

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GELENEKSEL VE MODÜLER YAPI SİSTEMLERİNİN MALİYET, İNŞAAT SÜRESİ, ENERJİ
VERİMLİLİĞİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer ÖZBEY

EYLÜL 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

**GELENEKSEL VE MODÜLER YAPI SİSTEMLERİNİN MALİYET, İNŞAAT SÜRESİ,
ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI
ANALİZİ**

Ömer ÖZBEY

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 / 09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 26 / 09 / 2025

Tez Danışmanı : Doç Dr. Hasan Basri BAŞAĞA
ORCID : - - -

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

Hayat; sabır, azim ve emekle anlam kazanan uzun bir yolculuktur. Bu tez çalışması da yalnızca akademik bir uğraşın değil, aynı zamanda bana inanan, yolumu aydınlatan ve her koşulda destek olan kıymetli insanların katkılarının bir yansımasıdır.

Öncelikle kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Hasan Basri Başağa'ya, danışmanım olduğu ilk günden itibaren, engin bilgi birikimi, vizyonu ve yol göstericiliğiyle bana rehberlik etmiş ve büyük katkılar sağlamıştır. Tez çalışmam süresince paylaştığı değerli bilgiler, gösterdiği sabır, yapıcı eleştiriler ve emekleriyle her zorluğun üstesinden gelmemde yolumu kolaylaştırmış; cesaret verici tutumuyla bana daima güç kaynağı olmuştur. Bu süreçte akademik ve kişisel gelişimime sunduğu katkılar için kendisine minnet ve teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Trabzon'da bulunduğum süre boyunca her türlü desteğini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Volkan Kahya, Prof. Dr. Ahmet Can Altunışık, Prof. Dr. Cenk Demirkır, Dr. Öğr. Üyesi Bayram Ali Temel, Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi Okur, Arş. Gör. Dr. Ümit Bahadır ve Arş. Gör. İpek Naz Semercioğlu'na şükranlarımı sunarım. Onların akademik birikimleri ve ilham verici katkıları, sürecin çok daha verimli ve öğretici olmasını sağlamıştır. Ayrıca, bu süreçte manevi destekleri ve değerli dostluklarıyla yanımda olan kıymetli arkadaşlarım Mohammad Alhasan ve Onur Açıl'a da içten teşekkürlerimi sunarım.

Fedakârlıklarıyla bana yol gösteren, sevgileriyle güç veren kıymetli babam Orhan ÖZBEY ve annem Rukiye ÖZBEY'e; hayat yolculuğumda her zaman yanımda olan sevgili ablam Rabia ile kardeşlerim Kübra ÖZBEY ve Mira Melek Nur ÖZBEY'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca dualarıyla her daim yanımda olan ÖZBEY ailesinin tüm fertlerine, kıymetli amcalarıma ve çocukluğumdan bu yana her anımı paylaştığım, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli kuzenim Cumali ÖZBEY'e de minnettarlığımı ifade ediyorum. Onların manevi desteği, bu yolculuğun en kıymetli dayanaklarından biri olmuştur.

Tüm bu katkıların birleşimiyle ortaya çıkan bu tez çalışmasının, akademik alana ve fayda sağlamasını ve bana emek veren, destek olan herkesin hakkını bir nebze olsun yansıtabilmesini diliyorum. Bu eser, yalnızca benim değil; bana inanan, yol gösteren ve desteğini esirgemeyen herkesin ortak başarısıdır.

Ömer ÖZBEY

Trabzon,2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Geleneksel ve Modüler Yapı Sistemlerinin Maliyet, İnşaat süresi, Enerji verimliliği ve Yaşam Döngüsü Açısından Karşılaştırmalı Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Hasan Basri Başağa’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29/09/2025

Ömer ÖZBEY

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖN SÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOL VE KISALTMLAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Çalışması	3
1.2.1. Yaklaşık Maliyet ile İlgili Yapılan Çalışmalar	3
1.2.2. Proje Süresi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	11
1.2.3. Enerji Verimliliği Analizi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	22
1.2.4. Yaşam Döngüsü Analizi(LCA) ile İlgili Yapılan Çalışmalar	28
1.2.5. Anahtar Kelime Analizi.....	37
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	41
1.4. Çalışmada İncelenen Sistemlerinin Özellikleri ve Yapım Teknikleri.....	41
1.4.1. Betonarme Yapı Sistemi	42
1.4.2. Çelik Yapı Sistemi	43
1.4.3. Ahşap Yığma Yapı Sistemi.....	44
1.4.4. Bağdadi Ahşap Yapı Sistemi	44
1.4.5. Payandalı Ahşap Yapı Sistemi	45
1.4.6. Payandasız Ahşap Yapı Sistemi	46
1.4.7. Taş Yığma Yapı Sistemi	46
1.4.8. Tuğla Yığma Yapı Sistemi.....	47
1.4.9. Donatılı Tuğla Yığma Yapı Sistemi	48
1.4.10. Donatılı Gaz Beton Panel Yapı Sistemi.....	48
1.4.11. Hafif Çelik Prefabrik Yapı Sistemi.....	49

1.4.12. CLT (Çapraz Lamine Ahşap) Yapı Sistemi	50
1.5. Maliyet Hesabı.....	51
1.6. Proje Süresi Hesabı.....	53
1.7. Enerji Verimliliği Analizi	56
1.8. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA).....	58
1.9. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)	59
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	63
2.1. Yöntem	63
2.1.1. Yapı Sisteminin Belirlenmesi	64
2.1.2. Yapı Sistemlerinin Uygulanacağı Alanın Belirlenmesi.....	65
2.1.3. Yapı Sistemlerinin BIM Tabanlı Modellemesi.....	66
2.1.4. Yaklaşık Maliyet Hesaplanması	76
2.1.5. Proje Sürelerinin Belirlenmesi	81
2.1.6. Enerji Verimliliği Analizi	88
2.1.7. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)	89
2.1.8. Ağırlıkların Belirlenmesi (AHP Yöntemi)	91
3. BULGULAR	96
3.1. Maliyet Analizlerinin Karşılaştırılması	96
3.2. Proje Sürelerinin Karşılaştırılması	101
3.3. Enerji Verimliliği Analizi Değerlendirilmesi.....	103
3.4. LCA Analizinin Değerlendirilmesi.....	115
3.5. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Sonuçlarına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	121
4. TARTIŞMALAR.....	123
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
6. KAYNAKLAR.....	130
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GELENEKSEL VE MODÜLER YAPI SİSTEMLERİNİN MALİYET, İNŞAAT SÜRESİ, ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Ömer ÖZBEY

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA

2025, Sayfa 140

Bu tez çalışması, afet sonrası yeniden yapılaşma sürecinde kullanılabilecek yapı sistemlerinin mühendislik, ekonomik ve çevresel boyutlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Kahramanmaraş ili örneğinde yürütülen analizlerde, betonarme, çelik, ahşap (yığma, payandalı ve payandasız , bağdadi), yığma (taş, tuğla, donatılı) ve modüler (CLT, prefabrik hafif çelik, gaz beton panel) olmak üzere 12 farklı sistem incelenmiştir.

Çalışma kapsamında her sistem için maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) parametreleri dikkate alınmış; analizler Autodesk Revit–Insight ve Tally yazılımları aracılığıyla yürütülmüştür. Parametrelerin ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle belirlenmiş ve çok kriterli karar verme yaklaşımıyla nihai değerlendirme yapılmıştır. Bulgular, modüler ve prefabrik sistemlerin inşa süresini önemli ölçüde kısalttığını, karbon salımını azalttığını ve enerji verimliliğinde üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Buna karşın, betonarme yapıların dayanım açısından avantajlı olmakla birlikte çevresel etki ve üretim süresi bakımından en dezavantajlı sistem olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, afet sonrası hızlı, sürdürülebilir ve enerji verimli yapı üretimi için modüler ve hafif çelik sistemlerin en uygun alternatifler olduğu saptanmıştır. Bu bulgular, gelecekteki yeniden inşa stratejilerinde çevresel duyarlılığı yüksek ve ekonomik çözümlerin geliştirilmesine bilimsel zemin oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Afet Sonrası Yeniden Yapılaşma; BIM; Yaklaşık Maliyet; Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA); Enerji Verimliliği; Proje Süresi; Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

SUMMARY

M.Sc. Thesis

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL AND MODULAR BUILDING SYSTEMS IN TERMS OF COST, CONSTRUCTION TIME, ENERGY EFFICIENCY, AND LIFE CYCLE ASSESSMENT

Ömer ÖZBEY

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering, Graduate Program
Supervisor: Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA
2025, 140 Pages

This thesis presents a comparative evaluation of various building systems that can be utilized in post-disaster reconstruction processes from engineering, economic, and environmental perspectives. The analyses, conducted for the province of Kahramanmaraş, examine eleven different systems, including reinforced concrete, steel, timber (masonry, braced and unbraced frame, Bağdadi), masonry (stone, brick, reinforced), and modular systems (CLT, prefabricated light steel, autoclaved aerated concrete panel). For each system, cost, project duration, energy efficiency, and life cycle assessment (LCA) parameters were considered. The analyses were performed using Autodesk Revit-Insight and Tally software. The parameter weights were determined through the Analytic Hierarchy Process (AHP), and a multi-criteria decision-making framework was applied for the final evaluation. The results revealed that modular and prefabricated systems significantly reduce construction time, lower carbon emissions, and exhibit superior performance in energy efficiency. In contrast, reinforced concrete structures, while advantageous in terms of structural strength, were found to be the least favorable in terms of environmental impact and construction duration. Ultimately, the study concludes that modular and light steel systems represent the most suitable alternatives for rapid, sustainable, and energy-efficient construction in post-disaster contexts. These findings provide a scientific basis for developing environmentally sensitive and economically feasible reconstruction strategies for future disaster scenarios.

Keywords: Post-Disaster Reconstruction; BIM; Approximate Cost; Life Cycle Assessment (LCA); Energy Efficiency; Project Duration; Analytic Hierarchy Process (AHP)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa NO

Şekil 1.	Literatürde yaklaşık maliyet tahmini için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi.....	11
Şekil 2.	Literatürde proje süresi analizi için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi	22
Şekil 3.	Literatürde enerji verimliliği analizi için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi.	28
Şekil 4.	Literatürde yaşam döngüsü (lca) analizi için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi.....	37
Şekil 5.	Maliyet tahmini literatüründe kavramsal yoğunluk ve kümelenme analizi	38
Şekil 6.	Proje süresi analizi literatüründe kavramsal yoğunluk ve kümelenme analizi ..	39
Şekil 7.	Enerji verimliliği literatüründe kavramsal yoğunluk ve kümelenme analizi	40
Şekil 8.	Yaşam döngüsü analizi (lca) literatüründe kavramsal yoğunluk ve kümelenme analizi	40
Şekil 9.	Betonarme yapı sisteminin genel görünümü.....	43
Şekil 10.	Çelik yapı sisteminin genel görünümü.....	43
Şekil 11.	Ahşap yığma yapı sisteminin genel görünümü	44
Şekil 12.	Bağdadi ahşap yapı sisteminin genel görünümü.....	45
Şekil 13.	Payandalı ahşap yapı sisteminin genel görünümü	45
Şekil 14.	Payandasız ahşap yapı sisteminin genel görünümü	46
Şekil 15.	Taş yığma yapı sisteminin genel görünümü.....	47
Şekil 16.	Tuğla yığma yapı sisteminin genel görünümü	47
Şekil 17.	Donatılı tuğla yığma yapı sisteminin genel görünümü	48
Şekil 18.	Donatılı gaz beton panel yapı sisteminin genel görünümü	49
Şekil 19.	Hafif çelik prefabrike yapı sisteminin genel görünümü.....	49
Şekil 20.	CLT ahşap yapı sisteminin genel görünümü	50
Şekil 21.	Çalışmada izlenen metodolojik süreç	64
Şekil 22.	Çalışma alanının coğrafi konumu	66
Şekil 23.	Betonarme yapı revit modellemesi	68
Şekil 24.	Çelik yapı ve hafif çelik yapı revit modellemesi	69
Şekil 25.	Ahşap yığma yapı ve clt ahşap yapı revit modellemesi	70
Şekil 26.	Bağdadi ahşap yapı revit modellemesi.....	71

Şekil 27.	Payandalı ahşap yapı ve payandasız ahşap yapı revit modellemesi.....	72
Şekil 28.	Taş yığma yapı revit modellemesi.....	73
Şekil 29.	Tuğla yığma yapı ve donatılı yığma yapı revit modellemesi.....	74
Şekil 30.	Donatılı gaz beton panel yapı revit modellemesi.....	75
Şekil 31.	Betonarme yapı gant diyagramı	85
Şekil 32.	Çelik yapı gant diyagramı	85
Şekil 33.	Ahşap yığma yapı gant diyagramı	85
Şekil 34.	Bağdadi ahşap yapı gant diyagramı	86
Şekil 35.	Payandalı ahşap yapı gant diyagramı.....	86
Şekil 36.	Payandasız ahşap yapı gant diyagramı.....	86
Şekil 37.	Taş yığma yapı gant diyagramı	86
Şekil 38.	Tuğla yığma yapı gant diyagramı	86
Şekil 39.	Donatılı yığma yapı gant diyagramı.....	87
Şekil 40.	Gaz beton panel yapı gant diyagramı.....	87
Şekil 41.	Prefabrik yapı gant diyagramı.....	87
Şekil 42.	Clt ahşap yapı gant diyagramı.....	87
Şekil 43.	Yapı sistemleri seçiminde ahp temelli karar hiyerarşisi.....	92
Şekil 44.	Ahşap yapı türlerinin kendi içindeki maliyet karşılaştırması.....	97
Şekil 45.	Yığma yapı türlerinin kendi içindeki maliyet karşılaştırması.....	98
Şekil 46.	Modüler yapı sistemlerinin kendi içindeki maliyet karşılaştırması	99
Şekil 47.	Tüm yapı sistemlerinin yaklaşık maliyet karşılaştırması	101
Şekil 48.	Yapı sistemlerinin toplam yapım sürelerinin karşılaştırmalı analizi	102
Şekil 49.	Betonarme yapı soğutma ısıtma yükleri.....	104
Şekil 50.	Çelik yapı soğutma ısıtma yükleri	105
Şekil 51.	Ahşap yığma yapı soğutma ısıtma yükleri.....	106
Şekil 52.	Bağdadi ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri.....	107
Şekil 53.	Payandalı ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri	107
Şekil 54.	Payandasız ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri	108
Şekil 55.	Taş yığma yapı soğutma ısıtma yükleri.....	109
Şekil 56.	Tuğla yığma yapı soğutma ısıtma yükleri	110
Şekil 57.	Donatılı tuğla yığma yapı soğutma ısıtma yükleri	110
Şekil 58.	Donatılı gaz beton panel yapı soğutma ısıtma yükleri.....	111
Şekil 59.	Hafif çelik prefabrik yapı soğutma ısıtma yükleri	112
Şekil 60.	Clt ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri	111

Şekil 61. Tüm yapı sistemleri için toplam ısıtma ve soğutma yükleri karşılaştırması.....	112
Şekil 62. Farklı yapı sistemlerinin küresel ısınma potansiyeli (gwp) değerleri	117
Şekil 63. Farklı yapı sistemlerinin asitleme potansiyeli (ap) değerleri	118
Şekil 64. Farklı yapı sistemlerinin ötrofikasyon potansiyeli (ep) değerleri	119
Şekil 64. Farklı yapı sistemlerinin ozon oluşumu potansiyeli (sfp) değerleri.....	120
Şekil 65. Farklı yapı sistemlerinin yenilenemez birincil enerji tüketimi (penr) değerleri.....	121



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İş kalemleri listesi	78
Tablo 2. Proje süresi analizinde kullanılan iş kalemleri ve işçi sayıları	82
Tablo 3. Yaşam döngüsü aşamaları	90
Tablo 4. İkili karşılaştırma yönteminde kullanılan önem skalası	93
Tablo 5. Rastgele tutarlılık indeksi	93
Tablo 6. AHP anketlerinde ana ve alt kriterler için değerleri	94
Tablo 7. Ağırlıklandırma sonuçları	95
Tablo 8. Yapı sistemlerinin çok kriterli değerlendirme skorları	123

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİN

T_i	: İş kaleminin tamamlanma süresi
Q_i	: İş kaleminin toplam miktarı
P_i	: İş gücünün günlük üretim kapasitesi
EF_i	: Erken bitiş
ES_i	: Erken başlangıç
LS_i	: Geç başlangıç
LF_i	: Geç bitiş
a_{ij}	: AHP’de i. kriterin j. kritere göre göreceli önemi
N_{ij}	: Normalize edilmiş değer
λ_{max}	: En büyük özdeğer
CI	: Tutarlılık indeksi
CR	: Tutarlılık oranı
RI	: Rastgele indeks değeri
w_i	: Kriter ağırlıkları
A1–A3	: Ham madde çıkarımı ve malzeme üretimi
A4–A5	: Şantiye süreci ve taşımalar
AHP	: Analitik hiyerarşi prosesi
ANN	: Yapay sinir ağları
AP	: Asitlenme potansiyeli
B1–B7	: Kullanım evresi
BIM	: Yapı Bilgi Modellemesi
C1–C4	: Ömrün sonu aşamaları
CBR	: Vaka tabanlı akıl yürütme
CCPM	: Kritik zincir proje yönetimi
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
CLT	: Çapraz lamine ahşap
CPM	: Kritik yol yöntemi
D1–D3	: Geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyeli
EDI	: Kazanılmış süre endeksi

EDM	: Kazanılmış süre yönetimi
EP	: Ötrofikasyon potansiyeli
ES	: Kazanılmış zaman
EVM	: Kazanılmış değer yönetimi
GA	: Genetik algoritma
GWP	: Küresel ısınma potansiyeli
HVAC	: Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme
KOBİ	: Küçük ve orta büyüklükte işletme
LCA	: Yaşam döngüsü değerlendirmesi
LBMS	: Lokasyon tabanlı yönetim sistemi
LOB	: Çizgisel operasyon dengeleme
MAE	: Ortalama mutlak hata
MAPE	: Ortalama mutlak yüzde hatası
P6	: Primavera P6 proje planlama yazılımı
PCM	: Faz değişim malzemesi
PENR	: Yenilenemez birincil enerji tüketimi
PERT	: Program değerlendirme ve gözden geçirme tekniği
PMBOK	: Proje yönetimi bilgi birikimi kılavuzu
RACPM	: Kaynak-faaliyet kritik yol yöntemi
RBEDM	: Risk tabanlı kazanılmış süre yönetimi
SFP	: Fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli
SPCE	: Spektral fotoelektrik dönüşüm verimliliği
SVM	: Destek vektör makineleri
TRNSYS	: Transient system simulation tool

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Barınma, insanın en temel ihtiyaçlarından biri olarak, toplumsal gelişmenin her aşamasında kritik bir rol oynamaktadır. İnsanlık tarihi boyunca, barınma ihtiyacı yalnızca bireysel bir gereklilik olmamış, aynı zamanda toplumların sosyo-ekonomik yapılarının şekillenmesinde de önemli bir etken olmuştur. Barınma, sadece fiziksel bir mekân talebi değil, aynı zamanda yaşam kalitesini doğrudan etkileyen bir faktördür. Geçmişte, doğal koşulların ve yerleşim alanlarının etkisiyle barınma çözümleri genellikle daha basit ve yerel yöntemlerle sağlanırken, günümüzde bu ihtiyaçlar daha karmaşık hale gelmiştir. Artan dünya nüfusu, göç hareketleri ve hızla ilerleyen kentleşme süreci, barınma ihtiyacını sürekli olarak büyütmemekte, bununla birlikte sürdürülebilir, ekonomik ve çevre dostu çözümler geliştirilmesini gerektirmektedir.

Kentleşme ile, şehirlerdeki nüfus yoğunluğu artmakta ve buna paralel olarak konut talebi hızla yükselmektedir. Bu durum, inşaat sektöründe büyük bir çeşitliliği de beraberinde getirmiştir. Her biri farklı ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlanmış olan konut tipleri ve inşaat yöntemleri, sektördeki çeşitli yapı türlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Betonarme, çelik, ahşap, yığma, prefabrik ve modüler yapılar, günümüzde konut ihtiyacını karşılamak amacıyla tercih edilen temel yapı sistemleridir. Ancak, bu yapı türlerinin her biri farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Yalnızca yapıların inşa edilmesi değil, aynı zamanda uzun vadeli yaşam kalitesinin sağlanması da bu yapı türlerinin seçiminde etkili olan önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle, sadece barınma ihtiyacını karşılamak değil, aynı zamanda yapıların çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

Son yıllarda, geleneksel yapı yöntemlerinin ötesinde, inşaat sektöründe daha verimli ve sürdürülebilir çözümler arayışı ön plana çıkmıştır. Bu bağlamda, yapı türlerinin seçiminde maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü analizi (LCA) faktörleri devreye girmektedir. Maliyet, projelerin gerçekleştirilebilirliği açısından kritik bir parametre iken, proje süresi de projelerin hızla tamamlanabilmesi adına büyük bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, enerji verimliliği, çevresel etkileri azaltma ve enerji tüketimini minimize etme hedefleri doğrultusunda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ayrıca, yapıların yaşam

döngüsü boyunca gerçekleştirdiği çevresel etkilerin yanı sıra, ekonomik ve sosyal etkilerinin de değerlendirilmesi, sürdürülebilir inşaat çözümleri için temel bir gereklilik halini almıştır.

Çevresel etkilerin azaltılması ve enerji verimliliği, özellikle son yıllarda büyük bir önem kazanmıştır. Yapıların inşa edilmesinden kullanım sürecine kadar olan her aşamada, kaynak kullanımı ve enerji tüketimi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, inşaat sektöründe çevresel etkilerin yanı sıra, yapıların ekonomik sürdürülebilirliğini sağlamak da kritik bir öneme sahiptir. Modüler ve prefabrik yapı sistemleri, çevresel ve ekonomik açıdan daha verimli çözümler sunabilmektedir. Bu sistemler, proje süresini kısaltmakta, maliyetleri düşürmekte ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Ancak, her yapı türünün kendine özgü avantajları ve zorlukları vardır ve en uygun yapı türünün seçilmesi, projenin özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Deprem sonrası, yıkılan veya yıkılması gereken binaların yerlerine yenilerinin yapılması süreci çok sancılı olmaktadır. Binaların çok büyük kısmı betonarme olduğundan belirli zaman diliminde üretilmesi gereken bina stoğunun fazlalığı hammadde (çimento, demir vs), insan kaynağı (nitelikli usta) ve iş ekipmanı konusunda sıkıntılar yaratmaktadır. Bu bağlamda modüler ve prefabrik sistemler özellikle köylerde hem hızlı kurulum hem de mevcut sisteme alternatif olması açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sistemlerin yaygın kullanımı betonarme yapılarının kaynak sıkıntısını da azaltacaktır.

Bu tez çalışmasında, farklı imalat ve malzeme tiplerine sahip 12 adet yapı türünün tip proje üzerinden maliyet, enerji verimliliği, yaşam döngüsü (LCA) ve proje süresi analizi yapılmış ve bu parametreler doğrultusunda karşılaştırılması yapılmıştır. Bu kapsamda, yapı türleri olarak betonarme, çelik, ahşap (yığma, payandalı ve payandasız çerçeve yapılar, bağdadi), yığma (taş, tuğla, donatılı) ve modüler (CLT, prefabrik hafif çelik, gaz beton panel) yapılar incelenmiştir. Yapıların nihai karşılaştırması incelenen parametrelerin birleştirilmesi sonucunda yapılmıştır. Parametrelerin birleştirilmesinde kullanılan ağırlıklar AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışmada, yerleşim bölgesi olarak Kahramanmaraş seçilmiştir. 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremlerin sonrası büyük hasarların meydana geldiği bu ilde yapılacak modüler ve prefabrik sistemlerin etkinliğinin araştırılması ilerleyen yıllarda meydana gelebilecek olası depremler için de hazırlık olacaktır. Ayrıca, yapılacak yapıların kırsal hayat ile uyum içinde sürdürülebilir ve doğa dostu olması bu yapı türlerinin olumlu bir katkısı olacaktır.

1.2. Literatür Çalışması

Bu tez çalışmasında, Geleneksel ve Modüler Yapı Sistemlerinin maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü parametreleri açısından karşılaştırmalı bir analizinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, mevcut literatürde yer alan çalışmalar incelenerek, konuya ilişkin mevcut bilgi birikimi değerlendirilmiş ve bu çalışmanın özgün katkılarını vurgulayacak bir çerçeve oluşturulmuştur. İncelenen çalışmalar, araştırma probleminin daha iyi anlaşılmasına, kullanılan yöntemlerin belirlenmesine ve bu tez kapsamında ele alınacak analizlerin dayanaklarını oluşturmaya hizmet etmektedir.

1.2.1. Yaklaşık Maliyet ile ilgili Yapılan Çalışmalar

Yaklaşık maliyet hesaplamaları, inşaat projelerinin planlama ve karar verme süreçlerinde en kritik unsurlardan biridir. Özellikle erken tasarım aşamalarında proje bütçesinin öngörülmesi, kaynakların etkin kullanımının sağlanması ve maliyet risklerinin kontrol altına alınması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, literatürde farklı yöntemler, yaklaşımlar ve teknolojiler kullanılarak yaklaşık maliyet tahminine yönelik pek çok çalışma yapılmıştır. Aşağıda bu çalışmalar detaylı biçimde incelenmektedir.

Otoyol projeleri gibi büyük ölçekli altyapı yatırımlarında, doğru maliyet tahmini karar alma süreçlerinin başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, Hegazy ve Ayed (1998) tarafından geliştirilen yapay sinir ağı (ANN) tabanlı parametrik model, sınırlı sayıda girdi değişkeniyle yüksek doğrulukta maliyet tahmini yapılmasına imkân tanımaktadır. Geleneksel regresyon yöntemlerine kıyasla daha esnek ve doğrusal olmayan ilişkilere duyarlı bir yapıya sahip olan model, altyapı projeleri için güvenilir bir tahmin aracı olarak öne çıkmaktadır (Hegazy & Ayed, 1998).

Briggs vd. (1998), maliyet-etkililik analizlerinde geleneksel parametrik yaklaşımlara alternatif olarak bootstrap yöntemine dayalı olasılıksal bir analiz modeli sunmuşlardır. Bu yaklaşım, güven aralıklarının örneklemeyle dayalı şekilde oluşturulmasına olanak tanımaktadır (Briggs vd., 1998).

Hegazy ve Moselhi (2000), bina projelerinin kavramsal maliyet tahmini için yapay sinir ağı (ANN) modelleri geliştirmiş ve bu modellerin doğrusal regresyon yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Model, parametrik girdiler ile

eğitilerek özellikle erken tasarım aşamasında kullanılabilecek güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır (Hegazy & Moselhi, 2000).

Kuyu inşaatı projelerinde maliyet tahmini için olasılıksal bir model sunan Jablonowski ve MacEachern (2009), regresyon analizine dayalı olarak kuyunun derinliği, lokasyonu ve ekipman türü gibi değişkenlerin maliyet üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Ayrıca, Monte Carlo benzeri yaklaşımlarla %95 güven aralığında tahminler üretilmiştir (Jablonowski & MacEachern, 2009).

Jablonowski ve MacEachern (2009) tarafından geliştirilen regresyon tabanlı maliyet modeli, kuyu inşaatı projelerinde belirleyici maliyet bileşenlerini istatistiksel olarak tanımlamaktadır. Veri seti, 100'den fazla proje verisiyle oluşturulmuş ve çoklu regresyon yöntemi ile analiz edilmiştir. Modelin güvenilirliği, tahmin aralıklarının oluşturulmasıyla daha da pekiştirilmiştir (Jablonowski & MacEachern, 2009).

Leung vd. (2010), maliyet tahmini süreçlerine katılan kişilerin yaşadığı stres düzeyleri ile organizasyonel destek yapıları arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışma sonucunda, destekleyici yönetim uygulamalarının hem bireysel performansı hem de tahmin doğruluğunu olumlu yönde etkilediği görülmüştür. (Leung vd., 2010)

Okmen ve Oztaş (2010) tarafından altyapı projelerine yönelik geliştirilen yaşam döngüsü maliyet analizinde Monte Carlo simülasyonu kullanılarak belirsizliklerin modellenmesi hedeflenmiştir. Bu yöntem, özellikle tasarımın ilk aşamalarında risklerin değerlendirilmesine imkân tanımakta ve maliyet hesaplamalarının daha güvenilir hale gelmesini sağlamaktadır (Okmen & Oztaş, 2010).

Leung vd. (2010), maliyet tahmini ekiplerinin stres düzeyleri ile kurumsal destek uygulamaları arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Bulgular, destekleyici organizasyonel yapıların ekip performansı ve tahmin doğruluğu üzerinde pozitif etkileri olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, mühendislik karar süreçlerinde psikososyal faktörlerin önemini ortaya koyan nadir örneklerden biridir (Leung vd., 2010).

Belirsizlik ve öznel kararların daha doğru şekilde modellenmesini amaçlayan Al-Hajj ve Sayers (2011), maliyet tahmini için bulanık mantık temelli bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yöntem, karar vericilerin deneyim ve sezgilerini matematiksel modele entegre etmeye olanak tanımakta ve özellikle erken planlama süreçlerinde güçlü bir araç olarak değerlendirilmektedir (Al-Hajj & Sayers, 2011).

Maliyet aşımalarının öngörülmesi ve önlenmesi konusunda proaktif çözümler geliştirmek amacıyla, Chou (2011) veri madenciliği temelli bir yaklaşım benimsemiştir.

Çalışmada karar ağacı ve ilişkilendirme kuralı teknikleri kullanılarak, proje özelliklerinin maliyet aşımı olasılığı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, proje yöneticilerine erken uyarı sistemleri kurma olanağı tanımakta ve potansiyel risklerin önceden belirlenmesine katkı sağlamaktadır (Chou, 2011).

BIM tabanlı verilerin çok boyutlu analizine dayanan bir diğer çalışma, Wang (2013) tarafından gerçekleştirilmiştir. OLAP (Online Analytical Processing) bilgi modeli aracılığıyla parametrik maliyet tahmini süreçleri BIM ortamına entegre edilerek, karar vericilerin senaryo bazlı analizler yapması sağlanmıştır. Bu sayede proje planlama süreçlerinin dijitalleştirilmesi ve maliyet kontrolünün gerçek zamanlı yapılabilirliği artırılmıştır (Wang vd., 2013).

Kim vd. (2013), parametrik maliyet tahmini süreçlerine OLAP (Online Analytical Processing) modellerinin entegrasyonunu sağlayarak BIM ortamında çok boyutlu veri analizine imkân tanıyan bir sistem önermiştir. Bu yapı, veri küplerini kullanarak farklı senaryolar altında interaktif maliyet analizi yapılmasını mümkün kılmaktadır (Kim vd., 2013).

El-Abbasy vd. (2013), mühendislik hizmetlerinin maliyet tahmini için yapay sinir ağı (ANN) temelli bir model geliştirmiştir. Model, geçmiş proje verileriyle eğitilmiş ve hizmet tipine bağlı olarak yüksek doğrulukta tahminler elde edilmiştir. Özellikle hizmetin türü, süresi ve uzmanlık seviyesi gibi değişkenlerle beslenen ağ mimarisi, geleneksel regresyon tekniklerinden daha iyi performans sergilemiştir (El-Abbasy vd., 2013).

Kim vd. (2013), parametrik maliyet tahmini ile BIM entegrasyonunu destekleyen OLAP (Online Analytical Processing) bilgi modelini kullanarak çok boyutlu analizlere olanak sağlayan bir yapı geliştirmiştir. OLAP sisteminin BIM ile entegrasyonu, kullanıcıların proje verilerini interaktif şekilde analiz etmesini ve farklı senaryolara göre maliyet tahminlerini kolaylıkla oluşturmasını mümkün kılmaktadır (Kim vd., 2013).

Aibinu ve Venkatesh (2014), Avustralya'daki maliyet danışmanlarının BIM teknolojisini benimseme düzeylerini ve karşılaştıkları zorlukları incelemiştir. Araştırma bulgularına göre, eğitim eksikliği ve yazılım uyumsuzlukları, BIM'in yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeller arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, "Lack of BIM training and software interoperability are major barriers in the widespread adoption by cost consultants" ifadesiyle durum özetlenmiştir (Aibinu & Venkatesh, 2014).

Maliyet yönetiminde dijitalleşme eğilimlerine katkı sunan çalışmalardan biri Marzouk ve Azab (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, PMBOK (Project Management

Body of Knowledge) çerçevesi doğrultusunda BIM tabanlı projeler için sistematik bir maliyet yönetim modeli geliştirilmiştir. Planlama, tahmin, bütçeleme ve kontrol süreçlerinin dijital entegrasyonu sayesinde maliyet takibi daha bütüncül ve otomatik hale getirilmiştir (Marzouk & Azab, 2014).

Risk analizi ve simülasyonun entegre kullanıldığı bir diğer çalışma, Lari ve Asgari (2014) tarafından İran'daki yol projeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Monte Carlo simülasyonu aracılığıyla belirsizlik aralıkları belirlenmiş ve bu sayede daha güvenilir maliyet ve süre tahminleri elde edilmiştir. Model, özellikle projelerdeki risk faktörlerini niteliksel olarak tanımlayıp sayısal simülasyonla değerlendirdiği için karar verme sürecine güçlü bir zemin sunmaktadır (Lari & Asgari, 2014).

Deprem güçlendirme projeleri gibi yüksek belirsizlik içeren alanlarda geleneksel tahmin yöntemlerinin sınırlılıklarını aşmak amacıyla, Jafarzadeh vd. (2014) tarafından yapay sinir ağı (ANN) tabanlı bir maliyet tahmin modeli geliştirilmiştir. İran'daki 100'den fazla güçlendirme projesinin verileriyle eğitilen model, özellikle yapı yaşı, kat sayısı ve kolon tipi gibi çok sayıda parametreyi dikkate alarak karmaşık veri yapılarıyla baş edebilmiştir (Jafarzadeh vd., 2014).

Kapsamlı geçmiş proje verilerinin yeniden kullanımına dayanan vaka tabanlı akıl yürütme (CBR) yaklaşımı, Koo vd. (2015) tarafından erken tasarım aşamasındaki maliyet tahminlerine uygulanmıştır. Model, benzer geçmiş projelerden öğrenerek yeni projelere ilişkin öngörülerde bulunmakta ve özellikle kategorik değişkenlerin revize edilmesiyle tahmin doğruluğu artırılmaktadır (Koo vd., 2015).

Chou ve Le (2015), yol kaplama rehabilitasyon projelerinin maliyet tahmini için geliştirdikleri ANN tabanlı model ile özellikle proje öncesi aşamalarda yüksek tahmin doğruluğuna ulaşmayı hedeflemişlerdir. Model, benzer projelerden elde edilen verilerle eğitilmiş ve tahmin başarısı istatistiksel olarak test edilmiştir (Chou & Le, 2015).

Mühendislik hizmetlerinin maliyet tahminine yönelik yapay sinir ağı temelli bir model geliştiren Yıldız vd. (2015), çok sayıda proje girdisiyle eğitilen çok katmanlı ağ mimarisi sayesinde yüksek doğruluk elde etmişlerdir. Hizmet süresi, uzmanlık düzeyi ve proje büyüklüğü gibi değişkenlerin dikkate alındığı bu çalışmada, geleneksel yöntemlere kıyasla daha esnek ve güvenilir bir yaklaşım sunulmuştur (Yıldız vd., 2015).

Yol bakım ve rehabilitasyon projelerinde maliyet tahmininin doğruluğunu artırmak amacıyla geliştirilen ANN tabanlı model, Ceylan vd. (2015) tarafından önerilmiştir. Model,

proje uzunluğu, yol genişliği ve trafik hacmi gibi parametreler ile eğitilmiş ve geleneksel regresyon tekniklerine kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamıştır (Ceylan vd., 2015).

Yol projelerinde maliyet ve zaman tahmininin belirsizliklerle daha doğru bir şekilde yapılabilmesi için geliştirilen modelde, Khalilzadeh vd. (2016) Monte Carlo simülasyonu ve hassasiyet analizini bir arada kullanmıştır. Bu yöntemle olası senaryolar altında tahmin edilen maliyet ve süre değerlerinin güven aralıkları hesaplanmış ve belirsizlikler bilimsel temelde yönetilmiştir. Bu yaklaşımın klasik deterministik tahmin yöntemlerine göre daha güçlü olduğunu belirtmişlerdir (Khalilzadeh vd., 2016).

Vafaei vd. (2016), İran'daki yol projelerinde zaman ve maliyet tahminini daha güvenilir kılmak amacıyla Monte Carlo simülasyonu temelli bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yöntem sayesinde, projelerin belirsizlikler karşısındaki duyarlılığı daha doğru şekilde analiz edilmiş ve güven aralıkları oluşturulmuştur (Vafaei vd., 2016).

Jin vd. (2016), vaka tabanlı akıl yürütme (CBR) modelini kullanarak inşaat projelerinde maliyet tahmini yapmış; özellikle kategorik değişkenlerin yeniden düzenlenmesi ile modelin tahmin doğruluğunun artırılabilirliğini göstermiştir. Model, geçmiş projelerle benzerlik analizine dayalı olarak hızlı ve doğru tahminler sunmaktadır (Jin vd., 2016).

Endonezya'da yaygın olan dükkân-ev tipi yapıların maliyet tahminine yönelik regresyon temelli bir model geliştiren Putra vd. (2018), özellikle yapı bileşenlerinin toplam maliyet içindeki yüzdesel katkılarını analiz etmiştir. Model, çoklu doğrusal regresyon yöntemiyle duvar, döşeme ve çatı gibi yapı elemanlarının maliyet üzerindeki etkisini açıklamaktadır (Putra vd., 2018).

Leung vd. (2018), maliyet tahmini yapan mühendislerin stres seviyeleri ile organizasyonel destek arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmada, yüksek destek düzeylerinin tahmin doğruluğu üzerinde olumlu etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, psikolojik etkenlerin teknik süreçlerdeki performansa etkisini ortaya koyan nadir örneklerden biridir (Leung vd., 2018).

Rafiei ve Adeli (2018) tarafından geliştirilen model, ekonomik göstergeleri (örneğin işçilik endeksi, malzeme fiyatları, enflasyon oranları) dinamik olarak analiz eden ve bu verileri inşaat maliyet tahmin sürecine entegre eden yenilikçi bir yapay zekâ sistemidir. Model, ekonomik belirsizliklerin yüksek olduğu dönemlerde dahi yüksek doğruluk sunarak klasik modellere üstünlük sağlamaktadır (Rafiei & Adeli, 2018).

Mahfouz vd. (2019), PMBOK (Proje Yönetimi Bilgi Birikimi Kılavuzu) maliyet yönetim süreçlerini BIM ortamında yapılandırarak süreç temelli bir maliyet tahmin modeli geliştirmiştir. Model, planlama, izleme ve kontrol gibi temel süreçlerin BIM'in veritabanı mimarisiyle entegre edilmesine odaklanmaktadır (Mahfouz vd., 2019).

Beton köprü temellerinin kavramsal maliyet tahmini için parametrik bir model geliştiren Fragkakis vd. (2019), erken aşama karar süreçlerine destek sağlayacak bir araç ortaya koymuştur. Çoklu doğrusal regresyon yöntemine dayanan modelde, temel geometrisi ve zemin tipi gibi girdilerin maliyet üzerindeki etkileri analiz edilmiştir (Fragkakis vd., 2019).

Betonarme köprü temellerinin kavramsal maliyet tahminine yönelik olarak ANN tabanlı bir model geliştiren Fragkakis vd. (2019), yapının geometrik ve zemin özelliklerine dayalı olarak yüksek doğrulukta öngörüler elde etmiştir. Model, özellikle erken aşama planlamalarda mühendislik karar süreçlerine katkı sunmaktadır (Fragkakis vd., 2019).

Konut projelerinde ihale öncesi proje süresinin tahmini için parametrik bir yaklaşım geliştiren Khosravi vd. (2020), proje boyutu, bina tipi ve kat sayısı gibi değişkenlere dayalı çoklu regresyon modeli oluşturmuştur. Model, sadece süre tahmininde değil, aynı zamanda maliyet ve kaynak planlamasına da katkı sağlamaktadır (Khosravi vd., 2020).

Topluluk öğrenmesi (ensemble learning) yöntemlerinin maliyet aşımalarını öngörmedeki başarısını test eden Kim vd. (2020), random forest, gradient boosting ve XGBoost gibi yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışma, topluluk yöntemlerinin tekil modellere kıyasla daha yüksek tahmin doğruluğu sunduğunu göstermiştir (Kim vd., 2020).

Su altyapısı sistemleri için regresyon tekniklerine dayalı tahmin modelleri geliştiren Marchionni vd. (2021), yapı bileşenleriyle maliyet arasındaki doğrusal ilişkileri analiz ederek pratik tahmin araçları ortaya koymuştur. Boru uzunluğu, çapı ve malzeme türü gibi değişkenlere dayalı oluşturulan modeller, küçük ve orta ölçekli altyapı projeleri için uygulanabilir bir yapı sunmaktadır (Marchionni vd., 2021).

Marchionni vd. (2021), su temini altyapısı projeleri için geliştirdikleri regresyon analizine dayalı maliyet tahmini modelleriyle hem inşaat hem de bakım maliyetlerini ayrı ayrı değerlendirmiştir. Bu ikili ayrım sayesinde, yaşam döngüsü bütçelemesi daha hassas bir şekilde yapılabilmektedir (Marchionni vd., 2021).

Tayland'daki şophouse projeleri özelinde regresyon temelli maliyet tahmin modelleri geliştiren Nawari ve Wang (2021), yapı bileşenlerinin toplam maliyet içindeki yüzdelерini

de analiz etmiştir. Model, toplam alan ve yapı tipi gibi değişkenleri dikkate alarak maliyet öngörülerinde yüksek doğruluk sağlamıştır (Nawari & Wang, 2021).

Zhang vd. (2022), otoyol projelerinde maliyet davranışlarının modellenmesi için istatistiksel öğrenme (statistical learning) tekniklerini uygulamış ve bu yöntemleri geleneksel parametrik modellerle karşılaştırmıştır. Çalışma, lasso regresyon ve destek vektör regresyonu gibi yöntemlerin maliyet tahmininde daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur (Zhang vd., 2022).

Bera vd. (2022), inşaat maliyet tahmininde karmaşık karar yapılarını daha etkin analiz edebilmek amacıyla bulanık AHP (Fuzzy-AHP) ve makine öğrenimi algoritmalarını bütünleştiren bir yöntem önermiştir. Özellikle öznitelik mühendisliği ile desteklenen bu yaklaşım, veri boyutunu etkili biçimde indirgerken tahmin doğruluğunu artırmıştır (Bera vd., 2022,).

Yüksek katlı binaların erken tasarım aşamasında maliyet tahmini zorluklarını aşmak amacıyla geliştirilen bir diğer model ise Zhang (2022) tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada, random forest, destek vektör makineleri (SVM) ve XGBoost algoritmaları karşılaştırılmış, en yüksek başarıyı random forest yöntemi göstermiştir. Model, yapı alanı, kat sayısı gibi parametrelerle çalışarak doğrusal olmayan ilişkileri etkin biçimde modelleyebilmiştir (Zhang vd., 2022).

Farklı makine öğrenimi algoritmalarının inşaat maliyet tahminindeki performanslarını karşılaştırmalı olarak inceleyen Jindal vd. (2022), random forest, destek vektör makineleri (SVM) ve yapay sinir ağı (ANN) gibi yöntemleri çeşitli hata ölçütleri ile değerlendirmiştir. Yapılan analizler sonucunda, ANN tabanlı modellerin tahmin doğruluğu açısından öne çıktığı görülmüştür (Jindal vd., 2022).

Yer altı boru döşeme projeleri için maliyet tahmini amacıyla açıklanabilir yapay zekâ modelleri geliştiren Bansal ve vd. (2022), karar destek sistemlerinin şeffaflığına katkı sunmayı amaçlamıştır. Çalışmada random forest ve gradient boosting gibi güçlü tahmin algoritmaları, SHAP ve LIME gibi yorumlama teknikleriyle desteklenmiştir. Böylece girdi parametrelerinin tahmin çıktısına etkileri net bir şekilde analiz edilebilmiştir (Bansal vd., 2022).

Gaur vd. (2022), maliyet tahmini doğruluğunu artırmak amacıyla Fuzzy-AHP (bulanık analitik hiyerarşi süreci) ile yapay sinir ağlarını (ANN) birleştiren melez bir model geliştirmiştir. Özellik mühendisliği ile elde edilen parametrelerin, ANN mimarisine

entegrasyonu sayesinde karar süreci hem sezgisel hem de veri temelli bir yapıya kavuşmuştur (Gaur vd., 2022).

Hashemi ve Atzeni (2022), yüksek katlı binalar için erken aşama maliyet tahmini yapmak amacıyla XGBoost ve Random Forest gibi makine öğrenimi algoritmalarını karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Modeller, ortalama mutlak hata (MAE) ve model yorumlanabilirliği gibi kriterlerle değerlendirilmiş; XGBoost algoritması en yüksek başarıyı göstermiştir (Hashemi & Atzeni, 2022).

Moeini vd. (2023), inşaat projelerinde daha hassas maliyet tahmini yapmak amacıyla, bulanık analitik hiyerarşi süreci (Fuzzy-AHP) ile yapay sinir ağlarını (ANN) birleştiren hibrit bir model geliştirmiştir. Uzman görüşlerine dayalı olarak belirlenen kriter ağırlıkları, ANN modeline girdi olarak verilmiş ve bu sayede hem sezgisel bilgi hem de veri temelli öğrenme bir araya getirilmiştir (Moeini vd., 2023).

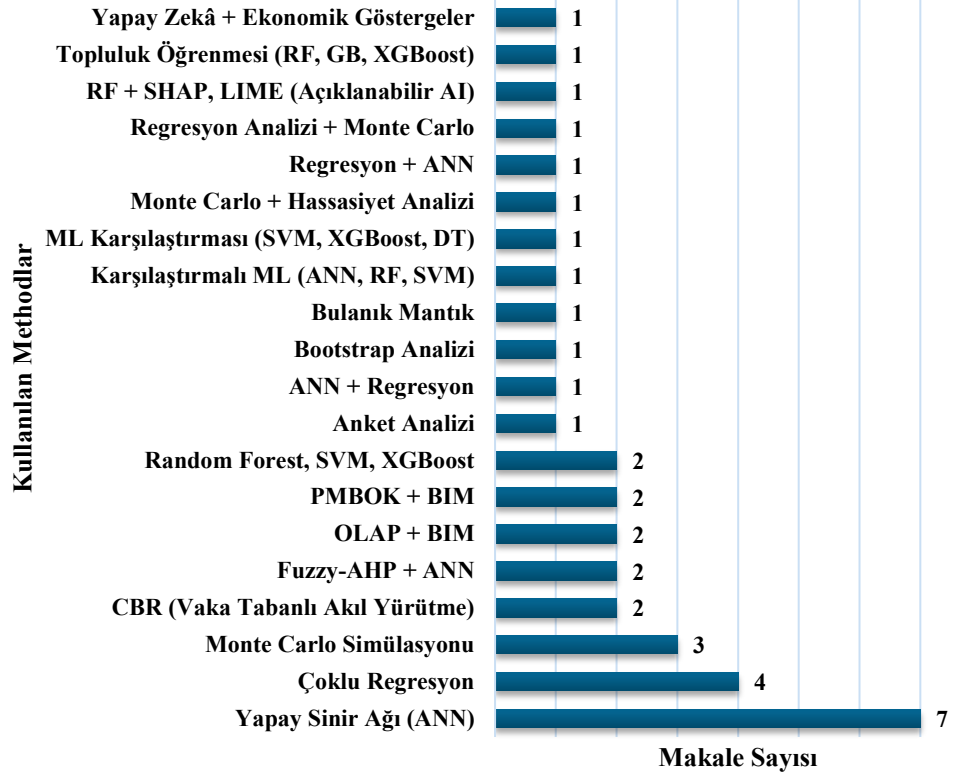
Yüksek katlı binaların erken aşama maliyet tahmininde geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşmak amacıyla, Zhou vd. (2023) makine öğrenmesine dayalı yeni bir model geliştirmiştir. Modelde, destek vektör makineleri (SVM), XGBoost ve karar ağaçları gibi yöntemler karşılaştırılmış, en iyi sonuç XGBoost algoritmasıyla elde edilmiştir. Bu çalışma, farklı bina fonksiyonları, alan ve kat sayısı gibi parametrik girdilerle yüksek doğruluklu tahmin yapılabileceğini göstermektedir (Zhou vd., 2023).

Cheng vd. (2023), bina projelerinin kavramsal maliyet tahminine yönelik olarak yapay sinir ağları ile regresyon tekniklerini birleştiren hibrit bir model önermiştir. Model, nicel ve nitel verileri bir arada değerlendirerek erken aşamada yüksek doğrulukta tahminler üretmektedir (Cheng vd., 2023).

Makine öğrenmesi algoritmalarının maliyet aşımalarını öngörme kapasitesini test eden bir diğer kapsamlı analiz ise Hamdan vd. (2024) tarafından gerçekleştirilmiştir. Logistic regression, karar ağacı, random forest ve yapay sinir ağı modelleri karşılaştırılmış; en yüksek doğruluk random forest yöntemiyle elde edilmiştir. Model performansları duyarlılık, özgüllük ve AUC gibi istatistiksel ölçütlerle değerlendirilmiştir (Hamdan vd., 2024).

Şekil 1’de, yaklaşık maliyet tahmininde kullanılan yöntemlerin dağılımı gösterilmektedir. Görsel incelemeye göre en sık kullanılan yöntem Yapay Sinir Ağı (ANN) olup 7 çalışmada tercih edilmiştir. Çoklu Regresyon (4 çalışma) ve Monte Carlo Simülasyonu (3 çalışma) diğer öne çıkan yöntemlerdir. Bunun yanında, PMBOK + BIM, OLAP + BIM, Fuzzy-AHP + ANN ve Random Forest–SVM–XGBoost gibi yaklaşımlar ikişer çalışmada yer almıştır. Diğer yöntemler ise yalnızca tekil çalışmalarda kullanılmıştır.

Bu durum, ANN ve regresyon tabanlı yöntemlerin literatürde baskınlığını koruduğunu, ancak BIM entegrasyonu ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin de giderek önem kazandığını göstermektedir.



Şekil 1. Literatürde yaklaşık maliyet tahmini için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi

1.2.2. Proje Süresi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Proje süresinin doğru şekilde öngörülmesi, inşaat yönetiminin temel başarı kriterlerinden biridir. Zaman yönetimi yalnızca maliyet ve kaliteyi değil, aynı zamanda kaynak planlamasını, iş güvenliğini ve paydaş memnuniyetini de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle literatürde, proje sürelerinin tahmin edilmesi, kontrolü ve optimize edilmesi amacıyla farklı yöntemler geliştirilmiş; geleneksel tekniklerden matematiksel modellere ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlara kadar geniş bir yelpazede araştırmalar yapılmıştır. Aşağıda bu kapsamda yürütülen çalışmalar detaylı biçimde sunulmaktadır.

Geleneksel Kritik Yol Yöntemi'nin (CPM), kaynak planlamasını yeterince dikkate almaması, inşaat projelerinde daha entegre planlama yaklaşımlarının geliştirilmesine neden

olmuştur. Bu bağlamda Lu ve Li (2003), CPM'nin kaynak kısıtlarını göz ardı etmesinin yol açtığı analitik eksiklikleri gidermek amacıyla "Kaynak-Faaliyet Kritik Yol Yöntemi" (Resource-Activity Critical-Path Method – RACPM) adlı yeni bir model önermiştir. RACPM, zaman-faaliyet düzlemine kaynak boyutunu entegre ederek, faaliyetlerin başlangıç/bitiş zamanlarını ve kayma sürelerini hem faaliyetler arası hem de kaynak-temelli öncelik ilişkilerine göre belirlemektedir. Ayrıca, "kaynak-eleştirel faaliyet" kavramını ortaya koyarak, kaynak kısıtlı projelerde klasik CPM'nin yetersiz kaldığı durumlarda daha gerçekçi bir analiz sunmayı amaçlamıştır. Çalışmada geliştirilen model, hem örnek problem çözümleriyle hem de ayak köprüsü inşaatı gibi saha uygulamalarıyla test edilmiştir. Bu yaklaşım, sezgisel (heuristik) ve deterministik tekniklerin birleşimiyle oluşturulan algoritmaya dayanmaktadır ve klasik CPM sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (Lu & Li, 2003).

Geleneksel Kritik Yol Yöntemi'nin (CPM), kaynak kısıtlarını dikkate almaması nedeniyle, proje planlamasında gerçekçi sonuçlar üretmediği birçok çalışmada vurgulanmıştır. Bu soruna çözüm olarak Lu ve Li (2003), zaman-faaliyet düzlemine kaynak boyutunu entegre eden ve kaynak-eleştirel faaliyet kavramını içeren "Kaynak-Faaliyet Kritik Yol Yöntemi"ni (RACPM) geliştirmiştir. Bu yöntem, kaynak ve faaliyet önceliklerini birlikte ele alarak kayma süresi ve faaliyet zamanlamasını daha gerçekçi biçimde belirlemektedir. Önerilen model, hem örnek problem çözümleriyle hem de ayak köprüsü inşaatı gibi uygulamalarla test edilmiştir. Sonuçlar, klasik CPM'ye kıyasla daha bütüncül planlama imkânı sunduğunu göstermektedir (Lu & Li, 2003a).

Geleneksel Kritik Yol Yöntemi (CPM), faaliyetlerin zamanlamasında etkili olmakla birlikte, kaynak sınırlamaları söz konusu olduğunda gerçekçi sonuçlar üretmekte yetersiz kalmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla Lu ve Li (2003), zaman-faaliyet düzlemine kaynak boyutunu da dahil eden ve kaynak-eleştirel faaliyet kavramını tanımlayan "Kaynak-Faaliyet Kritik Yol Yöntemi"ni (RACPM) geliştirmiştir. RACPM, kaynak teknolojileriyle bütünleşik öncelik ilişkileri kurarak faaliyet başlangıç ve bitiş zamanlarını daha gerçekçi biçimde hesaplamaktadır. Yöntem, klasik CPM ile karşılaştırmalı olarak hem örnek problem çözümleri hem de ayak köprüsü inşası gibi saha uygulamaları ile test edilmiştir (Lu & Li, 2003b).

Herroelen ve Leus (2005) tarafından yürütülen kapsamlı bir literatür taraması, proje zamanlamasında belirsizliklerin etkisini sistematik biçimde analiz etmektedir. Araştırmacılar, deterministik modellerin yetersizliklerine dikkat çekerek, belirsizlik altında

zamanlama yapmaya yönelik çeşitli simülasyon, senaryo analizi ve robust optimizasyon tekniklerinin araştırmalarda daha fazla yer alması gerektiğini savunmuşlardır. Bu yönüyle çalışma, modern planlama algoritmaları için kuramsal bir zemin oluşturmaktadır (Herroelen & Leus, 2005).

Kenley ve Seppänen (2006), inşaat projelerinde iş akışı sürekliliğini ve kaynak kullanım verimliliğini artırmak amacıyla Lokasyon Tabanlı Yönetim Sistemi'ni (LBMS) önermişlerdir. CPM'ye kıyasla mekânsal unsurları da süreç analizine dahil eden LBMS, üretim akışının sürekli ve dengeli olmasını sağlamakta; bu da planlama doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Çalışma, sistemin pratik uygulamalarda proje süresi ve kaynak kullanımındaki iyileştirmelere katkı sağladığını ortaya koymuştur (Kenley & Seppänen, 2006).

Benzer bir şekilde, Zhang ve vd. (2007), proje zamanlamasına ilişkin karar verme süreçlerini deneyim temelli bilgiyle desteklemek amacıyla bir bilgi tabanlı sistem (Knowledge-Based System – KBS) geliştirmiştir. Sistem, kullanıcıdan alınan proje bilgilerini, kısıtları ve CPM verilerini birleştirerek çizelgeleme önerilerinde bulunmakta; bu yönüyle yalnızca matematiksel algoritmalara dayalı yaklaşımların ötesine geçmektedir. Böylece, kullanıcı deneyimine dayalı daha esnek ve uyarlanabilir zamanlama çözümleri sunulabilmektedir (Zhang vd., 2007).

Proje planlamasında kaynak takvimi kısıtlarının göz ardı edilmesi, planlama doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sorunu ele alan Lu ve Lam (2008), her kaynağın yalnızca belirli zaman aralıklarında kullanılabileceği senaryoları dikkate alan bir CPM algoritması geliştirmiştir. Model, kaynak takvimi kısıtlarını doğrudan zamanlama algoritmasına entegre ederek faaliyet başlangıç ve bitiş zamanlarını daha doğru biçimde hesaplamaktadır. Bu sayede, özellikle karmaşık takvim yapılarının olduğu projelerde planlama güvenilirliği artırılmıştır (Lu & Lam, 2008).

Çoklu proje yönetimi bağlamında kaynak paylaşımı ve zamanlamaya dair karmaşıklıklar, geleneksel çizelgeleme yöntemlerinin sınırlılıklarını daha da görünür hâle getirmiştir. Bu kapsamda Zhou, AbouRizk ve Al-Battineh (2009), Kritik Zincir Proje Yönetimi (Critical Chain Project Management – CCPM) yaklaşımını birden fazla projenin eşzamanlı planlanmasında kullanmışlardır. Çalışmada, kaynak havuzlarının paylaşımı durumunda tampon sürelerinin etkin kullanımıyla kaynak çatışmaları ve gecikmelerin minimize edilebileceği ortaya konmuştur. Simülasyon tabanlı deneyler ve vaka analizleriyle

desteklenen model, geleneksel CPM uygulamalarına göre daha yüksek zaman verimliliği sunmuştur (Zhou vd., 2009).

Hegazy ve Menesi (2010), CPM'nin faaliyetleri kaba bloklar hâlinde ele almasının getirdiği doğruluk kayıplarını azaltmak için "Kritik Yol Parçaları" (Critical Path Segments – CPS) yöntemini önermektedir. CPS, faaliyetleri küçük zaman segmentlerine ayırarak, SS ve FF gibi karmaşık ilişkileri basitleştirilmiş FS ilişkilerine dönüştürmekte ve şebeke karmaşıklığını azaltmaktadır. Üç farklı vaka çalışması üzerinde yapılan testler, yöntemin toplam kayma sürelerini ve kritik yol analizlerini daha doğru biçimde gerçekleştirdiğini ortaya koymuştur (Hegazy & Menesi, 2010).

Hegazy ve Menesi (2010), CPM'nin faaliyetleri kaba zaman blokları şeklinde modellemesinin sınırlılıklarını ele alarak, "Kritik Yol Parçaları" (Critical Path Segments – CPS) adlı alternatif bir yöntem önermiştir. CPS, faaliyetleri küçük zaman segmentlerine ayırarak, kompleks ilişkileri (SS, FF) daha basit FS ilişkilerine dönüştürmekte ve böylece şebeke karmaşasını azaltmaktadır. Bu sayede, toplam kayma süreleri daha doğru biçimde hesaplanabilmekte ve kritik yolun daha net tanımlanması sağlanmaktadır. Geliştirilen yöntem, üç farklı vaka çalışması üzerinde doğrulanmıştır (Hegazy & Menesi, 2010).

EVM'nin zamana duyarlı tahmin yeteneklerini iyileştirmek üzere Kalman filtresi ile entegre edilen model, Kim ve Reinschmidt (2010) tarafından geliştirilmiştir. İki gerçek projeye uygulanan model, geçmiş hatalardan öğrenerek daha doğru zaman tahminleri üretebilmekte ve özellikle erken safhalarda daha hassas, probabilistik tahmin imkânı sunmaktadır. Kalman filtresi sayesinde, tahminler proje ilerledikçe dinamik olarak güncellenebilmektedir (Kim & Reinschmidt, 2010).

Kalman filtresi temelli süre tahmin yöntemleri üzerine olmuştur. Kim ve Reinschmidt (2010), Earned Value Management (EVM) ile Kalman filtresini entegre ederek, geçmiş veri hatalarından öğrenebilen ve ilerleyen aşamalarda sürekli güncellenebilen bir zaman tahmin modeli geliştirmiştir. Model, olasılık temelli yapısıyla geleneksel deterministik modellere kıyasla belirsizlikleri daha iyi yönetebilmekte ve projenin erken evrelerinde dahi güvenilir tahminler sunabilmektedir (Kim & Reinschmidt, 2010).

İş gücü verimliliği, proje süresi tahminlerinde önemli bir değişkendir. Bu bağlamda, Jarkas ve Bitar (2012), Kuveyt'teki inşaat projelerinde anket ve saha verilerine dayalı olarak iş gücü verimliliğini etkileyen 45 faktörü analiz etmiştir. Bulgular, proje planlamasında insan kaynağına ilişkin çevresel ve organizasyonel unsurların dikkate alınması gerektiğini ortaya

koymuş, bu faktörlerin doğru şekilde modellenmesinin çizelgeleme doğruluğunu artırabileceğini göstermiştir (Jarkas & Bitar, 2012).

Proje planlamasında belirsizliklerin modellenmesinde bulanık mantığın etkinliğini inceleyen Ponz-Tienda, Pellicer ve Yepes (2012), üçgensel ve trapezoidal bulanık sayılarla tanımlanmış faaliyet süreleri, maliyetler ve üretim değerlerine dayalı bir model geliştirmiştir. Modelde kullanılan α -cut parametresi sayesinde belirsizlik düzeyi kontrol edilebilmekte, bu da geleneksel deterministik yöntemlere göre daha gerçekçi planlama sonuçlarının elde edilmesini sağlamaktadır (Ponz-Tienda vd., 2012).

Yinelenen iş kalemleri içeren projelerde, geleneksel CPM yönteminin yetersiz kaldığı durumlara çözüm olarak, Ammar (2013), Çizgisel Operasyon Dengeleme (Line of Balance – LOB) ve CPM yöntemlerini entegre eden dört aşamalı bir planlama yaklaşımı önermektedir. Bu model, LOB hesaplamaları, faaliyet sürelerinin belirlenmesi, mantıksal ilişkilerin modellenmesi ve CPM analizi aşamalarını kapsamaktadır. Tekrarlayan projelerde grafiksel karmaşıklıkları azaltarak daha sistematik ve sürdürülebilir çizelgeleme sonuçları elde edilmesini sağlamaktadır (Ammar, 2013).

Zhao, Hwang ve Yu (2013) tarafından geliştirilen çok kriterli karar verme temelli model, belirsizlik içeren ortamlarda proje süresi tahmininin iyileştirilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Model, PERT ve simülasyon temelli yöntemlerin karar analizi ilkeleriyle birleştirilmesini sağlamış ve özellikle kamu altyapı projelerinde senaryo analizleri üzerinden test edilmiştir. Bulgular, farklı risk profillerine göre esnek çizelgeleme yapılabildiğini ve karar vericilere daha etkin planlama desteği sunulduğunu göstermiştir (Zhaovd., 2013).

Nguyen vd. (2013), çok katlı bina projelerinde kontrol edici faaliyetlerin rolünü analiz ederek, Monte Carlo simülasyonuna dayalı bir süre tahmin modeli geliştirmiştir. Kritik faaliyetlere odaklanılan bu yaklaşım, modelleme sürecini sadeleştirerek uygulama kolaylığı sağlamakta ve geleneksel yöntemlerin karmaşıklıklarını aşmayı hedeflemektedir. Bu çalışma, istatistiksel dağılımlar aracılığıyla daha gerçekçi tahminler yapılabileceğini göstermiştir (Nguyen vd., 2013).

Kaynak kısıtlı ortamlarda proje zamanlaması problemi için Zhang, Wang ve Wang (2015) tarafından simülasyon temelli bir optimizasyon çerçevesi geliştirilmiştir. Çalışmada, Monte Carlo simülasyonu ile kaynak dağılımı ve görev sıralaması modellenmiş; ardından genetik algoritmalar kullanılarak optimum çizelgeleme elde edilmiştir. Model, özellikle kaynakların sınırlı olduğu büyük ölçekli projelerde zamanlama doğruluğunu ve kaynak kullanım verimliliğini artırmaktadır (Zhangvd., 2015).

Earned Value Management (EVM) sistemlerinin tahmin performansını iyileştirme amacıyla yapılan ampirik bir değerlendirme, Batselier ve Vanhoucke (2015) tarafından gerçekleştirilmiştir. 51 farklı projeye ait zaman ve maliyet verilerinin incelendiği çalışmada, EVM, Earned Schedule (ES) ve Earned Duration (ED) yöntemleri karşılaştırılmış ve özellikle zaman tahminlerinde ED ve ES'in klasik EVM yöntemine göre daha yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Zaman tahmin performansının proje ilerleme yüzdesine bağlı olarak değiştiği ve erken aşamalarda ED yönteminin daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir (Batselier & Vanhoucke, 2015).

Batselier ve Vanhoucke (2015), EVM tabanlı süre ve maliyet tahmin yöntemlerinin ampirik değerlendirmesini yapmak amacıyla 51 gerçek projeden elde edilen veri setini analiz etmiştir. Çalışmada Earned Schedule (ES), Earned Duration (ED) ve klasik EVM yöntemleri proje ilerleme yüzdesine göre karşılaştırılmış ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) ile değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, ED yöntemi zaman tahmininde en yüksek doğruluğa ulaşırken, maliyet tahmininde ise klasik EVM öne çıkmıştır. ED yöntemi özellikle erken proje aşamalarında daha güvenilir süre tahmini sağlamıştır (Batselier & Vanhoucke, 2015).

Chen, Chen ve Lin (2016), EVM sistemini geliştirmek amacıyla logaritmik dönüşüm ve regresyon analizlerine dayanan yeni bir formülasyon sunmuşlardır. Geliştirilen bu model, hem zaman hem de maliyet tahmininde geleneksel EVM'ye kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamış ve özellikle projelerin planlanan takvime uyumu açısından daha hassas sonuçlar üretmiştir (Chen vd., 2016).

VM'nin uzantısı olan Earned Duration Index (EDI) kullanılarak geliştirilen Üstel Düzgünleştirme (Exponential Smoothing) modeli, Khamooshi ve Abdi (2017) tarafından önerilmiştir. Model, 19 gerçek projede test edilmiş ve zaman tahmininde klasik EVM'ye göre daha yüksek doğruluk sağlamıştır. ED tabanlı bu yaklaşım, proje süresini dinamik olarak tahmin etme ve güncelleme imkânı sunarak özellikle erken karar alma süreçlerini desteklemektedir (Khamooshi & Abdi, 2017).

Finansal planlama ile proje süresi ilişkisini irdeleyen Alavipour ve Arditi (2018), sabit süreli projelerde finansman maliyetlerini minimize eden doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Model, proje süresi değişmeden, nakit akış zamanlamasının optimize edilerek finansman yükünün azaltılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, proje planlama sürecine maliyet boyutunun entegre edilmesinde önemli bir katkı sunmaktadır (Alavipour & Arditi, 2018).

Olivieri, Seppänen ve Granja (2018), geleneksel CPM'nin sınırlılıklarını aşmak amacıyla Lokasyon Tabanlı Yönetim Sistemi'ni (Location-Based Management System – LBMS) önermiştir. Çalışmada, üç farklı projede CPM ile LBMS tabanlı çizelgeler karşılaştırılmış ve LBMS'nin kaynak kesintilerini azalttığı, ekip dağılımını dengelediği ve iş akışını iyileştirdiği ortaya konmuştur. Yer-zaman matrislerine dayanan bu yaklaşım, özellikle tekrarlayan işlerin sürekliliğini ve kaynak sürekliliğini dikkate alarak planlama doğruluğunu artırmaktadır (Olivieri vd., 2018).

Chen (2018), inşaat süreci başlamadan önce proje süresini öngörebilmek için kapsam, ekip, iletişim, risk ve inovasyon gibi planlama aşamasında elde edilen verileri analiz etmiştir. Çalışmada Doğrulamalı Faktör Analizi (CFA) ve zamana bağlı regresyon yöntemleri kullanılmış, elde edilen model %85'in üzerinde doğrulukla tahmin yapılabileceğini göstermiştir. Bu yaklaşım, geleneksel inşaat sürecine bağlı EVM tekniklerine kıyasla erken uyarı mekanizması olarak dikkat çekmektedir (Chen, 2018).

Lee, Lee ve Alleman (2018) ise, Güney Kore'de gerçekleştirilen dört ultra-kritik 1000 MW kömür yakıtlı termik santral projesi üzerinden, büyük ölçekli enerji projelerinde süre tahminine yönelik hibrit bir model geliştirmiştir. CPM/PERT teknikleri Monte Carlo simülasyonu ile entegre edilerek, projelerin tamamlanma süresine ilişkin %85 güven düzeyinde 64–68 aylık bir aralık öngörülmüştür. Çalışmada, iş gücü grevleri ve güvenlik kazaları gibi belirsizlik faktörlerinin etkileri de değerlendirilmiştir (Lee vd., 2018).

Earned Schedule (ES) yaklaşımının etkinliğini artırmak amacıyla Ballesteros-Pérez ve vd. (2019), ESmin ve ESmax adını verdikleri iki yeni metrik geliştirmiştir. Bu metrikler, 26 farklı deterministik EVM modeli üzerinde yapılan simülasyonlar ve ampirik analizlerle test edilmiştir. Sonuçlar, özellikle aktivite düzeyinde yapılan hesaplamaların proje süresi tahmininde geleneksel ES, ED ve ES(e) metriklerine kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir (Ballesteros-Pérez vd., 2019).

Andrade, Martens ve Vanhoucke (2019), Earned Schedule (ES) ve Earned Duration Management (EDM) yaklaşımlarını karşılaştırmak amacıyla büyük ölçekli projelerden elde edilen gerçek verileri kullanarak bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, takvime uyum göstergesi olan “c-factor” ve proje düzenlilik göstergesi tanımlanmış, zaman tahmin doğruluğunun yalnızca ilerleme oranıyla değil, aynı zamanda plan takibine olan bağlılıkla da önemli ölçüde ilişkili olduğu belirlenmiştir (Andrade vd., 2019).

İnşaat projelerinde maliyet ve süre tahmininin erken aşamalarda yapılması, proje başarısını önemli ölçüde etkileyen unsurlardan biridir. Bu doğrultuda Zhao vd. (2019),

projelerin ilk üçte birlik kısmında toplanan süre performansı verilerine dayanarak yapay sinir ağları ve regresyon tekniklerini içeren bir hibrit model geliştirmiştir. Model, proje erken safhasında tamamlanma süresine ilişkin yüksek doğrulukta tahminler sunarak karar vericilerin zamanında müdahale edebilmesini sağlamaktadır. Bu çalışma, erken tahmin sistemleri ile geleneksel yöntemler arasındaki boşluğu kapatmayı amaçlamaktadır (Zhao vd., 2019).

Maronati ve Petrovic (2019), nükleer santral gibi büyük ölçekli altyapı projelerinde süre ve maliyet belirsizliklerinin analizi için Monte Carlo simülasyonuna dayalı bir yaklaşım geliştirmiştir. Korelasyonlu rastgele değişkenler kullanılarak gerçekleştirilen bu analiz, proje süresine dair istatistiksel dağılımlar elde edilmesini sağlamış ve yatırım planlamasında kullanılabilecek güçlü bir karar destek aracı sunmuştur. Ortalama proje süresi yaklaşık 10,7 yıl olarak öngörülürken, belirsizlik payı %16,2'lik standart sapma ile tanımlanmıştır (Maronati & Petrovic, 2019).

Zaman serisi analizine dayalı bir diğer yaklaşım, Zhao vd. (2019) tarafından önerilmiştir. Çalışma, proje sürecinin ilk evrelerinden itibaren toplanan süre performans verilerini kullanarak tamamlanma süresini tahmin etmeye yönelik bir yapay sinir ağı modeli geliştirmiştir. Bu model, projelerin erken safhalarında yüksek doğruluk oranlarıyla tahmin yapılmasına olanak tanımakta ve zamanında müdahaleye imkân sunmaktadır. Özellikle regresyon temelli modellerle karşılaştırıldığında, öğrenme kapasitesi sayesinde daha etkin sonuçlar verdiği vurgulanmıştır (Zhao vd., 2019).

Lee vd. (2019), BIM tabanlı planlama araçlarının zaman tahmin performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma, geleneksel planlama araçlarıyla karşılaştırmalı olarak, BIM'in özellikle karmaşık bina projelerinde fazlar arası süre tahmininde daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. BIM'in sunduğu görsel senaryo analizi ve çakışma tespiti gibi yetenekler, çizelgeleme doğruluğunu ve öngörülebilirliği artırmıştır (Lee vd., 2019).

İnşaat projelerinde yapay zekâ ve veri odaklı modelleme yaklaşımlarının artan kullanımı, zaman tahmini süreçlerinde de dönüşüm yaratmaktadır. Bu kapsamda Cheng vd. (2020), LSTM (Long Short-Term Memory) algoritmasına dayalı bir model geliştirerek proje ilerleme verilerine dayalı olarak tamamlanma süresi tahmini yapmışlardır. Model, zaman serisi içerisindeki geçmiş bilgileri uzun süre hatırlayarak, geleneksel tahmin modellerine göre daha isabetli sonuçlar üretmiştir. Elde edilen bulgular, LSTM tabanlı yaklaşımların

özellikle uzun süreli ve karmaşık projelerde güçlü bir karar destek aracı olabileceğini ortaya koymuştur (Cheng vd., 2020).

Su vd. (2020), proje süresi tahmininde parametre belirsizliğini dikkate alan Bulanık Ağırlandırılmış Regressyon (Fuzzy Weighted Regression – FWR) yaklaşımını önermiştir. Bu yöntem, özellikle uzman görüşlerine dayalı olarak belirlenen belirsiz parametrelerin tahmin sürecine entegrasyonunu sağlayarak daha güvenilir sonuçlara ulaşmayı hedeflemektedir. FWR modeli, geleneksel regresyon yöntemlerine kıyasla, gerçek hayattaki veri bulanıklığını daha başarılı biçimde temsil edebilmiştir (Su vd., 2020).

Zhang vd. (2020), inşaat projelerinde tahmin performansını artırmak üzere Principal Component Analysis (PCA) ile veri boyutunu indirgemiş ve ardından destek vektör regresyon (SVR) algoritmasıyla proje süresi tahmini gerçekleştirmiştir. Bu yöntem, veri fazlalığının getirdiği karmaşıklığı azaltırken, SVR ile elde edilen yüksek doğruluk düzeyi sayesinde geleneksel yöntemlere kıyasla daha optimize sonuçlar üretmiştir (Zhang vd., 2020).

İnşaat projelerinde işçi üretkenliğinin sıcak hava koşullarından önemli ölçüde etkilendiği bilinmektedir. Bu kapsamda Chan, Yi ve Wong (2020), Hong Kong'da gerçekleştirdikleri saha araştırmasında, sıcak hava koşullarında çalışan inşaat işçileri için ideal çalışma-dinlenme sürelerini belirlemek üzere fizyolojik ölçümler ve üretkenlik analizleri yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, 45 dakikalık çalışma ve 15 dakikalık dinlenme döngüsünün hem güvenlik hem de verimlilik açısından en uygun model olduğu tespit edilmiştir. Bu tür davranış modellerinin, proje süresi tahmin modellerine entegre edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Chan vd., 2020).

Cheng, Tsai ve Do (2021), inşaat projelerinde tamamlanma süresini daha isabetli tahmin edebilmek amacıyla, ardışık (sequence) ve ardışık olmayan (non-sequence) faktörleri aynı modelde birleştiren yeni bir makine öğrenimi yaklaşımı önermişlerdir. RNN ve LSTM algoritmalarına dayalı model, özellikle geleneksel CPM yöntemlerine göre daha yüksek tahmin doğruluğu sağlamış; aktivite bağımlılığı olmayan faktörlerin modele eklenmesi, tahmin performansını önemli ölçüde artırmıştır (Cheng, Tsai, & Do, 2021).

Wang vd. (2021), proje zaman çizelgesi optimizasyonuna yönelik hibrit bir model geliştirerek, yapay sinir ağı (ANN) ile genetik algoritmayı (GA) entegre etmiştir. Model, kaynak kısıtlarını ve kritik yol üzerindeki değişkenleri eş zamanlı olarak değerlendirerek, en kısa süreli ve en dengeli planlama yapısını elde etmeyi amaçlamaktadır. Sonuçlar, melez

algoritmaların tek başına kullanılan yapay zekâ modellerine kıyasla daha başarılı planlama çıktıları ürettiğini göstermektedir (Wang vd., 2021).

Zhou vd. (2021), proje süresi tahmini için gözetimsiz öğrenme tekniklerinden K-means kümeleme algoritmasını kullanarak benzer proje örüntülerini sınıflandırmış ve her sınıf için ayrı tahmin modelleri geliştirmiştir. Bu yaklaşım, projelerin türüne göre özelleştirilmiş tahmin imkânı sunduğu için, genelleşici modellerden daha düşük hata oranlarıyla çalışmıştır. Özellikle büyük veri kümeleriyle çalışılan projelerde, algoritmanın doğruluk performansı önemli ölçüde artmıştır (Zhou vd., 2021).

İnşaat projelerinde zaman tahmini amacıyla kullanılan geleneksel yöntemlerin doğruluk sınırlılıkları, karar destek sistemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda Awada vd. (2021), sahadan elde edilen verileri doğrudan zaman çizelgesiyle ilişkilendiren bir makine öğrenimi yaklaşımı sunmuşlardır. Geliştirilen model, geçmiş projelerden öğrenme yeteneğine sahip olup, zamanlama süreçlerinde meydana gelen gecikmelerin ve sapmaların daha erken aşamalarda tespit edilmesini sağlamaktadır. Modelin, anlık güncellenebilen yapısı sayesinde kaynak optimizasyonuna da katkı sağladığı belirtilmiştir (Awada vd., 2021).

Zaman tahmini konusunda belirsizliklerin modellenmesinde Bayesçi yaklaşımlar da önemli bir potansiyel taşımaktadır. Tang vd. (2021), proje süresine ilişkin tolerans limitlerinin belirlenmesinde Bayes teoremini kullanarak sürekli güncellenebilir ve daha güvenilir tahminler yapılabileceğini göstermiştir. Bayesçi modeller, klasik deterministik yöntemlerin ötesine geçerek dinamik planlama süreçlerinde istatistiksel sağlamlık sağlamaktadır (Tang vd., 2021).

Nguyen, Do ve Cheng (2022), çok katlı bina projelerinde süre tahmini için kontrol edici faaliyetler (controlling activities) temelli bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Model, proje planlama yazılımından alınan verilerle beslenerek kritik olmayan ancak projeyi doğrudan etkileyen faaliyetlerin sürece etkisini dikkate almaktadır. Elde edilen bulgular, kontrol aktivitelerinin hesaba katıldığı bu modelin, geleneksel CPM'ye kıyasla daha doğru ve uygulanabilir süre tahminleri sunduğunu ortaya koymuştur (Nguyen vd., 2022).

Kazanılmış Değer Yönetimi (Earned Value Management EVM), projelerin zaman ve maliyet performansının izlenmesinde sıkça kullanılmasına karşın, bazı sınırlılıklar barındırmaktadır. Bu çerçevede Proaño-Narváez vd. (2022), Ekvador'daki tamamlanmış projelerde EVM uygulayarak geçmiş zaman ve maliyet performanslarını analiz etmiş ve bu yöntemin gelecek projelerde kontrol aracı olarak kullanım potansiyelini değerlendirmiştir.

Bulgular, EVM'nin maliyet sapmalarını ve zaman performansını belirlemede etkili bir çerçeve sunduğunu göstermektedir (Proaño-Narváez vd., 2022).

Proje süresi tahminlerinde geleneksel Earned Duration Management (EDM) yönteminin yetersizliklerini gidermek amacıyla, Arabpour Roghabadi ve Moselhi (2022) tarafından Risk Tabanlı EDM (RBEDM) modeli geliştirilmiştir. Bu model, yalnızca kritik faaliyetler üzerinde odaklanmakta ve bu faaliyetlerle ilişkili risk faktörlerini dikkate alarak süre tahmininde yeni bir risk ayarlama katsayısı (RAFCr) tanımlamaktadır. Modelin kullanımı sayesinde, kritik olmayan faaliyetlerin performansının genel süre tahminine olan olumsuz etkisi ortadan kaldırılmış ve gelecekteki belirsizlikler daha doğru öngörülebilmiştir (Arabpour Roghabadi & Moselhi, 2022).

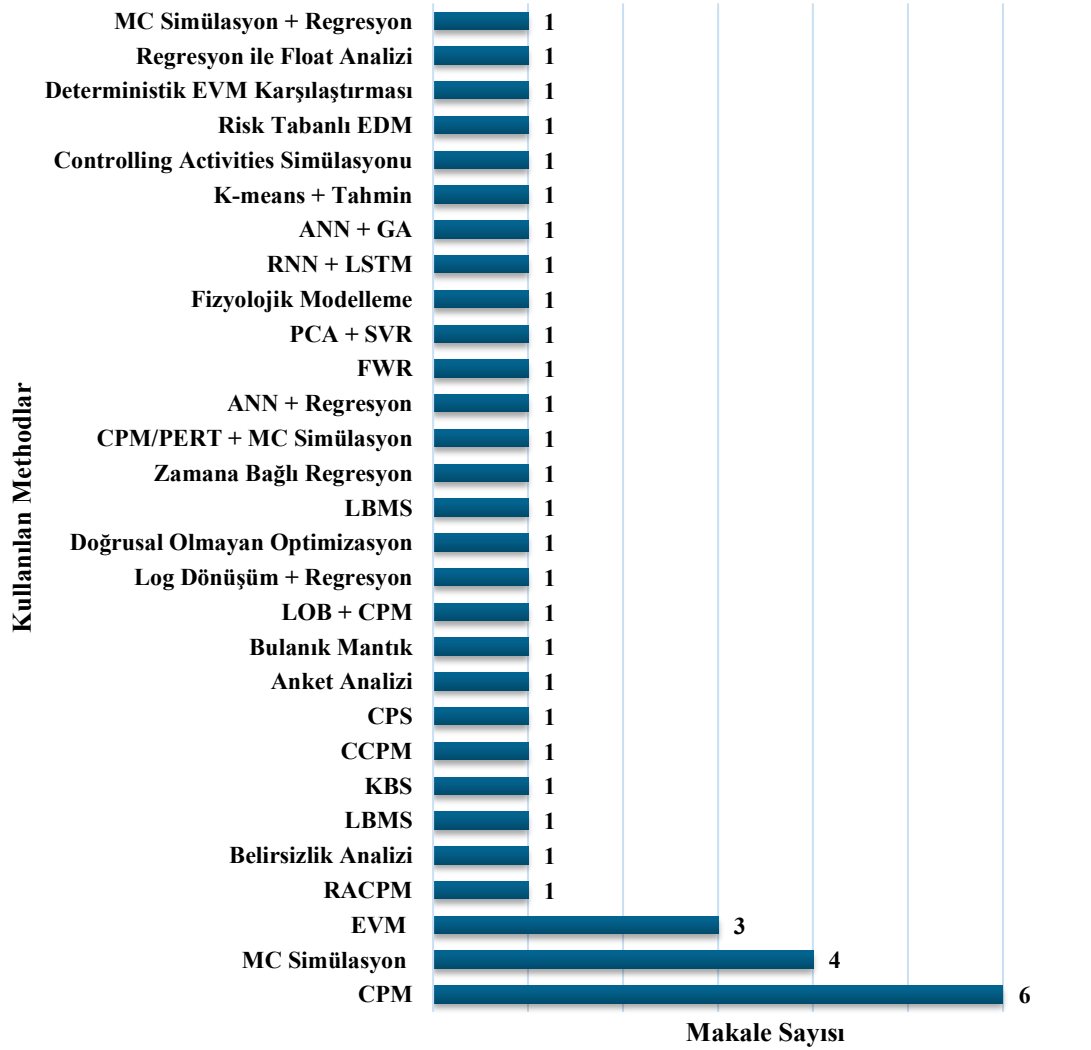
Deterministik EVM tabanlı süre tahmin yöntemlerinin doğruluk ve istikrar açısından karşılaştırıldığı bir diğer kapsamlı çalışma, Barrientos-Orellana vd. (2022) tarafından yürütülmüştür. Çalışmada, 27 farklı deterministik tahmin yöntemi, 4100 yapay proje ağı üzerinde Pearson, Spearman ve Kendall korelasyon katsayıları kullanılarak test edilmiştir. Bulgular, “AT + PD – ESmin” formülasyonunun hem hata oranları (MSE, MAPE) açısından hem de istikrar bakımından en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuştur (Barrientos-Orellana vd., 2022).

Süre tahmininin doğruluğunu etkileyen bir diğer önemli faktör olan float (zaman boşluğu) tüketimi, Sakka ve El-Sayegh (2024) tarafından incelenmiştir. Regresyon analizleriyle desteklenen çalışmada, aktiviteler arasındaki float kullanımının plansız tüketiminin hem proje süresinde hem de maliyet yapısında olumsuz sonuçlar doğurduğu belirlenmiştir. Araştırma, float yönetiminin sadece zaman tamponu olarak değil, aynı zamanda stratejik bir planlama aracı olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Sakka & El-Sayegh, 2024).

Bachar vd. (2025), küçük ve orta ölçekli inşaat işletmelerinde (KOBİ) güvenlik yatırımlarının proje maliyeti ve verimliliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Monte Carlo simülasyonu ve polinom regresyon modeli kullanılarak, 30 projeden elde edilen anket verileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, güvenliğe ayrılması gereken optimal yatırım oranının yaklaşık %3.8 olduğunu ve bu oranın mevcut sektör ortalamasından daha yüksek olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu da proje planlamasında güvenlik maliyetlerinin etkin entegrasyonunun önemini göstermektedir (Bachar vd., 2025).

Şekil 2’de çalışma kapsamında analiz edilen 55 makalede kullanılan zaman tahmini ve proje planlama yöntemlerinin dağılımı sunulmaktadır. Görsel incelemeye göre, literatürde

en çok tercih edilen yöntem Kritik Yol Yöntemi (CPM) olup, toplam 6 farklı çalışmada doğrudan veya temel bileşen olarak kullanılmıştır. Bu durum, CPM'nin hem uygulama kolaylığı hem de yaygın kabul görmüş yapısı nedeniyle hâlâ literatürdeki ağırlığını koruduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Literatürde proje süresi analizi için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi

1.2.3. Enerji Verimliliği Analizi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Enerji verimliliği, sürdürülebilir yapı tasarımının ve inşaat sektöründeki çevresel etkilerin azaltılmasının en önemli unsurlarından biri olarak görülmektedir. Binalarda enerji tüketiminin büyük bir kısmı ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gibi kullanım

aşamasına bağlı faaliyetlerden kaynaklanmakta; bu nedenle enerji verimliliğinin artırılması hem ekonomik maliyetlerin düşürülmesi hem de karbon salınımlarının azaltılması açısından kritik rol oynamaktadır. Literatürde, farklı yapı sistemleri, malzeme türleri ve tasarım yaklaşımlarının enerji performansına etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli yöntem ve stratejiler geliştirmiştir. Aşağıda bu kapsamda gerçekleştirilen araştırmalar ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

Saini ve Mande (2014), Hindistan'daki bir kamu binasında saha verileri kullanarak enerji tüketimini analiz etmiş; HVAC sistemleri, aydınlatma ve kullanıcı davranışlarının enerji yüklerine etkilerini detaylandırmış, bina yönetim sistemleriyle %12–18 oranında tasarruf sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

Enerji performansı analizlerinde özelleştirilmiş simülasyonların rolüne vurgu yapan Buonomano ve Palombo (2014a), geliştirdikleri dinamik simülasyon kodu ile konut tipolojilerine yönelik yıllık enerji tüketimini analiz etmiş ve söz konusu yazılımın EnergyPlus gibi ticari araçlara alternatif olabilecek doğruluk ve esneklik sunduğunu göstermiştir. Bu kod, özellikle güneş enerjisi ve HVAC yüklerinin bir arada değerlendirildiği senaryolarda başarıyla uygulanmıştır.

Yazılım temelli performans modellemelerinde özelleştirilmiş kodların kullanımı da dikkat çekmektedir. Buonomano ve Palombo (2014b), geliştirdikleri dinamik simülasyon yazılımı ile bina geometrisi, yapı malzemesi, iklim verisi ve sistem karakteristiklerini dikkate alarak enerji yüklerini analiz etmiş ve bu modelin farklı bina tipolojileri (konut, ticari bina, okul) üzerinde yüksek doğrulukla çalıştığını, TRNSYS gibi ticari yazılımlarla karşılaştırıldığında rekabetçi bir alternatif sunduğunu göstermiştir.

Enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda mevcut yapı stoğunun iyileştirilmesi, bina ölçeğinde önemli kazanımlar sağlamaktadır. Eicker vd. (2014) tarafından Almanya'nın farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilen çalışmada, yalıtım kalınlığı, pencere türleri ve hava sızdırmazlığı gibi parametrelerin yıllık ısıtma yükü üzerindeki etkileri EnergyPlus yazılımı ile modellenmiştir. Simülasyonlara ek olarak geri ödeme süreleri analiz edilmiş ve pasif stratejilerin ısıtma yükünü %60'a kadar azaltabileceği ortaya konmuştur.

Binaların enerji performansının çok kriterli karar destek yöntemleriyle değerlendirilmesi amacıyla Zhang vd. (2016), bulanık mantıkla bütünleştirilmiş AHP yöntemi geliştirmiştir. Model, enerji tüketimi, konfor, maliyet ve çevresel etki gibi faktörleri içermekte ve saha verileriyle desteklenmiştir. Bulgular, bina kabuğu ve HVAC sistemlerinin ağırlıklı olarak enerji performansı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Çatı sistemlerinin enerji verimliliği üzerindeki etkisini değerlendiren Al-Obaidi vd. (2016), Malezya’da beş farklı çatı tipini DesignBuilder ile simüle etmiş ve yansıtıcı/yeşil çatılarla iç sıcaklıkların düşürüldüğünü, %14’e kadar enerji tasarrufu sağlandığını göstermiştir.

Enerji talebinin azaltılmasına yönelik pasif stratejileri ele alan Rahimpour vd. (2017), Avustralya’nın farklı iklim bölgelerinde PCM entegreli yapıların HVAC taleplerini EnergyPlus ile simüle ederek, Hobart ve Melbourne gibi serin iklimli şehirlerde %20’ye yakın düşüşler kaydetmişlerdir. Faz değişim malzemelerinin hem enerji tasarrufu sağlama hem de talep yanıtı programlarına katkı potansiyeli sunduğu ortaya konmuştur.

Nem geçişi kaynaklı enerji performansı sorunlarına odaklanan Wan, Huang ve Xu (2018) ise, higroskopik yapı malzemeleri için Fourier dönüşümüne dayalı bir nem transfer modeli geliştirmiştir. Bu yaklaşım, karmaşık kök bulma süreçlerini ve Laplace dönüşümünü devre dışı bırakarak, zaman domeninde hızlı ve doğru hesaplamalar yapılmasına olanak tanımaktadır. Gerçekleştirilen deneysel validasyonlarda, modelin %10–12 hata payı ile yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. (Wan vd., 2018).

Türkiye’deki kamu binalarında farklı HVAC sistemlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesini yapan Kaya vd. (2020), EnergyPlus yazılımını kullanarak split klima, VRF, merkezi sistemler ve ısı pompalarının beş farklı iklim bölgesinde performansını analiz etmiştir. Çalışma, özellikle iklimsel farklılıkların HVAC sistemi seçimi üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamış ve bölgeye özgü sistem optimizasyonunun gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bina enerji verimliliğinin artırılması yönündeki çalışmalar, son yıllarda simülasyon yazılımlarının yoğun kullanımı ile disiplinler arası bir yapıya bürünmüştür. Bu bağlamda, Neardey vd. (2020), Malezya’da bir otoyol dinlenme tesisinde yapay aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimine etkisini analiz etmek üzere BIM tabanlı bir simülasyon gerçekleştirmiştir. Revit platformunda modellenen yapıda RELUX ile aydınlatma simülasyonu yapılmış, enerji tüketimi ise EnergyPlus ile hesaplanmış ve akıllı sistemlerin enerji tasarrufuna katkısının %49’a kadar çıktığı belirlenmiştir.

İklim farklılıklarının bina enerji performansı üzerindeki etkisini inceleyen Hussien vd. (2021), İran’ın dört farklı iklim bölgesinde konut yapıları için DesignBuilder yazılımı ile yıllık enerji tüketimi simülasyonları gerçekleştirmiştir. Araştırma, sıcak bölgelerde soğutma yükünün baskın olduğunu ve yapı kabuğunun optimize edilmesinin enerji verimliliği açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Benzer biçimde, Fasiuddin ve Choudhury (2021), Hindistan'daki konut binalarında bina kabuğu ile HVAC sistemlerinin performansını EnergyPlus ve DesignBuilder yardımıyla analiz etmiş; yalıtım ve pencere ısı geçirgenlik katsayılarındaki iyileştirmelerin enerji tüketimini %30'a kadar düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca, yerel iklime uygun pasif tasarım unsurlarının önemine dikkat çekilmiştir.

Homod vd. (2021) tarafından yürütülen başka bir çalışmada ise, farklı yapı zarfı malzemelerinin Basra kentinde termal konfor ve enerji tasarrufu üzerindeki etkileri EnergyPlus yazılımı ile değerlendirilmiştir. Cam yünü, taş yünü ve poliüretan gibi malzemelerin kıyaslandığı simülasyonlar sonucunda, bu yüksek yalıtım performanslı malzemelerin iç ortam sıcaklığının korunmasında etkili olduğu ve mevsimsel enerji tüketimini önemli ölçüde düşürdüğü saptanmıştır (Homod vd., 2021).

Bina kabuğunun enerji performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyan çalışmalarda, özellikle iklimsel koşullara uyumlu malzeme seçimleri ön plana çıkmaktadır. Homod, Humaidi ve Ahmed (2021), Basra'daki konut binalarında farklı dış duvar ve cam kombinasyonlarının enerji tüketimine etkisini EnergyPlus ile simüle etmiş ve yalıtımlı panel duvar ile çift camlı pencere kombinasyonunun klima enerji tüketimini %11'e kadar azalttığını ortaya koymuştur. Bu sonuç, bina kabuğunun iç mekân sıcaklık dalgalanmalarını da azaltarak termal konfora doğrudan katkı sağladığını göstermektedir.

Homod vd. (2021) tarafından Basra şehrinde yürütülen çalışmada, farklı yapı zarfı malzemelerinin termal konfor ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri EnergyPlus simülasyonları ile analiz edilmiştir. Çalışma, yalıtımlı hafif yapı malzemelerinin betonarme sistemlere kıyasla hem termal konforu iyileştirdiğini hem de klima enerji tüketimini %17'ye kadar azalttığını ortaya koymuştur.

Binaların enerji performansını artırmak ve iklim koşullarına uyumlu sistemler geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar, son yıllarda çok disiplinli yaklaşımlarla ilerlemektedir.

Zhou vd. (2022), yarı saydam fotovoltaiik (STPV) pencerelerin optik, termal ve elektriksel performanslarının ayrıştırılmasına yönelik yeni bir simülasyon yöntemi önermiştir. Bu yöntemde, dış kuantum verimliliği (EQE) esas alınarak spektral fotoelektrik dönüşüm verimliliği (SPCE) hesaplanmış ve EnergyPlus ile WINDOW yazılımları üzerinden yapılan analizler, açık alan deneyleriyle doğrulanmıştır. Çalışma, özellikle geleneksel modellerin atık ısı varsayımına dayalı hatalı tahminlerini düzelterek STPV pencerelerin daha gerçekçi biçimde modellenmesine imkân tanımaktadır (Zhou vd., 2022).

Wang ve vd. (2022a), iklim değişikliğinin bina enerji sistemlerine olan etkilerini hem talep hem de arz tarafında dikkate alan bütüncül bir CCHP optimizasyon modeli geliştirmiştir. PRECIS, TRNSYS, gaz türbini simülasyonları ve LINGO yazılımı bir araya getirilerek oluşturulan bu model, enerji verimliliği, emisyon azaltımı ve maliyet minimizasyonunu çoklu hedef fonksiyonlar altında ele almış; enerji depolama sistemleri ve kullanıcı davranışlarını da sisteme entegre ederek, özellikle kamu binaları için yenilikçi ve uygulanabilir bir çözüm önerisi sunmuştur (Wang vd., 2022).

İklim değişikliğine duyarlı sistem çözümlerine odaklanan Wang vd. (2022b) ise, CCHP sistemleri için geliştirdikleri dinamik optimizasyon modeli ile enerji verimliliği ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunmuşlardır. Python tabanlı simülasyon modülünü EnergyPlus ile entegre ederek, arz ve talep yönlü değişkenleri eş zamanlı değerlendirmişlerdir. Modelin iklim senaryoları altında karar destek sistemlerinde uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Türkiye özelinde yürütölen benzer bir çalışmada Altan vd. (2022), nanoteknolojik yalıtım malzemeleri ve çift cidarlı cephe sistemlerinin ofis binalarındaki enerji performansını TRNSYS yazılımı ile analiz etmiştir. Çalışma, vakum yalıtım panelleri ve cephe yönelimi parametrelerinin yıllık enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini kapsamlı biçimde ortaya koymuş, bu tür yenilikçi çözümlerin yüksek verimlilik potansiyeli taşıdığını göstermiştir.

Türkiye bağlamında Yıldız vd. (2022), farklı iklim bölgelerindeki konut yapılarında pasif tasarım stratejilerini (gölgeleme, yönlendirme, doğal havalandırma) EnergyPlus ile analiz etmiş; yaz aylarında soğutma yüklerinde %30'a varan azalma sağlandığını göstermiştir.

Nourian vd. (2022), Malezya'nın tropikal ikliminde PCM (faz değişim malzemesi) uygulamalarını EnergyPlus ve DesignBuilder ile simüle etmiş; PCM uygulamalarıyla iç ortam sıcaklığında 2–3 °C düşüş ve soğutma yüklerinde %15–25 tasarruf sağlandığını raporlamıştır.

Öte yandan, yarı saydam fotovoltaiik (STPV) sistemler gibi yenilikçi çözümlerin performans analizlerine odaklanan Zhou vd. (2022), dış kuantum verimliliğine (EQE) dayalı olarak STPV pencerelerin optik, termal ve elektriksel performanslarını ayrıştıran yeni bir model geliştirmiştir. EnergyPlus ve WINDOW yazılımlarıyla yapılan simülasyonlar, geleneksel birleşik modellerin soğutma yüklerini aşırı, ısıtma yüklerini ise eksik tahmin

ettiğini göstermiştir. Bu yöntem, STPV sistemlerinin enerji analizlerinde daha doğru sonuçlar elde edilmesine imkân sağlamaktadır.

Enerji verimli sistem çözümleri bağlamında Fan vd. (2023), farklı bina tiplerinde (okul, ofis, ticari) Termal Enerji Depolama (TES) stratejilerinin performansını EnergyPlus yardımıyla analiz etmiş; tam yük TES senaryosunun %20'ye varan enerji tasarrufu sağladığını ortaya koymuştur.

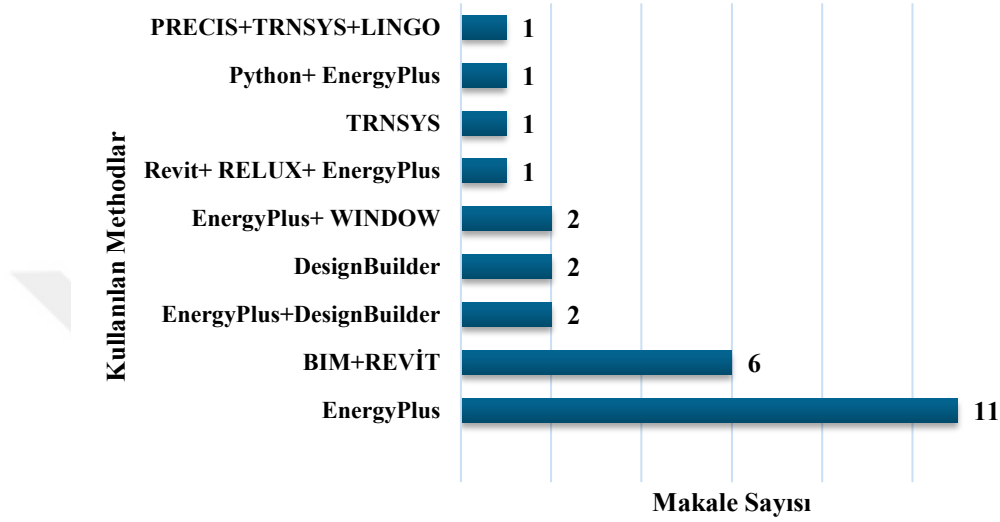
Liu vd. (2023), Çin'de yer alan konutlarda yapı kabuğu elemanlarının (pencere U-değeri, duvar/çatı yalıtımı) optimize edilmesinin EnergyPlus simülasyonları sonucunda yıllık enerji talebini %10–15 azalttığını belirtmiş; ayrıca yaşam döngüsü maliyet analizleri ile ekonomik açıdan en uygun yapı kombinasyonlarını belirlemiştir.

Pakistan özelinde yapılan bir çalışmada, Asif vd. (2024), sıcak-çok sıcak iklim bölgesinde bina zarfı parametrelerinin (yalıtım, cam türü, havalandırma) EnergyPlus ile modellenerek soğutma yüklerinde %20'ye varan azalma sağladığını ve karbon emisyonlarında da ciddi düşüşler elde edildiğini raporlamıştır.

Cao vd. (2025) da sıcak iklimlerde radyatif soğutma ve PCM teknolojilerinin birlikte kullanıldığı RC-PCM yapı kabuğunun enerji performansını incelemiştir. Guangzhou ve Ganzhou şehirlerinde önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanmış, ayrıca PCM kalınlığı ve erime sıcaklığı gibi parametreler optimize edilmiştir. Bu bağlamda çalışma, sıcak iklimlerde bina kabuğu tasarımında RC-PCM entegrasyonunun potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın literatür taraması kapsamında, bina enerji performansı analizine yönelik yayımlanmış 50 akademik makale kapsamlı biçimde incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda kullanılan simülasyon yöntemlerinin dağılımı Şekil 3'te sunulmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, enerji modellemesi alanında en yaygın kullanılan yazılımın EnergyPlus olduğu belirlenmiştir. EnergyPlus, toplam 11 çalışmada tek başına ve diğer yazılımlarla entegre biçimde kullanılmıştır. Bu durum, söz konusu yazılımın hem kapsamlı modelleme kapasitesine hem de uluslararası düzeyde yüksek düzeyde akademik kabul gördüğüne işaret etmektedir. Buna ek olarak, BIM tabanlı analizler ve Revit entegrasyonu içeren yaklaşımlar da dikkat çekici bir artış göstermekte olup, 6 çalışmada bu yöntemlere başvurulmuştur. BIM (Building Information Modeling) araçlarının enerji simülasyonlarıyla bütünleşik biçimde kullanılması, enerji verimliliğinin erken tasarım aşamalarında değerlendirilmesine olanak sağlamak ve karar destek süreçlerine katkı sunmaktadır. Bu bağlamda, parametrik modelleme araçlarının enerji performansı üzerindeki etkisi giderek daha belirleyici bir

konum kazanmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, gerçekleştirilen literatür taraması, bina enerji simülasyonu alanında EnergyPlus'ın merkezi bir konumda yer aldığını, BIM tabanlı çözümlerin yaygınlaştığını ve çoklu yazılım entegrasyonlarını içeren yeni nesil modelleme yaklaşımlarının yükselişte olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Literatürde enerji verimliliği analizi için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi

1.2.4. Yaşam Döngüsü Analizi ile ilgili Yapılan Çalışmalar

Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment – LCA), yapı sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için en kapsamlı değerlendirme yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bir yapının ham madde temininden üretim ve inşaat süreçlerine, kullanım süresinden bertaraf ve geri dönüşüm aşamalarına kadar tüm yaşam döngüsünü dikkate alması, çevresel etkilerin bütüncül olarak ortaya konmasını sağlamaktadır. Bu nedenle literatürde, farklı yapı malzemeleri, tasarım stratejileri ve inşaat sistemlerinin çevresel performanslarını karşılaştırmak amacıyla LCA yöntemine dayalı çok sayıda araştırma yapılmıştır. Aşağıda, bu çalışmalara ilişkin bulgular ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

Weidema vd. (2009), sonuç temelli yaşam döngüsü değerlendirmesi (cLCA) yönteminin metodolojik temellerini açıklamış ve özellikle marjinal değişimlere dayalı sistem modellemenin önemini vurgulamıştır. Çalışma, cLCA'nın, sistemdeki bir kararın neden olduğu marjinal değişimlerin çevresel etkilerini belirleme amacıyla genel denge

varsayımları altında çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, yazarlar mevcut aLCA uygulamalarının politika belirleme süreçleri için yetersiz kalabileceğini belirtmiş ve cLCA'nın karar odaklı analizler için daha uygun olduğunu savunmuştur.

Yang (2010), biyoenerji sistemlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesini gerçekleştirirken sistem sınırlarının ve tahsis stratejilerinin sonuçlar üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Çalışmada, bir mısır bazlı etanol üretim sistemi temel alınmış ve ALCA ile CLCA yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Bulgular, üretim zincirinin hangi aşamalarının sisteme dâhil edildiğine bağlı olarak emisyon hesaplamalarının ciddi oranda değişebileceğini göstermiştir. Bu durum, özellikle politika değerlendirmelerinde CLCA'nın daha kapsayıcı bir çerçeve sunduğunu ortaya koymaktadır.

Çevresel analizlerin yanı sıra, ahşap yapıların geri dönüştürülebilirlik özellikleri nedeniyle sera gazı salımında negatif emisyon etkisi yarattığı da birçok çalışmada vurgulanmıştır (e.g., Liang vd., 2021; Häkkinen & Vares, 2010). Ayrıca, yeni nesil yapı sistemlerinde, modüler ahşap elemanların kullanımının bina ömrü boyunca enerji verimliliğini artırdığı ve karbon ayak izini azalttığı görülmektedir.

Rehl vd. (2012), biyogaz tabanlı enerji üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmek üzere atıf temelli (aLCA) ve sonuç temelli (cLCA) yaşam döngüsü değerlendirme yaklaşımlarını karşılaştırmıştır. Çalışmada, farklı sistem sınırları ve tahsis stratejileri kullanılarak sera gazı emisyonları, asidifikasyon, ötrofikasyon ve enerji talebi gibi çevresel göstergeler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kullanılan LCA yaklaşımına bağlı olarak aynı sistem için çevresel etkilerin önemli ölçüde değişebileceğini ortaya koymuş ve karar vericilerin uygun yaklaşımı bağlama göre seçmesinin önemini vurgulamıştır.

Earles ve Halog (2012), ekonomik denge modelleri ile LCA sonuçlarını bütünleştirerek daha sistematik bir yaklaşım sunmuştur. Bu sayede malzeme üretimi ve tedarik zincirindeki sistemsel geri beslemeler de dikkate alınmıştır. (Earles & Halog, 2012)

Buyle vd. (2014), Belçika'nın Buggenhout kentinde bulunan üç katlı bir apartman binası üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada ALCA ve CLCA yaklaşımlarını karşılaştırarak binalar üzerinde bu iki yöntemle elde edilen çevresel etkileri analiz etmiştir. Sonuçlar, her iki yöntemin yaşam döngüsünün farklı aşamalarında önemli değişiklikler ortaya koyduğunu, özellikle yapı bileşenlerinin ve yalıtım malzemelerinin çevresel etkilerinde belirgin sapmalar meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, iki farklı optimizasyon senaryosu (yalıtım türü seçimi ve enerji verimliliği artırımı için farklı stratejiler) kapsamında, CLCA'nın sistem

sınırlarında yaptığı değişiklikler nedeniyle daha gerçekçi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir (Buyle vd., 2014).

Gervásio ve da Silva (2014) tarafından yürütülen çalışmada, farklı yapı tiplerinin (betonarme, çelik ve kompozit sistemler) çevresel performansları LCA yöntemiyle karşılaştırılmış ve çelik yapılarda üretim aşamasındaki emisyonların daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte kullanım aşamasında enerji verimliliği açısından çelik yapılar avantaj sunmaktadır (Gervásio & da Silva, 2014).

Suh ve Yang (2014), CLCA'nın potansiyelini eleştirel biçimde değerlendirdikleri yorum yazılarında, bu yaklaşımın kavramsal olarak üstün görünmesine rağmen pratikte bu idealize edilmiş güce ulaşmasının zorluklarını vurgulamıştır. Özellikle genel denge modelleri (GEM) ya da kısmi denge modelleri (PEM) gibi araçların, gerçek dünya dinamiklerini yansıtmakta yetersiz kalabileceği ifade edilmiştir (Suh & Yang, 2014).

Chen vd. (2016), %100 biyobazlı PET şişelerin yaşam döngüsü çevresel etkilerini, tamamen fosil ve kısmen biyobazlı PET şişelerle karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. GaBi yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen atıf temelli LCA (aLCA) kapsamında, hammaddenin çıkarılmasından üretim aşamasına kadar olan süreçlerde küresel ısınma potansiyeli (GWP), fosil yakıt kullanımı, ekotoksisite ve ozon tabakası incelenmesi gibi göstergeler analiz edilmiştir. Bulgular, odun bazlı biyokütleden üretilen PET şişelerin fosil bazlı eşdeğerlerine kıyasla %21 daha düşük GWP ve %22 daha az fosil yakıt tüketimi sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, biyobazlı PET üretiminde kullanılan hammaddelerin tarımsal girdilerinden kaynaklanan etkilerin bazı çevresel kategorilerde dezavantaj oluşturabileceği vurgulanmıştır (Chen vd., 2016).

Çeşitli çalışmalarda farklı LCA yazılımları ve veri tabanları kullanılmıştır. TRACI, CML ve ReCiPe gibi etki değerlendirme yöntemleriyle küresel ısınma potansiyeli (GWP), asidifikasyon (AP), ötrofikasyon (EP), smog oluşumu gibi kategoriler analiz edilmiştir. Örneğin, Al-Ghamdi ve Bilec (2016), Suudi Arabistan'daki bir ofis binası için LCA ve yaşam döngüsü maliyet (LCC) analizini entegre ederek, çevresel performansın maliyetle birlikte değerlendirilmesini sağlamışlardır (Al-Ghamdi & Bilec, 2016).

Akbarnezhad vd. (2017), sosyal konut projelerinde farklı inşaat sistemlerinin çevresel etkilerini yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemiyle karşılaştırmıştır. Avustralya'da gerçekleştirilen bu çalışmada, modüler çelik yapılar, geleneksel betonarme sistemler ve hibrit çözümler dahil olmak üzere farklı yapı sistemleri analiz edilmiştir. Çalışmada, üretim aşaması emisyonlarının toplam çevresel yük içinde belirleyici olduğu ve betonarme

sistemlerin GWP açısından daha yüksek değerlere sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca modüler sistemlerin nakliye ve montaj aşamalarında avantaj sağladığı, bu nedenle kentsel dönüşüm projelerinde öncelikli değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Akbarnezhad vd., 2017).

Bina tasarım süreçlerinde çevresel etkilerin erken aşamalarda değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Bueno, Pereira ve Fabricio (2018) tarafından yürütülen çalışmada, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) ile Bina Bilgi Modellemesi'nin (BIM) entegrasyonu sağlanarak, tasarımcıların çevresel performans kararlarını erken aşamada alabilmelerine imkân tanıyan bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada, Autodesk Revit, Dynamo ve Microsoft Excel yazılımları kullanılarak görsel programlama ile üreticiye dayalı LCA verileri BIM ortamına entegre edilmiştir. Geliştirilen sistem, sosyal konut örneği üzerinde test edilmiş ve tasarımcının ek müdahaleye gerek duymadan otomatik sonuçlar elde etmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, üretici bazlı LCA verilerinin sınırlılığı ve BIM yazılımlarına veri aktarımının karmaşıklığı gibi bazı kısıtlar da ortaya konmuştur. Çalışma, LCA bilgilerinin daha geniş bir çevrede yaygınlaştırılması gerektiğini ve bu analizlerin erken tasarım sürecine entegre edilmesinin çevresel açıdan avantajlı sonuçlar doğurabileceğini vurgulamaktadır (Bueno vd., 2018).

Parsons vd. (2019), paslanmaz çelik yüzeylerin pasivasyonunda kullanılan nitrik asit ve biyolojik olarak üretilmiş sitrik asidi çevresel etkiler açısından karşılaştırmıştır. Simapro yazılımı ve Ecoinvent veritabanı kullanılarak gerçekleştirilen atıf temelli LCA, iklim değişikliği, asidifikasyon, toksisite ve su tüketimi gibi birçok çevresel etki kategorisini kapsar. Bulgular, %4'lük sitrik asit çözeltisinin tüm kategorilerde nitrik aside göre daha çevreci olduğunu, ancak %10'luk sitrik asit çözeltisinin enerji tüketimi nedeniyle bazı kategorilerde dezavantajlı olabileceğini ortaya koymuştur. Çalışma, yeşil kimya prensiplerinin endüstriyel pasivasyon süreçlerine entegrasyonu için LCA'nın kritik bir araç olduğunu vurgulamaktadır (Parsons vd., 2019).

Hong vd. (2019), yaşam döngüsü maliyeti (LCC) ile yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) yöntemlerini entegre ederek, sürdürülebilir konut tasarımı açısından optimum yalıtım kalınlığını belirlemeyi amaçlamışlardır. Çin'in farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilen bu çalışmada, enerji tüketimi, yatırım maliyetleri, karbon emisyonları ve çevresel etki skorları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. LCA analizinde özellikle küresel ısınma potansiyeli (GWP), asidifikasyon, ötrofikasyon ve fotokimyasal oksidant oluşumu dikkate alınmıştır. Bulgular, enerji tasarrufu ve çevresel etki azaltımı açısından optimum yalıtım kalınlığının coğrafi ve iklimsel faktörlere göre

önemli ölçüde değiştiğini ve entegre LCA-LCC yaklaşımının bu tür karar süreçlerinde etkili bir araç olduğunu ortaya koymuştur (Hongvd., 2019).

Wu vd. (2019), yapı sektöründe enerji verimliliğini artırmak amacıyla BIM (Building Information Modeling) ile LCA (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi) entegrasyonunun yöntemsel çerçevesini tartışmıştır. Çalışmada, BIM modellerinden otomatik veri aktarımı ile LCA yazılımlarına bilgi akışının kolaylaştırılması hedeflenmiş ve özellikle erken tasarım aşamalarında bu entegrasyonun karar vericilere sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunduğu belirtilmiştir. Makalede, veri doğruluğu, yazılım uyumluluğu ve LCA için gerekli parametrelerin BIM ortamında eksiksiz tanımlanması gibi teknik zorluklar değerlendirilmiştir. BIM-LCA entegrasyonunun gelecekte sürdürülebilir bina uygulamalarını yaygınlaştırmada anahtar rol oynayacağı sonucuna varılmıştır (Wu vd., 2019).

Wang vd. (2019), Çin’de bir konut tasarımı örneği üzerinden entegre LCA-LCC yöntemini kullanarak enerji, karbon salımı ve maliyet performansını analiz etmiştir. Çalışma kapsamında TRNSYS yazılımı ile enerji simülasyonu yapılmış, çevresel etkiler SimaPro ile LCA metodolojisine göre değerlendirilmiştir. GWP, asidifikasyon, fosil enerji tüketimi gibi kriterler üzerinden yapılan analizlerde, yalıtım ve HVAC sistemleri değişkenlerinin enerji tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Çalışma, sürdürülebilir bina tasarımı için entegre yaklaşımların erken aşamalarda uygulanmasının gerekliliğini vurgulamaktadır (Wang vd., 2019).

Asare vd. (2020), sürdürülebilir bina tasarımını desteklemek amacıyla Bina Bilgi Modellemesi (BIM) ile Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) entegrasyonuna odaklanan kapsamlı bir çerçeve sunmuşlardır. Araştırma kapsamında, Gana’da inşa edilecek varsayımsal bir iki odalı konutun çevresel performansı değerlendirilmiş; Autodesk Revit, Green Building Studio (GBS) ve Tally yazılımları aracılığıyla hem operasyonel hem de gömülü karbon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, tasarımın erken aşamalarında karar vericilere destek olacak bir BIM-LCA rehberliği geliştirmiş ve bu süreci RIBA Plan of Work 2013’ün 0–2. aşamalarıyla uyumlu hale getirmiştir. Bu yapı sayesinde, tasarımcıların malzeme seçiminde çevresel etkileri dikkate alarak karar vermesi ve sürdürülebilirlik kriterleri doğrultusunda tasarımı optimize etmesi mümkün kılınmıştır. Çalışmada ayrıca, BIM tabanlı araçların enerji tüketimi, CO₂ emisyonu ve malzeme toksisitesi gibi çevresel parametreleri erken aşamada simüle etme gücüne sahip olduğu belirtilmiştir. Tally’nin ABD merkezli veri altyapısı nedeniyle bölgesel sınırlamalar içerse de, mimarlar için materyal

bazlı etki analizi sunması yönüyle tercih edilmiştir. Bu çalışma, gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilir bina tasarımı uygulamalarını yaygınlaştırma açısından örnek bir model ortaya koymuştur (Asare vd., 2020).

Naghshbandi ve Hosseini (2020), prefabrik yapı zarflarının (cephe panelleri) yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve maliyet analizini entegre ederek Türkiye'deki konut projeleri için uygun yapı çözümlerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında, dört farklı dış cephe sistemi (prefabrik beton panel, çelik panel, EPS panel ve taş yünü yalıtımlı panel) enerji performansı, CO₂ emisyonları ve toplam maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Tally yazılımı kullanılarak LCA verileri elde edilirken, maliyet analizleri birim maliyet ve enerji tüketimi verilerine dayalı olarak yürütülmüştür. Bulgular, EPS panelli yapıların hem maliyet hem de çevresel etki açısından daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Bu durum, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından hafif yapı elemanlarının öncelikli tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Naghshbandi & Hosseini, 2020).

Sameer ve Bringezu (2021) tarafından geliştirilen SURAP (Sustainable Resource Application) aracı, Autodesk Revit platformu üzerinde çalışan ve malzeme, su ve iklim ayak izi hesaplamalarını destekleyen bir eklenti olarak sunulmuştur. Python API aracılığıyla openLCA yazılımı ve GaBi malzeme veritabanı kullanılarak oluşturulan bu sistem, çoklu konut binası tasarımı üzerinde test edilmiştir. Araç, cradle-to-gate (ham maddeden kapıya kadar) temelli LCA hesaplamalarıyla çevresel etkileri sayısal ve görsel olarak analiz etme imkânı sunmuş, böylece tasarımcıların bilinçli kararlar almasına yardımcı olmuştur. Çalışma ayrıca, BIM ortamında sürdürülebilirliğe yönelik karar destek sistemlerinin geliştirilmesine yönelik mevcut eksiklikleri ve entegrasyon zorluklarını tartışmaktadır. LCA'nın BIM'e entegrasyonu sayesinde, farklı geliştirme seviyelerinde (LOD100–LOD400) tasarlanan binaların çevresel etkileri daha erken evrelerde değerlendirilebilmekte ve karar verme süreçleri daha rasyonel hâle getirilebilmektedir (Sameer & Bringezu, 2021).

Liang vd. (2021), Pasifik Kuzeybatı bölgesinde yer alan bir yüksek katlı kütle ahşap binanın yaşam döngüsü boyunca çevresel ve ekonomik performansını incelemiştir. Yapılan analizlerde, geleneksel betonarme yapıya kıyasla %12 daha düşük sera gazı emisyonu (3153 kgCO₂-eq/m² yerine 3203 kgCO₂-eq/m²) elde edilmiştir. Bu farkın büyük kısmı ahşap yapıların karbon depolama kabiliyetinden ve geri dönüşüm potansiyelinden kaynaklanmaktadır (Liang vd., 2021).

Schaubroeck vd. (2022), ISO 14040–14044 standartlarındaki ürün sistemi tanımı ve çok işlevlilik çözümlerindeki tutarsızlıkları tartışmış ve daha açık, genel bir LCA çerçevesi

önerisinde bulunmuştur. Çalışma, atıf temelli (ALCA) ve sonuç temelli (CLCA) yaklaşımlar arasındaki farkların standardizasyon bağlamında netleştirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Ayrıca, ürün sistemi tanımındaki çelişkilerin metodolojik sonuçlarını ele alarak, standartların güncellenmesine yönelik öneriler sunmuştur (Schaubroeck vd., 2022).

Yousefnezhad vd. (2022), mevcut konut yapılarının enerji etkinliğini artırmak amacıyla dış cephe yalıtım sistemlerinin (ETICS) yaşam döngüsü etkilerini analiz etmiştir. Revit ve Tally yazılımları kullanılarak, yedi farklı yalıtım malzemesi senaryosu üzerinde GWP, AP, EP gibi çevresel etki kategorileri değerlendirilmiştir. Çalışma, taş yünü ve cam yünü gibi geleneksel malzemelere kıyasla fenolik köpük ve EPS gibi hafif yalıtım malzemelerinin daha düşük çevresel etkilere yol açtığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, yapıların renovasyonunda malzeme seçimlerinin sürdürülebilirlik açısından belirleyici olduğunu vurgulamaktadır (Yousefnezhad vd., 2022).

Lu vd. (2022), akıllı konut binalarında kullanılan HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme) sistemlerinin çevresel etkilerini yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ile analiz etmiştir. Çin’de farklı bina senaryoları altında yapılan bu çalışmada TRACI 2.1 etki değerlendirme yöntemi kullanılarak GWP, asidifikasyon, su kullanımı ve toksisite gibi kategoriler dikkate alınmıştır. HVAC sistemlerinin üretim, işletim ve bertaraf aşamalarındaki çevresel etkiler ayrıntılı olarak karşılaştırılmış; özellikle işletme aşamasının toplam çevresel yükün %70’inden fazlasını oluşturduğu tespit edilmiştir. Çalışma, enerji verimliliği odaklı sistem seçiminin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir (Lu vd., 2022).

Binaların erken tasarım aşamalarında LCA verilerinin kullanılması, sürdürülebilir karar alma süreçlerini yönlendirmede önemli rol oynamaktadır. Galimshina vd. (2022), BIM entegrasyonu ile LCA uygulayarak malzeme seçimlerinin ve çevresel etkilerin tasarım sürecinde analiz edilmesine olanak tanımıştır. Çalışmalarında Revit yazılımı ile entegrasyon sağlanmış, malzeme bazlı CO₂ emisyonları detaylı şekilde hesaplanmıştır (Galimshina vd., 2022).

Schaubroeck (2023), yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) alanında yaygın olarak kullanılan iki ana yaklaşım olan atıf temelli LCA (ALCA) ve sonuç temelli LCA (CLCA) arasındaki farklılıkları toplumsal bağlamda karar destek süreçlerine etkileri açısından değerlendirmiştir. Yazar, ALCA’nın geçmişteki çevresel etkilerin belirlenmesinde daha yaygın kullanıldığını ancak etik açıdan sınırlı olduğunu; buna karşın CLCA’nın kararların doğrudan sonuçlarına odaklanarak sürdürülebilirlik hedefleriyle daha uyumlu olduğunu ileri

sürmektedir. Özellikle CLCA'nın değişim temelli karar destek sistemleri için daha uygun olduğu belirtilmiş ve gelecekteki standartların bu yöntemi daha çok desteklemesi gerektiği vurgulanmıştır (Schaubroeck, 2023).

Alfalah vd. (2024), Suudi Arabistan'ın Al Khobar kentinde planlanan bir ofis binası örneği üzerinden, yapısal sistemler ve dış cephe seçeneklerinin yaşam döngüsü maliyeti (LCC) ve çevresel etkileri (LCI) bağlamında kapsamlı analizini sunmaktadır. Çalışmada çelik çerçeve ve betonarme çerçeve olmak üzere iki farklı taşıyıcı sistem ile beş dış cephe malzemesi (örneğin, yalıtımlı beton birimler, AAC, kireç taşı kaplama, çift/triple cam ve Nanogel) değerlendirilmiştir. Autodesk Revit ile bina modellemesi yapılmış, enerji tüketimi simülasyonları Design Builder aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve yaşam döngüsü analizleri One Click LCA yazılımı ile yürütülmüştür. Sonuçlar, yalıtımlı beton birimler ve triple cam kombinasyonunun %5.6 oranında maliyet tasarrufu sağladığını, Nanogel camla birlikte kullanıldığında ise yıllık enerji tüketiminde %22'lik bir azalma elde edildiğini göstermektedir. Bu durum, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasında dış cephe ve taşıyıcı sistem seçiminin kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, Suudi inşaat sektörünün hızla büyümesiyle birlikte sürdürülebilirlik uygulamalarının yaygınlaştırılması gerektiği vurgulanmakta; geliştirilen LCC-LCI tabanlı değerlendirme çerçevesi, mevcut binaların sürdürülebilir dönüşümü için tesis yöneticilerine rehberlik etmektedir (Alfalah vd., 2024).

Yu vd. (2024), Çin'de kırsal yerleşim alanlarında uygulanan biyokütleyle dayalı enerji sistemlerinin yaşam döngüsü sera gazı emisyonları açısından etkinliğini değerlendirmiştir. Çalışmada geleneksel kömür kullanımına kıyasla biyokütle enerji sistemlerinin net emisyon azaltım potansiyeli analiz edilmiş; biyokütle temelli sistemlerin, özellikle piroliz gazlaştırma teknolojisinin, kömüre kıyasla %47 oranında daha düşük sera gazı emisyonu sağladığı ortaya konmuştur. Araştırma ayrıca politika desteği, teknoloji seçimi ve lojistik altyapının bu sistemlerin etkinliğini önemli ölçüde etkilediğini vurgulamaktadır (Yu vd., 2024).

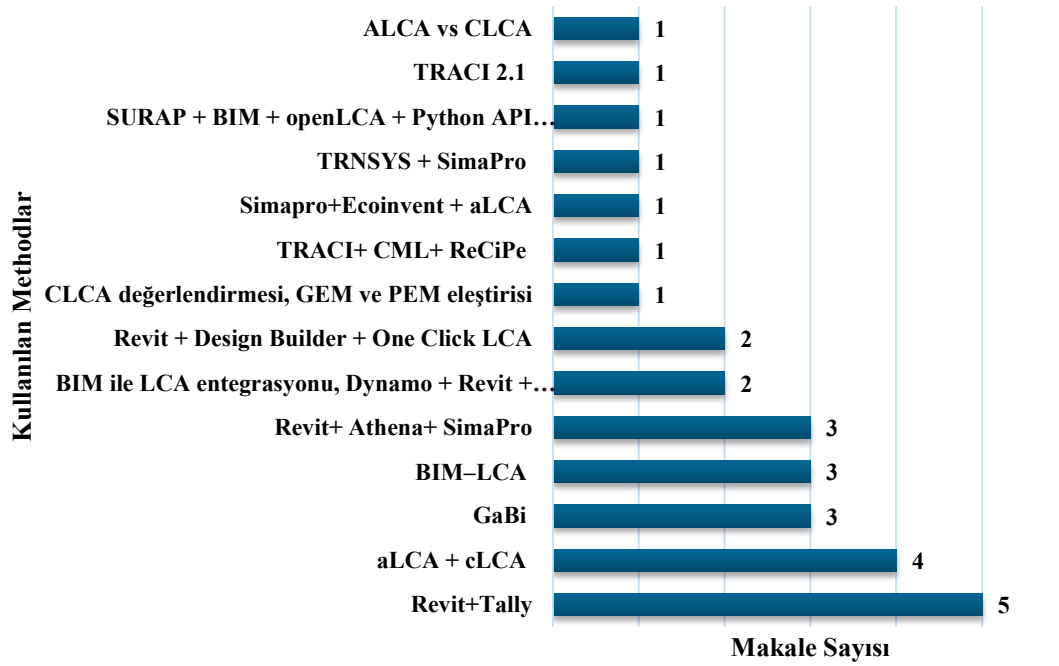
Ma, Azari ve Elnimeiri (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yüksek katlı binaların çevresel etkileri ve gömülü karbon salınımı, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) temelli Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yöntemiyle kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Araştırmada, Chicago'da bulunan ve betonarme-çelik hibrit yapı sistemine sahip 60 katlı bir ofis binası örnek vaka olarak ele alınmıştır. LCA çalışması, ISO 14040–14044, ISO 21930:2017, EN 15804:2012 ve EN 15978:2011 gibi uluslararası standartlara uygun şekilde Tally eklentisi ile Autodesk Revit yazılımı üzerinden yürütülmüştür. Çalışmanın odak

noktası yalnızca yapı taşıyıcı sistemine ait çevresel etkiler olup, kullanım aşaması kapsam dışı bırakılmıştır. Ürün (A1–A3), inşaat (A4–A5), kullanım sonu (C1–C4) ve yeniden kullanım (D) aşamaları değerlendirme kapsamına alınmıştır. Yapının kütle dağılımında beton %91’lik oranla en baskın yapı malzemesi olurken, çevresel etkiler bakımından küresel ısınma potansiyeline %74, asidifikasyon potansiyeline %53, ötrofikasyon potansiyeline %74, smog oluşumuna %74 ve yenilenemez enerji tüketimine %68 oranında katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, yapının yalnızca %9’unu oluşturan çeliğin, ilgili çevresel göstergelere katkısı sırasıyla %26, %47, %26, %26 ve %32 olarak hesaplanmıştır.

Fernández Rodríguez vd. (2025), BIM tabanlı modellerden LCA yazılımlarına veri aktarımının güvenilirliğini bir endüstriyel depo projesi üzerinden incelemiştir. Çalışmada Revit kullanılarak oluşturulan BIM modelinden Athena Impact Estimator ve SimaPro yazılımlarına veri aktarımı test edilmiş; her iki yazılımın veri doğruluğu, çevresel etki kategorilerinde sağladığı sonuçlar ve iş akışı verimliliği karşılaştırılmıştır. Araştırma, otomatik veri aktarımı sağlayan araçların LCA süreçlerine entegrasyonunun tasarım aşamasında çevresel karar desteğini artırabileceğini vurgulamaktadır (Fernández Rodríguez vd., 2025).

Zahabi vd. (2025), Tally® yazılımı ile Autodesk Revit® entegrasyonu kullanarak, dört farklı taşıyıcı sistem (hibrit, tamamen kütük, çelik ve betonarme) için bütüncül bir yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirmiştir. Çalışmada, tamamen kütük yapının GWP açısından en düşük etkiye sahip olduğu, betonarmenin ise en yüksek emisyonu ürettiği belirlenmiştir. Kütük sistemler, üretim aşamasında biyogenik karbon depolama avantajı sunarken, taşıma ve ömür sonu süreçlerinde ötrofikasyon ve asitleşme gibi etkilerde dezavantaj oluşturmuştur. Ayrıca, çelik sistemin yüksek geri dönüşüm oranı sayesinde ömür sonu aşamasında karbon kredisi sağladığı vurgulanmıştır (Zahabi vd., 2025).

Bu çalışmada incelenen 60 akademik yayında kullanılan yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) yöntemleri analiz edilmiş ve sıklık dağılımı Şekil 4’te sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, Revit + Tally yazılımlarının birlikte kullanıldığı yöntemler en çok tercih edilen yaklaşım olmuş ve toplamda 5 makalede yer almıştır. Bu durumu, Revit + Athena + SimaPro entegrasyonu ve GaBi yazılımı, BIM–LCA uygulamaları ile TRACI + CML + ReCiPe etki değerlendirme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar takip etmektedir. Ayrıca Revit + Design Builder + One Click LCA ve Simapro + Ecoinvent + aLCA gibi entegre yaklaşımlar da dikkat çekici olup, sırasıyla 2 makalede tercih edilmiştir.



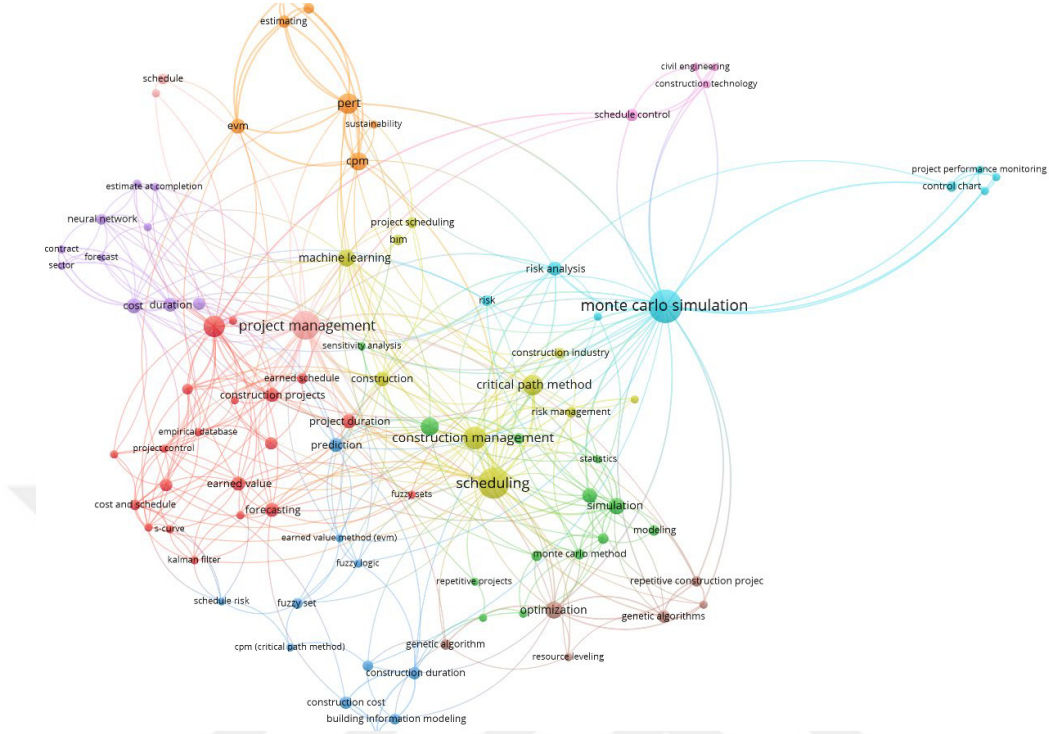
Şekil 4. Literatürde yaşam döngüsü (lca) analizi için tercih edilen yöntemlerin karşılaştırmalı görselleştirmesi

Bu bulgular, son yıllarda BIM tabanlı yazılımlarla LCA uygulamalarının entegrasyonunun artmakta olduğunu ve çevresel analizlerin yazılım destekli daha sistematik bir yapıya kavuşturulduğunu göstermektedir.

1.2.5. Anahtar Kelime Analizi

Bilimsel araştırmalarda başarıya ulaşmanın temel adımlarından biri, doğru anahtar kelimelerin belirlenmesidir. Araştırmacılar çalışmalarına uygun ve etkili anahtar kelimelerle başladıklarında, literatürdeki ilgili kaynaklara daha kısa sürede ve daha isabetli bir şekilde ulaşabilirler. Bu tez kapsamında da benzer bir yaklaşım benimsenmiş; literatürde sıkça karşılaşılan anahtar kelimeler belirlenerek, bunlar üzerinden anahtar kelime kümeleri oluşturulmuş ve elde edilen veriler grafiksel olarak analiz edilmiştir.

Analiz süreci kapsamında, 02 Şubat 2025 tarihinde Web of Science veri tabanında tez konusu ile ilgili 220 makale değerlendirmeye alınmıştır. Elde edilen anahtar kelime verileri, VOSviewer yazılımı aracılığıyla analiz edilerek dört temel tema altında sınıflandırılmıştır: maliyet tahmini, proje süresi yönetimi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü değerlendirmesi

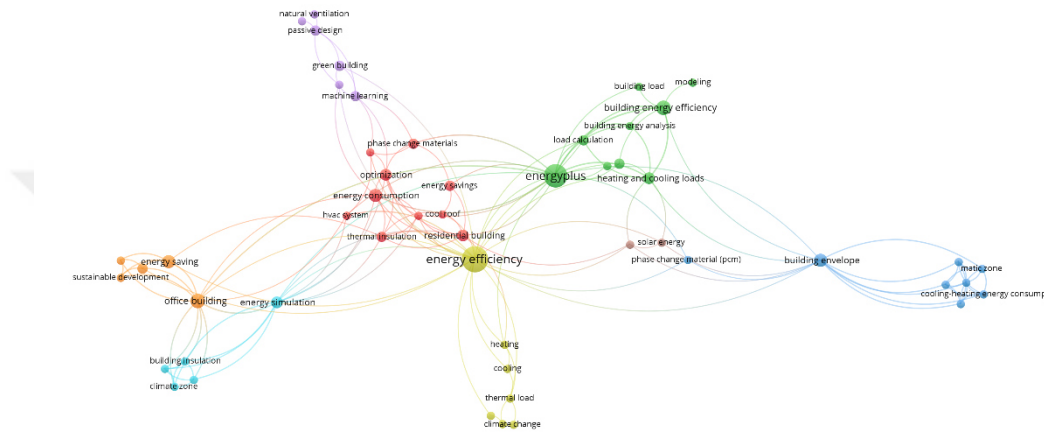


Şekil 6. Proje süresi analizi literatüründe kavramsal yoğunluk ve kümelenme analizi

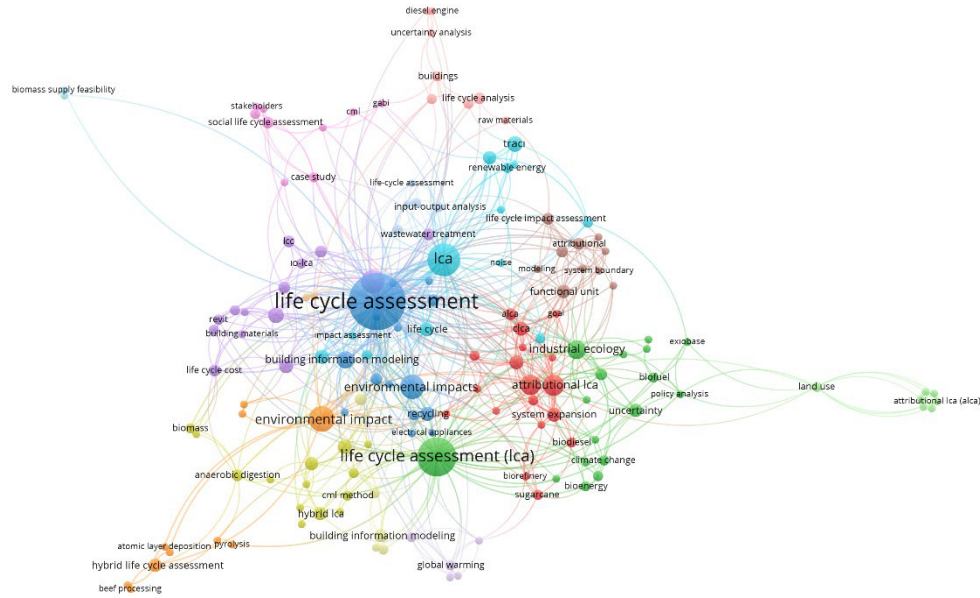
Şekil 7’de proje süresi tahmini ve planlama konularında literatürde öne çıkan kavramlar arasındaki ilişkiler görselleştirilmektedir. Harita, çalışmaların özellikle üç temel başlık altında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bunlar klasik zaman planlama yaklaşımları (CPM, PERT, scheduling), simülasyon ve belirsizlik analizine dayalı yöntemler (Monte Carlo simulation, risk analysis, control chart) ile yapay zekâ ve optimizasyon temelli modellerdir (machine learning, genetic algorithm, fuzzy logic). Haritanın merkezinde yer alan project management, scheduling ve construction management kavramları, proje süresi yönetimi konusunun çok boyutlu ve disiplinler arası bir yaklaşımla ele alındığını göstermektedir. Özellikle Monte Carlo simulation teriminin yüksek eşgörünüm ağına sahip olması, belirsizliklerin modellenmesinde bu yöntemin literatürde yaygın olarak tercih edildiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 8’de, yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment - LCA) alanında gerçekleştirilen akademik çalışmaların anahtar kavramlar arasındaki ilişkileri görselleştiren eşgörünüm haritası sunulmaktadır. Harita, literatürde LCA çalışmalarının çok disiplinli bir yapıya sahip olduğunu ve çeşitli tematik kümelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, araştırmalar özellikle çevresel etkiler (environmental impact,

environmental impacts), endüstriyel ekoloji (industrial ecology), atıksu arıtımı ve enerji sistemleri (bioenergy, biodiesel, renewable energy) ile yapı sektörü ve BIM entegrasyonu (building information modeling, Revit) alanlarda odaklanmaktadır. Bunun yanında, attributional LCA, consequential LCA, hybrid LCA ve social LCA gibi yöntemsel yaklaşımların da literatürde güçlü bir şekilde temsil edildiği görülmektedir. Merkezde yer alan life cycle assessment ve lca kavramlarının geniş bir bağlantı ağına sahip olması, bu alanın giderek artan bir şekilde farklı sektörlerle bütünleştiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Enerji verimliliği literatüründe kavramsal yoğunluk ve kümelenme analizi



Şekil 8. Yaşam döngüsü analizi (lca) literatüründe kavramsal yoğunluk ve kümelenme analizi

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı, geleneksel ve modüler yapı sistemlerinin maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü analizi (LCA) temel parametreleri açısından karşılaştırmalı bir değerlendirmesini yaparak, deprem sonrası ortaya çıkan acil barınma ihtiyacını hızlı, sürdürülebilir ve etkin bir şekilde karşılayabilecek yapı sistemlerini belirlemektir. Çalışma, farklı yapı türlerinin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarak, karar vericilere ve uygulayıcılara rehberlik edecek bilgiler sunmayı hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında farklı malzeme ve üretim teknikleri kullanılarak geliştirilmiş toplam 12 yapı türü incelenmiştir. Bu yapı türleri; betonarme yapılar, çelik yapılar, ahşap yapılar (yığma, payandalı çerçeve, payandasız çerçeve ve bağdadi yapılar), yığma yapılar (taş, tuğla ve donatılı yapılar) ile modüler sistemler (çapraz lamine ahşap (CLT), prefabrik hafif çelik, gaz beton panel) olarak sınıflandırılmıştır. Tüm yapı türleri, hazırlanan tip mimari projeler üzerinden detaylı olarak analiz edilmiştir.

Çalışmada, özellikle 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası büyük hasar gören bölgelerde modüler ve prefabrik yapı sistemlerinin uygulanabilirliği üzerinde durulmuştur. Bu yapıların kırsal alanlarda hızlı kurulum sağlaması, mevcut yapı sistemlerine sürdürülebilir alternatifler sunması ve çevresel açıdan sağladığı avantajlar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, bu sistemlerin geleneksel yapılara kıyasla kaynak kullanımı ve üretim süreçlerindeki kısıtlamaları nasıl hafifletebileceği incelenmiştir.

Çalışmada karar verme süreçlerini nesnel bir yaklaşımla desteklemek amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılmış ve belirlenen parametreler bu yöntemle ağırlıklandırılmıştır. Analizler sonucunda, farklı yapı türleri karşılaştırılarak deprem sonrası yeniden inşa süreçlerinde en uygun yapı sistemleri tespit edilmiştir.

Bu tez, yalnızca barınma ihtiyacına yönelik çözümler sunmayı değil, aynı zamanda gelecekte meydana gelebilecek afetlere hazırlık amacıyla kullanılabilecek bilimsel bir rehber oluşturmayı amaçlamaktadır.

1.4. Çalışmada İncelenen Sistemlerinin Özellikleri ve Yapım Teknikleri

Tez çalışmasında, tarihsel süreçte uzun yıllar boyunca uygulanmış olan betonarme, çelik, ahşap ve yığma yapı sistemlerinin yanı sıra, son yıllarda gelişen endüstriyel üretim yöntemlerine dayalı modüler sistemler de kapsam içine alınmıştır. Bu çeşitlilik sayesinde

hem geleneksel yapı teknolojilerinin sunduğu deneyim hem de çağdaş yöntemlerin sağladığı hız, verimlilik ve sürdürülebilirlik boyutları karşılaştırmalı olarak ortaya konmaktadır.

İncelenen yapı sistemlerinde öncelikle taşıyıcı prensiplerin tanıtılması, ardından malzeme özellikleri ve inşa süreçlerinin açıklanması hedeflenmiştir. Böylece her bir sistemin mühendislik bakış açısıyla nasıl işlediği, hangi teknik aşamalarla üretildiği ve hangi bağlamlarda tercih edildiği ortaya konulmaktadır. Bu yaklaşım, yapı türlerinin yalnızca fiziksel özellikleriyle değil, aynı zamanda teknolojik, yapım tekniği ve uygulama yönleriyle de değerlendirilmesini mümkün kılmakta ve çalışmanın bütüncül metodolojisine katkı sunmaktadır.

1.4.1. Betonarme Yapı Sistemi

Betonarme, modern yapı sektöründe en yaygın kullanılan taşıyıcı sistem olup, betonun basınca karşı yüksek dayanımı ile çeliğin çekme dayanımının birleştirilmesi esasına dayalıdır. Bu kompozit yapı, hem düşey yükleri hem de deprem ve rüzgâr gibi yatay etkileri güvenle taşıyabilecek bir sistem sunmaktadır. Şekil 9'da betonarme yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistem özellikle 20. yüzyılın başlarından itibaren mühendislik projelerinde standart hale gelmiş ve kentsel alanlarda en çok tercih edilen yapı türü olmuştur. Betonarme yapım süreci birden çok aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada projeye uygun kalıp sistemi hazırlanır. Bu kalıp ahşap, çelik veya plastik malzemelerden oluşabilir ve taşıyıcı elemanların nihai geometrisini belirler. Ardından, statik hesaplarda belirlenen konum ve çaplarda çelik donatılar kalıp içerisine yerleştirilir. Beton karışımı, çimento, su, agrega ve gerekirse katkı maddelerinden oluşacak şekilde hazırlanır ve pompalanarak kalıba dökülür. Beton dökümünden sonra vibrasyonla boşluklar giderilir ve betonun homojen bir şekilde priz alması sağlanır. Kür sürecinin tamamlanmasıyla yapı taşıyıcı elemanları nihai dayanımına ulaşır. Betonarme sistemler genellikle kolon, kiriş, döşeme ve perde duvarlardan oluşur ve katmanlı biçimde yükseltilerek inşa edilir (Afzal vd., 2020).



Şekil 9. Betonarme yapı sisteminin genel görünümü

1.4.2. Çelik Yapı Sistemi

Çelik yapılar, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, süneklik ve prefabrikasyona uygunluk gibi özellikleri nedeniyle modern yapı sektöründe, özellikle sanayi yapıları, yüksek binalar, köprüler ve geniş açıklık gerektiren yapılarda tercih edilmektedir. Şekil 10’da çelik yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, çeliğin homojen ve izotrop davranış göstermesi mühendislik hesaplamalarında öngörülebilir sonuçlar elde edilmesine imkân tanımaktadır. Çelik yapı elemanları, üretim sürecinde fabrikada hazırlanır; profiller kesilir, bükülür ve proje detaylarına uygun hale getirilir. Bu süreçte sıcak haddeleme, kaynak veya cıvata bağlantısı gibi yöntemler kullanılır. Hazırlanan çelik elemanlar şantiyeye taşınır ve montaj işlemleri vinç yardımıyla gerçekleştirilir. Bağlantılar cıvata, kaynak veya perçinleme yöntemleriyle yapılır. Çelik yapıların üretim süreci büyük ölçüde fabrikada tamamlandığı için sahadaki işçilik süresi oldukça kısalmış ve yüksek hassasiyetle montaj yapılabilir (Dorian vd., 2023)



Şekil 10. Çelik yapı sisteminin genel görünümü

1.4.3. Ahşap Yığma Yapı Sistemi

Ahşap yığma sistemler, en eski yapı tekniklerinden biri olup, özellikle orman kaynaklarının bol olduğu bölgelerde tarih boyunca yaygın şekilde uygulanmıştır. Şekil 11’de ahşap yığma yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistemde ahşap kütüklerin ya da kalasların yatay veya düşey doğrultuda üst üste bindirilmesiyle duvarlar oluşturulur.

Ahşabın doğal yapısı düşük özgül ağırlık, yüksek ısı yalıtımı ve işlenebilirlik gibi avantajlar sunar. Ahşap yığma yapılarda kalaslar belirli aralıklarla üst üste dizilir ve uç noktaları zıvana, kertme veya metal bağlantı elemanları ile sabitlenir. Bu yöntem, yapı elemanlarının bütünlük içinde çalışmasını sağlar. Kapı ve pencere boşlukları için gerekli açıklıklar önceden bırakılır. Taşıyıcı sistem doğrudan duvarlardan oluştuğu için yapım süreci göreceli olarak hızlıdır (Martins vd., 2021).



Şekil 11. Ahşap yığma yapı sisteminin genel görünümü

1.4.4. Bağdadi Ahşap Yapı Sistemi

Bağdadi yapı sistemi, özellikle Osmanlı dönemi şehir konutlarında sıkça kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Şekil 12’de Bağdadi ahşap yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistemde ahşap karkas taşıyıcı iskelet oluşturur. Karkasın üzerine sık aralıklarla ince ahşap çıtalar çakılır ve bu çıtaların üzerine kireç, alçı veya toprak esaslı harç sıvanır. Bu yöntem, hem taşıyıcılık hem de yüzey kaplama işlevini aynı anda yerine getirmektedir. Öncelikle dikey ahşap dikmelerden oluşan karkas kurulur, ardından yatay bağlantılar eklenerek iskelet sistem tamamlanır. Karkas üzerine ince ahşap çıtalar çakılır ve

araları harç ile doldurularak düz bir yüzey elde edilir. Çok katmanlı yapısı sayesinde hem taşıyıcı özellik sağlar hem de mimari estetik artırılır (Wang vd., 2022).



Şekil 12. Bağdadi ahşap yapı sisteminin genel görünümü

1.4.5. Payandalı Ahşap Yapı Sistemi

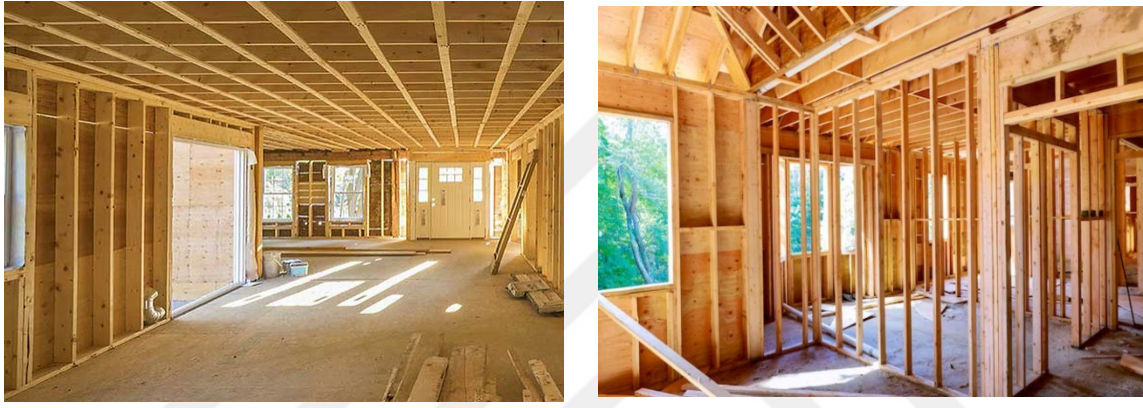
Payandalı ahşap sistem, ahşap karkas yapının yatay yükler karşısındaki dayanımını artırmak amacıyla eğik destek elemanlarının (payanda) kullanıldığı bir sistemdir. Şekil 13'te payandalı ahşap yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu destek elemanları yapının rijitliğini artırır ve özellikle deprem etkilerine karşı stabilite sağlar. Yapının düşey taşıyıcı dikeyleri ile yatay kirişlerin birleşim noktalarına eğik payandalar yerleştirilir. Bu elemanlar genellikle çivi veya metal bağlantı elemanları ile sabitlenir. Çatı ve kat döşemeleri bu karkasın üzerine oturtularak yapı tamamlanır (Emile vd., 2018).



Şekil 13. Payandalı ahşap yapı sisteminin genel görünümü

1.4.6. Payandasız Ahşap Yapı Sistemi

Payandasız ahşap yapı, basit bir karkas sistemine dayanır. Şekil 14'te payandasız ahşap yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, düşey ve yatay taşıyıcı elemanlar ile oluşturulan sistemde payanda kullanılmaz. Daha sade bir inşa yöntemi sunduğu için yapım süresi kısadır. Ahşap dikmeler temel üzerine dik olarak yerleştirilir ve aralarına yatay kirişler bağlanır. Bağlantılar çivi veya metal elemanlarla gerçekleştirilir. Çatı ve kaplama elemanları karkasın üzerine monte edilerek yapı tamamlanır (Granello vd.,2018)



Şekil 14. Payandasız ahşap yapı sisteminin genel görünümü

1.4.7. Taş Yığma Yapı Sistemi

Taş yığma yapılar, insanlık tarihinin en eski yapı sistemlerinden biri olup, doğal taşların üst üste konulması ve harçla birleştirilmesi esasına dayanır. Şekil 15'te taş yığma yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, Anadolu, Orta Doğu ve Akdeniz coğrafyasında tarihi anıtlarda, köprülerde ve surlarda yoğun olarak görülmektedir. Doğal taşların yüksek basınç dayanımı sayesinde uzun ömürlü yapılar üretilmiştir. Taş yığma inşaat, temel kazısı ve taş temel duvarlarının oluşturulmasıyla başlar. Duvarlar genellikle düzgün kesme taş, kaba yonu taş veya moloz taş kullanılarak örülür. Taşlar arasında bağlayıcı olarak kireç esaslı harç tercih edilir. Duvar kalınlıkları genellikle fazladır ve yatay süreklilik esastır. Örgü tekniği yapının dayanımını doğrudan etkiler (Mazzolani vd., 2022).



Şekil 15. Taş yığma yapı sisteminin genel görünümü

1.4.8. Tuğla Yığma Yapı Sistemi

Tuğla yığma yapılar, kil esaslı tuğlaların pişirilerek elde edilmesiyle ortaya çıkan yapı elemanlarının düzenli örgü sistemiyle bir araya getirilmesi esasına dayanır. Şekil 16’da tuğla yığma yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistem Roma ve Bizans dönemlerinden günümüze kadar yaygın şekilde kullanılmıştır. Tuğla, düşük maliyeti, kolay üretimi ve düzenli geometrisi nedeniyle en çok tercih edilen yığma malzemelerden biridir. Tuğlalar, yatay harç tabakaları üzerine yerleştirilir ve derzler şaşırtmalı (dikey derzlerin üst üste gelmeyecek şekilde) düzenlenir. Harç genellikle çimento-kum veya kireç esasludur. Taşıyıcı duvarların yanı sıra dolgu duvar olarak da kullanılabilir. Yük aktarımı, tuğlaların basınç dayanımı ve derzlerdeki harç tabakası aracılığıyla sağlanır (Xiong vd., 2016)



Şekil 16. Tuğla yığma yapı sisteminin genel görünümü

1.4.9. Donatılı Tuğla Yapı Sistemi

Donatılı tuğla yığma yapılar, klasik yığma sistemlerin geliştirilmiş bir versiyonudur. Şekil 17’de donatılı tuğla yığma yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistemde geleneksel tuğla duvar örgüsünün içerisine çelik donatılar eklenerek taşıyıcı kapasite artırılmıştır. Özellikle deprem bölgelerinde, tuğla duvarların rijitliğini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Tuğla örgüsü yapılırken belirli aralıklarla düşey ve yatay donatılar yerleştirilir. Donatılar genellikle duvar boyunca betonarme hatıllar veya kolonlarla bütünleştirilir. Böylece duvarlar yalnızca basınç değil, aynı zamanda çekme ve kesme kuvvetlerine karşı da dayanım kazanır. Donatılı yığma sistemler, hem geleneksel yığma tekniklerinin uygulanabilirliğini korur hem de mühendislik hesaplarıyla güvence altına alınmış bir yapı elde edilmesini sağlar (Witzayn vd., 2016).



Şekil 17. Donatılı tuğla yığma yapı sisteminin genel görünümü

1.4.10. Donatılı Gaz Beton Panel Yapı Sistemi

Donatılı gazbeton paneller, modern yapı teknolojilerinin ürünüdür ve yüksek ısı yalıtımı ile hafiflik özellikleriyle öne çıkar. Şekil 18’de donatılı gazbeton panel yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistemde endüstriyel üretim sayesinde standart ölçülerde paneller elde edilir. Fabrika ortamında üretilen gazbeton paneller, galvanizli çelik donatılarla güçlendirilir. Paneller sahaya taşındıktan sonra vinç yardımıyla yerlerine monte edilir ve birbirine özel bağlantı elemanları ile sabitlenir. Yük aktarımı, panellerin bütüncül davranışıyla sağlanır. Bu yöntem, hızlı inşaat süresi sağlamasıyla dikkat çeker (Chen vd.,2014).



Şekil 18. Donatılı gaz beton panel yapı sisteminin genel görünümü

1.4.11. Hafif Çelik Prefabrik Yapı Sistemi

Hafif çelik prefabrik yapılar, ince kesitli galvanizli çelik profillerden oluşturulan ve fabrika ortamında hazırlanıp sahada monte edilen modüler sistemlerdir. Şekil 19’da hafif çelik prefabrik yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistem afet sonrası hızlı konut çözümleri, şantiyeler ve geçici yapılar için sıkça kullanılmaktadır. İnce kesitli profiller, CNC makinelerinde kesilip şekillendirilir ve modüller halinde paketlenerek şantiyeye taşınır. Montaj süreci, cıvata, vida ve bağlantı plakaları aracılığıyla gerçekleştirilir. Dış cephe, iç kaplama ve yalıtım elemanları karkas üzerine monte edilerek yapı tamamlanır. Fabrikasyon süreci üretim hızını artırırken sahada işçilik ihtiyacını azaltır (Coppola vd., 2022)



Şekil 19. Hafif çelik prefabrike yapı sisteminin genel görünümü

1.4.12. CLT (Çapraz Lamine Ahşap) Yapı Sistemi

CLT (Cross Laminated Timber), son yıllarda sürdürülebilir yapı teknolojilerinde öne çıkan, çok katmanlı ahşap panellerden oluşan modern bir yapı sistemidir. Şekil 20’de CLT ahşap yapı sisteminin genel görünümü verilmiş olup, bu sistemde ahşap katmanlar birbirine dik olacak şekilde yerleştirilip özel yapıştırıcılarla preslenerek tek bir panel haline getirilir. Bu yöntem sayesinde ahşabın doğal özelliklerinden kaynaklanan zayıf yönler dengelenir ve yüksek taşıyıcı kapasite elde edilir. CLT paneller fabrika ortamında üretilir ve şantiyeye nakledilir. Vinç yardımıyla konumlandırılan paneller, özel çelik bağlantı elemanları ile birbirine sabitlenir. Paneller hem taşıyıcı duvar hem döşeme hem de çatı elemanı olarak kullanılabilir. Bu özellik, CLT’nin çok yönlü bir yapı malzemesi olmasını sağlar (Demirkır vd., 2018).



Şekil 20. CLT ahşap yapı sisteminin genel görünümü

1.5. Maliyet Hesabı

İnşaat projelerinde yaklaşık maliyet tahmini, proje başarısının en kritik bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Projenin finansal kaynaklarının doğru planlanması ve bütçesel sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu süreç, yalnızca olası bütçe aşımalarının önüne geçmekle kalmayıp, aynı zamanda erken proje safhalarında stratejik karar alma mekanizmalarının daha sağlıklı işlemesine katkı sunmaktadır. Kullanılan tahmin yöntemlerinin çeşitliliği ve uygulanabilirliği, doğrudan tahminlerin doğruluğunu etkileyen unsurlar arasında yer

almaktadır. Bu doğruluk ise proje fizibilitesinin ve uygulama başarısının temel belirleyicisidir.

Geleneksel tahmin yaklaşımları arasında yer alan birim alan yöntemi, yapıların toplam taban alanı esas alınarak gerçekleştirilen öngörülere dayanmakta, ancak projeye özgü teknik detayları ihmal edebilmesi nedeniyle erken aşama tahminlerinde sapmalar meydana getirebilmektedir (Bayram vd., 2015). Benzer şekilde, yapı hacmini temel alan birim hacim yöntemi, özellikle yapı yüksekliği ve mimari karmaşıklığı gibi parametreleri içermesi sayesinde daha ayrıntılı öngörüler sunabilmektedir (Kim & Cha, 2019). Fonksiyonel birim yöntemi ise, sunulan hizmet birimi üzerinden (örneğin yatak sayısı, öğrenci kapasitesi) maliyet tahminleri yapılmasına olanak tanımakta, bu yönüyle kullanıcı ihtiyaçlarına dayalı projelerde tercih edilmektedir. Öte yandan, benzeşim (analogous) yöntemi, geçmişte tamamlanmış benzer projelerin maliyet verilerinden yararlanılarak yapılan tahminleri kapsamaktadır. Ancak bu yöntem, tahmincinin bireysel tecrübesine ve geçmiş projelerin güncel projeyle olan benzerliğine bağlı olduğundan, belirli öznellik risklerini barındırmaktadır. (Ulinnuha vd., 2024)

Daha ayrıntılı analiz ihtiyacı bulunan projelerde eleman bazlı maliyet tahmini yöntemi öne çıkmakta; bu yaklaşımda projeler, yapı bileşenlerine ayrılarak her bir elemanın maliyeti ayrı ayrı hesaplanmaktadır (Bahuguna vd., 2020). Parametrik maliyet modelleme ise, proje özellikleriyle maliyetler arasında istatistiksel ilişkiler kurularak, nicel veriler (alan, hacim, yükseklik vb.) üzerinden tahmin yapılmasını mümkün kılmaktadır (Vaughan vd., 2020). Bu çerçevede regresyon analizi, değişkenler arası nedensel ilişkileri belirleyerek, uyarlanabilir maliyet modellerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. (Bautista-Arredondo vd., 2018)

Yakın dönemde teknolojinin inşaat sektörüne entegre edilmesiyle birlikte, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemler öne çıkmış ve geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşan güçlü alternatifler sunmaya başlamıştır. Yapay sinir ağları (ANN), doğrusal olmayan ilişkileri modelleme ve büyük veri kümeleri üzerinden öğrenme kapasitesi sayesinde, özellikle erken aşama maliyet tahminlerinde yüksek doğruluk düzeylerine ulaşılmasını sağlamaktadır (Padala & Goyal, 2025; Bayram vd., 2015). Baalousha ve Çelik (2011) tarafından yapılan çalışma, ANN tabanlı modellerin geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük hata oranları sunduğunu göstermiştir. Aynı şekilde, fizibilite aşamasında karar destek sistemlerinin etkinliğini artırmak amacıyla ANN'nin kullanımının kaçınılmaz olduğunu savunan çalışmalar da mevcuttur (Magdum & Adamuthe, 2017).

Makine öğrenmesinin alt dallarından biri olan topluluk öğrenme (ensemble learning) ise, farklı algoritmaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan modeller sayesinde, veri eksikliği sorunlarını minimize ederken tahmin doğruluğunu artırmayı başarmaktadır. Park ve arkadaşlarının geliştirdiği heterojen yığın algoritması, geçmiş proje verilerinden beslenerek erken safha tahminlerinde dikkate değer performans elde edilmesini sağlamıştır (Park vd., 2022). Ayrıca, öngörüselsel analitik yöntemler, büyük veri kümelerinden anlamlı eğilimler ve maliyet belirleyicileri çıkararak tahmin sürecine sistematik bir yapı kazandırmaktadır. (Miranda vd., 2022)

Bunlara ek olarak, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ile makine öğrenmesi tekniklerinin entegrasyonu, tasarım değişikliklerine anlık tepki verebilen dinamik tahmin sistemlerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Park ve Yun (2023), BIM verilerinin derin öğrenme algoritmalarıyla birlikte kullanılması sayesinde, erken tasarım aşamalarında daha hızlı ve güvenilir maliyet tahminleri yapılabildiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda, ARIMA gibi zaman serisi modelleme tekniklerinin geçmiş maliyet verileri ile güncel piyasa koşullarını entegre etme kapasitesi, tahminlerde istikrar ve süreklilik sağlamaktadır. (Işıkdag vd., 2023)

Maliyet tahmininin güvenilirliğini artıran bir diğer önemli unsur ise proje kapsamının, yapısal özelliklerin, bölgesel maliyet standartlarının ve yüklenici kapasitelerinin doğru şekilde analiz edilmesidir. Hatamleh vd. (2018), proje verilerinin eksikliği ya da belirsizliğinin maliyet tahmininde sapmalara yol açtığını vurgularken; Rossi (2022), yerel maliyet yapılarının dikkate alınmaması durumunda tahmin modellerinin geçerliliğini yitirebileceğini belirtmektedir. Ayrıca, yüklenici yeterliliklerinin ve tasarım kapsamının netleştirilmesi, erken aşama belirsizliklerinin azaltılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. (Senanayake vd., 2023)

Yaklaşık maliyet hesaplamalarında en sık başvuru tekniklerinden biri olan birim fiyat yöntemi ise, Türkiye'deki uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmakta ve yüksek kurumsal geçerlilik arz etmektedir. Bu yöntemde, proje kapsamında yer alan imalat kalemleri için tanımlanmış standart birim fiyatlar esas alınarak, miktar çarpımı ile poz bazında maliyetler hesaplanmakta ve tüm iş kalemleri toplandığında projenin toplam maliyeti elde edilmektedir. Türkiye'de bu standartlar; T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Karayolları Genel Müdürlüğü gibi kamu kurumlarınca her yıl güncellenerek yayımlanan birim fiyat poz kitapları üzerinden belirlenmektedir. Söz konusu kaynaklar, her poz için işin kapsamını, analiz içeriğini, uygulama esaslarını ve birim ölçüsünü içeren sistematik bilgiler sunmaktadır. Bu kitapların kullanımı hem hesaplamaların

mevzuata uygun olmasını hem de farklı projeler arası karşılaştırılabilirliğin sağlanmasını mümkün kılmaktadır.

Ancak uygulamada, bazı özgün veya karmaşık projelerde, mevcut poz kitaplarında yer almayan iş kalemleriyle karşılaşılabilmektedir. Bu gibi durumlarda, teknik içeriği açık biçimde tanımlanmış özel pozlar oluşturularak tahmin sürecine entegre edilmektedir. Özel pozların hazırlanmasında, işçilik, malzeme, makine kullanımı ve genel gider kalemlerine dayalı kapsamlı analizlerin yapılması ve bu analizlerin teknik şartnamelerle desteklenerek idarenin onayına sunulması gerekmektedir. Böylece birim fiyat yöntemi hem kamu kaynaklı standartlara uygunluğu hem de esnekliği ile farklı büyüklükte ve karmaşıklıkta projelerde etkili biçimde uygulanabilmektedir.

İnşaat sektöründe yaklaşık maliyet tahmini, geleneksel yöntemlerin pratikliğini ve modern teknolojilerin doğruluk kapasitesini bir arada barındıran bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Yapay zekâ ve veri temelli modelleme teknikleriyle desteklenen bu süreç, sadece ekonomik etkinliği değil, aynı zamanda stratejik planlama kapasitesini de artırmakta ve sektörel dönüşümün önünü açmaktadır.

1.6. Proje Süresi Hesabı

İnşaat projelerinin süresi, maliyet, kalite ve müşteri memnuniyeti gibi temel proje çıktıları üzerinde doğrudan etkili olması nedeniyle proje başarısını belirleyen kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Süre uzamaları genellikle yönetsel yetersizlikler, öngörülemeyen koşullar ve dışsal etkenler gibi nedenlerle ortaya çıkmakta, bu durum literatürde yaygın biçimde tartışılan yapısal bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle proje süresinin doğru biçimde planlanması ve etkin şekilde yönetilmesi, inşaat yönetimi alanındaki akademik çalışmaların temel odak noktalarından birini oluşturmaktadır.

Proje yönetiminde zamanın korunması ve gecikmelerin önlenmesi amacıyla kapsamlı planlama, zamanlama ve izleme stratejileri geliştirilmiştir. Bu kapsamda, Earned Value Management (EVM) yöntemi, zaman ve maliyet performansını eş zamanlı olarak takip etme imkânı sunmakta ve proje yöneticilerine erken uyarı sistemi sağlayarak sapmalara karşı önleyici stratejiler geliştirmelerine olanak tanımaktadır. EVM, planlanan ve gerçekleşen takvimler arasındaki sapmaları analiz ederek karar alma süreçlerinde doğruluğu artırmaktadır. (Kemandang, 2022)

İnşaat projeleri yapısı gereği çok sayıda belirsizlik içermektedir. Bu belirsizliklerin yeterince yönetilememesi, gecikmelerin temel nedenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, proje gecikmelerinin başlıca sebepleri arasında tasarım değişiklikleri, kaynakların yetersiz yönetimi ve zayıf saha denetimi gibi faktörler yer almaktadır (Memon vd., 2011). Bu bağlamda, esnek ve öngörücü yönetim stratejilerinin benimsenmesi gerektiği; yetkin proje yöneticilerinin varlığının süreye bağlı hedeflerin gerçekleştirilmesinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır. (Onenga vd., 2020; Shibani & Sukumar, 2015)

Zaman yönetimi kapsamında en yaygın kullanılan tekniklerden biri olan Kritik Yol Metodu (Critical Path Method – CPM), projedeki faaliyetler arasındaki bağımlılık ilişkilerini temel alarak, proje süresini belirleyen en uzun süreli yol olan kritik yolu tanımlar. Kritik yol üzerinde yer alan herhangi bir faaliyette yaşanacak gecikme, tüm projenin süresini doğrudan etkilemektedir. Bu yöntem, proje süresinin en doğru şekilde belirlenmesini ve zaman kayıplarının önlenmesini amaçlamaktadır. CPM yöntemi, her bir faaliyet süresinin belirlenmesinde iş kalemlerinin miktarı ve iş gücünün üretim hızı gibi parametreleri dikkate alır. Bu hesaplama aşağıdaki denklemle yapılır:

$$T_i = \frac{Q_i}{P_i} \quad (1)$$

Burada T_i , bir iş kaleminin tamamlanma süresini; Q_i , iş kaleminin toplam miktarını ve P_i , iş gücünün günlük üretim kapasitesini ifade eder. Bu süreler günlük çalışma süresine göre düzenlenerek proje ağ yapısına entegre edilir. Kritik yolun belirlenmesi için faaliyetlerin erken ve geç başlama ve bitiş süreleri hesaplanır. CPM analizinde kullanılan temel denklemler aşağıda verilmiştir:

$$EF_i = ES_i + T_i \quad (2)$$

$$LS_i = LF_i + T_i \quad (3)$$

$$LF_i = \min (LS_k) \quad (4)$$

Burada ES_i ve EF_i bir faaliyetin en erken başlama ve bitiş sürelerini; LS_i ve LF_i ise en geç başlama ve bitiş sürelerini ifade etmektedir. Kritik yol, $ES_i = LS_i$ ve $EF_i = LF_i$ eşitliğini sağlayan faaliyetlerden oluşur. CPM analizinde yaygın olarak kullanılan ağ yapılarından biri olan Activity on Node (AON) modeli, faaliyetleri düğümlerle temsil eder ve bu faaliyetler arasındaki bağımlılık ilişkilerini yönlü bağlantılarla gösterir. AON modeli, faaliyetlerin

başlangıç ve bitiş sürelerinin görsel olarak takibini kolaylaştırmakta ve zaman çizelgelerinin daha şeffaf şekilde yönetilmesine olanak sağlamaktadır.

CPM yöntemi, deterministik süre varsayımıyla çalıştığı için belirsizliğin yoğun olduğu projelerde tek başına yeterli olmayabilir. Bu gibi durumlarda, Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT) gibi olasılıksal yaklaşımların kullanımı önerilmektedir (Lee vd., 2018; Liu, 2013). PERT, faaliyet sürelerini iyimser, kötümser ve en olası süre tahminleriyle değerlendirerek sürece esneklik kazandırmakta ve özellikle değişkenlik gösteren süre tahminlerinin olduğu projelerde fayda sağlamaktadır (Shipes vd., 2023; Salhab vd., 2022). Ancak PERT'in öznel değerlendirmelere dayanması ve deneyimsiz ekiplerde uygulanmasının zor olması gibi sınırlamaları bulunmaktadır. (Ballesteros-Pérez, 2017)

Ayrık Olay Simülasyonu (DES), zamanlama, kapasite ve kaynak kullanım analizlerini farklı senaryolarla test etme imkânı sunmaktadır. DES, özellikle üretim, lojistik ve inşaat gibi karmaşık sistemlerde kullanılmakta ve veri temelli içgörülerle daha gerçekçi simülasyonlar üretmektedir. (Hu vd., 2014; Chen vd., 2023; Jadrić vd., 2020)

Geçmiş proje deneyimlerinin yeni projelere aktarılmasına dayanan Vaka Tabanlı Akıl Yürütme (CBR) yöntemi ise sezgisel karar destek mekanizmalarının geliştirilmesinde etkili bir araçtır (Montani & Jain, 2013). Ancak bu yöntemin geniş veri tabanlarının yönetimini gerektirmesi ve uygun vakaların seçimini zorlaştırması gibi sınırlılıkları bulunmaktadır. (Lepage & Lieber, 2019)

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) proje zamanlamasında teknolojik dönüşümün öncüsü konumundadır. BIM ile geliştirilen 4D modeller sayesinde yapı elemanları zamanla ilişkilendirilmekte ve zaman çizelgeleri daha görsel ve anlaşılır hâle gelmektedir (Liu vd., 2015). BIM, paydaşlar arası koordinasyonu artırmakta ve çakışan faaliyetlerden doğabilecek riskleri azaltmaktadır (Forcael vd., 2020). Ancak EBS ve WBS yapılarının uyumsuzluğu gibi teknik zorluklar, BIM'in entegrasyonunu sınırlamaktadır. (Park & Cai, 2015)

Zaman çizelgelerinin grafiksel temsili için kullanılan Gantt şemaları ise görevlerin başlangıç ve bitiş zamanlarını yatay çubuklarla göstermekte, zaman çizelgelerinin sade biçimde yönetilmesine olanak sağlamaktadır. Dinamik Gantt şemaları, özellikle belirsiz koşullarda uyarlanabilirliği artırmakta ve zaman yönetimi performansını geliştirmektedir (Brčić & Mlinarić, 2018). Günümüzde üç boyutlu görselleştirme ve bulut tabanlı uygulamalarla desteklenen Gantt şemaları, daha esnek ve erişilebilir zaman planlaması araçları hâline gelmiştir. (Jo vd., 2014)

1.7. Enerji Verimliliği Analizi

Binalarda enerji verimliliği, özellikle ısıtma ve soğutma yüklerinin yönetimi bağlamında, sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve kullanıcı konforu üzerindeki doğrudan etkileri nedeniyle son yıllarda artan bir öneme sahip olmuştur. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, enerji tüketimini azaltmaya yönelik çeşitli stratejilerin ve teknolojilerin uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve özellikle konut ile ticari yapılarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik çözüm yollarını detaylandırmaktadır.

Enerji verimliliğini etkileyen temel unsurlardan biri ısı yalıtımıdır. Isı yalıtımı, yapıların ısıtma ve soğutma ihtiyacını doğrudan azaltarak enerji tüketiminin minimize edilmesini sağlamaktadır. Nitekim Al-Qahtani vd. (2023), mikoryum (mycelium) temelli ısı yalıtım malzemelerinin konut binalarında soğutma yükünü azaltarak hem enerji verimliliğini hem de kullanıcı konforunu artırdığını göstermiştir. Benzer şekilde, (Mahgoub vd. 2024), bina kabuğunun iyileştirilmesinin, özellikle kurak iklimlerde klima kaynaklı enerji tüketimini azaltmada kritik rol oynadığını vurgulamaktadır.

Termal yüklerin yönetiminde etkili olan bir diğer teknolojik yaklaşım ise faz değişim malzemelerinin (PCM) kullanımıdır. (Kamel vd.,2022). PCM'lerin yüksek sıcaklık koşullarında binaların soğutma yüklerini düşürerek önemli enerji tasarrufu sağladığını belirtmektedir. Riahi vd. (2021) ise, PCM sistemlerinin pik soğutma taleplerini yönetme konusunda etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Bu tür teknolojiler, bina kabuğunun termal direncini artırarak mekanik soğutma ihtiyacını azaltmakta ve dolayısıyla sistem performansını optimize etmektedir.

Isıtma ve soğutma yüklerinin doğru şekilde öngörülebilmesi, enerji verimliliği açısından oldukça kritik bir unsurdur. (Batra vd., 2024), Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağları ile Artan Artımlı Makine (GBM) yöntemlerinin entegrasyonu sayesinde ısıtma-soğutma yüklerinin daha doğru tahmin edilebildiğini göstermektedir. Serat'ın (2023) çalışmasında ise, hassas yük hesaplarının HVAC sistemlerinin performansını doğrudan artırdığı ve enerji kullanımını önemli ölçüde azalttığı vurgulanmaktadır.

Bu teknolojik yaklaşımların yanı sıra, pasif tasarım stratejileri de enerji yönetiminde önemli rol oynamaktadır. Akande (2010), pasif tasarımın bir parçası olan bina yönelimi, doğal havalandırma ve malzeme seçiminin enerji tüketimini azaltmadaki etkisini ortaya koymuştur. Bu stratejiler, özellikle sıcak ve kuru iklimlerde geleneksel sistemlerin yetersiz kaldığı durumlarda büyük avantaj sağlamaktadır.

Enerji verimliliğini artırma gerekliliği, artan şehirleşme hızı ve iklim değişikliği nedeniyle daha da acil hâle gelmiştir. Mahgoub (2021), enerji verimliliği yönetmeliklerinin uygulanmaması hâlinde, kurak bölgelerde soğutma taleplerinin enerji kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaya devam edeceğini ifade etmektedir. Literatürdeki bulgular, mekanik sistemlere olan bağımlılığı azaltmanın; etkili yalıtım, yenilikçi malzeme kullanımı ve akıllı tasarım ilkelerinin bütüncül biçimde uygulanması ile mümkün olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda, enerji verimliliği analizlerinde Autodesk Revit gibi gelişmiş modelleme ve veri analizi araçlarının kullanımı, daha derinlikli ve bütüncül değerlendirmeleri mümkün kılmaktadır. Revit, bina geometrisi, yapı malzemeleri ve teknik sistemlerin detaylı modellenmesini sağlayarak ısıtma ve soğutma yükü hesaplarının doğruluğunu artıran bir Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) altyapısı sunmaktadır. Lin ve Lin'in (2019) çalışmasında atık su arıtma pompaları üzerine odaklanılsa da, işletme koşullarının değerlendirilmesine yönelik sundukları metodolojik yaklaşım, bina sistemlerinin enerji verimliliğini artırmaya yönelik analizlerde de uygulanabilir niteliktedir.

Revit ile gerçekteştirilen analizlerde, yapı elemanlarının ısıl özellikleri, dış hava koşulları ve kullanıcı yoğunluğu gibi parametrelerin entegre edilmesi, enerji tüketimini etkileyen faktörlerin çok boyutlu olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda Silva ve vdnın (2024) rüzgâr enerjisi üretiminde değerşkenler arası ilişkiler üzerine yaptığı çalışma, binalardaki enerji kullanımı analizlerinde bağımlılıkların anlaşılması açısından metodolojik katkılar sunmaktadır. Revit, farklı yapı senaryolarını simüle ederek enerji verimliliği açısından en uygun yapılandırma seğerneklerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Li ve vd (2015) tarafından geliştirilen Stokastik Sınır Analizi ile Genelleştirilmiş Otoregresif Koşullu Değerşen Varyans (SFA-GARCH) hibrit modeli, enerji performansını etkileyen çoklu değerşkenlerin modellenmesine olanak tanıyarak potansiyel tasarrufların öngörölmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle enerji simölasyonlarında stratejik kararların alınmasında kullanılabilecek öngörüsöl analizler sunmaktadır.

Pasif Ev standartlarının uygulanabilirliği de Revit üzerinden değerlendirilebilen önemli bir diğer yaklaşımdır. Kistelegdi ve vd (2019), malzeme seçimi ve bina yöneliminin pasif tasarım kapsamında enerji verimliliğine olan katkılarını vurgulamıştır. Revit, bu tür pasif stratejileri yapı modeli üzerinde entegre bir biçimde analiz ederek, özellikle aşırı iklim koşullarına sahip bölgelerde enerji verimliliği yönetmeliklerine uygun planlamaların yapılmasına olanak tanımaktadır.

Enerji tüketim nesnelerini sıralamak için kullandıkları Temel Bileşen Analizi (PCA), Revit analizleri kapsamında karar alma süreçlerini destekleyebilecek içgörüler sağlamaktadır. Isıl performans verilerinin yapısal parametrelerle ilişkilendirilmesi, enerji verimliliği açısından öncelikli iyileştirme alanlarının belirlenmesini kolaylaştırmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Revit'in gelişmiş analiz yetenekleriyle entegre edilmesi, binalarda enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik kapsamlı ve etkili yöntemlerin uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Simülasyonlar, veri korelasyonu ve tahmine dayalı analiz tekniklerinin bir arada kullanılması, enerji tüketimini azaltma hedefiyle daha bilinçli tasarım ve işletme kararlarının alınmasını desteklemektedir. Bu kapsamlı yaklaşım, hem sürdürülebilir yapılaşma süreçlerine katkı sunmakta hem de kullanıcı konforunun korunmasına imkân tanımaktadır.

1.8. Yaşam Döngüsü Analizi

Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment- LCA), yapı sistemlerinin çevresel etkilerini yaşam döngüsünün tüm aşamalarında değerlendiren bilimsel bir yöntemdir. Bu yöntem, bir yapının çevresel etkilerini, ham madde çıkarımından başlayarak üretim, inşaat, kullanım ve nihai bertaraf süreçlerine kadar tüm aşamalarda sistematik bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılar. LCA, yapı sistemlerinin enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, doğal kaynak kullanımı ve atık üretimi gibi çevresel parametreler açısından değerlendirilmesini sağlayarak, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için önemli bir araç sunar. Yapı sektöründe sürdürülebilirlik, bu tür kapsamlı yaklaşımlar aracılığıyla mümkün olmaktadır.

Tally, Revit yazılımı ile entegre çalışan bir BIM tabanlı yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) aracıdır. Autodesk Revit üzerine bir eklenti olarak geliştirilmiş olan Tally, yapı elemanlarının çevresel etkilerini otomatik olarak analiz edebilmekte ve bu sayede sürdürülebilir tasarım kararlarının veriye dayalı biçimde alınmasına katkı sunmaktadır. Yazılım, Revit modelinde tanımlı yapı bileşenlerinin türü, miktarı ve boyutları gibi nicel verilere dayanarak çevresel etki hesaplamalarını yürütür.

Tally'nin temelinde, GaBi çevresel veri tabanını kullanan thinkstep firması tarafından geliştirilmiş kapsamlı bir etki envanteri bulunmaktadır. Bu veri tabanı, yapı malzemelerinin üretim, taşımacılık, uygulama, kullanım ve bertaraf aşamalarına ilişkin çevresel etkileri; örneğin Küresel Isınma Potansiyeli (GWP), Asitleşme Potansiyeli (AP), Ötrofikasyon

Potansiyeli (EP) ve birincil enerji tüketimi gibi göstergeler üzerinden analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.

Yazılımın metodolojik altyapısı, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına dayalı dört temel aşamayı içeren klasik LCA yapısını BIM ortamına entegre etmektedir:

- Hedef ve kapsam tanımı: LCA analizinin hangi etki kategorilerine odaklanacağını ve sistem sınırlarının (A1–D) neyi kapsayacağını belirler.
- Yaşam döngüsü envanteri (LCI): BIM modelinden otomatik olarak alınan malzeme miktarları, LCA veri tabanlarıyla eşleştirilerek envanter oluşturulur.
- Etki değerlendirmesi (LCIA): Elde edilen envanter verileri, GWP, AP ve EP gibi etki kategorilerine göre analiz edilir.
- Yorumlama: Sonuçlar tasarım kararlarını yönlendirecek biçimde değerlendirilir ve farklı senaryoların karşılaştırmalı çevresel etkileri ortaya konur.

Tally'nin sağladığı en önemli avantajlardan biri, manuel veri girişine ihtiyaç duymadan BIM modelindeki bilgiler üzerinden doğrudan analiz yapılabilmesidir. Bu özellik hem zaman tasarrufu sağlamak hem de analiz doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, tasarım süreci boyunca yapılan değişikliklerin çevresel etkileri anlık olarak izlenebildiğinden, yinelemeli sürdürülebilirlik analizlerine olanak tanımaktadır.

BIM tabanlı LCA araçlarının entegrasyonu, inşaat sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için önemli bir yöntemsel çerçeve sunmaktadır. Tally gibi araçlar, yaşam döngüsünün tüm aşamalarında çevresel etkilerin nicel olarak değerlendirilmesini kolaylaştırmakta ve veri temelli karar alma süreçlerini desteklemektedir. Literatürdeki örnekler, bu tür entegre yaklaşımların tasarım, malzeme seçimi ve sistem tercihleri üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

1.9. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), karmaşık karar verme problemlerini daha yönetilebilir alt problemlere ayırarak değerlendiren, yapılandırılmış birçok kriterli karar verme yöntemidir. Bu yöntem, karar vericilerin farklı kriterlere dayalı olarak alternatifleri sistematik şekilde karşılaştırmasına olanak tanımakta ve seçenekleri öncelik sırasına göre derecelendirmektedir. Thomas L. Saaty tarafından 1970'lerde geliştirilen AHP, o tarihten bu yana proje yönetimi, sağlık hizmetleri ve mühendislik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sipahi & Timor, 2010; Ishizaka & Labib, 2011).

AHP'nin en önemli avantajlarından biri hem nitel hem de nicel verileri bir arada değerlendirebilme yeteneğidir. Bu özellik, maliyet gibi ölçülebilir parametrelerin yanı sıra, yaşam döngüsü analizi (LCA) gibi karmaşık ve kapsamlı değerlendirmelerin karar sürecine entegre edilmesini mümkün kılmaktadır. AHP'nin sunduğu yapılandırılmış yaklaşım, bu çalışmada kullanılan kriterler arasında denge kurulmasını sağlayarak optimal sonucun elde edilmesine katkıda bulunacaktır.

AHP, karar sürecinde ikili karşılaştırmalar yöntemini esas almaktadır. Bu süreçte, karar vericiler kriterlerin ve alternatiflerin göreceli önemini değerlendirerek, öznel yargıları nicel verilere dönüştürmekte ve bu değerlendirmeler sonucunda bir öncelik vektörü oluşturmaktadır (Zhang vd., 2014; Improtta vd., 2019). Süreç, öncelikle karar probleminin genel hedefinin tanımlanmasıyla başlamaktadır. Daha sonra, bu hedefe ulaşmayı etkileyen ana kriterler ve alt kriterler belirlenmektedir. Kriterler, ikili karşılaştırmalarla değerlendirilerek, alternatifler arasında anlamlı bir sıralama oluşturulmaktadır (Zamani & Yousefi, 2013; Alzober & Yaakub, 2014).

AHP'nin bireysel ve grup karar verme süreçlerine kolayca uyarlanabilir olması, değerlendirme sürecini daha esnek hale getirmektedir. Bu çalışmada, karar sürecinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, ikili karşılaştırmalardan elde edilen verilerin tutarlılığı kontrol edilecek ve tutarlılık oranı (CR) hesaplanarak doğruluk seviyesi değerlendirilecektir. Bu mekanizma, karar verme sürecinin sistematik ve güvenilir bir şekilde ilerlemesini sağlayacaktır.

AHP, karar problemlerini daha anlaşılır hale getirmek amacıyla hiyerarşik bir yapı kullanmaktadır. Hiyerarşinin en üst seviyesinde kararın genel hedefi yer almakta olup, alt seviyelerde sırasıyla ana kriterler, bu kriterlere bağlı alt kriterler ve en alt seviyede ise alternatifler bulunmaktadır. Bu yapı, karar vericilerin süreci sistematik bir şekilde analiz etmesine ve kararlarını rasyonel bir temele dayandırmasına olanak tanımaktadır.

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yönteminde, karar probleminin çözümünde en önemli adımlardan biri ağırlıkların belirlenmesidir. Bu süreç, karar vericilerin çeşitli kriterler ve alternatifler arasındaki göreceli önem derecelerini değerlendirerek, her bir unsura bir ağırlık değeri atamasını içerir. Yapı türlerinin analizi bağlamında, betonarme, çelik, ahşap (yığma, payandalı ve payandasız çerçeve yapılar, bağdadi), yığma (taş, tuğla, donatılı) ve modüler (CLT, prefabrik hafif çelik, gaz beton panel) yapı tipleri, maliyet, proje süresi, enerji tüketimi ve yaşam döngüsü analizi (LCA) kriterler çerçevesinde değerlendirilerek ağırlıklandırılacaktır.

Sürecin ilk aşamasında, hiyerarşik yapı oluşturulmalıdır. Hiyerarşi, en üst seviyede “en uygun yapı türünün seçimi” hedefini, bir alt seviyede ana kriterleri (maliyet, proje süresi, enerji tüketimi, LCA) ve en alt seviyede yapı tiplerini alternatif olarak içerir. Bu yapı oluşturulduktan sonra, ağırlıkların belirlenmesi için ikili karşılaştırma yöntemi kullanılacaktır.

Ağırlıkların belirlenmesi süreci, ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulması ile başlar. Karar vericiler, her bir kriteri ve yapı tiplerini birbirine göre karşılaştırarak, 1 ile 9 arasında bir ölçek kullanır. Burada 1, iki unsurun eşit derecede önemli olduğunu, 9 ise bir unsurun diğerine kıyasla aşırı derecede önemli olduğunu ifade eder. Bu karşılaştırmalar, kriterler için bir karşılaştırma matrisi A ve alternatifler için kriter bazlı matrisler şeklinde düzenlenir:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{3n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Her bir karşılaştırma matrisinde, a_{ij} değeri i-inci kriterin j-inci kritere göre göreceli önemini ifade eder. Maliyet kriterinin proje süresine göre daha önemli olduğunu düşünüyorsak, a_{ij} değeri 3, a_{ji} değeri ise $\frac{1}{3}$ olacaktır.

Bir sonraki adımda, karşılaştırma matrisini normalleştirerek kriterlerin göreceli ağırlıkları hesaplanır. Normalleştirme işlemi, her bir sütunun toplamını bulmayı ve her hücreyi bu toplamla bölmeyi içerir:

$$N_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{k=1}^n A_{kj}} \quad (6)$$

Normalleştirilmiş matris elde edildikten sonra, her satırın ortalaması alınarak öncelik vektörü yani ağırlıklar belirlenir:

$$N_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{k=1}^n A_{kj}} \quad (7)$$

Bu işlem, her kriterin veya alternatifin genel hedef üzerindeki göreceli önemini sayısal olarak ifade eder. Maliyet kriterinin ağırlığı w_{Maliyet} , enerji tüketimi kriterinin ağırlığı w_{Enerji} şeklinde hesaplanır.

Ağırlıkların hesaplanmasının ardından, ikili karşılaştırmaların tutarlılığı kontrol edilmelidir. Bu kontrol, tutarlılık oranı (Consistency Ratio - CR) hesaplanarak yapılır. İlk olarak, maksimum özdeğer (λ_{max}) şu şekilde hesaplanır:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Karşılaştırma Matris Satırı} \times w_i)}{w_i} \quad (8)$$

Daha sonra, tutarlılık indeksi (CI) bulunur:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} \quad (9)$$

Tutarlılık oranı şu şekilde hesaplanır:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

Burada RI, rastgele bir karşılaştırma matrisine karşılık gelen rastgele indeks değeridir ve matris boyutuna bağlıdır. Eğer $CR < 0.1$ ise, matris tutarlıdır ve sonuçlar güvenilir kabul edilir.

Bu süreç hem kriterlerin hem de yapı tiplerinin göreceli önemlerini objektif bir şekilde belirleyerek, en uygun yapı tipinin seçimi için karar verme sürecini sistematik hale getirir. Sonuç olarak, maliyet, proje süresi, enerji tüketimi ve yaşam döngüsü analizleri faktörlerin bir arada değerlendirildiği bu AHP analizi, karmaşık yapı seçim problemine bilimsel bir çözüm sunar.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, farklı yapım teknikleri ve malzeme türlerine sahip 12 farklı yapı sistemi, yaklaşık maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kriterleri açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analizler, Kahramanmaraş ili esas alınarak belirlenen bir tip proje üzerinden gerçekleştirilmiş ve değerlendirmeler bu konuma özgü koşullar dikkate alınarak yapılmıştır.

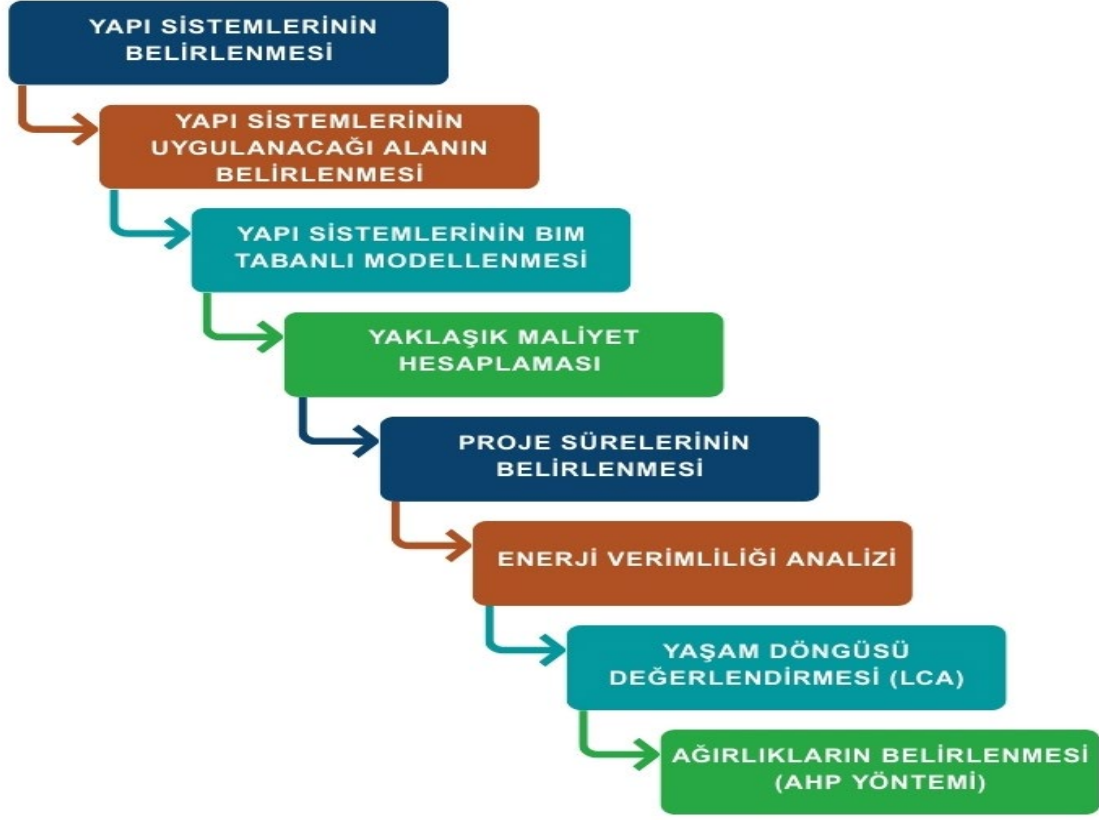
Karar verme sürecini desteklemek amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi uygulanmış ve her bir kriterin karar üzerindeki ağırlığı belirlenmiştir. Yapı sistemlerine ait performans değerleri normalize edildikten sonra, bu değerler AHP yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla çarpılarak bütüncül bir değerlendirme skoru oluşturulmuştur. Böylece, tüm kriterler göz önünde bulundurularak en uygun yapı sisteminin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2.1. Yöntem

Bu tez çalışmasının yöntemsel basamakları Şekil 21’de özetlenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle karşılaştırmaya dahil edilecek yapı sistemleri belirlenmiş, ardından bu sistemlerin uygulanacağı alan tanımlanmıştır. Sonraki aşamada, yapı sistemleri BIM tabanlı modellenerek dijital ortama aktarılmış ve bu modeller üzerinden yaklaşık maliyet hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen metraj ve maliyet verileri kullanılarak proje süreleri belirlenmiş, daha sonra sistemlerin kullanım aşamasına yönelik performanslarını ortaya koymak amacıyla enerji verimliliği analizleri yapılmıştır. Çevresel etkilerin değerlendirilmesi için yaşam döngüsü analizi (LCA) uygulanmış ve tüm kriterlerden elde edilen sonuçlar Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile ağırlıklandırılarak karşılaştırmalı değerlendirme tamamlanmıştır.

Bu metodolojik çerçeve sayesinde, farklı yapı sistemleri maliyet, süre, enerji verimliliği ve çevresel performans boyutlarında bütüncül bir yaklaşımla incelenmiş ve elde edilen sonuçların güvenilirliği artırılmıştır.



Şekil 21. Çalışmada izlenen metodolojik süreç

2.1.1. Yapı Sistemlerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında, afet sonrası yeniden yapılaşma sürecine uygun yapı sistemleri; maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü performansı açısından çok kriterli olarak karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, Türkiye’de hem geleneksel hem de modüler yapı tekniklerini temsil eden toplam 12 farklı yapı sistemi değerlendirmeye alınmıştır. Bu sistemler betonarme, çelik, ahşap (yığma ahşap, bağdadi, payandalı ve payandasız), yığma (taş, tuğla, donatılı tuğla) ve modüler (donatılı gazbeton panel, hafif çelik prefabrik ve CLT ahşap) yapı sistemleridir.

Yapı sistemleri seçilirken, malzeme türü, yapım yöntemi, sürdürülebilirlik potansiyeli, kaynak kullanımı, üretim ve montaj süreçleri gibi kriterler dikkate alınmıştır. Amaç farklı yapım tekniklerine sahip sistemleri karşılaştırmaya elverişli hale getirmek ve çeşitli koşullar altında performanslarını analiz edebilmektir.

Betonarme ve çelik yapılar, günümüzde yaygın olarak kullanılan mühendislik çözümleri olmaları nedeniyle çalışmaya dahil edilmiştir. Bu sistemler, yüksek taşıma kapasitesi ve standartlara uygunluk açısından öne çıkmaktadır. Ahşap temelli sistemler ise kültürel mirasın temsilcisi olmaları ve yerel malzeme kullanımını desteklemeleri nedeniyle seçilmiştir. Payandalı, payandasız, bağdadi ve yığma ahşap çeşitleri, farklı yapım tekniklerini temsil etmektedir.

Taş, tuğla ve donatılı tuğla yığma sistemler, kırsal bölgelerdeki kullanım yaygınlığı ve yerinde üretim imkânı nedeniyle değerlendirmeye alınmıştır. Donatılı tuğla sistemleri ise klasik yığma yapıların modernleştirilmiş bir versiyonunu sunduğu için tercih edilmiştir.

Modüler sistemler, hızlı montaj, düşük iş gücü ihtiyacı ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle donatılı gazbeton panel, hafif çelik prefabrik ve CLT (Cross-Laminated Timber) sistemleri çalışmaya dahil edilmiştir. Bu sistemler, özellikle afet sonrası müdahalelerde hız ve verimlilik açısından önem taşımaktadır.

Seçilen yapı sistemleri farklı yapım tekniklerini, malzeme çeşitlerini ve uygulama koşullarını temsil etmektedir. Bu seçim sayesinde, afet sonrası yapılaşma sürecinde hangi sistemlerin daha uygun olduğu çok boyutlu analizlerle değerlendirilmiştir.

2.1.2. Yapı Sistemlerinin Uygulanacağı Alanın Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında karşılaştırmalı analizlerin gerçekleştirileceği yapı sistemlerinin uygulanacağı örnek alan olarak, Şekil 22'de gösterildiği üzere Kahramanmaraş ili sınırlarında yer alan Onikişubat ilçesi belirlenmiştir. Coğrafi olarak 37°37'14.9" kuzey enlemi ve 36°53'30.7" doğu boylamı koordinatlarında konumlanan bu bölge, Doğu Anadolu Fay Zonu'na olan yakınlığı nedeniyle yüksek düzeyde sismik tehlike barındırmaktadır. Bu jeolojik gerçeklik, özellikle afet sonrası yapı üretiminde dayanıklılık, sürdürülebilirlik ve hızlı inşa edilebilirlik gibi kriterlerin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 22. Çalışma alanının coğrafi konumu

Konumun seçilmesinde belirleyici olan en temel faktör, 6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Kahramanmaraş olan depremler sonrası bölgede ortaya çıkan yeniden yapılaşma ihtiyacının büyüklüğü ve bu bağlamda çalışmanın, afet sonrası yapı üretimine yönelik çözüm arayışlarına katkı sunacak bir model oluşturma potansiyelidir. Bu kapsamda, Onikişubat ilçesi hem bölgesel ihtiyaçların aciliyeti hem de elde edilecek bulguların diğer benzer yerleşim alanlarına örnek teşkil edebilecek niteliği dolayısıyla tercih edilmiştir. Ayrıca, bölge geleneksel ve modüler yapı sistemlerinin afet sonrası kırsal yerleşim alanlarına entegrasyon potansiyelini değerlendirmek amacıyla uygun bir zemin sağlamaktadır. Bu yapı sistemlerinin sunduğu hızlı kurula bilirlilik, kaynak verimliliği ve düşük çevresel etki avantajları, yeniden yapılaşma sürecinin etkinliğini artırmak açısından stratejik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, çalışmada analiz edilen 12 farklı yapı sistemi, Onikişubat ilçesinin fiziksel ve çevresel özellikleri dikkate alınarak geliştirilen tip projeler üzerinden modellenmiş ve çok kriterli karar verme yöntemleri çerçevesinde karşılaştırmalı performans analizlerine tabi tutulmuştur.

2.1.3. Yapı Sistemlerinin BIM Tabanlı Modellenmesi

Bu tez çalışmasında karşılaştırmalı analiz kapsamında değerlendirilecek tüm yapı sistemleri, Autodesk Revit yazılımı kullanılarak dijital ortamda ayrı ayrı ve özgün biçimde modellenmiştir (Şekil 23–Şekil 30). Revit tabanlı modelleme süreci, her bir yapı sisteminin mimari, yapısal ve malzeme özelliklerini en ince ayrıntısına kadar yansıtacak şekilde yürütülmüş; yalnızca geometrik temsillerin oluşturulmasıyla sınırlı kalınmamış, aynı zamanda analizlerde kullanılmak üzere parametrik veri setleri de modellere entegre

edilmiştir. Böylelikle, dijital modeller yalnızca görsel sunum unsurları değil, aynı zamanda sayısal analizler için doğrudan kullanılabilir veri tabanları olarak yapılandırılmıştır.

Tez kapsamında yürütülen BIM tabanlı modelleme sürecinde ilk olarak örnek bir mimari proje geliştirilmiştir. Proje, toplam 120 m² kapalı alana sahip olup 3+1 plan tipolojisinde tasarlanmıştır. Fonksiyonel açıdan bir ailenin günlük yaşam ihtiyaçlarını karşılayabilecek şekilde planlanan proje, salon, oturma odası, mutfak, çocuk odası, yatak odası, banyo, tuvalet ve ebeveyn banyosundan oluşmaktadır. Modelleme sürecinde yapı elemanlarının boyutları, konumları ve geometrik özellikleri doğru ve uygulanabilir biçimde tanımlanmış, böylece metraj ve maliyet analizlerinde güvenilir sonuçlar elde edilebilecek ayrıntı düzeyi sağlanmıştır. Bu doğrultuda proje, LOD 300 (Level of Development 300) seviyesinde modellenmiştir. LOD 300, yapı elemanlarının tasarım sürecine uygun olarak kesin boyutları, konumları ve ilişkileriyle temsil edilmesini, bu kapsamda çizimlerin, kesitlerin ve metrajların doğrudan kullanılabilmesini ifade etmektedir. Hazırlanan model yalnızca görsel bir temsilden ibaret olmayıp teknik karar süreçlerini destekleyebilecek ve disiplinler arası koordinasyona katkı sağlayabilecek doğruluk ve güvenilirlik düzeyine sahiptir.

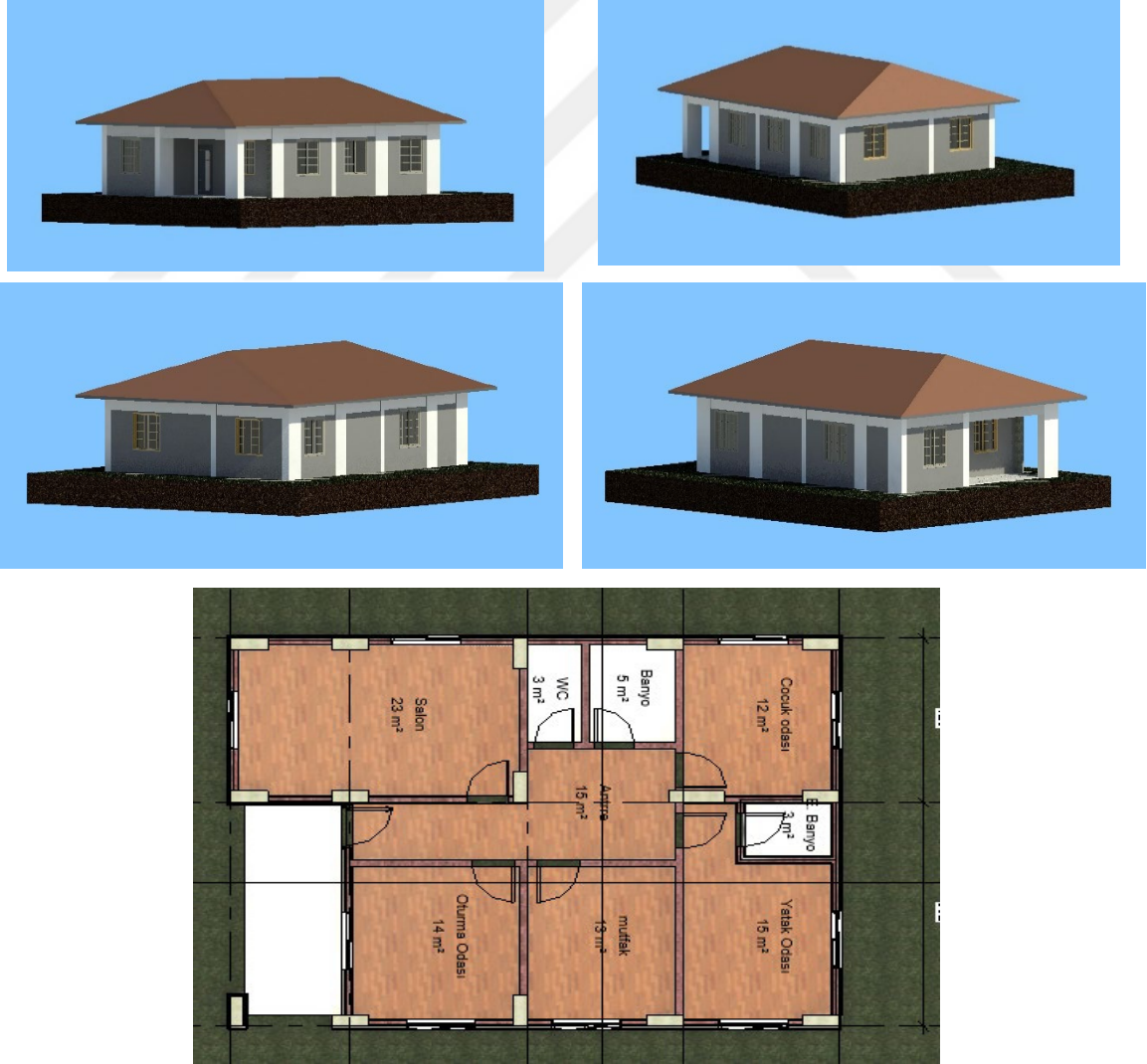
Söz konusu mimari tasarım, kullanıcıların konforlu ve sürdürülebilir bir yaşam alanına sahip olabilmesini amaçlayarak hazırlanmıştır. Mekânsal organizasyonda hem mahremiyet hem de işlevsellik dengesi gözetilmiş, ortak kullanım alanları ile bireysel alanların uyumlu bir biçimde kurgulanmasına özen gösterilmiştir. Bu bağlamda proje, yalnızca taşıyıcı sistemlerin modellenmesi açısından değil, aynı zamanda gerçekçi ve uygulanabilir bir yaşam senaryosunun dijital ortama aktarılması bakımından da önem taşımaktadır.

Tüm yapı sistemleri, aynı fonksiyonel kullanım senaryosuna sahip tip proje esas alınarak, kendi yapım tekniği ve taşıyıcı sistem özelliklerine uygun biçimde modellenmiştir. Bu kapsamda; betonarme (Şekil 23), çelik ve hafif çelik prefabrik (Şekil 24), yığma ahşap ve CLT ahşap (Şekil 25), bağdadi (Şekil 26), payandalı ve payandasız ahşap (Şekil 27), taş yığma (Şekil 28), tuğla ve donatılı tuğla (Şekil 29) ile donatılı gazbeton panel (Şekil 30) sistemleri ele alınmıştır. Farklı yapım teknolojilerine dayansalar da tüm sistemler, eşdeğer koşullar altında karşılaştırılabilir bir formata dönüştürülerek analiz edilmiştir.

Çelik ve hafif çelik prefabrik yapı (Şekil 42), yığma ahşap ve CLT ahşap yapı (Şekil 25), payandalı ve payandasız ahşap yapı (Şekil 27) ile tuğla ve donatılı tuğla yığma yapı (Şekil 27) modelleri, benzer yapım teknikleri ve iş kalemlerine sahip olmaları nedeniyle aynı mimari görünüm altında sunulmuştur. Bu sistemlerde taşıyıcı eleman tipleri, plan

organizasyonu ve cephe düzenleri büyük ölçüde örtüştüğünden, görsel açıdan farklılıklar belirgin değildir. Dolayısıyla aynı tip proje üzerinden üretilen bu modellemeler, sistemlerin yapısal özelliklerini temsil edecek şekilde tek bir görsel ile ifade edilmiştir. Böylelikle hem tekrarların önüne geçilmiş hem de karşılaştırmalı analizlerde bütüncül ve anlaşılır bir görsellik sağlanmıştır.

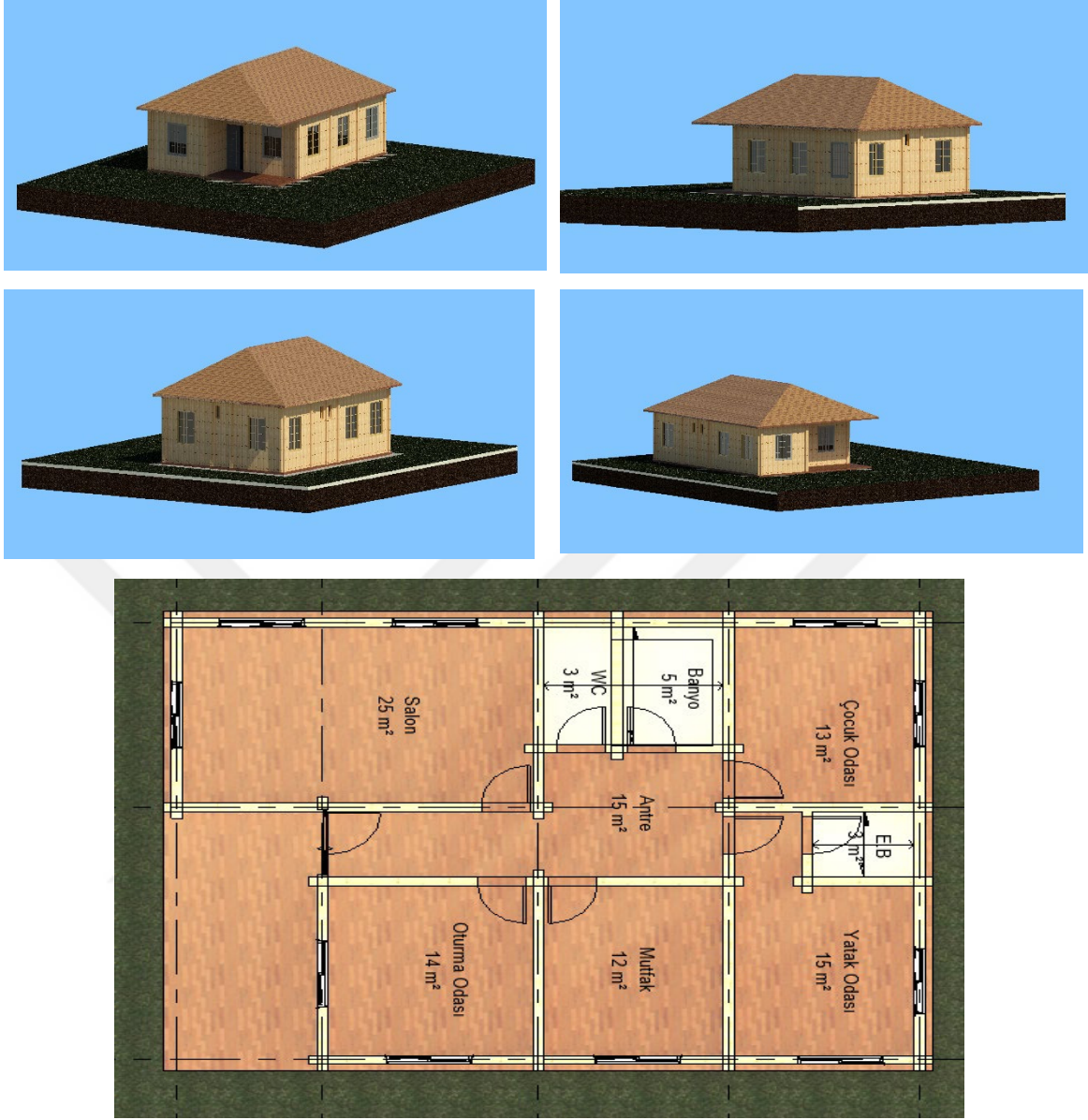
Modelleme sürecinde her yapı sistemine ait taşıyıcı eleman boyutları, duvar sistemleri, döşeme ve çatı katmanları, malzeme türleri ve birleşim detayları titizlikle tanımlanmıştır. Böylece oluşturulan BIM modelleri, metraj çıkarımı, yaklaşık maliyet hesaplamaları, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve enerji verimliliği analizleri gibi çok boyutlu çalışmalar için güvenilir bir veri altyapısı sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu modelleme yaklaşımı, çalışmanın karşılaştırmalı analiz metodolojisine teknik tutarlılık ve bütünlük kazandırmıştır.



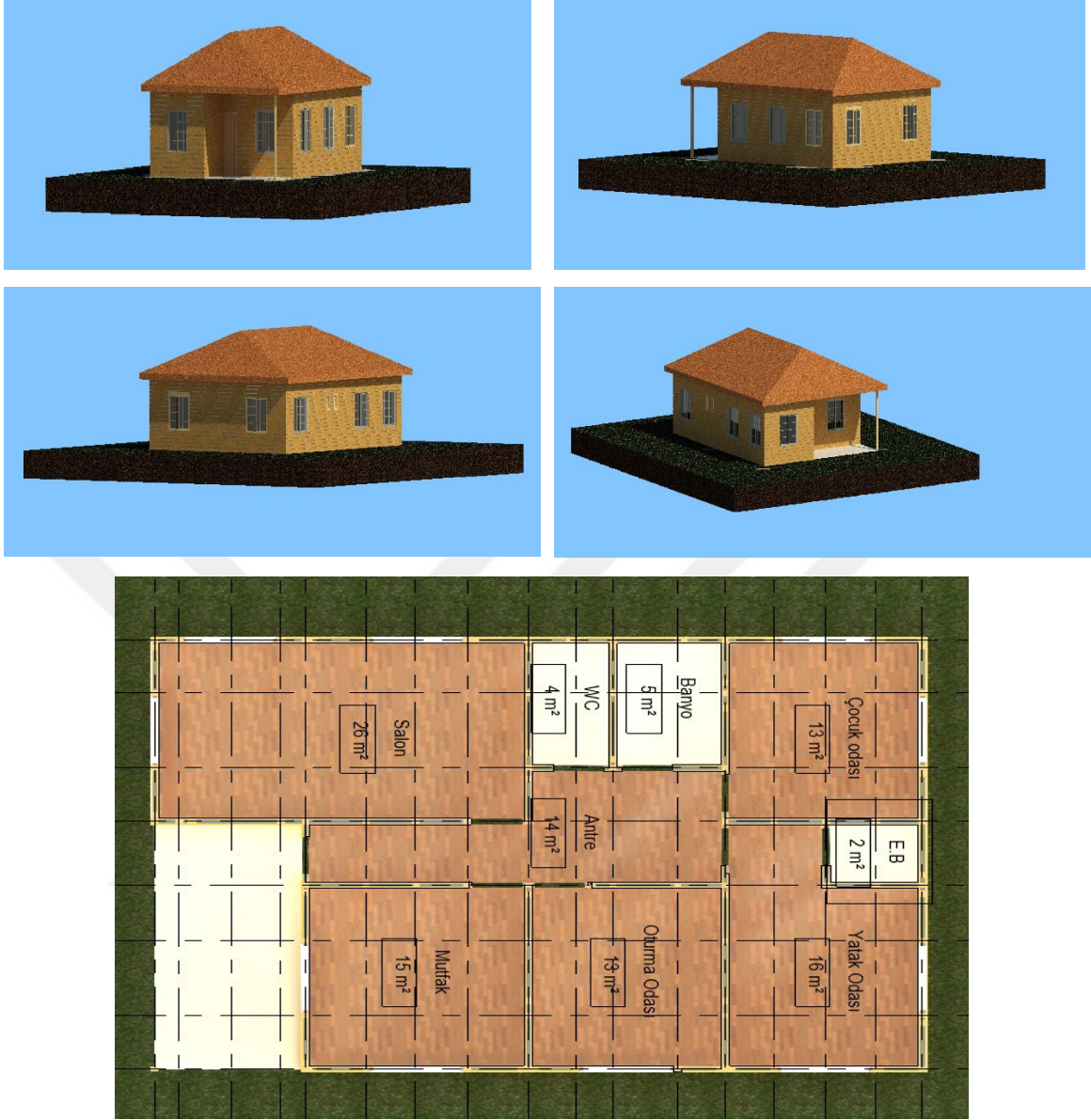
Şekil 23. Betonarme yapı Revit modellemesi



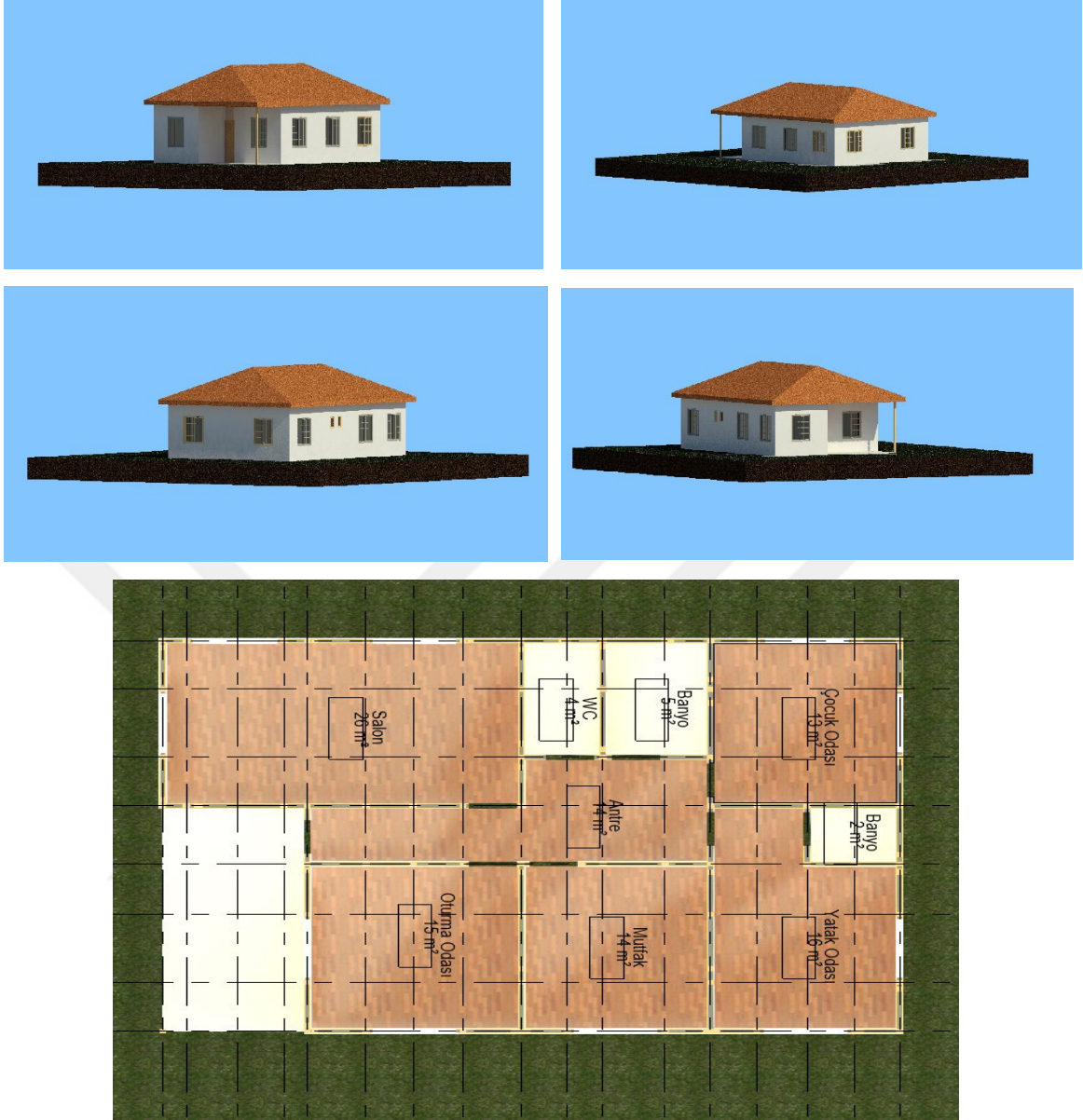
Şekil 24. Çelik yapı ve hafif çelik yapı Revit modellemesi



Şekil 25. Ahşap yığma yapı ve cilt ahşap yapı Revit modellemesi



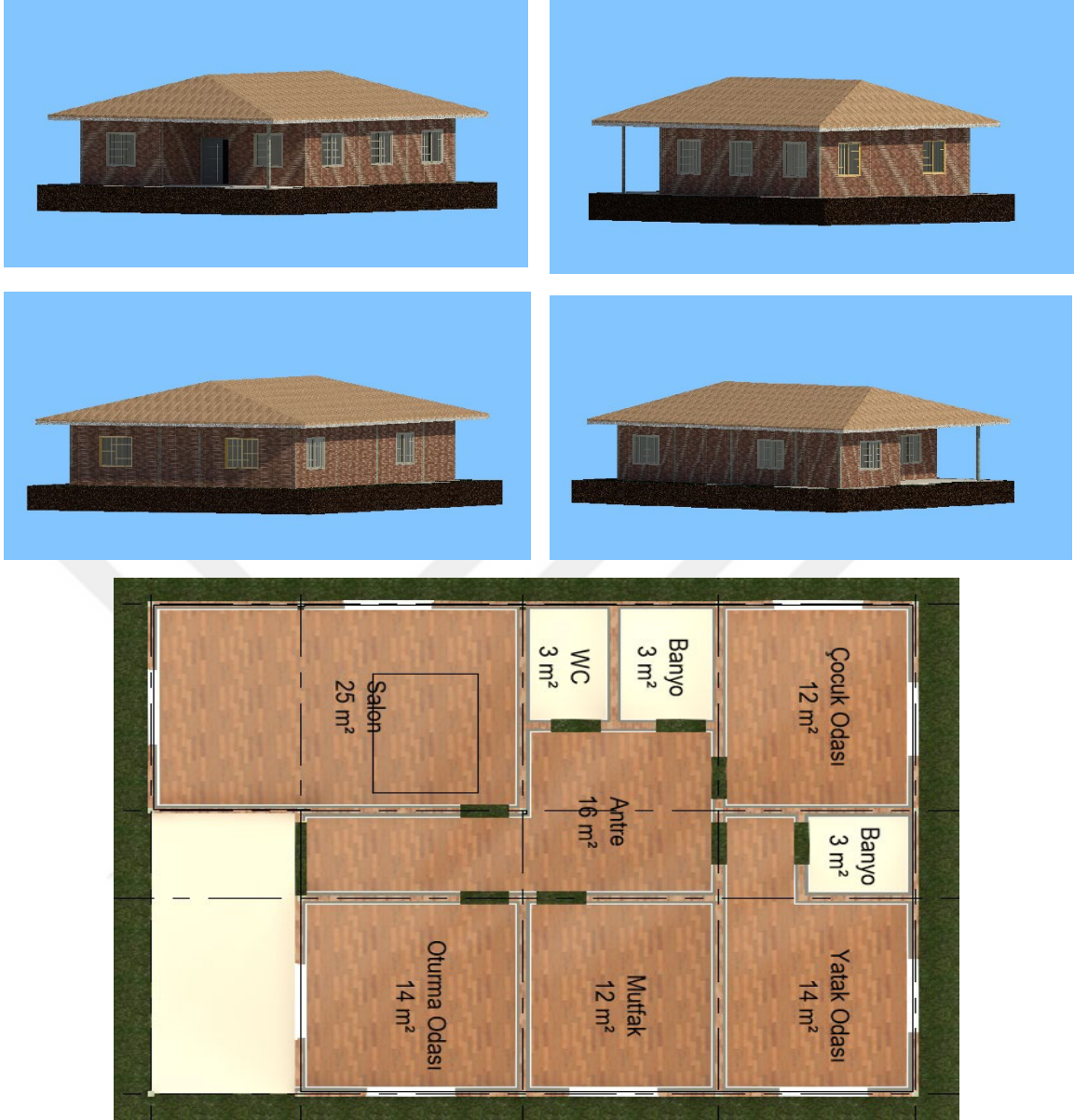
Şekil 26. Bağdadi ahşap yapı Revit modellemesi



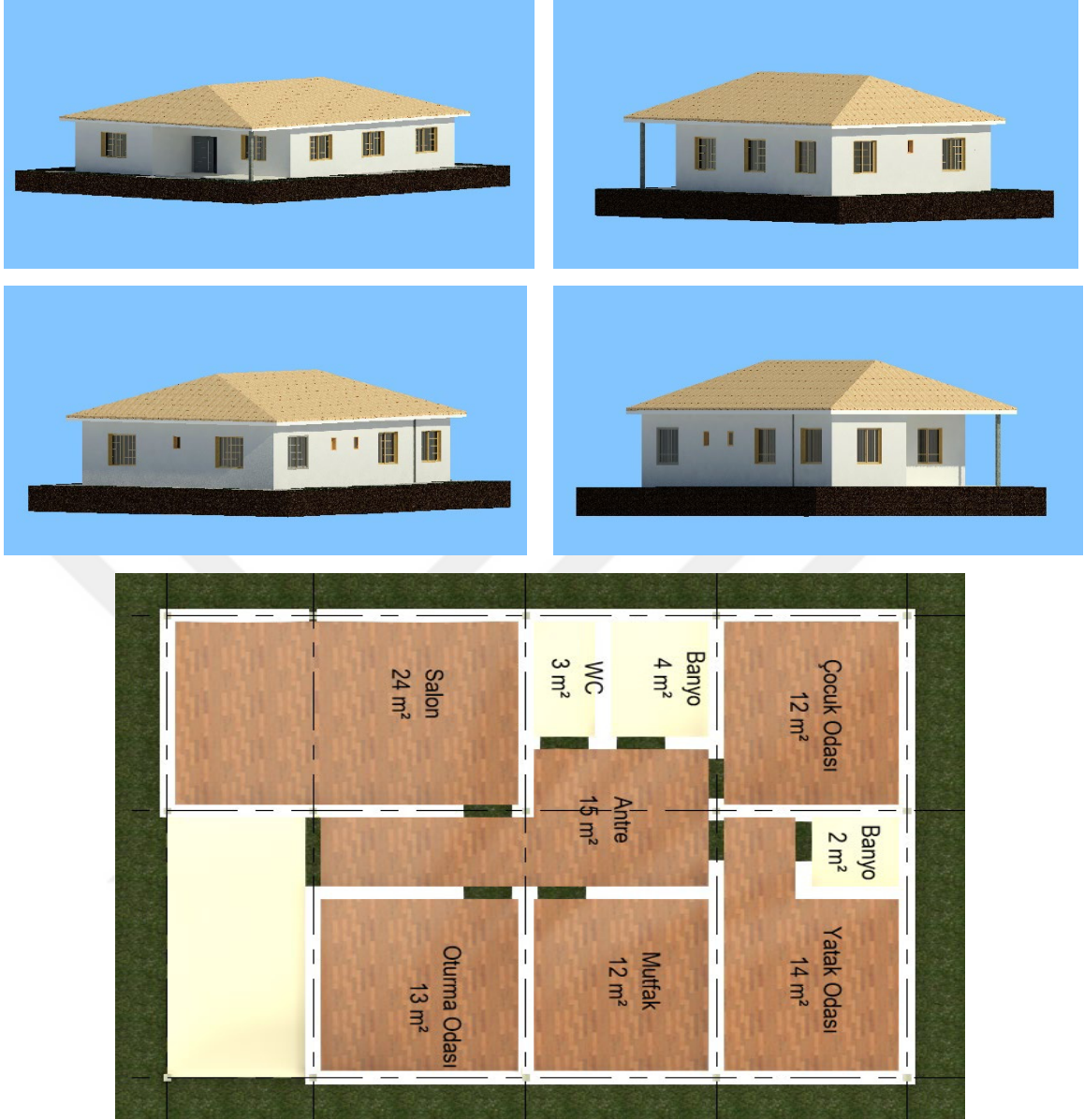
Şekil 27. Payandalı ahşap yapı ve payandasız ahşap yapı Revit modellemesi



Şekil 28. Taş yığma yapı Revit modellemesi



Şekil 29. Tuğla yığma yapı ve donatılı yığma yapı Revit modellemesi



Şekil 30. Donatılı gaz beton panel yapı Revit modellemesi

2.1.4. Yaklaşık Maliyet Hesaplaması

Bu çalışmada, farklı yapı sistemlerinin ekonomik performanslarını nesnel biçimde değerlendirmek amacıyla yaklaşık maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Söz konusu hesaplamaların ilk adımını, her yapı sistemine özgü üretim süreçlerini yansıtan iş kalemlerinin belirlenmesi oluşturmuştur.

İş kalemlerinin seçimi, yalnızca yapım maliyetini yansıtmakla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda her bir yapı sisteminin yapım sürecinde karşılaşılan iş gücü, malzeme kullanımı ve uygulama detayları gibi faktörleri doğru şekilde temsil edecek biçimde yapılmıştır. Bu kapsamda, taşıyıcı sistemlerin (betonarme, çelik, ahşap vb.), duvar kaplama malzemelerinin, döşeme ve çatı sistemlerinin farklılığı gözetilerek her yapı sistemine özel iş kalemleri tanımlanmıştır. Böylece, her sistemin kendine özgü yapım teknolojisi, imalat zorlukları ve malzeme-işçilik kombinasyonu maliyet hesaplarına doğrudan yansıtılmıştır.

Tanımlanan iş kalemlerine ait metraj verileri, Autodesk Revit yazılımı kullanılarak oluşturulan BIM modelleri üzerinden elde edilmiştir. Modelleme sürecinde yapı bileşenlerinin geometrik özellikleri, malzeme türleri ve yapım detayları dikkate alınarak oluşturulan bu metrajlar, hesaplamaların teknik doğruluğunu ve karşılaştırılabilirliğini sağlamayı amaçlamıştır. Metrajlara karşılık gelen birim fiyatlar, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan 2025 yılı birim fiyat kitapçıkları esas alınarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, deprem bölgesinde gözlemlenen olağanüstü fiyat dalgalanmaları ve sektörel işçilik maliyetlerindeki bölgesel farklılıklar nedeniyle, hesaplamalarda Kahramanmaraş bölgesinden temin edilen güncel piyasa birim fiyatları kullanılmıştır. Böylece, bölgesel ekonomik koşulların maliyet analizlerine daha gerçekçi biçimde yansıtılması hedeflenmiştir.

Söz konusu resmi kaynaklar, kamu ve özel sektör projelerinde yaygın biçimde kullanılan standart maliyet verilerini sağlamaktadır. Ancak bazı yapı sistemlerinde yer alan ve bu kaynaklarda doğrudan karşılığı bulunmayan iş kalemleri için özel poz tanımlamaları yapılmıştır. Bu özel pozlara ait maliyetler, piyasa araştırması yoluyla yerel üretici ve uygulayıcı firmalardan temin edilen ortalama fiyat verileri esas alınarak oluşturulmuştur. Bu sayede maliyet hesapları hem güncellik hem de sektörel gerçeklikle uyumlu hale getirilmiştir.

Tüm bu veriler, OSKA E-Hakediş yazılımı aracılığıyla entegre edilerek analiz edilmiş; her bir yapı sistemi için toplam inşaat maliyeti ve birim metrekare maliyeti hesaplanmıştır.

Elde edilen maliyet çıktıları, çalışmanın sonraki bölümlerinde gerçekleştirilen çok kriterli değerlendirmelerde temel bir karşılaştırma ölçütü olarak kullanılmıştır.

Her bir modelde kullanılan imalatlar, iş kalemleriyle eşleştirilerek metraj ve birim fiyat değerleriyle birlikte Tablo 1 'de sunulmuştur.



Tablo 1. İş kalemleri listesi

İnşaat İmalatları	İmalatın Cinsi	Birim Fiyat (TL)	Ahşap						Yığma			Modüler		
			Betonarme	Çelik	Yığma	Bağdadi	Payandalı	Payandasız	Taş	Tuğla	Donatılı Tuğla	Donatılı Gaz Beton Panel	Hafif Çelik Prefabrik	CLT Ahşap
Kazı ve Blokaj	Makine ile yumuşak/sert zemin serbest kazısı (m ³)	47.54	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536	157.536
	Ocak taşı ile blokaj yapımı (m ³)	1,106.18	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236	24.236
Betonarme İmalatları	Plywood düz yüzeyli betonarme kalıp yapımı (m ²)	1,516.66	305.702	37.7	37.7	37.7	37.7	37.7	38.22	37.7	37.7	37.7	37.7	37.7
	Nervürlü donatı çubuğu kesme, bükme ve yerleştirme (ton)	42,626.98	10.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	5.00	5.00	4.00	4.00
	Beton dökümü(C16/20) (m ³)	3,103.84	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300
	Beton dökümü(C30/37) (m ³)	3,502.26	128.210	91.881	91.881	91.881	91.881	91.881	169,533	120.636	120.636	120.636	91.881	91.881
	Çelik boru iskele kurulumu (m ³)	103.20	339.488	---	---	---	---	---	339.488	339.488	339.488	339.488	---	---
Çelik İskelet Sistemi İmalatı	Profil demirlerden karkas ve birleşik aksam montajı (ton)	88,336.3	---	10.000	---	---	---	---	---	---	---	---	8.500	---
	İki kat solvent bazlı epoksi boya uygulaması (m ²)	328.90	---	2.7	---	---	---	---	---	---	---	---	2.7	---
Ahşap İskelet Sistemi İmalatı	1. Sınıf sedir kereste ahşap karkas imalatı ve montajı (m ³)	40,568.8	---	---	34.911	27.694	25.000	24.300	---	---	---	---	---	---
	Ahşap yüzey vernikli koruyucu ile vernikleme (m ²)	241.59	---	---	252.54	471.78	471.78	471.78	---	---	---	---	---	252.54
Döşeme İmalatı	Techizatlı gazbeton döşeme elemanı ile taşıyıcı döşeme yapımı (m ²)	1,311.13	---	---	---	---	---	---	---	---	---	164.575	---	---
	Kadron ahşap döşeme uygulaması (m ²)	1134.93	---	---	145.06	145.06	145.06	145.06	---	---	---	---	---	145.06
Döşeme Kaplama İmalatı	Çimento dozlu şap uygulaması (m ²)	369.40	95.93	95.93	---	---	---	---	89.678	98.90	98.90	95.933	95.933	---
	Seramik zemin kaplaması (m ²)	568.78	22.12	22.12	21.10	22.12	22.12	22.12	20.82	22.12	22.12	25.68	25.68	22.12
	Lamine parke kaplaması (süpürgelik dahil) (m ²)	1,724.01	95.93	95.93	---	---	---	---	89.678	98.90	98.90	95.933	95.933	---

Tablo 1. Devamı

İnşaat İmalatları	İmalatın Cinsi	Birim Fiyat (TL)	Betonarme	Ahşap					Yığma			Modüler		
				Çelik	Yığma	Bağdadi	Payandalı	Payandasız	Taş	Tuğla	Donatılı Tuğla	Donatılı Gaz Beton Panel	Hafif Çelik Prefabrik	CLT Ahşap
Duvar İmalatları	Dolgu harman tuğla duvar yapımı (m ²)	1,171.49	---	---	---	---	---	---	---	201.90	---	---	---	---
	Delikli harman tuğla duvar yapımı (m ²)	1,171.49	---	---	---	---	---	---	---	---	201.90	---	---	---
	Ocaktan çaplanmış moloz taşı ile 200 Dozlu çimento harçlı kâgir inşaat yapılması (m ³)	3,614.64	---	---	---	---	---	---	90.945	---	---	---	---	---
	Yatay delikli tuğla (190 x 190 x 135 mm) ile duvar yapılması (m ²)	866.96	96.52	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Yatay delikli tuğla (190 x 135 x 190 mm) ile duvar yapılması (m ²)	665.21	60.38	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Alçı levha ile bölme duvar yapımı (m ²)	1,139.78	---	450.79	---	---	---	---	---	---	---	---	447.18	---
	Osب/3 kaplama yapılması (m ²)	543.69	---	---	---	419.26	419.26	419.26	---	---	---	---	---	---
	Teçhizatlı gazbeton duvar elemanı ile duvar yapımı (m ²)	1,506.36	---	---	---	---	---	---	---	---	---	121.74	---	---
	15 cm CLT panel montajı (m ³)	27,937.45	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	34.91
Çatı İmalatları	Ahşap çatı oturtma (m ²)	1,372.82	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76
	0,50 mm galvanizli çinko çatı kaplaması (m ²)	2,107.53	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76
Yalıtım İmalatları	Pvc esaslı jeomembran su yalıtımı (m ²)	539.44	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16	133.16
	Taşyünü ısı yalıtımı (mantolama) (m ²)	1,103.75	118.95	---	---	---	---	---	---	---	---	118.95	---	---
	Çimento esaslı levha ile bölme duvar ısı/ses yalıtımı (m ²)	393.00	---	119.64	---	198.39	193.39	193.39	173.38	198.39	198.39	198.39	213.54	---
	Cam yünü şilte ve buhar kesici ile çatı yalıtımı (m ²)	272.56	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76
	Bitümlü membran su yalıtımı (m ²)	299.44	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76	183.76

Tablo 1. Devamı

İnşaat İmalatları	İmalatın Cinsi	Birim Fiyat (TL)	Ahşap							Yığma		Modüler		
			Betonarme	Çelik	Yığma	Bağdadi	Payandalı	Payandasız	Taş	Tuğla	Donatılı Tuğla	Donatılı Gaz Beton Panel	Hafif Çelik Prefabrik	CLT Ahşap
Duvar Kaplama İmalatları	Seramik Duvar Kaplaması (m ²)	678.20	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88	60.88
	Kaba ve İnce Harç Sıva (Dış Cephe) (m ²)	694,59	118.95	118.95	116.15	---	---	---	---	---	---	116.15	116.15	---
	Kireç/Çimento Karışımı İç Cephe Sıvası (m ²)	618.68	350.40	350.407	---	---	---	---	---	225.25	225.25	332.38	332.38	---
	Silikonlu Mat İç Cephe Boyası (m ²)	173.63	350.40	350.407	---	---	---	---	---	225.25	225.95	332.38	332.38	---
	Silikonlu Mat Dış Cephe Boyası (m ²)	310.31	99.39	118.95	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Kıtıklı Kireç Harcı ile Bağdadi Düz Sıva (m ²)	2724.26	---	---	---	582.236	---	---	---	---	---	---	---	---
Kapı ve Pencere İmalatı	Masif Tablalı Kapı Kasa ve Pervaz Montajı (m ²)	1,886.25	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37	8.37
	Laminat Kaplamalı Kapı Kanadı Montajı (m ²)	2,455.45	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16
	Ahşaptan masif tablalı dış kapı kasa ve pervazı yapılması yerine konulması (m ²)	2,049.79	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
	PVC/Alüminyum Doğrama Profil Montajı (m ²)	1,633.81	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75
	Masif Kapı Kanadı Montajı (m ²)	1,853.75	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	Gömme Tip Kapı Kilidi Montajı (adet)	106.25	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Kromajlı Kapı Kolu ve Ayna Montajı (adet)	106.25	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Menteşe Montajı (adet)	106.25	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Diğer İşlemler	Çeşitli Demir İşleri ve Montajı (kg)	1,886.25	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	200

2.1.5. Proje Sürelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, her bir yapı sistemi için proje sürelerinin belirlenmesi süreci, nicel veriye dayalı planlama yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Her iş kalemine ait metraj verileri elde edildikten sonra, işçilik planlaması aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda, her iş kalemi için gerekli işçi sayısı sektörel üretim normları ve geçmiş projelerden elde edilen saha verileri esas alınarak tespit edilmiştir. Adamsaat değerleri ise seçilen poz numaralarının analiz verilerinde yer alan işçilik değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu veriler Tablo 2’de verilmektedir.

İşçi sayısı, metraj ve adam saat değerleri kullanılarak her iş kaleminin tamamlanması için gereken toplam süre hesaplanmıştır (Tablo 2). Adamsaat değerlerinde işin zorluk derecesi, kullanılan ekipman türü, iş güvenliği gereklilikleri ve hava koşullarının olası etkileri gibi faktörler de göz önünde bulundurulduğundan, elde edilen sürelerin de sahadaki gerçek üretim koşullarını yansıtan realistik süreleri temsil ettiği kabul edilmiştir.

Hesaplanan proje süreleri, Primavera P6 yazılımına aktarılmış ve her bir yapı sistemi için ayrıntılı süre planlamaları oluşturulmuştur. Primavera ortamında iş kalemleri arasındaki mantıksal bağlar tanımlanmış, öncelik–sonralık ilişkileri kurulmuş ve Kritik Yol Yöntemi (Critical Path Method – CPM) esas alınarak proje süresini belirleyen kritik faaliyetler otomatik olarak ortaya çıkarılmıştır. Bu yöntem sayesinde faaliyetler arasındaki bağımlılıklar, süre kısıtları ve kaynak kullanımı dikkate alınarak kapsamlı ve sistematik bir zaman çizelgesi elde edilmiştir.

Tablo 2. Proje süresi analizinde kullanılan iş kalemleri ve işçi sayıları

İnşaat İmalatları	İmalatın Cinsi	İşçi Sayısı	Adamsaat	Süre (gün)											
				Ahşap	Yığma	Modüler									
				Betonarme	Çelik	Yığma	Bağdadi	Payandalı	Payandasız	Taş	Tuğla	Donatılı Tuğla	Donatılı Gaz Beton Panel	Hafif Çelik Prefabrik	CLT Ahşap
Kazı ve Blokaj	Makine ile yumuşak/sert zemin serbest kazısı	1	0.014	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Ocak taşı ile blokaj yapımı	3	1.50	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Betonarme İmalatları	Plywood düz yüzeyli betonarme kalıp yapımı	7	1.10	7	1	1	1	1	1	5	1	1	2	1	1
	Nervürlü donatı çubuğu kesme, bükme ve yerleştirme	5	12.00	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Beton dökümü	5	0.30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Çelik boru iskele kurulumu	5	0.024	1	---	---	---	---	---	1	1	1	1	---	---
Çelik İskelet Sistemi İmalatı	Profil demirlerden karkas ve birleşik aksam montajı	5	7.00	---	2	---	---	---	---	---	---	---	---	2	---
	İki kat solvent bazlı epoksi boya uygulaması	1	0.60	---	1	---	---	---	---	---	---	---	---	1	---
Ahşap İskelet Sistemi İmalatı	1. Sınıf sedir kereste ahşap karkas imalatı ve montajı	7	18.50	---	---	12	10	9	9	---	---	---	---	---	---
	Ahşap yüzey vernikli koruyucu ile vernikleme	5	0.45	---	---	3	6	6	6	---	---	---	---	---	3
Döşeme İmalatı	Teçhizatlı gazbeton döşeme elemanı ile taşıyıcı döşeme yapımı	5	0.34	---	---	---	---	---	---	---	---	---	2	---	---
	Kadro ahşap döşeme uygulaması	5	0.80	---	---	3	3	3	3	---	---	---	---	---	---
Döşeme Kaplama İmalatı	Çimento dozlu şap uygulaması	4	0.35	2	2	---	---	---	---	1	2	2	2	2	---
	Seramik zemin kaplaması	3	0.60	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Lamine parke kaplaması (süpürgelik dahil)	4	0.40	2	2	2	2	---	---	2	2	2	2	2	2

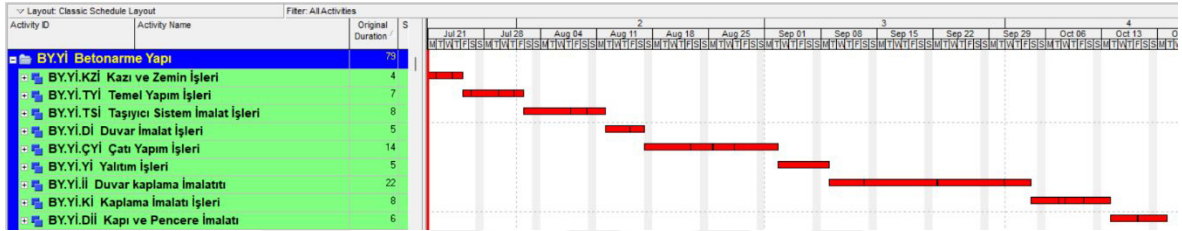
Tablo 2. Devamı

İnşaat İmalatları	İmalatın Cinsi	İşçi Sayısı	Adamsaat	Süre											
				Betonarme	Çelik	Yığma	Ahşap			Yığma			Modüler		
							Bağdadi	Payandalı	Payandasız	Taş	Tuğla	Donatılı Tuğla	Donatılı Gaz Beton Panel	Hafif Çelik Prefabrik	CLT Ahşap
Duvar İmalatları	Dolgu harman tuğla duvar yapımı	5	0.60	---	---	---	---	---	---	---	4	---	---	---	---
	Delikli harman tuğla duvar yapımı	5	0.60	---	---	---	---	---	---	---	---	4	---	---	---
	Ocaktan çaplanmış moloz taşı ile 200 dozlu çimento harçlı kâgir inşaat yapılması	5	1.25	---	---	---	---	---	---	3	---	---	---	---	---
	Yatay delikli tuğla (190 x 190 x 135 mm) ile duvar yapılması	4	0.67	3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Yatay delikli tuğla (190 x 135 x 190 mm) ile duvar yapılması	3	0.63	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Alçı levha ile bölme duvar yapımı	8	1.10	---	8	---	---	---	---	---	---	---	---	8	---
	Os/3 kaplama yapılması	7	0.40	---	---	---	3	3	3	---	---	---	---	---	---
	Teçhizatlı gazbeton duvar elemanı ile duvar yapımı	5	0.60	---	---	---	---	---	---	---	---	---	2	---	---
	15 cm CLT panel montajı	4	1.50	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	2
Çatı İmalatları	Ahşap çatı oturtma	5	1.00	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,50 mm galvanizli çinko çatı kaplaması	4	0.25	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Yalıtım İmalatları	Pvc esaslı jeomembran su yalıtımı	4	0.40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Taşyünü ısı yalıtımı (mantolama)	4	1.30	5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Çimento esaslı levha ile bölme duvar ısı/ses yalıtımı	4	0.15	---	2	---	2	2	2	2	---	---	---	2	---
	Cam yünü şilte ve buhar kesici ile çatı yalıtımı	4	0.30	2	2	2	2	2	2	---	2	2	2	2	2
	Bitümlü membran su yalıtımı	4	0.40	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

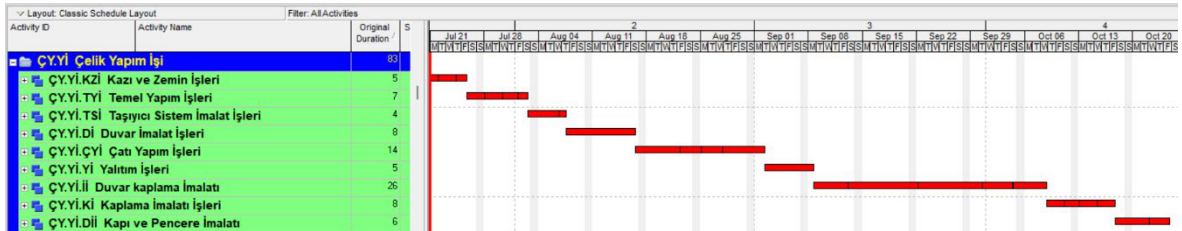
Tablo 2. Devamı

İnşaat İmalatları	İmalatın Cinsi	İşçi Sayısı	Adamsaat	Süre (gün)												
				Betonarme	Çelik	Yığma	Ahşap			Yığma				Modüler		
							Bağdadi	Payandalı	Payandasız	Taş	Tuğla	Donatılı Tuğla	Donatılı Gaz Beton Panel	Hafif Çelik Prefabrik	CLT Ahşap	
Duvar Kaplama İmalatları	Seramik Duvar Kaplaması	3	0.70	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Kaba ve İnce Harç Sıva (Dış Cephe)	4	1.00	4	4	---	---	---	---	---	---	---	4	4	---	
	Kireç/Çimento Karışımı İç Cephe Sıvası	6	0.90	7	7	---	---	---	---	---	5	5	7	7	---	
	Silikonlu Mat İç Cephe Boyası	3	0.35	4	6	---	---	---	---	---	4	4	5	4	---	
	Silikonlu Mat Dış Cephe Boyası	3	0.60	3	3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Kıtıklı Kireç Harcı ile Bağdadi Düz Sıva	10	4.00	---	---	---	30	---	---	---	---	---	---	---	---	
Kapı ve Pencere İmalatı	İç kapı yapımı ve montajı	4	6.3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Dış kapı yapımı ve montajı	4	6.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	PVC/Alüminyum Doğrama Profil Montajı	4	0.70	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Diğer İşlemler	Çeşitli Demir İşleri ve Montajı	2	0.05	---	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1	

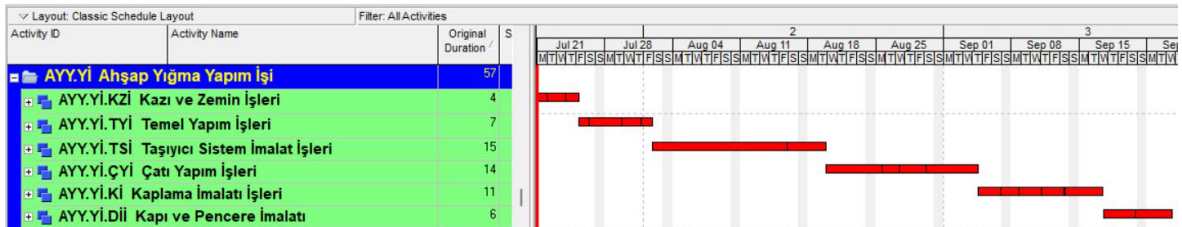
Farklı yapı sistemlerine ait proje süresi analizleri görseller aracılığıyla ayrıntılı olarak sunulmuştur. Betonarme yapı için oluşturulan süre planlaması Şekil 31, çelik yapı için hazırlanan çizelge Şekil 32’de verilmiştir. Ahşap yapı sistemlerine ilişkin sonuçlar; yığma ahşap (Şekil 33), bağdadi ahşap (Şekil 34), payandalı ahşap (Şekil 35) ve payandasız ahşap (Şekil 36) için ayrı ayrı gösterilmiştir. Yığma yapı sistemlerinden taş yığma (Şekil 37), tuğla yığma (Şekil 38) ve donatılı yığma (Şekil 39) için elde edilen süre planlamaları görselleştirilmiştir. Modüler yapı sistemleri kapsamında ise donatılı gaz beton panel (Şekil 40), prefabrikasyon yapı (Şekil 41) ve CLT ahşap yapı (Şekil 42) için hazırlanan zaman çizelgeleri sunulmaktadır.



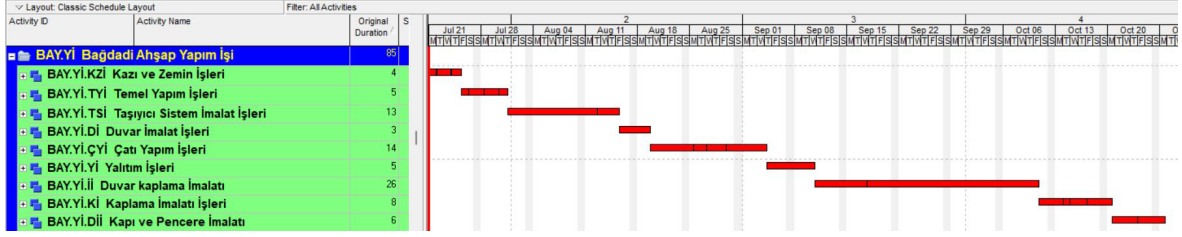
Şekil 31. Betonarme yapı Gant diyagramı



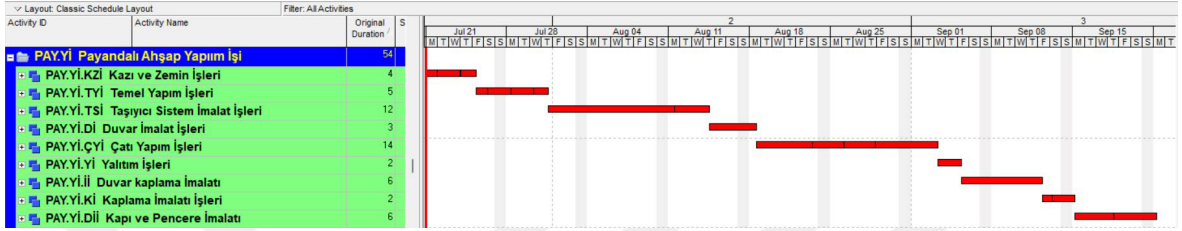
Şekil 32. Çelik yapı Gant diyagramı



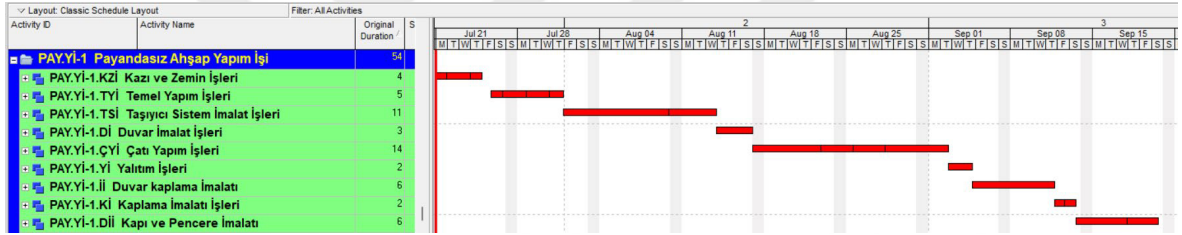
Şekil 33. Ahşap yığma yapı Gant diyagramı



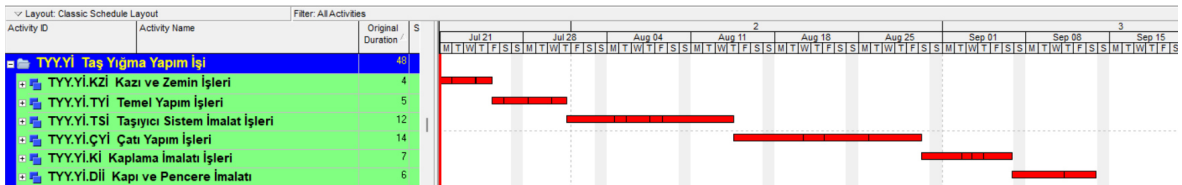
Şekil 34. Bağdadi ahşap yapı Gant diyagramı



Şekil 35. Payandalı ahşap yapı Gant diyagramı



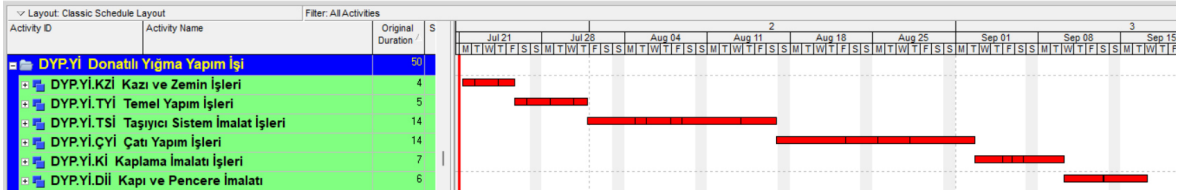
Şekil 36. Payandasız ahşap yapı Gant diyagramı



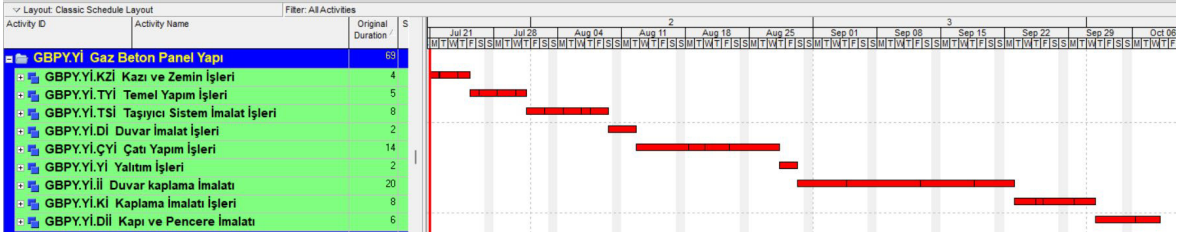
Şekil 37. Taş yığma yapı Gant diyagramı



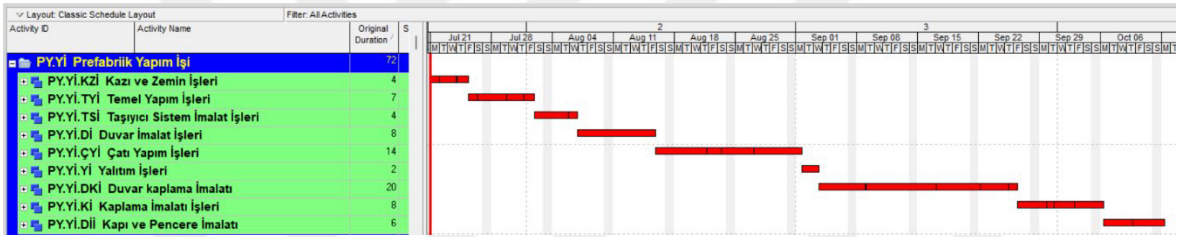
Şekil 38. Tuğla yığma yapı Gant diyagramı



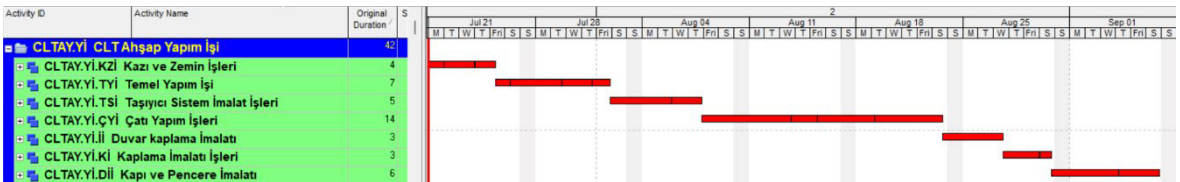
Şekil 39. Donatılı yığma yapı Gant diyagramı



Şekil 40. Gaz beton panel yapı Gant diyagramı



Şekil 41. Hafif Çelik prefabrik yapı Gant diyagramı



Şekil 42. Clt ahşap yapı Gant diyagramı

Şekil 31–42 arasında yer alan bu şekiller, farklı yapı sistemlerinin proje sürelerini karşılaştırmalı biçimde değerlendirme imkânı sunmakta hangi sistemlerin daha kısa veya daha uzun proje süresine sahip olduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Böylece, yapım yöntemleri arasındaki süre farklılıkları sistematik olarak belgelenmiş ve proje planlamasında karar vericilere kapsamlı bir perspektif sağlanmıştır.

2.1.6. Enerji Verimliliği Analizi

Bu çalışmada enerji verimliliği analizleri, Autodesk Revit yazılımının Insight modülü kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, analiz kapsamında yalnızca ısıtma (heating loads) ve soğutma yükleri (cooling loads) dikkate alınmıştır. Isıtma yükleri, bölgenin düşük sıcaklık koşullarında iç ortamın konfor seviyesinde tutulabilmesi için gerekli enerji ihtiyacını ifade ederken; soğutma yükleri ise yüksek sıcaklık koşullarında iç ortam sıcaklığının kontrol altında tutulabilmesi için gereken enerji talebini yansıtmaktadır. Bu kapsamda yapı sistemlerinin iklimsel koşullara karşı ısı performansları ön plana çıkarılmış ve enerji etkinlikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, enerji performansının değerlendirilmesinde kullanılan hesap yöntemlerinin de farklılık gösterdiği belirtilmelidir. TS 825 standardı, yapı elemanlarının katman kalınlıkları ve ısı iletkenlik katsayıları üzerinden yapılan statik bir hesaplama yöntemi sunmakta ve yalnızca ısı kayıplarına odaklanmaktadır. Buna karşın, bu çalışmada Revit yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen enerji analizleri dinamik bir yaklaşıma dayalıdır; saatlik iklim verileri, güneş radyasyonu, iç ısı kazançları ve kullanım koşulları dikkate alınarak hem ısıtma hem de soğutma yükleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla, TS 825'in sağladığı sınır değer odaklı uygunluk kontrolü ile Revit'in kapsamlı enerji simülasyonu arasında yöntemsel bir farklılık bulunmakta olup, bu fark elde edilen sonuçların da çeşitlenmesine yol açmakta ve Revit analizlerinin gerçek iklim koşulları altındaki performansı daha bütüncül biçimde yansıtmayı sağlamaktadır.

Analizler, Onikişubat/Kahramanmaraş bölgesine özgü iklim koşulları dikkate alınarak yürütülmüştür. Bu doğrultuda, meteorolojik parametreler Revit'in enerji analizi altyapısına entegre edilmiştir. İklim verileri, proje koordinatları tanımlandığında program tarafından otomatik olarak ilgili meteoroloji veri tabanından çekilmiş; coğrafi koordinatlar (enlem–boylam), yıllık ortalama sıcaklık değerleri, mevsimsel sıcaklık dalgalanmaları, bağıl nem oranları, hâkim rüzgâr yönleri ve hızları ile yıllık toplam güneşlenme süreleri sisteme aktarılmıştır. Böylelikle analiz sonuçları, bölgenin gerçekçi iklim koşullarını yansıtan bir temel üzerinde elde edilmiştir.

Her yapı sistemi için oluşturulan üç boyutlu BIM modelleri, enerji performansını etkileyen başlıca fiziksel ve termal parametreler gözetilerek hazırlanmıştır. Bu kapsamda; malzeme özellikleri, ısı iletim katsayıları (U-değerleri), yalıtım kalınlıkları, ısı depolama kapasiteleri, cephe yönlenmeleri, pencere–duvar oranları ve gölgeleme elemanları Revit programında tanımlı olan veriler kullanılarak modellenmiştir. Parametrelerin değerleri,

yazılımının kendi veri tabanındaki standartlara dayalı olarak atanmış olup ulusal ve uluslararası normlarla uyumludur. Bu yaklaşım, modellemelerin yalnızca geometrik açıdan değil, aynı zamanda termal özellikler bakımından da her yapı sistemine özgün olmasını sağlamıştır.

Analizler sonucunda her yapı sistemi için ısıtma ve soğutma yükleri ayrı ayrı hesaplanmış, elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmalar sayesinde, farklı yapı sistemlerinin bölgesel iklim koşullarına adaptasyon düzeyleri ortaya konmuş, yüksek enerji verimliliği potansiyeline sahip sistemler belirlenmiştir. Ayrıca, analiz bulguları üzerinden sistemler arasında enerji verimliliği açısından da kıyaslamalar yapılmış, enerji etkinliği bakımından öne çıkan yapı türleri tespit edilmiştir.

2.1.7. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Bu çalışmada, farklı yapı sistemlerinin çevresel etkilerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmesi amacıyla Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment – LCA) yöntemi uygulanmıştır. LCA, bir ürünün veya sistemin ham madde tedarikinden bertarafına kadar geçen tüm süreçlerde ortaya çıkan çevresel etkilerin nicel olarak değerlendirilmesini sağlayan, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları ile tanımlanmış uluslararası kabul görmüş bir yöntemdir.

Analiz sürecinde, her yapı sistemi için Autodesk Revit ortamında geliştirilen üç boyutlu bina modelleri, Tally eklentisi ile entegre edilmiştir. Tally'nin tercih edilmesinin temel nedeni, BIM (Building Information Modeling) ortamında doğrudan LCA hesaplaması yapabilen, EPD tabanlı malzeme veritabanına sahip ve ISO standartlarına uyumlu az sayıda yazılımdan biri olmasıdır. Bu sayede, tasarım modellerinden otomatik olarak malzeme miktarları çekilmiş, manuel veri girişi gereksinimi en aza indirilmiş ve olası insan hatalarının önüne geçilmiştir. Ayrıca Tally, Revit ile tam entegre çalışarak model üzerinde yapılan tasarım değişikliklerinin anında LCA sonuçlarına yansıtılmasını sağlamış, böylece hem zaman tasarrufu hem de yüksek veri doğruluğu elde edilmiştir.

Bu entegrasyon sürecinde, Revit modelinde tanımlı tüm yapı elemanlarının malzeme türleri, miktarları, yoğunluk değerleri, üretim yöntemleri ve kullanım ömürleri, her yapı sisteminin özgün konstrüksiyon teknikleri ve malzeme bileşimleri dikkate alınarak ayrıntılı biçimde belirlenmiştir. Tally veritabanı, Çevresel Ürün Beyanları (Environmental Product

Declarations – EPD) ile uyumlu olarak çalışmakta olup, Revit modeli üzerinden seçilen her malzeme bileşenini ilgili çevresel veri setleri ile ilişkilendirmiştir.

Tablo 3’te yapı sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca oluşan çevresel etkiler, ham madde çıkarımı (A1), malzeme üretimi (A2–A3), şantiye süreci ve taşımalar (A4–A5), kullanım evresi (B1–B7) ve ömrünü tamamlama aşamaları (C1–C4) ile geri dönüşüm/yeniden kullanım potansiyeli (D) dâhil olmak üzere tüm yaşam döngüsü basamaklarında değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında, yapı sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkiler küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitlenme potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (EP), fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli (SFP) ve yenilenemez birincil enerji tüketimi (PENR) gibi temel göstergeler üzerinden kapsamlı biçimde incelenmiştir (Zahabi, 2025).

Tablo 3. Yaşam döngüsü aşamaları

Ürün			İnşaat		Kullanım							Kullanım Sonrası				Ömrün Sonu		
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3
Ham madde Tedariki	Taşımacılık	İmalat	Taşımacılık	İnşaat / Kurulum	Kullanım	Bakım	Onarım	Yenileme	Yeniden İşleme	İşletme Enerjisi	İşletme Suyu	Söküm / Yıkım	Taşımacılık	Atık İşleme	Bertaraf	Yeniden Kullanım	Geri Dönüşüm	Enerji Geri Kazanımı

Analizin sistem sınırları, “beşikten mezara” yaklaşımı esas alınarak belirlenmiştir. Buna göre değerlendirme; yapı malzemelerinin ham madde çıkarımı, üretim ve işleme süreçleri, şantiyeye taşınması, inşaat faaliyetleri, kullanım süresince gerçekleşen bakım-onarım faaliyetleri, hizmet ömrünün sona ermesiyle gerçekleşen yıkım ve bertaraf işlemleri ile olası geri dönüşüm ve yeniden kullanım senaryolarını kapsamaktadır. Kullanım evresinde, yalnızca yapı sistemlerinin malzeme temelli çevresel etkileri dikkate alınmış; enerji tüketimine bağlı işletme yükleri ise enerji verimliliği analizinde ayrıca değerlendirilmiştir. Bu sınırlandırma, analizlerin karşılaştırmalı bir temelde yürütülmesini kolaylaştırmış ve sonuçların her bir yapı sistemi için tutarlı ve karşılaştırılabilir olmasını sağlamıştır.

Bu kapsamda yapılan tüm hesaplamalarda, bazı varsayımlar ve parametreler dikkate alınmıştır:

- Yapıların hizmet ömrü 60 yıl olarak kabul edilmiştir (EN 15978).
- Kullanım evresindeki bakım-onarım faaliyetleri kapsamında, ahşap sistemler için her 2 yılda bir, diğer yapı sistemleri için ise 10 yılda bir yenileme yapılacağı varsayılmıştır.
- Taşımacılık mesafeleri hesaplanırken, şantiyeye ortalama ulaşım mesafesi 350 km olarak esas alınmıştır. Malzeme tedarik kaynaklarının coğrafi konumları dikkate alındığında, çelik malzemelerin Hatay/İskenderun, ahşap ürünlerin Adana/Seyhan ve tuğla ürünlerin ise Nevşehir bölgesinden temin edildiği belirlenmiştir. Bu kapsamda, Nevşehir'den sağlanan tuğla ürünlerinin şantiyeye en uzak noktadan ulaştırıldığı ve bu güzergâh için 350 km'lik taşıma mesafesinin dikkate alındığı varsayılmıştır. Diğer yapı malzemelerinin ise yerel tedarikçiler veya yakın çevredeki firmalar aracılığıyla temin edilebildiği kabul edilmiştir. Sonuç olarak, şehir dışından sağlanan malzemeler için ortalama 350 km şantiye ulaşım mesafesi esas alınarak taşımacılık analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Etki kategorileri Küresel Isınma Potansiyeli (GWP), Asitlenme Potansiyeli (AP), Ötrofikasyon Potansiyeli (EP), Fotokimyasal Ozon Oluşumu Potansiyeli (SFP) ve Yenilenemez Birincil Enerji Tüketimi (PENR) Tally yazılımının TRACI 2.1 yöntemine dayalı olarak belirlenmiştir ve EN 15978 ile uyumludur.

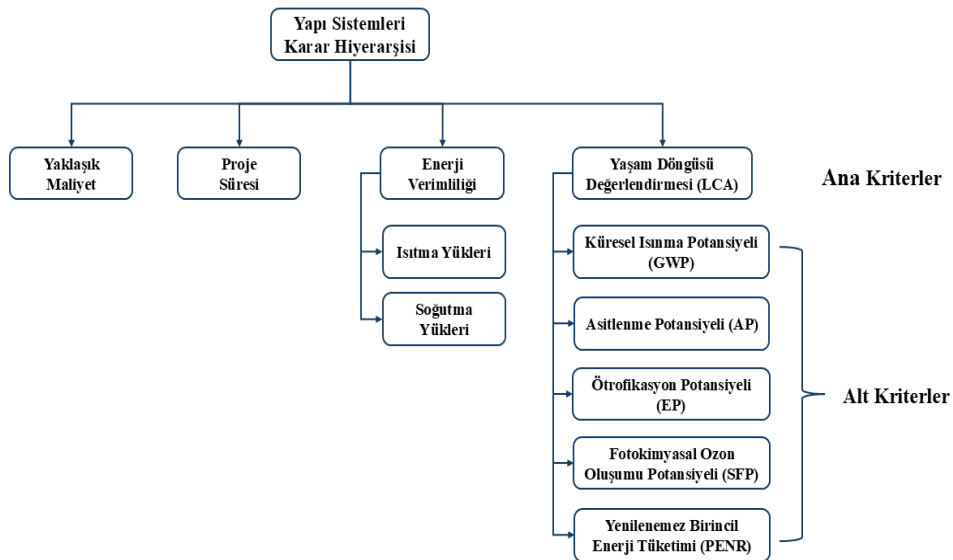
Bu yöntemsel yaklaşım, farklı yapı sistemlerinin yalnızca malzeme miktarları üzerinden değil, aynı zamanda üretim teknolojileri, nakliye süreçleri, kullanım ömrü senaryoları ve bertaraf yöntemleri açısından da kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmasına olanak tanımıştır. Böylece, her bir yapı sisteminin sürdürülebilirlik performansı bilimsel olarak ortaya konmuş ve çalışma kapsamında yürütülen çok kriterli değerlendirme sürecine güçlü bir veri altyapısı sağlanmıştır.

2.1.8. Ağırlıkların Belirlenmesi (AHP Yöntemi)

Bu çalışmada değerlendirme süreci, afet sonrası yeniden yapılaşma bağlamında hem ekonomik hem teknik hem de çevresel boyutları kapsayacak şekilde dört ana kriter üzerinden yürütülmüştür: yaklaşık maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA). Enerji verimliliği kriteri altında ısıtma yükleri ve soğutma yükleri olmak üzere iki alt kriter tanımlanmıştır. Bu alt kriterler, yapıların kullanım aşamasındaki enerji tüketim davranışlarının mevsimsel değişkenlikler çerçevesinde ayrıntılı olarak

değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi kriteri ise, yapı malzemelerinin üretiminden kullanım ömrü sonuna kadar olan tüm aşamalarındaki çevresel etkileri ölçmeyi amaçlayan beş alt kriterden oluşmaktadır: küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitlenme potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (EP), fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli (SFP) ve yenilenemez birincil enerji tüketimi (PENR). Bu alt kriterlerin seçimi, hem uluslararası LCA standartları (ISO 14040/44) hem de yapı sektöründe yaygın olarak kabul gören çevresel performans göstergeleri ile uyumlu şekilde yapılmıştır. Şekil 43'te ana kriterler ve alt kriterler şematik olarak verilmiştir.

Yapı sistemlerinin çok kriterli karşılaştırmasında kullanılacak kriterlerin göreceli önem derecelerinin belirlenmesi amacıyla Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi uygulanmıştır. Ağırlıkların belirlenmesi amacıyla, yapı yönetimi, enerji performansı, sürdürülebilir inşaat teknikleri ve yaşam döngüsü analizi konularında uzman akademisyenler ile sektör deneyimine sahip mühendislerden oluşan 10 katılımcıya ikili karşılaştırma anketi uygulanmıştır. Anket formu, Saaty'nin Tablo 4'te 1–9 öncelik ölçeği esas alınarak hazırlanmış olup 1 değeri iki kriterin eşit öneme sahip olduğunu, 3 değeri bir kriterin diğerine göre hafif derecede daha önemli olduğunu, 5 değeri güçlü önemi, 7 değeri çok güçlü önemi ve 9 değeri mutlak üstünlüğü ifade etmektedir. Ara değerler (2, 4, 6, 8) ise iki önem derecesi arasındaki ara tercihleri yansıtmaktadır. Katılımcılar hem ana kriterler hem de alt kriterler düzeyinde ikili karşılaştırmalar yaparak kendi uzmanlık alanlarındaki değerlendirmelerini sunmuşlardır.



Şekil 43. Yapı sistemleri seçiminde ahp temelli karar hiyerarşisi

Tablo 4. İkili karşılaştırma yönteminde kullanılan önem skalası

Değer	Açıklama
1	Eşit Öneme sahip
3	Orta Düzeyde Öneme Sahip
5	Güçlü Öneme Sahip
7	Çok Güçlü Öneme Sahip
9	Aşırı Önemli
2,4,6,8	Ara değerler

Anketten elde edilen veriler, öncelikle geometrik ortalama yöntemi kullanılarak birleştirilmiş, ardından ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Her bir matris normalize edilerek öncelik vektörleri hesaplanmış ve bu sayede her kriter ile alt kriterin göreceli ağırlıkları elde edilmiştir. AHP'nin metodolojik güvenilirliğini sağlamak amacıyla tutarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir matris için en büyük özdeğer (λ_{max}) kullanılarak Tutarlılık İndeksi (CI) hesaplanmış, ardından CI'nin Saaty tarafından belirlenen Rastgele Tutarlılık İndeksi (RI) Tablo 5'teki ilgili değere oranı alınarak Tutarlılık Oranı (CR) elde edilmiştir. CR değerinin 0,10 veya altında olması, karşılaştırmaların kabul edilebilir düzeyde tutarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Rastgele tutarlılık indeksi

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57

AHP anket çalışmasına toplam 10 uzman katılmış olup, her bir katılımcının ikili karşılaştırma matrisleri üzerinden Ana Kriter ve Alt Kriter düzeylerinde Tutarlılık Oranı (CR) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 6). Yapılan analiz sonucunda, 4., 5., 8. ve 10. katılımcıların hem ana kriterler hem de alt kriterler için hesaplanan CR değerlerinin 0,10'un altında olduğu belirlenmiştir. Literatürde önerildiği üzere (Saaty, 1980), yalnızca tutarlılık oranı 0,10'dan küçük olan karşılaştırma matrisleri değerlendirmeye alınmış ve nihai kriter ağırlıkları bu dört katılımcının görüşleri üzerinden hesaplanmıştır. CR değeri 0,10'un üzerinde olan diğer katılımcıların karşılaştırma matrisleri ise, tutarlılık şartını sağlamadıkları için analiz sürecine dâhil edilmemiştir.

Tablo 6. AHP anketlerinde ana ve alt kriter cr değerleri

Katılımcı	Ana Kriter CR	Alt Kriter CR	Alt Kriter CR
1	0,32	0,80	0,42
2	0,35	0,36	0,05
3	0,42	0,40	0,20
4	0,09	0,04	0,07
5	0,04	0,02	0,01
6	0,45	0,20	0,36
7	1,62	1,20	0,70
8	0,03	0,08	0,06
9	0,14	0,07	0,45
10	0,09	0,06	0,05

Elde edilen ağırlıklar, çalışmanın çok kriterli analiz aşamasında yapı sistemlerinin performans değerlendirmesinde doğrudan kullanılmıştır. Böylelikle, yapı sistemlerinin karşılaştırılması yalnızca tek bir performans ölçütüne dayandırılmamış, maliyet, süre, enerji verimliliği ve çevresel etki boyutlarını dengeli biçimde içeren bütüncül bir yaklaşım benimsenmiştir. Enerji verimliliği alt kriterleri, farklı iklim koşullarında yapıların ısıtma ve soğutma yüklerinin optimize edilmesi açısından önemli içgörüler sağlamış, LCA alt kriterleri ise yapı sistemlerinin çevresel ayak izini çok yönlü olarak değerlendirmeye imkân tanımıştır. Bu bütünlüklü yaklaşım, afet sonrası konut üretimi gibi hızlı ancak sürdürülebilir çözümler gerektiren durumlarda, karar vericilere bilimsel temelli ve tutarlı bir seçim süreci sunmaktadır.

Tablo 7’de görüldüğü üzere, çok kriterli değerlendirme sürecinde en yüksek ağırlığa sahip kriter yaklaşık maliyet (0,43) olmuştur. Bu sonuç, yapı sistemlerinin seçiminde ekonomik boyutun en belirleyici unsur olduğunu ve yatırım kararlarının öncelikle maliyet temelli yapıldığını göstermektedir. Maliyetin, özellikle afet sonrası konut üretimi veya acil uygulama gerektiren projelerde en önemli karar parametresi olduğu sıkça vurgulanmaktadır. Dolayısıyla maliyet avantajı sunan yapı sistemlerinin daha yüksek öncelik kazanması, sektörün temel dinamikleriyle uyumlu bir durumdur.

İkinci sırada yer alan enerji verimliliği (toplamda 0,27), yapıların uzun vadeli kullanım performansını doğrudan etkileyen bir unsur olarak dikkat çekmektedir. Yalnızca ilk yatırım maliyetinin değil, aynı zamanda kullanım sürecinde ortaya çıkacak enerji tüketiminin de

değerlendirme sürecinde öncelikli olarak dikkate alınması, sürdürülebilirlik hedefleri ve artan enerji maliyetleri bağlamında oldukça anlamlıdır. Enerji verimliliğinin ekonomik ve çevresel boyutlar arasında köprü işlevi görerek karar vericiler için stratejik bir kriter olduğunu ortaya koymaktadır.

Proje süresi 0,15 ağırlıkla üçüncü sırada yer almakta, bu da zaman faktörünün ekonomik ve enerji kriterleri kadar olmasa da karar sürecinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle afet sonrası hızlı konut üretimi ya da zaman baskısının ön planda olduğu projelerde, süre kısaltıcı yapım teknikleri öne çıkmakta ve rekabet avantajı yaratmaktadır.

Son olarak, LCA analizi toplamda 0,15'lik bir ağırlığa sahiptir. Bu bulgu, çevresel etkilerin tamamen göz ardı edilmediğini ancak maliyet ve enerji verimliliği kriterlerine kıyasla daha düşük önceliklendirme ile dikkate alındığını göstermektedir. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik ve süre odaklı karar verme eğilimlerinin baskın olmasına rağmen, çevresel duyarlılığın da karar süreçlerine giderek daha fazla entegre edilmeye başlandığını ortaya koymaktadır.

Tablo 7. Ağırlıklandırma sonuçları

Kriterler	Ağırlık (w)
Yaklaşık Maliyet	0,43
Proje Süresi	0,15
GWP	0,05
AP	0,02
LCA Analizi	EP
	0,02
	SFP
	0,02
	PENR
	0,04
Enerji Verimliliği	Isıtma Yükleri
	0,22
	Soğutma Yükleri
	0,05

3. BULGULAR

Bu çalışmada, afet sonrası yeniden yapılaşma sürecinde kullanılabilecek farklı yapı sistemlerinin yaklaşık maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü performansı açısından karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Analizlerde betonarme, çelik, ahşap (ahşap yığma, bağdadi, payandalı, payandasız), yığma (taş, tuğla, donatılı tuğla) ve modüler (hafif çelik prefabrik, donatılı gaz beton panel, CLT ahşap) olmak üzere toplam 12 farklı yapı sistemi değerlendirilmiş, her sistem için maliyet hesapları, inşaat süreleri, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü değerlendirmesi göstergeleri belirlenmiştir. Bu bölümde, söz konusu bulgular ilgili alt başlıklar altında detaylandırılarak sunulacak ve elde edilen veriler üzerinden yapılan analiz sonuçları paylaşılacaktır.

3.1. Maliyet Analizlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, incelenen tüm yapı sistemleri için gerçekleştirilen yaklaşık maliyet analizine dayalı karşılaştırma sonuçları sunulmaktadır. Her bir yapı sistemi için, BIM tabanlı metraj verileri ile güncel birim fiyatlar esas alınarak hesaplanan maliyet kalemleri, malzeme, işçilik, nakliye ve özel imalat bileşenleri kapsamında değerlendirilmiş; bu bileşenlerin toplam maliyet üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen maliyet verileri, Türk Lirası (₺) cinsinden grafik formatında sunulmuş olup, farklı yapı sistemleri arasındaki maliyet farklarının görsel olarak da anlaşılabilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede, yalnızca teknik ve süre performansı açısından değil, ekonomik verimlilik bakımından da sistemler arası karşılaştırma yapılmasına ve maliyet açısından avantajlı ya da dezavantajlı yapı türlerinin belirlenmesine olanak tanınmıştır.

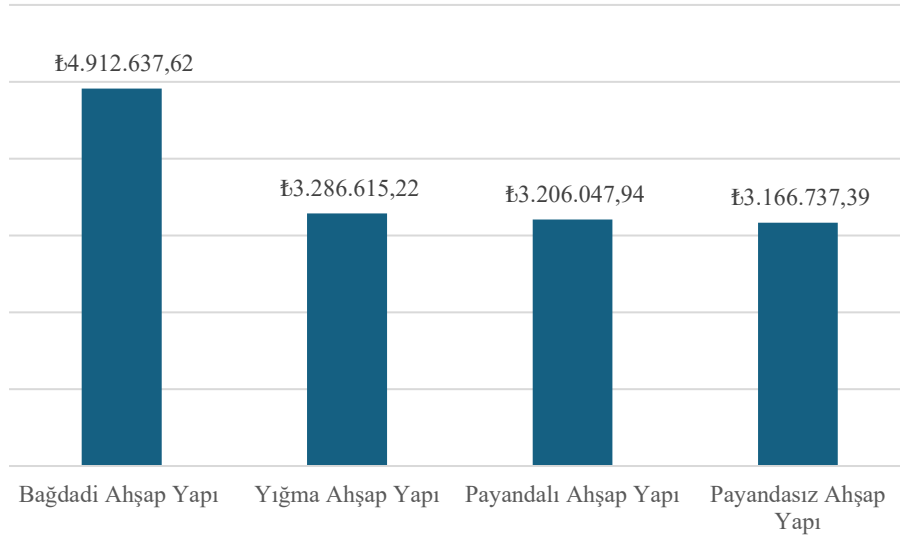
Ahşap yapı türlerine ait maliyetler Şekil 44’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, en yüksek maliyetin 4.912.637,62 ₺ ile Bağdadi ahşap yapılarda olduğu görülmektedir. Bu değer, en düşük maliyete sahip Payandasız ahşap yapıların (3.166.737,39 ₺) yaklaşık %55,1 üzerinde olup, sistemler arası belirgin bir farkı ortaya koymaktadır.

Bağdadi ahşap yapıların yüksek maliyetinde belirleyici olan temel unsur, iş kalemleri arasındaki fiyat farklılıklarıdır. Yapılan analizde özellikle “Kıtıklı Tatlı Kireç Harcı ile Bağdadi Satırlar Üzerinde Düz Sıva Yapılması” iş kalemi öne çıkmaktadır. Bu iş kaleminin birim fiyatının diğer yapı sistemlerinde yer alan benzer nitelikteki imalatlara kıyasla oldukça

yüksek olması, toplam maliyetin kayda değer oranda artmasına yol açmıştır. Dolayısıyla, Bağdadi ahşap yapıların genel maliyet düzeyinin yüksek çıkmasının başlıca nedeni, bu iş kaleminin maliyet içindeki baskın payıdır.

Yığma ahşap (3.286.615,22 ₺), payandalı ahşap (3.206.047,94 ₺) ve payandasız ahşap (3.166.737,39 ₺) yapıların toplam maliyetleri birbirine oldukça yakın olup aralarındaki fark %3,8'in altındadır. Bu benzerlik, sistemlerin iş kalemi bazında büyük ölçüde örtüşen maliyet yapılarından kaynaklanmaktadır. Özellikle taşıyıcı ahşap elemanların üretim ve montajı ile kaplama uygulamaları gibi ana imalat kalemlerinde gerek birim fiyat gerekse metraj değerleri açısından belirgin bir farklılık bulunmamaktadır.

Ancak sınırlı maliyet farkı ayrıntılı olarak incelendiğinde, yığma ahşap yapılarda taşıyıcı ahşap sistemin metraj fazlalığı maliyetleri artıran temel unsur olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık payandalı ve payandasız ahşap sistemlerde ilave yalıtım malzemesi kullanımı ve vernik kaplama imalatının görece daha yoğun olması maliyet artışına neden olmaktadır. Dolayısıyla, yığma ahşap yapılarda ortaya çıkan fark esasen taşıyıcı sistemin metrajından; payandalı ve payandasız yapılarda ise yalıtım ve vernik kaplama iş kalemlerinden kaynaklanmakta, bu farklı kalemlerin birbirini dengelemesi üç sistemin toplam maliyetlerinin benzer seviyelerde gerçekleşmesine yol açmaktadır.



Şekil 44. Ahşap yapı türlerinin kendi içindeki maliyet karşılaştırması

Yığma yapı türlerine ait maliyetler Şekil 45'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, en yüksek maliyet 2.552.859,70 ₺ ile Donatılı yığma yapılarda görülmektedir. Bu değer, en düşük maliyete sahip Taş yığma yapıların (2.522.314,91 ₺)

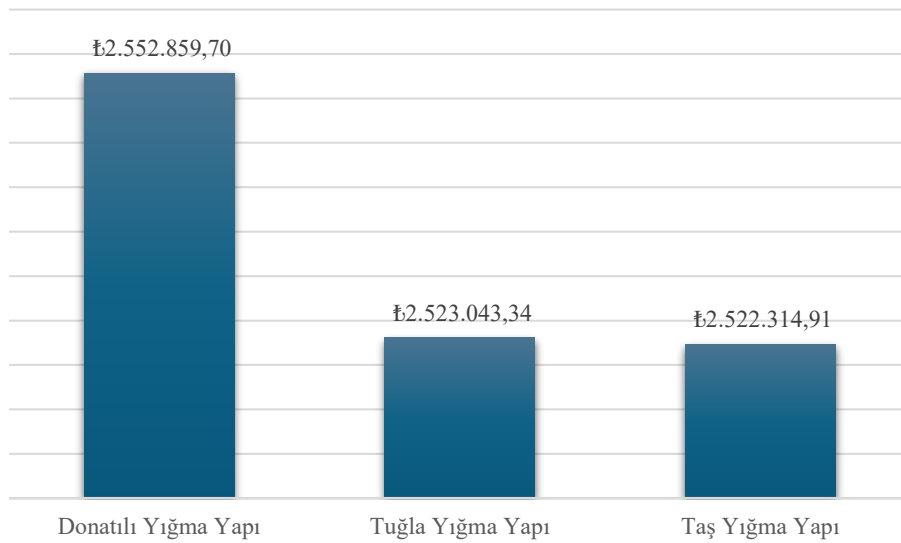
yaklaşık %1,2 üzerinde olup, sistemler arası maliyet farkının oldukça sınırlı düzeyde olduğunu göstermektedir.

Tuğla yığma yapıların toplam maliyeti 2.523.043,34 ₺ olup, donatılı yığma yapılardan yalnızca %1,2 daha düşük seviyededir. Buna karşılık taş yığma yapılar, tuğla yığma yapılara göre yaklaşık %0,03 daha düşük maliyetle öne çıkmaktadır.

Elde edilen bulgular, yığma yapı türleri arasında maliyet seviyelerinin birbirine oldukça yakın olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, işçilik gereksinimleri ve yapım teknikleri açısından bu sistemlerin büyük ölçüde benzer özellikler taşımasından kaynaklanmaktadır.

Bununla birlikte, iş kalemleri bazında incelendiğinde belirgin bazı farklılıklar dikkat çekmektedir. Tuğla yığma sistemlerde dolu harman tuğla duvar iş kaleminin yüksek metrajı, toplam maliyetin taş yığma yapılara kıyasla artmasına neden olmuştur. Donatılı yığma yapılarda ise ilave donatı imalatları, ek maliyet unsuru olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık taş yığma sistemlerde kalıp ve beton iş kalemlerinin görece düşük maliyetli olması, toplam maliyetin diğer sistemlerle yakın seviyede kalmasını sağlamaktadır.

Dolayısıyla, her üç sistemin toplam maliyetleri birbirine yakın olmakla birlikte; tuğla yığmada duvar iş kalemleri, donatılı yığmada takviye ve donatı iş kalemleri, taş yığmada ise beton ve kalıp iş kalemlerindeki görece düşük maliyetler, sistemler arasındaki farklılaşmanın temel nedenleri olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 45. Yığma yapı türlerinin kendi içindeki maliyet karşılaştırması

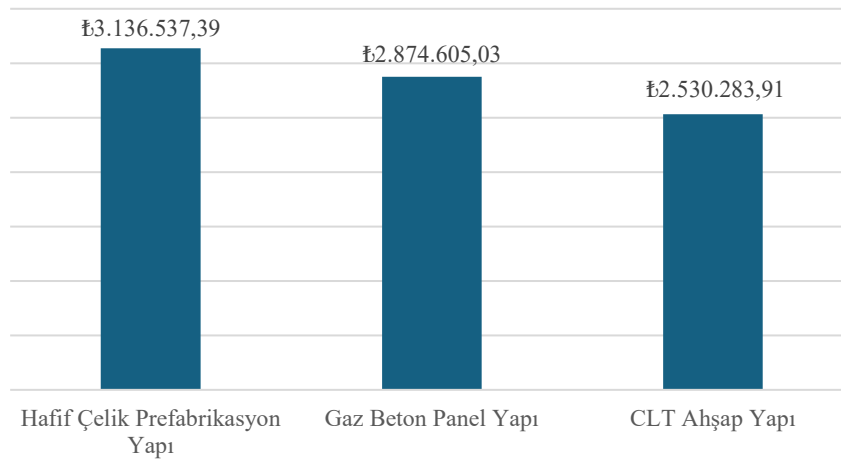
Modüler yapı sistemlerine ait toplam maliyetler Şekil 46’te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek maliyet 3.136.537,39 ₺ ile Hafif Çelik Prefabrikasyon Yapılara aittir. Bu değer, en düşük maliyete sahip CLT Ahşap Yapıların (2.530.283,91 ₺) yaklaşık %24,0 üzerinde olup, sistemler arası belirgin bir maliyet farkına işaret etmektedir.

Gaz Beton Panel Yapıların toplam maliyeti 2.874.605,03 ₺ olup, hafif çelik prefabrik yapılardan yaklaşık %8,3 daha düşük, CLT ahşap sistemlerden ise yaklaşık %13,6 daha yüksek seviyededir.

Hafif çelik prefabrik sistemlerin yüksek maliyetinde, profil demirlerinin münferit veya birleşik olarak hazırlanması ve yerine tespit edilmesi iş kalemleri ile korozyon koruma işlemleri önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, saha montajında panellerin birleşim detaylarının hazırlanması, vida ve bağlantı elemanlarının yerleştirilmesi ile ek yalıtım ve iç-dış kaplama iş kalemleri de maliyetin artmasına neden olmaktadır.

CLT ahşap sistemlerde ise iş kalemleri daha sınırlı ve sadeleşmiş durumdadır. Taşıyıcı ahşap paneller fabrika ortamında tek hat üzerinde üretildiğinden, çelik profillerin kesim, kaynak ya da ek koruma işlemlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca, kaplama ve yalıtım uygulamaları daha az çeşitlilik göstermekte, bu da toplam maliyeti azaltan temel unsur olmaktadır.

Bu bulgular, modüler yapı türleri arasında maliyet açısından en uygun seçeneğin CLT ahşap sistemler olduğunu, hafif çelik prefabrik çözümlerin ise imalat iş kalemlerinin yoğunluğu nedeniyle dezavantajlı konumda yer aldığını göstermektedir.

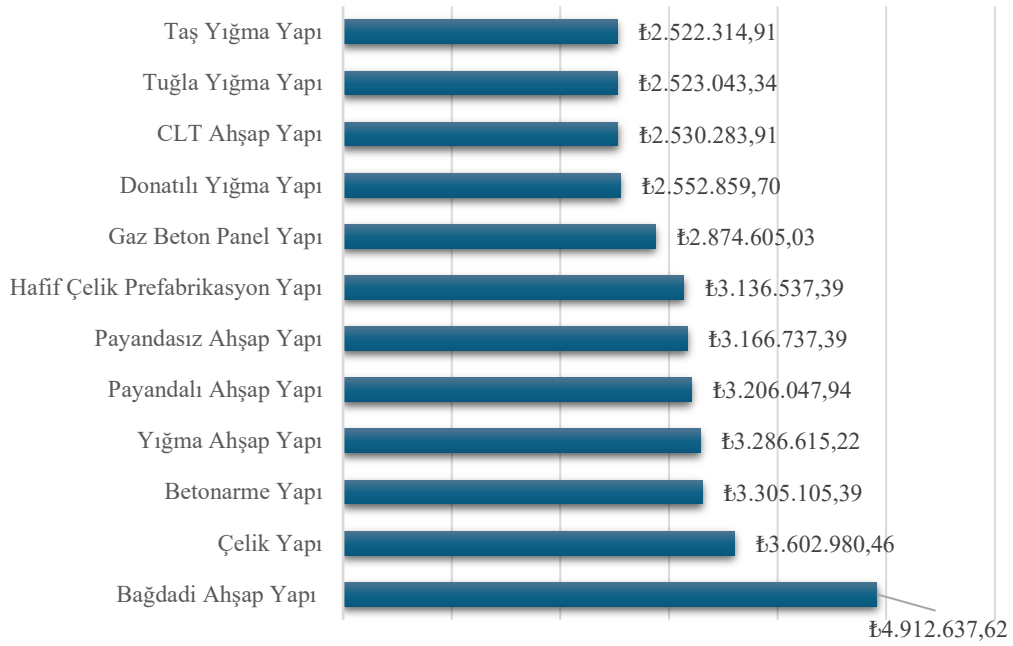


Şekil 46. Modüler yapı sistemlerinin kendi içindeki maliyet karşılaştırması

Tüm yapı sistemlerine ait toplam maliyet değerleri Şekil 47’te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Analiz sonuçları, maliyetler açısından oldukça geniş bir dağılım olduğunu ortaya koymaktadır. En yüksek maliyet, 4.912.637,62 ₺ ile Bağdadi ahşap yapılarda hesaplanmış olup, bu değer en düşük maliyete sahip Taş yığma yapıya (2.522.314,91 ₺) kıyasla yaklaşık %94,8 daha fazladır. Bu farklılık iş kalemi bazında yapılan incelemelerde, maliyet seviyesini en fazla yükselten unsurun “Kıtıklı Tatlı Kireç Harcı ile Bağdadi Satırlar Üzerinde Düz Sıva Yapılması” iş kalemi olduğunu göstermektedir. Bu kalemin hem birim fiyatının diğer iş kalemlerine göre oldukça yüksek olması hem de projede öngörülen metraj miktarının fazla olması, toplam maliyet üzerinde belirleyici bir etki yaratmıştır. Dolayısıyla, Bağdadi ahşap yapıların yüksek maliyet düzeyi yalnızca geleneksel yapım teknikleri ve işçilik yoğunluğundan değil, aynı zamanda belirli iş kalemlerinde ortaya çıkan fiyat–metraj kombinasyonlarının etkisinden de kaynaklanmaktadır.

En düşük maliyet grubunu Taş yığma yapı (2.522.314,91 ₺), Tuğla yığma yapı (2.523.043,34 ₺), CLT ahşap yapı (2.530.283,91 ₺) ve Donatılı yığma yapı (2.552.859,70 ₺) oluşturmaktadır. Bu sistemlerin düşük maliyet seviyeleri, yerel malzemelerin kullanılabilmesi, yapım teknolojilerinin basitliği ile iş kalemleri ve metraj özellikleriyle de ilişkilidir. Özellikle “Yığma duvar örülmesi” iş kalemi, söz konusu sistemlerde toplam maliyet üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu iş kaleminin birim fiyatının görece düşük olması ve projede öngörülen metraj miktarlarının sınırlı kalması, maliyetlerin düşük düzeyde seyretmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, en düşük maliyet grubunu oluşturan bu yapı sistemlerinin avantajı yalnızca genel yapım kolaylıklarından değil, aynı zamanda temel iş kalemlerinde düşük birim fiyat–metraj kombinasyonlarından kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, analizler yapı sistemlerinin maliyet düzeyleri açısından iki uç arasında oldukça geniş bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bağdadi ahşap yapılar en yüksek maliyet grubunu oluştururken, taş yığma, tuğla yığma ve CLT ahşap sistemler en düşük maliyet grubunu temsil etmektedir.



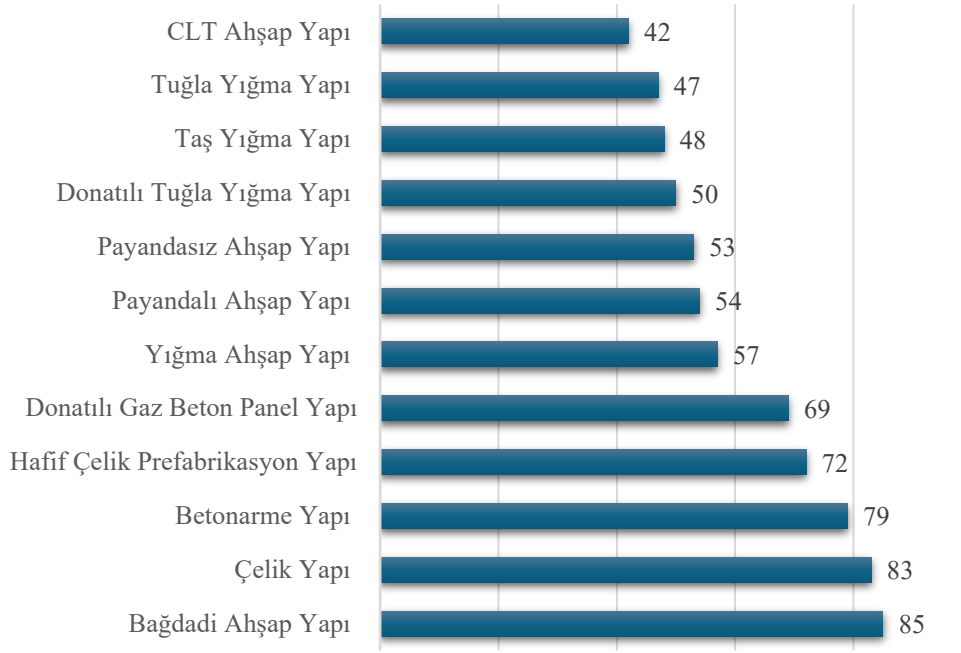
Şekil 47. Tüm yapı sistemlerinin yaklaşık maliyet karşılaştırması

3.2. Proje Sürelerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, incelenen tüm yapı sistemleri için Primavera P6 yazılımında gerçekleştirilen kritik yol analizi sonuçlarına dayalı proje süreleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Her bir yapı sistemi için, metraj verileri ve işçilik normları esas alınarak hesaplanan iş kalemi süreleri, mantıksal bağımlılık ilişkileri doğrultusunda zaman çizelgesine aktarılmış ve toplam proje süresi belirlenmiştir. Karşılaştırmada, her sistemin başlangıçtan tamamlanmaya kadar geçen net proje süresi dikkate alınmış; iş gücü dengesi, üretim hızı, yapım tekniği ve malzeme türü gibi faktörlerin süre üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Elde edilen proje süreleri, gün cinsinden grafik formatında sunulmuş olup, farklı yapı sistemleri arasındaki süre farklarının görsel olarak da anlaşılabilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede, yalnızca teknik ve ekonomik performans açısından değil, yapım süresi verimliliği bakımından da sistemler arası karşılaştırma yapılmasına olanak tanınmıştır.

Şekil 48’de incelenen yapı sistemlerine ait toplam proje süreleri gün cinsinden karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, farklı yapım tekniklerinin ve malzeme türlerinin proje süresi üzerinde belirgin etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 48. Yapı sistemlerinin toplam yapım sürelerinin karşılaştırmalı analizi

Analiz sonuçlarına göre, en kısa proje süresine sahip sistem CLT Ahşap Yapı olup, toplam 42 günde tamamlanabilmektedir. Bu sürenin düşük olmasında, büyük oranda fabrikada üretilen ve sahada yalnızca montajı yapılan modüler ahşap panellerin kullanılması ile ıslak imalat süreçlerinin minimum seviyede tutulması etkili olmuştur. CLT Ahşap Yapı'yı, sırasıyla Tuğla Yığma Yapı 47 gün, Taş Yığma Yapı 48 gün ve Donatılı Tuğla Yığma Yapı 50 gün takip etmektedir.

Buna karşılık, en uzun proje süresine sahip sistem Bağdadi ahşap yapı olup, tamamlanması 85 gün sürmektedir. Bu durumun temel nedeni, söz konusu sistemde çok aşamalı ve zaman alıcı iş kalemlerinin bulunmasıdır. Özellikle dış cephe kaplamasında yer alan “Kıtıklı Tatlı Kireç Harcı ile Bağdadi Satırlar Üzerinde Düz Sıva Yapılması” iş kalemi, proje süresini uzatan en kritik unsurlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu iş kalemi hem yüksek iş gücü gerektirmesi hem de uygulama sürecinin uzun zaman alması nedeniyle yapım süresini belirgin biçimde artırmaktadır. Dolayısıyla, Bağdadi ahşap yapıların uzun proje süresi yalnızca geleneksel yapım yöntemlerinin çok aşamalı doğasından değil, aynı zamanda belirli iş kalemlerinin yoğun işçilik ve zaman gerektiren özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Bunu, 83 gün ile Çelik yapılar ve 79 gün ile Betonarme yapılar izlemektedir. Çelik yapılarda proje süresinin görece uzun olmasının temel nedeni, yapının taşıyıcı sisteminin montajında yer alan ayrıntılı iş kalemleridir. Özellikle “Çelik profillerin kaynaklı ve bulonlu

birleşimlerle montajı” iş kalemi, yüksek metrajı ve işçilik yoğunluğu nedeniyle sürecin uzamasına neden olmaktadır. Bu iş kaleminin her bir birleşim noktasında hassasiyet gerektirmesi ve montajın aşamalı olarak ilerlemesi, toplam süre üzerinde belirleyici bir etki yaratmaktadır.

Betonarme yapılarda ise süreyi artıran en önemli unsurlar kalıp, donatı ve beton dökümüne ilişkin iş kalemleridir. Özellikle “Kalıp kurulumu ve sökümü” ile “Betonarme donatıların yerleştirilmesi” iş kalemleri, yüksek metraj gerektirmeleri ve yoğun iş gücü istemeleri nedeniyle sürecin kritik noktalarıdır. Dolayısıyla, betonarme yapılarda uzun proje süresi hem işçilik yoğunluğu yüksek kalemlerden hem de ıslak imalat süreçlerinin doğasından kaynaklanmaktadır.

Modern prefabrik sistemler incelendiğinde, Hafif Çelik Prefabrikasyon Yapı 72 gün ve Donatılı Gaz Beton Panel Yapı 69 gün süre açısından orta–yüksek seviyede yer almakta, ancak geleneksel sistemlere kıyasla daha kontrollü ve standart üretim avantajı sunmaktadır.

Genel olarak, modüler ve panel bazlı sistemlerin geleneksel sistemlere kıyasla daha kısa sürede tamamlandığı görülmektedir. Bu durum, afet sonrası yeniden yapılaşma senaryolarında zaman faktörünün kritik olduğu durumlarda, bu tür sistemlerin önemli avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

3.3. Enerji Verimliliği Analizinin Değerlendirilmesi

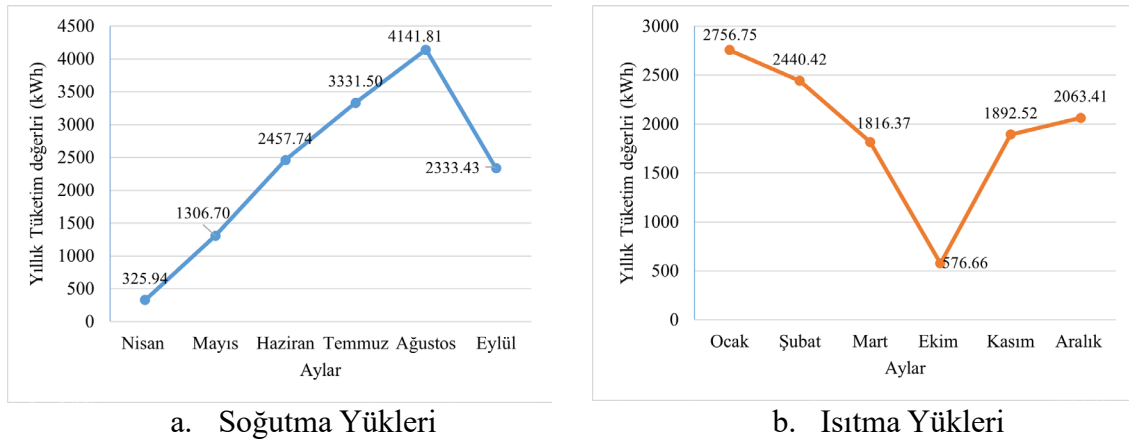
Bu bölümde, incelenen tüm yapı sistemleri için Autodesk Revit yazılımında gerçekleştirilen enerji verimliliği analizleri sonucunda elde edilen ısıtma yükleri ve soğutma yükleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Her bir yapı sistemi için, Onikişubat/Kahramanmaraş bölgesine ait iklim verileri tanımlanarak yürütülen simülasyonlarda, ısı iletim katsayıları, yalıtım kalınlıkları, pencere-duvar oranları, cephe yönelmeleri ve gölgeleme elemanları gibi enerji performansını doğrudan etkileyen parametreler dikkate alınmış ve yıllık bazda gerekli ısıtma ile soğutma enerjisi miktarları belirlenmiştir.

Karşılaştırmada, her sistemin yıl boyunca konfor sıcaklıklarını korumak için ihtiyaç duyduğu net ısıtma ve soğutma yükleri ayrı ayrı değerlendirilmiş; yapı kabuğu özellikleri, malzeme türü, iklimsel adaptasyon düzeyi ve ısıl denge davranışları gibi faktörlerin bu yükler üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

Elde edilen ısıtma ve soğutma yükleri, kWh cinsinden grafik formatında sunulmuş olup, farklı yapı sistemleri arasındaki mevsimsel enerji talebi farklarının görsel olarak da anlaşılabilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede, yalnızca teknik ve yapısal performans açısından değil, enerji verimliliği ve iklim koşullarına uyum bakımından da sistemler arası karşılaştırma yapılmasına olanak tanınmıştır.

Şekil 49'de betonarme yapı sistemi için aylık bazda belirlenen soğutma ve ısıtma yüklerinin değişimi sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 325,94 kWh olarak en düşük seviyede gerçekleşmiş, yaz aylarının ilerlemesiyle birlikte artarak Ağustos ayında 4141,81 kWh ile maksimum değere ulaşmıştır. Eylül ayında ise sıcaklıkların düşmesiyle birlikte soğutma ihtiyacı 2333,43 kWh seviyesine gerilemiştir. Bu artış ve azalış eğilimi, bölgenin yaz aylarında yüksek sıcaklık değerlerine sahip olması ve betonarme yapıların ısıl kütlesinin iç ortam sıcaklığını yükseltmesi ile ilişkilendirilebilir.

Isıtma yükleri ise kış aylarında yüksek değerler göstermiş; Ocak ayında 2756,75 kWh ile en yüksek seviyeye ulaşmış, Şubat ve Mart aylarında kademeli olarak azalmış, Ekim ayında ise 576,66 kWh ile minimum seviyeye inmiştir. Kasım ve Aralık aylarında soğukların artmasıyla birlikte ısıtma yükü yeniden yükselmiş ve Aralık ayında 2063,41 kWh olmuştur. Bu dağılım, betonarme yapıların yüksek ısıl iletkenlik katsayısına bağlı olarak dış ortam sıcaklık değişimlerine duyarlı olduğunu ve kış aylarında ısı kaybının daha fazla enerji ihtiyacı doğurduğunu göstermektedir.

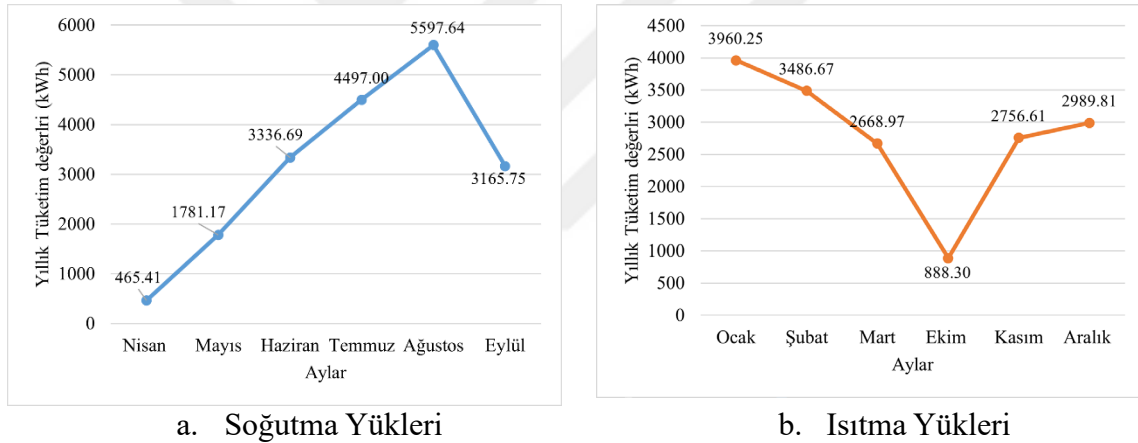


Şekil 49. Betonarme yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 50'de çelik yapı sistemi için aylık soğutma ve ısıtma yüklerinin değişimi görülmektedir. Soğutma yükleri Nisan ayında 465,41 kWh ile düşük seviyede başlamakta, yaz aylarının ilerlemesiyle birlikte hızlı bir artış göstererek ağustos ayında 5597,64 kWh ile

en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu değerin betonarme sisteme kıyasla belirgin derecede yüksek olması, çelik yapıların düşük ısıal kütleye sahip olması nedeniyle dış ortam sıcaklık değişimlerine daha hızlı tepki vermesi ve yaz aylarında ısı kazancının artması ile ilişkilidir. Eylül ayında ise sıcaklıkların düşmesiyle birlikte soğutma yükü 3165,75 kWh seviyesine gerilemektedir.

Isıtma yükleri ise kış aylarında yüksek değerler göstermektedir. Ocak ayında 3960,25 kWh ile en yüksek seviyeye ulaşan ısıtma ihtiyacı, Şubat (3486,67 kWh) ve Mart (2668,97 kWh) aylarında kademeli olarak azalmaktadır. Ekim ayında 888,30 kWh ile minimum seviyeye düşen ısıtma yükü, Kasım (2756,61 kWh) ve Aralık (2989,81 kWh) aylarında yeniden yükselmiştir. Bu eğilim, çelik yapıların yüksek ısıal iletkenliğe sahip olması ve yeterli ısı depolama kapasitesinin bulunmaması nedeniyle kış aylarında ısı kayıplarının artmasına bağlanabilir.

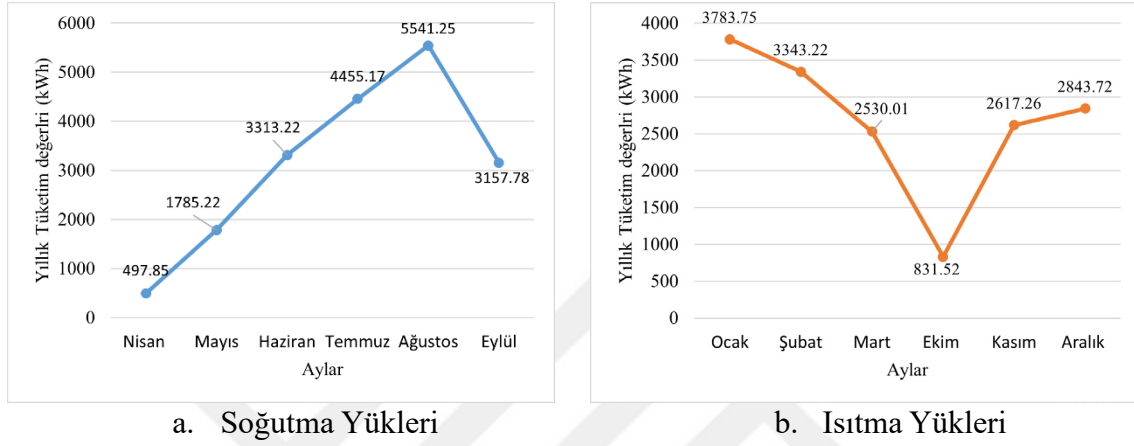


Şekil 50. Çelik yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 51’de ahşap yığma yapı sistemi için aylık bazda hesaplanan soğutma ve ısıtma yükleri gösterilmektedir. Soğutma yükleri Nisan ayında 497,85 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarının ilerlemesiyle birlikte artarak Ağustos ayında 5541,25 kWh ile maksimum değere ulaşmıştır. Eylül ayında ise sıcaklıkların düşmesine bağlı olarak soğutma yükü 3157,78 kWh seviyesine gerilemiştir. Bu yüksek yaz dönemi soğutma yükleri, ahşap yığma yapıların nispeten düşük ısıal kütleye sahip olması ve dış ortam sıcaklık değişimlerinden hızlı etkilenmesi ile açıklanabilir.

Isıtma yükleri ise kış aylarında yüksek seviyelerde seyretmiştir. Ocak ayında 3783,75 kWh ile en yüksek değere ulaşan ısıtma yükü, Şubat (3343,22 kWh) ve Mart (2530,01 kWh) aylarında kademeli olarak azalmış, Ekim ayında 831,52 kWh ile minimum seviyeye inmiştir.

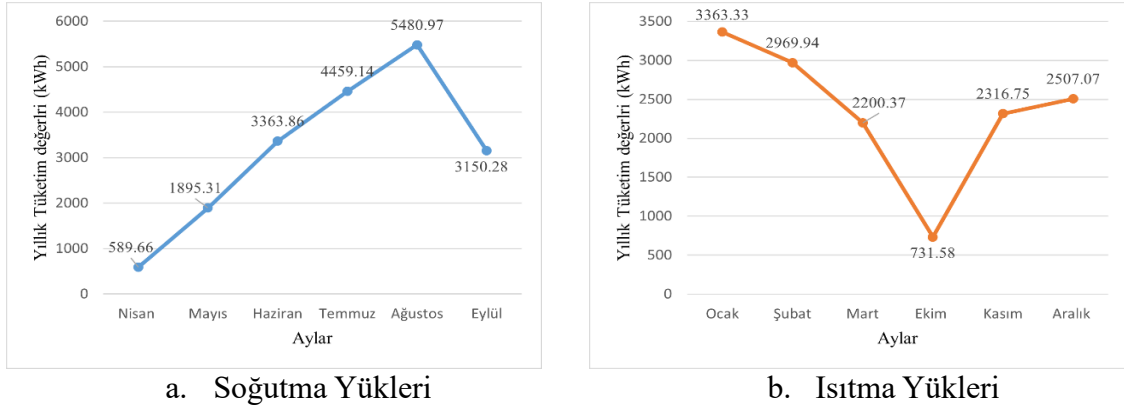
Kasım (2617,26 kWh) ve Aralık (2843,72 kWh) aylarında ise sıcaklıkların yeniden düşmesiyle ısıtma ihtiyacı artmıştır. Bu eğilim, ahşap yığma yapıların yalıtım performansının mevsimsel sıcaklık değişimlerine karşı sınırlı koruma sağlamasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 51. Ahşap yığma yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 52’de ahşap bağdadi yapı sistemi için aylık soğutma ve ısıtma yükleri sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 589,66 kWh seviyesinde başlamış, yaz aylarının ilerlemesiyle birlikte artarak Ağustos ayında 5480,97 kWh ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Bu değerin yüksek olmasının, bağdadi yapıların hafif ve düşük ısıl kütleyle sahip olması nedeniyle yaz aylarında güneş kazancına karşı sınırlı koruma sağlamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Eylül ayında ise soğutma yükü 3150,28 kWh’ye düşmüştür.

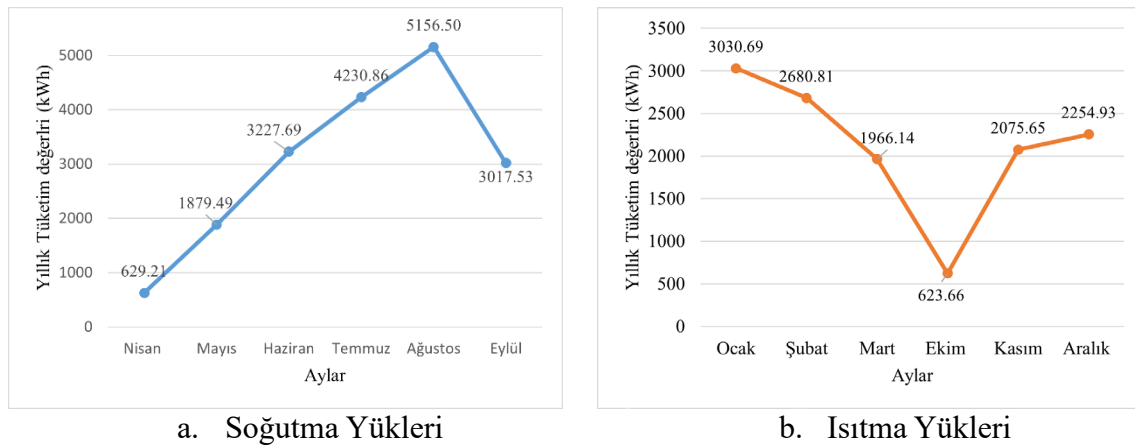
Isıtma yükleri incelendiğinde, Ocak ayında 3363,33 kWh ile en yüksek seviyeye ulaşıldığı, Şubat (2969,94 kWh) ve Mart (2200,37 kWh) aylarında kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Ekim ayında ısıtma yükü 731,58 kWh ile en düşük seviyeye inerken, Kasım (2316,75 kWh) ve Aralık (2507,07 kWh) aylarında tekrar yükselmiştir. Bu eğilim, bağdadi yapıların gözenekli ve hafif yapısının kış aylarında ısı kayıplarını artırarak daha yüksek enerji ihtiyacı doğurduğunu göstermektedir.



Şekil 52. Bağdadi ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 53’de payandalı ahşap yapı sistemi için aylık soğutma ve ısıtma yüklerinin dağılımı gösterilmektedir. Soğutma yükleri Nisan ayında 629,21 kWh seviyesinde başlamış, yaz aylarının ilerlemesiyle birlikte düzenli bir artış eğilimi göstererek Ağustos ayında 5156,50 kWh ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Eylül ayında ise sıcaklıkların düşmesiyle soğutma yükü 3017,53 kWh seviyesine gerilemiştir. Bu durum, payandalı ahşap yapıların hafif yapısal özellikleri nedeniyle dış ortam sıcaklık değişimlerine hızlı tepki vermesi ve yaz aylarında güneş kazancının iç mekân sıcaklıklarını artırması ile ilişkilendirilebilir.

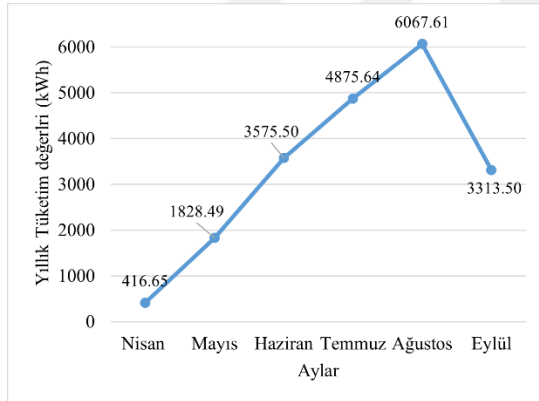
Isıtma yükleri incelendiğinde, Ocak ayında 3030,69 kWh ile en yüksek değere ulaşıldığı, Şubat (2680,81 kWh) ve Mart (1966,14 kWh) aylarında kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Ekim ayında 623,66 kWh ile minimum seviyeye inen ısıtma yükü, Kasım (2075,65 kWh) ve Aralık (2254,93 kWh) aylarında tekrar yükselmiştir. Bu artış, yapının düşük ısıtma kütlesi ve yalıtım kapasitesinin mevsimsel sıcaklık farklarını dengelemekte sınırlı kalmasıyla açıklanabilir.



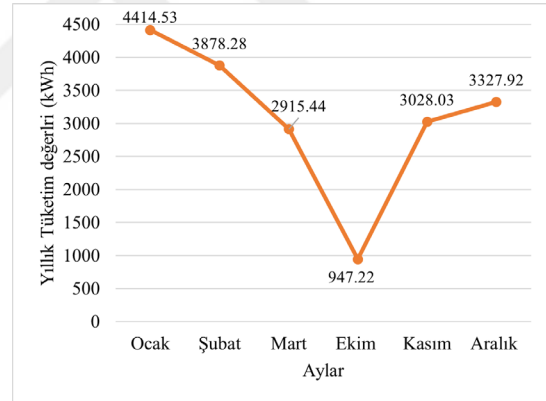
Şekil 53. Payandalı ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 54’de payandasız ahşap yapı sistemi için aylık bazda belirlenen soğutma ve ısıtma yüklerinin değişimi sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 416,65 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarında düzenli bir artış göstererek Ağustos ayında 6067,61 kWh ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu seviyenin, incelenen ahşap sistemler arasında en yüksek soğutma yüklerinden biri olduğu görülmektedir. Bu durum, yapının düşük ısıl kütlesi ve yüksek ısı iletimine sahip cephe özellikleri nedeniyle yaz aylarında güneş kazancının iç mekân sıcaklıklarını hızlı bir şekilde artırmasından kaynaklanmaktadır. Eylül ayında ise soğutma yükü 3313,50 kWh’ye gerilemiştir.

Isıtma yükleri açısından incelendiğinde, Ocak ayında 4414,53 kWh ile maksimum değere ulaşıldığı, Şubat (3878,28 kWh) ve Mart (2915,44 kWh) aylarında kademeli bir azalma yaşandığı görülmektedir. Ekim ayında 947,22 kWh ile minimum seviyeye ulaşan ısıtma yükü, Kasım (3028,03 kWh) ve Aralık (3327,92 kWh) aylarında tekrar yükselmiştir. Bu eğilim, kış aylarında yapı kabuğunun yetersiz yalıtımı ve düşük ısı depolama kapasitesi nedeniyle ısı kayıplarının artmasına bağlanabilir.



a. Soğutma Yükleri

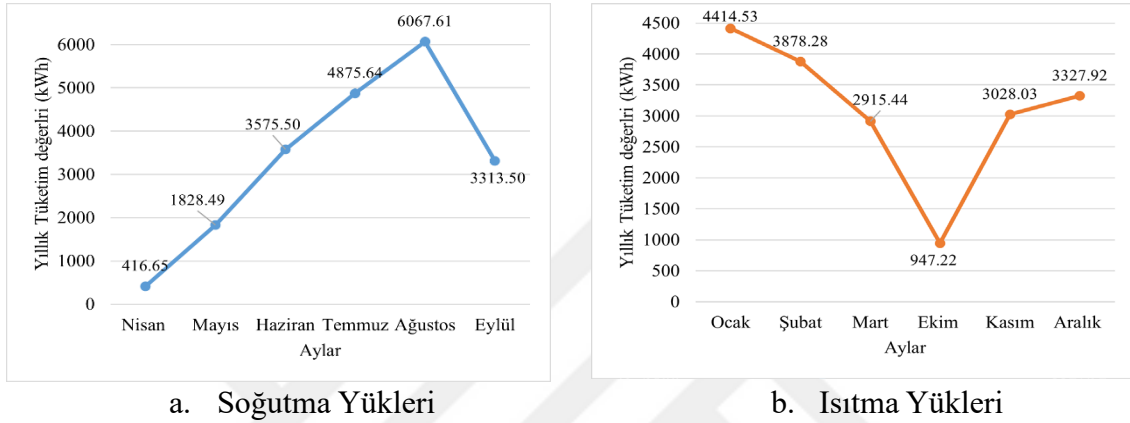


b. Isıtma Yükleri

Şekil 54. Payandasız ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 55’te taş yığma yapı sistemi için aylık soğutma ve ısıtma yüklerinin değişimi sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 416,65 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarının ilerlemesiyle düzenli bir artış göstererek Ağustos ayında 6067,61 kWh ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Eylül ayında ise soğutma yükü 3313,50 kWh seviyesine gerilemiştir. Bu değerler, taş yığma yapıların yüksek ısıl kütleye sahip olmasına rağmen yaz aylarında güneş ışıınımı etkisiyle iç mekân sıcaklıklarının artmasını yeterince engelleyemediğini göstermektedir.

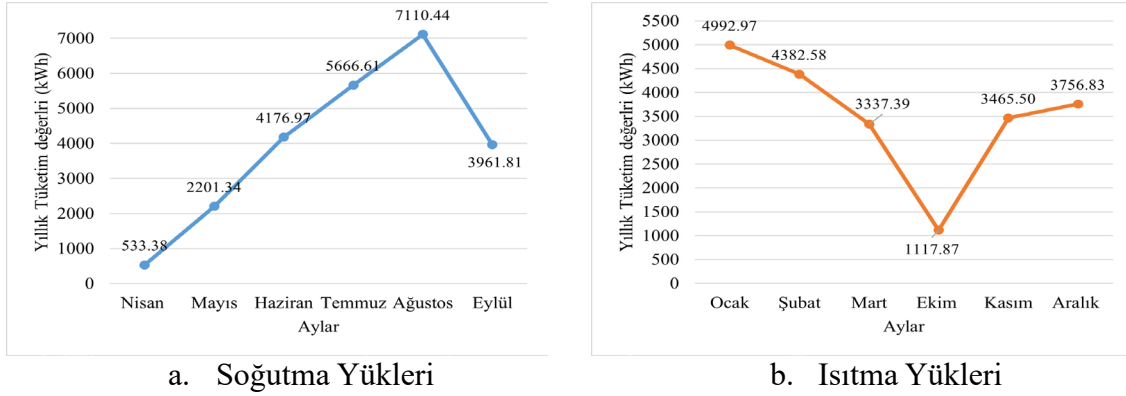
Isıtma yükleri açısından incelendiğinde, Ocak ayında 4414,53 kWh ile en yüksek değere ulaşılmış, Şubat (3878,28 kWh) ve Mart (2915,44 kWh) aylarında kademeli bir azalma yaşanmıştır. Ekim ayında 947,22 kWh ile minimum seviyeye inen ısıtma yükü, Kasım (3028,03 kWh) ve Aralık (3327,92 kWh) aylarında yeniden yükselmiştir. Bu durum, taş yığma yapıların kış aylarında yetersiz yalıtım özellikleri nedeniyle ısı kayıplarına karşı zayıf olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 55. Taş yığma yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 56’te tuğla yığma yapı sistemi için aylık bazda belirlenen soğutma ve ısıtma yükleri sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 533,38 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarının ilerlemesiyle birlikte artış göstererek Ağustos ayında 7110,44 kWh ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Bu değer, tüm yapı sistemleri içinde en yüksek soğutma yüklerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Eylül ayında ise soğutma yükü 3961,81 kWh seviyesine gerilemiştir. Bu sonuçlar, tuğla yığma yapıların belirli bir ısıl kütleye sahip olmasına rağmen, yaz aylarında yoğun güneş ışınlamı karşısında iç mekân sıcaklık artışını sınırlamakta yetersiz kaldığını göstermektedir.

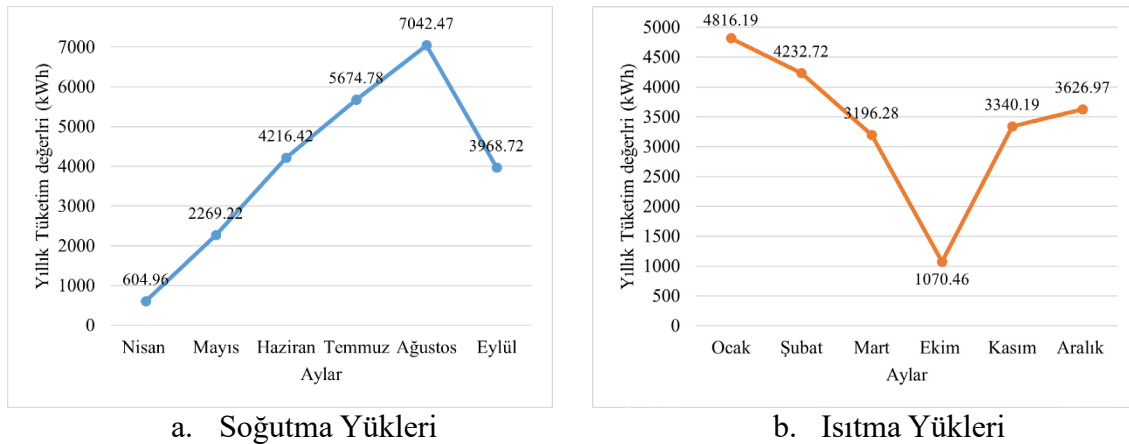
Isıtma yükleri incelendiğinde, Ocak ayında 4992,97 kWh ile maksimum değere ulaşıldığı, Şubat (4382,58 kWh) ve Mart (3337,39 kWh) aylarında kademeli bir azalma olduğu görülmektedir. Ekim ayında 1117,87 kWh ile minimum seviyeye inen ısıtma yükü, Kasım (3465,50 kWh) ve Aralık (3756,83 kWh) aylarında yeniden artmıştır. Bu durum, tuğla yığma yapıların kış aylarında yetersiz yalıtım özellikleri nedeniyle yüksek ısı kayıplarına maruz kaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 56. Tuğla yığma yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 57’de donatılı tuğla yığma yapı sistemi için aylık soğutma ve ısıtma yüklerinin değişimi sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 604,96 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarında düzenli bir artış göstererek Ağustos ayında 7042,47 kWh ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bu değer, incelenen tüm sistemler arasında en yüksek soğutma yüklerinden biri olup, donatılı tuğla yığma yapıların yaz aylarında güneş ışıını karşılarında yüksek ısı kazancı yaşadığını göstermektedir. Eylül ayında ise soğutma yükü 3968,72 kWh’ye gerilemiştir.

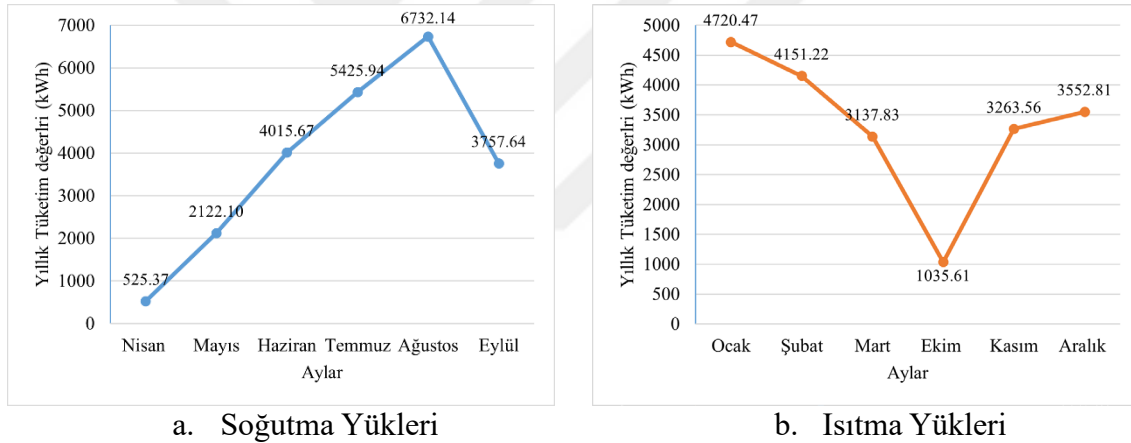
Isıtma yükleri incelendiğinde, Ocak ayında 4816,19 kWh ile en yüksek değere ulaşıldığı, Şubat (4232,72 kWh) ve Mart (3196,28 kWh) aylarında kademeli bir azalma olduğu görülmektedir. Ekim ayında 1070,46 kWh ile minimum seviyeye inen ısıtma yükü, Kasım (3340,19 kWh) ve Aralık (3626,97 kWh) aylarında yeniden artmıştır. Bu eğilim, kış aylarında yapının yüksek ısı iletkenliği ve sınırlı yalıtım kapasitesi nedeniyle ısı kayıplarının fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 57. Donatılı tuğla yığma yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 58’da donatılı gaz beton panel yapı sistemi için aylık soğutma ve ısıtma yüklerinin değişimi sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 525,37 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarında düzenli bir artış göstererek Ağustos ayında 6732,14 kWh ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Eylül ayında ise soğutma yükü 3757,64 kWh seviyesine gerilemiştir. Bu değerler, donatılı gaz beton panel yapıların yaz aylarında güneş ışınlamına karşı belirli bir yalıtım avantajı sunsa da, yüksek sıcaklık dönemlerinde iç mekân ısıısının artmasını tamamen engelleyemediğini göstermektedir.

Isıtma yükleri açısından incelendiğinde, Ocak ayında 4720,47 kWh ile en yüksek değere ulaşıldığı, Şubat (4151,22 kWh) ve Mart (3137,83 kWh) aylarında kademeli bir düşüş olduğu görülmektedir. Ekim ayında 1035,61 kWh ile minimum seviyeye inen ısıtma yükü, Kasım (3263,56 kWh) ve Aralık (3552,81 kWh) aylarında yeniden yükselmiştir. Bu durum, kış aylarında yapı kabuğunun ısı kayıplarını tam olarak önleyemediğini ortaya koymaktadır.

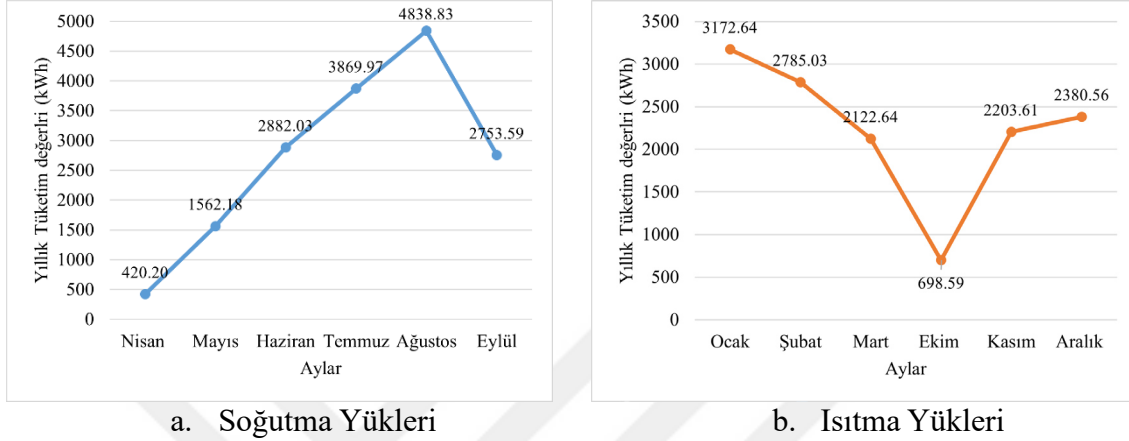


Şekil 58. Donatılı gaz beton panel yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 59’da hafif çelik prefabrik yapı sistemi için aylık bazda belirlenen soğutma ve ısıtma yükleri gösterilmektedir. Soğutma yükleri Nisan ayında 524,62 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarında düzenli bir artış göstererek Ağustos ayında 4838,83 kWh ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bu artış eğilimi, hafif çelik yapının düşük ısı kütlesi nedeniyle dış ortam sıcaklık değişimlerine hızlı tepki vermesinden kaynaklanmaktadır. Eylül ayında soğutma yükü 2588,88 kWh seviyesine gerilemiştir. Bu sonuç, hafif çelik yapıların özellikle yazın yüksek güneş ışınlamına maruz kaldığında iç mekân sıcaklığını kontrol etmede sınırlı performans sergilediğini göstermektedir.

Isıtma yükleri incelendiğinde, Ocak ayında 3172,64 kWh ile en yüksek değere ulaşıldığı, Şubat (2865,20 kWh) ve Mart (2128,19 kWh) aylarında kademeli bir azalma

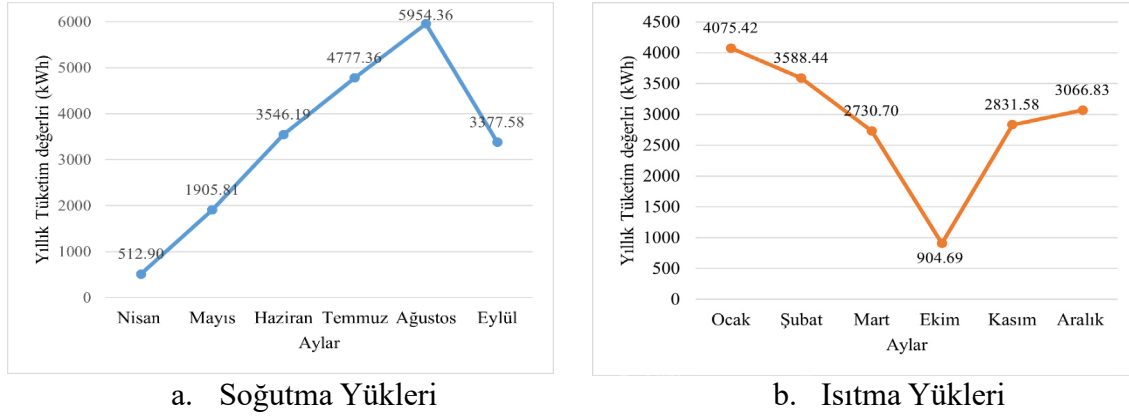
olduğu görülmektedir. Ekim ayında ısıtma yükü 698,59 kWh ile minimum seviyeye inmiş, Kasım (2301,05 kWh) ve Aralık (2497,35 kWh) aylarında yeniden yükselmiştir. Hafif çelik yapıların düşük termal yalıtım kapasitesi, kış aylarında hızlı ısı kaybına neden olmakta ve bu da enerji tüketimini artırmaktadır.



Şekil 59. Hafif çelik prefabrik yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 60'da CLT (Cross Laminated Timber) ahşap yapı sistemi için aylık bazda belirlenen soğutma ve ısıtma yükleri sunulmaktadır. Soğutma yükleri Nisan ayında 512,90 kWh ile düşük seviyede başlamış, yaz aylarında belirgin bir artış göstererek Ağustos ayında 5954,36 kWh ile maksimum değere ulaşmıştır. Bu değer, hafif çelik yapıya kıyasla daha yüksek olup, ahşabın ısıl kütlesinin güneş kazanımlarını tamamen absorbe etmede yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Eylül ayında soğutma yükü 3377,58 kWh seviyesine gerilemiştir.

Isıtma yükleri açısından, Ocak ayında 4075,42 kWh ile en yüksek tüketim gerçekleşmiş, Şubat (3588,44 kWh) ve Mart (2730,70 kWh) aylarında kademeli bir düşüş yaşanmıştır. Ekim ayında 904,69 kWh ile minimum seviyeye inen ısıtma yükü, Kasım (2831,58 kWh) ve Aralık (3066,83 kWh) aylarında yeniden yükselmiştir. CLT yapılar, ahşabın doğal yalıtım avantajına sahip olmasına rağmen, özellikle kış aylarında düşük dış sıcaklık koşullarında ek ısıtma ihtiyacı doğurmaktadır.



Şekil 60. CLT ahşap yapı soğutma ısıtma yükleri

Şekil 61’da incelenen tüm yapı sistemlerinin yıllık toplam soğutma ve ısıtma yükleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Genel eğilimler incelendiğinde, soğutma yüklerinin çoğu yapı sistemi için ısıtma yüklerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, analiz yapılan iklim koşullarında soğutma gereksiniminin yıl boyunca enerji tüketiminde daha baskın bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Donatılı Tuğla Yapı (Soğutma: 18,141.28 kWh – Isıtma: 12,242.51 kWh) ve Taş Yığma Yapı (Soğutma: 18,843.66 kWh – Isıtma: 16,750.61 kWh) en yüksek soğutma yüklerini göstermiştir. Bu yapıların ortak özelliği, yüksek ısıl kütleye sahip olmaları ve dış cephe duvarlarında yalıtım kalınlıklarının yetersiz kalmasıdır. Gündüz depolanan ısının gece saatlerinde iç mekâna aktarılması, soğutma ihtiyacını artırmıştır. Ayrıca kullanılan taş ve tuğla malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarının görece yüksek olması, ısı kayıplarını da büyütülmüştür.

Tuğla Yığma Yapı (Soğutma: 18,750.49 kWh – Isıtma: 15,949.48 kWh) hem ısıtma hem de soğutma yüklerinde yüksek değerlere ulaşmıştır. Bunun başlıca nedeni, tuğla malzemenin gözenekli yapısına rağmen tek başına yeterli ısı direnci sağlamaması ve ek yalıtım uygulamalarının sınırlı kalmasıdır. Kalın kesitlere rağmen düşük yalıtım kapasitesi, kışın ısı kayıplarını, yazın ise iç mekâna ısı kazançlarını artırmıştır.

CLT Ahşap Yapı (Soğutma: 13,897.12 kWh – Isıtma: 11,546.13 kWh), Bağdadi Ahşap Yapı (Soğutma: 20,077.39 kWh – Isıtma: 18,511.42 kWh), Payandalı Ahşap Yapı (Soğutma: 20,074.20 kWh – Isıtma: 17,197.66 kWh), Payandasız Ahşap Yapı (Soğutma: 18,939.22 kWh – Isıtma: 14,089.04 kWh) ve Ahşap Yığma Yapı (Soğutma: 22,578.86 kWh – Isıtma: 19,861.50 kWh) gibi ahşap temelli sistemlerde sonuçlar görece daha dengeli çıkmıştır. Bunun temel nedeni, ahşabın düşük ısı iletkenliği ve lifli yapısı sayesinde doğal bir yalıtım özelliği sağlamasıdır. Özellikle bağdadi sistemde çok katmanlı cephe kurgusu ve dolgu

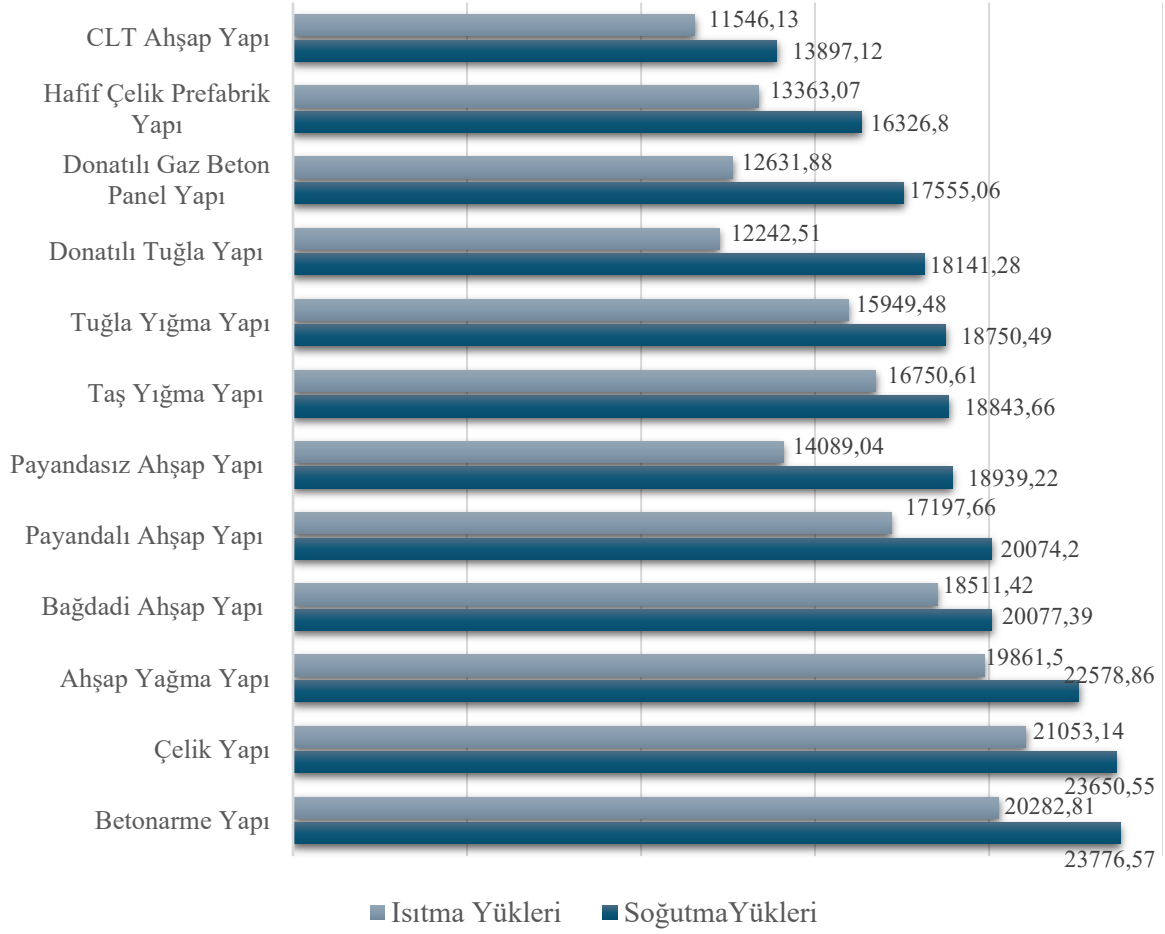
malzemelerinin etkisi, enerji performansına katkı sunmuştur. Ancak düşük ısıl kütleye sahip olmaları nedeniyle sıcaklık dalgalanmalarında iç mekân konforunun korunabilmesi için ek yalıtım veya pasif ısı depolama çözümleri önerilmektedir.

Donatılı Gaz Beton Panel Yapı (Soğutma: 17,555.06 kWh – Isıtma: 12,631.88 kWh) gözenekli yapısı sayesinde nispeten iyi bir ısı direnci sağlasa da panel kalınlığının sınırlı olması ve birleşim detaylarındaki ısı köprüleri hem ısıtma hem soğutma yüklerinde orta-yüksek seviyelere neden olmuştur.

Çelik Yapı (Soğutma: 23,650.55 kWh – Isıtma: 21,053.14 kWh) ve Hafif Çelik Prefabrik Yapı (Soğutma: 16,326.80 kWh – Isıtma: 13,363.07 kWh) görece daha düşük enerji tüketim değerleri sunmuştur. Özellikle hafif çelik sistemlerde dış cephelerde kullanılan sandviç panellerin yüksek yalıtım kapasitesi belirleyici olmuş, düşük ısıl kütle ise iç sıcaklığın daha hızlı kontrol edilmesine olanak tanımıştır. Ancak bu durum, ani sıcaklık değişimlerinde konfor koşullarının korunabilmesi için ilave stratejiler gerektirebilir.

Betonarme Yapı (Soğutma: 23,776.57 kWh – Isıtma: 20,282.81 kWh) hem ısıtma hem de soğutma yüklerinde en yüksek değerleri ortaya koymuştur. Bunun başlıca nedeni, kalın duvar kesitleri ile birlikte dış cephelerde kullanılan yalıtım katmanlarının yeterli kalınlık ve malzeme kalitesine sahip olmasıdır. Böylece hem yaz hem de kış dönemlerinde enerji performansı açısından avantajlı bir sonuç elde edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiği de Donatılı Tuğla, Tuğla Yığma ve Taş Yığma sistemler en yüksek enerji tüketimine sahip yapılar olarak öne çıkarken, Betonarme ve Hafif Çelik Prefabrik Yapılar görece daha avantajlı sistemlerdir. Bununla birlikte, yalıtım kalınlığı, kullanılan malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ve dış cephe duvar detaylarının enerji performansında belirleyici olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 61. Tüm yapı sistemleri için toplam ısıtma ve soğutma yükleri karşılaştırması

3.4. LCA Analizinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, incelenen tüm yapı sistemleri için Autodesk Revit yazılımında geliştirilen üç boyutlu modeller üzerinden Tally eklentisi kullanılarak gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Her bir yapı sistemi için, beşikten mezara (cradle-to-grave) yaklaşımı esas alınarak yürütülen analizlerde, malzeme türleri, üretim süreçleri, nakliye mesafeleri, kullanım ömürleri ve bertaraf senaryoları gibi çevresel performansı doğrudan etkileyen parametreler dikkate alınmış ve ISO 14040 ile ISO 14044 standartlarına uygun olarak çevresel etki değerleri hesaplanmıştır.

Karşılaştırmada, her sistemin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkardığı toplam çevresel etkiler beş temel gösterge üzerinden değerlendirilmiştir: küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitlenme potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (EP), fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli (SFP) ve yenilenemez birincil enerji tüketimi (PENR). Bu göstergeler,

yaşam döngüsü aşamaları olan ham madde çıkarımı ve üretim (A1–A3), şantiye süreci ve taşımalar (A4–A5), kullanım evresi (B1–B7), hizmet ömrü sonu (C1–C4) ve geri dönüşüm/yeniden kullanım potansiyeli (D) dikkate alınarak detaylı biçimde incelenmiştir.

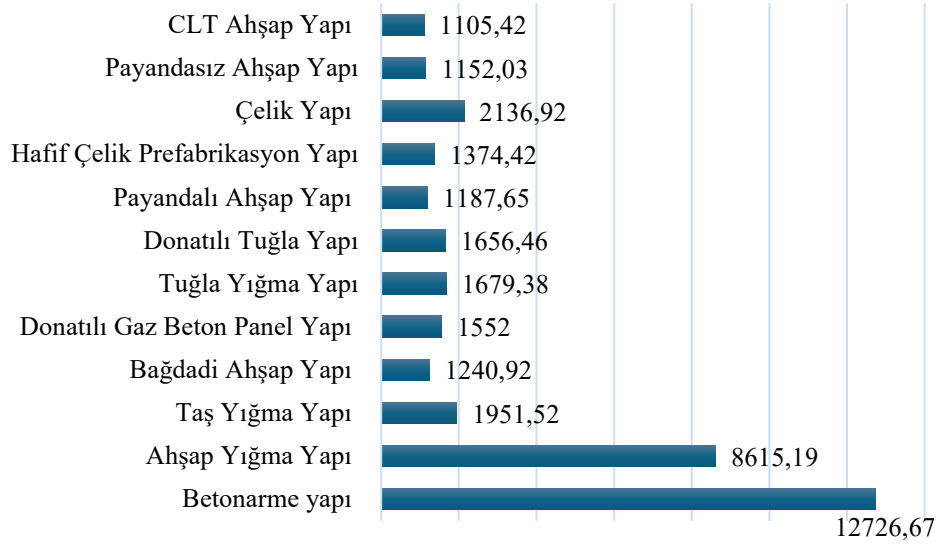
Şekil 62’de verilen Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential – GWP) değerleri incelendiğinde, yapı sistemleri arasında küresel ısınma potansiyeli bakımından önemli farklılıklar gözlenmiştir. En yüksek GWP değeri betonarme yapıda (12.726,67 kg CO₂eq/m²) hesaplanmış olup, bu durum büyük ölçüde çimento üretim sürecinde ortaya çıkan yüksek karbon salımları ve betonarme sistemlerin yoğun malzeme kullanımı ile ilişkilidir. Bu nedenle betonarme, küresel ısınmaya katkısı açısından çevresel açıdan en olumsuz performansı sergilemektedir.

İkinci sırada ahşap yığma yapı (8.615,19 kg CO₂eq/m²) yer almaktadır. Ahşabın karbon depolama özelliği bulunmasına rağmen, bu sistemde kullanılan yüksek hacimli ahşap miktarı ve işleme süreçlerinde harcanan enerji toplam emisyonları artırmıştır.

Buna karşın, en düşük GWP değeri CLT ahşap yapıda (1.105,42 kg CO₂eq/m²) görülmüş, bu sonuç ahşabın karbon tutma potansiyeli, üretim süreçlerindeki görece düşük enerji tüketimi ve hafif yapısal özellikleri ile açıklanabilir. Benzer şekilde payandasız ahşap yapı (1.152,03 kg CO₂eq/m²) ve bağdadi ahşap yapı (1.240,92 kg CO₂eq/m²) de düşük GWP değerleriyle dikkat çekmiş ve sürdürülebilirlik açısından avantajlı sistemler olarak öne çıkmıştır.

Orta seviyede GWP değerleri ise hafif çelik prefabrikasyon yapı (1.374,42 kg CO₂eq/m²), payandalı ahşap yapı (1.187,65 kg CO₂eq/m²), donatılı gaz beton panel yapı (1.552,00 kg CO₂eq/m²), donatılı tuğla yapı (1.656,46 kg CO₂eq/m²), tuğla yığma yapı (1.679,38 kg CO₂eq/m²), taş yığma yapı (1.951,52 kg CO₂eq/m²) ve çelik yapı (2.136,92 kg CO₂eq/m²) sistemlerinde gözlenmiştir.

Genel olarak, betonarme yapı ile CLT ahşap yapı arasında yaklaşık 11,5 kat fark bulunması, malzeme seçiminin yaşam döngüsü boyunca küresel ısınma etkisi üzerinde ne kadar belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, düşük karbon ayak izine sahip malzemelerin tercih edilmesinin sürdürülebilir yapı tasarımı açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 62. Farklı yapı sistemlerinin küresel ısınma potansiyeli (gwp) değerleri

Şekil 63’de verilen Asitlenme Potansiyeli (Acidification Potential – AP) değerleri incelendiğinde, yapı sistemleri arasında belirgin farklılıklar gözlenmektedir. En yüksek AP değeri çelik yapıda ($19,71 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) ölçülmüş olup, bu durum çelik üretim sürecinde kullanılan yüksek enerji miktarı ve hammadde işleme sırasında ortaya çıkan kükürt oksit (SO_x) emisyonları ile ilişkilidir. Bu nedenle çelik yapılar, asitlenme etkisi bakımından en olumsuz performansı sergileyen sistem olmuştur.

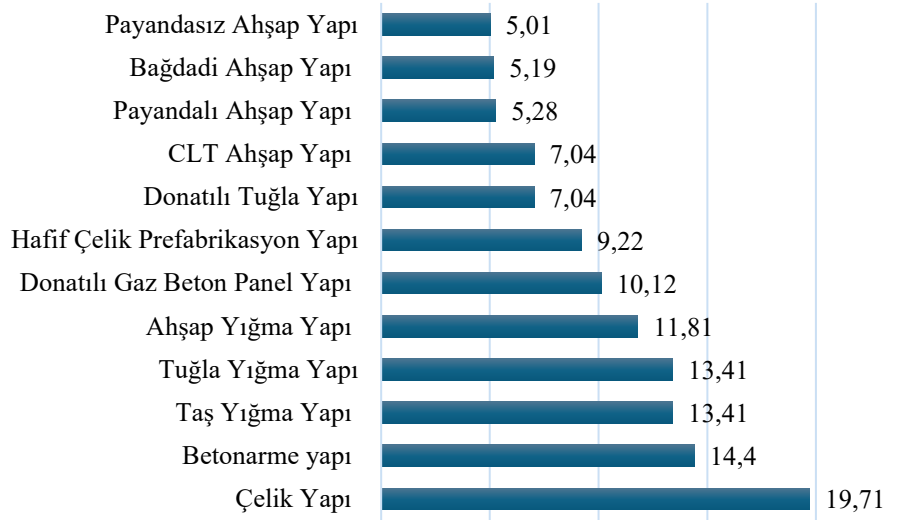
İkinci sırada betonarme yapı ($14,40 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) yer almakta, onu taş yığma ($13,41 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) ve tuğla yığma ($13,41 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) yapılar takip etmektedir. Bu sistemlerdeki yüksek değerler, üretim ve nakliye süreçlerinde ortaya çıkan enerji tüketimi ile açıklanabilir. Ahşap yığma yapı da ($11,81 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) yüksek değerleriyle öne çıkmıştır.

Orta düzeyde AP değerleri donatılı gaz beton panel yapı ($10,12 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) ve hafif çelik prefabrikasyon yapı ($9,22 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) sistemlerinde gözlenmiştir. Bu değerler, malzeme türü ve üretim teknolojilerine bağlı olarak çevresel etki açısından orta seviyede bir performansı göstermektedir.

Daha düşük AP değerleri donatılı tuğla yapı ($7,04 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) ve CLT ahşap yapı ($7,04 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) sistemlerinde ölçülmüştür. En düşük değerler ise payandalı ahşap yapı ($5,28 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$), bağdadi ahşap yapı ($5,19 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) ve payandasız ahşap yapı ($5,01 \text{ kg SO}_2\text{eq/m}^2$) sistemlerinde kaydedilmiştir.

Genel olarak, en yüksek değere sahip çelik yapı ile en düşük değere sahip payandasız ahşap yapı arasında yaklaşık 3,9 kat fark bulunması, malzeme türü ve üretim süreçlerinin

asitlenme potansiyeli üzerinde kritik rol oynadığını göstermektedir. Bu sonuç, düşük SO₂ ve NO₂ emisyonu sağlayan malzeme ve teknolojilerin tercih edilmesinin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 63. Farklı yapı sistemlerinin asitlenme potansiyeli (ap) değerleri

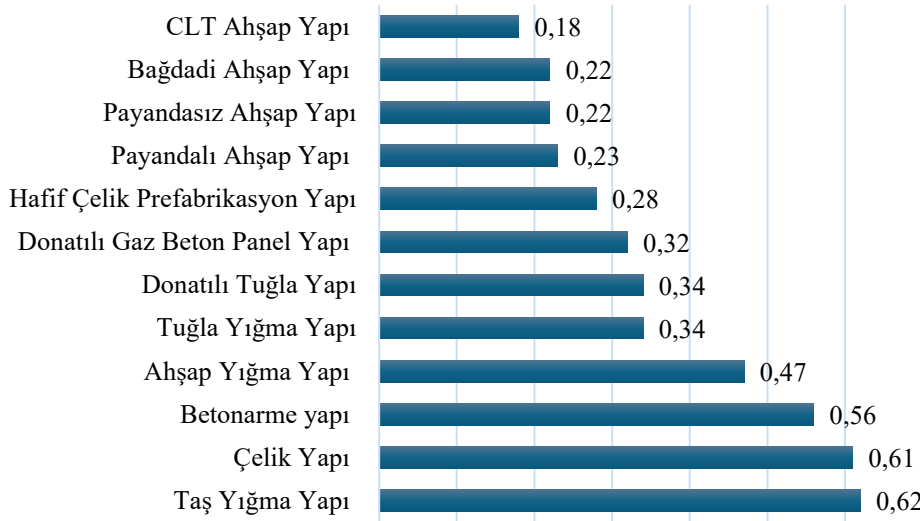
Şekil 64’de verilen Ötrofikasyon Potansiyeli (Eutrophication Potential – EP) değerleri incelendiğinde, sistemler arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. En yüksek değer taş yığma yapıda (0,62 kg PO₄³⁻-eq/m²) ölçülmüş olup, bunu çelik yapı (0,61 kg PO₄³⁻-eq/m²) ve betonarme yapı (0,56 kg PO₄³⁻-eq/m²) takip etmektedir. Bu sistemlerdeki yüksek değerler, özellikle üretim süreçlerinde ortaya çıkan azot ve fosfor bazlı emisyonlarla ve yüksek enerji tüketimiyle ilişkilidir.

Ahşap yığma yapı (0,47 kg PO₄³⁻-eq/m²) da nispeten yüksek bir ötrofikasyon potansiyeline sahiptir. Orta düzeyde değerler donatılı tuğla yapı (0,34 kg PO₄³⁻-eq/m²), tuğla yığma yapı (0,34 kg PO₄³⁻-eq/m²), donatılı gaz beton panel yapı (0,32 kg PO₄³⁻-eq/m²) ve hafif çelik prefabrikasyon yapı (0,28 kg PO₄³⁻-eq/m²) sistemlerinde kaydedilmiştir.

Daha düşük EP değerleri payandalı ahşap yapı (0,23 kg PO₄³⁻-eq/m²), payandasız ahşap yapı (0,22 kg PO₄³⁻-eq/m²) ve bağdadi ahşap yapı (0,22 kg PO₄³⁻-eq/m²) sistemlerinde görülmüştür. En düşük değer ise CLT ahşap yapıda (0,18 kg PO₄³⁻-eq/m²) hesaplanmıştır.

Genel olarak, en yüksek değere sahip taş yığma yapı ile en düşük değere sahip CLT ahşap yapı arasında yaklaşık 3,4 kat fark bulunması, malzeme seçiminin ve üretim süreçlerinin ötrofikasyon potansiyeli üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bu

sonuç, azot ve fosfor bazlı emisyonları düşük malzemelerin tercih edilmesinin su ekosistemlerinin korunması açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 64. Farklı yapı sistemlerinin ötrofikasyon potansiyeli (ep) değerleri

Şekil 65'te verilen Fotokimyasal Ozon Oluşumu potansiyeli (Smog Formation Potential – SFP) değerleri incelendiğinde, yapı sistemleri arasında oldukça belirgin farklılıklar gözlenmektedir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek değerin çelik yapıda ($225,93 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$) ortaya çıktığı görülmektedir. Bu yüksek değer, çelik üretiminde açığa çıkan uçucu organik bileşikler (VOC) ile azot oksit (NO_2) emisyonlarından kaynaklanmakta, ayrıca çelik sistemlerdeki enerji yoğun üretim süreçleri bu değeri artırmaktadır. Bu nedenle çelik yapı, hava kalitesi üzerinde en olumsuz etkiye sahip sistem olarak öne çıkmaktadır.

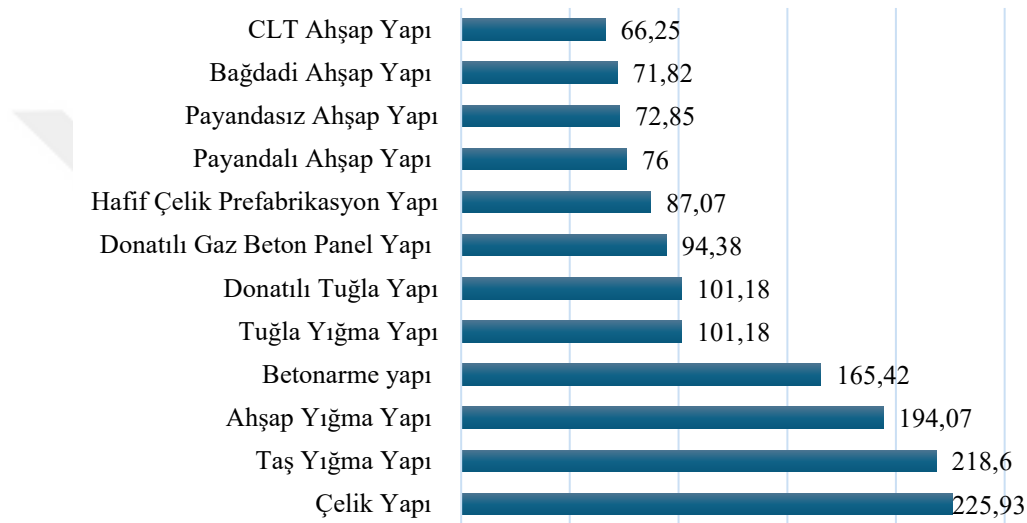
İkinci sırada taş yığma yapı ($218,60 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$) yer almakta olup, bu yüksek değer taşın işlenmesi, nakliyesi ve uygulanması sırasında ortaya çıkan enerji gereksiniminin etkisiyle açıklanabilir. Üçüncü sırada bulunan ahşap yığma yapı ($194,07 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$) ise kullanılan yoğun malzeme miktarı ve yüzey koruma işlemlerinde kullanılan kimyasallardan kaynaklanmaktadır.

Buna karşın, en düşük değerler CLT ahşap yapı ($66,25 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$) ve bağdadi ahşap yapı ($71,82 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$) sistemlerinde görülmektedir. Bu düşük sonuçlar, üretim süreçlerinde modern teknolojilerin tercih edilmesi, VOC salımlarının sınırlı olması ve malzeme yoğunluğunun düşük tutulmasıyla açıklanabilir.

Payandasız ahşap yapı ($72,85 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$), payandalı ahşap yapı ($76,00 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$), hafif çelik prefabrikasyon yapı ($87,07 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$), donatılı gaz beton panel yapı ($94,38 \text{ g O}_3\text{eq/m}^2$)

O_3eq/m^2), donatılı tuğla yapı (101,18 g O_3eq/m^2), tuğla yığma yapı (101,18 g O_3eq/m^2), betonarme yapı (165,42 g O_3eq/m^2) sistemlerinde tespit edilmiştir.

Genel olarak, çelik yapı ile en düşük değere sahip CLT ahşap yapı arasında yaklaşık 3,4 kat fark bulunması, malzeme türü ve üretim süreçlerinin fotokimyasal ozon oluşumu üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir. Bu bulgu, özellikle VOC ve NO_2 salımlarını sınırlayan malzeme ve teknolojilerin tercih edilmesinin hava kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasında kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 65. Farklı yapı sistemlerinin ozon oluşumu potansiyeli (sfp) değerleri

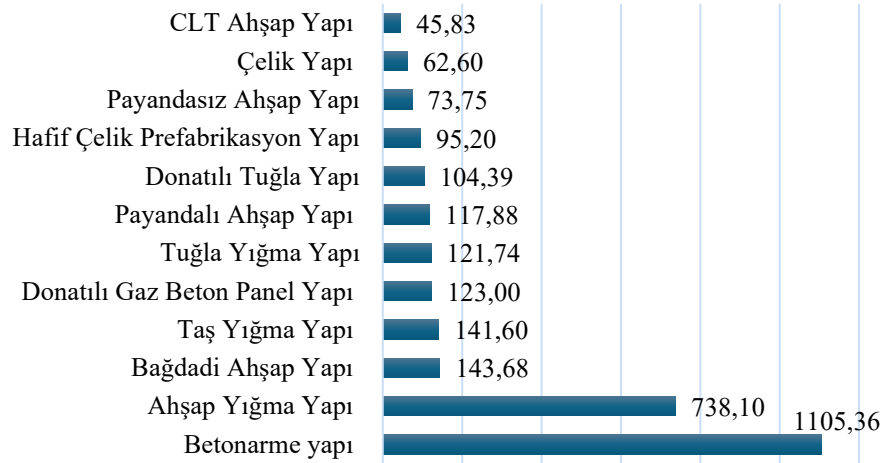
Şekil 66'da Yenilenemez birincil enerji tüketimi (Primary Energy Non-Renewable – PENR) sonuçları incelendiğinde, sistemler arasında oldukça büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Analizlere göre yenilenemez enerji tüketimi bakımından en yüksek değer betonarme yapıda (1105,36 MJ/m²) ölçülmüş olup, bu durum çimento, agrega ve donatı çeliği üretim süreçlerinde yoğun fosil yakıt tüketilmesi ve hem üretim hem de nakliye aşamalarının yüksek enerji gerektirmesiyle ilişkilidir. Bu nedenle betonarme, enerji yoğunluğu açısından en olumsuz performansı göstermektedir.

İkinci sırada ahşap yığma yapı (738,10 MJ/m²) yer almaktadır. Ahşap yenilenebilir bir malzeme olmasına rağmen, işleme süreçlerinde kullanılan elektrik ve fosil yakıt bazlı enerji, koruyucu kimyasalların tüketimi ve büyük hacimli malzeme kullanımı bu yüksek değere katkı sağlamıştır.

En düşük değerler ise CLT ahşap yapı (45,83 MJ/m²) ve çelik yapı (62,60 MJ/m²) sistemlerinde gözlenmiştir. CLT'nin düşük değeri, üretim sürecindeki görece düşük enerji yoğunluğu ve hafifliği sayesinde nakliye sırasında sınırlı enerji gerektirmesiyle açıklanabilir. Çelik yapıdaki düşük değer ise yüksek geri dönüşüm oranı ve yeniden kullanım potansiyeli ile ilişkilidir.

Orta seviyede değerler hafif çelik prefabrik yapı (95,20 MJ/m²), donatılı tuğla yapı (104,39 MJ/m²), payandasız ahşap yapı (73,75 MJ/m²), payandalı ahşap yapı (117,88 MJ/m²), tuğla yığma yapı (121,74 MJ/m²), donatılı gaz beton panel yapı (123,00 MJ/m²), taş yığma yapı (141,60 MJ/m²) ve bağdadi ahşap yapı (143,68 MJ/m²) sistemlerinde kaydedilmiştir.

Genel olarak, betonarme yapı ile en düşük değere sahip CLT ahşap yapı arasında yaklaşık 24 kat fark bulunması, malzeme türü ve üretim süreçlerinin enerji tüketimi üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Bu bulgu, yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımını azaltacak malzeme seçimlerinin ve üretim teknolojilerinin sürdürülebilir yapı tasarımında öncelikli olması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 66. Farklı yapı sistemlerinin yenilenemez birincil enerji tüketimi (penr) değerleri

3.5. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Sonuçlarına Göre Alternatiflerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Tablo 8’de yapı sistemlerinin çok kriterli değerlendirme sürecine ilişkin elde edilen skorlar sunulmaktadır. Bu analizde kriterlerin farklı ölçeklere sahip olmasından dolayı

öncelikle normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Yaklaşık maliyet, proje süresi ve LCA göstergeleri için doğrudan normalizasyon kullanılmış, yani yüksek değerlerin daha olumsuz performansı yansıttığı kabul edilmiştir. Buna karşılık enerji verimliliği göstergeleri olan ısıtma ve soğutma yüklerinde ise ters normalizasyon yapılmış, bu sayede düşük enerji tüketim değerleri daha avantajlı bir performans olarak değerlendirilmiştir. Normalizasyon sonrasında elde edilen değerler Tablo 7’de belirlenen kriter ağırlıkları ile çarpılmış ve her bir yapı sistemi için kriter skorları hesaplanmıştır. Tüm kriterlerin skorlarının toplanması ile toplam skorlar elde edilmiş, bu değerler küçükten büyüğe doğru sıralanarak en avantajlıdan en dezavantajlıya doğru bir değerlendirme yapılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, en düşük toplam skor değerleri CLT Ahşap Yapı (0.1144), Tuğla Yığma Yapı (0.1757) ve Donatılı Tuğla Yığma Yapı (0.1796) sistemlerinde görülmüş ve bu sistemler çok kriterli analiz kapsamında en uygun alternatifler olarak öne çıkmıştır. Özellikle CLT Ahşap Yapı, düşük maliyet skorunun yanı sıra enerji verimliliğinde sağladığı avantajlarla dengeli bir performans sergilemiştir. Tuğla Yığma Yapı ve Donatılı Tuğla Yığma Yapı ise düşük maliyet ve çevresel göstergelerdeki olumlu sonuçları sayesinde düşük toplam skor elde ederek avantajlı sistemler arasında yer almıştır.

Donatılı Gaz Beton Panel Yapı (0.1978), Prefabrik Yapı (0.3830) ve Gaz Beton Panel Yapı (0.3830) orta düzeyde performans sergileyen sistemler olarak değerlendirilmiştir. Bu sistemler, üretim teknolojileri sayesinde belirli çevresel avantajlara sahip olsa da maliyet ve enerji tüketimi açısından daha dengeli bir performans ortaya koymuştur.

Diğer yandan, Taş Yığma Yapı (0.2579), Payandalı Ahşap Yapı (0.4154), Payandasız Ahşap Yapı (0.4533) ve Bağdadi Ahşap Yapı (0.8161) gibi sistemler, özellikle yapım süresi ve maliyet yönlerinden dezavantajlı konumda bulunmuştur.

En yüksek toplam skor değerleri ise Betonarme Yapı (0.6722) ve Çelik Yapı (0.5287) sistemlerinde görülmüştür. Betonarme yapı, yüksek GWP değeri ve enerji tüketimi nedeniyle çevresel açıdan en olumsuz performansı sergilerken, çelik yapı yüksek üretim enerjisi ve asitlenme potansiyeliyle dezavantajlı konumda yer almıştır.

Genel olarak, çok kriterli değerlendirme yöntemi, tek bir performans göstergesine odaklanmadan maliyet, süre, çevresel etkiler ve enerji verimliliğini birlikte ele alarak daha rasyonel bir karar mekanizması sağlamaktadır. Bu kapsamda, düşük toplam skor değerleri ile öne çıkan sistemler özellikle CLT Ahşap, Tuğla Yığma ve Donatılı Tuğla Yığma bütüncül bakış açısıyla en uygun seçenekler olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 8. Yapı sistemlerinin çok kriterli değerlendirme skorları

		Betonarme	Çelik	Yığma Ahşap	Bağdadi Ahşap	Payandalı Ahşap	Payandasız Ahşap	Taş Yığma	Tuğla Yığma	Donatılı Tuğla Yığma	Gaz Beton Panel	Prefabrik	CLT Ahşap	
Yaklaşık Maliyet	Maliyet (₺)	3305105.39	3602980.46	3286615.22	4912637.62	3206047.94	3166737.39	2522314.91	2523043.34	2552859.70	2874605.03	3136537.39	2530283.91	
	Norm.	0.3275	0.4521	0.3197	1.0000	0.2860	0.2696	0.0000	0.0003	0.0128	0.1474	0.2570	0.0033	
	Skor	0.1408	0.1944	0.1374	0.4300	0.1229	0.1154	0.0000	0.0001	0.0055	0.0633	0.1105	0.0014	
Proje Süresi	Süre	79	83	57	85	54	53	48	47	50	69	72	42	
	Norm.	0.8605	0.9535	0.3488	1.0000	0.4000	0.3667	0.2000	0.1667	0.2667	0.9000	1.0000	0.0001	
	Skor	0.1290	0.1425	0.0525	0.1500	0.0600	0.0555	0.0300	0.0255	0.0405	0.1350	0.1500	0.0015	
LCA Değerlendirilmesi	GWP	GWP	12726,67	2136,92	8615,19	1240,92	1187,65	1152,03	1951,52	1678,38	1656,46	1552	1374,42	1105,42
		Norm.	1,0000	0,1374	1,0000	0,1601	0,0972	0,0551	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000
		Skor	0.0500	0.0069	0.0500	0.0080	0.0049	0.0028	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0000
	AP	AP	14,04	19,71	11,81	5,19	5,28	5,01	13,41	13,41	7,04	10,12	9,22	7,04
		Norm.	0,6143	1,0000	0,8095	0,0214	0,0321	0,0000	1,0000	1,0000	0,3973	1,0000	1,0000	0,1381
		Skor	0.0123	0.0200	0.0162	0.0004	0.0006	0.0000	0.0200	0.0200	0.0079	0.0200	0.0200	0.0028
	EP	EP	0,56	0,61	0,47	0,22	0,23	0,22	0,61	0,34	0,34	0,32	0,28	0,18
		Norm.	0,8837	1,0000	0,6744	0,0930	0,1163	0,0930	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000
		Skor	0.0177	0.0200	0.0135	0.0019	0.0023	0.0019	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0000
	SFP	SFP	165,42	225,93	194,07	71,82	76	72,85	218,6	101,88	101,18	94,38	87,07	66,25
		Norm.	0,6211	1,0000	0,8390	0,0366	0,0640	0,0433	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000
		Skor	0.0124	0.0200	0.0168	0.0007	0.0013	0.0009	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0000
	PENR	PENR	132642,85	7511,88	88571,42	17241,71	14145,02	8850,55	16992,52	14608,97	12526,62	14760,32	11423,9	5499,67
		Norm.	1,0000	0,0242	1,0000	1,0000	0,7522	0,2916	1,0000	0,9837	0,7588	1,0000	1,0000	0,0001
		Skor	0.0400	0.0010	0.0400	0.0400	0.0301	0.0117	0.0400	0.0393	0.0304	0.0400	0.0400	0.0000
Enerji Verimliliği	Isıtma Yük.	Isıtma	1924.36	2791.77	2658.25	2348.17	2040.42	2105.31	3085.24	3508.86	3380.47	3310.25	2227.18	2866.28
		Norm.	1.0000	0.4526	0.5368	0.7325	0.9268	0.8858	0.2674	0.0001	0.0810	0.1253	0.8089	0.4055
		Skor	0.2200	0.0990	0.1188	0.1606	0.2046	0.1958	0.0594	0.0002	0.0176	0.0286	0.1782	0.0902
	Soğutma Yük.	Soğutma	2316.19	3140.61	3125.08	3156.54	3023.55	2925.84	3346.23	3941.76	3962.76	3763.14	2721.13	3345.70
		Norm.	1.0000	0.4993	0.5087	0.4896	0.5704	0.6297	0.3744	0.0128	0.0001	0.1212	0.7541	0.3748
		Skor	0.0500	0.0250	0.0255	0.0245	0.0285	0.0315	0.0185	0.0005	0.0001	0.0060	0.0375	0.0185
Toplam Skor		0.6722	0.5287	0.4707	0.8161	0.4553	0.4154	0.2579	0.1757	0.1920	0.3830	0.6262	0.1144	

4. TARTIŖMALAR

Bu çalışmada elde edilen bulgular, afet sonrası yeniden yapılaşma senaryoları açısından farklı yapı sistemlerinin performansını bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirme imkânı sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, literatürde rapor edilen eğilimlerle büyük ölçüde örtüşmekte; bazı noktalarda ise metodolojik farklılıklar nedeniyle ayrışmaktadır. Bu bağlamda, çalışma çıktılarının literatürle karşılaştırılması, elde edilen bulguların güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini pekiştirmektedir.

Yaklaşık maliyet analizlerinde, en düşük maliyetli sistemler tuğla ve taş yığma yapılar olurken, en yüksek maliyetli sistem Bağdadi ahşap yapılar olarak belirlenmiştir. Bu farklılığın temelinde iş kalemlerinin yoğunluğu ve özellikle “Kıtıklı Tatlı Kireç Harcı ile Bağdadi Satırlar Üzerinde Düz Sıva” gibi maliyetli imalat süreçleri bulunmaktadır. Çalışmada, CLT ahşap yapıların modüler üretim süreçleri sayesinde düşük maliyetli olması, Zhang (2022) ile Jindal vd. (2022)’nin ahşap yapıların erken aşama maliyet tahminlerinde avantaj sağladığına yönelik bulgularıyla örtüşmektedir. Buna karşılık, hafif elik prefabrik sistemlerin yüksek maliyetleri, profil demirlerinin işlenmesi ve korozyon koruma işlemlerinin yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Bu durum, literatürde elik sistemlerin üretim ve montaj aşamalarındaki ek işçilik yüklerini vurgulayan araştırmalarla Aibinu vd.(2014) uyum göstermektedir.

Proje sürelerine ilişkin bulgular, yapı türleri arasında belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. CLT ahşap yapıların 42 gün ile en kısa sürede tamamlanabilmesi, fabrikada üretilen panellerin sahada hızlı montajına bağlanırken; Bağdadi ahşap yapıların 85 gün ile en uzun süreye sahip olması, çok aşamalı ve işçilik yoğun iş kalemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar, literatürde modüler yapıların zaman avantajına vurgu yapan çalışmaları desteklemektedir. Örneğin, Olivieri vd. (2018), Lokasyon Tabanlı Yönetim Sistemi’nin tekrarlayan işlerde süreyi kısaltabildiğini belirtmiştir. Çalışmamızda, geleneksel yöntemlerle hesaplanan uzun süreler ile modüler sistemlerin sağladığı zaman avantajının açık biçimde ortaya konulması, söz konusu literatür bulgularıyla paralellik göstermektedir.

Enerji verimliliği analizlerinde, Kahramanmaraş/Onikişubat iklim koşullarında çoğu yapı sistemi için soğutma yüklerinin ısıtma yüklerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek enerji tüketimi donatılı tuğla ve taş yığma sistemlerde görölürken, betonarme ve hafif

çelik prefabrik sistemler daha avantajlı sonuçlar vermiştir. Bu durum, yüksek ısı kütleye sahip yapıların gündüz depoladığı ısıyı gece iç mekâna aktarması nedeniyle yaz aylarında soğutma yükünü artırmasıyla açıklanabilir. Literatürde Homod vd. (2021), cephe malzemelerinin ve yalıtım kalınlıklarının enerji tüketimi üzerinde belirleyici olduğunu; Hussien vd. (2021) ise malzeme seçimlerinin enerji verimliliğine doğrudan etki ettiğini vurgulamıştır. Çalışmamızda elde edilen sonuçlar bu görüşleri doğrulamakta; özellikle tuğla ve taş yığma sistemlerin yüksek enerji tüketimi literatürdeki bulgularla uyumlu biçimde ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık, hafif çelik prefabrik sistemlerin düşük enerji tüketimi, sandviç panel teknolojilerinin sağladığı yüksek yalıtım kapasitesine bağlanabilir. Bu durum, BIM tabanlı enerji simülasyonlarının enerji performansını erken aşamada doğru tahmin edebildiğini vurgulayan çalışmalarla (Buonomano & Palombo, 2014; Wang vd., 2022) örtüşmektedir.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) sonuçları, malzeme seçiminin çevresel performans üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermiştir. En yüksek çevresel etki betonarme yapılarda ortaya çıkarken, en düşük değerler CLT ahşap ve çelik yapılarda hesaplanmıştır. Betonarmenin yüksek GWP, AP, EP, SFP ve PENR değerleri, çimento üretiminde ortaya çıkan yoğun karbon salımı ve yüksek enerji tüketimiyle ilişkilidir. Bu bulgular, Ma vd. (2024)'ün betonarme yapılarda gömülü karbon salınımının baskın olduğunu gösteren çalışmasıyla uyumludur. Ayrıca, Gervásio ve da Silva (2014), çelik yapıların üretim aşamasında yüksek emisyonu sahip olduğunu ancak kullanım aşamasında enerji verimliliği avantajı sunduğunu rapor etmiştir. Çalışmamızda çelik yapıların görece düşük GWP ve PENR değerleri, yüksek geri dönüşüm oranı ve yeniden kullanım potansiyeliyle ilişkilendirilmiştir; bu da literatürdeki bulguları doğrulamaktadır. Ahşap yığma yapılarda ise malzeme hacmi ve işleme süreçlerinin yüksek enerji tüketimine yol açması nedeniyle çevresel etkilerin görece yüksek olduğu görülmüştür. Buna karşın, CLT ahşap sistemler düşük karbon ayak izi ve enerji tüketimiyle öne çıkmış; bu sonuç, ahşabın karbon depolama özelliğini vurgulayan Altan vd. (2022) ile Liu vd. (2023)'ün çalışmalarıyla örtüşmektedir.

Son olarak, çok kriterli değerlendirme (AHP) sonuçları, yalnızca tek boyutlu kriterlere odaklanmanın sınırlı kalacağını, maliyet, süre, enerji ve çevresel göstergelerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Donatılı tuğla, CLT ahşap ve taş yığma yapıların en uygun alternatifler olarak öne çıkması, maliyet ve çevresel göstergelerdeki avantajlarının

birleşimiyle açıklanabilir. Buna karşın, Bağdadi ahşap ve betonarme yapılar, yüksek maliyet, uzun süre ve çevresel etkiler nedeniyle alt sıralarda kalmıştır

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmanın özğün katkısı, farklı yapı sistemlerinin maliyet, süre, enerji ve yaşam döngüsü göstergelerinin BIM tabanlı bir yaklaşımla aynı anda incelenmesi ve çok kriterli bir karar mekanizmasıyla bütüncül olarak değerlendirilmesidir. Literatürde genellikle bu parametreler ayrı ayrı ele alınmışken, bu çalışma tümünü entegre ederek afet sonrası yapı seçiminde daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar sunmuştur. Elde edilen bulgular, yapı seçiminde sadece maliyet veya süre gibi tekil ölçütlere değil, enerji ve çevresel göstergelere de önem verilmesi gerektiğini, böylelikle sürdürülebilir ve dirençli yapıların ön plana çıkarılabileceğini göstermektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, afet sonrası yeniden yapılaşma sürecinde kullanılabilecek farklı yapı sistemlerini mühendislik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla bütüncül biçimde ele almıştır. On iki farklı yapı sistemi; yaklaşık maliyet, proje süresi, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kriterleri çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Bulgular, her sistemin belirli kriterlerde avantaj ve dezavantajlar sunduğunu göstermiş, yapı seçiminin tek boyutlu yaklaşımlara indirgenemeyeceğini ortaya koymuştur.

Yığma türü yapıların düşük maliyet seviyelerine sahip olduğu, buna karşılık Bağdadi ahşap yapı gibi çok katmanlı imalat süreçleri içeren geleneksel sistemlerin en yüksek maliyetleri doğurduğu belirlenmiştir. CLT ve belirli prefabrik çözümler, hızlı üretim ve montaj avantajlarının yanı sıra sağladıkları enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik katkılarıyla uzun vadede toplam sahip olma maliyetini azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle, maliyet analizlerinde yalnızca ilk yatırım değil, tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkacak enerji tüketimi, bakım ve kullanım ömrü performansının da dikkate alınması gerekmektedir.

Prefabrikasyon ve modüler montaj temelli sistemler, süre bakımından en avantajlı alternatiflerdir. Özellikle CLT yapılar, fabrikada ön üretim ve sahada hızlı montaj imkânı sayesinde kısa sürede tamamlanabilmektedir. Bu özellik, afet sonrası acil barınma ihtiyacının karşılanmasında kritik bir üstünlük sağlamaktadır. Buna karşılık, geleneksel yığma sistemler uzun ve çok aşamalı uygulamalar nedeniyle acil senaryolarda yetersiz kalmakta, ancak kalıcı ve kültürel uyum gerektiren projelerde daha uygun hale gelmektedir. Bu bulgular, literatürde prefabrik ve endüstriyel sistemlerin afet yönetiminde öncelikli olarak önerilmesiyle örtüşmektedir.

Enerji analizleri, yapı sistemlerinin ısıtma ve soğutma yükleri açısından belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Yığma sistemlerde yüksek soğutma yükleri, sıcak iklim koşullarında enerji tüketiminin artmasına yol açmıştır. Hafif çelik prefabrik sistemler kış aylarında görece düşük ısıtma yükleri sunarken, betonarme yapılarda ısıtma ve soğutma yükleri yüksek kalmıştır. Bu durum, literatürde sıkça vurgulanan “yüksek ısıl kütle her zaman avantaj değildir” görüşünü desteklemektedir. Yüksek ısıl kütle, belirli koşullarda iç mekân sıcaklığının dengelenmesine katkı sunsa da sıcak iklimlerde soğutma ihtiyacını artırarak enerji tüketimini yükseltebilmektedir.

Dolayısıyla, yapı sistemlerinin enerji performansını değerlendirirken yalnızca malzeme kapasitesine odaklanmak yeterli değildir; iklim koşulları ve kullanım senaryoları da dikkate alınmalıdır. Özellikle CLT ve modüler sistemler, daha dengeli ısı transferi ve düşük enerji tüketimiyle öne çıkmakta ve sürdürülebilirlik hedeflerine somut katkı sağlamaktadır.

LCA bulguları, çevresel etkiler açısından yapı türleri arasında radikal farklılıklar bulunduğunu göstermiştir. Betonarme yapılar, çimento üretimindeki enerji yoğunluğu ve karbon salımları nedeniyle GWP ve PENR gibi göstergelerde en olumsuz senaryoyu sunarken; CLT gibi ahşap tabanlı sistemler en düşük çevresel etkilere sahiptir. Çelik yapılarda geri dönüşüm olanakları performansı kısmen iyileştirse de, AP ve SFP göstergelerinde yüksek değerler gözlenmektedir. Bu sonuç, küresel ölçekte sürdürülebilir yapılaşma politikalarının neden ahşap ve geri dönüştürülebilir çelik bileşeni yüksek çözümlere yöneldiğini açıkça ortaya koymaktadır.

AHP analizi, tüm kriterlerin birlikte değerlendirilmesini sağlamış ve CLT Ahşap Yapı, Tuğla Yığma ve Donatılı Tuğla Yığma sistemlerini en uygun alternatifler olarak öne çıkarmıştır. Buna karşılık, Bağdadi Ahşap, Betonarme, Çelik ve Hafif Çelik Prefabrik yapılar yüksek toplam skorları ile daha dezavantajlı konumda kalmıştır. Taş Yığma ise orta düzey bir toplam skorla bu grupların ardından gelmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında, farklı yapı sistemlerinin afet sonrası yeniden yapılaşma ve sürdürülebilirlik bağlamında hangi koşullarda daha uygun olabileceğine yönelik çeşitli uygulama ve politika önerileri geliştirilmiştir. Bu öneriler, hem karar vericilerin daha bilinçli tercihler yapmasına katkı sunmakta hem de ileride yapılacak araştırmalara yön gösterecek nitelik taşımaktadır:

- Ekonomik kısıtlar söz konusu olduğunda, tuğla yığma ve donatılı tuğla yığma sistemler uygun seçenekler olabilir; ancak enerji ve çevresel performanslarının artırılması için yalıtım ve malzeme iyileştirmeleri yapılmalıdır.
- Afet sonrası geçici ve kalıcı barınma için CLT ve (özellikle donatılı gaz beton panel gibi) prefabrik sistemler tercih edilmelidir. Hızlı uygulama kabiliyetleri, afet yönetiminde toplumların toparlanma süresini kısaltacaktır.
- Karbon nötr hedefleri olan kentlerde ahşap ve geri dönüştürülebilir çelik oranı yüksek çözümler öne çıkarılmalı; betonarme sistemlerde ise düşük karbonlu çimento ve geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı teşvik edilmelidir.

- Sıcak iklimlerde, yüksek soğutma yüküne neden olan yığma yapılardan kaçınılmalı; yüksek yalıtım performansı sağlayan modern sistemler ve pasif tasarım stratejileri öncelikli hale getirilmelidir.
- Geleneksel sistemlerin geliştirilmesi amacıyla fabrikasyon elemanların ve kuru montaj tekniklerinin entegrasyonu teşvik edilmelidir.
- AHP kriter ağırlıkları, projelerin bağlamına göre esnek biçimde uyarlanmalı; afet senaryolarında süre, sürdürülebilirlik politikalarında çevresel etkiler öncelikli hale getirilmelidir.
- Gelecek araştırmalarda, aydınlatma, kullanıcı davranışları, ekipman yükleri ve yenilenebilir enerji entegrasyonu da analize dahil edilmeli; farklı iklim bölgelerinde benzer çalışmalar yürütülmelidir.

Bu çalışma, yapı sistemlerinin seçiminde maliyet veya süre odaklı tek boyutlu kararların yetersiz olduğunu, çok kriterli değerlendirme gerekliliğini ortaya koymuştur. Hiçbir sistem tüm kriterlerde mutlak üstünlük sağlamamış; ancak farklı senaryolara göre bazıları daha uygun hale gelmiştir. Bu nedenle karar vericilerin, maliyet, süre, enerji verimliliği ve yaşam döngüsü analizi (LCA) bütüncül biçimde ele alması kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, bu tez hem bilimsel literatüre katkı sunmakta hem de pratik uygulamalara yol gösterici öneriler getirmektedir. Bulgular, gelecekteki yapı sistemleri seçiminde karar vericilere çok boyutlu bir yol haritası sunmakta, özellikle afet yönetimi ve sürdürülebilirlik bağlamında önemli bir referans oluşturmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Abasnezhad, S., Soltani, N., Markarian, E., & Khezerloo, H. (2019). Impact of building design parameters precision on heating and cooling load calculations. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(2), 741–749. doi.org/10.1002/ep.13106
- Agouzoul, A., Chegari, B., Tabaa, M., & Simeu, E. (2022). Using neural network in a model-based predictive control loop to enhance energy performance of buildings. *Energy Reports*, 8, 1196–1207. doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.125
- Ajayi, S. O., Oyedele, L. O., & Ilori, O. M. (2019). Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources. *Journal of Building Engineering*, 23, 324–333. doi.org/10.1016/j.job.2019.02.008
- Alajmi, T., & Phelan, P. (2020). Modeling and forecasting end-use energy consumption for residential buildings in Kuwait using a bottom-up approach. *Energies*, 13(8), 1981. doi.org/10.3390/en13081981
- Alavipour, S. M. R., & Arditi, D. (2018). Optimizing financing cost in construction projects with fixed project duration. *Construction Management and Economics*, 36(11), 609–621. doi.org/10.1080/01446193.2018.1498663
- Albatayneh, A. (2021). Optimising the parameters of a building envelope in the East Mediterranean Saharan, cool climate zone. *Buildings*, 11(2), 43. doi.org/10.3390/buildings11020043
- Alfalah, G., Al Qahtani, N., Al-Sakkaf, A., Elshaboury, N., & Alshamrani, O. (2024). Assessing life cycle cost and environmental impact for office building construction in Saudi Arabia. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 23(6), 1854–1873. doi.org/10.1080/13467581.2023.2278461
- Ammar, M. A. (2013). LOB and CPM integrated method for scheduling repetitive projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(1), 44–50. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000569
- Andrade, P. A., Martens, A., & Vanhoucke, M. (2019). Using real project schedule data to compare earned schedule and earned duration management project time forecasting capabilities. *Automation in Construction*, 99, 68–78. doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.030
- Andrae, A. S. G. (2015). Method based on market changes for improvement of comparative attributional life cycle assessments. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(2), 263–275. doi.org/10.1007/s11367-014-0830-2
- An-Naggar, A. S., Ibrahim, M. A., & Khalil, E. E. (2017). Energy performance simulation in residential buildings. *Procedia Engineering*, 205, 4187–4194. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.177

- Arabpour Roghabadi, M., & Moselhi, O. (2022). Forecasting project duration using risk-based earned duration management. *International Journal of Construction Management*, 22(16), 3077–3087. doi.org/10.1080/15623599.2020.1840272
- Asare, K. A. B., Ruikar, K. D., Zanni, M., & Soetanto, R. (2020). BIM-based LCA and energy analysis for optimised sustainable building design in Ghana. *SN Applied Sciences*, 2, 1855. doi.org/10.1007/s42452-020-03682-2
- Awada, M., Elbeltagi, I., El-Rayes, K., & Abotaleb, I. (2021). Machine learning models for forecasting construction project duration using site data. *Automation in Construction*, 124, 103577. doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577
- Bachar, R., Urlainis, A., Wang, K.-C., & Shohet, I. M. (2025). Optimal allocation of safety resources in small and medium construction enterprises. *Safety Science*, 181, 106680. doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106680
- Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Mora-Melià, D., González-Cruz, M. C., Fuentes-Bargues, J. L., & Pellicer, E. (2019). Earned schedule min-max: Two new EVM metrics for monitoring and controlling projects. *Automation in Construction*, 103, 279–290. doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.016
- Bamber, N., Turner, I., Dutta, B., Heidari, M. D., & Pelletier, N. (2023). Consequential life cycle assessment of grain and oilseed crops: Review and recommendations. *Sustainability*, 15(7), 6201. doi.org/10.3390/su15076201
- Bansal, N. K., Buddhi, D., & Sawhney, R. L. (1991). Solar passive building design: A case study for composite climate of India. *Energy*, 16(7), 1251–1259. doi.org/10.1016/0360-5442(91)90077-F
- Barrientos-Orellana, A., Ballesteros-Pérez, P., Mora-Melià, D., González-Cruz, M. C., & Vanhoucke, M. (2022). Stability and accuracy of deterministic project duration forecasting methods in earned value management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(3), 1449–1469. doi.org/10.1108/ECAM-12-2020-1045
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2015). Empirical evaluation of earned value management forecasting accuracy for time and cost. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(11), 05015010. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001010
- Bizjak, M., Žalik, B., Štumberger, G., & Lukač, N. (2018). Estimation and optimisation of buildings' thermal load using LiDAR data. *Building and Environment*, 128, 12–21. doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.016
- Bueno, C., Pereira, L. M., & Fabricio, M. M. (2018). Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages: An application using building information modelling. *Architectural Engineering and Design Management*, 14(5), 332–346. doi.org/10.1080/17452007.2018.1458593

- Buonomano, A., & Palombo, A. (2014). Building energy performance analysis by an in-house developed dynamic simulation code: An investigation for different case studies. *Applied Energy*, 113, 788–807. doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.004
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2014). Life cycle assessment of an apartment building: Comparison of an attributional and consequential approach. *Energy Procedia*, 62, 132–140. doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.374
- Cao, X., Wang, Y., Luo, K., Wang, L., Liu, X., & Luan, Y. (2025). Energy-saving potential of radiative cooling and phase change materials in hot climates: A numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 268, 125971. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125971
- Chan, A. P. C., Yi, W., & Wong, F. K. W. (2020). Optimal work pattern for construction workers in hot weather: A case study in Hong Kong. *Building and Environment*, 185, 107268. doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107268
- Chen, H. L. (2018). Early prediction of project duration: A longitudinal study. *Engineering Management Journal*, 30(3), 191–202. doi.org/10.1080/10429247.2018.1483169
- Chen, H. L., Chen, T. C., & Lin, Y. T. (2016). Enhancing the earned value management system using a modified log-linear regression model. *Automation in Construction*, 63, 105–116. doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.011
- Chen, X., & Yang, H. (2017). A multi-stage optimization of passively designed high-rise residential buildings in multiple building operation scenarios. *Applied Energy*, 206, 541–557. doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.204
- Cheng, B., Li, J., Tam, V. W. Y., Yang, M., & Chen, D. (2020). A BIM-LCA approach for estimating the greenhouse gas emissions of large-scale public buildings: A case study. *Sustainability*, 12(2), 685. doi.org/10.3390/su12020685
- Cheng, M. Y., Do, H. L., & Lin, J. C. (2020). Project duration forecasting using LSTM neural network and early construction progress data. *Automation in Construction*, 119, 103336. doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103336
- Cheng, M.-Y., Tsai, H.-C., & Do, H.-L. (2021). A novel approach to estimating schedule to completion in construction projects using sequence and nonsequence factors. *Automation in Construction*, 126, 103639. doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103639
- Del Ama Gonzalo, F., Moreno Santamaría, B., & Montero Burgos, M. J. (2023). Assessment of building energy simulation tools to predict heating and cooling energy consumption at early design stages. *Sustainability*, 15(3), 1920. doi.org/10.3390/su15031920
- Ding, X., Du, W., & Cerpa, A. (2019). OCTOPUS: Deep reinforcement learning for holistic smart building control. In *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation (BuildSys '19)* (pp. 326–335). ACM. doi.org/10.1145/3360322.3360857

- Earles, J. M., Halog, A., Ince, P., & Skog, K. (2012). Integrated economic equilibrium and life cycle assessment modeling for policy-based consequential LCA. *Journal of Industrial Ecology*, 17(3), 375–384. doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00540.x
- Enríquez, R., Jiménez, M. J., & Heras, M. R. (2017). Towards non-intrusive thermal load monitoring of buildings: BES calibration. *Applied Energy*, 191, 44–54. doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.050
- Fabrizio, E. (2011). Feasibility of polygeneration in energy supply systems for health-care facilities under the Italian climate and boundary conditions. *Energy for Sustainable Development*, 15(2), 92–103. doi.org/10.1016/j.esd.2011.01.003
- Fernández Rodríguez, J. F., Picardo, A., Aguilar-Planet, T., Martín-Mariscal, A., & Peralta, E. (2025). Data transfer reliability from Building Information Modeling (BIM) to Life Cycle Assessment (LCA)—A comparative case study of an industrial warehouse. *Sustainability*, 17(4), 1685. doi.org/10.3390/su17041685
- Ferrara, M., Fabrizio, E., Virgone, J., & Filippi, M. (2014). A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 84, 442–457. doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.002
- Friess, W. A., Rakhshan, K., & Davis, M. P. (2017). A global survey of adverse energetic effects of increased wall insulation in office buildings: Degree day and climate zone indicators. *Energy Efficiency*, 10, 97–116. doi.org/10.1007/s12053-016-9441-z
- Gaudreault, C., Samson, R., & Stuart, P. R. (2010). Energy decision making in a pulp and paper mill: Selection of LCA system boundary. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(2), 198–211. doi.org/10.1007/s11367-009-0125-1
- González-García, S., Almeida, F., & Brandão, M. (2023). Do carbon footprint estimates depend on the LCA modelling approach adopted? A case study of bread wheat grown in a crop-rotation system. *Sustainability*, 15(6), 4941. doi.org/10.3390/su15064941
- Hegazy, T., & Ayed, A. (1998). Neural network model for parametric cost estimation of highway projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(3), 210–218. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:3(210)
- Hegazy, T., & Menesi, W. (2010). Critical path segments scheduling technique. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1078–1085. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000212
- Hemmati, M., Messadi, T., & Gu, H. (2024). Life cycle assessment of the construction process in a mass timber structure. *Sustainability*, 16(1), 262. doi.org/10.3390/su16010262
- Herroelen, W., & Leus, R. (2005). Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research*, 165(2), 289–306.

- Hou, L., Liu, Y., Yang, L., Liu, J., & Qiao, Y. (2017). The impacts of energy efficiency design parameters on office buildings energy consumption in different climate zones in China. *Procedia Engineering*, 205, 2478–2484. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.976
- Ibrahim, M., Biwole, P. H., Wurtz, E., & Achard, P. (2014). Limiting windows offset thermal bridge losses using a new insulating coating. *Applied Energy*, 123, 220–231. doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.043
- Jalali, Z., Shamseldin, A. Y., & Mannakkara, S. (2025). Evaluation of climate change effects on residential building cooling and heating demands in New Zealand: Implications for energy efficiency standards and building codes. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 43(5), 1179–1196. doi.org/10.1108/IJBPA-10-2022-0168
- Jarkas, A. M., & Bitar, C. G. (2012). Factors affecting construction labor productivity in Kuwait. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(7), 811–820. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000501
- Kenley, R., & Seppänen, O. (2006). Improving workflow and resource usage in construction schedules through location-based management system (LBMS). *Proceedings of the 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*.
- Khamooshi, H., & Abdi, A. (2017). Project duration forecasting using earned duration index and exponential smoothing. *Journal of Management in Engineering*, 33(1), 04016026. doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000472
- Kim, B. C., & Reinschmidt, K. F. (2010). Probabilistic forecasting of project duration using Kalman filter and the earned value method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(8), 834–843. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000181
- Lee, D. E., Park, H. K., Kim, H., & Kim, H. (2019). Improving time performance in construction project using building information modeling (BIM)-based scheduling: A case study. *Journal of Building Engineering*, 25, 100802. doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100802
- Lee, D. Y., Seo, B. M., Hong, S. H., Choi, J. M., & Lee, K. H. (2019). Part load ratio characteristics and energy saving performance of standing column well geothermal heat pump system assisted with storage tank in an apartment. *Energy*, 174, 1060–1078. doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.029
- Lee, H.-C., Lee, E.-B., & Alleman, D. (2018). Schedule modeling to estimate typical construction durations and areas of risk for 1000 MW ultra-critical coal-fired power plants. *Energies*, 11(10), 2850. doi.org/10.3390/en11102850
- Lesage, P., Ekvall, T., Deschênes, L., & Samson, R. (2007). Environmental assessment of brownfield rehabilitation using two different life cycle inventory models. Part 1: Methodological approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(6), 391–398. doi.org/10.1065/lca2006.10.279.1
- Li, Q., Yang, W., Kohler, N., Yang, L., Li, J., Sun, Z., Yu, H., Liu, L., & Ren, J. (2023). A BIM-LCA approach for the whole design process of green buildings in the Chinese context. *Sustainability*, 15(4), 3629. doi.org/10.3390/su15043629

- Lu, K., Jiang, X., Tam, V. W. Y., Li, M., Wang, H., Xia, B., & Chen, Q. (2019). Development of a carbon emissions analysis framework using building information modeling and life cycle assessment for the construction of hospital projects. *Sustainability*, 11(22), 6274. doi.org/10.3390/su11226274
- Lu, M., & Lam, H. C. (2008). Critical path scheduling under resource calendar constraints. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 25–31. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:1(25)
- Lu, M., & Li, H. (2003). Resource-activity critical-path method for construction planning. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(4), 412–420. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:4(412)
- Lu, M., Lam, H. C., & Dai, F. (2008). Resource-constrained critical path analysis based on discrete event simulation and particle swarm optimization. *Automation in Construction*, 17(6), 670–681. doi.org/10.1016/j.autcon.2007.11.004
- Ma, L., Azari, R., & Elnimeiri, M. (2024). A building information modeling-based life cycle assessment of the embodied carbon and environmental impacts of high-rise building structures: A case study. *Sustainability*, 16(2), 569. doi.org/10.3390/su16020569
- Maronati, G., & Petrovic, B. (2019). Estimating cost uncertainties in nuclear power plant construction through Monte Carlo sampled correlated random variables. *Progress in*
- Marques, R. P., Hacon, D., Tessarollo, A., & Parise, J. A. R. (2010). Thermodynamic analysis of tri-generation systems taking into account refrigeration, heating and electricity load demands. *Energy and Buildings*, 42(12), 2323–2330. doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.026
- Najjar, M., Figueiredo, K., Palumbo, M., & Haddad, A. (2017). Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. *Journal of Building Engineering*, 14, 115–126. doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.10.005
- Nehasilová, M., Lupíšek, A., Coufalová, P. L., Kupsa, T., Veselka, J., Vlasatá, B., Železná, J., Kunová, P., & Volf, M. (2022). Rapid environmental assessment of buildings: Linking environmental and cost estimating databases. *Sustainability*, 14(17), 10928. doi.org/10.3390/su141710928
- Nguyen, H., Do, N., & Cheng, J. C. P. (2022). Simulating construction duration for multistory buildings with controlling activities. *Automation in Construction*, 137, 104241. doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104241
- Nguyen, L. D., Phan, D. H., & Tang, L. C. M. (2013). Simulating construction duration for multistory buildings with controlling activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(8), 951–959. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000677
- Nuclear Energy, 111, 211–222. doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.11.011

- Olivieri, H., Seppänen, O., & Granja, A. D. (2018). Improving workflow and resource usage in construction schedules through location-based management system (LBMS). *Construction Management and Economics*, 36(2), 109–124. doi.org/10.1080/01446193.2017.1410561
- Pan, L., Guo, Y., Yan, Q., & Shi, W. (2024). Modelling of regional heating and cooling load in the context of carbon neutrality. *Journal of Building Engineering*, 85, 108724. doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108724
- Parajuli, R., Knudsen, M. T., Birkved, M., Djomo, S. N., Corona, A., & Dalgaard, T. (2017). Environmental impacts of producing bioethanol and biobased lactic acid from standalone and integrated biorefineries using a consequential and an attributional life cycle assessment approach. *Science of the Total Environment*, 598, 497–512. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.087
- Parsons, S., Poyntz-Wright, O., Kent, A., & McManus, M. C. (2019). Green chemistry for stainless steel corrosion resistance: Life cycle assessment of citric acid versus nitric acid passivation. *Materials Today Sustainability*, 3–4, 100005. doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.01.001
- Phillips, R., Troup, L., Fannon, D., & Eckelman, M. J. (2020). Triple bottom line sustainability assessment of window-to-wall ratio in US office buildings. *Building and Environment*, 182, 107057. doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107057
- Pino-Mejías, R., Pérez-Fargallo, A., Rubio-Bellido, C., & Pulido-Arcas, J. A. (2017). Comparison of linear regression and artificial neural networks models to predict heating and cooling energy demand, energy consumption and CO2 emissions. *Energy*, 118, 24–36. doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.022
- Ponz-Tienda, J. L., Pellicer, E., & Yepes, V. (2012). Complete fuzzy scheduling and fuzzy earned value management in construction projects. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 13(1), 56–68. doi.org/10.1631/jzus.A1100160
- Proaño-Narváez, M., Flores-Vázquez, C., Vázquez Quiroz, P., & Avila-Calle, M. (2022). Earned value method (EVM) for construction projects: Current application and future projections. *Buildings*, 12(3), 301. doi.org/10.3390/buildings12030301
- Qurraie, B. S., & Sertyamaç, R. (2023). Investigation of energy performance of nanotechnological material and double-skin facade system in office buildings in Türkiye. *Intelligent Buildings International*, 15(6), 251–265. doi.org/10.1080/17508975.2024.2310059
- Rahimpour, Z., Faccani, A., Azuatalam, D., Chapman, A., & Verbič, G. (2017). Using thermal inertia of buildings with phase change material for demand response. *Energy Procedia*, 121, 102–109. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.483
- Raposo, C., Rodrigues, F., & Rodrigues, H. (2019). BIM-based LCA assessment of seismic strengthening solutions for reinforced concrete precast industrial buildings. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4, 51. doi.org/10.1007/s41062-019-0239-7

- Rezaei, F., Bulle, C., & Lesage, P. (2019). Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages. *Building and Environment*, 153, 158–167. doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.034
- Rosado, P. J., & Levinson, R. (2019). Potential benefits of cool walls on residential and commercial buildings across California and the United States: Conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy & Buildings*, 199, 588–607. doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.028
- Sakka, F., & El-Sayegh, S. (2024). Float consumption impact on cost and schedule in the construction industry. *Construction Management and Economics*. doi.org/10.1080/01446193.2024.0000000
- Sameer, H., & Bringezu, S. (2021). Building information modelling application of material, water, and climate footprint analysis. *Building Research & Information*, 49(6), 593–612. doi.org/10.1080/09613218.2020.1864266
- Saxegård, S. A., Wikström, F., & Williams, H. (2025). Applying material flow assessment-based system expansion with multiple functions to solve for multifunctionality of recycling in life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(2), 355–370. doi.org/10.1007/s11367-024-02364-0
- Schaubroeck, T. (2023). Relevance of attributional and consequential life cycle assessment for society and decision support. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1063583. doi.org/10.3389/frsus.2023.1063583
- Schaubroeck, T., Schaubroeck, S., Heijungs, R., Zamagni, A., Brandão, M., & Benetto, E. (2021). Attributional & consequential life cycle assessment: Definitions, conceptual characteristics and modelling restrictions. *Sustainability*, 13(13), 7386. doi.org/10.3390/su13137386
- Schaubroeck, T., Schrijvers, D., Schaubroeck, S., Moretti, C., Zamagni, A., Pelletier, N., Huppes, G., & Brandão, M. (2022). Definition of product system and solving multifunctionality in ISO 14040–14044: Inconsistencies and proposed amendments—Toward a more open and general LCA framework. *Frontiers in Sustainability*, 3, 778100. doi.org/10.3389/frsus.2022.778100
- Shin, K., Kim, J., Hwang, Y. W., Kim, B. C., & Kim, D. H. (2025). LCA-based environmental benefit allocation between steel and cement industries in steel byproduct recycling. *Environmental Engineering Research*, 30(1), 240032. doi.org/10.4491/eer.2024.032
- Skitmore, M., & Ng, S. T. (2003). Forecast models for actual construction time and cost. *Building and Environment*, 38(8), 1075–1083. doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00035-X
- Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., & Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, 82–103. doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042

- Soimakallio, S., Kiviluoma, J., & Saikku, L. (2011). The complexity and challenges of determining GHG emissions from grid electricity consumption and conservation in LCA: A methodological review. *Energy*, 36(11), 6705–6713. doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.028
- Su, J., Zhang, Y., Wang, Y., & Li, Z. (2020). Project duration estimation using fuzzy weighted regression model with parameter uncertainty. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1), 04019094. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001723
- Suh, S., & Yang, Y. (2014). On the uncanny capabilities of consequential LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(6), 1179–1184. doi.org/10.1007/s11367-014-0739-9
- Tang, L., Liu, H., & Huang, X. (2021). Bayesian analysis for tolerance limits in project control. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(2), 04020154. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001977
- Teng, Y., Xu, J., Pan, W., & Zhang, Y. (2022). A systematic review of the integration of building information modeling into life cycle assessment. *Building and Environment*, 221, 109260. doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109260
- Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., Zhang, G., & Maqsood, T. (2021). An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125622. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125622
- Tushar, Q., Zhang, G., Bhuiyan, M. A., Navaratnam, S., Giustozzi, F., & Hou, L. (2022). Retrofit of building façade using precast sandwich panel: An integrated thermal and environmental assessment on BIM-based LCA. *Buildings*, 12(12), 2098. doi.org/10.3390/buildings12122098
- Wang, J., Wei, J., Liu, Z., Huang, C., & Du, X. (2022). Life cycle assessment of building demolition waste based on building information modeling. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106095. doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106095
- Wang, L., Yu, H., & Li, H. (2021). Hybrid model of artificial neural network and genetic algorithm for project time–cost tradeoff optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(2), 04020066. doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000927
- Wu, Y., Jian, W., Yang, L., Zhang, T., & Liu, Y. (2021). Effects of different surface heat transfer coefficients on predicted heating and cooling loads towards sustainable building design. *Buildings*, 11(12), 609. doi.org/10.3390/buildings11120609
- Xuan, Q., Lao, J., Zhao, B., Li, G., Pei, G., Niu, J., & Dai, J.-G. (2024). Experimental and numerical investigation on energy-saving performance of radiative cooling coating for metal container office. *Energy & Buildings*, 310, 114084. doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114084

- Yang, Y., & Campbell, J. E. (2017). Improving attributional life cycle assessment for decision support: The case of local food in sustainable design. *Journal of Cleaner Production*, 145, 361–366. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.020
- Yeo, U.-H., Lee, S.-Y., Park, S.-J., Kim, J.-G., Cho, J.-H., Decano-Valentin, C., Kim, R.-W., & Lee, I.-B. (2022). Rooftop greenhouse: (2) Analysis of thermal energy loads of a building-integrated rooftop greenhouse (BiRTG) for urban agriculture. *Agriculture*, 12(6), 787. doi.org/10.3390/agriculture12060787
- Yoon, Y., Seo, B., & Cho, S. (2023). Potential cooling energy savings of economizer control and artificial-neural-network-based air-handling unit discharge air temperature control for commercial building. *Buildings*, 13(5), 1174. doi.org/10.3390/buildings13051174
- Zahabi, N., Gu, H., Gong, M., & Blackadar, J. (2025). A comparative whole-building life cycle assessment of the four framing systems of the Bakers Place Building using the Tally LCA tool. *Buildings*, 15(7), 1192. doi.org/10.3390/buildings15071192
- Zhang, H., Tam, C. M., Li, H., & Shen, L. Y. (2007). Building a knowledge-based system for project scheduling. *Automation in Construction*, 17(3), 341–355. doi.org/10.1016/j.autcon.2007.05.012
- Zhang, Q., Yang, Z., Li, N., Feng, R., & Gao, Y. (2018). The influence of building using function on the operating characteristics of the gas engine driven heat pump with energy storage system (ESGEHPs). *Energy & Buildings*, 167, 136–151. doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.039
- Zhang, Y., Wang, G., & Wang, L. (2015). Simulation-based optimization framework for resource-constrained project scheduling problems. *Science China Technological Sciences*, 58, 694–703. doi.org/10.1007/s11431-015-5859-3
- Zhao, X., Hwang, B. G., & Yu, G. (2013). Developing a fuzzy model for project schedule risk assessment: A case study of a subway construction project. *Automation in Construction*, 29, 100–111. doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.004
- Zhao, X., Ma, T., Shen, L., & Liu, L. (2019). Early prediction of project completion time using performance data from early stages of construction. *Automation in Construction*, 99, 163–174. doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.029
- Zhao, Z., Lin, Y.-F., Stumpf, A., & Wang, X. (2023). Improving LEED-certified building loads on borehole heat exchangers by coupling subsurface variables. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120119. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120119
- Zhou, J., AbouRizk, S., & Al-Battineh, H. (2009). Optimizing multiple project scheduling with critical chain concepts. *Automation in Construction*, 18(4), 580–588. doi.org/10.1016/j.autcon.2008.11.008
- Zhou, W., Zhang, J., Wang, Z., & Xu, Q. (2021). Clustering-based project duration prediction model using K-means and machine learning algorithms. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(5), 1393–1410. doi.org/10.1108/ECAM-08-2020-0656

Zhou, Y., Liu, Y., Wang, D., & Liu, X. (2021). Comparison of machine-learning models for predicting short-term building heating load using operational parameters. *Energy and Buildings*, 253, 111505. doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111505



ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Yaşar Rukiye Kısacık Anadolu İmam Hatip Lisesi'nde tamamlamıştır. Lisans eğitimini Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Lisansüstü çalışmalarını Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde sürdürmüştür. Akademik geçmişinin yanı sıra, orta düzeyde İngilizce konuşmaktadır.

