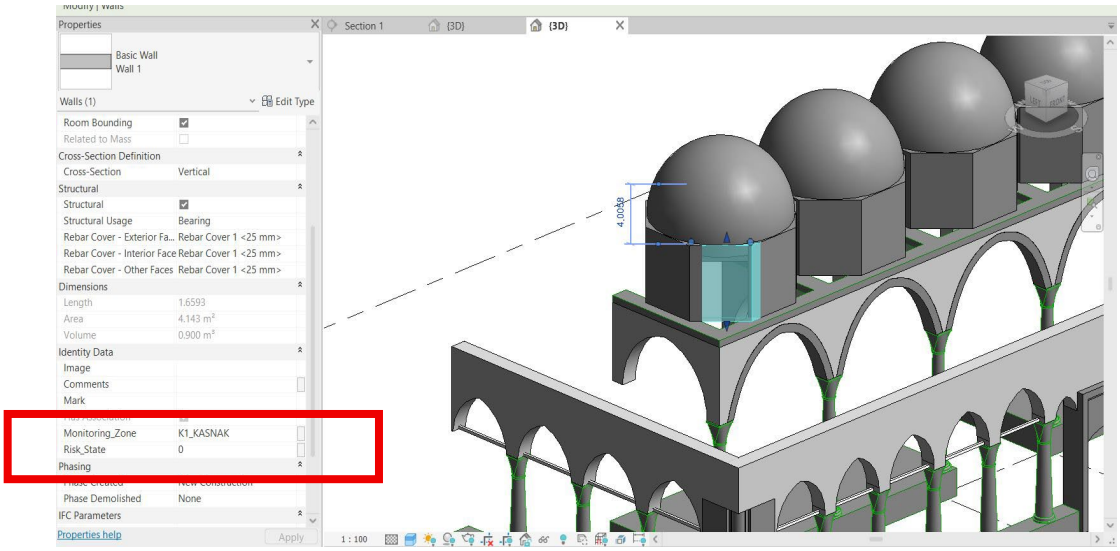
Şekil 5.30 Senaryo 1 için sensörlerden çekildiği öngörülen verilerin CSV dosyası Notepad içeriği.

viii. Oluşturulan CSV dosyası, her bir sensörün ait olduğu izleme bölgesini, ölçtüğü dinamik parametreleri ve bu ölçümlere bağlı olarak belirlenen risk durumunu içerecek biçimde kurgulanmıştır. Bu kapsamda veri setinde, sensör kimliğini tanımlayan "Sensor_Code", sensörün ilişkilendirildiği kasnak izleme bölgesini ifade eden "Target_Zone", yapının doğal titreşim frekansını gösteren "Freq_Hz", ölçülen titreşim ivmesini temsil eden "ACC_g" ve değerlendirme sonucunu ortaya koyan "Risk_State" alanları tanımlanmıştır.

ix. Hazırlanan CSV dosyası “Data.ImportCSV” olarak Dynamo ortamına çekilmiş ve kolon bazlı olacak şekilde işlenmiştir. Revit ortamındaki dijital ikiz üzerinde oluşturulan “Monitoring_Zone” ve “Risk_State” parametrelerine göre, sensör verilerine bağlı maskeleme yaparak, ilgili zonlardaki tanımlanan kasnak duvarlarına risk değerleri işlenmiştir. Model içerisindeki bilgilerin doğruluğu ve sensör verisiyle eşleşmesi sayesinde varsayılan ölçüm verisinin doğrudan modelin bilgi parçası haline gelmesi sağlanmıştır. Böylelikle dijital ikiz yaklaşımının temel gerekliliklerinden biri olan ***“veri-model bütünleşmesi”*** gerçekleşmiştir.



Şekil 5.31 Senaryo 1 için hazırlanan Dynamo arayüzü.



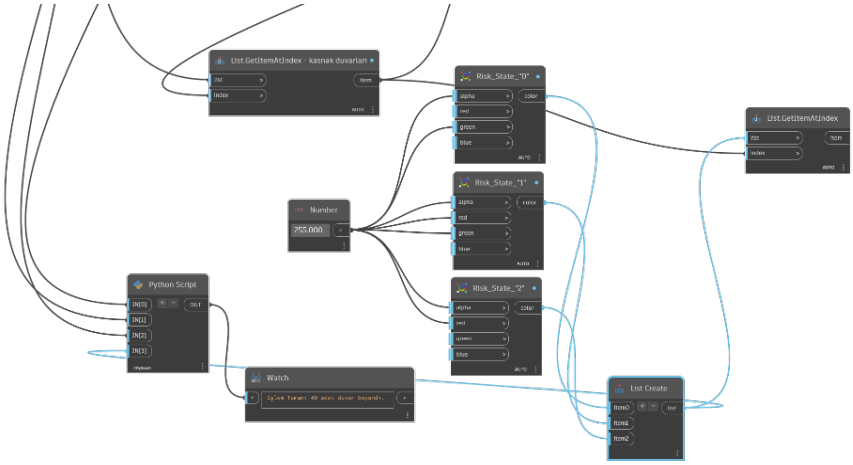
Şekil 5.32 Dynamo aracılığıyla Revit modelde ilgili parametrelere otomatik olarak veri girişi sağlanması.

x. Son aşamada risk sınıflamasının izlemeyi yapan uzman tarafından hızlı biçimde okunabilmesi amacıyla, model görünümünde Dynamo çalıştırıldığında görsel olarak uyarı veren bir "Alarm Görünümü" kurulmuştur. Python tabanlı görünüm denetimi kodu kurularak elemanların grafik özellikleri risk seviyelerine bağlı olacak şekilde yeniden tanımlanmıştır. Sensör verilerinden alındığı varsayılan "0-1-2" risk seviyeleri RGB renklerle eşleştirilmiştir. Buna göre:

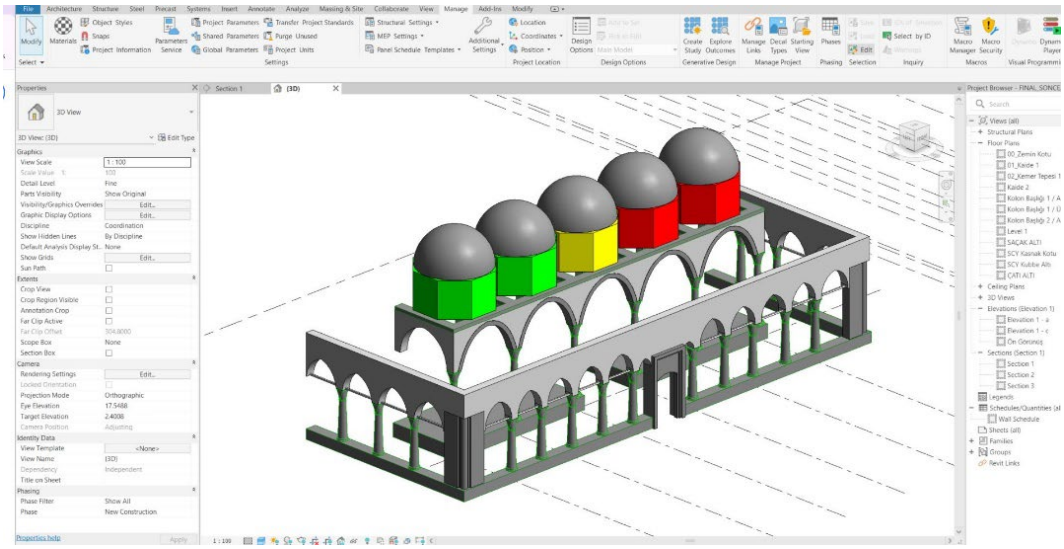
Risk Statüsü 0: Normal : Yeşil

Risk Statüsü 1: Uyarı : Sarı

Risk Statüsü 2: Kritik : Kırmızı olarak modelde temsil edilmiştir.



Şekil 5.33 Dynamo ve Python ile alarm sistemi kurulması



Şekil 5.34 Kurulan alarm sisteminin Revit ortamında görsel ifadesi

Bu görselleştirme, risk bilgisinin yalnızca sayısal bir parametre olarak kalmasını engelleyerek modelin riskli kısımlarının görsel olarak okunabilmesine imkan sağlamıştır.

5.3.7.2 Senaryo 2: Yapısal Deformasyon Takibi

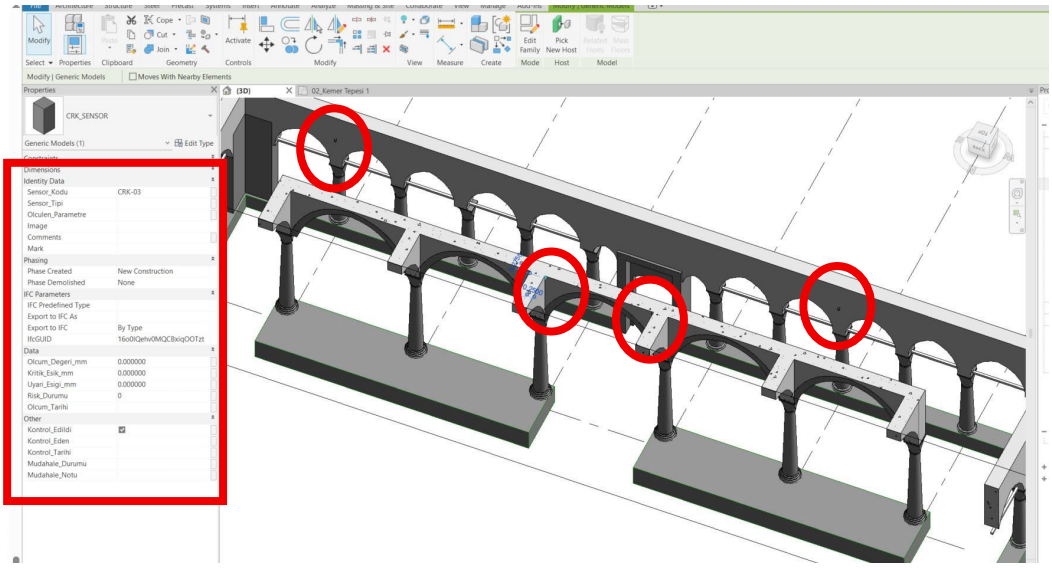
Senaryo 2 kapsamında izleme yaklaşımı, yapısal sistemde zamanla birikebilecek yer değiştirme, çatlak gelişimi gibi deformasyon süreçlerinin erken aşamada tanımlanmasına odaklanmaktadır. Bu senaryoda amaç, ani hasar oluşumunu tespit etmekten ziyade, çatlak gelişimi gibi **zamana bağlı ilerleyen davranışların** izlenmesi ve buna bağlı bakım müdahalelerinin proaktif biçimde planlanabilmesidir. Bu doğrultuda senaryo, Tablo 5.1'de tanımlanan LVD-01 yer değiştirme sensörü, CRK-01 çatlak ölçer ve TILT-01 eğim sensörü üzerinden teorik olarak tanımlanmış; ancak yöntemsel kurgunun doğrulanabilmesi amacıyla uygulama aşamasında **çatlak ölçer (CRK) sensörleri** üzerine odaklanacak biçimde sınırlandırılmıştır.

Yer değiştirme ölçümleri, özellikle **kemer–kolon birleşim bölgelerinde** yük aktarım sürekliliğinin korunup korunmadığını değerlendirmek açısından önemli kabul edilmiştir. Bu bölgelerde oluşabilecek diferansiyel hareketler, yapısal sistemde düzensiz yük dağılımına ve ilerleyici hasar mekanizmalarına işaret edebilmektedir. Buna paralel olarak çatlak genişliği değişimleri, taşıyıcı elemanlarda gerilme birikiminin zamansal gelişimini ortaya koyan temel göstergelerden biri olarak ele alınmıştır. Çatlak davranışının süreklilik göstermesi

veya eşik değerleri aşması, yalnızca mevcut hasarın büyüklüğünü değil, aynı zamanda gelecekteki yapısal performansa ilişkin riskleri de tanımlamaktadır.

Eğim ölçümleri ise kolon başlıkları düzeyinde oluşabilecek oturma, dönme veya eksen dışı davranışların belirlenmesine yönelik tamamlayıcı bir izleme katmanı sunmaktadır. Bu tür deformasyonların çoğu zaman doğrudan gözlenebilir hasar üretmeden önce ortaya çıkması, eğim verilerini proaktif koruma açısından kritik bir erken uyarı parametresi hâline getirmektedir. Böylece yer değiştirme, çatlak ve eğim verileri birlikte değerlendirilerek yapısal sistemin yalnızca anlık durumu değil, zaman içindeki davranış eğilimi de okunabilir hâle gelmektedir.

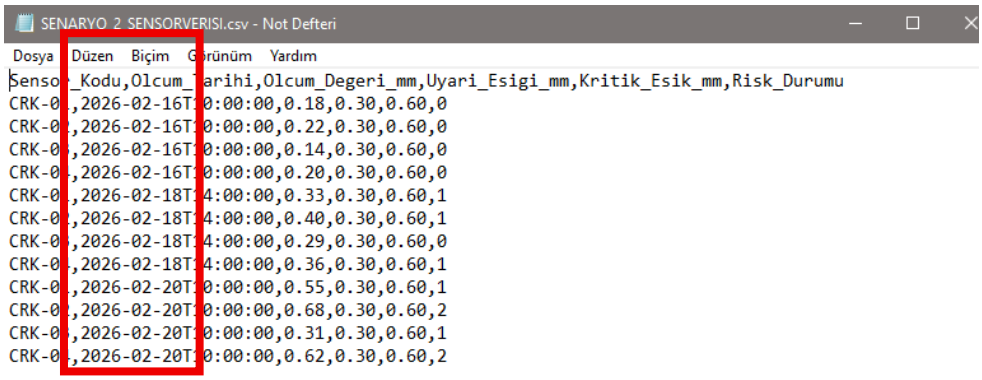
i. Senaryo 2'nin işlerliğini test etmek için önce Revit ortamında **Generic Model** özelliğinde bir CRK sensör ailesi oluşturulmuştur. Sensörden elde edilmesi öngörülen veri seti; sensör kimliği, ölçüm değeri, eşik tanımları, risk durumu ve kontrol bilgilerini içerecek biçimde parametreleştirilmiş ve bu parametreler *Shared Parameter* yapısında tanımlanarak model genelinde erişilebilir hâle getirilmiştir. Böylece her sensörün bağımsız biçimde veri tutabilmesi, dış veri kaynaklarıyla ilişkilendirilebilmesi ve model tabanlı izleme süreçlerine dâhil edilebilmesi sağlanmıştır.
ii. Model üzerinde iki adet beden duvarı ve iki adet kemer birleşim bölgesine yerleştirilen dört tane CRK sensörü, çatlak gelişiminin hem yatay doğrultuda hem de yük aktarım bölgelerindeki gerilme birikimi üzerinden izlenebilmesine olanak tanımaktadır. Her sensörün aynı nitelikli iki bölgeye yerleştirilmesi ise aynı nitelikli verilerin kendi içinde karşılaştırılması amacıyla planlanmıştır. Bu aşamada sensörlere ait uyarı ve kritik eşik değerleri tanımlanmış; ancak ölçüm değerleri başlangıç aşamasında boş bırakılarak bu verilerin senaryo kapsamında üretilecek **zamana bağlı ölçüm serileri** aracılığıyla modele otomatik olarak aktarılması öngörülmüştür. Böylece model, ölçüm verisinin sonradan eklendiği pasif bir ortam değil, veri akışıyla güncellenebilen aktif bir izleme altyapısı olarak kurgulanmıştır.



Şekil 5.35 Çatlak sensörlerinin Revit ortamında yerleşimi.

iii. CRK Sensörlerinden elde edildiği varsayılan çatlak açıklığı ölçümleri (mm), her sensör için tanımlanan uyarı ve kritik eşik değerleriyle birlikte kayıt altına alınmıştır. Bu eşik değerlerinin, ölçüm değerinin hangi risk seviyesine karşılık geldiğini belirleyen sınırlar tasarlanmıştır. Buna göre ölçüm değeri uyarı eşiğinin altında kaldığında "Normal", uyarı eşiği ile kritik eşik aralığında "Uyarı", bu değerin de üzerinde ise "Kritik" risk durumu tanımlanmıştır. Risk seviyeleri, CSV veri seti içinde artan tehlike düzeyini temsil edecek biçimde 0, 1 ve 2 sayısal kodlarıyla ifade edilmiştir. Ölçümlerin üç farklı zamanda alındığını gösteren zaman verisinin eklenmesiyle, çatlak davranışının yalnızca anlık değil, zamansal gelişimiyle birlikte izlenebilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, deformasyon süreçlerinin erken aşamada okunmasına ve bakım müdahalelerinin zamanında planlanmasına olanak tanımaktadır.

iv. Hazırlanan CSV veri seti, sensörlerden elde edildiği varsayılan zaman bağımlı ölçüm serilerinin sayısal temsili olarak ele alınmış ve bu verilerin Revit ortamındaki sensör nesneleriyle ilişkilendirilmesi amacıyla Python tabanlı bir veri aktarım kurgusu geliştirilmiştir. Bu süreçte sensör kimliği anahtar veri olarak kullanılmış; ölçüm değeri, eşik tanımları ve risk durumu ilgili parametrelere otomatik olarak yazdırılmıştır. Bu aşamada amaç, bir dış veri kaynağından belirli zamanlarda canlı olarak aktarılabildiğini test etmek ve önceden önerilen izleme yaklaşımının gerçek zamanlı sistemlere uyarlanabilirliğini kontrol etmektir.



Şekil 5.36 Senaryo 2 için sensörlerden ölçüm zamanlarına göre çekildiği varsayılan verilerin CSV dosyası Notepad içeriği.



Şekil 5.37 Senaryo 2 için ölçüm zamanlarına göre geliştirilen Python sistemi.

v. Geliştirilen Pyhton kodu, CSV dosyasında yer alan sensör kimliği bilgisini anahtar veri olarak kullanarak modelde karşılığına denk gelen sensör nesnesini tespit ederek ölçüm değeri, kritik eşik, uyarı eşiği, risk durumu, ölçüm tarihi parametrelerini işlemektedir. Bunun sonucunda model dış veri akışıyla anlık olarak güncellenebilir bir dinamik veri ortamına dönüşmüştür.

vi. Aynı sensörün farklı zamanlarda veri aktarabileceğini ön görerek, Python koduna "Ölçüm Zamanı" ayıklama özelliği girilmiştir. Bunun sonucunda, farklı zamanlarda yapılmış ölçümler gibi varsayarak, hangi tarih seçilirse ona göre ilgili sensörde bilgi güncellemesi sağlanmıştır. Çalışmanın bu aşaması "Çatlak Sensörü Takip Listesi" adı altında modelde liste olarak görselleştirilmiştir.

vii. Senaryo 2 kapsamında izleme süreci yalnızca hasarın tespit edilmesiyle sınırlı tutulmamış, aynı zamanda gerçekleştirilen kontrol ve müdahale eylemlerinin de modele kaydedilebilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla sensör parametrelerine *Kontrol_Edildi*, *Kontrol_Eden*, *Kontrol_Tarihi*, *Mudahale_Durumu* ve *Mudahale_Notu* alanları eklenmiştir.

Çatlak Sensörü Takip Listesi

<Çatlak Sensörü Takip Listesi>

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Sensor_Kodu	Sensor_Tipi	Olcum_Tarihi	Olculen_Param	Olcum_Degeri_	Kritik_Esik_	Uyari_Esigi_m	Risk_Duru	Kontrol_Edildi	Kontrol_Tarihi	Kontrol_Eden	Mudahale_Durumu	Mudahale_Notu
CRK-01	Çatlak Sensörü	2026-02-16T10:00:00		0.18	0.6	0.3	0	☑	2026-02-16	S.O	N/A	N/A
CRK-02	Çatlak Sensörü	2026-02-16T10:00:00		0.22	0.6	0.3	0	☑	2026-02-16	S.O	N/A	N/A
CRK-04	Çatlak Sensörü	2026-02-16T10:00:00		0.2	0.6	0.3	0	☑	2026-02-16	S.O	N/A	N/A
CRK-03	Çatlak Sensörü	2026-02-16T10:00:00		0.14	0.6	0.3	0	☑	2026-02-16	S.O	N/A	N/A

Çatlak Sensörü Takip Listesi | Wall Schedule

<Çatlak Sensörü Takip Listesi>

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Sensor_Kodu	Sensor_Tipi	Olcum_Tarihi	Olculen_Param	Olcum_Degeri_	Kritik_Esik_	Uyari_Esigi_m	Risk_Duru	Kontrol_Edildi	Kontrol_Tarihi	Kontrol_Eden	Mudahale_Durumu	Mudahale_Notu
CRK-01	Çatlak Sensörü	2026-02-18T14:00:00		0.33	0.6	0.3	1	☑	2026-02-16	S.O	İZLENİYOR	N/A
CRK-02	Çatlak Sensörü	2026-02-18T14:00:00		0.4	0.6	0.3	1	☑	2026-02-16	S.O	İZLENİYOR	N/A
CRK-04	Çatlak Sensörü	2026-02-18T14:00:00		0.36	0.6	0.3	1	☑	2026-02-16	S.O	İZLENİYOR	N/A
CRK-03	Çatlak Sensörü	2026-02-18T14:00:00		0.29	0.6	0.3	0	☑	2026-02-16	S.O	N/A	N/A

Çatlak Sensörü Takip Listesi | Wall Schedule

<Çatlak Sensörü Takip Listesi>

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Sensor_Kodu	Sensor_Tipi	Olcum_Tarihi	Olculen_Param	Olcum_Degeri_	Kritik_Esik_	Uyari_Esigi_m	Risk_Duru	Kontrol_Edildi	Kontrol_Tarihi	Kontrol_Eden	Mudahale_Durumu	Mudahale_Notu
CRK-01	Çatlak Sensörü	2026-02-20T10:00:00		0.55	0.6	0.3	1	☑	2026-02-16	S.O	İZLENİYOR	N/A
CRK-02	Çatlak Sensörü	2026-02-20T10:00:00		0.68	0.6	0.3	2	☑	2026-02-16	S.O	YERİNDE MÜDAHAL	N/A
CRK-04	Çatlak Sensörü	2026-02-20T10:00:00		0.62	0.6	0.3	2	☑	2026-02-16	S.O	YERİNDE MÜDAHAL	N/A
CRK-03	Çatlak Sensörü	2026-02-20T10:00:00		0.31	0.6	0.3	1	☑	2026-02-16	S.O	N/A	N/A

Şekil 5.38 Sensör listesi üzerinde ölçüm zamanlarına göre risk takibi.

Elde edilen bulgular, çatlak gelişimine odaklanan sensör tabanlı izleme yaklaşımının, yapısal sistemde zamanla oluşabilecek deformasyon süreçlerini erken aşamada tanımlayabildiğini göstermektedir. Sensör verilerinin HBIM modeliyle bütünleştirilmesi, yapısal davranışın yalnızca ölçülmesini değil, aynı zamanda **yorumlanabilir, karşılaştırılabilir ve müdahale üretilebilir** bir bilgiye dönüşmesini sağlamıştır.

Bu yönüyle Senaryo 2, deformasyon temelli proaktif koruma yaklaşımının uygulanabilirliğini ortaya koyarken LVDT ve TILT sensörlerinin eklenmesiyle sistemin çok katmanlı bir izleme altyapısına genişletilebileceğini de göstermektedir. Böylece önerilen TYBM tabanlı izleme modeli, yalnızca mevcut çalışmanın sınırları içinde değil, gelecekteki kapsamlı yapısal sağlık izleme uygulamaları için de ölçeklenebilir bir çerçeve sunmaktadır.

5.3.7.3 Senaryo 3: Çevresel Etkiler ve Davranış Korelasyonu

Bu senaryoda izleme yaklaşımı, yapısal sistemde gözlenen davranış değişimlerinin yalnızca içsel yapısal dinamiklerden değil, aynı zamanda çevresel koşullardan da etkilenebileceği kabulüne dayanmaktadır. Özellikle sıcaklık değişimleri, malzeme genleşmesi ve büzülmesi yoluyla çatlak açıklıklarında ölçülebilir değişimlere neden olabilmektedir. Tarihi yapılarda kullanılan taş, tuğla ve kireç esaslı harç gibi malzemelerin ısıl genleşme katsayıları farklılık gösterebildiğinden, sıcaklık dalgalanmaları yapısal süreklilik üzerinde gerilme dağılımı değişimlerine ve mevcut mikro çatlakların açılıp kapanmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle çevresel verilerin yapısal ölçümlerle eş zamanlı değerlendirilmesi, ölçülen hareketin kaynağının doğru yorumlanmasına ve eşik değer temelli sistemlerde ortaya çıkabilecek yanlış alarm üretiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Senaryo 3 kapsamında temel amaç, çatlak genişliğini temsil eden CRK sensör verileri ile ortam sıcaklığı ölçümleri arasındaki ilişkinin sayısal olarak test edilmesidir. Bu doğrultuda yapısal davranışı temsil eden veri seti ile çevresel ölçüm verileri zamansal olarak hizalanmakta; eşleşen veri çiftleri üzerinde doğrusal ilişkiyi belirlemeye yönelik korelasyon katsayıları hesaplanmaktadır. Böylece çatlak genişliğinde gözlenen bir artışın doğrudan bir hasar mekanizmasına mı yoksa ısıl genleşme kaynaklı çevresel bir etkiye mi bağlı olduğu analitik olarak ayrıştırılabilmektedir. Bu yaklaşım, ölçüm değerlerinin değişkenler arası etkileşimine dayalı bir yorumlama çerçevesi oluşturmuştur.

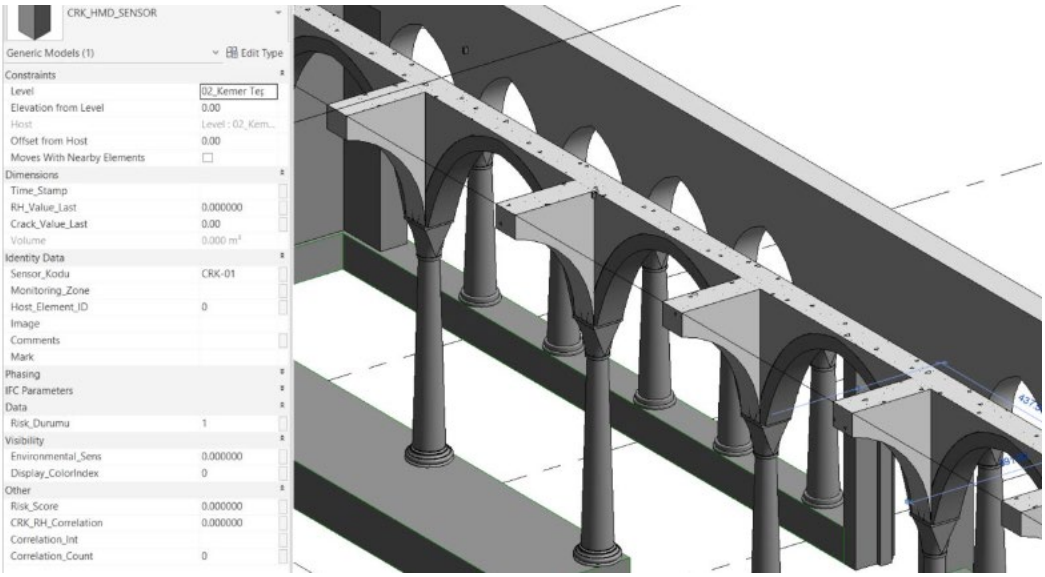
Senaryo 2'de yapısal davranış verileri eşik değer temelli olarak değerlendirilmekte ve ölçülen büyüklüğün belirli bir sınırı aşması alarm üretimi için yeterli görülmektedir. Buna karşılık Senaryo 3'te ölçümler çevresel parametrelerle birlikte ele alınmakta ve davranışın bağlamsal yorumu esas alınmaktadır. Böylece izleme sürecine, hasar tespitinden ziyade davranışın nedenini sorgulayan ikinci bir analitik katman eklenmektedir. Bu durum, yapısal sağlık izleme süreçlerinde sık karşılaşılan yanlış pozitif alarm probleminin azaltılmasına yönelik metodolojik bir katkı sunmaktadır.

Literatürde kültürel miras yapılarında gerçekleştirilen güncel izleme çalışmalarında çevresel parametreler ile yapısal davranışlar arasındaki ilişkinin korelasyona bağlı analizlerle incelendiği görülmektedir. Örneğin Çin'in Ningbo kentinde yer alan

Baoguo Tapınağı'nda yürütülen IoT tabanlı izleme çalışmasında, ahşap yapı elemanlarındaki yer değiştirme ile bağıl nem arasında güçlü bir korelasyon tespit edilmiş ve çevresel etkilerin gecikmeli bir karakter gösterebildiği ortaya konmuştur (Wu ve diğerleri, 2024). Bu tür bulgular, yapısal ölçümlerin yalnızca mutlak değerler üzerinden değil, çevresel değişkenlerle birlikte ve bağlamsal olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada ise odak, sıcaklık değişimlerinin çatlak (CRK) genişliği üzerindeki ısıl etkisinin incelenmesine yöneltilmiştir.

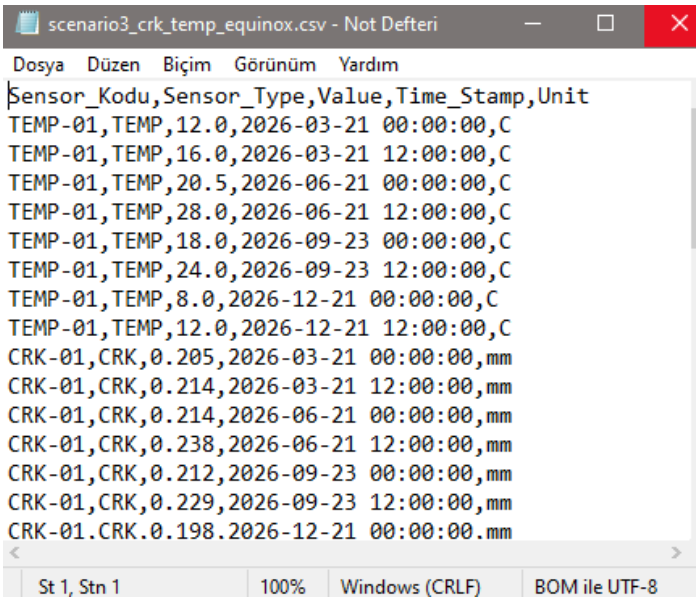
Sensörlerin TYBM modeli içinde "akıllı nesneler" olarak tanımlanması sayesinde analiz sonuçları yalnızca harici veri ortamında kalmamakta; hesaplanan korelasyon katsayıları ve çevresel etki göstergeleri doğrudan model parametrelerine işlenmektedir. Bu entegrasyon, TYBM'nin 6D veri boyutunda yer alan sürdürülebilirlik ve çevresel performans katmanlarıyla ilişkilendirilerek, izleme sistemini dinamik ve güncellenebilir bir karar destek altyapısına dönüştürmektedir. Böylece yapısal davranış, yalnızca mevcut ölçüm değerleri üzerinden değil, çevresel bağlamı içinde ve zaman temelli bir perspektifle değerlendirilebilmektedir.

i. CRK sensör ailesine ait parametreler çevresel verilerin değişmesiyle ilişkilendirilecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bu kapsamda sensör kimliği, izleme bölgesi ve bağlı olduğu yapı elemanını tanımlayan parametreler veri eşleştirme ve mekânsal ilişkilendirme gereksinimini karşılamakta, çatlak genişliği, bağıl nem ve zaman damgası gibi ölçüm parametreleri zamansal davranış analizine olanak tanımaktadır. Risk durumu göstergeleri önceki senaryolardaki eşik temelli değerlendirme sürekliliğini korurken, korelasyon katsayısı, örnek sayısı ve çevresel duyarlılık indeksi gibi yeni tanımlanan parametreler çevresel değişkenler ile yapısal tepki arasındaki ilişkinin nicel olarak yorumlanmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.39 İlişkilendirilmiş sensör parametreleri.

ii. Senaryo 3 kapsamında oluşturulan CSV veri seti, mevsimsel çevresel değişimleri çatlak davranışı üzerindeki etkisini test etmek amacıyla kurgulanmıştır. Veri seti, İstanbul için yıl içerisinde 21 Mart, 21 Haziran, 23 Eylül ve 21 Aralık olmak üzere dört ekinoks zamanında, aynı gün içinde saat 00:00 ve 12:00 olmak üzere iki ölçüm alınacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece hem mevsimsel hem de gün içi sıcaklık farklarını yapısal tepki üzerindeki etkisini gözlemlenmesi planlanmıştır. CSV yapısında bir adet harici çevresel veri değeri (TEMP-01) ile dört adet çatlak sensörüne ait eş zamanlı veriler tanımlanmıştır. Çatlak değerleri, sıcaklık artışıyla birlikte sınırlı düzeyde değişim gösterecek şekilde tasarlanmış, böylece ısıl genleşme kaynaklı davranışın simülasyonu amaçlanmıştır.



Şekil 5.40 Senaryo 3 için sensörlerden ölçüm zamanlarına göre çekildiği varsayılan verilerin CSV dosyası Notepad içeriği.

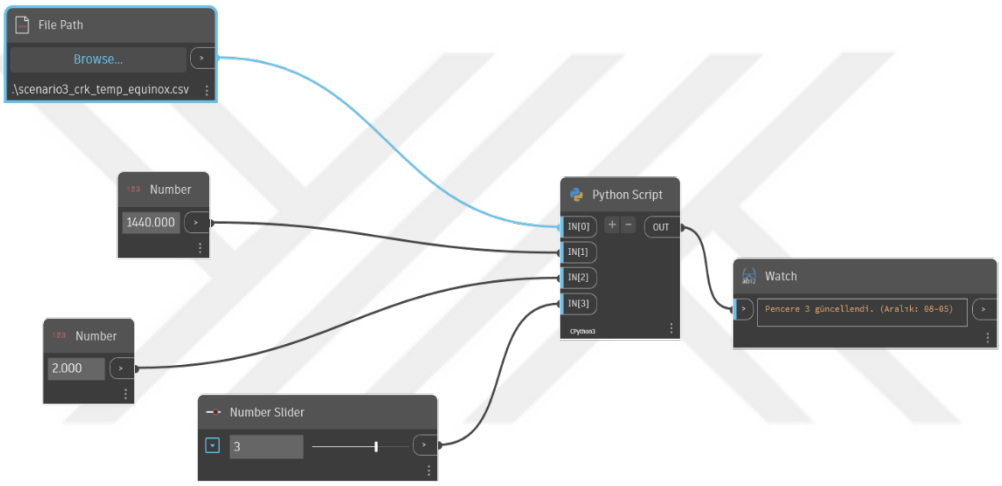
iii. Elde edilen veri seti üzerinde gerçekleştirilen zaman eşleştirme ve doğrusal korelasyon analizleri sonucunda, çatlak genişliği değişimleri ile sıcaklık değerleri arasında güçlü ve pozitif yönlü bir ilişki tespit edilmiştir. Hesaplanan korelasyon katsayılarının yüksek çıkması, analiz kapsamındaki CRK sensör noktalarında ölçülen çatlak açıklıklarının çevresel sıcaklık değişimlerine duyarlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu bulgu, ilgili sensör konumlarında gözlemlenen çatlak hareketinin en azından kısmen ısıl etkilerle ilişkili olabileceğini göstermiştir.

iv. Analiz sürecinde yalnızca korelasyon katsayısı değil, eşleşen veri çifti sayısı da dikkate alınmıştır. Böylece elde edilen ilişkinin güvenilirliği değerlendirilebilir hale getirilmiştir. Bu yaklaşım, sınırlı veri eşleşmelerinden kaynaklanabilecek yanıltıcı yorumların önüne geçmeyi ve çevresel değişken ile yapısal tepki arasındaki ilişkinin nicel olarak desteklenmesini amaçlamaktadır.

v. Analizin uygulanabilmesi için CSV veri seti, Dynamo ortamında Python tabanlı bir betik aracılığıyla modele entegre edilmiştir. Bu süreçte CSV dosyası satır satır okunmuş; sensör kodu, sensör tipi, ölçüm değeri ve zaman damgası alanları ayrıştırılmıştır. Elde edilen kayıtlar sensör tipine göre gruplanarak çevresel veri (TEMP) ve çatlak verisi (CRK) olmak üzere iki ayrı zaman serisine dönüştürülmüştür. Bu ayrıştırma işlemi, farklı

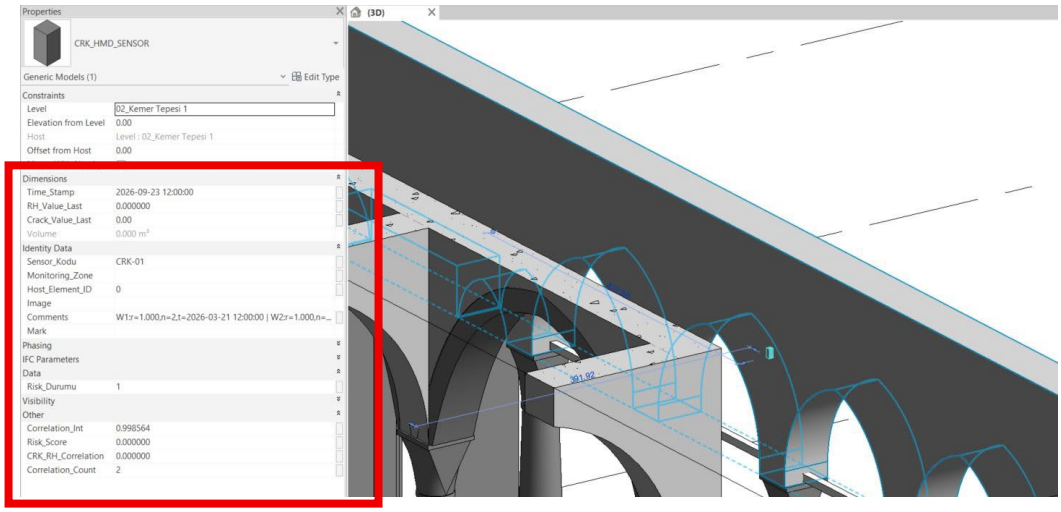
sensörlerden gelen verilerin ortak bir zaman ekseni üzerinde analiz edilmesini sağlamıştır.

vi. TEMP ve CRK sensörlerinin ölçüm zamanlarının birebir çakışmaması ihtimali dikkate alınarak zamansal tolerans tanımlanmış; her bir çatlak ölçümü için belirlenen zaman aralığında en yakın sıcaklık ölçümü eşleştirilmiştir. Böylece sensörlerin farklı örnekleme sıklıklarında veri üretmesi durumunda dahi karşılaştırılabilir veri çiftleri oluşturulmuştur. Bu eşleştirme işlemi sonucunda her CRK sensörü için "çatlak değeri–sıcaklık değeri" çiftlerinden oluşan analiz kümeleri elde edilmiştir.



Şekil 5.41 Senaryo 3 için ölçüm zamanlarına göre geliştirilen Python sistemi.

vii. Oluşturulan veri çiftleri üzerinden doğrusal ilişki katsayısı hesaplanmış ve eşleşen veri sayısı ile birlikte sonuç seti üretilmiştir. Hesaplanan değerler yalnızca analiz çıktısı olarak bırakılmamış; Revit modelindeki ilgili CRK sensör aile örnekleri Sensor_Kodu parametresi üzerinden tespit edilerek, korelasyon katsayısı (Correlation_Int), eşleşme sayısı (Correlation_Count) ve analiz zamanı (Time_Stamp) parametrelerine doğrudan yazılmıştır. Bu işlem, Transaction tabanlı model güncellemesi ile gerçekleştirilmiş ve sonuçların model nesneleri üzerinde kalıcı olarak temsil edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.42 Farklı tarihlere ait verilerin Revit modeldeki sensörlere aktarılması.

viii. Böylece Senaryo 3 kapsamında veri akışı; CSV veri üretimi → Python ile veri ayrıştırma → zamansal eşleştirme → doğrusal ilişki analizi → sonuçların model parametrelerine işlenmesi biçiminde bütünleşik bir iş akışına dönüştürülmüştür. Bu akış sayesinde TYBM modeli, yalnızca ölçüm verilerini depolayan bir ortam olmaktan çıkarak, çevresel değişkenlerle ilişkili davranış üretme kapasitesine sahip analitik bir katman kazanmıştır.

Sonuç olarak Senaryo 3, eşik temelli risk değerlendirmesinin ötesine geçerek, yapısal davranışın çevresel bağlam içinde yorumlanabileceğini göstermektedir. Çatlak değerlerinin çevresel sıcaklık değişimiyle birlikte sınırlı ve tutarlı bir eğilim göstermesi, ilgili sensör noktalarında gözlenen hareketin yapısal hasardan ziyade ısıl etkilerle ilişkili olabileceğine işaret etmektedir. Bu durum, önleyici koruma yaklaşımı açısından kritik bir ayrım sunmakta, çevresel etkilerden kaynaklanan geri dönüşlü davranış ile kalıcı yapısal risk arasındaki farkın veri temelli biçimde değerlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır.

5.4 Son Cemaat Yeri Model Değerlendirmesi ve Risk Çerçevesi

Önceki aşamalarda ayrıntılandırılan izleme yöntemleri ve senaryo odaklı analiz bulguları, son cemaat yeri özelinde geliştirilen yapısal kırılganlık değerlendirmeleri ile bütünleştirilerek kavramsal bir risk matrisi formunda sistematikleştirilmiştir. Bu matris, sensör çıktılarının yalnızca raporlanmasına dayalı bir yaklaşım yerine; Senaryo 1'de tanımlanan eşik temelli alarm mekanizması, Senaryo 2'de ortaya konan zamansal değişim takibi ve Senaryo 3'te geliştirilen çevresel–yapısal

korelasyon analizleri arasındaki ilişkileri tek bir karar üretim çerçevesinde bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Böylece analiz katmanı ile müdahale planlama katmanı arasında doğrudan bir metodolojik süreklilik kurulmuştur.

Risk matrisi oluşturulurken, son cemaat yerinin kolon–kemer sistemine dayalı yapısal kurgusu temel referans olarak alınmıştır. Bu alt sistem, ana ibadet mekânına kıyasla daha açık bir mekânsal organizasyona ve daha sınırlı yatay stabiliteye sahip olması nedeniyle, yatay yükler, diferansiyel zemin oturmaları ve çatlak ilerlemeleri karşısında görece daha kırılgan bir davranış sergilemektedir. Bu nedenle kolon–kemer birleşim bölgeleri, kolon tabanları ve kemer yüzeyleri kritik izleme bölgeleri olarak tanımlanmıştır. Deprem etkisi, zemin etkileşimi, malzeme yorulması ve çevresel nem gibi faktörler bu bölgelerde yoğunlaşabilecek potansiyel risk alanları olarak değerlendirilmiştir.

Bu doğrultuda her bir risk türü, doğrudan belirli bir taşıyıcı eleman ve o elemanı izleyen sensör parametresi (ACC, TILT, CRK, RH vb.) ile eşleştirilmiştir. Eşik aşımı, zamansal eğilim ve parametreler arası korelasyon çıktıları risk seviyesine dönüştürülmüş; böylece matris, soyut bir tehdit sınıflandırması olmaktan çıkarılarak izleme altyapısı ile doğrudan ilişkili operasyonel bir karar destek aracına dönüştürülmüştür. Bu yaklaşım, verinin model üzerinde mekânsal olarak konumlandırılması ve davranış değişiminin zamansal olarak izlenmesi sayesinde, riskin yalnızca hasar oluştuğunda değil; davranış örüntüsü değiştiğinde de tespit edilmesine olanak tanımaktadır.

Oluşturulan sistem, TYBM bileşenleri ile Yapısal Sağlık İzleme verileri arasında çift yönlü bir ilişki kurmaktadır. Sensör verileri modele işlenmekte; model üzerindeki risk düzeyi güncellenmekte ve bu güncelleme müdahale planlamasına yansıtılmaktadır. Böylece dijital model, pasif bir temsil aracı olmaktan çıkarak dinamik bir değerlendirme altyapısına dönüşmektedir. Bu çalışma, tam ölçekli gerçek zamanlı bir dijital ikiz uygulaması gerçekleştirmemekle birlikte, modelin zamansal veri ile güncellenebilir ve davranış temelli analizlere açık bir dijital omurga sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda atanan olasılık değerleri (0–1 aralığında), mutlak istatistiksel sonuçlar olarak değil, göreli öncelik katsayıları olarak değerlendirilmelidir. Bu katsayılar, son cemaat yerinin yapısal özellikleri, literatürde anıtsal yığma yapılara ilişkin

tanımlanan hasar eğilimleri, bölgesel sismik tehlike verileri ve izleme senaryolarında belirlenen eşik değerleri dikkate alınarak kavramsal düzeyde tanımlanmıştır. Amaç, farklı risk türlerini ortak bir ölçek üzerinde karşılaştırılabilir kılmak ve müdahale önceliklerini sistematik biçimde sıralamaktır. Bu yöntem, heterojen risk faktörlerinin tekil olaylar olarak değil, izlenebilir ve derecelendirilebilir davranış örüntüleri olarak ele alınmasını sağlamaktadır.

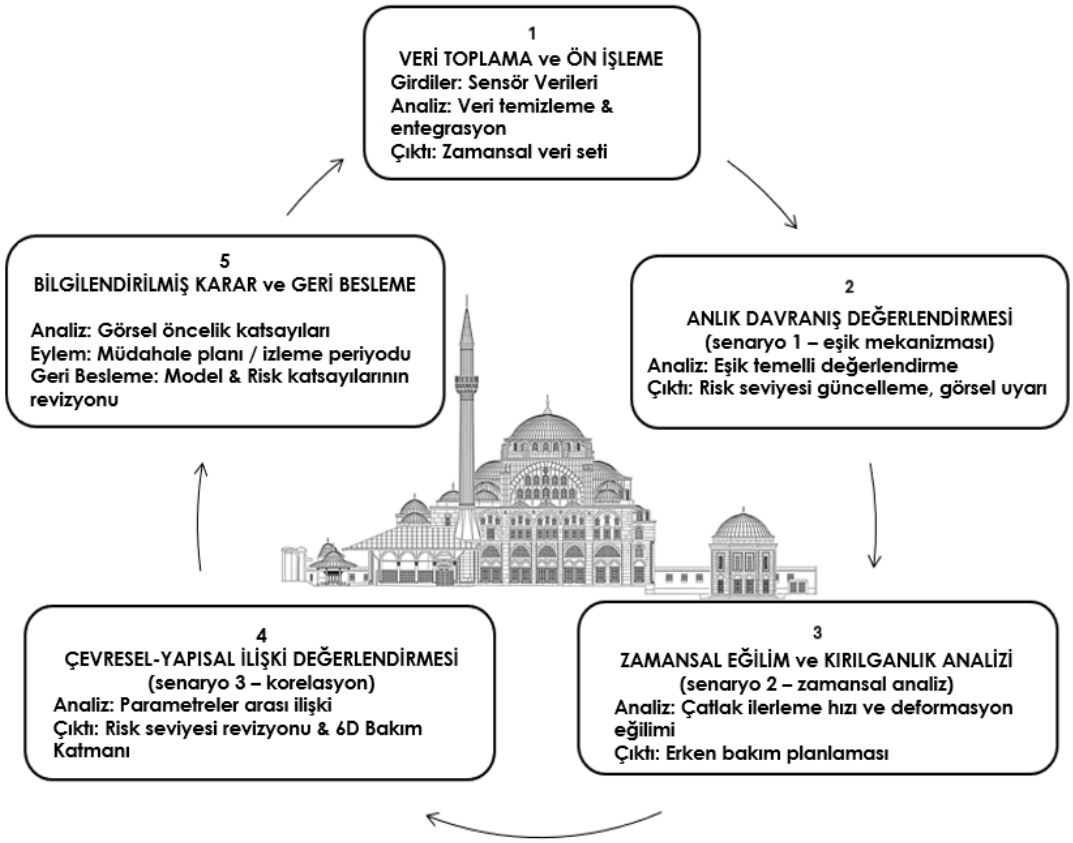
Sonuç olarak kavramsal risk matrisi, son cemaat yerinin taşıyıcı sistemine özgü kırılganlık bölgelerini sensör parametreleriyle eşleştirerek, analiz çıktılarının önceliklendirilmiş müdahale kararlarına dönüştürülmesini sağlayan bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Bu çerçeve, farklı risk türlerinin ortak bir ölçek üzerinde karşılaştırılabilmesine ve bakım planlamasının sistematik biçimde yapılandırılmasına imkân vermektedir.

Tablo 5.2 Risk Matrisi

Risk Türü	Kritik Eleman	İzleme Parametresi	Eşik Türü	Olasılık (0–1, Göreli)	Etki (Göreli)	Risk Seviyesi	Karar Türü
Deprem etkisi	Kolon–kemer birleşimi	ACC / TILT	Ani eşik aşımı	**0.80**	Çok Yüksek	Kritik	Anlık alarm + detaylı inceleme
Diferansiyel zemin oturması	Kolon tabanı	TILT	Zamansal artış	**0.65**	Yüksek	Yüksek	Uzun dönem izleme + jeoteknik değerlendirme
Çatlak ilerlemesi	Kemer yüzeyi	CRK	Eğilimsel eşik	**0.55**	Orta-Yüksek	Orta-Yüksek	Erken bakım planı
Nem kaynaklı malzeme zayıflaması	Taş yüzey	RH	Sürekli eşik	**0.50**	Orta	Orta	Koruma müdahalesi
Titreşim kaynaklı mikro deformasyon	Kemer açıklığı	ACC	Frekans değişimi	**0.40**	Orta	Düşük-Orta	Davranış izleme

Tablo 5.2'de sunulan kavramsal risk matrisi, Şekil 5.43'te gösterilen TYBM tabanlı yapısal sağlık izleme ve karar döngüsünün operasyonel çekirdeğini oluşturmaktadır. Matriste tanımlanan eşik türleri (ani, zamansal ve korelasyon temelli) ile göreli öncelik katsayıları, analiz aşamalarında üretilen verilerin müdahale kararlarına dönüştürülmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda kullanılan 0–1 aralığındaki olasılık değerleri, mutlak istatistiksel sonuçlar olarak değil; son cemaat yerinin yapısal özellikleri, literatürde anıtsal yığma yapılara ilişkin hasar eğilimleri, bölgesel sismik tehlike bileşenleri ve senaryolarda belirlenen eşik ağırlıkları dikkate alınarak oluşturulmuş kavramsal öncelik katsayılarıdır. Bu değerlerin saha verileriyle kalibre edilmesi, modelin geliştirilmesi açısından sonraki aşamaya işaret etmektedir.

Bu yapı sayesinde sensör verileri yalnızca model üzerinde görselleştirilen teknik çıktılar olarak kalmamakta; risk düzeyinin güncellenmesi, bakım önceliklerinin belirlenmesi ve izleme periyotlarının düzenlenmesi gibi yönetsel süreçlere entegre edilmektedir. Böylece oluşturulan sistem, analiz katmanından karar üretim katmanına uzanan kapalı bir geri besleme mekanizması tanımlamakta ve TYBM'nin önleyici koruma bağlamında operasyonel bir araç olarak konumlandırılmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 5.43 TYBM tabanlı yapısal sağlık izleme ve risk temelli karar döngüsü. Sensör verilerinin eşik ve korelasyon analizleriyle risk seviyesine dönüştürülerek bakım kararlarına entegre edildiği kapalı sistem yapısı.

Risk matrisi ile tanımlanan önceliklendirme yapısı, Şekil 5.43'te sunulan karar döngüsü içerisinde operasyonel bir işlev kazanmaktadır. Analiz aşamalarında üretilen eşik ve eğilim verileri risk seviyesini güncellemekte; bu güncelleme bakım planlamasına ve izleme periyotlarının yeniden tanımlanmasına yansımaktadır. Böylece sistem, veri üretimi ile müdahale kararları arasında kapalı bir geri besleme mekanizması kurmakta ve önleyici koruma yaklaşımını dijital model ortamında süreklilik kazandırmaktadır.

6
SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, TYBM ortamının sensör verisi ile bütünleştirilerek izleme ve erken uyarı tabanlı bir karar destek arayüzü olarak kurgulanabileceği ortaya konmuştur. Kılıç Ali Paşa Camisi son cemaat yeri özelinde geliştirilen modelde, sensör verilerinin (ivme, çatlak, çevresel veri) model bileşenleri ile ilişkilendirilmesi ve eşik değerler üzerinden değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede TYBM modeli, yalnızca geometrik bir temsil değil, yapısal davranışı izlemeye ve yorumlamaya imkân veren bir sistem olarak ele alınmıştır.

Araştırma kapsamında geliştirilen sistem, üç temel soru etrafında değerlendirilmiştir:

i. TYBM ortamı, sensör verisi ile ilişkilendirilerek izleme ve erken uyarı tabanlı bir karar destek arayüzüne dönüştürülebilir mi?
ii. Bu sistem yapısal davranışın yorumlanmasına nasıl katkı sağlar?
iii. Önerilen model farklı yapılara uyarlanabilir bir metodoloji sunar mı?

Elde edilen bulgular, TYBM ortamının veri ile beslenen bir izleme platformu olarak kurgulanabildiğini, yapısal davranışın çok katmanlı veri ilişkileri üzerinden yorumlanabildiğini ve geliştirilen yaklaşımın farklı yapılar için uyarlanabilir bir metodolojik çerçeve sunduğunu göstermiştir.

6.1 Çalışmanın Özgün Katkıları ve Metodolojik Kazanımlar

Çalışmanın metodolojik katkıları üç düzlemde değerlendirilebilir:

İlk olarak, TYBM modelinin yapısal tipolojiyi temsil edebilecek biçimde analitik ortama aktarılabilirliği test edilmiş ve modelin ileri mühendislik analizleri ile ilişkilendirilebilir bir altyapıya sahip olduğu gösterilmiştir. Bu yaklaşım, sensör temelli izleme verileri ile yapısal çözümleme süreçleri arasında teknik bir süreklilik kurulabileceğini ortaya koymuştur.

İkinci olarak, risk değerlendirme süreci, son cemaat yerindeki kolon–kemer sistemi üzerinden tanımlanan yapısal kırılganlık bölgeleri ile sensör parametrelerinin doğrudan ilişkilendirildiği bir karar destek matrisi üzerinden kurgulanmıştır. Bu matriste kullanılan katsayılar mutlak istatistiksel çıktılar olarak değil, literatürde tanımlanan hasar örüntüleri, bölgesel tehlike verileri ve izleme eşik değerleri doğrultusunda oluşturulmuş göreli öncelik değerleri olarak tanımlanmıştır. Bu sayede farklı türdeki risklerin ortak bir değerlendirme düzleminde karşılaştırılması mümkün hale gelmiştir.

Üçüncü olarak, geliştirilen model, erken uyarı, bakım planlaması ve müdahale önceliklendirmesi üreten bir karar destek altyapısı olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda TYBM modeli, izleme verisini işleyen ve bu veriyi müdahale kararları ile ilişkilendiren bir sistem içinde değerlendirilmiş, böylece TYBM'nin 7D işlevselliği kapsamında bakım ve işletme süreçlerine doğrudan katkı sağlayan bir yaklaşım ortaya konmuştur.

Bu üç katkı birlikte değerlendirildiğinde, çalışma TYBM yaklaşımının veri ile bütünleşik ve analiz odaklı bir sistem olarak ele alınabileceğini göstermiş ve farklı yapılara uyarlanabilecek bir metodolojik çerçeve tanımlamıştır.

6.2 Önleyici Koruma Yaklaşımı Bağlamında Değerlendirme

Geleneksel koruma pratiğinde müdahaleler çoğunlukla gözlemsel tespitler ve periyodik incelemeler üzerinden yürütülmekte, bu süreç kesintili veri okumalarına dayanmaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşım, yapısal davranışın zamansal süreklilik içinde izlenebileceğini ve veri temelli eşik değerler üzerinden değerlendirilebileceğini göstermiştir. Bu durum, gözleme dayalı değerlendirme ile sürekli veri üretimine dayalı izleme yaklaşımı arasında belirgin bir yöntemsel fark ortaya koymuştur. Böylece hasarın oluşumunun belgelenmesi yerine, davranış değişimlerinin erken aşamada tespit edilmesine imkân tanıyan bir sistem kurgusu doğrulanmıştır.

Geliştirilen model, tam ölçekli bir dijital ikiz uygulaması olarak kurgulanmamış, sensör verisi ile güncellenebilen, risk seviyesini izleme verilerine bağlı olarak yeniden tanımlayabilen ve müdahale önceliklerini veri üzerinden belirleyebilen bir yapı ortaya koymuştur. Bu yönüyle model, kültürel miras yapılarında dijital ikiz

yaklaşımının nasıl kurgulanabileceğine dair yarı dinamik bir dijital temsil sunmuştur.

Bu değerlendirme, önleyici koruma yaklaşımının veri temelli izleme sistemleri aracılığıyla uygulanabilir bir yöntem olarak ele alınabileceğini göstermiştir.

6.3 Sınırlılıklar

Çalışmanın bulguları, kapsam ve veri setine bağlı olarak belirli sınırlılıklar çerçevesinde değerlendirilmiştir. Modelin tek bir yapı ve bu yapının son cemaat yeri ile sınırlı bir bölümü üzerinden geliştirilmiş olması, elde edilen sonuçların doğrudan genellenebilirliğini sınırlandırmıştır. Bu nedenle sistem, farklı yapı tipleri veya tüm yapı ölçeğinde test edilmemiştir.

Sensör verilerinin kurgusal veri setleri üzerinden oluşturulmuş olması, sistemin doğruluk ve güvenilirlik düzeyinin nicel olarak ölçülmesini mümkün kılmamıştır. Bu nedenle doğruluk oranı veya tahmin performansı gibi sayısal çıktılar elde edilmemiştir. Buna karşılık, veri işleme süreci, parametre eşleşme sistemi ve model güncelleme mantığı test edilerek sistemin işleyiş kurgusu doğrulanmıştır. Bu yönüyle çalışma kavramsal doğrulama niteliği taşımaktadır.

Ayrıca yapının ana taşıyıcı sistemi yerine sınırlı bir bölümünün ele alınması, yapısal davranışın bütüncül olarak değerlendirilmesini kısıtlamıştır. Bu durum, üst yapı–zemin etkileşimini içeren daha kapsamlı modelleme yaklaşımlarına ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşım, doğrudan bir uygulama sistemi olarak değil, belirli bir metodolojik çerçeve olarak ele alınmıştır. Bu çerçevenin farklı yapılara uygulanabilmesi için, yapı özelinde strüktürel kırılganlık bölgelerinin yeniden tanımlanması, sensör yerleşimlerinin bu tanımlara göre kurgulanması ve veri eşik değerlerinin yeniden kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu durum, modelin veri akış mantığı, parametre eşleşme yapısı ve senaryo temelli analiz yaklaşımı ile yeniden üretilebilir bir sistem önerdiğini göstermektedir.

6.4 Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, veri temelli izleme yaklaşımının kavramsal ve metodolojik çerçevesini ortaya koymuş; ancak sistem performansının nicel olarak değerlendirilebilmesi için gerçek zamanlı saha verisine dayalı çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Bu kapsamda uzun dönemli sensör verilerinin toplanması ve model parametrelerinin bu veriler üzerinden kalibre edilmesi, sistemin doğruluğunun ölçülmesini sağlayacaktır.

Parametreler arası ilişkilerin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesi, özellikle çevresel etkiler ile yapısal davranış arasındaki korelasyonların daha yüksek doğrulukla tanımlanmasına katkı sağlayacaktır. Bu doğrultuda makine öğrenmesi yaklaşımlarının, eşik değerlerin dinamik olarak güncellenmesi ve risk tahminlerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılması, modelin analitik kapasitesini artıracaktır.

Bununla birlikte, geliştirilen metodolojik çerçevenin farklı yapı tipleri üzerinde test edilmesi gerekmektedir. Özellikle farklı plan şemalarına ve strüktürel organizasyonlara sahip Osmanlı camileri üzerinde yapılacak uygulamalar, modelin tipolojik uyarlanabilirliğinin değerlendirilmesini sağlayacaktır. Bu süreçte sensör yerleşim stratejilerinin, veri eşik değerlerinin ve risk değerlendirme yaklaşımlarının yapı özelinde yeniden tanımlanması gerekliliği, modelin esnek ancak kalibrasyon gerektiren bir sistem olduğunu ortaya koyacaktır.

Son olarak, üst yapı ile zemin etkileşimini içeren daha kapsamlı modelleme yaklaşımlarının geliştirilmesi, yapısal davranışın bütüncül olarak değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu doğrultuda, izleme verisinin analitik modellerle bütünleştirildiği ve çok katmanlı veri yapılarının birlikte işlendiği hibrit sistemlerin geliştirilmesi, gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanı olarak tanımlanmıştır.

KAYNAKÇA

Abdelfettah, M., & Uzun, C. (2025). Digital Twin Prototyping and Simulation Process Proposal in Architecture Through the Integration of BIM and IOT. *Modul-Ar Journal, Vol.8*(No.2), s. 427-447.

Acar, A., Atalay, B. F., Say, S., Tunca, M. E., Çetin, M. C., Çalışkan, Ş. N., . . . Karakaya, F. A. (2022). Developing a mobile augmented reality application for cultural heritage. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37*(4), s. 1931-1944. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.932478

Adami, A., & Fregonese, L. (2020). Geomatics in the management of built heritage through BIM systems: The training of new experienced professional figures. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B5-2020*, s. 9-14. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2020-9-2020

Adami, A., Fregonese, L., Rosignoli, O., Scala, B., Taffurelli, L., & Treccani, D. (2019). Geometric survey data and historical sources interpretation for HBIM process: The case of Mantua Cathedral façade. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W11*, s. 25–32. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-29-2019

Aguilar, R., Huaranga, S., Pórcel, P., & Zavala, G. (2023). Seismic Vulnerability Assessment of Andean Constructions: Structural Typification of Historical Churches Using Digital Technologies. *International Journal of Architectural Heritage, 17*(1), s. 76-89. https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2114863

Ahunbay, Z. (2019). *Kültür Mirasını Koruma İlke ve Teknikleri.* İstanbul: YEM Yayın.

Ahunbay, Z. (2023). Depremin ardından kültürel mirasın geleceğine ilişkin düşünceler. *Mimarlık*(430), s. 18-21.

Akın, Ş., Gürsel Dino, İ., & Savaş Sargın, A. (2022). Heritage Building Information Modelling For Conservation Of 20th Century Modernist Architecture. *METU Journal of the Faculty of Architecture, 39*(1), s. 1-22.

https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2022.1.1

Albourae, A. T., Armenakis, C., & Kyan, M. (2017). Architectural Heritage Visulization Using Interactive Technologies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W5*, s. 7-13. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-7-2017

Albourae, A., Armenakis, C., & Kyan, M. (2017). Architectural Heritage Visualization Using Interactive Technologies. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W5* (s. 7-13). Ottawa: The International Archives of the Photogrammetry.

Alioğlu, E. F. (2023). Şehzade Mehmet camisi modüler tasarımı. *Belleten, 87*(308), s. 87-111. https://doi.org/10.37879/belleten.2023.087

Alioğlu, F., & Köroğlu, N. (2011). Mimar Sinan camilerinde modüler sistem. *Sigma, 3*, s. 331-340.

Allegra, V., Di Paola, F., Lo Brutto, M., & Vinci, C. (2020). Scan-to-BIM For The Management Of Heritage Buildings: The Case Study Of The Castle Of Maredolce (Palermo, Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2020*, s. 1355-1362. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1355-2020

Al-Muqdadi, F., & Ahmed, A. (2022). Applying Heritage Building Information Modelling (HBIM) To Lost Heritage In Conflict Zones: Al-Hadba' Minaret in Mosul, Iraq. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2022*, s. 753-760. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-753-2022

Anaç, M., & Arun, G. (2024). HBIM supported archive model. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39*(1), s. 443-459. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1175113

Angulo, R., Pinto, F., Rodríguez, J., & Palomino, A. (2017). Digital Anastylosis of the Remains of a Portal by Master Builder Hernán Ruiz: Knowledge Strategies, Methods and Modelling Results. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 7*, s. 32-41. https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.09.003

Argenziano, P., Avella, A., & Albanese, S. (2018). Building Materials, Ionizing Radiation and HBIM: A Case Study from Pompei (Italy). *Buildings, 8*(1), s. 1-9. https://doi.org/10.3390/buildings8010018

Aricò, M., Lo Brutto, M., & Maltese, A. (2023). A Scan-to-BIM Approach for the Management of Two Arab-Norman Churches in Palermo (Italy). *Heritage, 6*, s. 1622-1644. https://doi.org/10.3390/heritage6020087

Artopoulos, G., Fokaides, P., Lysandrou, V., Deligiorgi, M., Sabatakos, P., & Agapiou, A. (2024). Data-Driven Multi-Scale Study of Historic Urban Environments by Accessing Earth Observation and Non-Destructive Testing Information via an HBIM-Supported Platform. *International Journal of Architectural Heritage, 18*(6), s. 920-939. https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2199408

Atabay, Ş., & Öztürk, M. B. (2019). Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) Uygulama Planı Üzerine İnceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7*(2), s. 418-430. https://doi.org/10.21923/jesd.431262

Ataş, Z. (2023). Tarihi Gaziantep Camilerinde Deprem Hasarlarının Saptanması. *ISPEC International Journal Of Social Sciences & Humanities, 7*(2), s. 512-528. https://doi.org/10.5281/zenodo.7991874

Attenni, M. (2019). Informative Models for Architectural Heritage. *Heritage, 2*, s. 2067-2089. https://doi.org/10.3390/heritage2030125

Bacci, G., Bertolini, F., Bevilacqua, M., Caroti, G., Zaragoza, I. M.-E., Martino, M., & Piemonte, A. (2019). HBIM Methodologies For The Architectural Restoration. The Case Of The Ex-Church of San Quirico All'Olivo in Lucca, Tuscany. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W11*, s. 121-126. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-121-2019

Bagnolo, V., Argiolas, R., & Cuccu, A. (2019). Digital survey and algorithmic modeling in HBIM: Towards a library of complex construction elements. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLII-4/W12*, s. 25-31. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-25-2019

Bagnolo, V., Argiolas, R., & Cuccu, A. (2019). HBIM for archaeological sites: From SfM based survey to algorithmic modeling. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLII-2/W9*, s. 57-63. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-57-2019

Baik, A. (2019). From point cloud to existing BIM for modelling and simulation purposes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-5/W2*, s. 15-19. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-15-2019

Baik, A. (2019). From point cloud to Jeddah Heritage BIM Nasif Historical House – case. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 4*, s. 1-18. https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.02.001

Baik, A., Alitany, A., Boehm, J., & Robson, S. (2014). Jeddah Historical Building Information Modeling "JHBIM" Object Library. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5*, s. 41-47. https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-41-2014

Baneh, K. W., Baneh, B. W., Osman, A., Mostafapour, O., & Bradosty, Z. R. (2023). Regeneration and documentation of historic geometric Islamic patterns via HBIM: a case study of Choli minaret, Kurdistan Region. *International Journal of Building Pathology and Adaptation, 41*(2), s. 347-363. https://doi.org/10.1108/IJBPA-03-2021-0043

Banfi, F. (2017). BIM orientation: Grades of generation and information for different type of analysis and management process. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLII-2/W5*, s. 57-64. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-57-2017

Banfi, F. (2017). Building information modelling – A novel parametric modeling approach based on 3D surveys of historic architecture. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLII-2/W5*, s. 19-26. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_10

Banfi, F. (2019). The integration of a scan-to-HBIM process in BIM application: The development of an add-in to guide users in Autodesk Revit. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLII-2/W11*, s. 141-148. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-141-2019

Banfi, F., Barazzetti, L., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2017). Historic BIM: A New Repository For Structural Health Monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-5/W1*, s. 269-274. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-269-2017

Banfi, F., Stanga, C., & Landi, A. G. (2023). Virtual Access To Heritage Through Scientific Drawing, Semantic Models and VR-Experience of the Stronghold of Arquata Del Tronto After The Earthquake. *SCIRES-IT – Scientific Research and Information Technology, 13*(1), s. 83-100. https://doi.org/10.2423/i22394303v13n1p83

Bastem, S. (2021). Tarihi yapılarda yapı bilgi modeli uygulamalarının sistematik literatür tarama yöntemiyle değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bastem, S. S., & Çekmiş, A. (2021). Development of historic building information modelling: a systematic literature review. *Building Research & Information, 50*(5), s. 527-558. https://doi.org/10.1080/09613218.2021.1983754

Benian, E. (2011). Mimar Sinan ve Osmanlı Cami Mimarisinin Gelişimindeki Rolü. *Bilim ve Teknik*, s. 40-47.

Bertacchi, G., Juan-Vidal, F., & Cipriani, L. (2023). From The Representation To The Digital HBIM Model Of a Historic Building. *Expresión gráfica arquitectónica, 47*, s. 184-197. https://doi.org/10.4995/ega.2023.18606

Biagini, C., Ottobri, P., Banti, N., & Bongini, A. (2020). Validation processes of H-BIM models: a case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 949*(1), s. 1-10. https://doi.org/10.1088/1757-899X/949/1/012115

Bianconi, F., Filippucci, M., Amoruso, G., & Bertinelli, M. (2019). From The Integrated Survey Of Historic Settlements To The Pattern Book Within The BIM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9*, s. 135-142. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-135-2019

Biblus. (2022, 12 04). 6D BIM and Construction Sustainability: https://biblus.accasoftware.com/en/6d-bim-and-construction-sustainability/ adresinden alındı

BIM Dictionary. (2022, 12 04). https://bimdictionary.com/ adresinden alındı

Borkowski, A. S. (2023). A literature review of BIM definitions: Narrow and broad views. *Technologies, 11*(6), s. 1-14. https://doi.org/10.3390/technologies11060176

Borkowski, A. S. (2023). Evolution of BIM: Epistemology, genesis and division into periods. *Journal of information technology in construction, 28*, s. 646-661. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.034

Bottazi, R. (2018). *Digital Architecture Beyond Computers.* London: Bloomsbury Publishing Plc.

Brumana, R., Della Torre, S., Previtali, M., Barazzetti, L., Cantini, L., Oreni, D., & Banfi, F. (2018). Generative HBIM modelling to embody complexity (LOD, LOG, LOA, LOI): surveying, preservation, site intervention—the Basilica di Collemaggio (L'Aquila). *Applied Geomatics, 10*, s. 545-567. https://doi.org/10.1007/s12518-018-0233-3

Brumana, R., Della Torrea,, S., Oreni, D., Previtali, M., Cantini, L., Barazzetti, L., . . . Banfi, F. (2017). HBIM Challenge Among The Paradigm Of Complexity, Tools And Preservation: The Basilica Di Collemaggio 8 Years After The Earthquake (L'Aquila). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W5*, s. 97-104. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-97-2017

Brumana, R., Stanga, C., & Banfi, F. (2022). Models and scales for quality control: Toward the definition of specifications (GOA-LOG) for the generation and re-use of HBIM object libraries in a common data environment. *Applied geomatics, 14*, s. 151-179. https://doi.org/10.1007/s12518-020-00351-2

Brusaporci, S., Maiezza, P., Marra, A., Tata, A., & Vespasiano, L. (2023). Scan-to-HBIM Reliability. *Drones, 7*(7), s. 1-14. https://doi.org/10.3390/drones7070426

Casimiro-Bernárdez, J. M., Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., & Carvajal-Ramirez, F. (2024). FEM Structural Analysis From UAV Photogrammetry Projects. Case Study: Twenty Eyes Aqueduct In The Wadi Of Carcauz (Almeria, Spain). *Conservation Science In Cultural Heritage*, s. 111-139.

Castellano-Roman, M., & Pinto-Puerto, F. (2019). Dimensions and levels of knowledge in heritage building information modelling, HBIM: The model of the Charterhouse of Jerez (Cádiz, Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 14, 14*. https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00110

Chanda, B., & Chaudhuri, S. (2018). *Heritage Preservation A Computational Approach.* Mumbai: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7221-5

Chaves, E., Aguilar, J., Barontini, A., Mendes, N., & Compán, V. (2024). Digital Tools for the Preventive Conservation of Built Heritage: The Church of Santa Ana in Seville. *Heritage, 7*, s. 3470-3494. https://doi.org/10.3390/heritage7070164

Chik, T., Mahamood, I., Mohamad, N., Yusoff, N., Rusidi, M., & Hakim, S. (2024). A Review of Structural Health Monitoring in Heritage Building due to Cracking Issues. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 1347.* IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1347/1/012071

Cicioğlu, M., & Çalhan, A. (2020). IoT-based wireless body area networks for disaster cases. *International Journal of Communication Systems, 33*, s. 1-12. https://doi.org/10.1002/dac.3864

Ciuffreda, A. L., Trovatelli, F., Meli, F., Caselli, G., Stramaccioni, C., Coli, M., & Tanganelli, M. (2024). Historic Building Information Modeling for Conservation and Maintenance: San Niccolo's Tower Gate, Florence. *Heritage, 7*, s. 1334-1356. https://doi.org/10.3390/heritage7030064

Codecademy. (2026). *Rest nedir?* 01 18, 2026 tarihinde Codeacademy: https://www.codecademy.com/article/what-is-rest-api adresinden alındı

Croce, P., Landi, F., Puccini, B., Martino, M., & Maneo, A. (2022). Parametric HBIM Procedure for the Structural Evaluation of Heritage Masonry Buildings. *Buildings, 12*, s. 1-26. https://doi.org/10.3390/buildings12020194

Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Jacquot, K., Piemonte, A., & Véron, P. (2021). From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning. *Remote Sensing, 13*(461), s. 1-34. https://doi.org/10.3390/rs13030461

Croce, V., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., & Véron, P. (2023). H-BIM and Artificial Intelligence: Classification of Architectural Heritage for Semi-Automatic Scan-to-BIM Reconstruction. *Sensors, 23*(2497), s. 1-30. https://doi.org/10.3390/s23052497

Currà, E., D'Amico, A., & Angelosanti, M. (2022). HBIM between Antiquity and Industrial Archaeology: Former Segrè Papermill and Sanctuary of Hercules in Tivoli. *Sustainability, 14*(1329), s. 1-29. https://doi.org/10.3390/su14031329

Cügen, H. F., Arslan Selçuk, S., & ARayıcı, Y. (2024). A hybrid modelling approach for information processing workflow in inter-cultural heritage projects. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*. https://doi.org/10.1108/ARCH-12-2023-0355

D'Orazio, M., Canafoglia, M., Bernardini, G., & Quagliarini, E. (2024). Towards Using Digital Technologies to Balance Conservation and Fire Mitigation in Building Heritage Hosting Vulnerable Occupants: Rapid Evacuation Simulator Verification for the "Omero Museum" (Ancona, Italy). *Heritage, 7*, s. 3734-3755. https://doi.org/10.3390/heritage7070177

Delpozzo, D., Appolonia, L., Scala, B., & Adami, A. (2022). Federated HBIM Models For Cultural Heritage: Survey Model and Conceptual Model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-2/W1-2022. XLVI-2/W1-2022*, s. 191-197. Mantua: Copernicus Publications. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-191-2022

Deng, H., & Chen, J. (2023). A Survey of Structural Health Monitoring Advances Based on Internet of Things (IoT) Sensors. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14*(10), s. 225-234.

Desogus, G., Quaquero, E., Rubiu, G., Gatto, G., & Perra, C. (2021). BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings. *Sustainability, 13*(4496), s. 2-22. https://doi.org/10.3390/su13084496

Dzwierzynska, J., & Prokop, A. (2022). Reconstruction of Historic Monuments-A Dual Approach. *Sustainability, 14*(14651), s. 1-14. https://doi.org/10.3390/su142114651

Ehab, A., Mahdi, M., & El-Helloty, A. (2024). BIM Maintenance System with IoT Integration: Enhancing Building Performance and Facility Management. *Civil Engineering Journal, 10*(6), s. 1953-1973. https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-06-015

El Barhoumi, N., Radoine, H., Hajji, R., & Harmouche, H. (2024). Adaptive cultural mediation through HBIM and VR: enhancing personalized experiences via thematic data structuring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W8-2024, 8th International ISPRS Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications* (s. 139-145). Brescia: ISPRS. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-139-2024

Erickson, J. (2024). *What Is JSON?* 01 18, 2026 tarihinde Oracle Türkiye: https://www.oracle.com/database/what-is-json/ adresinden alındı

Escudero, P. A., López González, M. C., & García Valldecabres, J. L. (2024). Methodology for data integration in 3D-HBIM digital models: Case study: The Holy Chalice Chapel of Valencia Cathedral. *Disegnarecon, 17*(32), s. 1-9. https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.11

Escudero, P. A., López González, M. C., & García Valldecabres, J. L. (2024). Optimising floor plan extraction: Applying DBSCAN and K-means in point cloud analysis of Valencia cathedral. *Heritage, 7*(10), s. 5787-5799. https://doi.org/10.3390/heritage7100272

Eyice, S. (1999). Kılıç Ali Paşa Külliyesi. *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi* (Cilt 25, s. 412-414). içinde Türkiye Diyanet Vakfı.

Ferretti, U., Quattrini, R., & D'Alessio, M. (2022). A Comprehensive HBIM to XR Framework for Museum Management and User Experience in Ducal Palace at Urbino. *Heritage, 5*, s. 1551-1571. https://doi.org/10.3390/heritage5030081

Galera-Rodríguez, A., Angulo-Fornos, R., & Algarín-Comino, M. (2022). Survey and 3D Modelling Of Underground Heritage Spaces With Complex Geometry: Surface Optimisation For Association With HBIM Methodology. *SCIRES-IT: Scientific Research and Information Technology, 12*(1), s. 177-190. https://doi.org/10.2423/i22394303v12n1p177

Ganah, A., & Lea, G. (2021). A Global Analysis of BIM Standards across the Globe: A Critical Review. *Journal of Project Management Practice, 1*(1), s. 52-60.

Garcia-Gago, J., Sanchez-Aparicio, J., Solian, M., & Gonzalez-Aguilera, D. (2022). HBIM for supporting the diagnosis of historical buildings: case study of the Master Gate of San Francisco in Portugal. *Automation in Construction, 141*(104453). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104453

García-León, J., Murrieri, P., & Torres Picazo, M. (2024). Data sharing and interoperability in HBIM applied to the Rame Tower. *Disegnarecon, 17*(32), s. 1-12. https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.16

Gorkovchuk, J., & Gorkovchuk, D. (2022). Features of Heritage BIM Modeling Based On Laser Scanning Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-5/W1*, s. 123-128. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-123-2022

Güleç Korumaz, A., Dülgerler, O. N., & Yakar, M. (2011). Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Dijital Yaklaşımlar. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik - Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26*(3), s. 67-83.

Günes, M. C., Mertan, A., Şahin, Y. H., Ünal, G., & Özkar, M. (2024). Semi-automated minimization of brick-mortar segmentation errors in 3D historical wall reconstruction. *Automation in Construction, 167*(105693), s. 1-13. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105693

Harmouche, H., Hajji, R., El Barhoumi, N., Sardi, N., & Bouramdane, A. (2024). Inntegration of HBIM, XR And Beacons For Cultural Mediation of Historical Heritage: The Case of "Al-Quaraouiyine Mosque" In Fes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W4*, s. 221-226. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-221-2024

Hasol, D. (1995). *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü.* İstanbul: YEM Yayın.

Haznedar, B., Bayraktar, R., Öztürk, A. E., & Arayıcı, Y. (2023). Implementing PointNet For Point Cloud Segmentation In The Heritage Context. *Heritage Science, 11*(2), s. 1-18. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00844-w

Horn, D. (2024). *Dijital Sinyal İleme (DSP) Nedir?* 12 28, 2024 tarihinde Digilent Blog: https://digilent.com/blog/what-is-digital-signal-processing/ adresinden alındı

Hu, W., & Hu, R. (2024). Creating Historical Building Models By Deep Fusion Of Multi-Source Heterogeneous Data Using Residual 3D Convolutional Neural Network. *International Journal of Architectural Heritage, 18*(9), s. 1377-1393. https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2229253

Hu, X., Olgun, G., & Assaad, R. H. (2024). An intelligent BIM-enabled digital twin framework for real-time structural health monitoring using wireless IoT sensing, digital signal processing, and structural analysis. *Expert Systems With Applications, 252*(124204), s. 1-20. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124204

IBM. (2025, 10 28). What is machine learning?: https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning adresinden alındı

Imtiaz, S., Arif, S., Nawaz, A., & Shah, S. A. (2024). Conservation Of Socio-Religious Historic Buildings: A Case Study Of Shah Yousuf Gardez Shrine. *Buildings, 14*(2116), s. 1-27. https://doi.org/10.3390/buildings14072116

IRCICA. (2023). *Şubat 2023 Kahramanmaraş Depreminin Türkiye'deki Tarihi Kültürel Mirasa Verdiği Zararlar Hakkında Rapor.* IRCICA.

İSMEP. (2014). *Kültürel Mirasın Korunması.* İstanbul: İPKB.

Karasaka, L., & Ulutas, N. (2023). Point Cloud-Based Historical Building Information Modeling (H-BIM) In Urban Heritage Documentation Studies. *Sustainability, 15*(10726), s. 1-21. https://doi.org/10.3390/su151310726

Khalil, A., Stravoravdis, S., & Backes, D. (2021). Categorisation of building data in the digital documentation of heritage buildings. *Applied Geomatics, 13*, s. 29-54. https://doi.org/10.1007/s12518-020-00322-7

Khan, M. S., Khan, M., Bughio, M., Talpur, B. D., Kim, I. S., & Seo, J. (2023). An Integrated HBIM Framework For The Management Of Heritage Buildings. *Buildings, 12*(964), s. 1-25. https://doi.org/10.3390/buildings12070964

Kıvılcım, C. Ö., & Duran, Z. (2021). Parametric Architectural Elements from Point Clouds for HBIS Applications. *International Journal of Environment and Geoinformatics, 8*(2), s. 144-149. https://doi.org/10.30897/ijegeo.803334

Korumaz, M. (2016). Kültürel Mirasın 3D Belgelenmesinde Yersel Lazer Tarama Teknolojisinin Kullanımı: Aksaray'da Bir Sivil Mimarlık Örneği. *Selçuk Teknik Dergisi, 15*(2), s. 138-156.

Koşan, D. (2020). Taşınmaz Kültür Varlıklarında Önleyici Koruma Önerisi: Erken Müdahale Sistemi. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 13*(1), s. 130-143. https://doi.org/10.17218.hititsosbil.675762

Kömürcü, E., & Yıldız, N. (2021). Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi. *4th International Conference Of Contemporary Affairs In Architecture And Urbanism (ICCAUA-2021)*, (s. 589-597). Antalya. https://doi.org/10.38027/ICCAUA2021TR0072N25

Köroğlu, N. (2010). Mimar Sinan Camilerinde Strüktür Morfolojisi Üzerine Bir Araştırma: Kılıç Ali Paşa Camisi. *Doktora Tezi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.

Kuban, D. (1997). *Sinan'ın Sanatı ve Selimiye.* İstanbul: Türkiye Ekonomik ve Toplumsal Tarih Vakfı.

Kuban, D. (2021). *Osmanlı Mimarisi.* İstanbul: YEM Yayın.

Kuçak, R. A., & Dervişoğlu, A. (2023). The Heritage Building Information Modelling Of The Church Of St. Sophia In Ohrid, North Macedonia. *Mediterranean Archaeology And Archaeometry, 23*(3), s. 31-43. https://doi.org/10.5281/zenodo.10444362

Kültür Varlıklarına Yönelik Afet Risklerinin Yönetimi. (2019). İstanbul: İstanbul Tarihi Alanları Alan Başkanlığı Yayınları.

Laumain, X., Esteve Muñoz, V. F., & López Sabater, Á. (2023). Studies Of The Nolla Palace. From Survey To HBIM Management. *EGE - Revista De Expresión Gráfica En La Edificación*(19), s. 96-116. https://doi.org/10.4995/ege.2023.20825

Level of Development (LOD) Specification. (2024). 01 18, 2026 tarihinde BIM Forum: https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/ adresinden alındı

Liberotti, R., & Gusella, V. (2023). Parametric Modeling And Heritage: A Design Process Sustainable For Restoration. *Sustainability, 15*(1371), s. 1-15. https://doi.org/10.3390/su15021371

Lin, G., Giordano, A., Stendard, L., Xu, L., & Yang, X. (2022). Using UAV For The Digital, Documentation, Monitoring Of Culture Architectural Heritage: A Case Study Of Sisheng Ancestral Hall, Shenzhen, China. *Disegnarecon, 15*(29), s. 1-6. https://doi.org/10.20365/disegnarecon.29.2022.13

Lin, G., Li, G., Giordano, A., Sang, K., Stendardo, L., & Yang, X. (2024). Three-Dimensional Documentation And Reconversion Of Architectural Heritage By UAV And HBIM: A Study Of Santo Stefano Church In Italy. *Drones, 8*(250), s. 1-16. https://doi.org/10.3390/drones8060250

Liu, J., Foreman, G., Sattineni, A., & Li, B. (2023). Integrating Stakeholders' Priorities Into Level Of Development Supplemental Guidelines For HBIM Implementation. *Buildings, 13*(530), s. 1-29. https://doi.org/10.3390/buildings13020530

LOD Kavramı. (2022, 12 10). BIM TEKNOLOJİ: https://www.bimteknoloji.com/fikir/model-tanim-duzeyi-lod-level-of-development/ adresinden alındı

Logothetis, S., & Stylianidis, E. (2016). BIM Open-Source Software (OSS) For The Documentation Of Cultural Heritage. *Virtual Archaeology Review, 7*(15), s. 28-35. https://doi.org/10.4995/var.2016.5864

Lopez, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction, 2*(21), s. 1-29. https://doi.org/10.3390/mti2020021

Lovell, L. J., Davies, R. J., & Hunt, D. V. (2023). The Application of Historic Building Information Modelling (HBIM) to Cultural Heritage: A Review. *Heritage, 6*, s. 6691-6717. https://doi.org/10.3390/heritage6100350

Lucchi, E. (2023). Digital twins for the automation of the heritage construction sector. *Automation in Construction, 156*(105073), s. 1-19. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105073

Maksimović, M., & Ćosović, M. (2019). Preservation of Cultural Heritage Sites using IoT. *18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA.* Jahorina: IEEE.

Maravelakis, E., Giannioti, G., Psalti, A., Tsakoumaki, M., Pocobelli, D. P., Xinogalos, M., . . . Stavroulakis, G. (2023). 3D Modeling & Analysis Techniques For The Apollo Temple In Delphi. *Buildings, 13*(1730), s. 1-16. https://doi.org/10.3390/buildings13071730

Marra, A., Fabbrocino, G., & Trizio, I. (2023). On The Interoperability Performance Of HBIM Models For Structural Conservation And Upgrading Of Building Aggregates In The Italian Minor Centres. *VITRUVIO – International Journal Of Architectural Technology And Sustainability, 8*(Special Issue), s. 140-151. https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.18856

Martinelli, L., Calcerano, F., & Gigliarelli, E. (2022). Methodology For An HBIM Workflow Focused On The Representation Of Construction Systems Of Built Heritage. *Journal Of Cultural Heritage, 55*, s. 277-289. https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.03.016

Mimari Mirası Koruma Bildirgesi. (2013). ICOMOS Türkiye.

Monchetti, S., Betti, M., Borri, C., Gerola, C., Matta, C., & Francalanci, B. (2023). Insight On HBIM For Conservation Of Cultural Heritage: The Galleria dell'Accademia di Firenze. *Heritage, 6*, s. 6949-6964. https://doi.org/10.3390/heritage6110363

Moyano, J., Carreño, E., Nieto-Julián, J. E., Gil-Arizón, I., & Bruno, S. (2022). Systematic Approach To Generate Historical Building Information Modelling (HBIM) In Architectural Restoration Project. *Automation In Construction, 143*(104551), s. 1-21. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104551

Moyano, J., Musicco, A., Nieto-Julián, J. E., & Domínguez-Morales, J. P. (2024). Geometric Characterization And Segmentation Of Historic Buildings Using Classification Algorithms And Convolutional Networks In HBIM. *Automation In Construction, 167*(105728), s. 1-19. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105728

Moyano, J., Pili, A., Nieto-Julián, J. E., Della Torre, S., & Bruno, S. (2023). Semantic Interoperability For Cultural Heritage Conservation: Workflow From Ontologies To A Tool For Managing And Sharing Data. *Journal Of Building Engineering, 80*(107965), s. 1-16. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107965

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey, 27*(4), s. 311-327. https://doi.org/10.1108/02630800910985108

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic building information modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 76*, s. 89-102. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006

Ni, Z., Liu, Y., Karlsson, M., & Gong, S. (2022). Enabling Preventive Conservation of Historci Buildings Through Cloud-Based Digital Twins: A Case Study in the City Theatre, Norrköping. *IEEE Access, 10*(1), s. 1-15. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3202181

Nieto-Julián, J. E., Farratell, J., Cavada, M. B., & Moyano, J. (2023). Collaborative Workflow in an HBIM Project for the Restoration and Conservation of Cultural Heritage. *International Journal of Architectural Heritage, 17*(11), s. 1813-1832. https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2073294

Nieto-Julián, J. E., Lara, L., & Moyano, J. (2021). Implementation of a TeamWork-HBIM for the Management and Sustainability of Architectural Heritage. *Sustainability, 13*(2161), s. 1-26. https://doi.org/10.3390/su13042161

O'Shea, M., & Murphy, J. (2020). Design of a BIM Integrated Structural Health Monitoring System for a Historic O. *Buildings, 10*(131), s. 1-16. https://doi.org/10.3390/buildings10070131

Ofluoğlu, S. (2016). Yapı Bilgi Modelleme ve Kullanım Alanları. *Timöb Dergisi*.

Oktay, S., Taş, N., & Taş, M. (2020). Kültürel Miras Alanlarının Korunması ve Afet Yönetimi İlişkisi. *Resicilience, 4*(2), s. 305-321. https://doi.org/10.32569/resilience.710387

Orabi, R. B. (2023). A Digital Approach to Revisiting the Byzantine Past of Al-Madrassa Al-Halawiyya in Aleppo. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage, 16*(4), s. 1-24. https://doi.org/10.1145/3625300

Orbeyi, N. (2016). Çift Revaklı Sinan Camilerinde Modüler Sistem. *METU Journal Of The Faculty Of Architecture, 33*(2), s. 201-225. https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2016.2.7

Önge, M. (2020). A Proposal for a Principal Based Approach to Conservation Project Preparation Process of Architectural Heritage. *Grid Mimarlık Planlama ve Tasarım Dergisi, 3*(1), s. 28-50. https://doi.org/10.37246/grid.651438

Özdemir, K., Topal, E., & Tatar, E. (2025). The Internet of Things at the Intersection of Architecture and Disaster-Emergency Management Processes. *Türk Deprem Araştırma Dergisi, 7*(1), s. 14-24. https://doi.org/10.46464/tdad.1514655

Özeren, O. K. (2022). HBIM and Thermal Performance in Historical Buildings. *Innovations in Smart Cities Applications Volume 5* (s. 327-338). içinde Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94191-8_26

Özgür Yıldız, Ş., & Doğan, D. (2023). Klasik Dönem Osmanlı Mimarisinde Statünün Görselşemesi: Kaptan-ı Derya Camileri. *Ege Üniversitesi Yayınları Edebiyat Fakültesi Yayın No:22*, s. 411-421.

Parola, M., Galatolo, F. A., Cimino, M. G., & Squeglia, N. (2025). Multi-sensor intelligent system for assessing the structural drift of the Leaning Tower of Pisa. *Computational Intelligence.* içinde https://doi.org/10.1007/978-3-031-85252-7_3

Pekmezci, I. (2018). "Önleyici Koruma" Alanında Avrupa'nın Deneyimi ve Türkiye'deki Kültür Mirası İçin Yapılabilecekler. *Mimarist*(3), s. 16-21.

Qsymah, A. A.-H.-Q. (2024). HBIM for Sustainable Documentation of Historic Buildings: Case Study of Al-Faddain Umayyad Mosque. *Civil Engineering and Architecture, 12*(3A), s. 1969-1984. https://doi.org/10.13189/cea.2024.121305

Quattrini, R., Malinverni, E. S., Clini, P., Nespeca, R., & Orlietti, E. (2015). From TLS to HBIM. High Quality Semantically-Aware 3D Modeling Of Complex Achitecture. *he International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W4*, s. 367-374. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-367-2015

Rimella, N. D. (2024). Semantic HBIM approach for digital inclusion. *Disegnarecon, 17*(32), s. 1-9. https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.9

Rossato, L. P. (2023). The Rocca Malatestiana Of Verucchio: SCAN To HBIM Process For The Digitisation Of Cultural Site With Severe Topography Condition. *Disegnarecon, 16*(31), s. 1-12. https://doi.org/10.20365/disegnarecon.31.2023.2

Sampaio, A. Z. (2023). Heritage Building Information Modelling Implementation First Steps Applied In A Castle Building: Historic Evolution Identity, Data Collection And Stratigraphic Modelling. *Heritage, 6*, s. 6472-6493. https://doi.org/10.3390/heritage6100338

Sancak, N., & Alaçam, S. (2021). Sinan Camilerinde Kubbelerin Strüktürel Davranışının Hesaplamalı Tasarım Araçlarıyla Değerlendirilmesi. *Mimarlıkta Sayısal Tasarım 15. Ulusal Sempozyumu* (s. 194-204). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi. https://mstas2021.itu.edu.tr/sempozyum/bildiri-kitabi adresinden alındı

Santini, S. B. (2023). HBIM-Based Decision-Making Approach For Sustainable Diagnosis And Conservation Of Historical Timber Structures. *Sustainability, 15*(3003), s. 1-23. https://doi.org/10.3390/su15043003

Santini, S. C. (2023). Field Testing For Structural Behavior Of A Stratified Monumental Complex Over Time: Palazzo Colonna-Barberini And Templum Fortunae Praeneste. *Case Studies In Construction Materials, 18*(e02152), s. 1-25. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02152

Santini, S. C. (2023). From Digital Restitution To Structural Analysis Of A Historical Adobe Building: The Escuela José Mariano Méndez In El Salvador. *Heritage, 6*, s. 4362–4379. https://doi.org/10.3390/heritage6050231

Santini, S. S. (2023). Integrated Modeling Of Minerva Medica To Identify The Dynamic Effects Of Rail-Traffic Vibrations. *Buildings, 13*(1308), s. 1-30. https://doi.org/10.3390/buildings13051308

Santoni, A. M.-T.-F. (2021). HBIM Approach To Implement The Historical And Constructive Knowledge. The Case Of The Real Colegiata Of San Isidoro (León, Spain). *Virtual Archaeology Review, 12*(24), s. 49-65. https://doi.org/10.4995/var.2021.13661

Silva, F. B. (2022). A Technological Prospect For A Diagnostic Model In HBIM. *Journal of Computing and Cultural Heritage, 15*(4), s. 1-24. https://doi.org/10.1145/3526091

Simeone, D., Cursi, S., Toldo, I., & Carrara, G. (2014). BIM and Knowledge Management For Building Heritage. *ACADIA 14: Design Agency* (s. 681-690). Los Angeles: Sapienza University of Rome.

Solla, M. G. (2020). A Building Information Modeling Approach To Integrate Geomatic Data For The Documentation And Preservation Of Cultural Heritage. *Remote Sensing, 12*(4028), s. 1-24. https://doi.org/10.3390/rs12244028

Soyluk, A., & Demircan, B. (2023). Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Yükü Altındaki Davranışlarının 6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde Hasar Görmüş Cami Örnekleri Üzerinden Mimari Açıdan İncelenmesi. *Journal of Architectural Sciences and Applications, 8*(Special Issue), s. 329-354. https://doi.org/10.30785/mbud.1318660

Stanga, C. B. (2021). Extending 3D Quality Modelling For Earthquake-Damaged Stone Masonry Wall: Combined Digital Models For Building Archaeology. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-M-1-2021*, s. 721-728. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-721-2021

Stanga, C. B. (2023). Enhancing Building Archaeology: Drawing, UAV Photogrammetry And Scan-to-BIM-to-VR Process Of Ancient Roman Ruins. *Drones, 7*(521), s. 1-27. https://doi.org/10.3390/drones7080521

Sun, Z. X. (2019). As-Built BIM For A Fifteenth-Century Chinese Brick Structure At Various LoDs. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 8*(577), s. 1-15. https://doi.org/10.3390/ijgi8120577

T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi. (2022, 12 12). KÜLTÜR VE TABİAT VARLIKLARINI KORUMA KANUNU: https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2863&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5 adresinden alındı

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2022, 12 12). 2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu: https://korumakurullari.ktb.gov.tr/TR-131017/2863-sayili-kultur-ve-tabiat-varliklarini-koruma-kanunu.html adresinden alındı

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2026, 02 07). Türkiye Geneli Korunması Gerekli Taşınmaz Kültür Varlığı İstatistiği: https://kvmgm.ktb.gov.tr/TR-44798/turkiye-geneli-korunmasi-gerekli-tasinmaz-kultur-varlig-.html adresinden alındı

Tahoon, D. E.-Z. (2024). Cost Impact Comparative Analysis Via BIM between Heritage Regular Maintenance Projects and Long-Term Restoration Projects—A Case Study. *Heritage, 7*, s. 50-75. https://doi.org/10.3390/heritage7010002

Taileb, A. D. (2023). HBIM: A Tool For Enhancing the Diagnosis Of Historical Buildings: The Case Of St. George's Memorial Anglican Church, Oshawa. *Heritage, 6*, s. 5848–5866. https://doi.org/10.3390/heritage6080307

Tan, J. L. (2022). Digital Twin for Xiegong's Architectural Archaeological Research: A Case Study of Xuanluo Hall, Sichuan, China. *Buildings, 12*(1053), s. 1-24. https://doi.org/10.3390/buildings12071053

Tekin, H. (2017). Yapı Bilgi Modellemesi Sisteminin Türk İnşaat Sekjtörüne Uygulanması ve Adaptasyonunda Kritik Yol Haritasının Oluşturulması. *Yayınlanmamış Doktora Tezi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.

TMMOB Mimarlar Odası. (2023). *6 Şubat 2023 Depremleri Tespit ve Değerlendirme Raporu.* TMMOB Mimarlar Odası.

Tokdemir, O. B., & Orhan, Ö. (2026, 01 18). *İnşaat Sektöründe Dijital İkiz Kullanımı*. Buildig Smart Türkiye: https://www.buildingsmartturkiye.org/paylasimlar/kose-yazilari/insaat-sektorunde-dijital-ikiz-kullanimi adresinden alındı

Töre, T. (2018, Volume 8, Issue 1). Sayısal Miras: Mimari Miras ve Sayısal Nesne İlişkisinde Koruma Yaklaşımları. *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication - TOJDAC*, s. 1-10.

Tuluk, Ö. İ. (2006). Osmanlı Camilerinde Mekan Kurgusu Açısından KAre Tabanlı Baldaken Varyasyonları (15-17yy). *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21*(2), s. 275-284.

Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi Türkiye Milli Komitesi. (2022, 04 10). ICOMOS: https://www.icomos.org.tr/ adresinden alındı

UNESCO TÜrkiye Milli Komisyonu. (2022, 04 10). UNESCO: https://www.unesco.org.tr/ adresinden alındı

Valentini, M. B. (2023). HBIM To Support The Executive Design Of A Restoration. Critical Issues Related To Geometric And Semantic Modeling. *SCIRES-IT: Scientific Research and Information Technology, 13*(2), s. 125–136. https://doi.org/10.2423/i22394303v13n2p125

Van Balen, K. (2017). Challenges that Preventive Conservation poses to the Cultural Heritage documentation field. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (s. 713-717). Ottawa.

Velastegui-Cáceres, L. A.-B.-C. (2024). Implementation of Laser Scanning and HBIM Technology for the Structural Evaluation of Built Heritage in Ecuador. *Civil Engineering and Architecture, 12*(5), s. 3221-3234. https://doi.org/10.13189/cea.2024.120508

Vestroni, F., De Sortis, A., & Pau, A. (2020). Measurements Of The Colosseum Response to Environmental Actions. *EURODYN 2020 XI International Conference on Structural Dynamics* . Atina.

Wafaei Baneh, K., Wafaei Baneh, B., Osman, A., Mostafapour, O., & Bradosty, Z. R. (2023, Vol.41 No.2). Regeneration and documentation of historic geometric Islamic patterns via HBIM: a case study of Choli minaret, Kurdistan Region. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, s. 347-363.

Wikipedia. (2026). *Uygulama programlama arayüzü*. 01 18, 2026 tarihinde Vikipedi Özgür Ansiklopedi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Uygulama_programlama_aray%C3%BCz%C3%BC adresinden alındı

Willkens, D. S. (2024). A Case Study of Integrating Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Building Information Modeling (BIM) in Heritage Bridge Documentation: The Edmund Pettus Bridge. *Buildings, 14*(1940), s. 1-32. https://doi.org/10.3390/buildings14071940

Wireless Structural Health Monitoring of the Colosseum. (2024). Move Solutions: https://www.movesolutions.it/case-study/wireless-structural-health-monitoring-of-the-colosseum adresinden alındı

Wojciechowska, G., Jan Bednarz, Ł., Dolinska, N., Opałka, P., Krupa, M., & Imnadze, N. (2024). Intelligent Monitoring System for Integrated Management of Historical Buildings. *Buildings, 14*(2108), s. 1-29. https://doi.org/10.3390/buildings14072108

Wu, Y., Dong, Y., Shan, Z., Meng, X., He, Y., Jia, P., & Lu, D. (2024). Enhancing Anomaly Detection for Cultural Heritage via Long Short-Term Memory with Attention Mechanism. *Electronics, 13*(1254), s. 1-21. https://doi.org/10.3390/electronics13071254

Xu, C., Zhao, Y., & Wu, C. (2022). 'Sustainable' Recording and Preservation of Zangniang Stupa and Sangzhou Lamasery in Qinghai, China with Heritage Building Information Model. *Sustainability, 14*(4549), s. 1-19. https://doi.org/10.3390/su14084549

Zaragoza, M., Bayarri, V., & García, F. (2024). Integrated Building Modelling Using Geomatics and GPR Techniques for Cultural Heritage Preservation: A Case Study of the Charles V Pavilion in Seville (Spain). *Imaging, 10*(128), s. 1-18. https://doi.org/10.3390/jimaging10060128

Zouaoui, M. A., Djebri, B., & Capsoni, A. (2021). From Point Cloud to HBIM to FEA, the Case of a Vernacular Architecture: Aggregate of the Kasbah of Algiers. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage, 14*(1), s. 1-21. https://doi.org/10.1145/3418039

A
LİTERATÜRDEKİ YAYGIN KULLANILAN YBM YAZILIMLARI

Tablo A.1 Kullanılan yazılımlar – yazar tarafından Türkçe'ye çevrilmiş ve güncellenmiştir (**(Lopez ve diğerleri, 2018)**.

	ÜRETİCİ	ÜRÜN ADI	İŞLEV	ARAÇ SETİ	PARAMETRİK OBJE ÜRETİMİ	VERİ TABANI YAPISI	BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK
YBM YAZILIMLARI	**AUTODESK www.autodesk.com**	**REVIT**	3D Modelleme / inceleme	3D Modelleyici	**Evet**	Tek Dosya	DWG, DXF, DGN, SAT, SKP, IFC, gbXML
	NEMETSCHEK www.nemetschek.com	**ALLPLAN**	3D Modelleme / inceleme	3D Modelleyici	**Evet**	Tek Dosya	DWG, DXF, IFC, PDF
	BENTLEY SYSTEMS www.bentley.com	**BENTLEY Architecture**	3D Modelleme / inceleme	3D Modelleyici	**Evet**	Tek Dosya	DWG, DXF, DGN, SAT, SKP, IFC, gbXML
	BENTLEY SYSTEMS www.bentley.com	**BENTLEY Structural Facilities**	3D Modelleme / Analizler / Yapısal Detaylar	3D Modelleyici	**Evet**	Tek Dosya	DWG, DXF, DGN, SAT, IFC, gbXML, PDF
	BENTLEY SYSTEMS www.bentley.com	**BENTLEY Power Civil**	3D Modelleme / Analizler / Yapısal Detaylar	3D Modelleyici	**Evet**	Tek Dosya	DWG, DXF, DGN, SAT, IFC, gbXML, PDF
	BENTLEY SYSTEMS www.bentley.com	**BENTLEY Generative Components**	3D Modelleme / Analizler / Yapısal Detaylar	3D Modelleyici	**Evet**	Tek Dosya	DWG, DXF, DGN, SAT, IFC, gbXML, PDF
	GRAPHISOFT www.graphisoft.com	**ARCHICAD**	3D Modelleme	3D Modelleyici	**Evet**	Tek Dosya	DWG, DXF, IFC, SKP
	TEKLA www.tekla.com	**TEKLA**	3D Strüktür Modelleme / Yapısal Detaylar	3D Modelleyici	**Evet**	Birkaç Dosya	DWG, DXF, DGN, CIS/2, IFC, DTSV, SDNF
DİĞER YAZILIMLAR	**TRIMBLE www.sketchup.com**	**SKETCHUP**	3D Modelleme	3D Modelleyici	Hayır	Tek Dosya	DWG, DWX, IFC
	DASSAULT SYSTEMES www.3ds.com	**CATIA**	3D Modelleme	3D Modelleyici	Hayır	Tek Dosya	DWG, DXF, IFC
	AUTODESK www.autodesk.com	**NAVISWORKS**	3D Modelleme Görüntüleme / İnceleme	Spectators / yüzey modelleyici	Hayır	Tek Dosya	DWG, DXF, IFC, PDF, FBX
	RHINOCEROS www.rhino3d.com	**RHINO / GRASSHOPPER**	3D Modelleme	3D Modelleyici	Grasshopper eklentisiyle Evet	Tek Dosya	DWG, DXF, IFC, SAT
	AUTODESK www.autodesk.com	**ECOTECT Analysis**	Enerji, ısı, su ve karbon emilimi analizi	Analiz	-	Tek Dosya	IFC
	DAYSIM www.daysim.software.informer.com	**DAYSIM**	Yıllık aydınlatma analizi	Analiz	-	-	IFC
	NREL U.S. LCI www.nrel.gov/lci	**LIFECYCLE**	Malzemelerin çevresel etki analizi ve hesapları	Analiz	-	-	-

B
LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ TABLOLARI

Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen literatür incelemesine ait detaylı vaka analizi tabloları sunulmaktadır. Çalışma sürecinde, Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM) alanında farklı coğrafyalarda ve çeşitli yapı tipolojileri üzerinde gerçekleştirilmiş toplam 100 vaka çalışması belirli kriterler doğrultusunda incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Her bir çalışma; veri toplama yöntemleri, modelleme yaklaşımları, analiz türleri, kullanılan yazılım altyapıları ve elde edilen çıktıların niteliği açısından sınıflandırılmıştır. Bunun yanı sıra, vaka çalışmalarında öne çıkan faydalar ve karşılaşılan kısıtlar sayısal kodlar aracılığıyla değerlendirilmiş ve bu kodların dağılımı üzerinden alanın genel eğilimleri saptanmıştır.

Tablo B.1 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (1-10)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Acar, A., Atalaya, B., Say, S., Tunca, M., Çetin, M., Çalışkan, Ş., Altay, S., Öngören, P., Karakaya, F.	2022	Kültürel mirasa yönelik mobil artırılmış gerçeklik uygulaması geliştirilmesi	TÜRKİYE	TEK YAPI	TOPOĞRAFİK TARAMA FOTOGRAMETRİ	-	-	-	GÖRSEL AR/VR/MR	2, 7, 19, 24	1, 2, 4, 7	Dijital Kamera Samsung Galaxy Tab S5 Tablet	-	Unity		Wikitude Studio Vuforia	AR destekli mobil uygulama ile nokta bulutu ve 3B modellerin entegrasyonu sağlanarak, yapının farklı tarihsel dönemlerine ait restitüsyonları yerinde, etkileşimli ve kullanıcıya bilgi sunan bir deneyim ortamında görselleştirilmiştir.
Adami, A., Fregonese, L., Rosignoli, O., Scala, B., Taffurelli, L., Treccani, D.	2019	GEOMETRIC SURVEY DATA AND HISTORICAL SOURCES INTERPRETATION FOR HBIM PROCESS: THE CASE OF MANTUA CATHEDRAL FACADE	İTALYA	TEK YAPI	TOPOĞRAFİK TARAMA FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL	2, 7, 8, 9, 15, 17, 21, 25	2, 3, 12, 17, 18, 23	Leica TS30 Total Station Leica HDS7000 Lazer Tarayıcı Canon EOS 5D Mark III iStar Kamera	Leica Cyclone Leica CloudWorx Cad Plug in	Autodesk Revit Leica CloudWorx RVT Plug in Agisoft Photoscan Midas GEN Autocad			Geomatik veri (lazer tarama + fotogrametri) ile Scan-to-BIM sürecinin HBIM'e entegrasyonu ve bu süreci destekleyen uzmanlık/eğitim çerçevesinin tanımlanması; nokta bulutundan parametreye, modelden karar desteğine uzanan bütüncül yaklaşım.
Aguilar, R., Huaranga,S., Porcel, P., Zavala, G.	2022	Seismic Vulnerability Assessment of Andean Constructions: Structural Typification of Historical Churches Using Digital Technologies	PERU	YAPI TİPİ	TOPOĞRAFİK TARAMA FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ	STRÜKTÜR ANALİZİ	AR/VR/MR DİJİTAL ARŞİV	1, 4, 6, 9, 15, 21, 27	1, 2, 7, 8, 9, 10, 23, 24	Detay verilmemiştir.	Detay verilmemiştir.	Autodesk Revit Twinmotion Unity		Vuforia	HBIM ve artırılmış gerçeklik entegrasyonu ile And bölgesindeki tarihsel kiliseler geniş bir veri seti analiz edilerek 12 yapısal tipoloji tanımlanmış; bu tipolojiler yapısal, malzeme ve geometrik verilerle ilişkilendirilerek deprem kırılganlık analizlerine veri sağlayan bir sistem içinde kullanılmıştır. AR uygulamasıyla bu yapıların etkileşimli sunumu sağlanarak sınıflandırma, analiz ve karar süreçleri desteklenmiştir.
Akın, Ş., Gürsel Dino, İ., Savaş Sargın, A.	2022	HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELLING FOR CONSERVATION OF 20TH CENTURY MODERNIST ARCHITECTURE	TÜRKİYE	TEK YAPI	LAZER TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ MALZEME ANALİZİ ÇEVRESEL ANALİZLER	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR HASAR TESPİT DİJİTAL ARŞİV	1, 4, 6, 8, 9, 10, 15, 19, 20, 21, 26	7, 8, 12, 23, 25, 26, 27	GeoSLAM ZEB-REVO FARO Focus Laser Scanner Schmidt Hammer Ferro Scanner LVDT Sensörleri Çevresel Sensörler Dijital Kamera		Autodesk Revit 3DF Zephyr A360	Energy Plus Design Builder	Revit Live Lumion Enscape	Bu vaka çalışmasında elde edilen HBIM modeli, modernist bir miras yapının korunması ve yönetimi için gelişmiş bir dijital çözüm sunmuştur. Sadece mevcut durumu belgelemekle kalmamış, aynı zamanda gelecekte yapılacak müdahalelere rehberlik edecek bir platform olarak tasarlanmıştır. Bu son ürün, dijital koruma yöntemlerinin miras yapılarındaki potansiyelini açıkça göstermiştir.
Al-Muqdadi, F., Ahmed, A.	2022	APPLYING HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELLING (HBIM) TO LOST HERITAGE IN CONFLICT ZONES: AL-HADBA' MINARET IN MOSUL, IRAQ.	FRANSA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	VAR	-	-	MODEL	1, 4, 6, 7, 8, 17, 19, 22, 24, 25, 26	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 20, 22, 23, 27, 28	Dijital Kamera		Autodesk Revit Meshroom Agisoft Metashape Autodesk Recap			Bu vaka çalışmasında, crowdsourced fotoğraflar ve sınırlı saha verileri kullanılarak fotogrametri ile nokta bulutu üretilmiş ve HBIM ortamında parametrik bir dijital rekonstrüksiyon modeli oluşturulmuştur. Çalışma, erişilebilir yöntemlerle mirasın belgelenebileceğini gösterirken, analiz ve izleme içermeyen statik bir modelleme ile sınırlı kalmaktadır.
Albourae, A.T., Armenakis, C., Kyan, M.	2017	ARCHITECTURAL HERITAGE VISUALIZATION USING INTERACTIVE TECHNOLOGIES	CİDDE	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA GELENEKSEL	-	YAPI TİPOLOJİSİ	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE GÖRSEL-AR-VR-MR	4, 5, 9, 16, 18, 20, 24, 25, 26	1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 25	Dijital Kamera Terrestrial Laser Scanner Tablet VR/AR Gözlükleri	Detay verilmemiştir.	Autodesk Revit Unity	-	Unity	Makalenin içeriğinde, genel olarak Al-Balad bölgesinin tarihi önemi vurgulansa da, çalışmanın odak noktasının Nasıf Tarihi Evi gibi belirli bir yapı üzerinde yoğunlaştığı belirtilmiştir. Bu tek yapı üzerinde HBIM yöntemlerinin uygulanması ve ilgili semantik bilgilerle zenginleştirilmiş 3D modellerin oluşturulması detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, bu tür çalışmaların yapı gruplarına ölçeklenebilir olduğu ifade edilse de, bu makale kapsamında yapılan çalışma bir bina ölçeğinde kalmıştır.
Allegra, V., Di Paola, F., Lo Brutto, M., Vinci, C.	2020	SCAN-TO-BIM FOR THE MANAGEMENT OF HERITAGE BUILDINGS: THE CASE STUDY OF THE CASTLE OF MAREDOLCE (PALERMO, ITALY)		TEK YAPI	LAZER TARAMA	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE GÖRSEL-AR-VR-MR DİJİTAL ARŞİV METRAJ	1, 3, 4, 6, 17, 18, 19, 25, 27	1, 2, 3, 5, 9, 10, 14, 15, 20, 23, 24	Leica RTC360 Lazer Tarayıcı FARO Focus Laser Scanner	Leica Cyclone Faro Scene	Autodesk Revit Rhinoceros	Cyclone 3D Reshaper		Scan-to-BIM tabanlı HBIM üretimi Maredolce Kalesi üzerinde uygulanmıştır. Çalışma, lazer tarama verilerinden parametrik HBIM model oluşturma sürecine odaklanmaktadır. Parametrik tonoz family'leri geliştirilmiş, tekil karmaşık elemanlar için Rhino tabanlı non-parametrik modelleme kullanılmıştır. Çalışma izleme veya sensör entegrasyonu içermemektedir; statik HBIM üretimi ile sınırlıdır.
Anaç, M., Arun, G.	2024	HBIM supported archive model	TÜRKİYE	YAPI GRUBU	GELENEKSEL	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE DİJİTAL ARŞİV	2, 4, 5, 7, 14, 25	8, 11	Dijital Kamera Tablet	Microsoft Excel Adobe Photoshop	Autodesk Revit Revit Family Builder Autocad			Bu çalışmada, tarihi yapıların dağınık ve farklı formatlardaki verilerini tek bir platformda toplayarak kurumlar arası veri akışını düzenleyen HBIM destekli bir dijital arşiv modeli geliştirilmiştir. Model, yapının geometrik ve semantik bilgilerini bütüncül biçimde bir araya getirirken, zaman katmanları aracılığıyla yapıdaki değişimleri izlenebilir hale getirerek restorasyon süreçlerine karar destek altyapısı sunmaktadır
Angulo, R., Pinto, F., Rodríguez, J., & Palomino, A.	2017	Digital anastylosis of the remains of a portal by master builder Hernán Ruiz: Knowledge strategies, methods and modelling results		TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ	-	MODEL	1, 3, 6, 7, 15, 16, 17, 19, 25, 26	1, 2, 3, 5, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 20, 23, 25, 26	DJI Phantom 2 Drone GoPro 3 Kamera	Agisoft PhotoScan	Autodesk Revit Meshlab Geomagic Design X Rhinoceros	Geomagic Design X	-	Fotogrametri ile elde edilen nokta bulutu üzerinden mesh model oluşturulmuş, reverse engineering teknikleri kullanılarak parçalar yeniden hizalanmış ve Rhinoceros ortamında modellenmiştir. Model, Revit tabanlı HBIM ortamına aktarılmış ve Dynamo aracılığıyla veri tabanı ile çift yönlü bilgi akışı sağlanarak dijital anastylosis yaklaşımı geliştirilmiştir.
Argenziano, P., Avella, A., Albanese, S.	2018	Building Materials, Ionizing Radiation and HBIM: A Case Study from Pompei (Italy)	İTALYA	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ	MALZEME ANALİZİ ÇEVRESEL ANALİZLER MEKANSAL ANALİZ	MODEL KENTSEL MODEL	4, 6, 7, 15, 18, 25, 27	3, 10, 11, 23	Terrestrial Laser Scanner	QGIS 2.18 Atas Lite Maps.me	Autodesk Revit	QGIS 2.18 Atas Lite	-	HBIM modeline iyonize radyasyon verisi non-geometrik veri olarak entegre edilmiştir. GIS + CIM + HBIM birlikte çalıştırılmıştır. Radyasyon verileri BIM modelinde false-color tematik haritalar olarak görselleştirilmiştir. Çalışma malzeme tanımlaması için non-invaziv radyometrik analiz önerir.

Tablo B.2 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (11-20)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Arico, M., Lo Brutto, M., Maltese, A.	2023	A Scan-to-BIM Approach for the Management of Two Arab-Norman Churches in Palermo (Italy).	İTALYA	YAPI TİPİ	TOPOĞRAFİK TARAMA	-	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL	4, 7, 8, 15, 19, 24	2, 3, 5, 8, 10, 14	FARO Focus Laser Scanner	Autodesk ReCap	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışmada, lazer tarama ve fotogrametri verilerinin entegrasyonuna dayanan Scan-to-BIM yaklaşımı ile yüksek doğrulukta nokta bulutu verileri üretilmiş ve bu veriler HBIM ortamında semantik olarak zenginleştirilmiş dijital modellere dönüştürülmüştür. Geliştirilen model, yalnızca geometrik temsili değil, aynı zamanda yapıya ait malzeme, yapı sistemi ve koruma durumuna ilişkin bilgileri de içeren bütüncül bir veri altyapısı sunarak kültürel mirasın yönetimi ve korunması için karar destek aracı olarak kullanılmaktadır
					FOTOGRAMETRİ				DİJİTAL ARŞİV			DJI Mavic Mini (UAV)	Cloud Compare				
					LAZER TARAMA				PARAMETRİK KÜTÜPHANE			Leica TPS 1105 Total Station	Agisoft Metashape				
												Aydınlatma	Faro Scene				
Artopoulos, G., Fokaides, P., Lysandrou, V., Deligiorgi, M., Sabatakos, P., Agapiou, A.	2024	Data-Driven Multi-Scale Study of Historic Urban Environments by Accessing Earth Observation and Non-Destructive Testing Information via an HBIM- Supported Platform	KIBRIS	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA	VAR		MALZEME ANALİZİ	KENTSEL MODEL	1, 4, 6, 7, 8, 16, 18, 19, 20, 27	3, 4, 9, 10, 23, 25, 27	Terrestrial Laser Scanner	EarthExploer		Google Earth Engine	-	Bu çalışmada, farklı ölçeklerde elde edilen verilerin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi amacıyla HBIM destekli bir platform önerilmektedir. Platform, yapı ölçeğindeki geometrik ve semantik bilgileri; uzaktan algılama verileri, yersel tahribatsız test (NDT) sonuçları ve çevresel analiz çıktıları ile entegre ederek çok disiplinli bir veri ortamı sunmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, kültürel miras yapılarının yalnızca fiziksel özellikleri değil, aynı zamanda çevresel koşullarla ilişkili davranışları da analiz edilebilmekte; böylece koruma, bakım ve müdahale süreçlerinde karar destek mekanizmaları güçlendirilmektedir
				TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ			ÇEVRESEL ANALİZLER	MODEL			UAV Kamera	Google Earth Engine		GIS Platformu		
					TOPOGRAFİK TARAMA				HASAR TESPİT			Landstat 7-8	Periscope				
												NDT Ölçüm Cihazları					
Atteni, M., Rossi, L.	2019	The modelization of built heritage. Comparing BIM processes for architectural types	İTALYA	KARŞILAŞTIRMA	LAZER TARAMA	-	YAPI TİPOLOJİSİ	-	MODEL	1, 4, 6, 7, 16, 17, 25, 27	1,2,6,7,9,10,14,22,23,25	Laser Scanner	-	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma iki farklı mimari tipte (modern ve Rönesans) HBIM parametrik modelleme sürecini karşılaştırır. Survey ve nokta bulutu verilerinden parametrik model oluşturulmuş, mimari elemanlar tipolojik olarak ayrıştırılmış ve parametrik kütüphaneler geliştirilmiştir. Yapısal veya malzeme analizleri yapılmamış, odak HBIM modelleme metodolojisidir.
					FOTOGRAMETRİ				PARAMETRİK KÜTÜPHANE			Survey Equipment					
Bacci, G., Bertolini, F., Bevilacqua, M.G., Caroti, G., Zaragoza, I.M., Martino, M., Piemonte, A.	2019	HBIM METHODOLOGIES FOR THE ARCHITECTURAL RESTORATION. THE CASE OF THE EX-CHURCH OF SAN QUIRICO ALL'OLIVO IN LUCCA, TUSCANY	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ	BOZULMA ANALİZİ	MODEL	1,3,4,6,7,10,11,12,14,15,16,19,20,25,26	1,2,3,6,7,10,12,14,15,18,21,23,25,26	SFM Fotogrametri	Agisoft Photoscan	Autodesk Revit			Fotogrametri tabanlı nokta bulutu verileriyle oluşturulan HBIM model, tarihsel analiz, mevcut durum tespiti ve restorasyon önerilerini tek bir dijital ortamda birleştirerek yapı elemanlarıyla ilişkilendirilmiş parametreler üzerinden yönetilmektedir. Modelin zamansal fazlara ayrılması ve her bileşene ait bozulma durumu, müdahale önerileri ve maliyet bilgileriyle zenginleştirilmesi, koruma sürecinin sistematik ve sorgulanabilir bir bilgi altyapısı üzerinden yürütülmesini sağlamaktadır
					TOPOGRAFİK TARAMA				HASAR TESPİT			Nikon D3100 Kamera	Autodesk ReCap				
									PARAMETRİK KÜTÜPHANE				Microsoft Excel				
													Solibri Model Viewer				
													Microsoft Access				
Bagnolo, V., Argiolas, R., & Alessandro, C.	2019	HBIM for archaeological sites: From SFM based survey to algorithmic modeling.	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	-	-	-	MODEL	1,4,6,7,16,17,25	1,2,13,14,20,22,24	Nikon D3300 Kamera	Agisoft Photoscan	Autodesk Revit	-	-	SfM fotogrametri ile elde edilen nokta bulutundan, Antas Tapınağı kolonadına ait elemanlar parametrik ve algoritmik modelleme yaklaşımlarıyla HBIM ortamında yeniden üretilmiştir. Kolon bileşenleri (base-shaft-capital) için farklı modelleme stratejileri uygulanmış ve Dynamo tabanlı parametrik kolon ailesi oluşturulmuştur.
									PARAMETRİK KÜTÜPHANE			Nikon NPL 350 Total Station		Dynamo			
									GÖRSEL-AR-VR-MR								
Bagnolo, V., Argiolas, R., & Cuccu, A.	2019	DIGITAL SURVEY AND ALGORITHMIC MODELING IN HBIM. TOWARDS A LIBRARY OF COMPLEX CONSTRUCTION ELEMENTS.	İTALYA	YAPI TİPİ	FOTOGRAMETRİ	-	-	-	PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 3, 4, 5, 6, 16, 17, 25, 27	1, 2, 3, 6, 7, 14, 15, 23, 24, 26	Dijital Kamera	-	Autodesk Revit	-	-	Fotogrametri verilerinden elde edilen nokta bulutu temel alınarak, Revit-Dynamo ortamında algoritmik parametrik kolon kütüphanesi geliştirilmiştir. Farklı tarihsel yapılardan kolon tipolojileri test edilerek entasis, bantlı, yivli ve poligonal varyasyonlar parametrik olarak modellenmiştir. Çalışma HBIM model üretim sürecini hızlandırmayı amaçlayan geometrik ve algoritmik modelleme yaklaşımı sunmaktadır.
														Dynamo			
Baik, A.	2017	From point cloud to Jeddah heritage bim Nasif historical house – case study.	CİDDE	TEK YAPI	LAZER TARAMA	VAR	-	-	MODEL	1,2,3,4,6,7,12,16,17,18,19,25,26	1,2,5,8,9,14,15,23,24	Leica ScanStation C10	Leica Cyclone	Autodesk Revit	-	-	Lazer tarama ve fotogrametri verileriyle elde edilen nokta bulutu üzerinden geliştirilen HBIM model, parametrik nesne kütüphanesi (HAOL) yaklaşımı ile desteklenerek karmaşık mimari elemanların yüksek doğrulukta ve tekrar kullanılabilir biçimde modellenmesini sağlamaktadır. Bu süreçte model, yalnızca geometrik bir temsil değil; yapıya ait malzeme, yapım tekniği ve koruma bilgilerini içeren veri zengin bir sistem olarak kurgulanmış, böylece dokümantasyon, analiz ve restorasyon süreçleri için bütüncül bir dijital altyapı sunulmuştur
					FOTOGRAMETRİ				PARAMETRİK KÜTÜPHANE								
Baik, A.	2019	FROM POINT CLOUD TO EXISTING BIM FOR MODELLING AND SIMULATION PURPOSES	CİDDE	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	-	-	-	MODEL	1, 4, 6, 7, 12, 13, 16, 17, 19, 25	1, 2, 7, 14, 19, 20, 23	Nikon D5100 Kamera	Leica Cyclone	Autodesk Revit	Belirtilmemiş	-	TLS ve fotogrametri verilerinden elde edilen nokta bulutu Cyclone yazılımında işlenmiş, Autodesk Revit ortamına aktarılmış ve parametrik mimari eleman kütüphanesi oluşturularak eBIM modeli üretilmiştir. Model yapısal ve enerji simülasyonları için kullanılabilecek şekilde geliştirilmiş ancak detaylı analizler gerçekleştirilmemiştir.
					LAZER TARAMA				PARAMETRİK KÜTÜPHANE			Terrestrial Laser Scanner		eBIM plugin			
												Total Station					
Baik, A., Alitany, A., Boehm, J., Robson, S.	2014	JEDDAH HISTORICAL BUILDING INFORMATION MODELING "JHBIM"- OBJECT LIBRARY	CİDDE	YAPI TİPİ	FOTOGRAMETRİ	VAR	-	-	PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1,3,4,5,6,16,17,19,25,27	1,2,6,8,9,10,14,22,23	Leica ScanStation C10	PhotoModeler Scanner	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma, Old Jeddah'daki Hijazi mimari elemanları için lazer tarama ve görüntü tabanlı verilerden parametrik HBIM nesne kütüphanesi geliştirmektedir. Roshan elemanları parçalarına ayrılarak Revit family tabanlı parametrik objeler oluşturulmuş ve farklı LOD seviyelerinde tekrar kullanılabilir bir JHBIM library önerilmiştir. Modelleme süresini azaltmaya odaklanan metodoloji, TLS + fotogrametri + Rhino + Revit entegrasyonuna dayanmaktadır.
					LAZER TARAMA							Dijital Kamera	Autodesk ReCap	Rhinoceros			
					SFM												
Baneh, K.W., Baneh, B.W., Osman, A., Mostafapour, O., Bradosty, Z.R.	2023	Regeneration and documentation of historic geometric Islamic patterns via HBIM: a case study of Choli minaret, Kurdistan Region	IRAK	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	VAR	-	MALZEME ANALİZİ	MODEL	1, 4, 6, 7, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 25, 26	1, 2, 8, 9, 10, 20, 23	Quadcopter	Agisoft Metashape	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma fotogrametri tabanlı nokta bulutundan HBIM model üreterek Choli minaresinin geometrik İslam motiflerini yeniden oluşturmayı amaçlar. Model Revit ortamında semantik veriler ve malzeme bilgileriyle zenginleştirilmiş, veritabanı entegrasyonu ve IFC paylaşımı ile koruma ve restorasyon süreçlerine destek verecek şekilde geliştirilmiştir.
								BOZULMA ANALİZİ				Canon 4000D Kamera	Pix4D				
													Autodesk ReCap				

Tablo B.3 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (21-29)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Banfi, F.	2016	Building information modelling – a novel parametric modeling approach based on 3d surveys of historic architecture.	İTALYA	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ	BOZULMA ANALİZİ	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1,2,4,6,7,9,12,13,16,17,18,19,20,25,27	1,2,4,6,7,8,10,14,15,20,23,25,26,27	Faro Focus 3D Laser Scanner 182 scan Leica TS30 Sony NEX-5N RGB Kamera Falcon 8 UAV	Agisoft PhotoScan Pointools Autodesk ReCap	Rhinoceros Autodesk AutoCAD Autodesk Revit 3ds Max	-	Abvent Artlantis iVisit 3D Autodesk A360	3 farklı tarihi yapı üzerinde lazer tarama ve fotogrametri verilerinden NURBS tabanlı parametrik HBIM modeli üretilmiştir. Çalışma LoD ve ReverseLoD yaklaşımı ile çok seviyeli model üretimini ve restorasyon sürecine destek sağlayan yüksek doğruluklu HBIM oluşturmayı hedeflemektedir.
Banfi, F.	2017	Bim orientation: Grades of generation and information for different type of analysis and management process.	İTALYA	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 27	1, 2, 3, 4, 7, 8, 14, 15, 22, 23, 25, 26, 27	Terrestrial Laser Scanner UAV Kamera	Autodesk ReCap	Rhinoceros Autodesk Revit Archicad Bentley Microstation			GoG-GoI-GoA kavramlarını tanımlayan çalışma; lazer tarama ve fotogrametri verilerinden NURBS tabanlı HBIM modelleri üretilmiş, modeller yapısal analiz, bozulma analizi, SHM ve VR/AR uygulamaları için farklı bilgi seviyelerinde yönlendirilmiştir.
Banfi, F.	2019	THE INTEGRATION OF A SCAN-TO-HBIM PROCESS IN BIM APPLICATION: THE DEVELOPMENT OF AN ADD-IN TO GUIDE USERS IN AUTODESK REVIT	İTALYA	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ DOKÜMANLAR	VAR	-	-	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 28	1, 2, 3, 4, 8, 9, 15, 20, 23, 24, 25, 27	Laser Scanner Kamera	Agisoft Photoscan Autodesk Recap	Autodesk Revit Rhinoceros Autocad	-	BIM Cloud Oculus Rift	Bu çalışma, nokta bulutu verilerinden HBIM üretimini hızlandırmak amacıyla Autodesk Revit için geliştirilen bir Scan-to-HBIM eklentisini sunmaktadır. Yöntem Basilica di Collemaggio ve Milan Arch of Peace anıtlarında test edilmiştir. Lazer tarama ve fotogrametri verileri kullanılarak GOG tabanlı modelleme uygulanmış, NURBS yüzeyleri üzerinden yüksek doğrulukta HBIM modelleri üretilmiştir. Geliştirilen sistem model doğruluk analizi (GOA), veri eşleme, otomatik veritabanı oluşturma ve BIM-VR entegrasyonu sağlamaktadır.
Banfi, F., Stanga, C., Landi, A.G.	2023	VIRTUAL ACCESS TO HERITAGE THROUGH SCIENTIFIC DRAWING, SEMANTIC MODELS AND VR-EXPERIENCE OF THE STRONGHOLD OF ARQUATA DEL TRONTO AFTER THE EARTHQUAKE	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ STRÜKTÜR TİPOLOJİSİ	STRÜKTÜR ANALİZİ MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ ÇEVRESEL ANALİZLER	moDEL GÖRSEL-AR-VR-MR	4, 7, 14, 15, 17, 19, 20	1, 7, 8, 11, 27, 28	Total Station Terrestrial Laser Scanner Drone VR Donanımları	Pix4D QGIS Cloud Compare	Rhinoceros Autodesk Revit		Twinmotion	Scan-to-BIM süreciyle elde edilen HBIM model, yalnızca geometrik bir temsil olarak değil; tarihsel, yapısal ve malzeme verileriyle zenginleştirilmiş semantik bir bilgi sistemi olarak kurgulanmış, bu veri yapısı Web-VR platformu ile entegre edilerek fiziksel olarak erişilemeyen yapının çok cihazlı, etkileşimli ve hikâye anlatımı temelli bir deneyim ortamında kullanıcıya sunulması sağlanmıştır
Bertacchi, G., Juan-Vidal, F., Cipriani, L.	2023	FROM THE REPRESENTATION TO THE DIGITAL HBIM MODEL OF A HISTORIC BUILDING	İSPANYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	-	-	MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ ÇEVRESEL ANALİZLER STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL DİJİTAL ARŞİV	4, 8, 14, 25, 26	1, 2, 7, 8, 10, 20, 23	Terrestrial Laser Scanner Diital Kamera	Cloud Compare Agisoft Metashape	Autodesk Revit Dynamo			Lazer tarama ve fotogrametri verilerinden üretilen yüksek detaylı modellerin HBIM'e aktarımıyla, yapı elemanlarının tekil olarak tanımlandığı ve her birine malzeme, durum ve müdahale bilgisi atanabilen, restorasyon odaklı dinamik bir bilgi sistemi oluşturulmuştur.
Biagini, C., Ottobri, P. Banti, N., Bongini, A.	2020	Validation processes of H-BIM models: a case study	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ MANUEL ÖLÇÜM	VAR	-	MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 4, 6, 10, 11, 16, 19, 25, 28	1, 2, 3, 10, 14, 15, 20, 25	Lazer Metre Dijital Kamera	Agisoft Photoscan Autodesk ReCap	Autodesk Revit	Cloud Compare	-	Bu çalışma, fotogrametri tabanlı nokta bulutundan üretilen HBIM modelinin doğruluğunu değerlendirmek için model-nokta bulutu karşılaştırmasına dayalı bir validasyon metodolojisi önermektedir. Revit ortamında oluşturulan HBIM modeli CloudCompare yazılımı ile analiz edilerek yaklaşık 3-4 cm geometrik sapma tespit edilmiş ve model doğruluğu doğrulanmıştır.
Bianconi, F., Filippucci, M., Amoruso, G., and Bertinelli, M	2019	FROM THE INTEGRATED SURVEY OF HISTORIC SETTLEMENTS TO THE PATTERN BOOK WITHIN THE BIM	İTALYA	YAPI GRUBU	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA MANUEL ÖLÇÜM	VAR	-	DOĞRULUK ANALİZİ	MODEL	1, 4, 6, 7, 12, 15, 16, 17, 20, 26, 27	1, 2, 5, 9, 10, 12, 14, 15, 23, 24, 25, 26	EVO 4HSE drone LUMIX DMC-GH4 dijital kamera Faro İmager 5010 lazer tarayıcı	ContextCapture Faro Scene 3DReshaper Autodesk ReCap	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma klasik bina ölçeğinde değil, tarihi yerleşim ölçeğinde HBIM üretip bunu pattern book / tipolojik katalog ile birleştiriyor. Amaç yalnızca model üretmek değil, yerleşim karakterini tanımlayan semantik parametreleri HBIM üzerinden çıkarmak. Bu yönüyle analiz-odaklı değil, bilgi organizasyonu ve karar destek odaklı bir HBIM yaklaşımı.
Brumana, R., Stanga, C., Banfi, F.	2022	Models and scales for quality control: toward the definition of specifications (GOA-LOG) for the generation and re-use of HBIM object libraries in a Common Data Environment	İTALYA	YAPI ELEMANI	LAZER TARAMA	VAR	-	DOĞRULUK ANALİZİ	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	4, 6, 7, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 27	1, 2, 6, 7, 10, 13, 15, 23, 24, 26	Laser Scanner	-	-	-	-	Bu çalışma HBIM modelleri için GOA (Grade of Accuracy) ve LOG (Level of Geometry) kavramlarını model ölçeği ile ilişkilendirerek kalite kontrol metodolojisi önerir. Nokta bulutu verilerinden duvar ve tonoz objeleri farklı detay seviyelerinde modellenmiş, tolerans ve sapma analizleri ile doğruluk değerlendirilmiştir. Amaç, CDE ortamında yeniden kullanılabilir güvenilir HBIM object library üretmektir.
Brusaporci, S., Maiezza, P., Marra, A., Tata, A., Vespasiano, L.	2023	Scan-to-HBIM Reliability	İTALYA	YAPI ELEMANI	FOTOGRAMETRİ	-	-	DOĞRULUK ANALİZİ	MODEL	1, 4, 17	1, 2, 3, 14, 15, 20	DJI Mini 2 UAV	Agisoft Metashape	-	CloudCompare deviation	-	Bu çalışma, drone fotogrametri ile elde edilen nokta bulutundan üç farklı geometrik gelişmişlik seviyesinde HBIM modeli üreterek, cloud-to-mesh sapma analizi üzerinden model güvenilirliğini değerlendirmektedir. Sonuçlar, düşük LoG modelin bile kabul edilebilir doğruluk sağlayabildiğini, model detay seviyesinin proje amacına göre belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo B.4 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (30-39)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Casimiro-Bernardez, J.M., Martinez - Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramirez, F.	2024	FEM STRUCTURAL ANALYSIS FROM UAV PHOTOGRAMMETRY PROJECTS. CASE STUDY: TWENTY EYES AQUEDUCT IN THE WADI OF CARCAUZ	İSPANYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZ	MODEL HASAR TESPİT	1, 4, 6, 8, 10, 14, 15, 17, 18, 20, 28	1, 2, 4, 9, 10, 12, 15, 16, 20, 23, 25, 26, 27	UAV Drone Zenith	CloudCompare	Agisoft Metashape Autodesk Revit	SAP2000 STAAD.Pro SOFiSTiK Robot	-	UAV fotogrametri verilerinden elde edilen nokta bulutu ile HBIM oluşturulmuş, model SAP2000 ortamına aktarılıp FEM yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Cloud-to-BIM-to-FEM yaklaşımıyla tarihi kemer aküedüğün deprem ve rüzgar davranışı değerlendirilmiş ve potansiyel gerilme bölgeleri belirlenmiştir.
Chaves, E., Aguilar, J., Barontini, A., Mendes, N., Compan, V.	2024	Digital Tools for the Preventive Conservation of Built Heritage: The Church of Santa Ana in Seville	İSPANYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ ÇEVRESEL ANALİZLER	MODEL DİJİTAL ARŞİV HASAR TESPİT	5, 7, 9, 21, 28	2, 8, 9, 10, 18	Sony ILCE-6000 Triaxial Accelerometer (KINEMETRICS) Impact Hammer (H-02)	Agisoft Metashape Autodesk ReCap	Autodesk Revit	DIANA FEA	Panorama Studio Pano2VR	Lazer tarama ve fotogrametri gibi sayısal belgeleme yöntemleriyle elde edilen nokta bulutu verileri işlenerek, yapının geometrik ve yapısal özelliklerini içeren bir HBIM modeli oluşturulmuştur. Bu model, yalnızca üç boyutlu bir temsil sunmakla kalmayıp, malzeme, bozulma ve yapısal davranış gibi bilgilerin entegre edilmesiyle koruma, analiz ve karar verme süreçlerine dijital bir altyapı sağlamaktadır.
Ciuffreda, A.L., Trovatelli, F., Meli, F., Caselli, G., Stramaccioni, C., Coli, M., Tanganelli, M.	2024	Historic Building Information Modeling for Conservation and Maintenance: San Niccolo's Tower Gate, Florence	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ STRÜKTÜR TİPOLOJİSİ	STRÜKTÜR ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ MALZEME ANALİZİ	MODEL	1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 25, 27, 28	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 19, 23, 25, 26, 27	FARO Focus S70 Z+F IMAGER 5016 Drone Schmidt Hammer Novasonic U5200 Penetrometre GPR Cihazları	Autodesk ReCap	Autodesk Revit	LV1 / LV2 Kinematik analiz		Bu çalışma, tarihi bir yığma kule üzerinde lazer tarama, tanısal testler ve jeolojik verilerin entegre edilmesiyle oluşturulan HBIM tabanlı bir bilgi yönetim sistemi sunmaktadır. Model yalnızca geometrik bir temsil değil, aynı zamanda malzeme, bozulma ve yapısal analiz verilerini içeren bir veri tabanı olarak kurgulanmıştır. Bu yapı üzerinden gerçekleştirilen LV1 ve LV2 düzeyindeki sismik analizler, HBIM'in karar destek aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.
Croce, P., Landi, F., Puccini, B., Martino, M., Maneo, A.	2022	Parametric HBIM Procedure for the Structural Evaluation of Heritage Masonry Buildings	İTALYA	TEK YAPI	DOKÜMANLAR	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 20, 28	1, 2, 3, 7, 8, 10, 14, 15, 23, 25	-	-	BIM yazılımı Rhino Archicad Grasshopper	E-PUSH	-	Bu çalışma, mevcut yığma yapıların sismik değerlendirilmesi için parametrik HBIM tabanlı bir iş akışı önermektedir. HBIM modeli içerisinde tanımlanan geometrik ve mekanik parametreler doğrudan E-PUSH yapısal analiz yazılımına aktarılmış ve pushover analizleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, yapısal değerlendirme sürecini HBIM ortamına entegre ederek veri yönetimini ve analiz süreçlerini tek bir platformda birleştirmeyi amaçlamaktadır.
Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Jacquot, K., Piemonte, A., Veron, P.	2021	From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	-	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 3, 4, 5, 6, 15, 17	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 15, 25	Leica ScanStation C10 DJI FC6310 kamera	-	BIM yazılımı	Random Forest	-	Makale, TLS ve UAV fotogrametri ile elde edilen nokta bulutunun makine öğrenmesi (Random Forest) ile semantik sınıflandırılmasını ve bu verinin yarı otomatik HBIM modeline dönüştürülmesini önerir. Geometrik modelleme yerine semantic point-cloud → HBIM otomasyonuna odaklanır.
Croce, V., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., Veron, P.	2023	H-BIM and Artificial Intelligence: Classification of Architectural Heritage for Semi-Automatic Scan-to-BIM Reconstruction	İTALYA	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	-	-	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 16, 17, 19	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 13, 15, 23, 25	Terrestrial Laser Scanner Dijital Kamera	-	BIM yazılımı Dynamo Grasshopper	Random Forest	-	AI tabanlı semantic segmentation ile nokta bulutundan mimari eleman sınıflandırması yapılmış, template geometri üretimi ve tipolojik yayılım ile yarı otomatik HBIM modeli oluşturulmuştur. Yapısal veya malzeme analizi içermeyen, otomasyon odaklı bir Scan-to-BIM yaklaşımıdır.
Curra, E., D'Amico, A., Angelosanti, M.	2022	HBIM between Antiquity and Industrial Archaeology: Former Segrè Papermill and Sanctuary of Hercules in Tivoli Edoardo Currà	İTALYA	TEK YAPI	DOKÜMANLAR FOTOGRAMETRİ	VAR	-	-	MODEL	1, 7, 8, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 26	1, 2, 10, 11, 12, 14, 15, 23, 26	UAV Kamera Drone	-	BIM yazılımı ArchaeoBIM	-	-	Antik kutsal alan üzerine kurulmuş Segrè kağıt fabrikasının diachronic HBIM modeli oluşturulmuştur. UAV fotogrametri ve arşiv belgeleri kullanılarak yapının tarihsel evrim aşamaları 4D olarak modellenmiş, endüstriyel makineler HBIM bileşenleri olarak tanımlanmıştır.
Cügen, H.F, Selçuk, S.A., Arayici, Y.	2024	A hybrid modelling approach for information processing workflow in inter-cultural heritage projects	SIRBİSTAN	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	-	-	STRÜKTÜR ANALİZİ MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ ÇEVRESEL ANALİZLER	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR DİJİTAL ARŞİV	1, 5, 8, 9, 14, 19, 24	1, 2, 7, 9, 10, 14, 18, 20	Laser Scanner	Cloud Compare	Autodesk Revit Autocad Dynamo Adobe Photoshop	SAP2000		Hibrit Modelleme: BIM araçları, geleneksel yöntemlerle birlikte kullanıldığında verimlilik ve bilgi paylaşımında önemli avantajlar sağlamıştır. Yeni eklemeler için BIM modelleri hızlı bir şekilde üretilebilmiş ve alternatif restorasyon senaryoları kolayca oluşturulmuştur.
De Falco, A., Gaglio, F., Giuliani, F., Martino, M., Messina, V.	2024	An HBIM Approach for Structural Diagnosis and Intervention Design in Heritage Constructions: The Case of the Certosa di Pisa	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	YAPI TİPOLOJİSİ STRÜKTÜR TİPOLOJİSİ	MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 10, 11, 13, 28	2, 9, 16, 24	Laser Scanner		Autodesk Revit Rhinoceros Grasshopper	FEM structural software BIM structural software		HBIM modeli kullanılarak Certosa di Pisa kompleksinde malzeme sınıflandırması, çatlak haritalama ve yapısal teşhis gerçekleştirilmiştir. Model üzerinden farklı inşa dönemleri, bozulmalar ve stabilite sorunları değerlendirilmiş, yerçekimi ve deprem etkileri için ön güvenlik analizi yapılmıştır. Sensör tabanlı izleme bulunmamaktadır.
Delpozzo, D., Appolonia, L., Scala, B., Adami, A.	2022	FEDERATED HBIM MODELS FOR CULTURAL HERITAGE: SURVEY MODEL AND CONCEPTUAL MODEL	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	-	BOZULMA ANALİZİ GÜNEŞ-GÖLGE ANALİZİ	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE HASAR TESPİT	1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 20, 23, 24, 26	Leica RTC360 Canon EOS 5D DJI Mavic 2 Pro	-	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma, Aosta'daki Augustus Kemeri için lazer tarama ve fotogrametri verilerinden elde edilen nokta bulutu ile parametrik taş bloklardan oluşan kavramsal HBIM modelinin federated yaklaşımda birlikte kullanılmasını önermektedir. Survey modeli gerçek geometrik doğruluğu sağlarken, kavramsal model bilgi yönetimi için sadeleştirilmiş parametrik elemanlar içerir. İki modelin karşılaştırılmasıyla bozulma alanları belirlenmiş, konservasyon bilgileri model elemanlarına bağlanmış ve HBIM tabanlı metraj, gölge analizi ve risk değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo B.5 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (40-50)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
D'Orazio, M., Canafoglia, M., Bernardini, G., Quagliarini, E.	2024	Towards Using Digital Technologies to Balance Conservation and Fire Mitigation in Building Heritage Hosting Vulnerable Occupants: Rapid Evacuation Simulator Verification for the "Omero Museum" (Ancona, Italy)	İTALYA	TEK YAPI	DOKÜMANLAR	-	-	-	MODEL	1, 12, 13, 18, 21, 28	8, 10, 18, 23	-	-	Autodesk Revit Autocad	Evacuation Simulator	-	Tarihi müze yapısında yangın tahliye performansını değerlendirmek amacıyla BIM tabanlı dijital model ve kullanıcı davranış simülasyonu oluşturulmuş, sonuçlar gerçek tahliye tatbikatı ile doğrulanmıştır. Sensör veya 3B tarama kullanılmamış, çalışma performans tabanlı risk analizi üzerine odaklanmıştır.
Dzwierzynska, J., Prokop, A.	2022	Reconstruction of Historic Monuments—A Dual Approach	POLONYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	-	MODEL HASAR TESPİT KARŞILAŞTIRMA	1, 2, 4, 6, 9, 12, 16, 17, 18, 19, 28	1, 2, 5, 9, 10, 11, 12, 15, 17, 23	Faro Focus 3D	Faro Scene	Autodesk Revit Autocad	Mathcad	-	Bu çalışma, tarihi bir yapının hem arşiv fotoğrafından geometrik restitüsyonla hem de lazer tarama verisinden HBIM modeli oluşturularak yeniden modellenmesini karşılaştırmaktadır. Elde edilen modellerin ölçüsel karşılaştırması, tek fotoğrafa dayalı rekonstrüksiyonun kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermektedir. Çalışma özellikle yok olmuş ya da değişmiş kültür mirası yapıların tarihsel dönem modellemesi için hibrit rekonstrüksiyon yaklaşımını önermektedir.
El Barhoumi, N., Radoine, H., Hajj, R., Harmouche, H.	2024	Adaptive cultural mediation through HBIM and VR: enhancing personalized experiences via thematic data structuring	FAS	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA DOKÜMANLAR	VAR	-	-	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 6, 7, 8, 16, 21, 24, 25, 26	3, 4, 10, 23, 25	Terrestrial Laser Scanner Dijital Kamera	Cyclone	Autodesk Revit SIMLAB Composer	Mongo DB Python Flash API JSON / BSON Veri Yapısı	Unity	HBIM modeli lazer tarama verisinden oluşturulmuş, semantik ve tarihsel bilgilerle zenginleştirilmiş ve MongoDB veri tabanında tematik olarak yapılandırılmıştır. Model Unity ortamına aktarılmış ve VR arayüzü ile kullanıcıya filtrelenebilir, kişiselleştirilebilir kültürel miras deneyimi sunulmuştur. Yapısal veya malzeme analizi bulunmamaktadır; çalışma kültürel aracılık ve veri organizasyonuna odaklanmaktadır.
Escudero, P.A., Lopez Gonzales, M.C, Garcia Valldecabres, J.L.	2024	Optimising Floor Plan Extraction: Applying DBSCAN and K-Means in Point Cloud Analysis of Valencia Cathedral	İSPANYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA	-	-	-	2D FLOOR PLAN HBIM ÖNCESİ PLAN ÜRETİMİ	3, 4, 5	1, 3	Terrestrial Laser Scanner	-	-	-	-	TLS nokta bulutu verisinden DBSCAN ve K-means algoritmaları kullanılarak Valencia Katedrali'nin kat planı otomatik çıkarılmıştır. Python tabanlı kümeleme ve convex hull yöntemi ile 2D plan üretimi gerçekleştirilmiş, DBSCAN algoritmasının daha yüksek doğruluk verdiği gösterilmiştir. Yöntem HBIM model üretimi öncesi otomatik plan üretimini hızlandırmayı amaçlamaktadır.
Escudero, P.A., Lopez Gonzales, M.C, Garcia Valldecabres, J.L.	2024	Methodology for Data Integration in 3D-HBIM Digital Models. Case Study: the Holy Chalice Chapel of Valencia Cathedral	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	-	MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT DİJİTAL ARŞİV	1, 4, 6, 7, 10, 11, 16, 17, 18, 20, 28	3, 5, 9, 10, 15, 22, 23, 25, 26	Faro Focus Premium S150 Faro Focus Premium S350 Terrestrial Laser Scanner RGB Kamera	Faro Scene 2023.1 CloudCompare RANSAC K-means clustering	Autodesk Revit Dynamo			TLS nokta bulutu verisi RANSAC ve RGB tabanlı makine öğrenmesi algoritmalarıyla segment edilerek HBIM modeline entegre edilmiştir. Geometrik yüzey sınıflandırması ve renk temelli analizlerle malzeme ve bozulma bölgeleri belirlenmiş, veri IFC ve GIS ortamlarına aktarılabilir dijital ikiz modeli oluşturulmuştur.
Ferretti, U., Quattrini, R., D'Alessio, M.	2022	A Comprehensive HBIM to XR Framework for Museum Management and User Experience in Ducal Palace at Urbino	İTALYA	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA	VAR	-	-	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR DİJİTAL ARŞİV	1, 5, 6, 7, 16, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26	1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 23, 25, 26, 27	Terrestrial Laser Scanner	Leica Cyclone	Autodesk Revit	-	Unity 3D Microsoft HoloLens2 Oculus Quest 2	Scan-to-HBIM workflow ile Ducal Palace için semantik HBIM modeli oluşturulmuş, sanat eserleri veri ontolojisi ile modele entegre edilmiş ve model VR/MR ortamlarına aktarılmıştır. Çalışma yapısal analiz yerine müze yönetimi ve kullanıcı deneyimi odaklı HBIM→XR yaklaşımı sunmaktadır.
Garcia-Gago, J., Sanchez-Aparicio, J., Soilan, M., Gonzalez-Aguilera, D.	2022	HBIM for supporting the diagnosis of historical buildings: case study of the Master Gate of San Francisco in Portugal	PORTEKİZ	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1,4,6,7,10,11,12,16,20,25,28	1,2,9,10,12,15,23,25,26	Terrestrial Laser Scanner Panoramik Kamera	Scanner Native SFM	Autodesk Revit	Radiometric Analysis Script BIM script		HBIM modeli; TLS, fotogrametri, 360° görüntü ve SEM-XRD malzeme testlerinden elde edilen çok kaynaklı veriyi birleştirerek hasar ve malzeme analizine yönelik tanı odaklı bir dijital model üretmiştir. Düşük geometri düzeyi ancak yüksek bilgi içeren HBIM aileleri geliştirilmiştir.
Garcia-Leon, J., Murrieri, P., Picazo, M.T.	2024	Data sharing and interoperability in HBIM applied to the Rame Tower	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	-	-	BOZULMA ANALİZİ	MODEL DİJİTAL ARŞİV	6, 7, 15, 16, 18, 19, 21, 25, 28	4, 7, 10, 11, 14, 26, 27	Laser Scanner	-	Edificius	usBIM.bSDDeditor	-	Çalışmada Rame Tower için 3B ölçüm verilerinden nokta bulutu üretilmiş ve buradan parametrik bir HBIM modeli oluşturulmuştur. Modelde bozulmalar semantik olarak tanımlanmış, IFC ve bSDD standartları kullanılarak veri paylaşımına açık, birlikte çalışabilir bir dijital model geliştirilmiştir. Yaklaşım veri standardizasyonu ve interoperabiliteye odaklanmakta olup sensör tabanlı izleme veya yapısal analiz içermemektedir.
Galera-Rodríguez, A., Angulo-Fornos, R., Algarín-Comino, M.	2022	SURVEY AND 3D MODELLING OF UNDERGROUND HERITAGE SPACES WITH COMPLEX GEOMETRY: SURFACE OPTIMISATION FOR ASSOCIATION WITH HBIM METHODOLOGY	İSPANYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	-	-	-	MODEL	1, 4, 5, 6, 15, 16, 18, 19, 25, 26	1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 14, 20, 23, 24, 26, 27, 28	Samsung NX3000 kamera Samyang 14mm f/2.8 lens	Agisoft Metashape CloudCompare Geomagic Design X	Rhinoceros MeshLab Autodesk Revit AutoCAD			Fotogrametri tabanlı nokta bulutu verileri kullanılarak, karmaşık ve düzensiz geometrilere sahip yeraltı miras yapıları için 3B model üretimi gerçekleştirilmiş; bu modeller, yüzey optimizasyonu ve tersine mühendislik süreçleriyle sadeleştirilerek HBIM ortamına entegre edilebilir hale getirilmiştir. Böylece, yalnızca geometrik temsil değil, analiz ve veri yönetimine altyapı oluşturan bir dijital modelleme yaklaşımı ortaya konmuştur
Gorkovchuk, J., Gorkovchuk, D.	2022	FEATURES OF HERITAGE BIM MODELING BASED ON LASER SCANNING DATA	UKRAYNA	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ TOTAL STATION	VAR	-	BOZULMA ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT DİJİTAL ARŞİV	1, 4, 7, 11, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 25, 28	1, 2, 3, 9, 13, 15, 20, 24	Leica P40 terrestrial laser scanner DJI Phantom 3 Pro Faro Focus S350 Total station	-	Autodesk Revit Archicad	-	-	Bu çalışma klasik scan-to-HBIM yaklaşımını lazer tarama + fotogrametri veri füzyonu ile uygulayarak, karma LOD (250-500) seviyesinde restorasyon ve izleme odaklı HBIM modeli üretmiştir. Model özellikle deformasyonların temsil edilmesi ve as-built geometriye ulaşılması açısından operasyon ve bakım sürecine karar destek aracı olarak kullanılmıştır.
Güneş, M.C., Mertan, A., Şahin, Y.H., Ünal, G., Özkar, M.	2024	Semi-automated minimization of brick-mortar segmentation errors in 3D historical wall reconstruction	TÜRKİYE	YAPI GRUBU	FOTOGRAMETRİ	VAR	-	BOZULMA ANALİZİ MALZEME ANALİZİ	MODEL	1, 4, 10, 11, 17, 18	1, 3, 9, 10, 16, 20, 22, 23	Dijital Kamera	Agisoft Metashape	Deep learning Python			Yarı otomatik derin öğrenme tabanlı bir yöntemle fotogrametrik nokta bulutu verisi üzerinde tuğla-harç ayrımı iyileştirilmiş ve tuğla seviyesinde 3B rekonstrüksiyon elde edilmiştir. Yöntem HBIM modelleme öncesi geometri ayrıştırma doğruluğunu artırmayı hedefler.

Tablo B.6 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (51-61)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Harmouche, H., Hajji, R., El Barhoumi, N., Sardi, N., and Bouramdane, A	2024	INTEGRATION OF HBIM, XR AND BEACONS FOR CULTURAL MEDIATION OF HISTORICAL HERITAGE: THE CASE OF "AL-QUARAOUIYINE MOSQUE" IN FES	FAS	TEK YAPI	LAZER TARAMA	VAR	-	-	MODEL	1, 6, 7, 16, 18, 21, 24, 25, 26	3, 4, 7, 10, 13, 23, 27	Terrestrial Laser Scanner Dijital Kamera	Cyclone	Autodesk Revit SIMLAB Composer Dynamo Python	MongoDB JSON	Unity Oculus Quest 2 Beacon	Bu çalışma, Al-Quaraouiyine Camii için lazer tarama tabanlı HBIM modeli üretmiş ve bu modeli XR ortamına aktararak MongoDB veri tabanı ve beacon sensörleri ile konum tabanlı kültürel bilgi sunumu geliştirmiştir. Dynamo ve Python ile HBIM'den semantik veriler JSON formatında çıkarılmış, Unity ortamında kullanıcı etkileşimli VR deneyimi oluşturulmuştur. Çalışma yapısal analiz değil, kültürel mirasın dijital yorumlanmasına odaklanmaktadır.
Haznedar, B., Bayraktar, R., Öztürk, A.E., Arayıcı, Y.	2023	Implementing PointNet for point cloud segmentation in the heritage context	TÜRKİYE	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA	-	-	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 4, 5, 6, 7, 17	1, 2, 9, 10, 11, 16, 23	Laser Scanner LIDAR	-	Autodesk Revit Cloud Compare	PointNet Pyhthon		PointNet tabanlı derin öğrenme yaklaşımı kullanılarak Gaziantep'teki 28 tarihi yapının lazer tarama nokta bulutları otomatik olarak segment edilmiştir. Çalışmada lazer verisinin deformasyonlar nedeniyle düşük doğruluk verdiği, restitüsyon tabanlı sentetik HBIM verisi ile eğitildiğinde doğruluğun önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir. Yöntem HBIM modellemede otomatik eleman sınıflandırması için önerilmektedir.
Hu, W., Hu, R.	2024	Creating Historical Building Models by Deep Fusion of Multi-Source Heterogeneous Data Using Residual 3D Convolutional Neural Network	ÇİN	TEK YAPI FOTOGRAMETRİ	LAZER TARAMA	-	-	-	MODEL DERİN ÖĞRENME MODELİ	1, 4, 6, 7, 17	1, 9, 10, 25	3D Laser Scanner Total Station Dijital Kamera	-	-	-	-	Deep learning tabanlı residual 3D CNN algoritması ile lazer tarama, UAV fotogrametri ve total station verileri birleştirilerek otomatik 3B model üretilmiş, model HBIM platformunda rafine edilmiştir. Amaç veri füzyonu doğruluğunu artırmaktır; analiz yapılmamıştır.
Hu, X., Olgun, G., Assaad, R.H.	2024	An intelligent BIM-enabled digital twin framework for real-time structural health monitoring using wireless IoT sensing, digital signal processing, and structural analysis	ABD	DENEYSEL	SHM	-	YAPI TİPOLOJİSİ	-	MODEL DİJİTAL ARŞİV	1, 4, 6, 7, 9, 10, 17, 18, 20, 21, 28	3, 5, 8, 9, 10, 23, 26	IoT Sensörleri	Python 3 Raspberry Pi	Autodesk Revit Dynamo	Dijital Sinyal İzleme Sensor Data Preprocessing Real-Time SHM Structural Deformation Interpolation		IoT tabanlı strain ve mesafe sensörlerinden alınan veriler Raspberry Pi üzerinden işlenerek Revit-Dynamo ortamına aktarılmış ve BIM modeli üzerinde gerçek zamanlı yapısal deformasyonlar renk kodlu olarak görselleştirilmiştir. Çalışma, BIM tabanlı digital twin yaklaşımıyla SHM entegrasyonunu deneysel bir çerçeve prototipi üzerinde test etmektedir.
Imtiaz, S., Arif, S., Nawaz, A., Shah, S.A.R.	2024	Conservation of Socio-Religious Historic Buildings: A Case Study of Shah Yousuf Gardez Shrine	PAKİSTAN	TEK YAPI FOTOGRAMETRİ	LAZER TARAMA	VAR		BOZULMA ANALİZİ MALZEME ANALİZİ STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 4, 6, 7, 11, 12, 15, 19	1, 2, 9, 10, 16, 23	3D Laser Scanner Dijital Kamera	-	Autodesk Revit	-	-	Lazer tarama ve fotogrametri verileri kullanılarak Pakistan'daki Shah Yousuf Gardez Türbesi için scan-to-HBIM modeli oluşturulmuştur. Modelde geometrik detaylar, süslemeler ve yapısal/yapısal olmayan bozulmalar işlenmiş, hasar haritaları üretilmiş ve koruma planlaması için HBIM tabanlı bir karar destek modeli önerilmiştir.
Karasaka, L., Ulutas, N.	2023	Point Cloud-Based Historical Building Information Modeling (H-BIM) in Urban Heritage Documentation Studies	TÜRKİYE	TEK YAPI FOTOGRAMETRİ	LAZER TARAMA	-	-	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 4, 6, 12, 15, 16, 17, 19	1, 2, 14, 20, 23	Terrestrial Laser Scanner	-	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma, kentsel tarihi yapıların belgelenmesi için TLS tabanlı nokta bulutu verisinin Revit ortamına aktarılmasıyla manuel HBIM modelleme önerir. Eleman bazlı parametrik model oluşturulur ve modele grafik olmayan semantik bilgiler eklenir. Çalışma analiz ya da izleme içermeyen, dokümantasyon odaklı point cloud → HBIM workflow sunar.
Khan, M.S., Khan, M., Bughio, M., Talpur, B.D., Kim, I.S., Seo, J.	2022	An Integrated HBIM Framework for the Management of Heritage Buildings	PAKİSTAN	TEK YAPI	DOKÜMANLAR	VAR	-	-	MODEL	1, 2, 5, 6, 7, 8, 12, 14, 15, 16, 19, 20	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 15, 22, 23, 27	-	-	BIM yazılımı	-	-	Bu çalışma geometrik doğruluk veya analiz odaklı bir HBIM değil, daha çok bilgi yönetimi ve restorasyon planlama frameworkü sunmaktadır. Tarihi NED kampüsü için oluşturulan HBIM modeline zaman parametreleri, maliyet, ekipman ve işçilik bilgileri bağlanarak restorasyon süreçlerinin görselleştirilmesi ve yönetimi amaçlanmıştır.
Kıvılcım, C.Ö., Duran, Z.	2021	Parametric Architectural Elements from Point Clouds for HBIS Applications	TÜRKİYE	TEK YAPI	LAZER TARAMA	-	-	-	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 4, 5, 7, 8, 14	1, 2, 3, 5, 11, 18, 25	Airbone LIDAR RIEGL VZ-400 Lazer Tarayıcı	Python Visualization Toolkit (VTK) RANSAC Algoritması	Autodesk Revit FreeCAD	Microscoft Excel		Çalışmada RANSAC (RANdom SAmple Consensus) algoritması ile yarı otomatik bir yöntem uygulanmıştır. Bu algoritma, özellikle gürültülü nokta bulutlarından geometrik şekillerin tespiti Yapı ve strüktür tipolojisi, daha çok genel bağlamda ele alınmış, detaylı bir inceleme yapılmamıştır.
Kuçak, R.A., Dervişoğlu, A.	2023	The Heritage Building Information Modelling of the Church of St. Sophia in Ohrid, North Macedonia	MAKEDONYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA	-	-	-	MODEL	4, 5, 12, 13, 18, 19, 26	1, 2, 3, 4, 6, 8, 14, 15, 16, 20, 23	FARO Focus S350 terrestrial laser scanner Phase-based LiDAR sistem	Faro Focus S350 CloudCompare Autodesk Recap	Autodesk Revit	CloudCompare	-	TLS verileri kullanılarak St. Sophia Kilisesi için HBIM modeli üretilmiştir. FARO Focus S350 ile elde edilen nokta bulutu CloudCompare ortamında RANSAC algoritması ile kısmi otomatik geometri çıkarımı için kullanılmış, nihai HBIM modeli Autodesk Revit'te oluşturulmuştur. Çalışma, Revit'in karmaşık tarihi yapı modellemede daha uygun olduğunu, RANSAC yaklaşımının ise sınırlı otomatik geometri üretimi sağlayabildiğini göstermektedir.
Laumain, X., Esteve Muñoz, V. F., López Sabater, A.	2023	STUDIES OF THE NOLLA PALACE. FROM SURVEY TO HBIM MANAGEMENT	İTALYA	TEK YAPI GELENEKSEL	LAZER TARAMA	VAR	-	MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL	1, 4, 6, 7, 12, 15, 16, 25, 28	2, 6, 8, 9, 10, 14, 15, 23, 26	Faro Focus 3D X330	Faro Scene Autodesk Recap	Autodesk Revit	-	BIMcollab Zoom	Bu çalışma Nolla Palace için çok aşamalı bir belgeleme süreci tanımlar. Geleneksel ölçüm ve lazer tarama birlikte kullanılarak nokta bulutu oluşturulmuş, Faro Scene ve Recap Pro ile işlenmiş ve Revit tabanlı HBIM modeli üretilmiştir. Model içinde mozaikler, malzemeler ve tarihsel yapım evreleri parametrik olarak ayrıştırılmış ve yönetim amaçlı bilgi modeli elde edilmiştir.
Liberotti, R., Gusella, V.	2023	Parametric Modeling and Heritage: A Design Process Sustainable for Restoration	İTALYA	TEK YAPI LAZER TARAMA	GELENEKSEL	VAR	-	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 2, 3, 4, 12, 13, 16, 17	1, 2, 4, 14, 15, 23, 24	Laser scanner	-	BIM yazılımı Rhinoceros Grassshopper	-	-	Bu çalışma, tarihi yığma tonozların parametrik algoritmalarla üretilmesini ve HBIM ortamına aktarılmasını amaçlar. Geliştirilen model, az sayıda geometrik parametre ile farklı tonoz tiplerinin otomatik üretilmesini sağlar ve FEM analizine uygun geometri oluşturur. Yöntem Murena Palace (18.yy, Perugia) üzerinde test edilmiştir ve restorasyon tasarımı için parametrik HBIM bileşenleri üretmektedir.

Tablo B.7 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (62-71)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Lin, G., Giordano, A., Stendardo, L.X., Yang, X.	2022	Using UAV for the digital, documentation, monitoring of culture architectural heritage: a case study of Sisheng ancestral hall, Shenzhen, China	ÇİN	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	VAR	-	BOZULMA ANALİZİ STRÜKTÜR ANALİZİ DOĞRULUK ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 16, 17, 19, 20, 26	1, 2, 5, 9, 10, 15, 16, 20, 26, 28	UAV Drone RTK GNSS Dijital Kamera	Pix4D Agisoft Metashape	BIM yazılımı	-	-	Bu çalışma UAV fotogrametri → point cloud → HBIM zinciri üzerinden kültürel mirasın dijital belgelenmesi ve izlenmesini hedefleyen bir vaka çalışmasıdır. Üretilen HBIM modeli yalnızca geometrik temsil değil, hasar, deformasyon ve oturma analizlerinin yapılabildiği bir karar destek altyapısı olarak kullanılmıştır. UAV verilerinden elde edilen nokta bulutu ile HBIM modeli karşılaştırılarak sapma haritaları oluşturulmuş ve yapıdaki deformasyon bölgeleri belirlenmiştir.
Lin, G., Li, G., Giordano, A., Sang, K., Stendardo, L., Yang, X.	2024	Three-Dimensional Documentation and Reconversion of Architectural Heritage by UAV and HBIM: A Study of Santo Stefano Church in Italy.	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 4, 6, 7, 13, 15, 17, 18, 22, 26	9, 11, 20, 23	UAV Drone Dijital Kamera	-	Autodesk Revit	-	-	Drone fotogrametri ile elde edilen nokta bulutundan HBIM modeli üretilmiş, eksik yapı bölümleri tarihsel verilere dayanarak idealize şekilde rekonstrükte edilmiş ve sonuç VR ortamında sunulmuştur. Çalışma belgeleme ve görselleştirme odaklıdır; detaylı yapısal analiz sınırlıdır.
Liu, J., Foreman, G., Sattineni, A., Li,B.	2023	Integrating Stakeholders' Priorities into Level of Development Supplemental Guidelines for HBIM Implementation	ABD	TEK YAPI	DOKÜMANLAR	VAR	-	BOZULMA ANALİZİ	MODEL LOD REHBERİ	1, 6, 7, 8, 12, 15, 16, 19, 20, 28	7, 8, 10, 11, 12, 23, 26, 27	-	-	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma, HBIM uygulamalarında model detay seviyesinin paydaş önceliklerine göre belirlenmesini amaçlayan bir LOD rehberi önermektedir. Literatür taraması ve tarihi adliye yöneticileriyle yapılan görüşmeler sonucunda geliştirilen yaklaşım, reality capture ve HBIM modelleme ile bir vaka çalışması üzerinde doğrulanmıştır. Çalışma, HBIM modelleme süreçlerinin kullanıcı ihtiyaçlarına göre optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.
Maravelakis, E., Giannioti, G., Psalti, A., Tsakoumaki, M., Pocobelli, D.P., Xinogalos, M., Galanakis, D., Bilalis, N., Stavroulakis, G.	2023	3D Modeling & Analysis Techniques for the Apollo Temple in Delphi	YUNANİSTAN	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	STRÜKTÜR TİPOLOJİSİ	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL	1, 4, 8, 9, 10, 13, 27, 28	1, 2, 8, 9, 10	UAV Drone Terrestrial Laser Scanner Dijital Kamera	-	-	-	-	Maravelakis vd. (2023) çalışmasında Delphi'deki Apollo Tapınağı için lazer tarama ve İHA fotogrametrisini birleştiren bir veri toplama süreciyle yüksek doğrulukta bir 3B model üretilmiş ve bu model HBIM yaklaşımına uygun şekilde yapı elemanları ve malzeme özellikleriyle zenginleştirilmiştir. Elde edilen model daha sonra sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile statik ve dinamik yapısal analizlerde kullanılmış, özellikle deprem etkisi altında olası göçme mekanizmaları ve rezonans frekansları değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, kültürel miras yapısının geometrik belgelemesini yapısal davranış analizi ile birleştiren bütünleşik bir HBIM tabanlı model oluşturmak ve bu model üzerinden sismik kırılganlık ve stabilite
Martinelli, L., Calcerano, F., Gigliarelli, E.	2022	Methodology for an HBIM workflow focused on the representation of construction systems of built heritage	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA TOPOGRAFİK TARAMA	-	-	-	MODEL	1, 4, 6, 7, 15, 16, 19, 25, 27	1, 2, 3, 6, 14, 15, 23, 24	Leica ScanStation P50 Leica GS15 GNSS Leica Nova TS60 total station	Leica Cyclone 3DReshaper	Autodesk Revit	-	-	Çalışma, tarihî yapıların yapım sistemlerini temsil etmeye odaklanan beş aşamalı bir HBIM iş akışı önermektedir. Lazer tarama verilerinden elde edilen nokta bulutları Scan-to-HBIM yaklaşımıyla modellenmiş ve semantik yapı bileşenlerine ayrılmış bir HBIM modeli oluşturulmuştur. Önerilen yöntem, geometrik doğruluk ile bilgi zenginliği arasında denge kurarak bakım ve koruma süreçlerini destekleyen bir bilgi yönetim modeli geliştirmeyi amaçlamaktadır.
Marra, A., Fabbrocino, G., Trizio, I.	2023	On the interoperability performance of HBIM models for structural conservation and upgrading of building aggregates in the Italian minor centres	İTALYA	YAPI GRUBU	FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	3, 6, 7, 9, 12, 13, 15, 16, 28	3, 4, 7, 10, 14, 16, 27	Leica Disto 3D ZEB Horizon mobile Laser Scanner Leica ScanStation P50	Leica Cyclone GeoSLAM Hub	Autodesk Revit usBIM.editor Edificius	Edificius Structural Analysis		Çalışmada, tarihi bir yapı adası için çok kaynaklı ölçüm verileri kullanılarak HBIM modeli oluşturulmuş, model IFC tabanlı veri aktarımı ile yapısal analiz ortamına taşınmış ve farklı güçlendirme senaryoları değerlendirilmiştir. Böylece HBIM modelinin yalnızca belgeleme değil, yapısal değerlendirme ve müdahale kararlarını destekleyen birlikte çalışabilir bir karar platformu olarak kullanılabilirliği test edilmiştir.
Monchetti, S., Betti, M., Borri, C., Gerola, C., Matta, C., Francalanci, B.	2023	Insight on HBIM for Conservation of Cultural Heritage: The Galleria dell'Accademia di Firenze	İTALYA	TEK YAPI	DOKÜMANLAR	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	EM YAPISAL ANALİZ MODE MODEL	1, 6, 7, 8, 9, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 26, 27, 28	3, 4, 7, 10, 11, 12, 15, 21, 23, 26	-	-	Autodesk Revit Rhinoceros Python	Code_Aster (FEM)	-	Bu çalışma, Floransa'daki Galleria dell'Accademia için geliştirilen HBIM tabanlı bilgi modelinin, yapısal veriler, restorasyon geçmişi ve deneysel izleme sonuçlarını entegre ederek FEM analizleri ile ilişkilendirilmesini ele almaktadır. Revit tabanlı HBIM modeli, Rhinoceros-Python ara yüzü ile Code_Aster yapısal analiz ortamına aktarılmış ve bakım-koruma kararlarını destekleyen bütünleşik bir yönetim modeli oluşturulmuştur.
Moyano, J., Carreno, E., Nieto-Julian, J.E., Gil-Arizon, I., Bruno, S.	2022	Systematic approach to generate Historical Building Information Modelling (HBIM) in architectural restoration project	İSPANYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	-	-	BOZULMA ANALİZİ	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE DİJİTAL ARŞİV	1, 4, 6, 7, 8, 16, 18, 19, 20	1, 2, 4, 8, 9, 10, 14	Terrestrial Laser Scanner Total Station Dijital Kamera	MeshLab	Autodesk Revit ArchiCAD Rhinoceros	-	-	Makale, tarihi yapı restorasyon projeleri için veri toplama, semantik sınıflandırma ve parametrik modelleme adımlarını birleştiren sistematik bir HBIM üretim yöntemi önermektedir. Santiago Kilisesi'ndeki bir kolon üzerinde TLS ve fotogrametri verilerinden mesh oluşturulmuş, bu geometri Rhino/MeshLab üzerinden işlenerek Revit ve ArchiCAD ortamında parametrik HBIM nesnesine dönüştürülmüştür. Süreç, semantik veri organizasyonu ve IFC tabanlı paylaşım ile dijital ikiz yaklaşımına genişletilmiştir.
Moyano, J., Pili, A., Nieto-Julian, J., Della Torre, S., Bruno, S.	2023	Semantic interoperability for cultural heritage conservation: Workflow from ontologies to a tool for managing and sharing data	İTALYA	TEK YAPI	DOKÜMANLAR	-	-	-	MODEL	6, 7, 8, 16, 17, 18, 19, 20, 28	4, 7, 9, 10, 11, 15, 22, 25, 27	-	Protégé IFCtoRDF	FreeCAD ArchiCAD Autodesk Revit FOSS HBIM	-	-	Bu çalışma, HBIM modelinde kültürel mirasa özgü semantik verilerin ontolojiler aracılığıyla tanımlanmasını ve FreeCAD–ArchiCAD–Revit ortamları arasında IFC tabanlı veri alışverişi ile interoperabilitenin sağlanmasını amaçlayan bir workflow önermektedir. Geometrik model üretiminden ziyade bilgi yönetimi ve veri paylaşımı üzerine odaklanmıştır.
Moyano, J., Musicco, A., Nieto-Julian, J.E., Dominguez-Morales, J.P.	2024	Geometric characterization and segmentation of historic buildings using classification algorithms and convolutional networks in HBIM	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA MAKİNA ÖĞRENMESİ DERİN ÖĞRENME	-	-	-	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 2, 4, 5, 6, 7, 16, 17, 18, 20	1, 2, 3, 4, 9, 10, 15, 20, 24, 26	Terrestrial Laser Scanner Geometric Aquisition Tools	Cyclone 3D Geomatics Software	BIM yazılımı GuBIMClass	MATLAB (Random Forest) Deep Learning - Pointnet	-	ML ve DL tabanlı semantic segmentation kullanılarak tarihi yapıya ait nokta bulutu sınıflandırılmış ve segmentlenen elemanlardan ontoloji tabanlı parametric HBIM nesneleri üretilmiştir. Çalışma tarihsel faz modellemesi içermemekte olup, geometrik karakterizasyon ve otomatik HBIM üretimi üzerine odaklanmaktadır.

Tablo B.8 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (72-82)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Nieto-Julian, J. E., Faratell, J., Cavada, M.B., Moyano, J.	2023	Collaborative Workflow in an HBIM Project for the Restoration and Conservation of Cultural Heritage	İSPANYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	-	-	MALZEME ANALİZİ STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE DİJİTAL ARŞİV	1, 4, 6, 7, 15, 16, 18, 19, 27	1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 17, 23	Terrestrial Laser Scanner	Leica JetStream	ArchiCAD BIMcloud	Python	-	Collaborative OpenBIM tabanlı HBIM workflow geliştirilmiştir. TLS ve SfM verileriyle oluşturulan modelde duvarlar semantik olarak segmentlere ayrılmış, Python script ile otomatik taş birimi tanımlaması yapılmıştır. ArchiCAD Teamwork + BIMcloud + IFC üzerinden disiplinler arası ortak 3D veri tabanı oluşturulmuştur.
Nieto-Julian, E., Bruno, S., Moyano, J.	2024	An Efficient Process for the Management of the Deterioration and Conservation of Architectural Heritage: The HBIM Project of the Duomo of Molfetta (Italy)	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ MALZEME ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 4, 6, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 19, 20, 28	2, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 23	Terrestrial Laser Scanner Dijital Kamera	Cyclone 3D	BIM yazılımı openBIM	-	-	TLS + fotogrametri verilerinden üretilen nokta bulutu Cyclone 3DR ile semantik olarak sınıflandırılmış, ardından Scan-to-HBIM süreciyle parametre tabanlı bozulma yönetim modeli oluşturulmuştur. HBIM modeli, yapı elemanları üzerinde deformasyon ve malzeme bozulmalarını tanımlayan bir koruma yönetim veritabanı olarak kullanılmıştır.
Orabi, R., Bakirtzis, N., Artopoulos, G.	2023	A Digital Approach to Revisiting the Byzantine Past of Al-Madrassa Al-Halawiyya in Aleppo	SURİYE	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ GELENEKSEL	VAR	-	DOĞRULUK ANALİZİ	MODEL	1, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 16, 17, 26	1, 2, 10, 12, 15, 16, 24	Terrestrial Laser Scanner Dijital Kamera	-	Autodesk Revit	-	-	Hibrit lazer tarama ve fotogrametri verilerinden oluşturulan nokta bulutu üzerine parametrik HBIM rekonstrüksiyonlarının bindirilmesiyle, Halawiyya yapısının Bizans dönemine ait inşa evreleri yeniden yorumlanmış ve tarihsel rekonstrüksiyonlar geometrik karşılaştırma yoluyla doğrulanmıştır.
Özeren, Ö., Korumaz, M.	2022	HBIM and Thermal Performance in Historical Buildings	TÜRKİYE	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	-	-	MALZEME ANALİZİ ENERJİ ANALİZİ	MODEL	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27,	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21,	Faro S120 Terrestrial Laser Scanner	Faro Scene ReCap Pro	Autodesk Revit Dynamo	-	-	HBIM modeli üzerinde farklı yalıtım malzemeleri Revit ve Dynamo ile test edilmiş, tarihi yapının özgünlüğünü koruyarak enerji performansı analiz edilmiştir. Sonuçta uygun yalıtım senaryolarıyla enerji verimliliğinin ortalama %33 arttığı görülmüştür.
Qsymah, A., Al Shdaifat, I., Ayasarh, M., Qi'dan, D., Al-Housan, A.	2024	HBIM for Sustainable Documentaion of Historic Buildings: Case Study of Al-Faddain Umayyad Mosque	ÜRDÜN	TEK YAPI	DOKÜMANLAR KALINTILAR	VAR	-	-	MODEL	1, 6, 16, 17, 19, 25, 28	2, 3, 13, 20, 23	-		Autodesk Revit	-	-	Hasarlı Emevi dönemi camisi için arşiv verileri ve tipolojik karşılaştırma kullanılarak parametrik HBIM rekonstrüksiyon modeli oluşturulmuştur. Çalışma veri tabanı temelli semantik HBIM organizasyonu sunmakta olup analiz içermemektedir.
Rimella, N., Del Giudice, M., Ozturk, H.B., Osello, A.	2024	Semantic HBIM approach for digital inclusion	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA DOKÜMANLAR	VAR	-	-	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 2, 4, 6, 7, 16, 18, 19, 22, 24	1, 2, 3, 4, 9, 10, 15, 16, 20, 23, 25	F6 Handheld Scanner	-	Autodesk Revit Grasshopper Volvox Game engine	RANSAC DBSCAN	-	ML tabanlı segmentation (RANSAC + DBSCAN) ile nokta bulutundan HBIM üretimi yapılmış; Revit + Grasshopper tabanlı semantic HBIM modeli XR ortamına aktarılmıştır. Model farklı LOD mesh seviyeleri ve semantik kodlama ile erişilebilirlik odaklı VR deneyimi üretmektedir.
Rossato, L., Planu, F., Montanari, G.	2023	The Rocca Malatestiana of Verucchio. SCAN to HBIM process for the digitisation of cultural site with severe topography condition	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	-	MODEL	1, 4, 6, 7, 11, 12, 14, 16, 18, 19	1, 2, 3, 4, 7, 9, 10, 15, 23, 25	Terrestrial Laser Scanner UAV Drone Dijital Kamera	Autodesk ReCap CloudCompare	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma, karmaşık topoğrafya üzerinde konumlanan Rocca Malatestiana için lazer tarama ve UAS fotogrametri verilerinin entegrasyonu ile yüksek yoğunluklu nokta bulutundan DEM ve kontur hatları türeterek Revit ortamında topoğrafya ile bütünleşik bir HBIM modeli üretmektedir. Model, dokümantasyon, restorasyon planlama ve miras yönetimi amaçlı bilgi tabanı olarak kurgulanmıştır.
Sampaio, A.Z., Tome, J., Gomes, A.M.	2023	Heritage Building Information Modelling Implementation First Steps Applied in a Castle Building: Historic Evolution Identity, Data Collection and Stratigraphic Modelling	PORTEKİZ	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ DOKÜMANLAR	VAR	-	-	MODEL DİJİTAL ARŞİV PARAMETRİK KÜTÜPHANE	1, 2, 4, 6, 18	1, 2, 8, 9, 11, 14, 23	Dijital Kamera Laser Scanner	-	BIM Yazılımı	-	-	Bu çalışma, HBIM uygulamalarında veri toplama ve tarihsel evrim analizine odaklanan, stratigrafik model üretimiyle sonuçlanan erken aşama bir uygulamadır. Fotogrametri ve arşiv belgeleri kullanılarak yapıdaki farklı yapım dönemleri tanımlanmış ve bu bilgiler LOD 400 seviyesinde parametrik HBIM modeline entegre edilmiştir. Yapısal veya performans analizi yapılmamış olup çalışma veri organizasyonu ve tarihsel modelleme üzerine yoğunlaşmaktadır.
Santini, S., Borghese, V., Baggio, C.	2023	HBIM-Based Decision-Making Approach for Sustainable Diagnosis and Conservation of Historical Timber Structures	İTALYA	TEK YAPI	GELENEKSEL	-	-	ÇEVRESEL ANALİZLER SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT MÜDAHALE SENARYOLARI	1, 5, 6, 7, 12, 13, 15, 19, 21, 28	2, 3, 8, 10, 11, 12, 18, 23, 25	NDT Testleri	-	Autodesk Revit	Analytical Hierarchy Process MIVES decision model Sustainability Index hesaplama	Python	Bu çalışma HBIM modelini geometrik modelleme için değil, müdahale alternatiflerini karşılaştıran karar destek platformu olarak kullanmaktadır. AHP ve MIVES çok kriterli değerlendirme yöntemleri HBIM modeline entegre edilerek sürdürülebilir müdahale seçimi için sayısal bir indeks (SI) üretilmiştir. Sensör, izleme veya yapısal analiz entegrasyonu bulunmamaktadır.
Santini, S., Cogotti, M., Baggio, C., Sabbatini, V., Sebastiani, C.	2023	Field testing for structural behavior of a stratified monumental complex over time: Palazzo Colonna-Barberini and Templum Fortunae Praeneste	İTALYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ SONIC TOMOGRAPHY VIDEO ENDOSCOPY	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL EM YAPISAL ANALİZ MODE	1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 19, 20, 28	1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 20, 23, 25, 26	NDT Testleri	-	Autodesk Revit Autocad Agisoft Metashape	MIDAS FEA NX FORTRAN	-	Çalışmada stratifiye tarihî bir antsal yapının yapısal davranışını değerlendirmek amacıyla tarihsel araştırma, UAV tabanlı fotogrametri, yerinde NDT testleri (sonik tomografi, double flat jack, endoskopi) ve görsel incelemeler entegre edilerek HBIM tabanlı bir model oluşturulmuş, bu model test sonuçlarıyla zenginleştirilerek FEM ortamına aktarılmış ve malzemelerin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak yapının sismik performansı analiz edilmiştir; süreçte Revit tabanlı HBIM, AutoCAD geometrik modelleme, Agisoft Metashape fotogrametri ve MIDAS FEA NX yapısal analiz yazılımları birlikte kullanılmıştır.
Santini, S., Canciani, M., Borghese, V., Sabbatini, V., Sebastiani, C.	2023	From Digital Restitution to Structural Analysis of a Historical Adobe Building: The Escuela José Mariano Méndez in El Salvador	EL SALVADOR	TEK YAPI	LAZER TARAMA TOPOGRAFİK TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ MALZEME ANALİZİ	MODEL EM YAPISAL ANALİZ MODE	1, 2, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 20, 28	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 15, 16, 23, 25, 26, 27	Laser Scanner UAV Drone	Agisoft Photoscan Faro Scene Autodesk Recap	Autodesk Revit Autocad 3ds Max Instant Meshes	-	-	Bu çalışma, lazer tarama ve drone fotogrametri ile elde edilen nokta bulutundan HBIM model oluşturulmasını ve bu modelin FEM yapısal analizine dönüştürülmesini amaçlamaktadır. El Salvador'daki tarihi adobe yapı için geliştirilen workflow, cloud-to-HBIM-to-FEM yaklaşımıyla geometrik, malzeme ve mekanik özelliklerin tek modelde birleştirilmesini sağlar. Böylece yapının yapısal davranışı değerlendirilmiş ve restorasyon kararlarını destekleyen analitik bir dijital model elde edilmiştir.

Tablo B.9 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (83-92)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Santini, S., Sabbatini, V., Sebastiani, C., Baggio, C.	2023	Integrated Modeling of Minerva Medica to Identify the Dynamic Effects of Rail-Traffic Vibrations	İTALYA	TEK YAPI	DOKÜMANLAR	-	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL FEM YAPISAL ANALİZ MODELİ	1, 4, 7, 9, 10, 11, 14, 17, 18, 19, 20, 28	1, 3, 4, 8, 9, 10, 12, 16, 20, 23	-	-	Autodesk Revit	MIDAS FEA NX MATLAB Simcenter Testlab	-	HBIM modeli tarihsel analizle oluşturulmuş, deneysel titreşim verileri ile kalibre edilmiş FEM modele aktarılmıştır. Model üzerinde tramvay kaynaklı hareketli yük ve taban ivmesi analizleri yapılmış, sonuçlar deneysel frekanslarla karşılaştırılarak model güncellenmiştir. Böylece trafik titreşimlerinin yapının dinamik davranışına etkisi değerlendirilmiştir.
Santoni, A., Martín-Talaverano, R., Quattrini, R., & Murillo-Fragero, J. I.	2021	HBIM APPROACH TO IMPLEMENT THE HISTORICAL AND CONSTRUCTIVE KNOWLEDGE. THE CASE OF THE REAL COLEGIATA OF SAN ISIDORO (LEÓN, SPAIN)	İSPANYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ TOPOGRAFİK TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL	1, 4, 6, 7, 8, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 26	1, 2, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 23, 25	Topcon GLS 2000 lazer tarayıcı	JRC 3D Reconstructor	Autodesk Revit	Dynamo	-	Bu çalışma, lazer tarama ve fotogrametri verilerinden oluşturulan nokta bulutu temelinde, yapının tarihsel evrelerini ve yapım stratigrafisini parametrelerle tanımlayan semantik HBIM modeli geliştirmektedir. Model Revit ortamında oluşturulmuş ve Dynamo tabanlı sorgular ile tarihsel fazlara göre analiz edilebilir hale getirilmiştir.
Silva, F.B., Cuperschmid, A.R., Ceravolo, A.L, Fabricio, M.	2022	A Technological Prospect for a Diagnostic Model in HBIM	BREZİLYA	Tek Yapı	GELENEKSEL FOTOGRAMETRİ DOKÜMANLAR	VAR	-	-	MODEL HASAR TESPİT	1, 6, 7, 10, 11, 15, 16, 18, 19, 20	3, 4, 10, 11, 21, 22, 23, 27	UAV Geleneksel Ölçüm Ekipmanları	SFM UAV Photogrammetry	Autodesk Revit Archicad BIMcollab Cloud	BIMcollab Zoom BCF	-	Bu çalışma, modern miras yapısı E1 binasında HBIM tabanlı teşhis modeli geliştirmeye odaklanmaktadır. UAV fotogrametri, doğrudan ölçüm ve inceleme raporlarından elde edilen verilerle Revit ortamında HBIM modeli oluşturulmuş; yapının tarihsel fazları ve bozulma verileri modele entegre edilmiştir. Hasar bilgileri BCF tabanlı BIMcollab platformu üzerinden yönetilmiş ve model içinde 3B hasar haritalama yapılmıştır. Çalışma, HBIM'in belgelemeyi aşarak tanısal karar destek sistemine dönüşebileceğini göstermektedir.
Simeone, D., Cursi, S., Toldo, I., Carrara, G.	2014	BIM AND KNOWLEDGE MANAGEMENT FOR BUILDING HERITAGE	İTALYA	TEK YAPI	GELENEKSEL FOTOGRAMETRİ DOKÜMANLAR	VAR	-	-	MODEL	6, 7, 8, 16, 18, 19, 20, 25, 26, 28	2, 6, 10, 12, 16, 18, 22, 24, 25, 27	Dijital Kamera	-	Autodesk Revit Protege	Protege	-	Bu çalışma, kültürel miras yapılarında yalnızca geometrik HBIM modellemesinin yetersiz kaldığını savunarak, BIM ortamının ontoloji tabanlı bir bilgi yönetim sistemiyle entegrasyonunu önermektedir. Önerilen yaklaşım, hem somut hem de soyut kültürel miras bilgisini tek modelde birleştirerek disiplinler arası bilgi paylaşımını ve karar destek süreçlerini geliştirmeyi hedeflemektedir. Yöntem, İtalya Cori'deki Castor and Pollux Tapınağı üzerinde test edilmiştir.
Solla, M., Gonçalves, L. M. S., Gonçalves, G., Francisco, C., Puente, I., Providência, P., Gaspar, F., et al.	2020	A Building Information Modeling Approach to Integrate Geomatic Data for the Documentation and Preservation of Cultural Heritage	PORTEKİZ	TEK YAPI	LAZER TARAMA GROUND PENETRATING INFRARED THERMOGRAPH UAV			MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 19, 20, 28	2, 3, 9, 10, 23, 25, 27	Lazer Tarayıcı UAV Drone GPR Sistemi RGB Kamera Termal Kamera	ReflexW	BIM yazılımı eCognition	-	-	Bu çalışma, lazer tarama, GPR, termografi ve UAV görüntüleme gibi çoklu jeomatik verilerin HBIM ortamında birleştirilmesini amaçlayan entegre bir BIM yaklaşımı sunmaktadır. Yöntem, Batalha Manastırı üzerinde uygulanarak yapısal bozulmaların tespiti, malzeme karakterizasyonu ve patoloji haritalarının BIM modeline aktarılmasını sağlamış; böylece koruma, restorasyon ve tesis yönetimi süreçlerine karar destek sağlayan çok katmanlı bir HBIM modeli geliştirilmiştir.
Stanga, C., Brumana, R., Previtali, M., Landi, G., Banfi, F.	2021	EXTENDING 3D QUALITY MODELLING FOR EARTHQUAKE-DAMAGED STONE MASONRY WALL: COMBINED DIGITAL MODELS FOR BUILDING ARCHAEOLOGY	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	MALZEME ANALİZİ STRÜKTÜR ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL	1, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 25, 28	1, 6, 9, 10, 14, 15, 16, 20, 23, 24, 26	Faro Focus 3D Lazer Tarayıcı Leica TPS1200 Total Station UAV Drone	Autodesk ReCap	NURBS Modeller	-	Common Data Environment VR Entegrasyonu Autodesk Forge Twinmotion Unreal Engine	Makale, deprem hasarlı taş yığma bir kalenin lazer tarama, fotogrametri ve total station verileriyle belgelenmesini ve NURBS tabanlı scan-to-BIM yaklaşımıyla çok katmanlı HBIM modeline dönüştürülmesini sunmaktadır. Modelde duvar stratigrafisi, malzeme, hasar ve tarihsel faz bilgileri parametrik olarak tanımlanmış; sonuç model CDE ve VR ortamlarında paylaşılabilir hale getirilmiştir.
Stanga, C., Banfi, F., Roascio, S.	2023	Enhancing Building Archaeology: Drawing, UAV Photogrammetry and Scan-to-BIM-to-VR Process of Ancient Roman Ruins	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	BOZULMA ANALİZİ MALZEME ANALİZİ	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 6, 7, 16, 18, 24, 25, 27	1, 4, 6, 23, 25	UAV Drone Lazer Tarayıcı	Agisoft Metashape	Rhinoceros Autodesk Revit Autocad	-	-	Bu çalışma Roma'daki Claudius–Anio Novus su kemerinin belgelenmesi amacıyla UAV fotogrametri, lazer tarama ve GNSS destekli ölçümlerle elde edilen verilerin scan-to-HBIM süreciyle modellenmesini ele almaktadır. Fotogrametrik ortomozaikler, stratigrafik analizler ve malzeme bozulmaları HBIM nesnelerine aktarılmış, Rhinoceros–Revit tabanlı parametrik model oluşturulmuştur. Model XR ortamına aktarılmış ve yapı arkeolojisi verilerinin yorumlanması, paylaşılması ve görselleştirilmesi amaçlanmıştır.
Sun, Z., Xie, J., Zhang, Y., Cao, Y.	2019	As-Built BIM for a Fifteenth-Century Chinese Brick Structure at Various LoDs	ÇİN	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ MOBİL TARAMA	VAR	-	-	MODEL	1, 4, 6, 7, 10, 11, 16, 18, 27	1, 3, 6, 9, 10, 15, 16, 20, 23, 24	Terrestrial Laser Scanner Dijital Kamera	-	Autodesk Revit OSS CAD	-	-	Bu çalışma, Çin'de 15. yüzyıla ait tuğla bir yapının as-built HBIM modelinin farklı LoD seviyelerinde oluşturulmasını incelemektedir. Lazer tarama ve fotogrametri verilerinden elde edilen nokta bulutu Revit tabanlı bir BIM platformunda modellenmiş, LoD1 ortofoto tabanlı model, LoD2 semantik kabuk model ve LoD3 tuğla-bazlı detay model geliştirilmiştir. Çalışma, tarihi yığma yapılarda malzeme seviyesinde hasar bilgisinin HBIM ortamına entegre edilebileceğini göstermektedir.
Tahoon, D., El-Zohairy, A., Hendawy, H.I.	2024	Cost Impact Comparative Analysis via BIM between Heritage Regular Maintenance Projects and Long-Term Restoration Projects—A Case Study	MISIR	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA	VAR	-	-	MODEL HASAR TESPİT MALİYET ANALİZİ	5, 14, 15, 18, 19, 28	8, 9, 10, 23, 25	Terrestrial Laser Scanner	-	- 5D BIM COBie Veri Modeli	-	-	Bu çalışma, Kahire'deki Aidkeen Al-Bendqdari kubbesi için oluşturulan HBIM modeli üzerinden düzenli bakım ve uzun dönem restorasyon stratejilerinin maliyet etkilerini karşılaştırmaktadır. Lazer tarama ile oluşturulan 3B model, COBie tabanlı veri yapısı ve 5D BIM maliyet boyutu ile entegre edilmiştir. Delphi yöntemi ile farklı bozulma senaryoları değerlendirilmiş ve zaman içinde müdahale stratejilerinin finansal etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, önleyici bakım yaklaşımının uzun vadede büyük restorasyonlara göre daha maliyet etkin olduğunu göstermektedir.
Taileb, A., Dekkiche, H., Sherzad, M.F.	2023	HBIM: A Tool for Enhancing the Diagnosis of Historical Buildings: The Case of St. George's Memorial Anglican Church, Oshawa	KANADA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	TERMAL ANALİZ	MODEL PARAMETRİK KÜTÜPHANE HASAR TESPİT	1, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 15, 16, 17	3, 9, 10, 11, 14, 20, 23	3D Laser Scanner 360 Kamera IR Termal Kamera 3D Yazıcı	Autodesk ReCap	Autodesk Revit	IR Thermography	-	Bu çalışma, Kanada'daki St. George's Memorial Anglican Church yapısı için 3B lazer tarama, 360° görüntüleme ve IR termografi verilerinin entegrasyonu ile bir HBIM modeli geliştirmektedir. Autodesk ReCap ve Revit tabanlı iş akışıyla parametrik mimari bileşen kütüphanesi oluşturulmuş, yapı elemanları detaylı biçimde modellenmiş ve termal teşhis verileri modele entegre edilmiştir. Geliştirilen HBIM modeli, tarihi yapının korunması, restorasyon kararlarının desteklenmesi ve tanı süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla bir veri tabanı ve analiz platformu olarak kullanılmıştır.

Tablo B.10 Literatürdeki TYBM Vaka İncelemeleri (93-100)

LİTERATÜRDEKİ TYBM VAKA İNCELEMELERİ																	
YAZARLAR	YIL	BAŞLIK	YERİ	VAKA TİPİ	YÖNTEM	DÖNEM MODELİ	YAPISAL İNCELEME	ANALİZLER	SON ÜRÜN	FAYDALAR	KISITLAR	EKİPMAN	YAZILIMLAR				NOTLAR
													VERİ TOPLAMA	MODELLEME	ANALİZ	AR/VR/MR	
Tan, J., Leng, J., Zeng, X., Feng, D., Yu, P.	2022	Digital Twin for Xiegong's Architectural Archaeological Research: A Case Study of Xuanluo Hall, Sichuan, China	ÇİN	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	-	MODEL DİJİTAL ARŞİV	1, 6, 7, 8, 16, 17, 18, 25, 26	9, 10, 11, 12, 24	Terrestrial Laser Scanner UAV Drone Kamera	-	-	-	-	Tan vd. (2022) çalışmasında Sichuan'daki Xuanluo Hall için TLS lazer tarama ve UAV tabanlı fotogrametri verileri kullanılarak HBIM tabanlı bir dijital ikiz modeli geliştirilmiştir. Model, mimari arkeoloji kapsamında farklı dönemlere ait yapı bileşenlerinin semantik olarak sınıflandırılmasını ve zaman-mekân evriminin analiz edilmesini sağlamaktadır. Önerilen digital twin yaklaşımı, 3B geometri, tarihsel veri ve arkeolojik yorumları entegre ederek geleneksel belgelenme yöntemlerindeki bilgi kaybını azaltan sorgulanabilir bir karar destek ortamı sunmaktadır.
Valentini, M., Battini, C., Vecchiattini, R.	2023	HBIM TO SUPPORT THE EXECUTIVE DESIGN OF A RESTORATION. CRITICAL ISSUES RELATED TO GEOMETRIC AND SEMANTIC MODELING	İTALYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	BOZULMA ANALİZİ MALZEME ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 5, 6, 7, 12, 14, 16, 17, 25, 27	1, 2, 3, 6, 10, 15, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 26	Trimble X7 Nikon D610 DJI Mavic 3T	Autocad	Autodesk Revit	-	-	Bu çalışma, lazer tarama ve fotogrametri verilerinden elde edilen nokta bulutuna dayalı olarak Oratory of S. Giovanni Battista yapısının HBIM modelini üretmiş; model içinde geometri, malzeme, bozulma ve restorasyon müdahaleleri semantik parametrelerle ilişkilendirilerek restorasyon uygulama projesini destekleyen bilgi tabanlı bir model oluşturulmuştur.
Velastegui-Caceres, L.A., Guevara-Bonifaz, B., Velastegui-caceres, J., Toulkeridis, T.	2024	Implementation of Laser Scanning and HBIM Technology for the Structural Evaluation of Built Heritage in Ecuador	EKVATOR	TEK YAPI	LAZER TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ FEM YAPISAL ANALİZ MODE	MODEL	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 18, 20, 28	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 23, 26	FARO Focus3D	Trimble RealWorks	Archicad	DIANA FEA	-	Çalışmada Balbanera Kilisesi Faro Focus 3D lazer tarayıcı ile belgelenmiş, nokta bulutu Trimble RealWorks'te işlenmiş, ArchiCAD 24'te HBIM modeli oluşturulmuş ve model DIANA FEA'ya aktarılarak doğrusal olmayan pushover analizi ile deprem davranışı değerlendirilmiştir. Kritik elemanlar belirlenerek müdahale kararları için temel oluşturulmuştur.
Wilkens, D.S., Liu, J., Alathamneh, S.	2024	A Case Study of Integrating Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Building Information Modeling (BIM) in Heritage Bridge Documentation: The Edmund Pettus Bridge	ABD	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 3, 4, 6, 7, 19, 20, 25	1, 2, 5, 8, 9, 15, 23, 25	FARO Focus3D X330 UAV Kamera	Faro Scene Autodesk ReCap	Autodesk Revit Autocad	-	-	Bu çalışmada Edmund Pettus Köprüsü'nün belgelenmesi için TLS tabanlı gerçeklik yakalama teknikleri BIM ortamına entegre edilmiştir. Statik lazer tarama, UAV fotogrametri ve 360° görüntüleme ile elde edilen veriler FARO Scene ve ReCap yazılımları ile işlenmiş, ardından scan-to-BIM yaklaşımı ile Autodesk Revit ortamında HBIM modeli oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda detaylı HBIM modeli ve HAER teknik çizimleri üretilmiş; geometrik doğruluk analizi yapılmış ve bakım gerektiren bölgeler belgelenmiştir.
Wojciechowska, G., Bednarz, L.J., Dolinska, N., Opalka, P., Krupa, M., Imnadze, N.	2024	Intelligent Monitoring System for Integrated Management of Historical Buildings	POLONYA	TEK YAPI	FOTOGRAMETRİ	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ MALZEME ANALİZİ BOZULMA ANALİZİ ÇEVRESEL ANALİZLER	MODEL İZLEME SİSTEMİ	1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 18, 19, 20, 21, 28		Fotogrametri Kameraları Çatlak Ölçüm Eklipmanları Sensörler	IoT Monitoring System Veri Toplama Platformu	-	-	-	HBIM modeli; fotogrametri, saha incelemeleri ve laboratuvar verileri ile oluşturulmuş, ardından sıcaklık-nem ve yapısal deplasman sensörlerinden gelen sürekli veri ile akıllı izleme sistemi kurulmuştur. Sistem, yapının gelecekteki bakım ihtiyaçlarını tahmin eden önleyici koruma odaklı bir karar destek yaklaşımı sunmaktadır.
Xu, C., Zhao, Y., Wu, C.	2022	Sustainable' Recording and Preservation of Zangniang Stupa and Sangzhou Lamasery in Qinghai, China with Heritage Building Information Model	ÇİN	YAPI GRUBU	GELENEKSEL FOTOGRAMETRİ LAZER TARAMA	-	-	-	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 5, 19, 20, 25, 26	3, 4, 7, 14, 15, 27	Laser Scanner Kamera	PhotoScan Autocad Microsoft Office Synology Drive	Autodesk Revit Rhinoceros Bentley AECOsim Building Designer	-	-	Çalışmada Qinghai, Çin'deki Zangniang Stupa ve Sangzhou Lamasery için tarama ve rölöve verilerine dayalı bir HBIM modeli oluşturulmuş, çoklu yazılım iş akışıyla sürdürülebilir veri kaydı ve yönetimi hedeflenmiştir. Model mevcut durumu belgelemeye odaklanmakta olup yapısal analiz, simülasyon veya tarihsel dönem rekonstrüksiyonu yapılmamıştır; çalışma daha çok veri entegrasyonu, güncellenebilir HBIM modeli ve işbirlikçi bilgi yönetimi yaklaşımı sunmaktadır.
Zaragoza, M., Bayarri, V., Garcia, F.	2024	Integrated Building Modelling Using Geomatics and GPR Techniques for Cultural Heritage Preservation: A Case Study of the Charles V Pavilion in Seville (Spain)	İSPANYA	TEK YAPI	LAZER TARAMA FOTOGRAMETRİ	VAR	-	MALZEME ANALİZİ STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL GÖRSEL-AR-VR-MR	1, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 20, 25, 28	2, 4, 8, 9, 10, 23, 25	Terrestrial Laser Scanner GPR	Faro Scene	Archicad	-	-	Bu çalışma HBIM'i sadece geometrik model olarak değil, jeofizik (GPR) + geomatik + yapısal değerlendirme ile entegre ederek hem üst yapı hem yeraltı bileşenlerini içeren karar destek modeli üretmektedir. Bu yönüyle multidisipliner HBIM yaklaşımıdır.
Zouaoui, M.A., Djebri, B., Capsoni, A.	2021	From Point Cloud to HBIM to FEA, the Case of a Vernacular Architecture: Aggregate of the Kasbah of Algiers	CEZAYİR	YAPI GRUBU	LAZER TARAMA	VAR	-	STRÜKTÜR ANALİZİ	MODEL HASAR TESPİT	1, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 19, 20, 28	1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 15, 23, 24, 25, 26	FARO Focus3D	Faro Scene Autodesk ReCap	Autodesk Revit Autocad Rhinoceros	ABAQUS	-	Bu çalışmada Cezayir Kasbahi'ndaki vernaküler konut grubunun lazer tarama ile nokta bulutu verisi elde edilmiş, ReCap–AutoCAD–Revit–Rhinoceros iş akışıyla HBIM modeli oluşturulmuş ve model ABAQUS ortamına aktarılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. HBIM modeli malzeme, patoloji ve tarihsel bilgileri içermekte olup, yapısal stabilite ve sismik davranış değerlendirmesi için kullanılmıştır.

C
REVİT MODEL SENARYOLARI İÇİN HAZIRLANAN PYTHON KODLARI

Yazılım: Autodesk Revit 2024

Arayüz: Dynamo v.2.18.1

Python: Cpython3

Senaryo 1: Dinamik Davranış Sapmalarının Belirlenmesi

```
import clr
clr.AddReference('RevitAPI')
from Autodesk.Revit.DB import *
clr.AddReference('RevitNodes')
import Revit
clr.ImportExtensions(Revit.Elements)
clr.AddReference('RevitServices')
from RevitServices.Persistence import DocumentManager
from RevitServices.Transactions import TransactionManager
doc = DocumentManager.Instance.CurrentDBDocument
view = doc.ActiveView
# Girişler
walls = IN[0] if IN[0] else []
csv_zones = IN[1] if IN[1] else []
risk_states = IN[2] if IN[2] else []
colors = IN[3] if IN[3] else []
# Dolgu tipi (Solid Fill)
fill_pattern =
FilteredElementCollector(doc).OfClass(FillPatternElement).FirstElement()
TransactionManager.Instance.EnsureInTransaction(doc)
counter = 0
```

```
try:
    for wall in walls:
        rvt_wall = wall.InternalElement
        # Monitoring_Zone parametresini çek
        p = rvt_wall.LookupParameter("Monitoring_Zone")
        if p and p.HasValue:
            w_zone = p.AsString()
            # CSV listesinde var mı kontrol et
            if w_zone in csv_zones:
                idx = csv_zones.index(w_zone)
                # Risk değerini al (Sayıya çevir)
                r_val = int(float(str(risk_states[idx])))

                # Risk_State parametresine yaz
                rp = rvt_wall.LookupParameter("Risk_State")
                if rp: rp.Set(str(r_val))

                # Rengi hazırla ve uygula
                if r_val < len(colors):
                    dyn_color = colors[r_val]
                    rev_color = Color(dyn_color.Red, dyn_color.Green, dyn_color.Blue)

                    og = OverrideGraphicSettings()
                    og.SetSurfaceForegroundPatternColor(rev_color)
                    og.SetSurfaceForegroundPatternId(fill_pattern.Id)
                    view.SetElementOverrides(rvt_wall.Id, og)
                    counter += 1
    msg = "İşlem Tamam: " + str(counter) + " adet duvar boyandı."
except Exception as e:
    msg = "Hata oluştu: " + str(e)
TransactionManager.Instance.TransactionTaskDone()
OUT = msg
```

Senaryo 2: Yapısal Deformasyon Takibi

```
import clr
import csv
import io
clr.AddReference('RevitServices')
from RevitServices.Persistence import DocumentManager
from RevitServices.Transactions import TransactionManager
clr.AddReference('RevitAPI')
from Autodesk.Revit.DB import FilteredElementCollector, BuiltInCategory, StorageType
doc = DocumentManager.Instance.CurrentDBDocument
# DOSYA YOLU
CSV_PATH = r"D:\01_SEZER\00_DOKTORA TEZ CALISMASI\02_CALISMALAR\KILICALIPASA\SENARYO_2\SENARYO_2_SENSORVERISI.CSV"
# GİRİŞ KONTROLÜ (Hata veren kısım düzeltildi)
try:
    TIME_INDEX = IN[1] if IN[1] is not None else 0
except:
    TIME_INDEX = 0
def set_param(elem, pname, value):
    if value is None or str(value).strip() == "": return False
    p = elem.LookupParameter(pname)
    if p is None or p.IsReadOnly: return False
    st = p.StorageType
    try:
        val_str = str(value).replace(",", ".").strip()
        if st == StorageType.Double:
            return p.Set(float(val_str))
        elif st == StorageType.Integer:
            return p.Set(int(float(val_str)))
        else:
            return p.Set(str(value).strip())
    except:
        return False
# 1) Revit Elemanlarını Topla
```

```
elems =
FilteredElementCollector(doc).OfCategory(BuiltInCategory.OST_GenericModel)
.WhereElementIsNotElementType().ToElements()
by_code = {}
for e in elems:
    p = e.LookupParameter("Sensor_Kodu")
    if p and p.HasValue:
        c = p.AsString().strip().upper()
        if c: by_code[c] = e
# 2) CSV Oku
all_rows = []
try:
    with open(CSV_PATH, mode="r", encoding="utf-8-sig") as f:
        lines = [ln.strip() for ln in f if ln.strip()]
        reader = csv.DictReader(io.StringIO("\n".join(lines)), delimiter=",")
        all_rows = [{k.strip(): v for k, v in row.items()} for row in reader]
except:
    with open(CSV_PATH, mode="r", encoding="cp1254") as f:
        lines = [ln.strip() for ln in f if ln.strip()]
        reader = csv.DictReader(io.StringIO("\n".join(lines)), delimiter=",")
        all_rows = [{k.strip(): v for k, v in row.items()} for row in reader]
# 3) Zaman Dilimi Ayıkla
unique_times = sorted(list(set([r["Olcum_Tarihi"] for r in all_rows if
"Olcum_Tarihi" in r])))
if unique_times:
    if TIME_INDEX >= len(unique_times): TIME_INDEX = len(unique_times) -
1
    selected_time = unique_times[TIME_INDEX]
    filtered_rows = [r for r in all_rows if r.get("Olcum_Tarihi") == selected_time]
 # 4) Yazma İşlemi
    TransactionManager.Instance.EnsureInTransaction(doc)
    updated = 0
    for r in filtered_rows:
        code = str(r.get("Sensor_Kodu", "")).strip().upper()
        if code in by_code:
            el = by_code[code]
```

```
            set_param(el, "Olcum_Degeri_mm", r.get("Olcum_Degeri_mm"))
            set_param(el, "Olcum_Tarihi", r.get("Olcum_Tarihi"))
            set_param(el, "Risk_Durumu", r.get("Risk_Durumu"))
            set_param(el, "Uyari_Esigi_mm", r.get("Uyari_Esigi_mm"))
            set_param(el, "Kritik_Esik_mm", r.get("Kritik_Esik_mm"))
            updated += 1
    TransactionManager.Instance.TransactionTaskDone()
```

Senaryo 3: Çevresel Etkiler ve Davranış Korelasyonu

```
import os, csv, math, traceback
from datetime import datetime, timedelta
import clr
clr.AddReference("RevitServices")
from RevitServices.Persistence import DocumentManager
from RevitServices.Transactions import TransactionManager
clr.AddReference("RevitAPI")
from Autodesk.Revit.DB import FilteredElementCollector, BuiltInCategory,
StorageType
doc = DocumentManager.Instance.CurrentDBDocument
TS_FMT = "%Y-%m-%d %H:%M:%S"
def parse_ts(s):
    return datetime.strptime(str(s).strip(), TS_FMT)
def to_float(x):
    try:
        return float(str(x).strip().replace(",", "."))
    except:
        return None
def pearson_high_precision(xs, ys):
    n = len(xs)
    if n < 3: return 0.0  # Örneklem çok azsa (2 ve altı) güvenilir sonuç için 0
döndür


    mx = sum(xs)/float(n)
    my = sum(ys)/float(n)
```

```
    num = 0.0; dx = 0.0; dy = 0.0
    for i in range(n):
        ax = xs[i] - mx
        by = ys[i] - my
        num += ax * by
        dx += ax ** 2
        dy += by ** 2

    den = math.sqrt(dx * dy)
    if den == 0: return 0.0
    # Hassas değer döndür (yuvarlama yapmadan)
    return num / den
def nearest(series, t):
    if not series: return None
    return min(series, key=lambda x: abs(x[0]-t))
try:
    # ---------------- INPUTS ----------------
    csv_path = str(IN[0]).strip().strip('"').strip("'")
    tol_min = IN[1] if len(IN) > 1 and IN[1] is not None else 1440
    min_pairs = 3 # Güvenilir korelasyon için en az 3 çift zorunlu tutuldu
    active_window_idx = int(IN[3]) if len(IN) > 3 and IN[3] is not None else 1
        TOL = timedelta(minutes=float(tol_min))
        if not os.path.exists(csv_path):
        OUT = "Hata: CSV bulunamadı."
    else:
        temp_data = []; crk_series = {}; all_dates = []
        with open(csv_path, "r", encoding="utf-8-sig") as f:
            dr = csv.DictReader(f)
            for row in dr:
                sk = row.get("Sensor_Kodu")
                st = row.get("Sensor_Type", "").upper()
                val = to_float(row.get("Value"))
                ts = parse_ts(row.get("Time_Stamp"))
                if sk and val is not None:
                    all_dates.append(ts)
```

```
            if st == "TEMP": temp_data.append((ts, val))
            elif st == "CRK": crk_series.setdefault(sk, []).append((ts, val))
    temp_data.sort()
    for k in crk_series: crk_series[k].sort()
    min_d, max_d = min(all_dates), max(all_dates)
    total_span = (max_d - min_d).total_seconds()
    window_span = total_span / 4.0

    w_start = min_d + timedelta(seconds=(active_window_idx - 1) *
window_span)
    w_end = min_d + timedelta(seconds=active_window_idx * window_span)
    if active_window_idx == 4: w_end = max_d
    results = {}
    for ck, clist in crk_series.items():
      xs, ys = [] , []
      latest_ts = None
      for (t_crk, v_crk) in clist:
        if w_start <= t_crk <= w_end:
          m = nearest(temp_data, t_crk)
          if m and abs(m[0]-t_crk) <= TOL:
            xs.append(v_crk)
            ys.append(m[1])
            latest_ts = t_crk

      # Veri azlığı kontrolü
      if len(xs) >= min_pairs:
        r = pearson_high_precision(xs, ys)
        results[ck] = (r, len(xs), latest_ts.strftime(TS_FMT))
    # ----------- REVIT YAZMA -----------
    TransactionManager.Instance.EnsureInTransaction(doc)
    col =
FilteredElementCollector(doc).OfCategory(BuiltInCategory.OST_GenericModel)
.WhereElementIsNotElementType().ToElements()

    for el in col:
      p_code = el.LookupParameter("Sensor_Kodu")
```

```
            if p_code and p_code.AsString() in results:
                sk_code = p_code.AsString()
                r_val, n_val, ts_val = results[sk_code]

                # Değeri Double olarak set et (Revit otomatik yuvarlamasın)
                el.LookupParameter("Correlation_Int").Set(r_val)
                el.LookupParameter("Correlation_Count").Set(int(n_val))
                el.LookupParameter("Time_Stamp").Set(ts_val)
        TransactionManager.Instance.TransactionTaskDone()
        OUT = "Pencere " + str(active_window_idx) + " güncellendi. (Aralık: " +
w_start.strftime("%m-%d") + ")"
except Exception as ex:
    OUT = traceback.format_exc()
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Orhan, S. & Tong, T. (2025). HBIM Based Monitoring Infrastructure In The Digitization Of Cultural Heritage: The Case of Kılıç Ali Pasha Mosque, In A. Çilan Akın, D. Mubarakova, & A. İbrahim (Eds.), *Proceedings of the 8th International Mediterranean Scientific Research and Innovation Congress* (pp:196-217). ISBN: ' 978-625-378-300-6 '

Makaleler

1. Orhan, S. & Tong, T. (2025). Taşınmaz Kültür Mirası İçin Veri Odaklı Koruma: TYBM, IoT ve Yapısal Sağlık İzleme Entegrasyonuna Yönelik Kavramsal Çerçeve Önerisi, *The Journal of Academic Social Science Studies*, 18 (106), 1-12.