

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

MEVCUT KAMU BİNALARINDA VERİYE DAYALI SÜRDÜRÜLEBİLİR
ENERJİ OPTİMİZASYONU: ANKARA ÜNİVERSİTESİ BEŞEVLER
YERLEŞKESİ ÖRNEĞİ

Sinan GÜNEŞ

GAYRİMENKUL GELİŞTİRME VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2025

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

MEVCUT KAMU BİNALARINDA VERİYE DAYALI SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ OPTİMİZASYONU: ANKARA ÜNİVERSİTESİ BEŞEVLER YERLEŞKESİ ÖRNEĞİ

Sinan GÜNEŞ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa TOMBUL

İklim değişikliği ile mücadelede bina sektörü küresel enerji tüketiminin %36'sını ve karbon emisyonlarının %39'unu oluşturarak kritik önem taşımaktadır. Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda mevcut kamu binalarının enerji verimli dönüşümü stratejik öncelik haline gelmiştir. Bu kapsamda araştırmada mevcut kamu binalarının enerji performansını optimize etmek amacıyla veri odaklı sürdürülebilir enerji yönetimi yaklaşımı geliştirilmesi hedeflenmektedir. Çalışma çerçevesinde Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'nde yer alan dört farklı işlevsel binadan (Rektörlük, Eczacılık Fakültesi, Fen Fakültesi, Şevket Aziz Kansu Binası) dört yıllık dönemde (2021-2024) toplanan 35.064 saatlik enerji tüketimi ve meteorolojik veri seti analiz edilmiştir. Metodoloji çerçevesinde beş farklı enerji tüketim tahmin modeli (LSTM, GRU, RF, SVR, ARIMA) kullanılarak saatlik enerji tüketimi tahminleri yapılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon sürecinde üç farklı baskınlık stratejisi geliştirilmiştir. Bunlar; (i) tüketim odaklı strateji (minimum enerji tüketimi hedefli), (ii) maliyet odaklı strateji (minimum maliyet hedefli) ve (iii) eşit önemli stratejidir. Optimizasyon modeli; dış cephe, pencere ve çatı sistemleri için dokuz farklı malzeme alternatifi ile 63 senaryo kombinasyonunu kapsamaktadır. Maliyet hesaplamalarında EU 244/2012 direktifine uygun yaşam döngüsü maliyet analizi kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, Random Forest modeli tüm bina türlerinde en tutarlı performansı sergilemektedir (Şevket Aziz Kansu binası için %3,00 MAPE). Derin öğrenme modelleri yüksek doğruluk sağlarken, hesaplama süreleri açısından dezavantajlı olmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon bulgularında, üç baskınlık stratejisinin tamamı Pareto optimal çözümler üretmiştir. Yapı elemanlarının sinerjik etkinlik analizi sonuçları; dış cephe yalıtımının %50-60, pencere sistemlerinin %25-30 ve çatı yalıtımının %15-20 oranında enerji tasarrufuna katkı sağladığını göstermektedir. Bina yaşının tahmin zorluğu üzerindeki sistematik etkisi kanıtlanmış, en yeni bina (11 yaş) %3,00 MAPE ile en kolay, en eski bina (78 yaş) %35-38 MAPE ile en zorlu tahmin performansını sergilemiştir. Yaşam döngüsü maliyet analizinde dengeli stratejinin 12-15 yıllık geri ödeme süresi ile optimal yatırım seçeneği olduğu tespit edilmiştir. Sürdürülebilir yerleşimler ve gayrimenkul proje geliştirme ve yönetimi yönlerinden yapıları çevrede enerji kullanımı ve optimizasyonun özel önem taşıdığı vurgulanmalıdır.

Ağustos 2025, 201 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapılı çevre, kamu binaları, enerji optimizasyonu, sürdürülebilirlik, çok amaçlı optimizasyon, makine öğrenmesi, yaşam döngüsü maliyeti

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DATA-DRIVEN SUSTAINABLE ENERGY OPTIMIZATION IN EXISTING PUBLIC BUILDINGS: THE EXAMPLE OF ANKARA UNİVERSITY BEŞEVLER CAMPUS

Sinan GÜNEŞ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Real Estate Development and Management

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa TOMBUL

The building sector holds critical importance in combating climate change, accounting for 36% of global energy consumption and 39% of carbon emissions. In alignment with Türkiye's 2053 net-zero emission target, the energy-efficient transformation of existing public buildings has become a strategic priority. Within this context, this research aims to develop a data-driven sustainable energy management approach to optimize the energy performance of existing public buildings. The study analyzes a dataset comprising 35,064 hours of energy consumption and meteorological data collected over a four-year period (2021-2024) from four functionally distinct buildings (Rectorate, Faculty of Pharmacy, Faculty of Science, and Şevket Aziz Kansu Building) located at Ankara University Beşevler Campus. Within the methodological framework, hourly energy consumption predictions were conducted using five different energy consumption prediction models (LSTM, GRU, RF, SVR, ARIMA). Three different dominance strategies were developed in the multi-objective optimization process: consumption-focused strategy (targeting minimum energy consumption), cost-focused strategy (targeting minimum cost), and balanced strategy (employing IDOCRIW hybrid weighting methodology). The optimization model encompasses 63 scenario combinations with nine different material alternatives for exterior facade, window, and roof systems. Life cycle cost analysis compliant with EU 244/2012 directive was employed for cost calculations. According to the analysis results, the Random Forest model demonstrates the most consistent performance across all building types (3.00% MAPE for Şevket Aziz Kansu building). While deep learning models provide high accuracy, they prove disadvantageous in terms of computational time. Multi-objective optimization findings reveal that all three dominance strategies produce Pareto optimal solutions. Synergistic effectiveness analysis of building elements indicates that exterior facade insulation contributes 50-60%, window systems 25-30%, and roof insulation 15-20% to energy savings. The systematic effect of building age on prediction difficulty has been demonstrated, with the newest building (11 years) exhibiting the most manageable prediction performance at 3.00% MAPE, while the oldest building (78 years) presents the most challenging prediction performance at 35-38% MAPE. Life cycle cost analysis identifies the balanced strategy as the optimal investment option with a payback period of 12-15 years. It should be emphasised that energy usage and optimisation in the built environment hold particular importance in terms of sustainable settlements and property project development and management.

August 2025, 201 pages

Keywords: Built environment, public buildings, energy optimization, sustainability, multi-objective optimization, machine life cycle cost

TEŞEKKÜR

Tez sürecinin başlangıcından sonuna kadar tüm aşamalarında yol gösteren, destekleyen ve emeğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Mustafa TOMBUL'a (Ankara Üniversitesi, Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Bölümü) teşekkür ederim. Akademik özgüven kazanmamda ve çalışmamın yönünü belirlememde katkıları belirleyicidir. Doktora ders döneminde verdiği Derin Öğrenme dersiyle çalışmamın temel yönelimine katkı sağlayan tez izleme komitesi üyem Doç. Dr. Hacer YALIM KELEŞ'e (Hacettepe Üniversitesi, Bilgisayar Anabilim Dalı) ve optimizasyon aşamasındaki bilimsel katkılarıyla çalışmamın niteliğini artıran Prof. Dr. Özlem TÜRKŞEN'e (Ankara Üniversitesi, İstatistik Anabilim Dalı) teşekkür ederim. Tez izleme komitesi üyem Prof. Dr. Harun TANRIVERMİŞ'e (Ankara Üniversitesi) mesleki desteği ve veri temini ile yurt dışı araştırma olanaklarını sağladığı için ayrıca minnettarım. Yapıcı geri bildirimleriyle çalışmayı geliştiren Doç. Dr. Aylin ADEM'e (Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü) teşekkür ederim. Çalışma ortamında yükümü hafifleterek tezime odaklanmamı sağlayan Prof. Dr. Yeşim TANRIVERMİŞ'e teşekkür borçluyum. Almanya'daki araştırmalarım sırasında bilgi ve deneyimleriyle katkı sağlayan Prof. Dr. Tobias JUST'a (Regensburg Üniversitesi) en derin teşekkürlerimi sunarım. Süreç boyunca yanımda olan ve desteğini esirgemeyen mesai arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Esra KESKİN'e, Arş. Gör. Emine BAYDAN'a ve Yük. Müh. Buket ÜLGER'e teşekkür ederim. Tez çalışmam Ankara Üniversitesi Öncelikli Alanlar Doktora Tezi Bilimsel Araştırma Projesi (SDK-2024-3567) kapsamında ve TÜBİTAK 2211-C (2023/2, 1649B032309993) bursuyla desteklenmiştir; her iki kuruma da teşekkür ederim.

Beni her zaman güçlü kılan, sabrı ve sevgisiyle yanımda olan hayat arkadaşım Arş. Gör. Dr. Gülnaz ŞENGÜL GÜNEŞ'e; hayatıma anlam katan oğlum Mustafa Mert GÜNEŞ'e ve üzerimde büyük emeği olan annem Susam DEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım. İki yıl önce kaybettiğim dedem Bekir GÜNEŞ'i sevgi ve özlemle anıyorum. Bana kazandırdığı değerler yol göstericim olmaya devam etmektedir.

Sinan GÜNEŞ
Ankara, Ağustos 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Araştırmanın Önemi.....	1
1.2 Araştırmanın Amacı ve Problemin Tanımı	12
1.3 Araştırmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları	14
1.4 Araştırma Soruları ve Hipotezler	15
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE KURAMSAL TEMELLER.....	21
2.1 Mevcut Binalarda Enerji Tüketimi Tahmini	21
2.1.1 Enerji tüketimi tahmininde kullanılan değişkenler	24
2.1.2 Enerji tüketimi tahmininde kullanılan yöntemler	26
2.1.3 Performans değerlendirme ölçütleri	32
2.1.4 Tahmin yöntemleri ve karşılaştırmalı değerlendirme	34
2.2 Maliyet Etkin Çok Amaçlı Optimizasyon	36
2.2.1 Çok amaçlı optimizasyon ve temel kavramlar	37
2.2.2 Karar değişkenleri	40
2.2.3 Amaç fonksiyonları.....	46
2.2.4 Çok amaçlı optimizasyonda baskınlık stratejileri ve ağırlıklandırma yaklaşımları.....	51
2.3 Bina Enerji Tüketimi Tahmin ve Optimizasyon Çalışmalarının Sistematik Analizi	54
3. VERİYE DAYALI MODELLEME VE OPTİMİZASYON	59
3.1 Veriye Dayalı Karar Süreci.....	60
3.2 Veriye Dayalı Modelleme	77
3.3 Veriye Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon	98
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	101

4.1 Enerji Tüketimi Tahmin Modellerinin Performans Sonuçları.....	102
4.2 Bina Türüne Göre Model Performans Ölçümleri.....	109
4.3 Zaman Çözünürlüğünün Enerji Tüketim Tahmin Modellerine Etkisi	110
4.4 Çok Amaçlı Optimizasyon Sonuçları	117
4.4.1 Üç farklı baskınlık stratejisi genel sonuçları	132
4.4.2 Pareto-optimal çözüm kümesi analizi	157
4.4.3 Enerji-maliyet optimum derin yenileme stratejileri	161
4.4.4 Farklı bina türleri için optimum çözümler	167
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	175
KAYNAKLAR	185
ÖZGEÇMİŞ.....	198

SİMGELER DİZİNİ

°C	: Santigrad Derece
CO ₂	: Karbondioksit
EJ	: Exajoule
λ	: Lambda – Isı İletkenlik Katsayısı
\$	: Amerikan Doları
MTEP	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
MWh	: Mega-watt saat

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AYM	Avrupa Yeşil Mutabakatı
BM	Birleşmiş Milletler
CNN	Convolutional Neural Networks
CO-EPL	Cost-Optimal Energy Performance Level
COP	Verimlilik Katsayısı
CV-RMSE	Coefficient of Variance of Root Mean Squarre Error
ÇSY	Çevresel, Sosyal, Yönetişim
DNN	Deep Neural Network
DPP	İskonto Edilmiş Geri Ödeme Süresi (Discounted Payback Period)
EE	Embodied Energy
EnYS	Enerji Yönetim Sistemi
EP	Primary Energy
EPBD	Bina Enerji Performansı Direktifi (Energy Performance of Buildings Directive)
EPS	Expanded Polystyrene
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EUI	Enerji Kullanım Yoğunluğu (Energy Use Intensity)
EV	Enerji Verimliliği

GA	Genetik Algoritma
GAN	Üretici Çekişmeli Ağlar (Generative Adversarial Networks)
GBPN	Global Building Performance Network
GPU	Grafik İşlem Birimi (Graphics Processing Unit)
GRU	Gated Recurrent Unit
GSYİH	Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
IMF	Uluslararası Para Fonu (International Monetary Fund)
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
IQR	Interquartile Range
ISO	International Organisation of Standardisation
İVO	İç Verim Oranı
KGF	Kredi Garanti Fonu
k-NN	k En Yakın Komşular (k-Nearest Neighbors)
KPI	Key Performance Indicators
LSTM	Long Short-Term Memory
LTLF	Uzun Vadeli Yük Tahmini (Long-Term Load Forecasting)
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimisation
MOO	Çok Amaçlı Optimizasyon (Multi-Objective Optimisation)
MRE	Mean Relative Error
MSE	Mean Squared Error
MTLF	Orta Vadeli Yük Tahmini (Mid-Term Load Forecasting)
NBD	Net Bugünkü Değer
NBME	Normalised Mean Bias Error
NDC	Ulusal Katkı Beyanı (National Declaration of Contrubiton)
NRMSE	Normalised Root Mean Square Error
NPV	Net Present Value
NSDE	Non-Dominated Sorting Differantial Evolution
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
nZEB	nearly Zero Energy Building

NZEB	Net Zero Energy Building
PI	Performance Index
PV	Fotovoltaik (Photovoltaic)
PVC	Polyvinyl Chloride
R ²	Coefficient of Determination
RF	Random Forest
RMSE	Root Mean Square Error
RNN	Recurrent Neural Networks
RT	Regression Tree
SDS	Sustainable Development Scenario
SKA	Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient
STLF	Kısa Vadeli Yük Tahmini (Short-Term Load Forecasting)
SVR	Support Vector Regression
TC	Türkiye Cumhuriyeti
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
UEVEP	Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı
WWR	Pencere-Duvar Oranı (Window-Wall Ratio)
XPS	Extruded Polystyrene
YDA	Yaşam Döngüsü Analizi
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YDM	Yaşam Döngüsü Maliyeti

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Enerji tüketimi tahmininde uygulama seviyesi.....	22
Şekil 2.2 İki amaç fonksiyonu için olabilecek dört farklı durumda elde edilen Pareto yüzeyler.....	38
Şekil 2.3 $\min f_1, f_2$ problemi için ideal çözüm (Z^*), optimal çözümler (Z^{*1} ve Z^{*2}), ütöpik çözüm (Z^{**}) ve nadir çözüm (Z^{nad})	39
Şekil 2.4 Yıllara göre yayın sayısı ve atıf dağılımı	56
Şekil 3.1 Araştırmanın akış şeması	60
Şekil 3.2 nZEB konsepti	66
Şekil 3.3 Binalarda enerji tüketim alanları ve sistemlerin ilişkileri	69
Şekil 3.4 YDD aşamaları ve içerikleri (ISO 14040)	70
Şekil 3.5 Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi Vaziyet Planı.....	78
Şekil 3.6 Saatlik enerji tüketim kalıpları.....	85
Şekil 3.7 Meteorolojik değişkenlerin günlük döngüsü	86
Şekil 3.8 Binalara göre enerji tüketimi ve meteorolojik veriler arasındaki korelasyon..	87
Şekil 4.1 Maliyet-optimal hesaplama yöntemi	125
Şekil 4.2 Çok amaçlı optimizasyon akış şeması	126
Şekil 4.3 Üç farklı baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı sonuçları	136
Şekil 4.4 Pareto etkinlik analizi ve üç baskınlık stratejisinin optimal konum doğrulaması.....	138
Şekil 4.5 Rektörlük binası 2025-2030 yılları Pareto optimizasyon analizi.....	147
Şekil 4.6 Fen Fakültesi B Blok binası 2025-2030 yılları Pareto optimizasyon analizi	151
Şekil 4.7 Şevket Aziz Kansu binası 2025-2030 yılları Pareto optimizasyon analizi	155

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Kampüs ve bina ölçeklerinin karşılaştırmalı analizi	23
Çizelge 2.2 Enerji tüketimi tahmininde kullanılan değişkenler	25
Çizelge 2.3 Enerji tüketimi tahmin modellerinde kullanılan performans değerlendirme ölçütleri	33
Çizelge 2.4 Binalarda enerji tüketiminde tahmin tekniklerinin karşılaştırılması.....	35
Çizelge 2.5 Sistemik literatür taraması seçim aşamaları sonuçları	55
Çizelge 3.1 Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi bina listesi	79
Çizelge 3.2 Araştırma alanındaki binaların fiziksel özellikleri.....	81
Çizelge 3.3 Temin edilen veri türleri ile veri kaynakları	83
Çizelge 3.4 Veri setinin tanımlayıcı istatistikleri	84
Çizelge 3.5 Malzeme alternatifleri ile senaryoların hazırlanması.....	91
Çizelge 3.6 Binalarda enerji tüketiminde tahmin tekniklerinin karşılaştırılması.....	97
Çizelge 3.7 Stratejilere göre senaryo seçimi	99
Çizelge 4.1 LSTM modeli deneysel konfigürasyonu.....	103
Çizelge 4.2 LSTM model performans sonuçları – tüm binalar.....	104
Çizelge 4.3 GRU model deneysel konfigürasyonu	104
Çizelge 4.4 GRU model performans sonuçları – tüm binalar.....	105
Çizelge 4.5 Random Forest ensemble deneysel konfigürasyonu.....	105
Çizelge 4.6 Random Forest model performans sonuçları – tüm binalar.....	106
Çizelge 4.7 SVR model deneysel konfigürasyonu.....	106
Çizelge 4.8 SVR model performans sonuçları – tüm binalar.....	107
Çizelge 4.9 ARIMA model deneysel konfigürasyonu	107
Çizelge 4.10 ARIMA model performans sonuçları – tüm binalar	108
Çizelge 4.11 Tüm modellerin karşılaştırmalı performans özeti.....	108
Çizelge 4.12 Saatlik tahminlerde model performans karşılaştırması.....	111
Çizelge 4.13 Saatlik zaman çözünürlüğü performans sonuçları	112
Çizelge 4.14 Günlük çözünürlük model konfigürasyonları	112
Çizelge 4.15 Günlük zaman çözünürlüğü performans sonuçları	113
Çizelge 4.16 Haftalık çözünürlük model konfigürasyonları	113
Çizelge 4.17 Haftalık zaman çözünürlüğü performans sonuçları	114
Çizelge 4.18 Binaların yıllık bazda tahmin edilen elektrik tüketimi miktarları.....	118
Çizelge 4.19 Bina yıllık ısı enerjisi ihtiyacı temel modeli	119

Çizelge 4.20 Alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri.....	120
Çizelge 4.21 Proje değerlemesinde kullanılan döviz kuru tahminleri	122
Çizelge 4.22 Seçilen alternatiflerin 2025 yılı malzeme birim fiyatları.....	123
Çizelge 4.23 Seçilen alternatiflerin amortisman oranları.....	124
Çizelge 4.24 Sistem ve kütüphane bilgileri.....	131
Çizelge 4.25 Analizde kullanılan bina elemanları ve malzeme seçenekleri	133
Çizelge 4.26 Üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları	135
Çizelge 4.27 Üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca yıllık değişim oranları	139
Çizelge 4.28 Rektörlük binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri	144
Çizelge 4.29 Rektörlük binası üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları	146
Çizelge 4.30 Fen Fakültesi B Blok binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri	148
Çizelge 4.31 Fen Fakültesi B Blok binası üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları	150
Çizelge 4.32 Şevket Aziz Kansu binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri	152
Çizelge 4.33 Şevket Aziz Kansu binası üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları	154

1. GİRİŞ

1.1 Araştırmanın Önemi

Çevre kalitesi ve sorunları, ulusal sınırları aşarak küresel kamu malı niteliğine dönüşmüş ve çevre sorunları ile etkin mücadelenin de aynı yaklaşımla hem küresel hem de ulusal düzeylerde ele alınması gerekli olmaktadır. Bunların başında gelen iklim değişikliği, çağın en önemli küresel sorunlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu küresel sorun, sınır tanımaksızın ve ülkelerin gelişmişlik düzeyinden bağımsız olarak tüm ulusları etkilediği bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur (Anonim 2025a). Dünya Meteoroloji Örgütü ile Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Ofisi'nin raporuna göre, 1970-2019 yılları arasında yaşanan afetlerin yarısı hava, iklim ve su kaynaklıdır. Küresel olarak, bu dönemde 11.000 afet bildirilmiş, bu afetler sonucunda 2 milyon insan hayatını kaybetmiş ve 3,64 trilyon ABD Doları ekonomik kayıp yaşanmıştır (Anonymous 2021a).

İklim değişikliğinin giderek artan bir tehdit oluşturduğu ve insanlık için ciddi riskler taşıdığı bilimsel olarak kanıtlanmıştır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) yayımladığı raporlar, iklim değişikliğinin insanlık için “kırmızı alarm” seviyesinde olduğunu vurgulamaktadır. Her yıl yayımlanan BM Çevre Programı Emisyon Açığı Raporu ise, mevcut mücadele stratejileriyle küresel sıcaklığın yüzyıl sonunda 2,8 santigrat derece artacağını öngörmekte; ancak Ulusal Katkı Beyanları'nın (Nationally Determined Contribution – NDC) uygulanması durumunda bu artışın sırasıyla 2,6 ve 2,4 santigrat derece olacağını belirtmektedir (Anonymous 2023a).

İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında, düşük karbonlu ekonomiye geçişin küresel ölçekte gerçekleştirilmesi, yaşam tarzlarının, üretim ve imalat yöntemlerinin derinlemesine değişeceği büyük bir dönüşüm gerektirmektedir. Bu nedenle, iklim değişikliğiyle mücadele ve uyum çabalarının sadece bir çevre sorunu olarak değil, aynı zamanda ülkelerin büyüme stratejileri, enerji politikaları, sağlık ve tarımla ilgili programları, su kaynaklarının kullanımı ve gıda güvenliği gibi alanları doğrudan etkileyecek ve bu alanlardaki gelişmelerde belirleyici olabilecek önemli bir rolü

bulunmaktadır. Bu hedeflere ulaşabilmek için, gelişmiş ülkelerin finansman, teknoloji transferi ve kapasite geliştirmeye yönelik taahhütlerini yerine getirmeleri gerekmektedir.

Uluslararası düzeyde iklim değişikliği ile mücadele çabalarının merkezinde Birleşmiş Milletler'in 2015 yılında kabul ettiği 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi'nde belirlenen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) yer almaktadır. Bu gündem, gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkelerin ortak bir küresel iş birliği içinde harekete geçmesi için bir çağrı niteliği taşımaktadır. Belirlenen on yedi SKA, bu çağrının merkezine yerleştirilmiştir. Bu hedefler aracılığıyla üye ülkeler, yoksulluğun ve diğer dezavantajlı durumların sona erdirilmesi, iklim değişikliği ile mücadele ederken okyanuslar ve ormanlar gibi doğal kaynakların korunması, sağlık ve eğitim alanlarında iyileştirmeler yapılması, eşitsizliklerin azaltılması ve ekonomik büyümenin teşvik edilmesi gibi stratejileri benimsemektedirler. Böylelikle küresel düzeyde ortak bir vizyon etrafında birleşilerek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması hedeflenmektedir.

İklim değişikliği ile mücadele kapsamında Türkiye'nin uyum sürecinde bulunduğu Avrupa Birliği'nin (AB), Paris İklim Anlaşması gerekliliklerini karşılamak üzere yeşil bir dönüşüm sürecine odaklanan yol haritası, Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) ile belirlenmiştir. 11 Aralık 2019 tarihinde duyurulan AYM, AB'nin 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarını net olarak sıfırlayarak dünyanın ilk iklim-nötr kıtası haline gelmeyi amaçlayan yeni bir büyüme stratejisidir. AYM'nin kabulünü izleyen süreçte; enerji sistemlerinin karbonsuzlaştırılması, sürdürülebilir ve akıllı ulaşım sistemlerinin tesisi, döngüsel ekonomi, ticaret, sanayi, sürdürülebilir tarım ve gıda tedariki ile biyo-çeşitliliğin korunması gibi alanlarda sektörel düzeyde muhtelif stratejiler, politika değişiklikleri ve yasal düzenlemelerin yapılması gerekli olmuştur (Anonim 2025b).

AB sera gazı emisyonlarının %75'inden fazlasından sorumlu olan enerji sisteminin karbonsuzlaştırılması, AYM kapsamında öngörülen dönüşümün temel unsurlarından biridir. AYM hedefleri doğrultusunda AB; güvenilir ve düşük maliyetli enerji arzının sağlanmasını, tamamen entegre, bağlantılı ve dijital bir enerji piyasasının geliştirilmesini ve enerji verimliliğinin artırılmasını önceliklendirmektedir. Bu çerçevede, binalarda enerji performansının iyileştirilmesi ve büyük ölçüde yenilenebilir kaynaklara dayalı bir

elektrik sistemi oluşturulması hedeflenmektedir. AYM'nin uygulanmasına katkıda bulunmak üzere günümüze kadar, Enerji Sistemleri Entegrasyon Stratejisi, Hidrojen Stratejisi, bina sektörü için Yenileme Dalgası (Renovasyon) Stratejisi, Metan Stratejisi, Açık Deniz (Offshore) Yenilenebilir Enerji Stratejisi gibi önemli politika belgeleri yayınlanmıştır.

Türkiye de AB ülkeleri gibi iklim değişikliğinin küresel çapta ciddi ve çok yönlü sonuçlara yol açabilecek bir sorun olduğunun bilincindedir. Çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla değerlendirildiğinde, bu sorun gelecek nesillerin yaşam koşullarını tehdit eden en kritik küresel sınamalardan biri olarak öne çıkmaktadır. İklim değişikliği yalnızca ekosistemlerin dengesini bozmakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik istikrarı zayıflatmakta ve toplumsal refahı olumsuz yönde etkilemektedir. Söz konusu nedenlerle Türkiye, iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarını azaltma ve uluslararası düzeydeki iş birliğinin önemini vurgulama amacıyla “Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi”ni hazırlamıştır. Hazırlanan strateji, kısa, orta ve uzun vadeli hedeflerin yanı sıra ulusal ve uluslararası gelişmelere göre güncellenebilecek esnek bir yapıyı içermektedir.

Türkiye'nin iklim değişikliği ile mücadele vizyonu, kalkınma politikalarıyla sıkı bir şekilde entegre edilmiş, enerji verimliliğinin teşvik edildiği, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttığı, yüksek yaşam kalitesi ve refahın düşük karbon yoğunluğu ile her vatandaşa sunulduğu bir vizyonu içermektedir. Bu vizyon, “ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar” prensibi ve Türkiye'nin özel şartlarına dayalı olarak küresel iklim değişikliği ile mücadele çabalarına katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda Türkiye iklim değişikliği etkilerinin azaltılması amacıyla çeşitli uluslararası dokümanlarda taraf olmuştur. Türkiye'nin taraf olduğu uluslararası sözleşmeler ve protokoller; 1990 Viyana Sözleşmesi, 1991 Montreal Protokolü, 2004 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Protokolü, 2009 Kyoto Protokolü ve 2016 Paris İklim Anlaşmasıdır.

İklim değişikliği ile mücadelede enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik, giderek artan öneme sahip olan iki anahtar kavramdır. Enerji verimliliği, enerji kaynaklarının daha

etkin ve azaltılmış bir şekilde kullanılmasıyla, enerji talebinin karşılanmasında daha az kaynak kullanımı ve çevresel etki ile daha fazla verim elde edilmesini sağlamaktadır. Binalar, sanayi ve ulaşım gibi alanlardaki enerji tüketiminin optimize edilmesi, enerji verimliliğinin en yaygın uygulama alanlarından biridir (Sağbaşı ve Başbuğ 2018). Öte yandan sürdürülebilirlik, mevcut nesillerin ihtiyaçlarını karşılarken gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurarak doğal kaynakları koruyan ve çevresel etkileri minimize eden bir yaklaşımı ifade etmektedir (Anonymous 1987). Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik, fosil yakıtlara dayalı enerji sistemlerinin dönüşümü, yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesi, enerji tüketim alışkanlıklarının değiştirilmesi gibi birçok önlemle desteklenmektedir. Bu bağlamda uluslararası enerji ajansları, akademik araştırma merkezleri, çevre ve sürdürülebilirlik alanında uzmanlaşmış üniversiteler ile çeşitli resmî kurumların yayınladığı raporlar ve araştırmalar, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik konusunda önemli bilgi kaynakları olarak değerlendirilmektedir.

Yapılı çevre ve özellikle gayrimenkul sektörü; konut, ofis, alışveriş merkezi, otel, sanayi tesisleri ve özellikle gayrimenkuller gibi farklı tür ve büyüklüklerdeki yapıların geliştirilmesi ve proje aşamasından başlayarak inşaat, satış, kiralama ve yönetim faaliyetleri de dahil olmak üzere gayrimenkulün bütün yaşam döngüsünü içeren bir süreci kapsamaktadır (Tanrıvermiş 2016). Sektör istihdam sağlaması, inşaat ve hizmet sektörlerine yönlendirdiği yatırımlar ve ekonominin diğer sektörleriyle olan bağlantıları nedeniyle ülke ekonomisine önemli katkılar sunmaktadır. Ancak gayrimenkul sektöründeki hızlı büyüme ve artan yapılaşma ile birlikte enerji tüketimi de iklim değişikliğine neden olan kentleşme sorunlarının arasında yerini almıştır. Yüksek enerji tüketimi, fosil yakıtlara dayalı enerji kaynaklarının yoğun kullanımına bağlı olarak sera gazı emisyonlarının ve çevresel etkilerin artmasına yol açmaktadır.

Gayrimenkul sektöründe enerji tüketiminin azaltılması ve enerji verimli dönüşüm kapsamında ulusal ölçekte hazırlanan On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028) ile enerji arzının sürekli, kaliteli, sürdürülebilir, güvenli ve katlanılabilir maliyetlerle sağlanması amaçlanmaktadır (Anonim 2023). Planda gayrimenkul sektöründe enerji verimliliği ile ilgili hedefler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- 297. Net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda iklim değişikliğiyle mücadelenin ekonomiye maliyetlerini en aza indirecek ve dijital dönüşümle birlikte yeşil dönüşümün getirdiği fırsatlardan azami düzeyde faydalanılmasını sağlayacak düzenlemeler hayata geçirilecektir.
- 300. Enerji ve madencilik sektöründe doğal kaynaklardan azami ölçüde faydalanılmasını sağlayacak yatırımlar, yeşil dönüşüm de dikkate alınarak hayata geçirilecektir. Doğal zenginliklerin ve enerji kaynaklarının atıl bırakılmayarak ekonomiye kazandırılması sağlanacaktır.
- 317. Başta enerji, ulaştırma, sanayi ve tarım sektörleri olmak üzere sürdürülebilir, düşük emisyonlu, dijital üretim teknikleriyle bütünleşik ve çevre dostu politikalar benimsenecek, net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda yeşil dönüşüme yönelik gerekli düzenlemeler hayata geçirilecektir.

Kalkınma Planına ek olarak Enerji Verimliliği Strateji Belgesi'nde de enerji verimliliği hedeflerine yer verilmektedir. Strateji belgesinde binaların enerji taleplerinin ve karbon emisyonlarının azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan sürdürülebilir çevre dostu binaların yaygınlaştırılması ile kamu kesiminde kullanılan tüm bina ve tesislerde enerjinin etkin ve verimli kullanılması hedeflenmektedir (Anonim 2012).

İklim değişikliği ile mücadelede gayrimenkul sektörünün rolü, enerji tüketimini azaltarak sera gazı emisyonlarını düşürmek, sürdürülebilir ve çevre dostu binaların yaygınlaşmasını teşvik etmek ve çevresel etkileri minimize ederek daha dirençli ve yeşil yapılar oluşturmak şeklinde tanımlanmaktadır (Güneş vd. 2023). Gayrimenkul sektörü, dünya genelinde önemli bir enerji tüketimi oluşturduğundan ve binaların enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkisi bulunduğundan, iklim değişikliği ile mücadelede potansiyel olarak büyük bir etkiye sahiptir (Anonymous 2022a, Anonymous 2023b). Gayrimenkul sektörünün özelinde iklim değişikliğine neden olan faktörler dört temel başlık altında ele alınabilmektedir. Bu başlıklar, fazla taban alanının kullanılması, binalardaki enerji yoğunluğu, enerji tüketiminin emisyon yoğunluğu ve inşaat kaynaklı somutlaştırılmış emisyonlar şeklinde sıralanabilmektedir (Anonymous 2022a, Anonymous 2022b).

Sürdürülebilir kalkınma amaçları doğrultusunda enerji verimliliği hedeflerinden biri de enerji yoğunluğunun iyileştirilmesi olarak gösterilmektedir (Anonymous 2024). SKA kapsamında birincil enerji ve gayrisafi yurt içi hasıla (GSYİH) cinsinden ölçülen enerji yoğunluğu ile hesaplanan küresel enerji verimliliği iyileştirme oranının 2030 yılına kadar iki katına çıkarılması hedeflenmektedir. 2010 – 2021 yılları arasındaki gelişmelere göre Türkiye, G20 ülkeleri arasında ortalama bir hız yakalamasına rağmen belirlenen hedeflerin gerisinde kalmıştır (Anonymous 2022c). Buna karşın son yıllarda yaşanan enerji yoğunluğunun iyileştirilmesi verisindeki artış umut vericidir.

Enerji yoğunluğu, enerji verimliliği düzeyinin ölçümünde kullanılan bir parametredir ve bu, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) Stratejik Planı, Öncelikli Dönüşüm Programı, Kalkınma Planları ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP) gibi çeşitli stratejik planlar ve programlar tarafından kabul edilmiştir. Enerji yoğunluğu, birim başına tüketilen enerji miktarını ifade etmekte ve genellikle 1.000 \$ GSYİH elde etmek için gereken enerji miktarı (ton eşdeğer petrol veya TEP) olarak tanımlanmaktadır. Bu değer ne kadar düşük olursa, enerjinin o kadar verimli kullanıldığı anlamına gelmektedir. Enerji yoğunluğu iyileştirmelerinde dünya ortalamasına göre bina ve sanayi sektörlerinde enerji verimliliği hızı yavaşlamaktadır. Buna karşılık, 1990 yılından itibaren Türkiye’de enerji yoğunluğunda yaklaşık %15 oranında bir azalma gerçekleşmiş olup, bu durum SKA kapsamında enerjiyle ilgili hedeflere ulaşma açısından olumlu bir eğilime işaret etmektedir (Anonymous 2023c).

Türkiye’nin enerji yoğunluğu son otuz yıl boyunca düşüş trendini korumuştur ve enerji yoğunluğu endeksinde 76,18 (TEP/GSYİH) değerine ulaşmıştır (Anonymous 2021b). Bu eğilim, teknoloji ve birim taban alanındaki artışa rağmen enerji talebinin yükselmesine karşın enerji yoğunluğunun düşük seviyede tutulduğunu göstermektedir. Bu da Türkiye’nin iklim değişikliği etkilerini azaltma konusundaki hassasiyetini yansıtmaktadır.

İklim değişikliğinin başta gelen sebeplerden biri de fosil yakıtlardan sağlanan enerji kaynaklarından salınan karbon emisyonlarıdır. 2019 yılı verilerine göre bina inşaatı ve inşaatla ilişkin diğer faaliyetler, gerek küresel nihai enerji kullanımında (%36), gerekse

enerji kullanımı nedeniyle ortaya çıkan karbon emisyonunda (%39) en büyük payı oluşturmaktadır (Anonymous 2020). Bu doğrultuda, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel çabalarda bina ve inşaat sektörü öncelikli müdahale alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, emisyonların azaltılması ve düşük karbonlu, sürdürülebilir bir yapıyı çevrenin oluşturulması amacıyla daha kapsamlı ve etkili politikalara ve uygulamalara ihtiyaç duyulmaktadır (Anonymous 2019).

Binalardaki nihai enerji kullanımı 2010 yılı itibariyle 118 EJ seviyesinde iken bu rakam 2019 yılında %8,50'lik artışla yaklaşık 128 EJ olarak hesaplanmıştır. Binalarda doğrudan enerji tüketimine neden olan alanların başında alan soğutma ve elektrik yüklü cihazlar gelmektedir. Elektrik kaynaklı enerji tüketimi, toplam bina enerji tüketiminin üçte birini oluştururken, fosil yakıt kullanımı da 2010 yılından bu yana marjinal olarak %0,7 oranında artış göstermiş ve toplam CO₂ emisyonu yaklaşık 3 GtCO₂ olarak tespit edilmiştir. Yukarı akım enerji üretimi kaynaklı dolaylı enerji tüketimleri de eklendiğinde binalar, 2019 yılında enerji kaynaklı küresel CO₂ emisyonlarının %28'inden sorumlu olmakta ve dolaylı enerji tüketimleri ile birlikte binaların toplam CO₂ emisyonları 10 GtCO₂ ile tarihsel olarak kaydedilen en yüksek seviyeye çıkmıştır (Anonymous 2021c).

2010 yılından bu yana bina sektöründe enerji kullanımını etkileyen değişkenlerin başında nüfus, taban alanı, daha fazla ev aletleri ve soğutma ekipmanları gibi enerji hizmeti talebi, iklim değişikliği ve bina inşaat teknikleri ile kullanım türü gelmekte iken bu enerji talebinin dengelenmesinde ise bina dış kabuğu, bina enerji sistemleri ile bileşenlerinin performanslarında yapılan iyileştirmeler etkin rol oynamaktadır. Bununla birlikte binalarda toplam enerji talebinin artmaya devam ettiği, talebin sınırlanması ve enerji yoğunluğunun azaltılması için verimlilik ve pasif tasarım stratejilerine yönelik daha fazla yatırım gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Anonymous 2020). Taban alanı ve nüfustaki genişleme, bina sektörünün enerji talebini artırmaya devam etmiş, buna karşın bina dış kabuğu ve sistemleri ise bu büyümeyi dengeleyecek seviyeye aynı oranda gelememiştir.

Binalarda enerji tüketimi nedeniyle fosil yakıt tüketimi ile birlikte çevreye yayılan karbon emisyonunun artması ve uygun maliyetli enerjiye ulaşımının zorlaşması, sürdürülebilir yapıyı çevrenin oluşmasının önündeki başlıca engeller olarak görülmektedir. Bu durumun

temel nedenleri küresel nüfustaki artış ve binaların kullanım alanlarının artması olarak gösterilebilir (Anonymous 2020).

Küresel bina sektöründe ısıtma, aydınlatma, yemek pişirme gibi talebi karşılamak için kullanılan yakıtlardan kaynaklı emisyonlara dolaylı kaynaklar ve elektrik üretimi hakimdir. 2018 yılında küresel bina sektörü emisyonları bir önceki yıla göre %2 oranında artarak yaklaşık 10 GtCO₂ olarak hesaplanmış ve bu değerle tarihsel olarak en yüksek seviyeye erişilmiştir. Bu büyüme taban alanındaki artışlardan ve halen fosil yakıtlardan üretilen elektrik enerjisi talebinden kaynaklanmaktadır (Anonymous 2019a).

Türkiye’de binalarda enerji verimliliğine ilişkin yasal düzenlemelerin gelişimi, uluslararası enerji politikalarındaki paradigma değişiminin ulusal yansıması olarak değerlendirilmektedir. Bu süreç 2007 yılında yürürlüğe giren 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ile sistemli bir çerçeve kazanmış, Türkiye’nin enerji bağımlılığını azaltma ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerini gerçekleştirme stratejisinin temel taşlarından birini oluşturmuştur. Kanunun çıkış noktası sadece AB uyum süreci değil, aynı zamanda ülkenin yaşadığı hızlı kentleşme ve ekonomik büyümenin enerji talebinde oluşturduğu dramatik artışla baş etme zorunluluğu olmuştur.

Binalarda enerji verimliliğini düzenleyen yasal çerçeve iki temel dönem üzerinden irdelenebilir. İlk dönem (2007-2017), temel yasal altyapının oluşturulduğu ve enerji verimliliğinin ulusal politika gündemindeki yerini aldığı dönemi temsil eder. Bu süreçte 2008 yılında yayımlanan Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ile Enerji Kimlik Belgesi sistemi kurulmuş, böylece binaların enerji performansları ilk kez ölçülebilir ve karşılaştırılabilir hale gelmiştir. Ancak söz konusu düzenlemelerin etkin biçimde uygulanabilmesi için kurumsal ve teknik altyapının oluşturulması zorunlu hâle gelmiş; bu kapsamda, 2010 yılında yayımlanan ilgili tebliğ ile enerji uzmanlarının yetiştirilmesi süreci sistematik ve düzenli bir yapıya kavuşturulmuştur.

İkinci dönem (2017 sonrası), enerji verimliliği hedeflerinin nicelleştirildiği ve uygulama odaklı stratejilerin ön plana çıktığı süreci karakterize etmektedir. 2012 yılında belirlenen %20’lik enerji yoğunluğu azaltma hedefi, 2017 tarihli Ulusal Enerji Verimliliği Eylem

Planı ile operasyonel hale getirilmiştir. Süreçte önemli olan sadece hedeflerin belirlenmesi değil, aynı zamanda bu hedeflere ulaşmak için gereken yatırımların finansal boyutunun da netleştirilmiş olmasıdır. 23,9 milyon ton eş değer petrol (MTEP) tasarruf için 10,9 milyar ABD Doları yatırım öngörülmüş, böylece enerji verimliliği ilk kez somut ekonomik parametrelerle planlama sürecine entegre edilmiştir.

Söz konusu gelişim sürecinde dikkat çeken diğer bir husus, kamu sektörünün dönüştürücü rolüdür. 2019 ve 2023 yıllarında yayımlanan Cumhurbaşkanlığı genelgeleri ile kamu binalarında belirlenen enerji tasarrufu hedefleri, kamunun enerji verimliliği alanında özel sektöre model olma amacını yansıtmıştır. Yaklaşık iki katına (%15'ten %30'a) çıkarılan hedef, sadece nicel bir artışın ötesinde, enerji verimliliğinin ulusal önceliklerdeki konumunun güçlendiğinin bir göstergesidir. Mevcut veriler bu yasal çerçevenin etkinliğini doğrulamaktadır. 2022 yılı itibarıyla enerji yoğunluğundaki %20,4'lük azalma hedeflerin üzerinde bir başarıyı temsil ederken, bu başarının kalıcı hale getirilmesi için bina stoku yenileme stratejilerinin önemi artmaktadır. 2024 yılında yayımlanan Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi, mevcut başarıların üzerine bina ederek, bina sektörünün Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşmasındaki kritik rolünü vurgulamaktadır.

Gelişim süreci enerji verimliliğinin Türkiye'de teknik bir konudan ziyade, ekonomik rekabet gücü, çevresel sürdürülebilirlik ve sosyal refah arasındaki entegrasyonu sağlayan stratejik bir politika alanına dönüşümünü göstermektedir. Bina sektörünün ulusal enerji tüketiminde %35-40'luk payı göz önüne alındığında, bu alandaki yasal düzenlemelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmadaki önemi açıkça ortadadır.

Türkiye'nin AB uyum süreciyle paralel seyreden yasal düzenlemelerinin arka planında, AB'nin enerji verimliliği alanındaki stratejik konseptinin belirleyici etkisi görülmektedir. 2010 yılında yeniden gözden geçirilen Binalarda Enerji Performansı Direktifi (2010/31/EU), sadece bir uyum parametresi olmaktan çıkıp Türkiye'nin ulusal enerji politikalarına rehberlik eden bir çerçeve haline gelmiştir. Bu direktifin getirdiği yaklaşık sıfır enerjili bina (nZEB) konsepti ve enerji yenileme stratejileri, Türkiye'nin uzun vadeli planlamasında kritik önem taşımaktadır.

Avrupa Birliği'nin 2021 yılında ilan ettiği AYM ve bunu takip eden Fit for 55 paketi, bina sektörünün dekarbonizasyon hedeflerinde köklü bir değişimi tetiklemiştir. AB'nin 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine göre %55 azaltma hedefi, bina sektörü için daha agresif hedefler belirlenmesini zorunlu kılmıştır. 2021/31/EU sayılı yeni Enerji Verimliliği Direktifi ile bina yenileme oranının yıllık %3'e çıkarılması ve 2050 yılına kadar sıfır emisyonlu bina stokunun oluşturulması hedefleri, Türkiye'nin politika oluşturma sürecini doğrudan etkilemektedir.

Takip edilen söz konusu uluslararası gelişmelere karşılık Türkiye'nin enerji verimliliği hedefleri de evrilen bir form sergilemektedir. 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi, bina sektörü için yıllık yenileme oranının %3-4'e çıkarılmasını gerektirmektedir ki bu da mevcut yasal çerçevenin güçlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. 2024 yılında geliştirilmeye başlanan Ulusal Bina Yenileme Stratejisi, AB direktifleriyle paralel hedefler belirlemekle kalmayıp, iklim bölgelerine özgü çözümlerin adaptasyonunu da amaçlamaktadır.

Binalarda enerji verimliliğinin ulusal politikalara entegrasyonu, Avrupa Birliği'nin 2021'de ilan ettiği Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Fit for 55 paketinin öngördüğü hedeflerle sıkı bir senkronizasyon içinde gelişmiştir. AB'nin 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine göre %55 azaltma hedefi, bina sektörünün dekarbonizasyon stratejilerinde köklü değişiklikleri tetiklemiştir. Bu bağlamda 2023 yılında revize edilen Enerji Verimliliği Direktifi (2023/1791), üye devletlerin yıllık enerji tasarruf yükümlülüklerini 2024-2030 döneminde ortalama %1,49'a çıkarmış, Türkiye'nin II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'nda (2024-2030) belirlediği 20,2 milyar ABD Doları yatırım hedefiyle paralel bir strateji oluşturmayı zorunlu kılmıştır.

2024 yılında yayımlanan revize Binalarda Enerji Performansı Direktifi (2024/1275), AB'nin bina sektörüne yönelik vizyonunu kristalize ederek, 2030 yılına kadar tüm yeni binaların sıfır emisyonlu olması ve 2040'a kadar fosil yakıt kullanımının aşamalı olarak sonlandırılması hedeflerini ortaya koymuştur. Bu düzenlemeler, Türkiye'nin 2023'te belirlediği kamu binalarında %30 enerji tasarrufu hedefini aşan bir zaman çizelgesiyle,

mevcut bina stokunun %3-4'ünün yıllık olarak yenilenmesini öngören Ulusal Bina Yenileme Stratejisi'nin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Karşılaştırmalı bir bakış açısıyla değerlendirildiğinde, Avrupa Birliği'nin 2050 yılına kadar binalarda enerji verimliliğini %40–50 oranında artırma hedefi ile Türkiye'nin 2011–2023 döneminde enerji yoğunluğunu %20 oranında azaltma yönündeki başarısı, benzer yönelimlere sahip olmakla birlikte farklı metriklere ve zaman ufuklarına dayanan politika çerçevelerine işaret etmektedir. Bu farklılaşmanın temel nedenleri arasında, AB'nin 1990 yılını referans alan ölçüm yaklaşımına karşılık Türkiye'nin 2011 yılını baz alması, Türkiye'nin görece daha genç bina stokuna sahip olması ve kentleşme sürecinin kendine özgü dinamikleri yer almaktadır.

Finansman mekanizmaları açısından, AB'nin Sosyal İklim Fonu ile 86 milyar euro'luk yeşil geçiş desteği, Türkiye'nin Kredi Garanti Fonu (KGF) iş birliğiyle geliştirdiği Yeşil Kredi Programı ve kamu binalarının yenilenmesine yönelik 5 milyar ABD Doları tutarındaki hedeflenmiş yatırımlarla tamamlayıcı bir yapı arz etmektedir. Bu paralellikler enerji verimliliğinin sadece teknik bir meseleden çıkıp ekonomik sürdürülebilirlik ve sosyal refahın entegre olduğu bir politika alanına dönüşümünün küresel bir eğilim olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye'nin 2024 yılı verilerine göre enerji verimliliği hedeflerini %129 oranında aşması (Anonim 2025f), uygulanan politikaların etkinliğini doğrularken, binalarda enerji performansı alanında akıllı teknolojilerin entegrasyonu ve dijitalleşme stratejileri, AB'nin veri merkezi enerji performans sistemi izleme yükümlülüğü gibi düzenlemelerle uyumlu bir gelişim trendini yansıtmaktadır. İzlenen süreçte enerji verimliliğinin sadece emisyon azaltımını değil, aynı zamanda enerji güvenliği, ekonomik rekabet gücü ve sosyal eşitliğin desteklenmesini sağlayan çok boyutlu bir politika aracı olarak konumlandırıldığı görülmektedir.

1.2 Araştırmanın Amacı ve Problemin Tanımı

Gayrimenkul sektöründe iklim değişikliği ile mücadelenin öncülü olan enerji verimliliği konusu, çevresel faktörlerin yanında ekonomik ve teknik unsurları da hesaba katmayı gerektirmektedir. Fiziksel yapılar, özellikle binalar hem ekonomik bir değer taşımakta hem de inşa edilme ve kullanım süreçleri itibarıyla çevresel etkilerle doğrudan ilişkilendirilmektedir (Tanrıvermiş 2016). Bu bağlamda, söz konusu unsurların tamamı binalardaki enerji tüketimi ve enerji verimliliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Enerji tüketimini etkileyen unsurların tümünün bir arada değerlendirilmesi, bir başka zorluk doğurmaktadır (Li vd. 2021). Özellikle mevcut binaların enerji verimliliğine yönelik çalışmalarda, veri temininde yaşanan sorunlar, çalışmanın sağlıklı bir şekilde yürütülmesini engelleyebilmektedir. Ayrıca farklı veri türlerinin kullanılması, özellikle tüketim tahminine yönelik çalışmalarda düşük model performansına neden olmaktadır. Bu zorluklar, enerji tüketimini etkileyen unsurları anlama ve geleceğe yönelik tahminlerde hatalara neden olabilmektedir.

Binalarda enerji verimliliğinin sağlanmasıyla ilgili bir diğer zorluk da maliyet boyutudur (Liang vd. 2023). Küresel hedeflere uyumlu bir enerji verimli dönüşüm, yapı maliyetlerinin yanı sıra çevresel ve enerji maliyetlerini de içermelidir. Maliyet faktörünün zaman boyutu da dikkate alındığında, hesaplama yöntemlerinin gelecekte beklenen maliyet ve faydaları da içermesi gerekmektedir. Binalarda enerji verimliliği, enerji tüketimini azaltmayı hedeflerken düşük maliyetle yapmanın zorluklarıyla karşı karşıyadır (Afzal vd. 2024). Bu durum enerji verimliliğinin çok amaçlı bir şekilde optimize edilmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Araştırmanın amacı; mevcut kamu binalarının enerji verimli yenilenmesinde kullanılabilecek enerji tüketimi ile tasarrufuna ilişkin maliyet etkin bir optimizasyon modeli ortaya koymak ve düşük maliyetli stratejiler geliştirmektir. İklim değişikliği senaryoları verileri göz önünde bulundurularak hazırlanan optimizasyon modeli sonuçlarının aynı zamanda küresel hedeflerle uyumlu olmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca araştırma kapsamında ortaya konulan maliyet faktörünün, yapının yaşam döngüsü

boyunca etkin olabilmesi için gelecekte beklenen fayda ve maliyetlerin de günümüz koşullarında değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Araştırmanın bir diğer amacı, doğru enerji tüketimi tahmini için zaman serisi verileri ile fizik/mühendislik temelli veri kümelerini birlikte kullanarak üniversite kampüs binalarındaki enerji tüketimi için makine öğrenimi yöntemleri ile bir tahmin modeli geliştirmektir.

Araştırma sonuçlarının SKA ile uyumlu olması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda araştırmanın aşağıdaki hedeflerle uyumlu olması ve araştırmanın söz konusu hedeflere ulaşmaya katkı sunması amaçlanmıştır:

- Hedef 7 – Erişilebilir ve Temiz Enerji: Herkes için karşılanabilir, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimi sağlamak. 2030’a kadar küresel enerji verimliliği ilerleme oranının iki katına çıkarılması.
- Hedef 11 – Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar: Şehirleri ve insan yerleşimlerini kapsayıcı, güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir kılmak

Araştırma sonuçlarının öncelikle gayrimenkul sektöründeki paydaşlara katkı sağlaması beklenmektedir. Mevcut yapı stokunun enerji verimliliğinin artırılması için yapılan çalışmaların, enerji verimli dönüşüm konusunda karar alma süreçlerinde yer alan kesimlere, sürdürülebilir dirençli kentlere ulaşma bakımından gayrimenkul sektörünün genel politika yapıcılarına, zaman ve maliyet bakımından uygulayıcılara ve farkındalık çalışmaları kapsamında son kullanıcılara yol gösterici nitelikte katkılar sunması beklenmektedir. Ayrıca kullanılan araştırma yönteminin ve özellikle maliyet etkin çok amaçlı optimizasyon sonuçlarının özgün nitelikte olması beklenmektedir. Ortaya konulan sonuçların akademik literatüre ve enerji verimli dönüşüm alanında çalışan akademisyenlere faydalı olması öngörülmektedir.

1.3 Araştırmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları

İklim değişikliğiyle mücadelede mevcut yapı stokunun enerji verimliliğini artırmaya yönelik dönüşüm süreçleri, çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. Enerji tüketimi açısından öne çıkan kamu binalarına yönelik optimizasyon analizlerinde, idari kullanım, eğitim amaçlı kullanım ve karma kullanım türleri temel alınarak değerlendirmeler yapılmış; elde edilen sonuçlar ilgili kategorilere göre sunulmuştur. İkamet, ticari ve diğer kamusal kullanım türleri ise araştırma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Proje aşamasında enerji verimli bina tasarımından farklı olarak, farklı dönemlerde ve yapım tekniklerinde inşa edilmiş binaların ortak bir hedef doğrultusunda dönüştürülebilmesi, binalara özgü değişkenlerin dikkate alınmasını gerektiren bir süreci ifade etmektedir. Bir binanın enerji verimli tasarlanması aşamasında simülasyon verileri kullanılırken, mevcut binaların enerji verimli dönüşümünde bina fiziksel verileri ile geçmiş tüketim verilerinin dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca dönüşümde kullanılacak malzeme, yapım tekniği ve maliyet unsurlarının karşılanabilir düzeyde olması beklenmektedir. Araştırma kapsamında fayda ve maliyet unsurları statik yöntemlerle değil, yapıların tüm yaşam döngüsünü kapsayacak şekilde zaman unsuru da dikkate alınarak dinamik yöntemlerle hesaplanmıştır.

Binalarda enerji tüketiminin tahmininde simülasyon verileri üzerinden değil gerçek ölçüm verileri üzerinden tahmin ve optimizasyon sonuçları elde edilmiştir. Araştırmada kullanılan iklim verileri bölgeye en yakın ölçüm istasyonundan, elektrik tüketimi verileri ise bina sayaçları üzerinden dağıtım firmalarından elde edilmiştir. Fiziksel veriler, binaların mimari projeleri üzerinden üretilmiştir. Araştırmada enerji tüketimini temsilen elektrik tüketimi ve ısı enerjisi ihtiyacı kullanılmıştır. Araştırma alanında bulunan yapılardan bazılarının ortak sayaçlara sahip olması, binaların tekil tüketimlerini elde etmeyi olanaksız kıldığı için tekil sayaçlara sahip binaların tüketim verileri üzerinden araştırma yürütülmüştür. Burada bina seçiminde kullanım amacı, yapım tekniği ve tarihsel özellikler bakımından araştırma alanını temsil eden binaların seçilmesine özen gösterilmiştir. Ayrıca sayaç üzerinden elde edilen elektrik tüketimlerinin aydınlatma, ısıtma, soğutma gibi kullanıma göre alt kırılımı bulunmamaktadır. Bunun nedeni ise

elektrik tüketim verilerinin bu kısıtlımlara uygun şekilde depolanmamış olmasıdır. Öte yandan binaların ısıtma-soğutma enerjisi ihtiyacı için TS825 standardı kapsamında hesaplama yapılarak toplam enerji tüketimi ortaya konulmuştur.

Araştırmada kısa vadeli enerji tüketimi önlemlerinin yanı sıra uluslararası hedeflere ulaşmada kullanılacak, yüksek enerji verimliliği sağlayan, uzun vadeli geri dönüşü olan ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegre edilebildiği çözümlere kadar farklı aşama ve süreçleri gerektiren çözümleri içeren bir çerçeve oluşturulmuştur. Bu nedenle bina ölçeğinde tüketim çözümlerinin yanı sıra binaların birbirleri ile etkileşimlerin de hesaba katılabilmesi amacıyla kampüs ölçeğinde optimizasyona odaklanılmıştır. Araştırmanın optimizasyon aşaması, binaların dış cephesi, pencere ve çatı elemanları üzerinden tasarlanmıştır. Bu durumun temel nedeni, ilgili yapı elemanlarının binanın toplam enerji tüketiminin büyük bir bölümünden sorumlu olmasıdır (Vandenbogaerde vd. 2023, Chiradeja vd. 2023). Ayrıca diğer yapı bileşenlerinin sisteme dâhil edilmesinin enerji tüketiminin optimizasyonu açısından anlamlı bir katkı sağlamayacağı yönündeki bulgular, odaklanılan elemanların önemini pekiştirmektedir.

1.4 Araştırma Soruları ve Hipotezler

Araştırma kapsamında mevcut kamu binalarında veri odaklı sürdürülebilir enerji optimizasyonu için bütünlük bir metodoloji geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Literatürdeki güncel çalışmalar özellikle kampüs ölçeğindeki enerji optimizasyonu (Hu vd. 2022) ve makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin (Runge ve Zmeureanu 2021, Fan vd. 2019) potansiyelini vurgulamaktadır. Ancak mevcut literatürde, tahmin ve optimizasyon süreçlerinin çoğunlukla birbirinden bağımsız olarak ele alındığı ve bu iki yaklaşımın bütüncül bir yapıda entegre edilmesine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, alanyazında önemli bir araştırma boşluğunu işaret etmekte olup, söz konusu boşluğun giderilmesine katkı sunmak amacıyla çalışma tasarlanmıştır. Bu çerçevede, çalışmanın temel araştırma soruları ve test edilmesi planlanan hipotezler aşağıda sistematik biçimde sunulmuştur.

Tüm araştırma soruları ve hipotezler, tez çalışmasının süre, veri erişimi ve teknik kapasite gibi pratik kısıtlamaları içerisinde cevaplanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Araştırma soruları tanımlama ve keşfetme, açıklama ve test etme, değerlendirme ve uygulama amaçlarına hizmet edecek şekilde yapılandırılmıştır.

Yaklaşık Sıfır Enerjili Bina (nearly zero energy building – nZEB) Yaklaşımı ve Derin Yenileme Bağlamında: Derin yenileme bu çalışma kapsamında, binanın enerji performansında en az %60'lık iyileştirme sağlayan ve yapı kabuğu, pencereler ve çatı gibi temel yapı elemanlarının kapsamlı yenilenmesini içeren müdahaleler olarak tanımlanmaktadır (Anonim 2020). Yaklaşık sıfır enerjili bina (nZEB) ise, çok yüksek enerji performansı gösteren ve enerji ihtiyacı büyük oranda yenilenebilir kaynaklardan sağlanan bina olarak ifade edilmektedir (Anonymous 2021d).

Soru 1.1: Mevcut kamu binalarını yaklaşık sıfır enerjili bina standartlarına dönüştürmek için enerji tüketimi ve maliyet açısından optimal derin yenileme stratejileri nelerdir?

- Alt Soru 1.1.1: Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'ndeki farklı işlev ve yaştaki kamu binalarının mevcut enerji tüketim profilleri nelerdir?
- Alt Soru 1.1.2: Derin yenileme kapsamında yapı kabuğu iyileştirmelerinin enerji tüketimindeki azalmaya etkisi ne düzeydedir?
- Alt Soru 1.1.3: nZEB hedeflerine ulaşmada yapı elemanlarının (dış cephe, pencere, çatı) göreceli etkinlikleri nasıl farklılaşmaktadır?

Soru 1.2: Farklı baskınlık stratejilerinin (tüketim odaklı, maliyet odaklı ve dengeli yaklaşım) çok amaçlı optimizasyon sürecindeki Pareto etkinlikleri nasıl değerlendirilir?

- Alt Soru 1.2.1: Tüketim odaklı, maliyet odaklı ve dengeli optimizasyon stratejilerinin Pareto sınırındaki konumları nasıl farklılaşmaktadır?
- Alt Soru 1.2.2: Çok amaçlı optimizasyonda kritik karar noktaları (knee points) hangi maliyet-enerji kombinasyonlarında ortaya çıkmaktadır?

Yaşam Döngüsü Maliyeti Optimizasyonu Kapsamında: Yaşam döngüsü maliyeti (YDM), bir ürün veya sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan maliyetlerin sistematik analizi olarak tanımlanmaktadır (Barringer vd. 1995). Çalışmada YDM yaklaşımı, derin yenileme alternatiflerinin ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde temel analiz aracı olarak kullanılmaktadır.

Soru 2.1: Farklı derin yenileme senaryolarının yaşam döngüsü maliyeti bakımından optimum noktaları nelerdir?

- Alt Soru 2.1.1: Maliyet-optimal metodoloji çerçevesinde, farklı yenileme alternatiflerinin ekonomik fizibilitesi nasıl değerlendirilir?

Enerji Tüketimi Tahmin Modelleri Açısından: Binalarda enerji tüketiminin doğru tahmin edilmesi, enerji verimli yenileme çalışmalarının planlanması ve etkinliğinin değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda gelişen makine öğrenmesi teknolojileri, bina enerji tüketiminin modellenmesinde yeni olanaklar sunmaktadır. Belirlenen araştırma soruları, derin öğrenme tabanlı modeller ile klasik tahmin yöntemlerinin karşılaştırılmasını ve bina karakteristiklerinin tahmin performansına etkisini incelemeyi amaçlamaktadır.

Soru 3.1: Derin öğrenme tabanlı tahmin modelleri, topluluk öğrenme modeli, destek vektör regresyonu ve istatistik tabanlı modellere kıyasla kamu binalarının enerji tüketimini tahmin etmede ne ölçüde başarılıdır?

- Alt Soru 3.1.1: Farklı model mimarilerinin tahmin performansları hangi metriklerle nasıl farklılaşmaktadır?
- Alt Soru 3.1.2: Hesaplama süresi ve model karmaşıklığı açısından farklı tahmin algoritmalarının pratik uygulanabilirlik değerlendirmesi nasıl yapılır?

Soru 3.2: Bina yaşı, pencere-yüzey oranı ve bina boyutlarının enerji tüketimi tahmin modeli performansına etkisi nedir?

- Alt Soru 3.2.1: Farklı yaş kategorilerindeki binaların (10-20 yaş, 40-60 yaş, 70+ yaş) tahmin zorluğu seviyeleri nasıl değişmektedir?
- Alt Soru 3.2.2: Pencere-yüzey oranının tahmin modeli doğruluğu üzerindeki sistematik etkisi hangi eşik değerlerde kritik hale gelmektedir?
- Alt Soru 3.2.3: Bina taban alanı büyüklüğünün model performansı üzerindeki etkisi nasıl değerlendirilir?

Araştırma Hipotezleri ve Araştırma Soruları İlişkilendirmesi: Belirlenen araştırma soruları, tez çalışmasının ana çerçevesini oluşturmaktadır. Bu sorulara sistematik ve bilimsel olarak yanıt verebilmek için literatürden ve ön analizlerden elde edilen bilgiler doğrultusunda bir dizi hipotez geliştirilmiştir. Hipotezler, araştırma sürecine rehberlik etmek, veri toplama ve analiz yöntemlerini şekillendirmek ve bulguların değerlendirilmesinde nesnel kriterleri belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.

Her bir hipotez, ilgili araştırma sorusuyla doğrudan bağlantılı olup, tez çalışması kapsamında uygun yöntemlerle test edilecektir. Bu teste dayalı yaklaşım, çalışmanın bilimsel geçerliliğini ve güvenilirliğini sağlayacaktır. Aşağıda her hipotez, test ettiği araştırma sorusuyla birlikte sunulmaktadır:

Derin Yenileme Stratejileri Hipotezleri (Soru 1.1 ile ilişkili):

H1: Mevcut kamu binalarında derin yenileme stratejileri ile enerji tüketiminde en az %60'lık azalma sağlanabilir (Soru 1.1 ve Alt Soru 1.1.2).

H2: Dış cephe yalıtımı, enerji verimli pencere sistemleri ve çatı iyileştirmelerini içeren bütünsel derin yenileme stratejileri, münferit müdahalelere kıyasla enerji tüketimini daha etkin şekilde azaltır (Soru 1.1 ve Alt Soru 1.1.3)

Çok Amaçlı Optimizasyon Hipotezi (Soru 1.2 ile ilişkili):

H3: Üç farklı optimizasyon stratejisinin (tüketim odaklı, maliyet odaklı, dengeli) tamamı Pareto etkin sınır üzerinde konumlanır ve her strateji farklı karar verici tercihlerine optimal çözümler sunar (Soru 1.2 ve Alt Soru 1.2.1)

Yaşam Döngüsü Maliyeti Hipotezi (Soru 2.1 ile ilişkili):

H4: Yaşam döngüsü maliyeti yaklaşımıyla değerlendirildiğinde, yüksek başlangıç maliyetine sahip yenileme alternatifleri, uzun vadede daha düşük toplam maliyete sahiptir (Soru 2.1 ve Alt Soru 2.1.1).

Model Performansı Hipotezi (Soru 3.1 ile ilişkili):

H5: Derin öğrenme modelleri, hesaplama süresi ve tahmin doğruluğu dengesini dikkate aldığında, klasik makine öğrenmesi modellerine (random forest (RF)) ve klasik modellere (destek vektör regresyonu – support vector regression (SVR), bütünleşik otoregresif hareketli ortalama – autoregressive integrated moving average (ARIMA)) kıyasla daha tutarlı ve dengeli performans gösterir (Soru 3.1 ve Alt Soru 3.1.1, 3.1.2).

Bina Karakteristikleri Hipotezi (Soru 3.2 ile ilişkili):

H6: Bina yaşının artmasıyla birlikte, enerji tüketimi tahmin modellerinin performansı sistematik olarak azalır ve en zor tahmin edilen bina kategorisi 70 yaş üzeri yapılar olur (Soru 3.2 ve Alt Soru 3.2.1)

H7: Pencere-yüzey oranının etkisi karmaşık bir ilişki sergilemektedir

H8: Pareto analizinde kritik karar noktaları orta maliyet aralığında yoğunlaşır

Belirlenen araştırma soruları ve hipotezler, araştırmanın temelini oluşturmakta ve analitik çerçevesini belirlemektedir. Araştırma bulguları, belirlenen hipotezlerin doğrulanması veya reddedilmesi çerçevesinde analiz edilecek olup, mevcut kamu binalarının enerji verimli dönüşümüne yönelik hem kuramsal hem de uygulamaya dönük çıkarımlar sunulması hedeflenmektedir. Araştırma kapsamında gerçekleştirilecek analizler, enerji

tüketimi tahmin modelleri ile çok amaçlı optimizasyon süreçlerinin entegrasyonunun, maliyet etkin ve sürdürülebilir bina yenileme stratejilerinin geliştirilmesine yönelik potansiyelini ortaya koyacaktır. Elde edilen bulgular, Türkiye'nin taraf olduğu uluslararası anlaşmalar ile ulusal strateji belgeleri ve eylem planlarında belirlenen hedeflerle uyumlu biçimde, kamu binalarının enerji verimliliğini artırmaya yönelik karar alma süreçlerine kapsamlı ve kanıta dayalı katkılar sunarak, ülkenin enerji verimliliği hedeflerine ve uluslararası iklim taahhütlerine somut destek sağlayacaktır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE KURAMSAL TEMELLER

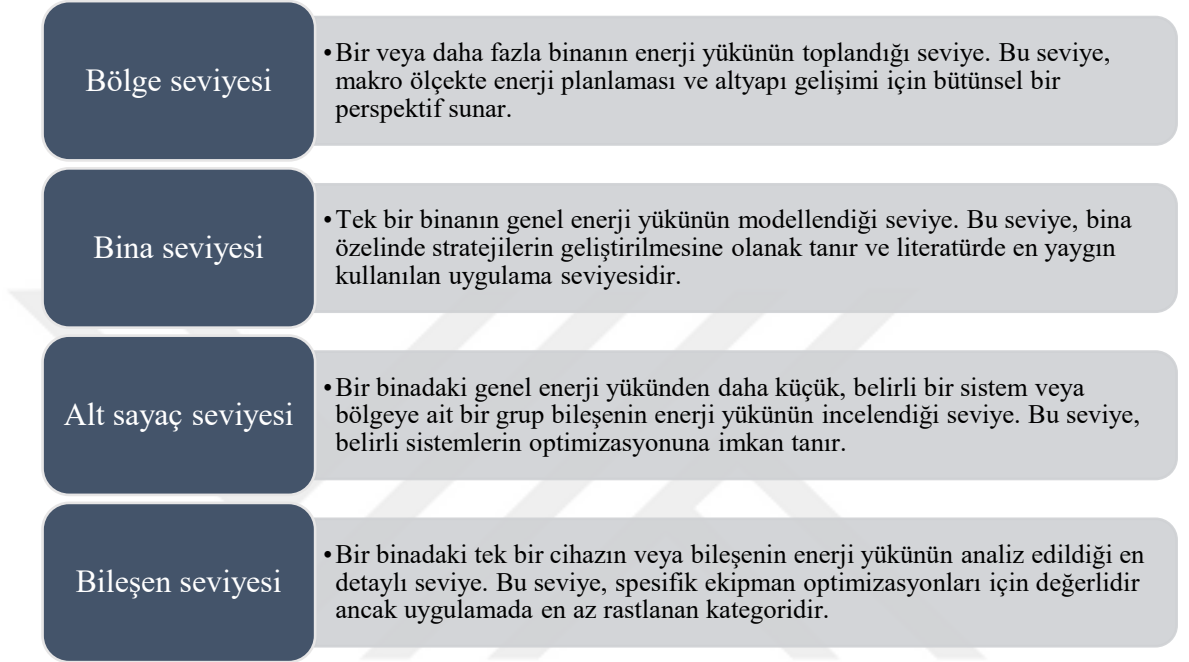
Mevcut binaların maliyet etkin enerji verimli dönüşümü için öncelikle enerji tüketiminin tahmin edilmesi, ardından bu sürecin küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlayacak şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Güneş vd. 2023). Bu nedenle enerji tüketiminin tahmini ve optimizasyonu ile bu iki sürecin bütünleşmesi, araştırmanın ana temasını oluşturmaktadır.

Araştırmada öncelikle mevcut binaların enerji verimli dönüşümüne yönelik önceki çalışmalar incelenmiştir. Literatürde enerji tüketiminde kullanılan bina uygulama seviyeleri, tahmin modelleri, veri türleri ve performans ölçütlerine yer verilmiştir. Sürecin optimizasyon aşamasında ise çok amaçlı optimizasyon yöntemleri, amaç fonksiyonları ve karar değişkenlerine ilişkin literatür çalışmaları incelenmiştir. Son olarak, araştırma boşlukları ve zorlukları tespit edilmiş ve araştırma çerçevesinde çıkarımlarda bulunulmuştur.

2.1 Mevcut Binalarda Enerji Tüketimi Tahmini

Binaların enerji verimli hale dönüştürülmesi, ekonomik, teknik, yasal ve çevresel süreçleri kapsayan karmaşık bir süreçtir (Güneş vd. 2023). Bu sürecin etkin planlanması ve yönetimi, öncelikle binalara ilişkin detaylı ve doğru enerji tüketim verilerinin elde edilmesine ve bu verilere dayalı güvenilir tahminlere bağlı olmaktadır. Literatürde ve yasal düzenlemelerde enerji verimliliğinin temel göstergesi, enerji tüketimi ve enerji talebinin azaltılması olarak tanımlanmaktadır (Bakar vd. 2015). Mevcut binaların kullanım amacı, yapım tekniği, coğrafi konumu ve işletme koşulları gibi çeşitli faktörler, enerji tüketim profillerinde önemli farklılıklara neden olmakta ve bu da tahmin süreçlerinin karmaşıklığını artırmaktadır. Araştırma kapsamında bina enerji tüketimi tahmin modellerine ilişkin literatür bulguları; enerji tüketimi tahmininde kullanılan değişkenler, yöntemler, performans değerlendirme ölçütleri ile tahmin yöntemleri ve karşılaştırmalı değerlendirme başlıkları altında kapsamlı ve eleştirel bir yaklaşımla sentezlenmiştir.

Enerji tüketimi tahmin modellerinin geliştirilmesi ve doğrulanması uygun test alanlarının belirlenmesine bağlıdır. Runge ve Zmeureanu (2021) tarafından yapılan kapsamlı bir literatür araştırmasına göre bu test alanları bölge seviyesi, bina seviyesi, alt sayaç seviyesi ve bileşen seviyesi olmak üzere dört seviyede sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Enerji tüketimi tahmininde uygulama seviyesi (Runge ve Zmeureanu 2021)

Vaka çalışmalarının dağılımı incelendiğinde, literatürdeki araştırmaların %37'sinin bölge seviyesinde, %53'ünün bina seviyesinde, %6'sının alt sayaç seviyesinde ve sadece %4'ünün bileşen seviyesinde gerçekleştirildiği görülmektedir (Runge ve Zmeureanu, 2021). Bölge ve bina seviyelerindeki bu yoğunluk, büyük ölçekte veri erişilebilirliği, uygulanabilirlik ve sonuçların genelleştirilebilirliği ile açıklanabilir. Bölge seviyesi kendi içinde alt kategorilere ayrılmakta olup, bu kategoriler aşağıda verilmiştir.

- (i) Sektör seviyesi: Konut, ticari, endüstriyel gibi tüm sektörleri kapsayan en geniş ölçek
- (ii) Şehir seviyesi: Kentsel ölçekte çeşitli bina türlerini içeren seviye
- (iii) Kompleks seviyesi: Üniversite kampüsü, hastane kompleksi gibi daha sınırlı ama heterojen yapılar
- (iv) Ticari-Konut seviyesi: belirli tip binaları içeren daha homojen yapılar

Kampüs ölçeğinde yürütülen enerji tahmin çalışmaları, sürdürülebilir yerleşke yönetimi ve entegre enerji sistemlerinin optimizasyonuna yönelik hedefler doğrultusunda akademik ve uygulamalı düzeyde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Dagdougui vd. (2019), Reynolds vd. (2019), Son vd. (2018), Kim vd. (2019), Wang vd. (2020), Zor vd. (2020), Lei vd. (2024), Yang ve Mao (2023), Guo vd. (2023), Faiq vd. (2023), Mariano-Hernandez vd. (2022) ve Manno vd. (2022) gibi araştırmacılar, kampüs ölçeğinde enerji tahmini ve yönetimi konusunda çalışmalar yürütmüştür. Bu çalışmalar kampüs enerji sistemlerinin entegre planlanması, enerji taşıyıcıları arasındaki etkileşimlerin modellenmesi ve çoklu bina sistemlerinin eşgüdümlü optimizasyonu konularında önemli bulgular ortaya koymuştur.

Zhao vd. (2021), kampüs ölçeğinde çalışmanın birim başına enerji dönüşüm maliyetini azalttığını göstermiş, ölçek ekonomisi avantajının enerji verimliliği çalışmalarında kritik bir faktör olduğunu vurgulamıştır. Benzer şekilde Hu vd. (2022) kampüs ölçekli çalışmalarda binalar arası enerji etkileşimlerinin modellenmesinin, tekil bina yaklaşımlarına göre daha gerçekçi ve kapsamlı sonuçlar sağladığını ortaya koymuştur. Kampüs ve bina ölçeklerinin karşılaştırmalı analizi aşağıda özet olarak verilmiştir (Çizelge 2.1). Bu karşılaştırma, her iki yaklaşımın güçlü yönlerini ve kısıtlarını yedi temel parametre üzerinden değerlendirmektedir.

Çizelge 2.1 Kampüs ve bina ölçeklerinin karşılaştırmalı analizi (Hu vd. 2022)

Parametre	Kampüs ölçeği	Bina ölçeği
Güvenilirlik	Yüksek (çoklu veri kaynakları ve çapraz doğrulama imkânı)	Görece düşük (Sınırlı veri kaynağı ve doğrulama zorluğu)
Veri sayısı	Görece yüksek (Farklı yapılardan çok sayıda veri noktası)	Görece düşük (Tek yapıdan sınırlı veri noktası)
Veri toplama zorluğu	Görece yüksek (farklı sistemlerin entegrasyonu ve veri standardizasyonu gereksinimi)	Görece düşük (Daha basit ve tekil veri sistemleri)
Bina türü	Çeşitli (Farklı işlevsel binalar ve kullanım profilleri)	Tek tip (Homojen kullanım ve işletme koşulları)
Genelleştirilebilirlik	Yüksek (Farklı bina tipleri ve kullanım koşullarına uygulama potansiyeli)	Sınırlı (Benzer özellikteki binalara uygulanabilirlik)
Özgünlük (Runge ve Zmeureanu 2021)	Yüksek (Literatürde daha az çalışılmış alan)	Düşük (Literatürde yaygın olarak çalışılmış alan)
Binalar arası etkileşim (Hu vd. 2022)	Dikkate alınır (Sistemik ve entegre yaklaşım)	Dikkate alınmaz (İzole sistem yaklaşımı)

Kampüs ölçeğindeki çalışmalar daha kapsamlı veri kümeleriyle çalışabilme, binalar arası etkileşimleri modelleyebilme ve farklı bina türlerinin entegre enerji davranışlarını analiz edebilme avantajları sunmaktadır. Bununla birlikte bu ölçekteki çalışmalar, veri toplama ve entegrasyonundaki zorluklar, sistem karmaşıklığı ve teknik uzmanlık gereksinimleri nedeniyle daha zorlu olabilmektedir.

Runge ve Zmeureanu (2021), derin öğrenme tabanlı modellerin kampüs ölçeğindeki uygulamalarına ilişkin literatürdeki sınırlı sayıda karşılaştırmalı çalışma bulunduğunu belirtmiş ve bu alanın gelecek araştırmalar için önemli bir potansiyel taşıdığını vurgulamıştır. Hu vd. (2022) ise kampüs ölçeğindeki çalışmalarda binalar arası enerji transferi, paylaşımlı kaynaklar ve senkronize kontrol stratejilerinin modellenmesinin, bütünsel enerji verimliliği için kritik olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular kampüs ölçeğinde enerji tüketimi tahmin modellerinin geliştirilmesinin sadece teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve operasyonel avantajlar da sağlayabileceğine işaret etmektedir.

Literatürde dikkat çeken bir boşluk, kampüs ölçeğindeki enerji tüketim tahmini ile optimizasyon modelleri arasındaki entegrasyonun yeterince incelenmemiş olmasıdır. Mevcut çalışmaların çoğu ya tahmin ya da optimizasyon odaklı olup, bu iki yaklaşımın bütünleştirilmesine yönelik çalışmalar sınırlıdır. Bu boşluk, özellikle mevcut binaların enerji verimli dönüşümü için karar destek sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

2.1.1 Enerji tüketimi tahmininde kullanılan değişkenler

Bina enerji tüketiminin tahmin edilmesinde kullanılan değişken türleri, seçilen modelleme yaklaşımına ve tahmin amacına göre farklılık göstermektedir. Literatürde kullanılan veri türleri dört ana kategoride sınıflandırılabilir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 Enerji tüketimi tahmininde kullanılan değişkenler (Orijinal)

Ana Kategori	Değişken Türü	Açıklama	Önemli Bulgular ve Uygulama Alanları	Referans
Enerji Tüketimi Değişkenleri	Elektrik tüketimi	Saatlik, günlük veya aylık elektrik tüketim kayıtları	Özellikle kısa vadeli tahminlerde kritik önem	Wang vd. (2018); Marino vd. (2016)
	Isıtma/soğutma enerjisi	Binalarda ısıtma ve soğutma için harcanan enerji miktarı	Mevsimsel etkilerin modellenmesinde önemli	Aparicio-Fernández vd. (2019)
	Doğalgaz tüketimi	Isıtma, sıcak su ve pişirme için kullanılan doğalgaz miktarı	Soğuk iklimlerde ve mevsimsel geçişlerde önemli tahmin parametresi	Abu-Shikah vd. (2011)
	Toplam enerji tüketimi	Tüm enerji kaynaklarının birleştirilmiş değeri	Makro ölçekli enerji planlamasında kullanışlı	Ma vd. (2019)
Meteorolojik Değişkenler	Dış hava sıcaklığı	Çevresel sıcaklık ölçümleri	Isıtma ve soğutma enerjisi tahmininde en önemli değişken	Fan vd. (2017)
	Bağıl nem	Havadaki nem oranı	Yüksek nemli iklimlerde model doğruluğunu önemli ölçüde artırır, özellikle soğutma yüklerini etkiler	Zhou vd. (2020)
	Güneş radyasyonu	Güneş ışıınım miktarı	Pasif ısı kazançları ve aydınlatma ihtiyacını etkiler, saydam yüzeyleri fazla olan binalarda kritik	Li vd. (2021)
	Rüzgâr hızı ve yönü	Rüzgâr parametreleri	İnfiltrasyon oranlarını ve ısıtma/soğutma yüklerini etkiler, yüksek rüzgârlı bölgelerde doğruluğu artırır	Chen vd. (2022)
Zamansal ve Kullanım Temelli Değişkenler	Zaman endeksi değişkenleri	Gün türü (hafta içi/hafta sonu), saat, mevsim bilgileri	Düzenli kullanım örüntüleri olan binalarda önemli	Mlangeni vd. (2020)
	İşletme saatleri	Binanın aktif kullanım süreleri	Ticari ve kurumsal binalarda enerji tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırır	Tudose vd. (2021)
	Doluluk oranları	Binayı kullanan kişi sayısı veya doluluk oranı	İnsan aktivitesine bağlı iç ısı kazançlarının modellenmesinde önemli	Sehovac vd. (2019)
Yapısal ve Teknik Özellikler	Geometrik veriler	Bina alanı, hacmi, yönelimi, pencere/duvar oranı	Fizik tabanlı modellerde vazgeçilmez	Li ve Wen (2014)
	Termal özellikler	Yapı elemanlarının U-değerleri, ısı kütlesi, hava sızdırmazlık	Gri kutu modellerinde kritik parametreler	Aparicio-Fernández vd. (2019)
	HVAC sistem özellikleri	Isıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin türü, kapasitesi ve verimliliği	Sistem bazlı enerji tahminleri ve optimizasyon süreçlerinde belirleyici	Bourdeau vd. (2019)
	Aydınlatma ve ekipman yoğunluğu	Birim alan başına düşen aydınlatma gücü ve elektrikli ekipman yoğunluğu	Özellikle ofis binalarında elektrik tüketimi tahminlerinde kullanılan parametre	Fan vd. (2019)

Veri odaklı yaklaşımlarda (black box modelleri), enerji tüketim verileri, meteorolojik veriler ve zamansal veriler ağırlıklı olarak kullanılırken; fizik tabanlı modellerde (white box) geometrik ve termal özellikler daha kritik rol oynamaktadır. Gri kutu modelleri ise genellikle tüm veri türlerinin bir kombinasyonunu kullanmaktadır. Diğer yandan Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT) cihazları, akıllı sayaçlar ve bina otomasyon sistemlerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü ve çok değişkenli verilerin kullanımı artmıştır. Sun vd. (2020) bu tür verilerin özellikle gerçek zamanlı tahmin ve optimizasyon uygulamalarında büyük potansiyel taşıdığını vurgulamaktadır. Bununla birlikte Wei vd. (2018), söz konusu verilerin etkin ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi için veri kalitesi, standardizasyon eksiklikleri ve veri gizliliğine ilişkin sorunların önemli yapısal engeller olarak tespit edildiğini vurgulamıştır.

2.1.2 Enerji tüketimi tahmininde kullanılan yöntemler

Bina enerji tüketiminin tahmin edilmesinde literatürde üç temel yaklaşım bulunmaktadır: (i) Fizik tabanlı modeller (white box), (ii) Veri odaklı modeller (black box) ve (iii) Her iki yaklaşımı birleştiren gri kutu (grey box) modelleri. Bu sınıflandırma, farklı modelleme yaklaşımları arasındaki metodolojik ayrımları ve her bir modelin potansiyel uygulama alanlarını kavrayabilmek açısından önemli bir çerçeve sunmaktadır.

(i) Fizik tabanlı modeller; binaların termodinamik davranışlarını ve enerji tüketimini temel fizik prensipleri ve detaylı matematiksel denklemler aracılığıyla simüle etmektedir (Luo vd. 2020). Bu modeller bina özelliklerinin detaylı bir şekilde tanımlanmasını gerektirmekte ve genellikle iki ana girdi türüne dayanmaktadır:

1. Binaların fiziksel özellikleri: Bina geometrisi, yapı elemanlarının termal özellikleri, malzeme karakteristikleri, kat düzeni, HVAC sistemleri ve işletme parametreleri gibi detaylı yapısal bilgilerden oluşmaktadır.
2. Çevresel parametreler: Dış hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgâr hızı, güneş radyasyonu, gölgeleme koşulları gibi meteorolojik ve çevresel faktörleri ifade etmektedir.

Literatürde en yaygın kullanılan fizik tabanlı simülasyon yazılımları arasında EnergyPlus (Li ve Wen 2014), TRNSYS (Aparicio-Fernández vd. 2019), DOE-2, ESP-r ve IDA-ICE bulunmaktadır. Bu yazılımlar kapsamlı bina modellemesi ve detaylı enerji performans simülasyonu yapabilme kapasitesine sahiptir. Li ve Wen (2014) EnergyPlus platformunun özellikle çok zonlu bina sistemlerinin termal davranışlarını modellemede güçlü bir araç olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Aparicio-Fernández vd. (2019), TRNSYS ile gerçekleştirdikleri simülasyonlarda bina kabuğu iyileştirmelerinin enerji performansına etkilerini yüksek doğrulukla tahmin etmişlerdir.

Fizik tabanlı modellerin en önemli avantajı, teorik olarak sağlam bir temele dayanarak detaylı ve açıklanabilir tahminler sunabilmeleridir. Aynı zamanda henüz inşa edilmemiş veya yenilenecek binaların performansını da simüle edebilme esnekliği sağlamaktadırlar. Ancak Hong vd. (2020)'nin vurguladığı gibi bu modeller üç temel kısıta sahiptir:

1. Yüksek veri gereksinimi: Detaylı yapısal bilgi ve parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Mevcut binalarda bu bilgilere erişim genellikle sınırlıdır.
2. Hesaplama yoğunluğu: Kompleks binalarda termal ve akışkan dinamiği hesaplamaları yüksek işlem gücü gerektirmektedir.
3. Modellemedeki belirsizlikler: Gerçek kullanıcı davranışlarını ve operasyonel değişkenlikleri modellemekte zorlamaktadırlar.

Wang vd. (2019) fizik tabanlı modellerin tahmin doğruluğunun, girdi parametrelerinin hassasiyetine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Mevcut binalarda özellikle eski yapılarda, yapısal detayların ve malzeme özelliklerinin tam olarak bilinmemesi, tahmin doğruluğunu önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

(ii) Veri odaklı modeller; fiziksel süreçleri açıkça modellemek yerine geçmiş ve mevcut verileri kullanarak girdi değişkenleri ile çıktılar arasındaki ilişkiyi öğrenen ve bu ilişkiye dayanarak yeni öngörüler oluşturan yaklaşımlardır (Bourdeau vd. 2019). Chen vd. (2022)'nin belirttiği gibi bu modeller, detaylı fiziksel bina bilgisi gerektirmediğinden, white box modellerine kıyasla kullanımı daha yaygındır. Veri odaklı modeller üç ana kategoride incelenmektedir:

1. Klasik makine öğrenimi modelleri: Karar ağaçları, random forest, destek vektör makineleri, gradient boosting gibi klasik algoritmalar kullanılmaktadır (Ma vd. 2019). Fan vd. (2017) çalışmalarında bu algoritmaların özellikle doğrusal olmayan enerji tüketim modellerini başarıyla yakalayabildiği sonucuna ulaşmışlardır.
2. Derin öğrenme modelleri: Yapay sinir ağlarının çok katmanlı ve karmaşık versiyonları olan LSTM, CNN, RNN gibi ileri algoritmalar kullanılmaktadır (He 2017). Sehovac vd. (2019) LSTM ağlarının özellikle uzun vadeli bağımlılıkları yakalamada ve zaman serisi tahminlerinde üstün performans gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır.
3. Zaman serisi modelleri: Regresyon analizi, ARIMA, SARIMA gibi istatistiksel zaman serisi metodolojileri kullanılmaktadır (Montgomery vd. 2015). Zhou vd. (2020) bu modellerin özellikle durağan veri setlerinde ve kısa vadeli tahminlerde etkili olduğunu, ancak karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri yakalama konusunda sınırlılıkları olduğunu belirtmiştir.

Veri odaklı modellerin en büyük avantajı, karmaşık örüntüleri ve doğrusal olmayan ilişkileri veri üzerinden otomatik olarak öğrenebilme yetenekleridir. Marino vd. (2016) ve Wang vd. (2018), veri odaklı modellerin özellikle kısa vadeli enerji tüketim tahminlerinde yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. Tüketim tahminlerindeki başarılarına rağmen, Naug ve Biswas (2018) ile Runge ve Zmeureanu (2021), bu modellerin bazı önemli kısıtlara sahip olduğunu vurgulamıştır. Bu modeller, yüksek kaliteli, geniş kapsamlı ve temsili veri setlerine büyük ölçüde bağımlıdır. Eğitim verisi dışında kalan koşullarda genelleme yapma kapasiteleri sınırlı olabileceğinden, performans düşüklüğü yaşanabilmektedir. Ayrıca, söz konusu modeller genellikle “kara kutu” yapısına sahip olduklarından, elde edilen çıktılar ve model kararlarının yorumlanabilirliği oldukça düşüktür. Bununla birlikte, özellikle karmaşık yapıya sahip modellerde aşırı öğrenme (overfitting) riski ortaya çıkmakta; bu durum, modelin yalnızca eğitim verisine uyum sağladığı, ancak yeni veri karşısında yeterli genelleme yapamadığı anlamına gelmektedir.

Fan vd. (2019) çalışmasında veri odaklı modellerin özellikle geçmiş enerji tüketim profilleri ile meteorolojik koşullar arasındaki karmaşık etkileşimleri modellemede etkili olduğunu, ancak yapısal değişiklikler veya büyük operasyonel farklılıklar durumunda yeniden kalibre edilmeleri gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

(iii) Gri kutu modelleri; fizik tabanlı ve veri odaklı yaklaşımların avantajlarını birleştirerek hibrit bir metodoloji sunan modellerdir. Bourdeau vd.nin (2019) tanımıyla, bu modeller hem fiziksel prensiplere dayalı modellerin teorik sağlamlığını hem de veri odaklı modellerin esnekliğini bir araya getirerek daha kapsamlı ve doğru tahminler yapabilmektedir.

Chen vd. (2022), gri kutu modellerinin genellikle iki temel yaklaşımda uygulandığını belirtmektedir. Bunlardan ilki fiziksel model üzerinde veri düzeltmesi yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, önce fizik tabanlı bir model çalıştırılmakta, ardından gerçek ölçümler ile model tahminleri arasındaki farklar, bir veri odaklı algoritma ile düzeltilmektedir. Diğer bir yaklaşım ise basitleştirilmiş fiziksel modele veri desteği sağlanmasına yöneliktir. Bu yaklaşımda basitleştirilmiş fiziksel modeller kullanılmakta ve belirsiz parametreler veri odaklı yöntemlerle kalibre edilmektedir. Li vd. (2021), gri kutu modellerin birtakım önemli avantajlara sahip olduğunu belirtmiştir. Bu modeller, fiziksel olarak anlamlı ve yorumlanabilir sonuçlar üretebilmekte, daha az detaylı veri ile çalışabilmekte ve model parametrelerinin fiziksel anlamlarını koruyabilmektedir. Ayrıca, tahmin güvenilirliğini artırmaları ve beklenmedik koşullarda dahi makul öngörüler sunabilmeleri, söz konusu modellerin uygulama alanlarını genişletmektedir. El-Gohary (2018) ise, gri kutu modellerin özellikle bina otomasyon sistemleri ve enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde etkili bir araç olduğunu ve gerçek zamanlı kontrol ile optimizasyon için uygun bir çerçeve sunduğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, gri kutu modellerin geliştirilmesi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Li ve Wen (2014), bu modellerin hem fiziksel sistem bilgisi hem de veri analitiği konularında uzmanlık gerektirdiğini ifade etmiş; ayrıca, her bina için model yapısının özgün olarak belirlenmesi gerektiğini ve bu durumun modelleme sürecini daha karmaşık hale getirdiğini belirtmiştir.

Bina enerji tüketiminin tahmininde, tahmin ufku (öngörü periyodu) modelin tasarımı, veri gereksinimi ve uygulama alanını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Literatürde, tahmin ufku genellikle kısa, orta ve uzun vadeli yük tahmini olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır.

Kısa vadeli yük tahmini (Short term load forecasting – STLF): Bir saat ile bir hafta arasındaki zaman dilimini kapsayan tahminleri içermektedir. Khan vd. (2020) ile Rahman vd. (2018), STLF modellerinin özellikle günlük operasyonların planlanması, talep yanıt stratejilerinin uygulanması ve enerji tüketiminin gerçek zamanlı optimizasyonunda kritik rol oynadığını belirtmiştir. STLF modelleri, genellikle yüksek çözünürlüklü (saatlik veya daha kısa) veri gerektiren ve meteorolojik faktörlerin yanı sıra kullanıcı davranış kalıplarını da dikkate alan modeller olarak ifade edilmektedir.

Orta vadeli yük tahmini (Mid term load forecasting – MTLF): Bir hafta ile bir yıl arasındaki periyodu kapsayan tahminleri içermektedir. Abu-Shikhah ve Elkarmi (2011), MTLF modellerinin mevsimsel değişimler, tatil dönemleri ve orta vadeli enerji talep değişimleri gibi faktörlerden etkilendiğini ve bu modellerin özellikle bakım planlaması, bütçeleme ve enerji tedariki stratejilerinin geliştirilmesinde önemli olduğunu vurgulamıştır.

Uzun vadeli yük tahmini (Long term load forecasting – LTLF): Bir yıldan daha uzun süreli tahminleri kapsamaktadır. Esteves vd. (2015) çalışmasında, LTLF modellerinin enerji piyasası planlaması, altyapı yatırımları ve stratejik enerji politikalarının geliştirilmesinde önemli olduğunu belirtmektedirler. Bu modellerin demografik değişimler, ekonomik faktörler, teknolojik gelişmeler ve politika değişiklikleri gibi makro trendleri de dikkate alması gerektiği vurgulanmalıdır.

Wang vd. (2018) ile Ma vd. (2019) çalışmaları göstermiştir ki, tahmin ufkunun uzunluğu arttıkça model belirsizliği de artmakta, bu da daha karmaşık algoritmaların ve daha fazla açıklayıcı değişkenin modele dahil edilmesini gerektirmektedir. Kısa vadeli tahminlerde, LSTM ve CNN gibi derin öğrenme modelleri ile RF gibi topluluk (ensemble) tabanlı makine öğrenimi yöntemleri yüksek doğruluk sağlamaktadır. Ancak,

orta ve uzun vadeli tahminlerde makroekonomik göstergeler ile sosyo-demografik faktörleri de dikkate alan hibrit model yaklaşımlarının daha etkili sonuçlar verdiği görülmektedir. Tahmin ufkunun seçimi, modelin kullanım amacına ve elde edilebilecek veri türlerine bağlı olarak değişmektedir. Operasyonel optimizasyon ve günlük yönetim için STLF, bütçe planlaması ve mevsimsel stratejiler için MTLF, stratejik planlama ve yatırım kararları için LTLF modelleri daha uygundur.

Enerji tüketimi tahmin modellerinin performansı, kullanılan verilerin kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Ham veriler genellikle eksik değerler, aykırı değerler, gürültü ve tutarsızlıklar içerir ve model doğruluğunu etkiler (Gudivada vd. 2017). Bu nedenle veri ön işleme adımları, tahmin modellerinin geliştirilmesinde kritik bir aşamayı oluşturmaktadır. Literatürde aykırı değer tespiti ve arındırma, eksik değerlerin ele alınması, ölçeklendirme (normalizasyon, standardizasyon vb.) ve kategorik verilerin sayısallaştırılması olmak üzere dört temel veri ön işleme yöntemi öne çıkmaktadır.

Aykırı değer tespiti ve arındırma: Liu vd. (2020), enerji tüketim verilerindeki aykırı değerlerin tespit edilmesi ve ele alınması için Yerel Aykırı Değer Faktörü (Local Outlier Factor) yöntemini kullanmıştır. Araştırmacılar aykırı değerlerin arındırılmasının model performansını %15'e kadar artırabildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Wang vd. (2018), Z-skor ve Interquartile Range (IQR) yöntemlerini kullanarak aykırı değerleri tespit etmiş ve bu değerleri ya çıkararak ya da daha makul değerlerle değiştirerek model doğruluğunu artırmıştır.

Eksik/kayıp gözlemlerin incelenmesi: Pazhoohesh vd. (2021), bina enerji tüketimi veri setlerindeki eksik değerleri ele almanın üç ana yaklaşımını (i) eksik verilerin imputasyonu, (ii) eksik verilerin değiştirilmesi ve (iii) eksik veri içeren kayıtların silinmesi şeklinde karşılaştırmışlardır. Çalışmada, özellikle zamansal bağımlılık içeren veri setlerinde, lineer enterpolasyon, hareketli ortalama ve k-En Yakın Komşuluk Algoritması (k-NN) gibi imputasyon yöntemlerinin daha etkili sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Zeng vd. (2019), altı farklı bina için enerji tüketim verilerindeki eksik değerleri tamamlamak üzere doğrusal enterpolasyon kullanmış ve bu yöntemin model performansını önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir.

Normalizasyon/Ölçeklendirme: Wen vd. (2020), min-max normalizasyonu kullanarak enerji tüketim verilerini 0-1 aralığına dönüştürmüş ve bu işlemin özellikle gradyan tabanlı öğrenme algoritmalarının yakınsama hızını artırdığını göstermiştir. Fan vd. (2017), farklı ölçeklendirme yöntemlerinin (Min-max, Z-score, Decimal scaling) model performansına etkisini karşılaştırmış ve özellikle derin öğrenme modellerinde normalizasyonun kritik öneme sahip olduğunu vurgulamıştır.

Veri ön işleme yöntemlerinin seçimi, veri karakteristiklerine, model tipine ve tahmin amacına bağlı olarak değişmektedir. Wei vd. (2018), veri setinin boyutu, eksik değerlerin dağılımı, aykırı değerlerin oranı ve değişkenler arasındaki ilişkilerin, uygun ön işleme stratejisinin belirlenmesinde dikkate alınması gereken faktörler olduğunu vurgulamıştır. Amasyali ve El-Gohary (2018), kapsamlı bir literatür incelemesinde, uygun veri ön işleme tekniklerinin uygulanmasının, model performansını %10-30 arasında artırabileceğini ortaya koymuştur. Son olarak Sun vd. (2020), veri ön işleme aşamasının, özellikle büyük ve heterojen veri setlerinde, model geliştirme sürecinin en zaman alıcı ve emek yoğun kısmı olabileceğini, ancak bu aşamadaki titizliğin, modelin nihai performansını belirleyen en kritik faktörlerden biri olduğunu vurgulamıştır.

2.1.3 Performans değerlendirme ölçütleri

Enerji tüketimi tahmin modellerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için çeşitli performans metriklerinin kullanılması, model seçimi ve iyileştirme süreçlerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Khalil vd. (2022), literatürde en yaygın kullanılan performans değerlendirme ölçütlerini kapsamlı bir şekilde incelemiş ve bunların farklı modelleme yaklaşımlarına uygunluğunu tartışmıştır. Literatürde sıklıkla kullanılan performans metrikleri ve bunların özellikleri özetlenmektedir (Çizelge 2.3). Buna göre özetlenen performans metrikleri, farklı modellerin değerlendirilmesinde ve karşılaştırılmasında temel bir araçtır. Ancak tek bir ölçütün modeli temsil etme ve kapsama yönleri göz önünde bulundurulduğunda kapsamlı bir değerlendirme için birden fazla metriğin bir arada kullanılması önerilmektedir.

Çizelge 2.3 Enerji tüketimi tahmin modellerinde kullanılan performans değerlendirme ölçütleri (Khalil vd. 2022)

Ölçüt	Açıklama	Avantajlar	Sınırlılıklar	Optimal Kullanım Alanları
Root Mean Squared Error (RMSE)	Tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının kareköküdür	-Büyük hataları daha çok cezalandırır -Orijinal veri biriminde ifade edilir -Orijinal veri biriminde ifade edilir -İstatistiksel anlamı açıktır	-Aykırı değerlere duyarlıdır -Farklı ölçeklerdeki verilerde karşılaştırma için uygun değildir	-Büyük sapmaların önemli olduğu durumlar -Hata dağılımının normal olduğu durumlar
Mean Absolute Error (MAE)	Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasıdır	-Aykırı değerlere daha az duyarlıdır -Yorumlanması kolaydır -Orijinal veri biriminde ifade edilir	-Tüm hatalara eşit ağırlık verilir -Hataların yönünü göstermez	-Aykırı değerlerin olduğu veri setleri -Hataların mutlak büyüklüğünün önemli olduğu durumlar
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	Gerçek değerlere göre mutlak yüzde hataların ortalamasıdır	-Farklı ölçeklerdeki verileri karşılaştırmaya uygundur -Yüzde olarak ifade edildiği için yorumlanması kolaydır	-Gerçek değer in sıfır veya sıfıra yakın olduğu durumlarda tanımsızdır -Düşük değerlerde aşırı cezalandırma yapabilir	-Farklı veri setleri arasında karşılaştırma -Nispi hata önemli olduğunda
Coefficient of Determination (R^2)	Modelin açıkladığı varyansın toplam varyansa oranını gösteren istatistiksel ölçüdür	-0-1 arasında normalize edilmiştir -Model uyumunun genel bir ölçüsüdür -Yaygın olarak bilinir ve anlaşılır	-Regresyon modeli dışında kullanıldığında yanıltıcı olabilir -Model karmaşıklığını dikkate almaz	-Doğrusal regresyon modelleri -Açıklanan varyansın önemli olduğu durumlar
Coefficient of Variance of RMSE (CV-RMSE)	RMSE'nin verilerin ortalamasına oranının yüzde olarak ifadesidir.	-Farklı ölçeklerdeki verileri karşılaştırmaya uygundur -ASHRAE Guideline 14 gibi standartlarda kabul edilmiştir	-Ortalama değeri düşük olan verilerde yanıltıcı olabilir	-Farklı büyüklükteki veriler arasında karşılaştırma -Bina enerji modellerinin kalibrasyonu
Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE)	RMSE'nin veri aralığına bölünmesi ile elde edilir	-Farklı ölçeklerdeki verileri karşılaştırmaya uygundur -0-1 arasında normalize edilmiştir	-Aykırı değerlerden etkilenebilir	-Farklı veri setleri arasında karşılaştırma -Veri aralığının önemli olduğu durumlar
Mean Relative Error (MRE)	MAE'nin gerçek değerlere oranının ortalamasıdır	-Nispi hata ölçüsü sağlar -Farklı ölçeklerde karşılaştırmaya uygundur	-Gerçek değer in sıfır veya sıfıra yakın olduğu durumlarda tanımsızdır	-Yüzde cinsinden hata önemli olduğunda -Farklı büyüklükteki veriler arasında karşılaştırma

Yukarıdaki tabloda özetlenen performans metrikleri, farklı modellerin değerlendirilmesinde ve karşılaştırılmasında kritik rol oynamaktadır. Ancak tek bir ölçütün modeli temsil etme ve kapsama yönleri göz önünde bulundurulduğunda kapsamlı bir değerlendirme için birden fazla metriğin bir arada kullanılması önerilmektedir.

Fan vd. (2017) ve Wang vd. (2018), model karşılaştırmalarında en az bir mutlak hata metriği (RMSE veya MAE) ve bir rölatif hata metriği (MAPE veya CV-RMSE) kullanmanın daha kapsamlı bir değerlendirme sağladığını vurgulamıştır. Benzer şekilde Runge ve Zmeureanu (2021), farklı tahmin ufuklarına ve veri karakteristiklerine sahip modeller için farklı metriklerin daha uygun olabileceğini belirtmiştir.

Performans metriklerinin seçimi, model kullanım amacı ve uygulama alanına göre değişmektedir. Örneğin, ASHRAE Guideline 14 gibi bina enerji performansı standartları, model kalibrasyonu için CV-RMSE ve NMBE (Normalized Mean Bias Error) metriklerine odaklanırken; Khalil vd. (2022), gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için MAE ve MAPE'nin daha uygun olduğunu belirtmiştir. Son olarak Amasyali ve El-Gohary (2018), tahmin modellerinin doğruluğunu değerlendirmenin yanı sıra hesaplama verimliliği, yorumlanabilirlik, adaptasyon yeteneği ve genelleştirilebilirlik gibi niteliksel faktörlerin de model seçiminde dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

2.1.4 Tahmin yöntemleri ve karşılaştırmalı değerlendirme

Bina enerji tüketiminin tahmininde kullanılan algoritma ve teknikler, zaman içinde önemli bir evrim geçirmiştir. Khalil vd. (2022)'nin kapsamlı incelemesine göre, literatürde en yaygın kullanılan teknikler arasında Random Forest (RF), Destek Vektör Regresyonu (SVR), Yapay Sinir Ağları (ANN), Uzun-Kısa Dönemli Bellek (LSTM), Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN), Konvolüsyon Sinir Ağları (CNN), Doğrusal Regresyon (LR) ve Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama (ARIMA) gelmektedir. Bu tekniklerin çeşitli güçlü yanları, kısıtlılıkları bulunmakta ve optimal kullanım alanları ile karşılaştırmalı performansları değişiklik göstermektedir. Literatürdeki karşılaştırmalı çalışmalar, veri karakteristikleri, tahmin ufku ve uygulama senaryosuna bağlı olarak en uygun tekniğin değişebileceğini göstermektedir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 Binalarda enerji tüketiminde tahmin tekniklerinin karşılaştırılması (Khalil vd. 2022)

Teknik	Güçlü Yanlar	Kısıtlılıklar	Optimal kullanım alanları	Karşılaştırmalı performans
Random Forest (RF)	-Aşırı uyuma karşı dayanıklılık -Özellik önem sıralaması yeteneği -Yüksek boyutlu veri kümelerinde etkinlik -Doğrusal olmayan ilişkileri yakalama	-Yüksek sayıda ağaç gerektirdiğinde hesaplama maliyeti -Optimal ağaç sayısı belirleme zorluğu -Uzun vadeli bağımlılıkları modelleme güçlüğü	-Heterojen veri setleri -Özellik seçimi gerektiren durumlar -Orta vadeli tahminler	Wang vd. (2018): RF, SVR'den %5,5, regresyon ağacından %14-25 daha iyi performans göstermiştir.
Destek Vektör Regresyonu (SVR)	-Yüksek boyutlu uzayda çalışabilme -Sınırlı veri setlerinde bile iyi genelleme -Küresel optimum çözüm garantisi -Doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilme	-Büyük veri setlerinde hesaplama karmaşıklığı -Yorumlanabilirlik eksikliği -Kernel fonksiyonu seçiminin kritikliği -Hiperparametre optimizasyonu ihtiyacı	-Ota boyutlu veri setleri -Doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesi -Sınırlı eğitim verisi durumları	Fan vd. (2017): SVR, benzer koşullarda ANN'den %7-12 daha iyi performans göstermiştir.
Uzun-Kısa Dönemli Bellek (LSTM)	-Uzun vadeli bağımlılık yakalama -Kaybolan gradyan problemini çözme -Zamansal örüntüleri etkili modelleme -Değişken girdi-çıkı uzunluğu desteği	-Aşırı uyum riski -Yüksek sayıda parametre -Hesaplama yoğunluğu -Kompleks yapı ve uygulama zorluğu	-Uzun zaman serisi verileri -Karmaşık zamansal bağımlılıklar -Yüksek çözünürlüklü tahminler	Sehovac vd. (2019): LSTM, RNN ve GRU modellerinden %5-18 daha iyi performans göstermiştir.
Konvolüsyon Sinir Ağları (CNN)	-Otomatik özellik çıkarma -Paralel hesaplama yeteneği -Parametre paylaşımı ile verimlilik -Mekansal / zamansal ilişkileri yakalama	-Büyük eğitim seti gereksinimi -Yüksek parametre sayısı -Uygulama zorluğu -Yorumlanabilirlik eksikliği	-Çok değişkenli zaman serileri -Örüntü tanıma gereken durumlar -Görsel / mekânsal verilerle zengin modeller	Kim vd. (2019): CNN, geleneksel DNN'den %8-15, LSTM'den %3-7 daha iyi performans göstermiştir.
Doğrusal Regresyon (LR)	-Hesaplama verimliliği -Basit uygulama -Az parametre	-Doğrusal olmayan ilişkileri modelleyememe -Karmaşık etkileşim yakalayamama -Aykırı değerlere duyarlılık -Sınırlı esneklik	-Basit tahmin görevleri -Doğrusal ilişkili veriler -Ön analiz ve altlık oluşturma	Zhou vd. (2020): LR, basit veri setlerinde bile makine öğrenimi modellerinden %15-30 daha düşük performans göstermiştir.
ARIMA	-Zaman serisi bileşenlerini modelleyebilme -Az sayıda hiperparametre -İstatistiksel sağlamlık -Açık yorumlanabilirlik	-Mevsimsel bileşenleri doğrudan ele alamama -Aykırı değerlere hassasiyet -Dönüm noktalarını tahmin güçlüğü -Parametre optimizasyonu zorluğu	-Durağan zaman serileri -Kısa vadeli tahminler -Belirli periyodiklik gösteren veriler	Wen vd. (2020): ARIMA, düzenli örüntülere sahip verilerde iyi performans gösterirken, değişken koşullarda %20-35 performans düşüşü

Ahmad vd. (2018), derin öğrenme modellerinin (LSTM, CNN) özellikle büyük veri setleri ve karmaşık zamansal ilişkilerde üstün performans gösterdiğini, ancak sınırlı veri ve basit ilişkilerde daha geleneksel algoritmaların (RF, SVR) daha etkili olabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde Fan vd. (2019), tahmin ufkunun uzunluğunun model seçiminde kritik bir faktör olduğunu, kısa vadeli tahminlerde LSTM ve CNN'in, orta vadeli tahminlerde RF ve SVR'nin, uzun vadeli tahminlerde ise hibrit modellerin daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Tekli modellerden ziyade ensemble veya hibrit modellere yönelik çalışmalar da dikkat çekmektedir. Wang vd. (2018) ve Zhou vd. (2020), farklı algoritmaların güçlü yanlarını birleştiren ensemble yaklaşımların, tekli modellere göre daha yüksek doğruluk ve daha düşük varyansa sahip tahminler ürettiğini göstermiştir. Zhang vd. (2021), fizik tabanlı modeller ile veri odaklı modellerin entegrasyonunun, özellikle veri sınırlılığı olan durumlarda ve yeni inşa edilmiş binalarda etkili olabileceğini vurgulamıştır.

Tahmin tekniklerinin seçiminde doğruluk kadar hesaplama verimliliği, yorumlanabilirlik ve adaptasyon yeteneği de göz önünde bulundurulmalıdır. Thompson vd. (2020), özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda veya sınırlı hesaplama kaynakları olan ortamlarda, model karmaşıklığı ile performans arasında bir denge kurulması gerektiğini vurgulamıştır.

2.2 Maliyet Etkin Çok Amaçlı Optimizasyon

Binalarda enerji tüketimini optimize etmeyi amaçlayan çalışmalar genellikle detaylı bina parametreleri ve kapsamlı hesaplama süreçleri gerektirmektedir. Bu çalışmaların çoğu, EnergyPlus, TRNSYS ve benzer simülasyon yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen enerji analizlerine dayanmaktadır. Ancak bu modeller özellikle mevcut binalar için detaylı veriye erişim zorluğu, uzun hesaplama süreleri ve karmaşık parametre entegrasyonu gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Belirtilen hususlar göz önünde bulundurularak araştırma kapsamında bina enerji optimizasyonuna yönelik literatürdeki yöntemler, amaç fonksiyonları ve karar değişkenleri detaylı olarak incelenmiştir.

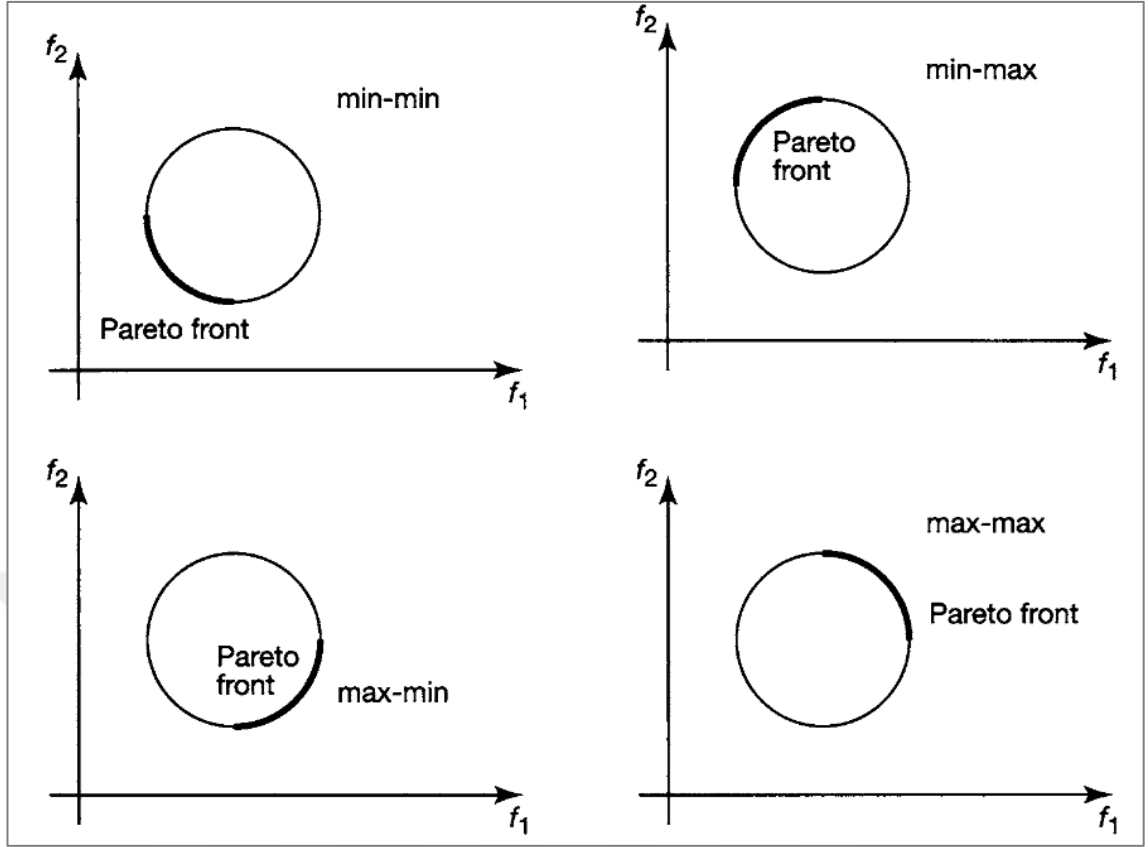
2.2.1 Çok amaçlı optimizasyon ve temel kavramlar

Tek amaçlı optimizasyon problemlerinde belirli bir hedefe yönelik en uygun çözüm elde edilmeye çalışılırken, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde aynı anda birden fazla amaç fonksiyonunun optimize edilmesi hedeflenmektedir. Ancak bu durumda, amaçların birbirleriyle çelişen doğası nedeniyle tek bir optimal çözüme ulaşmak genellikle mümkün olmamaktadır. Bunun yerine, her bir amacın belirli düzeyde tatmin edildiği, birbirine üstünlük sağlamayan (Pareto optimal) çözüm kümeleri elde edilmektedir.

Çok amaçlı optimizasyon modeli Eşitlik (2.1) ile ifade edildiğinde, modelin optimizasyonunda eğer, $f(x) \leq f(x^*)$ ve en az bir $j = 1, 2, \dots, r$ için $f_1(x) \leq f_1(x^*)$ olacak biçimde bir $x \in S$ yoksa, $x^* \in S$ Pareto çözüm (Pareto solution) olarak adlandırılır. Matematiksel olarak her Pareto çözüm, çok amaçlı optimizasyon modelinin aynı derecede kabul edilebilir bir çözümüdür. Çok amaçlı modelin optimizasyonunu karakterize eden Pareto çözümler, baskın çözümler olarak da ifade edilmektedir.

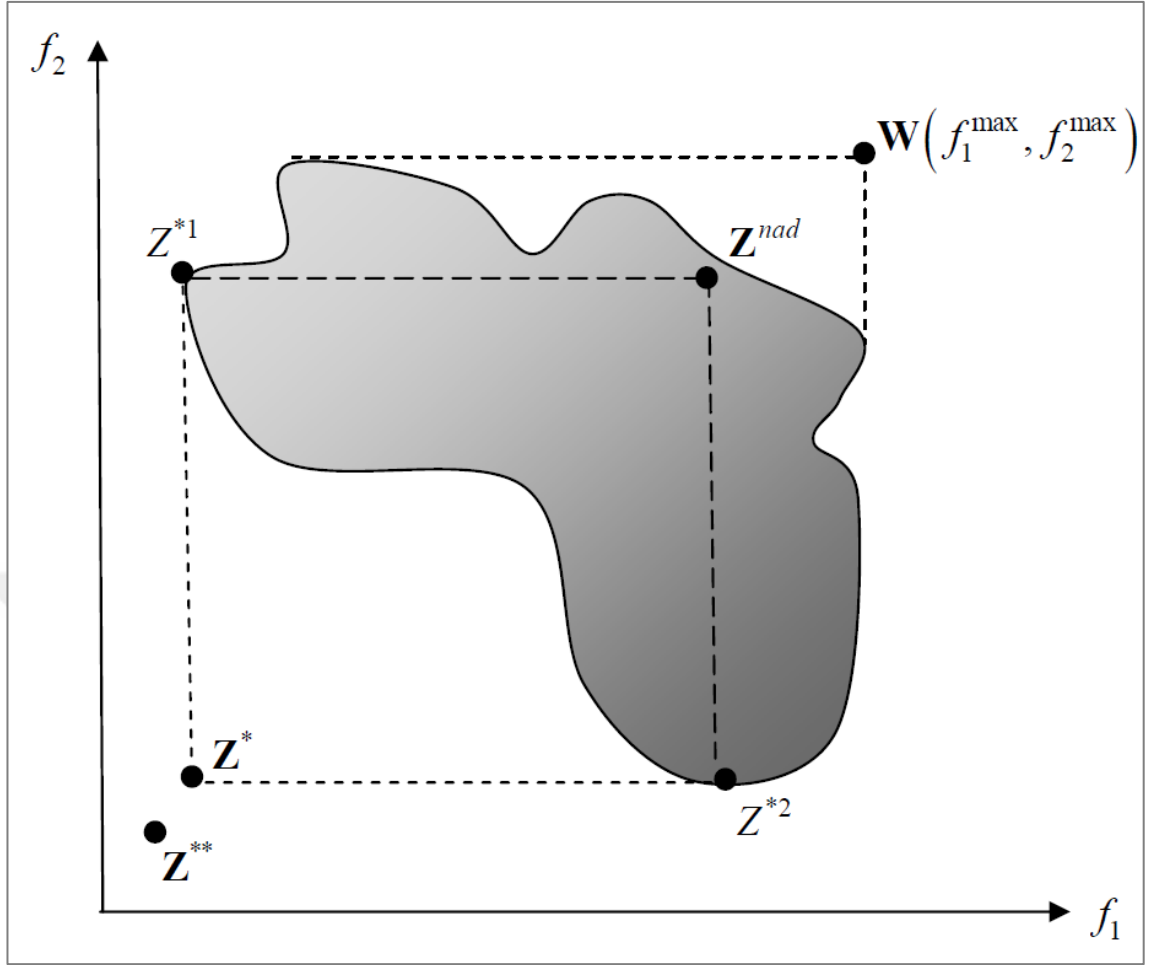
$$\min/\max f(x) = [f_1(x) \ f_1(x) \dots f_r(x)]^T \ x \in S \quad (2.1)$$

Baskın çözüm; çok amaçlı modelin optimizasyonunda, herhangi bir amaç fonksiyonu değerinde iyileşme sağlayan bir çözüm, diğer amaç fonksiyonlarının en az birinde herhangi bir bozulmaya neden olmuyorsa elde edilen çözüme baskın çözüm (non-dominated solution) olarak tanımlanmaktadır. Pareto çözüm kümesi her zaman baskın çözümlerden oluşmaktadır. Şekil 2.2’de $f_j: R^n \rightarrow R$, $j = 1, 2$ olmak üzere, optimal değeri elde edilmek istenen amaç fonksiyonu için amaç fonksiyonu uzayında olabilecek dört farklı durumda baskın çözümlerden oluşan Pareto yüzey (Pareto front) grafikleri gösterilmektedir. Sonlu sayıda elemana sahip bir çözüm kümesi için, tüm mümkün çözümler ikili karşılaştırılarak çözümler arasındaki baskınlık ya da basılgınlık ilişkisi ortaya konabilir.



Şekil 2.2 İki amaç fonksiyonu için olabilecek dört farklı durumda elde edilen Pareto yüzeyler (Türkşen 2023)

İdeal çözüm; ideal çözüm (ideal solution), matematiksel olarak her bir amaç fonksiyonu optimumdayken, amaç fonksiyonlarının optimal değerlerinin kesişim noktasında oluşur. Bu kesişim noktası genel olarak uygun çözüm alanının dışında kalır. Minimum değerleri elde edilmek istenen iki amaçlı bir problemin ideal çözüm noktası Z^* ile gösterilmiştir. Z^{*1} ve Z^{*2} noktaları, f_1 ve f_2 fonksiyonlarının optimal çözüm noktalarıdır. İdeal çözüm her bir amaç fonksiyonu için Pareto çözüm kümesinin bir alt sınırını tanımlamaktadır. Z^* ideal çözüm noktası, amaç uzayının dışında kalmıştır. Bu nedenle f_1 ve f_2 amaç fonksiyonlarını aynı anda optimum yapacak bir çözüm vektöründen söz edilmemektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 $\min\{f_1, f_2\}$ problemi için ideal çözüm (Z^*), optimal çözümler (Z^{*1} ve Z^{*2}), ütöfik çözüm (Z^{**}) ve nadir çözüm (Z^{nad}) (Türkşen 2011)

Uzlaşık çözüm; çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, klasik anlamda tek bir optimal çözümden söz etmenin mümkün olmadığı varsayımına dayanır. Bunun temel nedeni, birden fazla ve genellikle birbiriyle çelişen amaç fonksiyonlarının aynı anda en iyi şekilde optimize edilememesidir. Bu tür problemlerde, tüm amaç fonksiyonlarını eş zamanlı olarak en üst düzeyde tatmin eden bir çözüm, genellikle çözüm uzayı içinde bulunmamaktadır. Bu nedenle, çözüm sürecinde amaç fonksiyonları arasında denge kuran ve her birini kabul edilebilir düzeyde karşılayan bir *uzlaşık çözüm* (compromise solution) aranmaktadır. Uzlaşık çözümler, karar vericinin tercihlerini ve önceliklerini dikkate alarak, amaçlar arasında en uygun dengeyi kurmayı hedefler ve çok amaçlı optimizasyonun temel yaklaşımını oluşturmaktadır. Pareto çözüm kümesindeki alternatif baskın çözümler belirli bir önem sırasında incelenerek çok ölçütlü karar verme yöntemleri (multi-criteria decision making methods) ile uzlaşık çözüm elde edilmektedir. Uzlaşık

çözümün belirlenmesinde karar vericinin etkin rolü vardır. Çok amaçlı optimizasyonda grafik yöntem, klasik yöntemler ve metasezgisel yöntemler uygulanarak uzlaşık çözüm belirlenir (Türkşen 2023).

2.2.2 Karar değişkenleri

Bina enerji optimizasyonunda karar değişkenleri optimizasyon sürecinde değerleri belirlenerek enerji performansını ve diğer hedefleri etkileyen parametrelerdir. Literatür incelendiğinde bu değişkenler genellikle bina kabuğu, mekanik sistemler, yenilenebilir enerji ve kontrol stratejileri olmak üzere dört ana kategoride sınıflandırılabilir.

Bina kabuğu parametreleri: Bina kabuğu iç ve dış ortam arasındaki ara yüzey olarak, binanın enerji performansında belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde en yaygın kullanılan bina kabuğu parametreleri ise duvar yalıtımı, çatı yalıtımı, pencere özellikleri, termal kütle, gölgeleme elemanları ve hava sızdırmazlık olarak ifade edilmektedir.

Yang vd. (2017), duvar yalıtım kalınlığını 0-20 cm arasında değişen bir karar değişkeni olarak modellemişlerdir. Araştırmacılar farklı iklim bölgelerinde optimum yalıtım kalınlığının değiştiğini, soğuk iklimlerde daha kalın yalıtımın maliyet-optimal olduğunu göstermişlerdir. Benzer şekilde Ascione vd. (2017) yalıtım malzemesinin türünü (EPS, XPS, taş yünü vb.) ve kalınlığını optimizasyon değişkenleri olarak kullanmışlar ve malzeme seçiminin hem termal performans hem de maliyet üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Grygierek vd. (2018), çatı yalıtım kalınlığını 5-30 cm arasında değişen bir parametre olarak incelemişlerdir. Çalışma, çatı yalıtımının özellikle tek katlı binalarda ve son kat dairelerinde enerji performansı üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. He ve Zhang (2022), çatı yalıtımının kalınlığının yanı sıra yalıtım malzemesinin termal iletkenliğini de bir karar değişkeni olarak ele almışlar ve bu iki parametrenin eş zamanlı optimizasyonunun önemini vurgulamışlardır.

Azari vd. (2016), pencere-duvar oranını (window-wall ratio – WWR), cam türünü (U-değeri, SHGC, VT) ve çerçeve malzemesini optimizasyon değişkenleri olarak kullanmışlardır. Araştırmacılar bu parametrelerin bina yönelimi ile birlikte ele alındığında, enerji tüketimi üzerinde %10-25 arasında tasarruf potansiyeli sağlayabileceğini göstermişlerdir. Yaman (2025) ve Li ve Wu (2025), pencerelerin boyutu ve konumunu da içeren daha detaylı bir parametre seti kullanarak, görsel konfor ve enerji performansı arasındaki ödünleşimleri (trade-off) incelemişlerdir.

Wang ve Wei (2021) duvar malzemelerinin termal kapasitesini bir karar değişkeni olarak modellemişlerdir. Çalışma, özellikle gündüz-gece sıcaklık farkının yüksek olduğu iklimlerde, termal kütlenin enerji performansı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve uygun termal kütle seçiminin soğutma yüklerini %15'e kadar azaltabileceğini göstermiştir.

Elsheikh vd. (2023) sabit ve hareketli gölgeleme elemanlarının türünü, boyutunu ve kontrol stratejisini optimizasyon değişkenleri olarak ele almışlardır. Araştırmacılar, özellikle sıcak iklimlerde, uygun gölgeleme stratejisinin soğutma yüklerini %20-35 arasında azaltabileceğini ve görsel konfor koşullarını iyileştirebileceğini vurgulamışlardır.

Ferrara vd. (2019) bina kabuğunun hava sızdırmazlık düzeyini (infiltrasyon oranı) bir karar değişkeni olarak incelemişlerdir. Çalışma özellikle soğuk iklimlerde, infiltrasyonun azaltılmasının ısıtma enerjisi tüketimini önemli ölçüde düşürdüğünü, ancak bunun iç hava kalitesi ile dengeli bir şekilde ele alınması gerektiğini göstermiştir.

Mekanik sistem parametreleri: Mekanik sistemler binanın iç ortam koşullarını kontrol etmek ve kullanıcı konforunu sağlamak için gerekli enerjiyi yöneten sistemlerdir. Literatürde yaygın olarak kullanılan mekanik sistem parametreleri HVAC sistemleri, ekipman verimliliği, havalandırma stratejileri, sıcak ayar noktaları ve zaman çizelgeleri olarak belirtilmiştir.

HVAC Sistem Türü: He ve Zhang (2022) farklı HVAC sistem türlerini (VRF, fan-coil, radyant ısıtma/soğutma vb.) bir karar değişkeni olarak ele almışlardır. Araştırmacılar sistem seçiminin bina enerji performansını %25-40 arasında etkileyebileceğini ve optimum sistemin bina kullanım profili ve iklim koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir.

Ekipman Verimliliği: Wang ve Wei (2021) ısıtma ve soğutma ekipmanlarının verimlilik katsayılarını (COP) optimizasyon parametreleri olarak kullanmışlardır. Çalışma, yüksek verimli ekipmanların ilk yatırım maliyetleri daha yüksek olmasına rağmen, yaşam döngüsü maliyeti açısından genellikle daha avantajlı olduğunu ve özellikle yoğun kullanımlı binalarda kısa geri ödeme sürelerine sahip olabileceğini vurgulamıştır.

Havalandırma Stratejileri: Guardigli vd. (2018) havalandırma debisi, ısı geri kazanım verimliliği ve taze hava oranını optimizasyon değişkenleri olarak modellemişlerdir. Araştırmacılar, ısı geri kazanım sistemlerinin özellikle soğuk iklimlerde enerji tasarrufu potansiyelinin yüksek olduğunu, ancak sıcak ve nemli iklimlerde dikkatli bir şekilde tasarlanması gerektiğini göstermişlerdir.

Sıcaklık Ayar Noktaları: Semprini vd. (2017) ısıtma ve soğutma için sıcaklık ayar noktalarını karar değişkenleri olarak ele almışlardır. Çalışma, ayar noktalarındaki küçük değişikliklerin ($\pm 1-2^{\circ}\text{C}$) bile enerji tüketimini %5-15 arasında etkileyebileceğini ve adaptif konfor yaklaşımlarının enerji tasarrufu potansiyelini artırabileceğini vurgulamıştır.

Zaman Çizelgeleri: Qavidelfardi vd. (2022) HVAC sistemlerinin çalışma saatleri ve modlarını optimizasyon değişkenleri olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, özellikle değişken kullanım profiline sahip binalarda, enerji tüketimini %10-20 arasında azaltabilen dinamik zaman çizelgeleri geliştirmişlerdir.

Yenilenebilir enerji parametreleri: Yenilenebilir enerji sistemleri, binaların enerji ihtiyacını sürdürülebilir kaynaklardan karşılayarak, karbon emisyonlarını ve enerji

maliyetlerini azaltmaktadır. Literatürde ele alınan başlıca yenilenebilir enerji parametreleri fotovoltaik sistemler, rüzgâr türbinleri, ısı pompaları, solar termal sistemler ve enerji depolama olarak belirtilmektedir.

Fotovoltaik (PV) Sistemler: Ferrara vd. (2019) PV panel tipini, kapasitesini, yerleşimini ve yönelimini optimizasyon değişkenleri olarak ele almışlardır. Araştırmacılar, uygun panel yerleşimi ve yöneliminin, sistem verimini %15-25 arasında artırabileceğini ve özellikle enerji fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde ekonomik fizibiliteyi iyileştirebileceğini göstermişlerdir.

Rüzgâr Türbinleri: Elbeltagi vd. (2022) küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin kapasitesini ve yerleşimini optimizasyon değişkenleri olarak incelemişlerdir. Çalışma, rüzgâr türbinlerinin özellikle ortalama rüzgâr hızının 4 m/s'nin üzerinde olduğu bölgelerde maliyet-etkin olabileceğini, ancak gürültü ve estetik faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Isı Pompaları: Tagliabue vd. (2018) farklı ısı pompası türlerini (hava kaynaklı, toprak kaynaklı, su kaynaklı) ve kapasitelerini optimizasyon değişkenleri olarak modellemişlerdir. Araştırmacılar, ısı pompalarının özellikle elektrik-doğalgaz fiyat oranının düşük olduğu bölgelerde ve iyi yalıtılmış binalarda maliyet-etkin olduğunu göstermişlerdir.

Güneş Termal Sistemler: Yang vd. (2017) güneş kolektörlerinin alanını, tipini ve depolama tanklarının kapasitesini optimizasyon parametreleri olarak ele almışlardır. Çalışma, güneş termal sistemlerin özellikle sıcak su ihtiyacının yüksek olduğu binalarda (oteller, hastaneler vb.) ekonomik açıdan fizibil olduğunu ve geleneksel sistemlere göre %40-60 arasında enerji tasarrufu sağlayabileceğini vurgulamıştır.

Enerji Depolama: Wang ve Wei (2021) termal ve elektriksel enerji depolama sistemlerinin kapasitesini ve kontrol stratejilerini karar değişkenleri olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, depolama sistemlerinin özellikle yenilenebilir enerji

kaynaklarının entegrasyonunda ve talep yanıt programlarında kritik rol oynadığını, puant yük talebini %15-30 arasında azaltabileceğini göstermişlerdir.

Kontrol stratejisi parametreleri: Kontrol stratejileri bina sistemlerinin işletilmesini yöneten ve enerji tüketimi ile kullanıcı konforu arasındaki dengeyi sağlayan parametrelerdir. Literatürde ele alınan başlıca kontrol stratejisi parametreleri sensör yerleşimi, kontrol algoritmaları, zaman programları ve talep yanıt stratejileri başlıkları altında toplulaştırılabilmektedir.

Sensör Yerleşimi: Brambilla vd. (2018) sıcaklık, nem, CO₂ ve aydınlatma sensörlerinin sayısını ve yerleşimini optimizasyon değişkenleri olarak ele almışlardır. Araştırmacılar, uygun sensör yerleşiminin hem kontrol doğruluğunu hem de enerji verimliliğini artırabileceğini, özellikle büyük ve değişken kullanım profiline sahip binalarda önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Kontrol Algoritmaları: Irulegi vd. (2017) farklı kontrol algoritmalarını (PID, yapay zekâ tabanlı, model öngörülü kontrol vb.) karar değişkenleri olarak incelemişlerdir. Çalışma gelişmiş kontrol algoritmalarının, özellikle dinamik işletme koşullarında ve değişken çevresel faktörler altında, enerji tüketimini %10-25 arasında azaltabileceğini göstermiştir.

Zaman Programları: Fotopoulou vd. (2018) ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemlerinin zaman programlarını optimizasyon değişkenleri olarak modellemişlerdir. Araştırmacılar özellikle karma kullanımlı binalarda, kullanım profiline göre uyarlanmış zaman programlarının enerji tüketimini %5-15 arasında azaltabileceğini vurgulamışlardır.

Talep Yanıt Stratejileri: He ve Zhang (2022) enerji fiyatlandırması ve talep yanıt programlarına göre sistem işletme stratejilerini karar değişkenleri olarak ele almışlardır. Çalışma talep yanıt stratejilerinin, enerji maliyetlerini %10-20 arasında azaltabileceğini ve şebeke esnekliğine katkıda bulunabileceğini göstermiştir.

Karar değişkenlerinin entegrasyonu ve etkileşimleri: Bina enerji optimizasyonunda farklı kategorilerdeki karar değişkenlerinin entegrasyonu ve aralarındaki etkileşimler, optimizasyon sürecinin karmaşıklığını artırmakta, ancak potansiyel enerji tasarrufunu da maksimize etmektedir.

Azari vd. (2016) farklı karar değişkenleri arasındaki etkileşimleri inceledikleri çalışmada, izole optimizasyon yaklaşımlarına kıyasla, entegre optimizasyon yaklaşımlarının %15-30 daha yüksek enerji tasarrufu ve %10-25 daha düşük yaşam döngüsü maliyeti sağlayabileceğini göstermişlerdir. Benzer şekilde Wang ve Wei (2021) bina kabuğu ve mekanik sistem parametrelerinin eş zamanlı optimizasyonunun, bu parametrelerin ayrı ayrı optimizasyonuna göre daha etkin sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır.

Elsheikh vd. (2023) alışmalarında farklı iklim bölgelerinde karar değişkenlerinin etkilerini karşılaştırdıkları çalışmada, soğuk iklimlerde ısı yalıtımı ve ısıtma sistemi verimliliğinin, sıcak iklimlerde ise gölgeleme elemanları ve soğutma sistemi stratejilerinin daha kritik parametreler olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu bulgular karar değişkenlerinin seçiminin ve önem derecesinin, iklim koşullarına, bina tipine ve kullanım profiline göre değişebileceğini ifade etmektedir.

Literatürdeki alışmalar karar değişkenlerinin sayısı, aralığı ve kısıtlamaları konusunda farklı yaklaşımlar sergilemektedir. Bazı alışmalar (Qavidelfardi vd. 2022) kısıtlı sayıda değişken ile daha basit optimizasyon modelleri oluştururken, diğerleri (rneğin, Yang vd. 2017) ok sayıda değişken ile daha kapsamlı optimizasyon modelleri geliştirmektedir. Değişken sayısının artması daha kapsamlı optimizasyon imkânı sağlarken, hesaplama karmaşıklığını ve çözüm süresi de artırmaktadır.

Yao vd. (2020) farklı karar değişkenlerinin optimizasyon sonuçları üzerindeki etkisini inceledikleri duyarlılık analizinde, pencere özellikleri, yalıtım kalınlığı ve HVAC sistem türünün, diğer parametrelere göre daha yüksek etki potansiyeline sahip olduğu bulgusuna ulaşmışlardır. Çalışma bulguları sınırlı kaynaklarla yürütülen optimizasyon çalışmalarında, hangi parametrelere öncelik verilmesi gerektiği konusunda rehberlik sağlaması bakımından önemlidir.

2.2.3 Amaç fonksiyonları

Bina enerji sistemlerinin optimizasyonunda kullanılan amaç fonksiyonları, optimize edilecek hedefleri matematiksel olarak tanımlayan ve farklı senaryoların sistematik değerlendirmesine olanak sağlayan temel bileşenler olarak tanımlanmaktadır. Literatürde ekonomik sürdürülebilirlikten çevresel etkilere, kullanıcı konforundan sistem verimliliğine uzanan çeşitli perspektifleri yansıtan amaç fonksiyonları geliştirilmiştir. Bu fonksiyonlar binaların enerji verimli dönüşümünde karar vericilerin önceliklerine göre tek başına veya kombine edilerek kullanılabilir. (2.2).

Ekonomik amaç fonksiyonları: Ekonomik amaç fonksiyonları, enerji verimliliği yatırımlarının finansal performansının değerlendirilmesinde kullanılan temel araçlardır. Bu fonksiyonlar genellikle maliyet minimizasyonu veya getiri maksimizasyonu prensipleriyle çalışmakta ve yatırımın farklı zaman ölçeklerinde ekonomik değerini modellemektedir. İlk yatırım maliyeti, bir enerji verimliliği projesinin uygulanması için gerekli başlangıç sermayesini temsil eden önemli bir ekonomik değişkendir. He ve Zhang (2022) tarafından geliştirilen modelde, ilk yatırım maliyeti aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir (2.2).

$$M_{ilk\ yatırım} = \sum_{i=1}^n Q_i P_i \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2)'de, Q_i uygulanacak i. yenileme önleminin miktar veya ölçüsünü (m^2 , adet, vb.), P_i ise bu önlemin birim fiyatını göstermektedir. İlk yatırım maliyetinin en aza indirilmesi, özellikle kısıtlı bütçe koşullarında veya finansal kaynakların optimum dağılımının hedeflendiği durumlarda büyük önem taşımaktadır. Ancak He ve Zhang (2022) yalnızca ilk maliyete odaklanan optimizasyon stratejilerinin, uzun vadede daha yüksek operasyonel maliyetlere ve dolayısıyla toplam sahip olma maliyetinde artışa neden olabileceğini de vurgulamıştır.

Binaların yaşam döngüsü boyunca en büyük ekonomik yükü genellikle işletme maliyetleri oluşturmaktadır. Wang ve Wei (2021), işletme maliyetlerini enerji tüketimi, bakım giderleri ve diğer periyodik harcamaları içerecek şekilde modellemişlerdir (2.3).

$$M_{operasyonel} = \sum_{i=1}^T \frac{E_n P_e^n + M_n}{(1+f)^n} \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'te E_n n. yıldaki toplam enerji tüketimini, P_e^n ilgili dönemdeki enerji birim fiyatını, M_n bakım ve diğer işletme giderlerini, f ise paranın zaman değerini yansıtan iskonto oranını temsil etmektedir. İskonto faktörünün dahil edilmesi gelecekteki maliyetlerin bugünkü değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanmasına ve böylece farklı zaman dilimlerindeki nakit akışlarının karşılaştırılabilir olmasına olanak tanımaktadır. Wang ve Wei (2021) enerji fiyatlarındaki artış trendinin ve bakım maliyetlerinin zamanla değişiminin modele dahil edilmesinin, özellikle uzun vadeli optimizasyon çalışmalarında kritik öneme sahip olduğunu belirtmektedir.

YDM, bir bina veya sistemin planlanan yaşam süresi boyunca ortaya çıkan tüm maliyetlerin kapsamlı bir değerlendirmesini sunan bütünleşik bir ekonomik göstergedir. Hamdy vd. (2017) yaşam döngüsü maliyetini aşağıdaki şekilde formüle etmiştir (2.4).

$$YDM = M_{ilk\ yatırım} + M_{operasyonel} + M_{bakım} - M_{artık} \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)'te önceki bileşenlere ek olarak, $M_{bakım}$ bina yaşam döngüsü boyunca yapılan periyodik ekipman yenileme ve büyük onarım maliyetlerini, $M_{artık}$ ise değerlendirme dönemi sonunda bina veya sistemlerin artık değerini (residual value) ifade etmektedir. YDM hem ilk yatırım hem de işletme maliyetlerini içeren kapsamlı bir değerlendirme sunarak, gerçek anlamda ekonomik açıdan optimum çözümlerin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Hamdy vd. (2017) çalışmalarında YDM optimizasyonunun enerji verimli bina tasarımı ve yenileme stratejilerinin belirlenmesinde, kısa ve uzun vadeli ekonomik performans arasında denge kurulmasına yardımcı olduğunu vurgulamışlardır.

Yatırımların ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir diğer parametre, geri ödeme süresidir. Di Giuseppe vd. (2017) iskonto edilmiş geri ödeme süresini (GÖS) aşağıdaki formülasyonla tanımlamıştır (2.5).

$$GÖS = \min t : \sum_{n=0}^t \frac{S_n - C_n}{(1 + f)^n} \geq 0 \quad (2.5)$$

Burada S_i , i. yıldaki nakit girişlerini (enerji tasarrufları ve diğer gelirler), C_i , i. yıldaki nakit çıkışları (maliyetler) ve r ise iskonto oranını göstermektedir. DPP, iskonto edilmiş nakit akışlarının kümülatif toplamının pozitif geçtiği zaman noktasını belirleyerek, yatırımın kendisini ne kadar sürede amorti edeceğini göstermektedir. Tanrıvermiş (2016), geri ödeme süresinin optimizasyonunun özellikle bütçe kısıtları, yatırım riskleri ve likidite gereksinimleri açısından önemli olduğunu, ancak tek başına kullanıldığında yatırımın toplam ekonomik değerini yansıtmakta yetersiz kalabileceğini belirtmiştir.

Net Bugünkü Değer (NBD), bir yatırımın tüm yaşam döngüsü boyunca sağlayacağı nakit akışlarının, belirlenen bir iskonto oranı üzerinden bugüne indirgenmiş değerlerinin toplamı ile ilk yatırım maliyeti arasındaki farkı temsil eden kapsamlı bir ekonomik değerlendirme ölçütüdür (Tagliabue vd. 2018). NBD hesaplaması aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir (2.6).

$$NBD = \sum_{n=0}^N \frac{NNA_n}{(1 + r)^n} - M_{ilk\ yatırım} \quad (2.6)$$

Denklemden NNA_n n dönemindeki net nakit akışı (gelirler-giderler), N projenin toplam ekonomik ömrünü (dönem sayısı), $M_{ilk\ yatırım}$ da başlangıç yatırım tutarını temsil etmektedir. NBD'nin pozitif olması, yatırımın ekonomik açıdan kabul edilebilir olduğunu, negatif olması ise yatırımın maliyetini karşılamaya yetecek getiri sağlamadığını göstermektedir. Tagliabue vd. (2018) NBD maksimizasyonunun, farklı enerji verimliliği senaryoları arasında ekonomik açıdan en avantajlı olanların belirlenmesinde güçlü bir araç olduğunu ve özellikle alternatif yatırım fırsatlarının değerlendirildiği durumlarda önem taşıdığını vurgulamıştır.

Literatür incelendiğinde ekonomik amaç fonksiyonlarının genellikle birbirini tamamlayıcı nitelikte olduğu ve kapsamlı bir değerlendirme için birden fazla ölçütün bir arada kullanılmasının daha sağlıklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca ekonomik parametrelerin optimizasyonunda enerji fiyatları, iskonto oranları, enflasyon ve diğer makroekonomik faktörlerdeki belirsizliklerin de dikkate alınması, model güvenilirliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Çevresel amaç fonksiyonları: Çevresel sürdürülebilirlik perspektifinin giderek daha fazla önem kazanmasıyla birlikte, bina enerji sistemlerinin optimizasyonunda çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve en aza indirilmesi temel hedeflerden biri olarak öne çıkmaktadır. Çevresel amaç fonksiyonları, binaların enerji tüketimi, karbon emisyonları, malzeme kullanımı ve genel ekolojik ayak izi gibi çevresel performans göstergelerinin matematiksel olarak modellendiği ve optimize edildiği fonksiyonlardır.

Enerji tüketimi binaların çevresel etkilerinin en temel göstergelerinden biridir ve literatürde sıklıkla bir optimizasyon hedefi olarak kullanılmaktadır. Ascione vd. (2017), bina enerji tüketimini, farklı enerji kullanım kategorilerine ayrıştırarak aşağıdaki şekilde modellemişlerdir (2.7).

$$E = E_{heat} + E_{cool} + E_{light} + E_{equip} + E_{DHW} \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.7)'de E_{heat} ısıtma, E_{cool} soğutma, E_{light} aydınlatma, E_{equip} ekipman ve E_{DHW} sıcak su hazırlama için tüketilen enerjiyi temsil etmektedir. Ascione vd. (2017), enerji tüketiminin bu şekilde kategorilere ayrılarak modellendiğinde, farklı enerji kullanım alanlarındaki tasarruf potansiyelinin daha net görülebildiğini ve optimizasyon stratejilerinin bu doğrultuda daha etkin şekilde geliştirilebildiğini belirtmiştir. Ayrıca, farklı enerji türlerinin (elektrik, doğal gaz, vb.) birincil enerji denkliği üzerinden ifade edilmesi, enerji karışımının (energy mix) ve dönüşüm verimliliğinin de dikkate alınmasını sağlamaktadır.

Karbon emisyonları, enerji tüketiminin çevresel etkilerini daha doğrudan yansıtan ve özellikle iklim değişikliği bağlamında kritik öneme sahip bir göstergedir. Elsheikh vd. (2023), bina kaynaklı karbon emisyonlarını aşağıdaki denklemle ifade etmişlerdir (2.8).

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n E_i EF_i \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.8)'de, E_i i. enerji kaynağının tüketim miktarını, EF_i ise bu kaynağın emisyon faktörünü (birim enerji başına oluşan CO₂ miktarı) göstermektedir. Elsheikh vd. (2023) farklı enerji kaynaklarının emisyon faktörlerinin zaman ve bölgeye göre değişebileceğini, dolayısıyla lokal enerji üretim profilleri ve şebeke karakteristiklerinin dikkate alınmasının, emisyon hesaplamalarının doğruluğu açısından önemli olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik optimizasyon stratejilerinin, özellikle karbon vergileri, emisyon ticaret sistemleri ve net sıfır karbon hedefleri gibi politika araçlarının yaygınlaşmasıyla ekonomik optimizasyon hedefleriyle daha entegre hale geldiğini belirtmişlerdir.

Yapı malzemelerinin üretimi, taşınması, montajı ve nihai olarak bertarafı süreçlerinde harcanan enerji ve oluşan emisyonları ifade eden gömülü enerji/karbon, yaşam döngüsü perspektifinden binaların çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. Fotopoulou vd. (2018), gömülü enerjiyi aşağıdaki formülle modellemiştir (2.9).

$$EE = \sum_{i=1}^n M_i EE_i \quad (2.9)$$

Eşitlik (2.9)'da M_i i. malzemenin miktarını, EE_i ise bu malzemenin birim gömülü enerji değerini temsil etmektedir. Gömülü enerji/karbon, özellikle enerji verimli yenileme çalışmalarında, yenileme için kullanılan malzemelerin gömülü enerji/karbon değerlerinin, yenileme sonucu elde edilecek operasyonel enerji/karbon tasarruflarıyla karşılaştırılması ve net çevresel faydanın belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Fotopoulou vd. (2018), gömülü enerji/karbon optimizasyonunun, özellikle düşük enerji

ve pasif bina tasarımlarında, geleneksel enerji verimliliği stratejilerinin ötesinde, malzeme seçimi ve yapım tekniklerini de içeren daha bütüncül bir yaklaşım gerektirdiğini vurgulamıştır.

Enerji Kullanım Yoğunluğu (Energy Use Intensity - EUI), birim alan başına düşen enerji tüketimini ifade eden ve farklı büyüklükteki binaların enerji performanslarının karşılaştırılmasına olanak tanıyan normalize edilmiş bir göstergedir. Yang vd. (2017), EUI'yi aşağıdaki basit formülle tanımlamıştır (2.10).

$$EUI = \frac{E}{A} \quad (2.10)$$

Eşitlik (2.10)'da, E toplam enerji tüketimini, A ise bina alanını göstermektedir. Yang vd. (2017), EUI optimizasyonunun, özellikle farklı bina tipleri ve büyüklükleri için enerji verimliliği hedeflerinin standardize edilmesinde ve karşılaştırılmasında faydalı olduğunu, ayrıca bina yoğunluğunun ve kullanım şeklinin enerji tüketimi üzerindeki etkisini daha iyi anlamaya yardımcı olduğunu belirtmektedirler.

Çevresel amaç fonksiyonları, genellikle ekonomik fonksiyonlarla birlikte optimizasyon sürecine dahil edilmekte ve çevresel etkilerle ekonomik maliyetler arasındaki ödünleşimlerin (trade-offs) analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu entegre yaklaşım, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada hem ekonomik hem de çevresel açıdan optimum stratejilerin geliştirilmesini sağlamaktadır.

2.2.4 Çok amaçlı optimizasyonda baskınlık stratejileri ve ağırlıklandırma yaklaşımları

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde farklı amaç fonksiyonlarının göreceli önemleri, karar vericinin stratejik önceliklerine göre değişmektedir. Bu durumda, tek amaçlı baskınlık stratejileri ve dengeli ağırlıklandırma yaklaşımları, karar vericilere farklı senaryolar sunarak optimizasyon sürecinde esneklik sağlamaktadır.

Tek amaçlı baskınlık yaklaşımları, çok amaçlı optimizasyon problemini tek bir kriterin mutlak önceliği altında değerlendiren stratejilerdir. Cohon (2004), bu yaklaşımın özellikle karar vericinin net bir önceliğe sahip olduğu durumlarda etkili sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Enerji optimizasyonu bağlamında, ekonomik kısıtların kritik olduğu durumlarda maliyet minimizasyonu veya çevresel hedeflerin ön planda olduğu senaryolarda enerji tüketimi minimizasyonu gibi tek boyutlu yaklaşımlar tercih edilebilmektedir.

Eşit ağırlıklandırma stratejisi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. Marler ve Arora (2004), eşit ağırlık atanmasının özellikle amaç fonksiyonlarının benzer önem derecesine sahip olduğu durumlarda makul sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu yaklaşım, karar vericinin belirgin bir tercihi olmadığı veya tüm kriterleri eşit şekilde değerlendirmek istediği durumlarda dengeli çözümler sunmaktadır.

Baskınlık temelli senaryo seçimi yaklaşımları, farklı stratejik tercihlere göre optimal çözümlerin belirlenmesinde sistematik bir çerçeve sunmaktadır. Zeleny (1982), baskınlık kavramının çok amaçlı optimizasyonda matematiksel sağlamlık ve pratik uygulanabilirlik açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamıştır. Bu yaklaşımda her strateji kendi optimizasyon hedefine göre değerlendirilmekte ve karar vericiye alternatif çözüm seçenekleri sunulmaktadır.

Ağırlık belirleme sürecinde basitlik ve şeffaflık ilkeleri, özellikle uygulama odaklı çalışmalarda önem taşımaktadır. Keeney ve Raiffa (1993), karmaşık ağırlıklandırma yöntemlerinin pratikte uygulanabilirlik sorunları yaşayabileceğini ve basit yaklaşımların genellikle daha güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Bu nedenle deterministik tek kriter optimizasyonu ve eşit ağırlıklandırma gibi basit stratejiler hem hesaplama verimliliği hem de sonuç güvenilirliği açısından avantajlar sunmaktadır.

Normalizasyon ve skor hesaplama sistemleri, farklı birim ve ölçeklere sahip amaç fonksiyonlarının karşılaştırılabilir hale getirilmesinde temel rol oynamaktadır. Hwang ve Yoon (1981), normalizasyon tekniklerinin çok amaçlı optimizasyon sonuçlarını önemli

ölçüde etkileyebileceğini ve uygun yöntemin seçilmesinin kritik olduğunu vurgulamıştır. Min-max normalizasyonu gibi teknikler, uygulamada yaygın olarak tercih edilmekte ve güvenilir sonuçlar vermektedir.

Çok amaçlı optimizasyonda stratejik seçim yaklaşımları, karar vericilere farklı öncelik alanlarına göre seçim yapma esnekliği sunmaktadır. Steuer (1989), bu yaklaşımın özellikle belirsizlik koşulları altında ve çoklu paydaş ortamlarında etkili olduğunu göstermiştir. Bina enerji optimizasyonu gibi karmaşık uygulamalarda, farklı baskınlık stratejilerinin sunduğu alternatif çözümler, karar vericilerin çeşitli senaryoları değerlendirmesine ve en uygun stratejik yaklaşımı seçmesine olanak tanımaktadır.

Son yıllarda bina enerji optimizasyonunda farklı baskınlık stratejileri ve ağırlıklandırma yaklaşımları başarıyla uygulanmıştır. Yang vd. (2025), HVAC sistemlerinin optimizasyonunda enerji tüketimi ve termal konfor arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla ağırlıklı toplam yöntemini (Weighted Sum Method) kullanmışlardır. Çalışmada, çok amaçlı optimizasyon problemi tek amaçlı probleme dönüştürülerek Pareto frontu üzerinden tek bir çözüm seçilmiş ve bu yaklaşımın özellikle Model Öngörülü Kontrol (MPC) uygulamalarında etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Benzer şekilde, Guo vd. (2025) inşaat sahalarındaki geçici binalar için yürüttükleri çok amaçlı optimizasyon çalışmasında, farklı ağırlık katsayıları (a_1 , a_2) kullanarak enerji tüketimi ve kullanıcı konforu arasında dengeli çözümler elde etmişlerdir.

Tek amaçlı baskınlık stratejilerine yönelik uygulamalar da literatürde önemli yer tutmaktadır. Yang vd. (2024), yeşil binaların enerji tasarruflu tasarımında MOEA/D algoritmasını kullanarak enerji verimliliği ve konfor kriterlerini optimize etmiş, ancak karar verici tercihlerine göre tek kriterin önceliklendirildiği senaryoları da değerlendirmişlerdir. Qiao vd. (2023) ise entegre enerji sistemlerinin optimizasyonunda TOPSIS ve entropi ağırlık yöntemini birleştirerek çok kriterli karar verme sürecini desteklemiş, ekonomik, enerji tüketimi ve çevresel kriterler arasında hem tek amaçlı hem de dengeli optimizasyon stratejilerini karşılaştırmışlardır. Çalışmalar, pratik uygulamalarda basit ağırlıklandırma yaklaşımlarının karmaşık hibrit yöntemlere kıyasla daha güvenilir ve uygulanabilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

2.3 Bina Enerji Tüketimi Tahmin ve Optimizasyon Çalışmalarının Sistematik Analizi

Önceki bölümlerde (Bölüm 2.1 ve 2.2) enerji tüketimi tahmin yöntemleri ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları teorik çerçevede detaylı olarak incelenmiştir. Bölüm 2.1’de bina enerji tüketimi tahmininde kullanılan değişkenler, yöntemler ve performans ölçütleri ele alınmış, Bölüm 2.2’de ise çok amaçlı optimizasyon kavramları, karar değişkenleri ve amaç fonksiyonları irdelenmiştir. Bu bölümde söz konusu alanların güncel durumunu kapsamlı şekilde değerlendirmek, mevcut çalışmanın literatürdeki konumunu netleştirmek ve özgün katkı alanlarını belirlemek amacıyla sistematik literatür taraması sunulmaktadır. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında, bina sektörünün küresel enerji tüketimindeki %36’lık payının azaltılması, sürdürülebilir enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu gereksinim, veri odaklı tahmin modellerinin ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının entegre kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Son yıllarda makine öğrenmesi algoritmalarındaki gelişmeler, COVID-19 pandemisinin bina kullanım paternleri üzerindeki etkisi ve küresel sürdürülebilirlik hedeflerinin öncelik kazanması, bu alanda araştırma faaliyetlerini hızlandırmış ve disiplinler arası yaklaşımların önemini artırmıştır.

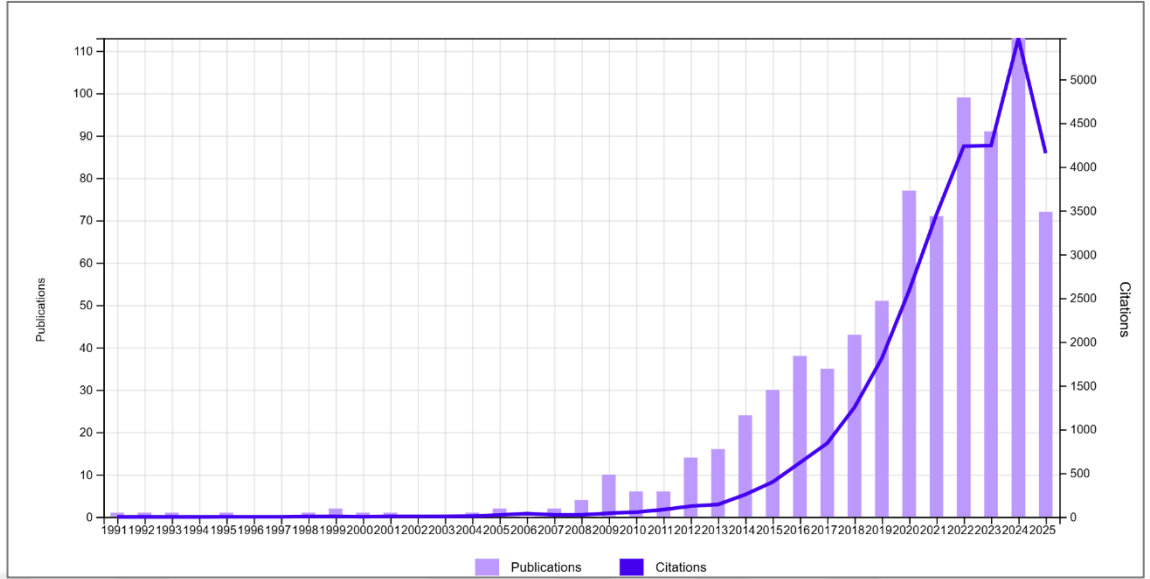
Araştırmada PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) kılavuzları doğrultusunda sistematik literatür taraması gerçekleştirilmiştir (Page vd. 2022). Çizelge 2.5’te sonuçları verilen sistematik literatür taramasında birincil veri kaynağı olarak Web of Science Core Collection veritabanı seçilmiş olup, bu tercih veritabanının yüksek etki faktörlü dergileri içermesi ve kapsamlı atıf analizi imkanları sunmasından kaynaklanmaktadır. Arama stratejisi, bina enerji tüketimi tahmin ve optimizasyon çalışmalarına odaklanan spesifik bir yaklaşım benimsenmiştir. Kullanılan arama formülü **TI=(("energy consumption*") AND ("predict*" OR "forecast*" OR "estimat*")) AND AB=("building*" OR "gray box" OR "grey box")** şeklinde tasarlanmış olup, başlıkta enerji tüketimi ve tahmin terminolojisini içeren, özetinde ise bina odaklı çalışmaları hedefleyen makalelerin sistematik olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Dahil etme kriterleri 2017-2025 yılları arasında yayınlanmış, İngilizce dilinde yazılmış, hakemli dergilerde yayınlanmış araştırma makaleleri ve derleme çalışmaları olarak belirlenmiştir. Özellikle bina enerji tüketimi tahmin modellemesi

odaklı çalışmalar ile makine öğrenmesi, istatistiksel modelleme veya hibrit yaklaşımlar içeren çalışmalar dahil edilmiştir. Hariç tutma kriterleri arasında konferans bildirileri, kitap bölümleri ve gri literatür, sadece teorik model önerileri içeren uygulama sonucu bulunmayan çalışmalar, bina dışı sektörlerle odaklanan enerji tüketim çalışmaları ve tekraren filtrelenen yayınlar yer almaktadır. İlk arama sonucunda toplamda 814 makale belirlenmiş, başlık ve özet incelemesi sonrasında 67 makale tam metin incelemesine alınmıştır.

Çizelge 2.5 Sistematik literatür taraması seçim aşamaları sonuçları

Aşama	Kriter	Makale Sayısı	Hariç Tutulan	Hariç Tutma Nedeni
İlk arama	TI= ("energy consumption") AND ("predict*" OR "forecast*" OR "estimat*") AND AB= ("building*" OR "gray box" OR "grey box")	814	-	-
Tarih filtresi	2017-2025 yılları	652	162	Tarih aralığı dışı yayınlar
Dil filtresi	İngilizce makaleler	634	18	İngilizce dışı dillerde yayınlar
Başlık incelemesi	Enerji tüketimi tahmini odaklı çalışmalar	287	347	Konu uygunluğu (endüstriyel süreçler, ulaştırma sektörü vb.)
Özet İncelemesi	Bina enerji optimizasyonu içeriği	156	131	Bina odaklı olmayan çalışmalar, teorik modeller
Tam metin incelemesi	Metolodolji ve sonuç kalitesi	89	67	Yetersiz metodoloji, sonuç eksikliği, veri erişimi sorunu

Analiz edilen literatürün zamansal dağılımı, bina enerji tüketimi tahmin alanında artan araştırma ilgisini net şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 2.4 üzerinde de görünen artış, kampüs ölçeğindeki çalışmaların sınırlılığı ile paralellik göstermektedir. 2017-2019 döneminde yıllık ortalama 43 yayın gözlenirken, 2020-2023 döneminde bu sayı 82 ve 2024-2025 döneminde ise 97 seviyesine ulaşmıştır ($p<0,05$). Bu artışın temel nedenleri arasında COVID-19 pandemisinin bina kullanım paternleri üzerindeki etkisi, makine öğrenmesi algoritmalarındaki gelişmeler ve sürdürülebilirlik hedeflerinin küresel düzeyde öncelik kazanması sayılabilir. 2020-2024 döneminde makine öğrenmesi uygulamalarında %98,85 yıllık artış gözlenmiş, bu da alanın hızla gelişmekte olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.4 Yıllara göre yayın sayısı ve atıf dağılımı

İncelenen çalışmalar, kullanılan metodolojik yaklaşımlara göre beş ana kategoride sınıflandırılmıştır. Yapılan sınıflandırma, fizik tabanlı (white box), veri odaklı (black box) ve gri kutu modelleri (grey-box) teorik çerçevesini destekler niteliktedir. Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar (n=496) derin öğrenme modelleri (LSTM, GRU, CNN), toplu öğrenme yöntemleri (Random Forest, Gradient Boosting) ve destek vektör makineleri ile varyasyonlarını içermektedir. İstatistiksel zaman serisi modelleri (n=154) ARIMA ve mevsimsel varyasyonları, exponential smoothing teknikleri ve VAR (Vector Autoregression) modellerini kapsamaktadır. Hibrit ve ensemble yaklaşımlar (n=205) makine öğrenmesi-istatistiksel hibrit modeller, çoklu model ensemble teknikleri ve adaptif hibrit sistemleri temsil etmektedir. Fiziksel model tabanlı yaklaşımlar (n=70) EnergyPlus entegrasyonları, ısı transfer modelleri ve Building Performance Simulation (BPS) uygulamalarını içerirken, optimizasyon entegreli modeller (n=210) genetik algoritma hibrit sistemleri, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) entegrasyonları ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarını kapsamaktadır.

Kamu binalarında gerçekleştirilen çalışmalar, kampüs ölçeğindeki araştırma eksikliğini doğrular nitelikte sınırlı sayıdadır (Han vd. 2022). Özellikle eğitim, sağlık ve devlet binalarının yoğun kullanım frekanslarından dolayı farklı dinamikler sergilediğini göstermektedir (Lian vd. 2025). Literatür analizi, veri kalitesinin model performansı

üzerindeki kritik etkisini ortaya koymaktadır (Parhizkar vd. 2021). Yüksek kaliteli sensör verisi ve meteorolojik veri entegrasyonu, tahmin doğruluğunu %15-30 aralığında artırmaktadır (Al Bataineh 2019, Shao vd. 2020). Özellikle eksik veri problemlerinin enterpolasyon ve imputasyon teknikleri ile çözülmesi, model kararlılığını önemli ölçüde etkilemektedir (Haddad vd. 2024, Sun vd. 2025).

Çok amaçlı optimizasyon konusunda elde edilen bulgular, Pareto optimizasyon yaklaşımlarının yaygın kullanımını doğrulamaktadır. Ancak literatürde dikkat çeken önemli bir boşluk, tahmin modelleri ile optimizasyon yaklaşımlarının entegrasyonuna yönelik çalışmaların sınırlılığıdır. Mevcut çalışmaların çoğunluğu ya tahmin odaklı ya da optimizasyon odaklı olup, karar değişkenleri ile amaç fonksiyonlarının tahmin modelleriyle bütünleştirilmesine yönelik disiplinlerarası yaklaşımlar yetersiz kalmaktadır.

Mevcut literatür incelemesi sonucunda tespit edilen araştırma boşlukları, araştırmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır ve daha önce kurulan teorik çerçeveyi destekler niteliktedir. Zamansal çözünürlük sınırlılıkları açısından, mevcut çalışmaların çoğunluğu günlük veya haftalık tahminlere odaklanmakta, saatlik düzeyde gerçek zamanlı tahmin çalışmaları sınırlı kalmaktadır. Bu durum, yüksek çözünürlüklü veri kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Çok değişkenli optimizasyon konusunda belirgin bir eksiklik gözlenmekte olup, literatürde enerji tüketimi, maliyet ve konfor parametrelerini eşzamanlı optimize eden çalışmalar yetersizdir. Tespit edilen boşluk ekonomik, çevresel ve konfor amaç fonksiyonlarının entegre kullanımının gerekliliğini desteklemektedir. Genelleştirilebilirlik açısından model transferi ve farklı iklim koşullarında adaptasyon çalışmaları sınırlı sayıdadır.

Uygulama odaklı boşluklar incelendiğinde, makine öğrenmesinin büyük veri ortamında kamu sektöründe yeterli düzeyde çalışmadığı tespit edilmiş olup, kampüs ölçeğindeki çalışmaların özgünlük değeri vurgulanmaktadır. Ayrıca, laboratuvar ortamında geliştirilen modellerin gerçek bina sistemlerine entegrasyonu konusunda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

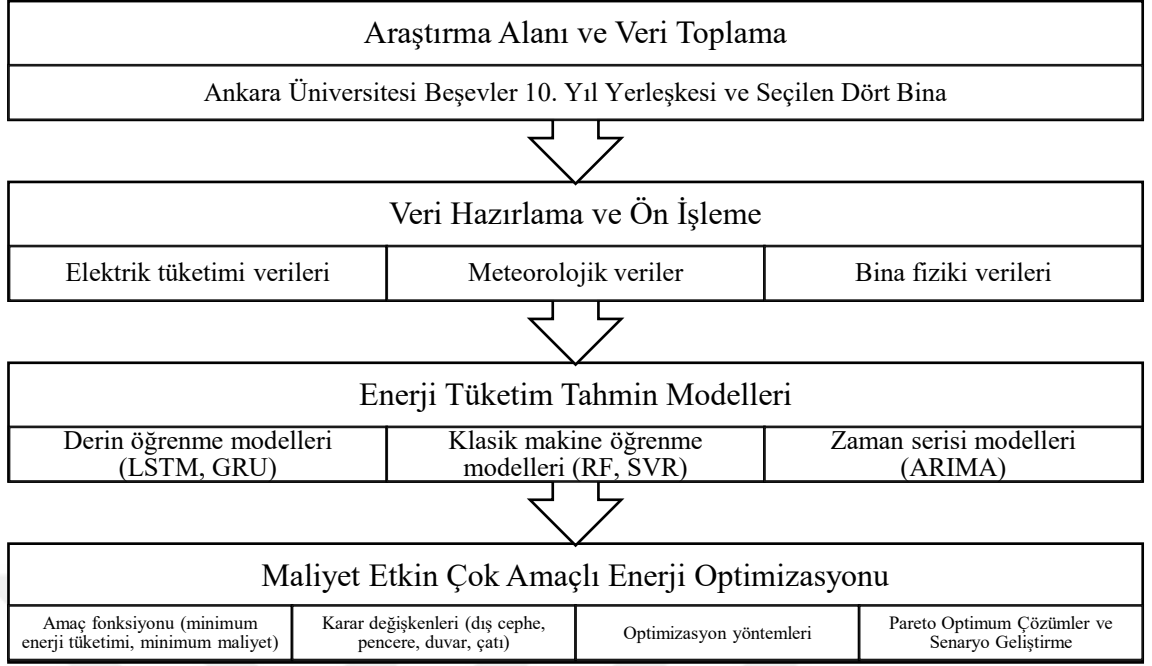
Gerçekleştirilen sistematik literatür taraması baz alınarak, mevcut çalışmanın literatüre sunacağı özgün katkılar beş ana başlık altında özetlenebilir. Metodolojik katkı açısından, karşılaştırılan beş farklı makine öğrenmesi modelinin (LSTM, GRU, Random Forest, SVR, ARIMA) aynı veri seti üzerinde karşılaştırmalı performans analizi gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşım, karşılaştırmalı değerlendirmeleri genişletecek ve daha kapsamlı model seçim kriterleri sunacaktır. Uygulama katkısı olarak Türkiye’de kamu üniversite yerleşkelerinde ilk kapsamlı enerji optimizasyon çalışması sunulmaktadır. Bu katkı kampüs ölçeğindeki araştırma eksikliğini giderecek ve kampüs ölçeğinin avantajlarını pratiğe dökcektir. Teknik katkı boyutunda 35.064 saatlik yüksek çözünürlüklü gerçek veri ile model doğrulaması sağlanmaktadır. Elde edilen veri seti, yüksek kaliteli veri gereksinimini karşılamakta ve literatürdeki veri sınırlılığını aşmaktadır.

Optimizasyon katkısı çerçevesinde üç farklı baskınlık stratejisi ile çok amaçlı optimizasyon çerçevesi geliştirilmektedir. Bu yaklaşım, Pareto optimal çözümlerin elde edilmesini ve farklı amaç fonksiyonlarının dengeli optimizasyonunu sağlayacaktır. Politik katkı olarak da EU 244/2012 direktifine uygun yaşam döngüsü maliyet analizi entegrasyonu gerçekleştirilmektedir. Önerilen entegrasyon, ekonomik amaç fonksiyonlarının uluslararası standartlarla uyumlu şekilde uygulanmasını sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen sistematik literatür taraması, teorik çerçevenin güncel literatürdeki konumunu netleştirmiş ve mevcut çalışmanın özgün katkı alanlarını belirlemiştir. Elde edilen bulgular, hibrit modelleme yaklaşımlarının üstünlüğünü, kamu sektöründe uygulama boşluklarını ve çok amaçlı optimizasyon gereksinimini vurgulamaktadır. Özellikle kampüs ölçeğinde entegre tahmin-optimizasyon modeli eksikliği, kampüs ölçeğinin avantajlarına rağmen bu alanda yeterli çalışma bulunmaması sorununu ortaya koymaktadır. Türkiye’de kamu binalarında kapsamlı uygulama eksikliği, ülkenin özgün iklim koşulları ve bina karakteristikleri dikkate alındığında önemli bir araştırma fırsatı sunmaktadır. Çok modellenli karşılaştırmalı analiz sınırlılığı, teorik olarak sunulan model karşılaştırmalarının pratikte yeterince uygulanmadığını göstermektedir.

3. VERİYE DAYALI MODELLEME VE OPTİMİZASYON

Araştırma kapsamında mevcut kamu binalarının enerji verimli dönüştürülmesine yönelik enerji tüketimi tahmin modeli oluşturulmuş, sonrasında söz konusu model bu tahmin edilen değerin, uluslararası hedefler doğrultusunda optimize edilmesi amacıyla güçlendirilmesine yönelik optimizasyon modeline altlık teşkil ederek çok amaçlı optimizasyon çalışması haline getirilmiştir. Çalışmanın uygulama alanı olarak, Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi ve bu yerleşkede seçilen dört bina belirlenmiştir. Bu aşamada, enerji tüketimi optimizasyonuna yönelik temel veri setleri temin edilmiştir. Toplanan veriler üç temel grupta sınıflandırılarak analiz için hazır hale getirilmiştir. Sonraki aşamada veri seti kullanılarak enerji talebinin tahmini amacıyla üç ana model grubu uygulanmıştır. Son aşamada ise tahmin modellerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak çok amaçlı enerji optimizasyonu süreci yürütülmüştür. Şekil 3.1, araştırmanın dört aşamalı metodolojik akışını göstermektedir. İlk aşamada Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi araştırma sahası ve dört bina örneklem olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada toplanan veriler elektrik tüketimi, meteorolojik veriler ve bina fiziki verileri olmak üzere üç kategoride sınıflandırılarak ön işleme tabi tutulmuştur. Üçüncü aşamada bu veriler kullanılarak enerji tüketim tahmini için derin öğrenme modelleri (LSTM, GRU), klasik makine öğrenme modelleri (RF, SVR) ve zaman serisi modelleri (ARIMA) geliştirilmiştir. Son aşamada ise tahmin sonuçları kullanılarak minimum enerji tüketimi ve minimum maliyet amaç fonksiyonları doğrultusunda, dış çevre faktörleri ve bina bileşenleri karar değişkenleri ile maliyet etkin çok amaçlı enerji optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve Pareto optimum çözümler ile senaryolar geliştirilmiştir.



Şekil 3.1 Araştırmanın akış şeması (Orijinal)

3.1 Veriye Dayalı Karar Süreci

Mevcut binaların enerji verimli dönüşümüne yönelik literatür taraması hem enerji tüketimi tahmini hem de çok amaçlı optimizasyon alanlarında önemli araştırma boşlukları ve zorlukları ortaya koymaktadır. Bu bölümde tespit edilen boşluklar ve zorluklar sistematik olarak analiz edilmiş ve çalışmanın literatüre potansiyel katkıları tartışılmıştır.

Enerji Tüketim Tahminine Yönelik Araştırma Boşlukları: Bina enerji tüketimi tahmini alanında tespit edilen araştırma boşlukları; ölçek düzeyi, model entegrasyonu, ölçüm verisinin niteliği, tahmin modellerinin vadesi, değişen iklim koşullarına etkisi ile kullanıcı davranış modellemesindeki zorluklar olarak sınıflandırılmıştır. Buna göre başlıca araştırma boşlukları aşağıda sıralanmaktadır:

Kampüs ölçeğinde sınırlı çalışmalar: Literatür incelemesi enerji tüketim tahmin modellerinin çoğunlukla tekil bina ölçeğinde geliştirildiğini göstermektedir. Hu vd. (2022) ve Runge ve Zmeureanu (2021)'nin de vurguladığı gibi kampüs gibi kompleks yapılarda binalar arası etkileşimleri ve ortak sistemleri dikkate alan tahmin modellerine yönelik çalışmalar sınırlı olmaktadır. Özellikle üniversite kampüsleri, hastaneler veya

karma kullanımlı kompleksler gibi heterojen bina gruplarındaki enerji tüketim dinamiklerinin modellenmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Veri odaklı ve fizik tabanlı modellerin entegrasyonu: Chen vd. (2022) ve Zhang vd. (2021)'nin belirttiği gibi, mevcut çalışmaların çoğu ya tamamen veri odaklı ya da tamamen fizik tabanlı yaklaşımlar kullanmaktadır. Bu iki yaklaşımın güçlü yönlerini birleştiren hibrit modellere yönelik araştırmalar son yıllarda artmakla birlikte özellikle mevcut binaların yenilenmesi bağlamında, bu modellerin optimizasyon süreçleri ile entegrasyonu konusunda literatürde önemli boşluklar bulunmaktadır.

Gerçek ölçüm verilerine dayalı modellerin sınırlılığı: Literatürdeki birçok çalışma simülasyon verilerini kullanarak tahmin modelleri geliştirmektedir. Fan vd. (2019) ve Thompson vd. (2020) gerçek ölçüm verilerine dayalı modellerin, özellikle kullanıcı davranışı ve operasyonel değişkenliği yakalamada daha etkili olduğunu, ancak bu tür verilerin toplanması ve işlenmesinin zorluklarını vurgulamıştır. Gerçek ölçüm verileri ile kalibre edilmiş modellerin geliştirilmesi ve doğrulanması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Uzun vadeli tahmin modellerinin yetersizliği: Khalil vd. (2022) ve Esteves vd. (2015), enerji tüketimi tahmin çalışmalarının çoğunun kısa ve orta vadeli tahminlere odaklandığını, uzun vadeli (bir yıldan uzun) tahmin modellerinin ise sınırlı kaldığını belirtmiştir. Özellikle enerji verimli yenileme projelerinin planlanması ve finansal değerlendirmesi için kritik olan uzun vadeli tahmin modellerine yönelik daha fazla araştırma gerekmektedir.

Değişen iklim koşullarının etkisi: Literatürde iklim değişikliğinin bina enerji tüketimi üzerindeki potansiyel etkilerini tahmin modellerine entegre eden sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. He ve Zhang (2022), iklim değişikliği senaryolarının enerji tahmin modellerine dahil edilmesinin, özellikle uzun vadeli yatırım kararları için önemli olduğunu vurgulamıştır.

Kullanıcı davranış modellemesindeki zorluklar: Yousefi vd. (2017) ve Rinaldi vd. (2018) kullanıcı davranışlarının bina enerji tüketimi üzerindeki önemli etkisini vurgulamış, ancak bu faktörün tahmin modellerine entegrasyonunun zorluklarını da belirtmiştir. Kullanıcı davranışının stokastik doğası ve çeşitliliği, özellikle karma kullanımlı binalarda tahmin doğruluğunu etkilemektedir.

Çok Amaçlı Enerji Optimizasyonuna Yönelik Araştırma Boşlukları: Çok amaçlı enerji optimizasyonu alanında mevcut binalarda yenilemeye yönelik optimizasyon, amaç fonksiyonlarının kapsamı, yatırım projesi perspektifi, veri entegrasyonu, ölçek bazında optimizasyon ve karar değişkenleri kısıtları gibi başlıklarda toplulaştırılmıştır. Tespit edilen başlıca araştırma boşlukları şunlardır:

Mevcut bina yenileme odaklı çalışmaların sınırlılığı: Wang ve Wei (2021) ve Long (2023)'un vurguladığı gibi, optimizasyon çalışmalarının çoğu yeni bina tasarımına odaklanmakta, mevcut binaların yenilenmesine yönelik optimizasyon modellerinin sayısı ise sınırlı kalmaktadır. Mevcut binaların kendine özgü kısıtlamaları, belirsizlikleri ve yenileme alternatifleri için özel optimizasyon yaklaşımlarına ihtiyaç vardır.

Amaç fonksiyonlarının kapsamındaki sınırlılıklar: Literatürdeki çalışmaların çoğu, enerji tüketimi ve maliyet minimizasyonu gibi temel amaç fonksiyonlarına odaklanmaktadır. Tagliabue vd. (2018) ve Eliopoulou ve Mantziou (2017), çevresel etki, kullanıcı konforu, estetik değer, iç hava kalitesi gibi daha geniş kapsamlı amaç fonksiyonlarının optimizasyon modellerine entegrasyonunun sınırlı kaldığını belirtmiştir.

Yatırım projesi perspektifinin eksikliği: Mevcut çalışmalarda optimizasyon genellikle teknik ve fiziksel parametre odaklıdır. Agliardi vd. (2018) ve Hamdy vd. (2017), finansal parametreler, risk değerlendirmesi, yatırım getirisi gibi ekonomik faktörlerin detaylı modellendiği çalışmaların sınırlı olduğunu vurgulamıştır. Yenileme projelerinin kapsamlı yatırım analizi için entegre modellere ihtiyaç bulunmaktadır.

Gerçek veri ve simülasyon entegrasyonundaki zorluklar: Optimizasyon çalışmalarının çoğu, simülasyon verilerine dayanmaktadır. He ve Zhang (2022) ve Elbeltagi vd. (2022),

gerçek ölçüm verilerinin optimizasyon süreçlerine entegrasyonunun, özellikle mevcut binaların modellenmesindeki belirsizlikler nedeniyle zorluklarını vurgulamıştır.

Kampüs ölçeğinde optimizasyon çalışmalarının azlığı: Literatürde, tekil binalar veya odalar üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları yaygınken, kampüs gibi kompleks yapılar için geliştirilen kapsamlı optimizasyon modellerinin sayısı son derece sınırlıdır. Zhao vd. (2021), kampüs ölçeğinde optimizasyonun, binalar arası etkileşimler, ortak altyapı ve ölçek ekonomisi gibi avantajlar sunabileceğini belirtmiştir.

Karar değişkenlerinin kapsamındaki sınırlılıklar: Optimizasyon çalışmalarında genellikle sınırlı sayıda karar değişkeni kullanılmaktadır. Yang vd. (2017) ve Elsheikh vd. (2023), bina fiziksel özellikleri, işletme koşulları, kullanıcı davranışı, finansal parametreler ve çevresel faktörleri kapsayan daha bütünsel optimizasyon modellerine ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır.

Metodolojik ve pratik zorluklar: Mevcut binaların enerji verimli dönüşümüne yönelik araştırmalarda karşılaşılan başlıca metodolojik ve pratik zorluklar; hesaplama karmaşıklığı ve verimliliği, veri kalitesi ve veriye erişilebilirlik, model doğrulama ve genelleştirilebilirlik, disiplinler arası entegrasyon ve uygulama ve politika entegrasyonu şeklinde gruplandırılabilir.

Hesaplama karmaşıklığı ve verimliliği: Derin öğrenme modelleri ve karmaşık optimizasyon algoritmalarının kullanımı, yüksek hesaplama gücü gerektirmektedir. Thompson vd. (2020) ve Wang vd. (2018), özellikle kampüs ölçeğinde ve çok sayıda değişkenle çalışırken, hesaplama verimliliğinin önemli bir zorluk olduğunu belirtmiştir.

Veri kalitesi ve erişilebilirliği: Mevcut binalara ilişkin detaylı ve güvenilir verilerin temini, özellikle eski binalar için önemli bir zorluktur. Fan vd. (2019), veri toplama, ön işleme ve kalite kontrol süreçlerinin, tahmin ve optimizasyon modellerinin performansını doğrudan etkilediğini vurgulamıştır.

Model doğrulama ve genelleştirilebilirlik: Tahmin ve optimizasyon modellerinin farklı bina tipleri, iklim koşulları ve kullanım senaryoları için doğrulanması ve genelleştirilebilirliği, literatürde önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Runge ve Zmeureanu (2021), modellerin gerçek dünya koşullarında test edilmesi ve performanslarının uzun vadeli izlenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Disiplinlerarası entegrasyon: Bina enerji performansı, mimari, mühendislik, bilgisayar bilimleri, ekonomi gibi farklı disiplinlerin kesişiminde yer almaktadır. Eliopoulou ve Mantziou (2017) ve Ahmad vd. (2018), bu disiplinlerin entegrasyonunun, kapsamlı ve etkin modellerin geliştirilmesi için kritik olduğunu vurgulamıştır.

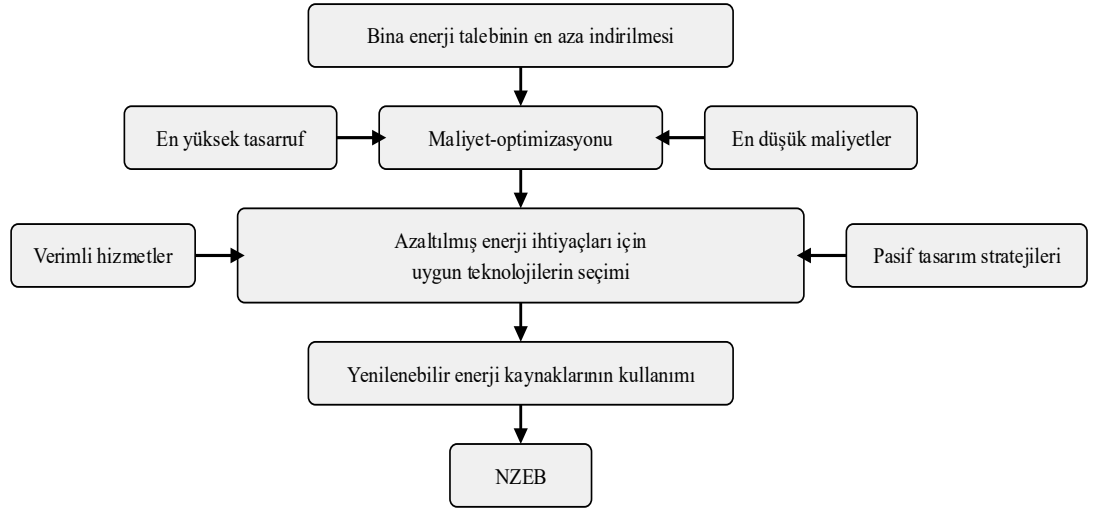
Uygulama ve politika entegrasyonu: Araştırma sonuçlarının pratikte uygulanması ve politika geliştirme süreçlerine entegrasyonu, önemli bir zorluktur. Wells vd. (2018) ve Attia vd. (2017), bilimsel araştırmalar ile uygulama ve politika arasındaki boşluğun kapatılması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu belirtmiştir.

Tespit edilen araştırma boşluklarının analizi, mevcut binaların enerji verimli dönüşümü alanında özellikle kampüs ölçeğinde, enerji tüketimi tahmini ve çok amaçlı optimizasyonu entegre eden, gerçek veriye dayalı ve pratik uygulamaya yönelik çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu çalışma söz konusu boşlukları doldurmaya ve literatüre özgün katkılar sunmaya yönelik kapsamlı bir metodoloji geliştirmeyi hedeflemektedir. Buna göre çalışmada, üniversite kampüsü gibi karmaşık yapıların enerji yönetimine yönelik olarak enerji tüketimi tahmini ile çok amaçlı optimizasyonu entegre eden bir metodoloji geliştirilecektir. Bu kapsamda, gerçek ölçüm verileri ile kalibre edilen veri odaklı modeller ile fizik tabanlı modelleri birleştiren hibrit bir yaklaşım önerilmektedir. Mevcut binaların enerji verimli biçimde yenilenmesi, yalnızca teknik bir konu olarak değil, aynı zamanda finansal analiz, risk değerlendirmesi ve uzun vadeli getiri hesaplamalarını içeren kapsamlı bir yatırım projesi olarak ele alınacaktır. Geliştirilen modeller, kuramsal düzeyde kalmayıp, Ankara Üniversitesi kampüsündeki gerçek binalar üzerinde uygulanarak test edilecek ve doğruluğu değerlendirilecektir.

Teorik ve Kavramsal Çerçeve: Bu bölümde kamu binalarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik yenileme stratejilerinin dayandığı temel kavramsal ve teorik çerçeve incelenmektedir. Sürdürülebilir yapılı çevre, yaşam döngüsü yaklaşımları ve veri odaklı optimizasyon teorileri gibi farklı disiplinlerden gelen kavramlar entegre bir biçimde ele alınarak, araştırmanın dayandığı teorik altyapı oluşturulmaktadır. Bu bütünleşik teorik yaklaşım, araştırma metodolojisinin geliştirilmesi, bulguların yorumlanması ve önerilerin formüle edilmesi süreçlerine bilimsel bir zemin sağlamaktadır.

Yaklaşık sıfır enerjili bina kavramı, 1970’lerdeki enerji krizleriyle başlayan, binalarda enerji verimliliğini artırma çabalarının günümüzdeki en gelişmiş aşamasını temsil etmektedir. Kavram, 2000’li yılların başında ortaya çıkmış, 2010 yılında Avrupa Birliği’nin Bina Enerji Performansı Direktifi (Energy Performance of Buildings Directive – EPBD) içerisinde resmi bir tanım kazanmıştır. EPBD’nin 9. maddesi, üye ülkelerin “31 Aralık 2018 tarihine kadar kamu binaları ve 31 Aralık 2020 tarihine kadar tüm yeni binaların nZEB standardında olmasını sağlamalarını” zorunlu kılmıştır (Anonymous 2021c).

nZEB kavramının temelinde, binaların enerji ihtiyaçlarını minimuma indirmek ve kalan enerji ihtiyacını mümkün olduğunca yenilenebilir kaynaklardan sağlamak düşüncesi yatmaktadır. Bu yaklaşım, küresel iklim değişikliği ile mücadele ve enerji güvenliği politikalarının yapı sektörüne yansımalarının bir sonucudur. Şekil 3.2, nZEB konseptinin hiyerarşik yaklaşımını ve uygulama stratejisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, nZEB yaklaşımı öncelikle bina enerji talebinin en aza indirilmesini hedeflemektedir. Bu amaçla maliyet-optimizasyonu yapılarak en yüksek tasarruf ile en düşük maliyetler arasında denge kurulmaktadır. İkinci aşamada, azaltılmış enerji ihtiyaçları için uygun teknolojilerin seçimi yapılmakta; bu süreçte verimli hizmet sistemleri ve pasif tasarım stratejileri birlikte değerlendirilmektedir. Son aşamada ise kalan enerji ihtiyacının karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına geçilmektedir. Bu sistematik yaklaşım, “önce azalt, sonra üret” felsefesi ile binaların enerji performansını optimize ederek nZEB standardına ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Şekilde sunulan bu entegre yaklaşım, hem teknik hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler geliştirmeyi amaçlamaktadır.



Şekil 3.2 nZEB konsepti (D’Agostino ve Mazzarella 2019)

Literatürde ve yasal çerçevelerde nZEB’in farklı tanımları bulunmaktadır. EPBD, nZEB’i “çok yüksek enerji performansına sahip binalar” olarak tanımlamakta ve “enerji ihtiyacının çok önemli ölçüde yenilenebilir kaynaklardan karşılanması gerektiğini” belirtmektedir. Ancak, “çok yüksek performans” ve “çok önemli ölçüde” ifadelerinin sayısal karşılıkları, üye ülkelerin ulusal, bölgesel veya yerel koşullarına göre belirlenmektedir (Anonymous 2012).

Uluslararası Enerji Ajansı, nZEB’yi “yıllık net enerji tüketimi sıfıra yakın ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen binalar” olarak tanımlarken; Amerikan Enerji Bakanlığı “yıllık bazda ürettiği kadar enerji tüketen binalar” tanımını kullanmaktadır. Bu tanımlar arasındaki farklılıklar, nZEB konseptinin farklı iklim koşulları, yapı gelenekleri ve enerji politikaları bağlamında uygulanabilirliğini göstermektedir.

nZEB yaklaşımının merkezinde “Trias Energetica” olarak da bilinen üç aşamalı bir strateji bulunmaktadır (Lysen 1996). Öncelikle enerji talebinin azaltılması için yüksek performanslı bina kabuğu (gelişmiş ısı yalıtımı, hava sızdırmazlığı, yüksek performanslı pencereler), pasif tasarım stratejileri (güneş kontrolü, doğal havalandırma, gün ışığı optimizasyonu) ve kullanıcı davranışı optimizasyonu ile binanın enerji ihtiyacı minimuma indirilir. İkinci aşamada, geriye kalan enerji ihtiyacının verimli sistemlerle karşılanması için yüksek verimli HVAC sistemleri, ısı geri kazanımlı havalandırma, akıllı

kontrol sistemleri ve verimli aydınlatma çözümleri ile enerji tüketimi optimize edilir. Son aşamada ise yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu kapsamında fotovoltaik paneller, solar termal sistemler, rüzgâr türbinleri, biyokütle sistemleri ve jeotermal çözümler gibi yenilenebilir enerji sistemleri ile enerji ihtiyacı karşılanmaktadır.

EPBD'nin güncellenmesi ile getirilen önemli bir kavram da “maliyet optimum seviyesi”dir. Bu kavram, “tahmini ekonomik yaşam döngüsü boyunca en düşük maliyete yol açan enerji performansı seviyesi” olarak tanımlanmaktadır (Anonymous 2012). Maliyet optimum seviyesi ve nZEB arasındaki ilişki, enerji verimli bina yatırımlarının ekonomik sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Araştırma kapsamında nZEB kavramı, enerji verimliliği optimizasyonunun nihai hedefini tanımlamak için kullanılmıştır. Özellikle mevcut kamu binalarının nZEB standardına yaklaştırılması için gerekli yenileme stratejilerinin belirlenmesinde, nZEB prensipleri ve maliyet optimum seviyeleri dikkate alınmıştır. Çok amaçlı optimizasyon modelinin geliştirilmesinde hem enerji performansı hem de maliyet etkinliği hedeflerinin belirlenmesinde nZEB teorisi rehber olmuştur.

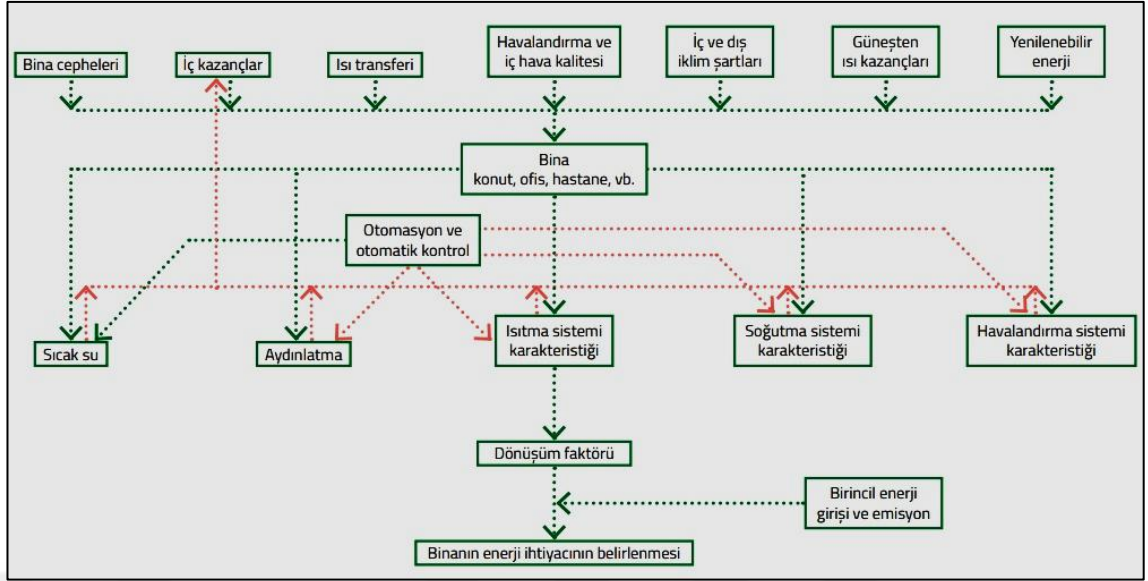
Derin yenileme: Kavramsal çerçeve ve metodoloji: Literatürde “derin yenileme” (deep renovation) veya “derin güçlendirme” (deep retrofit) kavramları için evrensel bir tanım bulunmamaktadır. Küresel Bina Performans Ağı (Global Building Performance Network - GBPN) tarafından yapılan araştırmaya göre, bu terimler arasında bölgesel bir ayrım mevcuttur: Avrupa’da genellikle “yenileme” terimi tercih edilirken, ABD’de “güçlendirme” terimi yaygın olarak kullanılmaktadır (Anonymous 2013).

Derin yenileme genel olarak, binanın enerji performansında önemli bir iyileştirme sağlayan kapsamlı müdahaleler bütünü olarak tanımlanabilir. Avrupa’daki yaygın anlayışa göre derin yenileme sonucunda binanın ısıtma, soğutma, havalandırma ve sıcak su ihtiyacında en az %75’lik bir azalma sağlanmalıdır. ABD’de ise derin yenileme genellikle toplam enerji tüketiminde %30-%50’lik bir azalma hedeflemektedir (Bowie 2012).

EPBD doğrudan “derin yenileme” terimini kullanmamakla birlikte, “büyük yenileme” (major renovation) kavramını bina kabuğu veya teknik sistemlerle ilgili yenileme maliyetinin, binanın değerinin %25’inden fazla olması veya bina dış kabuğunun %25’inden fazlasının yenilenmesi olarak tanımlamaktadır (Anonymous 2012).

Derin yenileme stratejileri genel olarak dört ana kategoride incelenebilir. Bina kabuğu odaklı stratejiler; duvar, çatı ve döşeme yalıtımının iyileştirilmesi, yüksek performanslı pencere ve kapıların kullanılması, hava sızdırmazlığının artırılması, termal köprülerin azaltılması gibi müdahaleleri içermektedir. Mekanik sistem odaklı stratejiler ise yüksek verimli ısıtma, soğutma, havalandırma ve sıcak su sistemlerinin kurulması, ısı geri kazanım sistemlerinin entegrasyonu, değişken hızlı fan ve pompaların kullanımı gibi müdahaleleri kapsar. Yenilenebilir enerji entegrasyonu kapsamında fotovoltaik sistemler, güneş kolektörleri, ısı pompaları, biyokütle kazanları gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin binaya entegre edilmesi hedeflenmektedir. Son olarak bütünleşik tasarım yaklaşımı ile yukarıdaki stratejilerin optimum kombinasyonunu içeren, binanın tüm sistemlerini bir bütün olarak ele alan ve sistem etkileşimlerini optimize eden bir yaklaşım benimsenmektedir.

Derin yenileme ve nZEB kavramları arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Derin yenileme, mevcut binaların enerji performansını önemli ölçüde iyileştirmeyi hedeflerken; nZEB, bu iyileştirmenin ulaşması gereken nihai hedefi temsil etmektedir. Bir başka deyişle derin yenileme, mevcut binaların nZEB standardına yükseltilmesini sağlayan metodolojik yaklaşımdır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Binalarda enerji tüketim alanları ve sistemlerin ilişkileri (Anonim 2020)

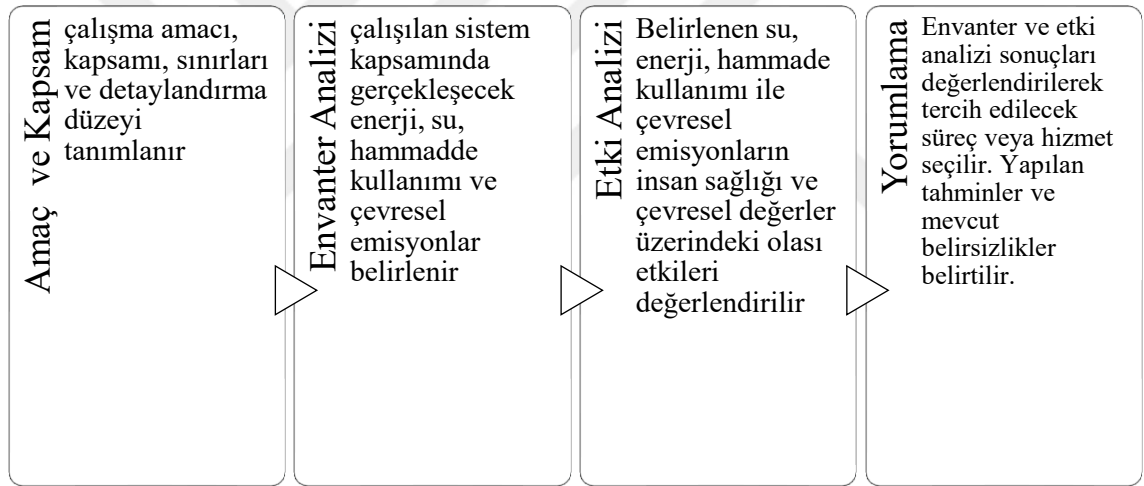
Araştırma kapsamında derin yenileme teorisi, Ankara Üniversitesi kampüs binalarının enerji performansını iyileştirmek için geliştirilecek kapsamlı yenileme stratejilerinin tasarlanmasında kullanılmıştır. Özellikle bina kabuğu, mekanik sistemler ve yenilenebilir enerji entegrasyonu alanlarındaki alternatif yenileme senaryoları, derin yenileme prensipleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Optimizasyon modelindeki karar değişkenleri, derin yenileme stratejilerinin temel bileşenlerini yansıtacak şekilde tasarlanmıştır.

Bir diğer yaklaşım olan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) ise, bir ürün, hizmet veya sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendiren sistematik ve bütünsel bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır. YDD metodolojisinin temelleri 1960'ların sonlarında atılmış, sonraki yıllarda gelişerek 1990'larda metodolojik standartlaştırma süreciyle olgunlaşmıştır (Curran 2006). Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO), 1997-2006 yılları arasında YDD metodolojisini standartlaştıran ISO 14040 ve 14044 serisi standartları yayınlamıştır (Anonymous 2021e).

YDD, çevresel etkilerin “beşikten mezara” bütünsel değerlendirilmesini sağlayarak, problemi bir aşamadan diğerine aktarmak yerine, sistemin tamamı üzerinde çözüm

geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu bütünsel yaklaşım, sürdürülebilirlik çalışmalarında karar verme süreçlerini destekleyen güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır.

ISO 14040 standardına göre YDD metodolojisi dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, amaç ve kapsam tanımı aşamasında YDD çalışmasının amacı, sistem sınırları, fonksiyonel birim ve veri kalitesi gereksinimleri belirlenir. İkinci aşamada, envanter analizi ile sistem sınırları içerisindeki tüm girdi (hammadde, enerji, su) ve çıktılar (emisyonlar, atıklar) belirlenir ve sayısallaştırılır. Üçüncü aşamada, etki değerlendirmesi yapılarak envanter analizi sonuçları, çeşitli çevresel etki kategorileri açısından değerlendirilir. Son aşamada ise yorum kısmında çalışma sonuçları, belirlenen amaç ve kapsam doğrultusunda değerlendirilir ve iyileştirme önerileri geliştirilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 YDD aşamaları ve içerikleri (ISO 14040)

YDD çalışmaları, sistem sınırlarının belirlenmesine göre farklı yaklaşımlarla uygulanabilmektedir (Çağlayan 2011). Beşikten mezara yaklaşımı, hammadde ediniminden atık bertarafına kadar tüm yaşam döngüsünü kapsar. Beşikten kapıya yaklaşımı ise hammadde ediniminden ürünün fabrika çıkışına kadar olan süreçleri kapsar. Beşikten beşiğe yaklaşımı, atık bertarafı yerine geri dönüşüm/yeniden kullanımı içeren kapalı döngü sistemleri için kullanılırken, kapıdan kapıya yaklaşımı sadece belirli bir üretim sürecini kapsamaktadır.

Bina sektöründe YDD uygulamaları özellikle yapı malzemelerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, enerji verimliliği önlemlerinin bütünsel değerlendirilmesi, alternatif tasarım ve yapım stratejilerinin karşılaştırılması ve yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde kullanım gibi alanlarda önem kazanmaktadır.

YDD perspektifinden bakıldığında bina enerji verimliliği stratejilerinin optimizasyonu düşük gömülü enerji ve karbona sahip malzemelerin seçilmesi, uzun ömürlü ve dayanıklı çözümlerin tercih edilmesi, işletme ve gömülü enerji/karbon etkilerinin birlikte optimize edilmesi ve malzemelerin yeniden kullanım ve geri dönüşüm potansiyelinin dikkate alınması gibi ilkelere dayanmalıdır.

Gerçekleştirilen araştırmada YDD yaklaşımı alternatif yenileme senaryolarının karşılaştırılmasında ve değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Özellikle farklı yapı elemanları ve malzeme seçimlerinin çevresel etkileri, yaşam döngüsü perspektifinden değerlendirilerek enerji tüketimi ile birlikte çevresel sürdürülebilirlik de optimizasyon sürecine dahil edilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon modelindeki çevresel etki parametreleri YDD prensipleri doğrultusunda belirlenmiştir.

Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM) analizi bir ürün, sistem veya yapının tüm yaşam döngüsü boyunca (tasarım, yapım, işletme, bakım, elden çıkarma) ortaya çıkan maliyetlerin sistematik bir şekilde değerlendirilmesi metodolojisidir. YDM, ilk yatırım maliyetine odaklanmak yerine, uzun vadeli ekonomik performansı dikkate alarak karar verme süreçlerini desteklemektedir (Barringer vd. 1995).

Bina sektöründe YDM analizi, özellikle enerji verimliliği yatırımlarının ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel olarak binalarla ilgili kararlar ilk yatırım maliyetine odaklanırken, YDM yaklaşımı işletme, bakım ve yenileme maliyetlerini de dikkate almaktadır.

Binalarda işletme ve bakım maliyetleri, genellikle ilk yatırım maliyetini kat kat aşmaktadır. Davis Langdon'un yaptığı araştırmalar, tipik bir ticari binanın 30 yıllık yaşam

döngüsü boyunca, ilk yatırım maliyetinin yaklaşık 5-7 katı kadar işletme ve bakım maliyeti oluştuğunu göstermektedir (Anonymous 2007).

Yapı sektöründe YDM analizleri genellikle proje alternatiflerinin belirlenmesi, maliyet yapısının oluşturulması, zaman periyodunun belirlenmesi, parasal değerlerin belirlenmesi, bugünkü değer hesaplaması, alternatiflerin karşılaştırılması ve duyarlılık analizi gibi aşamaları içerir (Fuller ve Petersen 1996).

Bina sektöründe YDM analizleri tasarım aşamasında optimizasyon, yenileme stratejilerinin değerlendirilmesi, enerji kaynağı seçimi, bütçe planlaması ve sürdürülebilirlik sertifikasyonu gibi çeşitli karar verme süreçlerinde kullanılmaktadır. Enerji verimliliği yatırımlarının ekonomik değerlendirmesinde YDM analizi, enerji tasarruf potansiyelinin ekonomik değerlendirilmesi, optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi, yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik değerlendirilmesi ve finansal teşvik mekanizmalarının etkisinin değerlendirilmesi gibi açılardan önem kazanmaktadır.

Araştırmada YDM metodolojisi, farklı enerji verimliliği yenileme senaryolarının ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Ankara Üniversitesi kampüs binaları için geliştirilen senaryoların ilk yatırım maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri ve enerji maliyetleri, YDM yaklaşımıyla analiz edilerek en maliyet-etkin çözümlerin belirlenmesine katkıda bulunmuştur. Çok amaçlı optimizasyon modelindeki maliyet minimizasyonu fonksiyonu, YDM prensipleri doğrultusunda formüle edilmiştir.

Derin öğrenme, makine öğrenmesinin bir alt alanı olarak insan beyninin nöral yapısından esinlenen çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak verideki karmaşık örüntüleri otomatik olarak öğrenebilen yapay zekâ teknolojisidir. Klasik makine öğrenmesi yöntemlerinden farklı olarak derin öğrenme, ham veriden özellikleri otomatik olarak çıkarabilme ve hiyerarşik temsillerle verileri işleyebilme yeteneğine sahiptir (LeCun vd. 2015). Derin öğrenme kavramı teorik olarak 1980'lerde ortaya çıkmış olmakla birlikte gerek yeterli hesaplama gücünün olmaması gerekse eğitim için büyük veri setlerinin bulunmaması nedeniyle uzun süre pratik uygulamalarda sınırlı kalmıştır. Son on yılda GPU teknolojisindeki gelişmeler, büyük veri setlerinin oluşturulması ve algoritmalarındaki

ilerlemeler, derin öğrenmenin pek çok alanda etkin şekilde kullanılmasını sağlamıştır (Goodfellow vd. 2016).

Derin öğrenme alanında yaygın olarak kullanılan başlıca mimari tipleri arasında CNN, RNN, LSTM, GRU, Autoencoder, Üretici Çekişmeli Ağlar (GAN) ve Transformers gibi farklı yapılar bulunmaktadır. Söz konusu mimariler farklı problem türleri için özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır. Ayrıca RF, SVR gibi klasik makine öğrenme yaklaşımları da güncel olarak tüketim tahmini oluşturmada kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Bina enerji verimliliği alanında derin öğrenme, enerji tüketim tahmini ve modelleme, bina enerji sistemlerinin optimizasyonu, anomali tespiti ve arıza teşhisi, bina enerji performansının değerlendirilmesi ve kullanıcı davranışının modellenmesi gibi alanlarda önemli potansiyel sunmaktadır.

Araştırma kapsamında derin öğrenme teknikleri, Ankara Üniversitesi kampüs binalarının enerji tüketiminin tahmin edilmesinde ve modellenmesinde kullanılmıştır. Özellikle LSTM, GRU gibi derin öğrenme mimarileri ile RF, SVR ve ARIMA gibi makine öğrenme modelleri, saatlik enerji tüketim verilerinin analiz edilmesi ve geleceğe yönelik tahminlerin yapılmasında uygulanmıştır. Klasik makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinden elde edilen tahminler, çok amaçlı optimizasyon sürecinin temel girdilerinden birini oluşturmuştur.

Zaman serisi analizi, belirli bir zaman periyodu boyunca düzenli aralıklarla kaydedilen verilerin incelenmesi ve bu verilerdeki örüntülerin keşfedilmesi sürecidir (Hyndman ve Athanasopoulos 2018). Zaman serisi verileri, trend, mevsimsellik, döngüsellik ve düzensiz bileşenler olmak üzere dört temel bileşenden oluşabilir. Zaman serisi analizi, bu bileşenlerin belirlenmesi, ayrıştırılması ve modellemesini içerir (Box vd. 2015).

Zaman serisi tahmin modelleri, geçmiş veri örüntülerini analiz ederek gelecekteki değerleri tahmin etmeyi amaçlar (Bontempi vd. 2012). Bu modeller, doğrusal (ARIMA, SARIMA) ve doğrusal olmayan (LSTM, GRU) olmak üzere çeşitli kategorilere ayrılabilir. Doğrusal modeller, verinin sabit bir istatistiksel yapıya sahip olduğunu

varsayarken, doğrusal olmayan modeller daha karmaşık ve dinamik ilişkileri modelleyebilmektedir (Zhang 2003).

Bina enerji tüketiminin tahmin edilmesinde, zaman serisi analizinin enerji tüketimindeki zamansal örüntülerin (günlük, haftalık, mevsimsel) yakalanabilmesi, dış faktörlerin (hava durumu, işletme saatleri) etkilerinin modellenenebilmesi, kısa, orta ve uzun vadeli tahminlerin yapılabilmesi ve anomali tespiti ve arıza teşhisi yapılabilmesi gibi önemli avantajları vardır (Makridakis vd. 2018).

Araştırma kapsamında zaman serisi analizi teknikleri, kampüs binalarının saatlik enerji tüketimindeki zamansal örüntülerin belirlenmesi ve modellenmesinde kullanılmıştır. ARIMA gibi klasik zaman serisi modelleri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modeller birbirleri ile karşılaştırılarak en uygun tahmin modelinin seçilmesi sağlanmıştır. Zaman serisi analizinden elde edilen içgörüler, binaların kullanım profillerinin anlaşılmasına ve enerji tüketimini etkileyen faktörlerin belirlenmesine katkıda bulunmuştur.

Çok amaçlı optimizasyon (Multi-Objective Optimization - MOO), birden fazla genellikle birbiriyle çelişen amaç fonksiyonunun eş zamanlı olarak optimize edilmesini amaçlayan matematiksel bir problem çözme yaklaşımıdır (Gunantara 2018). Tek amaçlı optimizasyonun aksine, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde genellikle tek bir optimal çözüm yerine, Pareto-optimal çözümler kümesi elde edilmektedir (Deb 2001). Bu çözümler kümesinde, bir amaç fonksiyonunu iyileştirmek ancak diğer amaç fonksiyonlarından ödün vermekle mümkündür. Çok amaçlı optimizasyon problemleri genel olarak Eşitlik 3.1'deki gibi formüle edilmektedir.

$$\min/\max f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \text{ s. t. } g(x) \leq 0, h(x) = 0, x \in X \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de $f(x)$, n adet amaç fonksiyonundan oluşan vektör, $g(x)$ ve $h(x)$ kısıtlar, x ise karar değişkenleri uzayıdır (Miettinen 1999).

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında; Ağırlıklı Toplam Yöntemi (Weighted Sum Method), Epsilon-Kısıt Yöntemi (ϵ -Constraint Method), Hedef Programlama (Goal Programming) ve Evrimsel Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları bulunmaktadır (Coello Coello vd. 2007). Bu algoritmalar içerisinde NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II), MOPSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) ve NSDE (Non-dominated Sorting Differential Evolution) gibi doğadan esinlenen meta-sezgisel algoritmalar yaygın olarak kullanılmaktadır (Deb vd. 2002).

Bina enerji verimliliği ve yenileme stratejilerinin optimizasyonunda, çok amaçlı yaklaşım özellikle uygun bir çerçeve sunmaktadır, çünkü bu problemler doğası gereği enerji tüketiminin minimizasyonu, maliyet minimizasyonu (ilk yatırım, işletme, yaşam döngüsü), konfor maksimizasyonu, çevresel etkilerin minimizasyonu ve yenilenebilir enerji entegrasyonunun maksimizasyonu gibi birden fazla, genellikle birbiriyle çelişen hedefi içermektedir (Asadi vd. 2012).

Araştırmada çok amaçlı optimizasyon teorisi, Ankara Üniversitesi kampüs binalarının enerji verimliliği yenileme stratejilerinin optimizasyonunda temel yaklaşım olarak benimsenmiştir. Baskınlık stratejileri kullanılarak enerji tüketimi ve maliyet gibi çoklu hedefleri optimize eden yenileme alternatifleri geliştirilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı, karar vericilere farklı ödünleşimler arasında bilinçli seçimler yapma imkânı sunarak, sürdürülebilir ve maliyet-etkin yenileme stratejilerinin belirlenmesini sağlamıştır.

Araştırma kapsamında ele alınan teorik kavramlar ve yaklaşımlar—enerji verimliliği, nZEB, derin yenileme, yaşam döngüsü değerlendirmesi, yaşam döngüsü maliyeti, derin öğrenme ve çok amaçlı optimizasyon—kamu binalarının enerji verimli yenilenmesi bağlamında birbiriyle yakından ilişkilidir ve bütünlük bir teorik çerçeve oluşturmaktadır.

Enerji verimliliği, nZEB konseptinin temel bileşeni olarak kabul edilemekte ve nZEB yaklaşımı, binalarda enerji verimliliğinin en üst düzeye çıkarılmasını ve kalan enerji

ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanmasını hedeflemektedir. nZEB ve derin yenileme arasında, derin yenilemeler mevcut binaların nZEB standartlarına yaklaştırılması için uygulanan kapsamlı iyileştirme stratejilerini ifade ederken, nZEB hedefi derin yenilemenin nihai amacını belirlemektedir. Derin yenileme ve yaşam döngüsü değerlendirmesi ilişkisinde YDD, derin yenileme stratejilerinin çevresel etkilerinin bütünsel değerlendirilmesini sağlamakta ve derin yenileme kararları, sadece işletme enerjisi tasarruflarına değil, aynı zamanda malzemelerin gömülü enerji ve karbon etkilerine de dayanmalıdır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyeti yaklaşımları, bina yenilemelerinin sırasıyla çevresel ve ekonomik boyutlarını değerlendirmekte ve bu iki yaklaşımın entegrasyonu, sürdürülebilirlik ve ekonomik fizibilite arasında optimum dengenin bulunmasını sağlamaktadır. Derin öğrenme ve enerji tahmin modelleri ile derin öğrenme, bina enerji tüketiminin modellenmesi ve tahmin edilmesi için güçlü araçlar sunmakta ve bu modeller, yenileme senaryolarının enerji tasarruf potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Son olarak, çok amaçlı optimizasyon ve diğer kavramlar arasındaki ilişkide çok amaçlı optimizasyon, diğer tüm kavramları entegre ederek, enerji verimliliği, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi çoklu hedefleri eş zamanlı optimize eden yenileme stratejilerinin geliştirilmesini sağlamaktadır.

Araştırmanın teorik modeli: Tez çalışması, yukarıda açıklanan kavramların entegrasyonuna dayanan bütünlük bir teorik model üzerine inşa edilmiştir. Bu model, kamu binalarının enerji verimli yenilenmesi sürecini veri toplama aşamasından optimizasyon ve uygulama aşamasına kadar kapsayan sistematik bir çerçeve sunmaktadır.

Araştırmanın teorik modeli ilk olarak, veri toplama ve analizi aşamasında bina enerji tüketimi, iklim verileri ve bina fiziksel özellikleri gibi verilerin toplanması ve analizi aşamalarından oluşmaktadır. İlk aşamada, zaman serisi analizi teknikleri kullanılarak veri örüntüleri keşfedilmektedir. İkinci aşamada, enerji tüketim modellemesi yapılarak derin öğrenme ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak bina enerji tüketiminin modellenmesi ve tahmin edilmesi sağlanmaktadır. Bu modeller, farklı yenileme senaryolarının enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Üçüncü aşamada, yenileme alternatiflerinin geliştirilmesi için derin

yenileme prensipleri doğrultusunda, bina kabuğu, pencere ve çatı gibi alanlarda yenileme alternatifleri oluşturulmaktadır. Dördüncü aşamada, yaşam döngüsü değerlendirmesi ile yenileme alternatiflerinin çevresel etkileri, “beşikten mezara” yaklaşımıyla değerlendirilmektedir. Beşinci aşamada, yaşam döngüsü maliyet analizi ile yenileme senaryolarının ekonomik fizibilitesi, ilk yatırım maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri ve enerji maliyetleri dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Altıncı aşamada, baskınlık stratejileri ile ağırlıklandırma yaklaşımı kullanılarak enerji tüketimi minimizasyonu ve maliyet minimizasyonu gibi çoklu hedefler, üç farklı baskınlık stratejisi çerçevesinde ağırlıklandırılarak tek bir optimizasyon fonksiyonuna dönüştürülmekte ve her strateji için optimum çözümler elde edilmektedir. Son aşamada ise karar destek süreci ile Pareto-optimal çözümler kümesinin analizi ve karar vericilerin tercihlerine göre en uygun yenileme stratejisinin seçilmesi sağlanmaktadır.

Geliştirilen entegre teorik model, kamu binalarının enerji verimli yenilenmesi için veri odaklı, sürdürülebilir ve maliyet-etkin bir yaklaşım sağlamaktadır. Model, teorik kavramların bilimsel temelleri üzerine inşa edilirken, aynı zamanda pratik uygulama ihtiyaçlarını da karşılamaktadır.

Araştırma kapsamında entegre teorik model, Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi’ndeki kamu binalarının enerji verimli yenilenmesi için kapsamlı bir metodolojik çerçeve sunmuştur. Araştırmanın hipotezleri, değişkenleri ve analiz yöntemleri, bu teorik model doğrultusunda belirlenmiş, böylece araştırma bulgularının hem teorik bilgi birikimine katkıda bulunması hem de pratik uygulama değeri taşıması sağlanmıştır.

3.2 Veriye Dayalı Modelleme

Araştırma Alanı: Literatür araştırması ve mevcut uygulamaların incelenmesinden, yapılan çalışmaların yaygın olarak bina ölçeğinde gerçekleştirildiği tespit edilmiş olup, bu ölçekte yapılan çalışmaların, mevcut binaların sürdürülebilir yaklaşımla enerji verimli dönüşümünde bütüncül yaklaşımlar sunmada yetersiz kalacağı kanaatine varılmıştır. Araştırma kapsamında önerilen süreç tasarımı ve sürdürülebilirlik yaklaşımı hakkında

bütüncül sonuçlara ulaşabilmek ve sağlıklı veriye erişimde kolaylık sağlamak amacıyla araştırma alanı olarak Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi tercih edilmiştir. Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi Ankara İli Çankaya ve Yenimahalle İlçeleri sınırlarında yer almakta olup 43372 ada 3 ve 4 numaralı parseller üzerinde yer almaktadır. Söz konusu yerleşke, çeşitli eğitim, idari ve sosyal işlevleri barındıran çok sayıda yapıyı içermektedir (Şekil 3.5). Ayrıca kampüs içinde yer alan binaların tarihi nitelik, yaş, kullanım amacı, taşıyıcı sistem gibi farklı özelliklere sahip olması, araştırma sonuçlarının karşılaştırılmasına ve sonuçların geçerliğinin teyit edilmesine olanak tanımaktadır. Kampüs içerisinde yer alan yapıların alanları ve kat adetleri farklılık göstermektedir (Çizelge 3.1).



Şekil 3.5 Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi Vaziyet Planı (Orijinal)

Çizelge 3.1 Ankara Üniversitesi Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi bina listesi (Orijinal)

Bina Türü	Kat Sayısı	Brüt Alan (m ²)
Rektörlük	B+Z+1	6.569,00
Eczacılık Fakültesi	B+Z+2	26.050,00
Piri Reis Spor Salonu	Z+1	2.126,44
Kafeterya	Z	292,54
Konukevi	Z+1	512,00
Kafeterya (Eski Kazan Dairesi)	B+Z	174,20
Fen Fakültesi A Blok	B+Z+1	14.691,75
Fen Fakültesi B Blok	B+Z+1	11.530,41
Akademi Kafe	Z	226,22
Yaşlılık Merkezi	Z	84,40
Kimya Mühendisliği-Astronomi ve Uzay Bilimleri Binası (E Blok)	B+Z+3	6.011,98
Merkez Kütüphane	Z+3	2.175,71
Laboratuvar Binası (D Blok)	Z+2	6.409,86
Tenis Evi	Z	37,98
Nükleer Bilimler Enstitüsü	B+Z+1	3.391,20
Hidrotek	Z	207,00
Güneş Meydanı Tören Alanı	Z	294,50
Olimpik Yüzme Havuzu	B+Z+1	9.789,28
Basımevi	B+Z+1	5.092,29
Ord. Prof. Dr. Şevket Aziz Kansu Binası	B+Z+8	20.852,60
Uygulamalı Anaokulu	Z	411,07
Çocuk Bilim Merkezi (Çocuk Üniversitesi) Koordinatörlüğü	Z	237,59
Çocuk Kültürü Araştırmaları ve Uygulama Merkezi	Z	389,04
Latin Amerika Çalışmaları Araştırma ve Uygulama Merkezi	Z	254,07
Teknoloji Transfer Ofisi	Z	148,28
Kapalı Tenis Sahası	Z	633,00
Çöp Binası	Z	45,00
Bakım Onarım Birimi	Z	171,90
Seralar	Z	974,26
Biyoteknoloji Enstitüsü	Z+1	1.120,00
Herbaryum (C Blok)	B+Z+2	4.347,00
Jeoloji Mühendisliği (F Blok)	B+Z+3	9.122,90
TOPLAM		134.373,47

Araştırma alanı olarak belirlenen Ankara Üniversitesi'nin ana yerleşkelerinden biri olan Beşevler 10. Yıl Yerleşkesi 1946 yılında kurulmuş, Ankara ili Yenimahalle ilçesi

Emniyet Mahallesi'nde yer almaktadır. Toplam 253.427 m² alan üzerine kurulu olan yerleşke, üniversitenin en köklü eğitim merkezlerinden biridir. Yerleşke içinde Eczacılık Fakültesi, Fen Fakültesi, Rektörlük, Dış Hekimliği Fakültesi'nin bazı birimleri ve çeşitli idari binalar bulunmaktadır. Bu fakülte binalarının yanı sıra kütüphane, konferans salonu, spor tesisleri ve sosyal alanlar da yerleşke içerisinde yer almaktadır. Binaların inşası 1960'lı ve 1970'li yıllarda başlamış olup, zaman içerisinde çeşitli renovasyon çalışmaları geçirmiştir.

Yerleşkedeki binalar farklı ısıtma sistemlerine sahiptir. Merkezi ısıtma sistemi ile fan coil ısıtma-soğutma sistemi bunlardan başlıcalarıdır. Isıtma-soğutma sistemlerine ilaveten bireysel ısıtıcı kullanımı oldukça yaygındır. Aydınlatma lambaları büyük oranda floresan lambalardan oluşmaktadır. Binaların enerji tüketiminin izlenmesine ve değerlendirilmesine yönelik herhangi bir veri toplama, otomasyon çalışması bulunmamaktadır.

Eğitim-öğretim döneminde yaklaşık 5.000 öğrenci ve yaklaşık 750 idari ve 550 akademik olmak üzere toplam 1.300 personele hizmet veren yerleşke, yoğun bir kullanıma sahiptir. Binalar genellikle hafta içi 08:00-17:00 saatleri arasında aktif olarak kullanılmaktadır. Hafta sonları ise kütüphane ve bazı çalışma alanları hizmet vermeye devam etmektedir. Yaz döneminde öğrenci yoğunluğu azalmakla birlikte, idari personel ve akademik çalışmalar devam etmektedir.

Yerleşkenin bulunduğu bölgede karasal iklim özellikleri hakimdir. Yaz aylarında ortalama sıcaklık 24°C'ye kadar yükselirken, kış aylarında 0°C'ye kadar düşebilmektedir (Anonim 2025c). Bu geniş sıcaklık aralığı, binaların ısıtma ve soğutma yüklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Yerleşkenin toplam enerji tüketimi mevsimsel olarak büyük farklılıklar göstermekte olup, en yüksek tüketim değerleri kış aylarında ısıtma yüklerinden, yaz aylarında ise soğutma yüklerinden kaynaklanmaktadır.

İncelenen dört binanın fiziksel özellikleri enerji verimliliği perspektifinden önemli farklılıklar göstermektedir. Kampüsteki en eski yapı olan 78 yaşındaki Fen Fakültesi binası ve onu takip eden 61 yaşındaki Eczacılık, 40 yaşındaki Rektörlük ve en yeni yapı

olan 20 yaşındaki Şevket Aziz Kansu binaları, farklı dönemlerin enerji yaklaşımlarını yansıtmaktadır. Taban alanı bakımından Eczacılık binası 6.333,33 m² ile en büyük ısıtma-soğutma yüküne sahip olabilecek yapıdır. Şevket Aziz Kansu binası 38,4 metre yüksekliği ile ısı katmanlaşması açısından risk taşıırken, en düşük cam alanı oranına (%19,91) sahip olması yapay aydınlatma ihtiyacını artırmakta fakat ısı kaybını azaltmaktadır. Cam alanı oranında Rektörlük binası %47,95 ile en yüksek değere sahip olup, doğal aydınlatma potansiyeli yüksek ancak çift cam teknolojisine rağmen ısı kaybı riski taşımaktadır. Fen Fakültesi'nin düşük cam oranı (%14,27) ve yaşı, enerji verimliliği açısından iyileştirme potansiyeline işaret etmektedir. Pencere tipi olarak Rektörlük binası ve Fen Fakültesi'ndeki çift cam sistemleri, Şevket Aziz Kansu ve Eczacılık binalarındaki PVC sistemlere göre daha iyi ısı yalıtımı sağlayabilir. Uzunluk/derinlik oranları düşük olan Fen Fakültesi (1,48) ve Eczacılık Fakültesi (1,13) binaları, kompakt formları sayesinde dış ortama maruz yüzey alanını azaltarak ısı kaybını minimize etme potansiyeline sahiptir. Çatı tiplerinde ise kiremit çatılı yapılar (Rektörlük, Fen Fakültesi, Eczacılık) çatı arası havalandırması sağlarken, Şevket Aziz Kansu binasının betonarme çatısı ısı adası etkisini artırabilmektedir. Binaların fiziksel özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, binaların enerji performansı optimizasyonu için farklı stratejilere ihtiyaç duyduğu, yaş ve mimari karakteristiklerin enerji verimliliği potansiyellerini belirleyen temel faktörler olduğu görülmektedir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 Araştırma alanındaki binaların fiziksel özellikleri (Orijinal)

Bina adı	Rektörlük	Şevket Aziz Kansu	Fen Fakültesi	Eczacılık
Bina Yaşı	40	20	78	61
Taban Alanı (m ²)	2.178,73	2.281,26	3.843,47	6.333,33
Uzunluk (m)	55,5	78,8	112,0	122,0
Yükseklik (m)	12,4	38,4	13,5	20,5
Derinlik (m)	20,2	29,0	75,7	107,9
Uzunluk/Derinlik	2,75	2,72	1,48	1,13
Yükseklik/Uzunluk	0,22	0,49	0,12	0,17
Cam alanı oranı (%)	43,21	19,91	14,27	24,84
Pencere tipi	Çift Cam	PVC	Çift Cam	PVC
Çatı tipi	Kiremit Çatı	Betonarme	Kiremit Çatı	Kiremit Çatı
Pencere alanı (m ²)	1.375,2	1.648,00	1.499,35	2.365,21

Yerleşkedeki binaların enerji performansları üzerine yapılan incelemelerde, önemli bir kısmının enerji verimliliği açısından iyileştirme potansiyeli taşıdığı tespit edilmiştir. Bu potansiyel, binaların ısı geçirgenlik katsayıları, hava sızdırmazlık performansları ve enerji tüketim değerlerinin mevcut yapı standartlarıyla kıyaslanması sonucu belirlenmiştir. Son yıllarda uygulanan pencere sistemi yenilemeleri ve ısı yalıtım çalışmaları, bu iyileştirme sürecinin bir parçası olarak hayata geçirilmiştir. Ayrıca, kampüs genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna yönelik fizibilite çalışmaları da yürütülmektedir.

Araştırma Verisi: Araştırma kapsamında kullanılan veri seti, 2021-2024 yılları arasında Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'nde amaçlı örnekleme yöntemiyle seçilen dört adet kamu binasından toplanan saatlik enerji tüketim verilerinden oluşmaktadır. Binalar, yerleşkedeki yapı stoğunu temsil edecek şekilde farklı yapıım yıllarını (1943-2010), kullanım türlerini (eğitim, idari ve karma kullanım), yapı sistemlerini (betonarme karkas, prefabrike) ve taşıyıcı malzeme türlerini (taş, betonarme) kapsayacak biçimde seçilmiştir. Dört bina, istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde etmek için yeterli örneklem büyüklüğünü sağlarken, aynı zamanda detaylı analiz için gereken veri toplama ve işleme kapasitesi içinde kalmaktadır.

Veriler, Ankara Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı ve elektrik dağıtım firmalarından elde edilmiş olup, elektrik tüketimi ile seçilmiş binaların mimari projeleri ve binaların fiziksel özelliklerini ifade eden değerleri içermektedir. Ayrıca, literatürde bina enerji tüketimini etkileyen başlıca dış parametreler olarak tanımlanan (Li vd. 2015) ortalama maksimum sıcaklık, bağıl nem, buhar basıncı, toplam yağış miktarı ve ortalama rüzgâr hızı gibi meteorolojik veriler T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınarak veri setine dahil edilmiştir (Çizelge 3.3). Bu iklim parametreleri, binaların ısıtma-soğutma yüklerini doğrudan etkilemekte olup, Liu vd. (2019) ile Wang vd. (2018) tarafından önerilen enerji tahmin modellerinde kritik girdiler olarak kabul edilmektedir.

Enerji tüketimini tahmin etmede kullanılan veri seti toplam 35,064 saatlik kayıttan oluşmakta ve 48 aylık bir süreyi kapsamaktadır. Yapılan ilk analizlerde veri setinin

%95’lik bir bütünlüğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Veri kalitesini artırmak amacıyla kapsamlı bir ön işleme süreci uygulanmıştır. Bu süreçte öncelikle eksik veriler ele alınmıştır. Kısa süreli (1-3 saat) eksik veriler için doğrusal interpolasyon yöntemi kullanılırken, daha uzun süreli eksiklikler için ilgili gün ve saatteki geçmiş haftalardaki değerlerin ortalaması kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Temin edilen veri türleri ile veri kaynakları (Orijinal)

Veri Türü	Düzey	Veri Kaynağı
Elektrik tüketimi	Saatlik ve aylık	AKSA Elektrik A.Ş., Enerjisa Başkent Elektrik AŞ, Aycan Elektrik AŞ
Hava durumu ve iklim	Saatlik ve günlük	TC Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü
Bina geometrik ve fiziki verileri	Kategorik	A.Ü. Yapı İşleri Genel Müdürlüğü

Araştırmada, 1 Ocak 2021’den 31 Aralık 2024’e kadar dört yıllık süre boyunca toplanan saatlik enerji tüketimi ve iklim verilerini içeren kapsamlı veri seti kullanılmıştır. Veriler, Ankara Üniversitesi Beşevler Kampüsü’ndeki dört binadan toplanmıştır: Eczacılık Fakültesi binası, Fen Fakültesi binası, Şevket Aziz Kansu binası ve Rektörlük binası, tam veri kapsamı ile 35.064 saatlik gözlem içermektedir. Bu binalar, farklı inşaat teknikleri ve kullanım amaçları göz önünde bulundurularak seçilmiştir ve karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak sağlamıştır. Farklı işletim şekilleri, yapısal özellikleri ve iklimsel bağımlılıkları nedeniyle temsili vaka çalışmaları olarak hizmet vermektedirler.

Veri seti, saatlik aralıklarla kaydedilen enerji ve iklimle ilgili çeşitli değişkenleri içermektedir. Enerji tüketimi verileri her bir binada kurulu olan elektrik sayaçlarından elde edilirken, meteorolojik veriler yerel hava istasyonlarından toplanmıştır. Birincil değişkenler arasında yerel saatle kaydedilen zaman damgalı veriler ve saatlik elektrik fiyatlarının yanı sıra bağıl nem (%10 ila %100), atmosferik buhar basıncı (2 ila 23,1 hPa), ortalama rüzgâr hızı (0,1 ila 6,8 m/s), ortalama sıcaklık (-9,8°C ila 37°C) ve kümülatif saatlik yağıştan oluşan meteorolojik veriler yer almaktadır. Megawatt-saat cinsinden ölçülen elektrik tüketimi verileri dört bina arasında önemli farklılıklar göstermektedir: Eczacılık fakültesi binası (0,009 MWh ile 0,194 MWh arasında değişmektedir), Fen

fakültesi binası (0,016 MWh ile 0,077 MWh arasında değişmektedir), Şevket Aziz Kansu binası (0,087 MWh ile 0,397 MWh arasında değişmektedir) ve Rektörlük binası (0,014 MWh ile 0,059 MWh arasında değişmektedir), farklı boyutlarını, işlevlerini ve operasyonel özelliklerini yansıtmaktadır.

Kayıp veriler veri setinin yaklaşık %1,5'ini oluşturmaktadır ve zaman serisi analizinde sürekliliği sağlamak için doğrusal enterpolasyon yöntemleri kullanılarak ele alınmıştır. Tüketim, ortalama sıcaklık ve buhar basıncı gibi sürekli değişkenler, derin öğrenme modelleriyle uyumluluk için min-max ölçeklendirme kullanılarak ölçeklendirilmiştir.

Veri kümesi, eksik değer içermeyen 35.064 saatlik kayıt içermekte ve analiz için bütünlüğünü sağlamaktadır. Çizelge 3.4'te tüm değişkenler için tanımlayıcı istatistikler sunulmaktadır. Veri kümesi dört farklı bina için ayrı tüketim verileri içermektedir. Eczacılık fakültesi, 0,0280 MWh standart sapma ile 0,0546 MWh ortalama saatlik tüketime sahiptir. Fen fakültesi binası, 0,0234 MWh ortalama ve 0,0068 MWh standart sapma ile en düşük ortalama tüketimi göstermektedir. Şevket Aziz Kansu binası, 0,1306 MWh ortalama ve 0,0571 MWh standart sapma ile en yüksek tüketimi ve değişkenliği göstermektedir. Rektörlük binası ise 0,0388 MWh ortalama ve 0,0070 MWh standart sapma ile istikrarlı bir tüketim sergilemektedir.

Çizelge 3.4 Veri setinin tanımlayıcı istatistikleri (Orijinal)

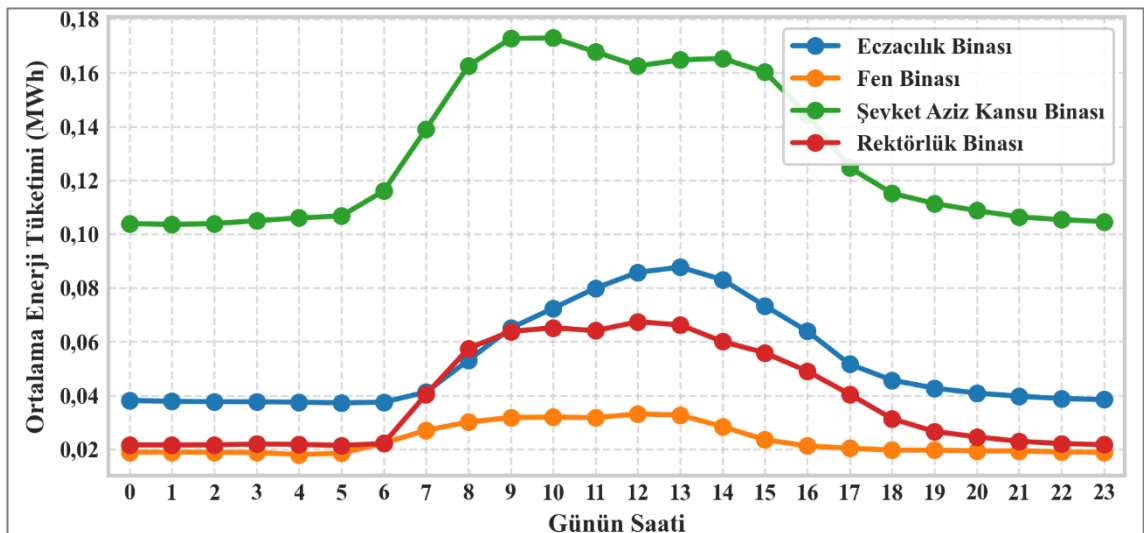
	Ortalama	Std. Sapma	Min	25%	50%	75%	Maks
Eczacılık (MWh)	0,0546	0,0280	0,0098	0,0370	0,0429	0,0618	0,1941
Fen Fakültesi B Blok (MWh)	0,0234	0,0068	0,0120	0,0184	0,0217	0,0294	0,0409
Şevket Aziz Kansu (MWh)	0,1306	0,0571	0,0001	0,0869	0,0994	0,1780	0,3972
Rektörlük (MWh)	0,0388	0,0070	0,0138	0,0354	0,0391	0,0429	0,0588
Fiyat (\$)	0,11	0,09	0,03	0,04	0,08	0,13	0,71
Ort. nem (%)	59,6	20,2	10,0	44,0	60,0	75,0	100,0
Buhar basıncı (hPa)	8,7	3,6	2,0	6,0	7,9	11,4	23,1
Ort. rüzgâr hızı (m/s)	1,3	0,8	0,1	0,7	1,2	1,7	6,8
Ort. sıcaklık (°C)	12,8	9,2	-9,8	5,4	12,6	19,7	37,0
Toplam yağış (mm)	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	18,8

Elektrik fiyatı verileri 0,11 \$ ortalama ve 0,09 \$ standart sapma ile daha yüksek değişkenlik göstermektedir. Minimum fiyat 0,03 \$ iken, maksimum fiyat muhtemelen

dinamik fiyatlandırma planları nedeniyle 0,71 \$'a ulaşmaktadır. Tablo ayrıca nem (ortalama: %59,6), buhar basıncı (ortalama: 8,7 hPa), rüzgâr hızı (ortalama: 1,3 m/s), sıcaklık (ortalama: 12,8°C) ve toplam yağış (ortalama: 0,01 mm) gibi iklim değişkenlerini de içermekte ve enerji tüketimi analizi için kapsamlı bir veri seti sağlamaktadır.

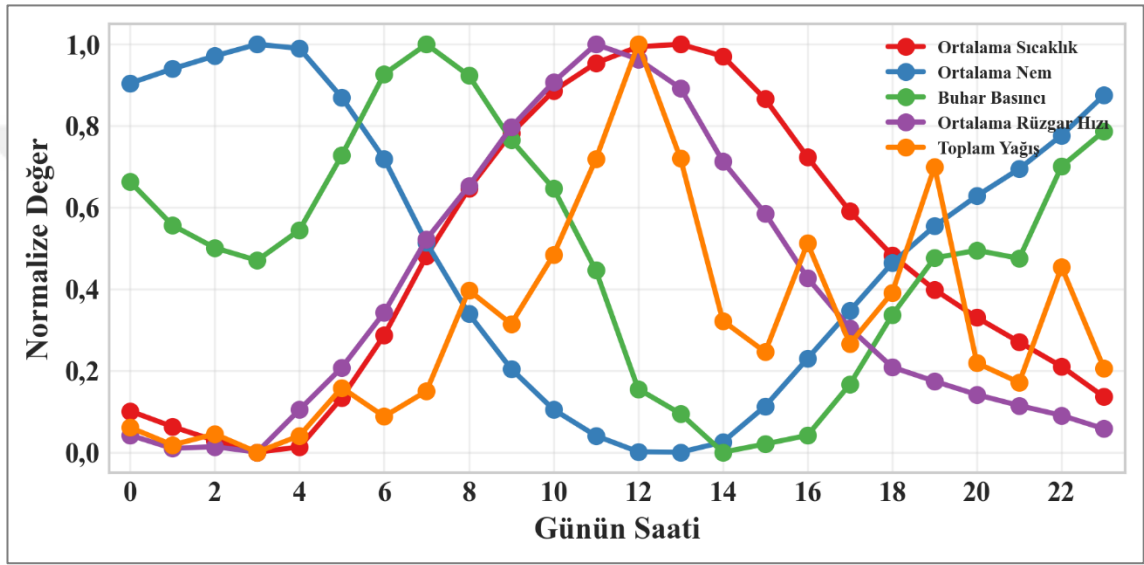
Keşifsel analiz enerji tüketiminde farklı zamansal modeller ortaya çıkarmıştır. Haftalık modeller, üniversite binalarının operasyonel dinamikleri ile tutarlı olarak hafta içi daha yüksek enerji tüketimi gösterirken, hafta sonları kullanım azalmaktadır. Daha soğuk kış sıcaklıkları daha yüksek ısıtma taleplerine yol açarken, nemli yaz koşulları artan soğutma enerjisi kullanımıyla ilişkili olduğundan mevsimsel modeller de ortaya çıkmaktadır.

Dört binadaki ortalama saatlik enerji tüketim modellerinin karşılaştırmalı analizi farklı profiller ortaya koymaktadır. Şevket Aziz Kansu binası en yüksek enerji tüketimini gösterirken, onu Eczacılık binası ve Rektörlük binası takip etmekte, Fen fakültesi binası ise en düşük tüketimi sergilemektedir. Tüm binalar günlük operasyonel döngülere karşılık gelen benzer zamansal modeller sergilemektedir. Tüketim gece saatlerinde (22:00-06:00) minimum seviyelerde kalmakta, çalışma saatlerinde artmakta, öğleden sonra (12:00-15:00) en yüksek değerlere ulaşmakta ve ardından akşam azalmaktadır (Şekil 3.6).



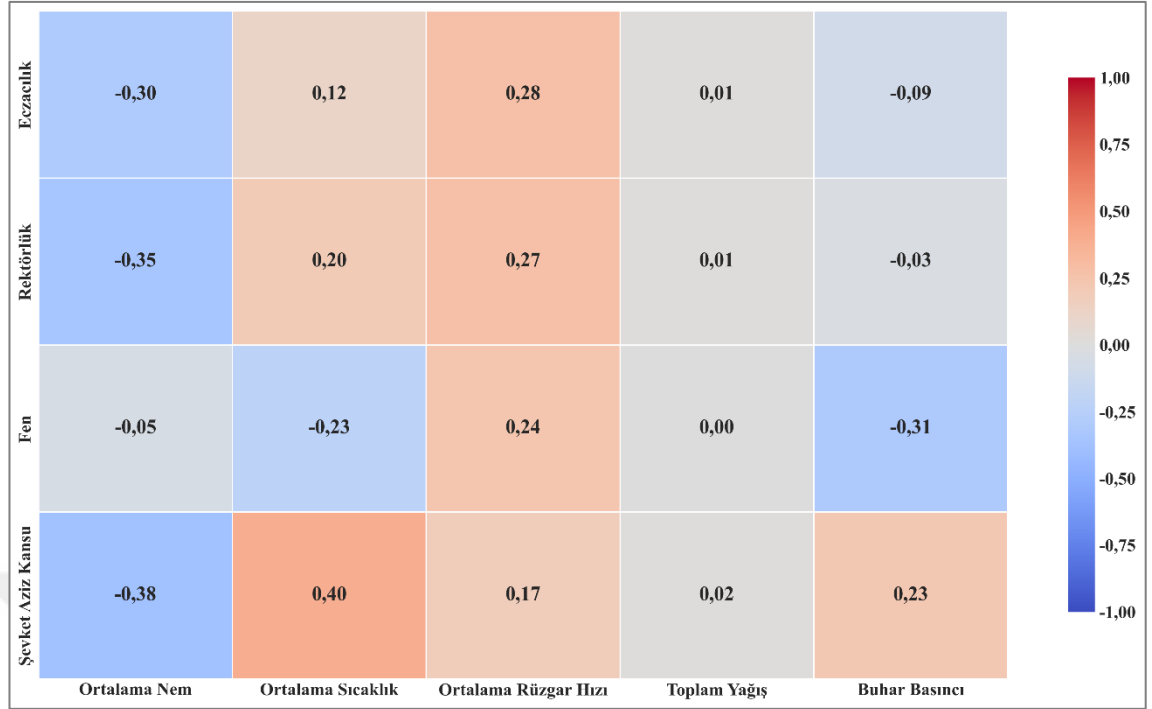
Şekil 3.6 Saatlik enerji tüketim kalıpları (Orijinal)

Meteorolojik değişkenlerin gün içindeki döngüsel değişimleri, enerji tüketimini etkileyen iklimsel faktörlerin karakteristik modellerini ortaya koymaktadır. Ortalama sıcaklık gece saatlerinde minimum değerlere ulaşmakta ve saat 14:00 civarında zirve yapmaktadır. Ortalama nem, sabahın erken saatlerinde yaklaşık %70'ten başlayıp öğleden sonra %45'e düşerek sıcaklıkla ters bir ilişki sergilemektedir. Bu örüntüler, enerji tahmin modellerinin performansını değerlendirirken hem günlük operasyonel döngülerin hem de iklimsel faktörlerin göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Meteorolojik değişkenlerin günlük döngüsü (Orijinal)

Enerji tüketimi ve iklimsel değişkenler arasındaki korelasyon analizi, ortalama sıcaklığın tüm binalarda enerji tüketimi ile kayda değer bir negatif korelasyon sergilediğini ve sıcaklık düştükçe enerji kullanımının arttığını göstermektedir. Ortalama nem enerji tüketimi ile değişken ilişkiler göstermekte, Eczacılık Fakültesi binası, Rektörlük binası ve Şevket Aziz Kansu binası için pozitif korelasyonlar gözlemlenirken, bu değişkenin etkisi Fen fakültesi binası için daha az belirgindir. Buhar basıncı Şevket Aziz Kansu binasında pozitif, Eczacılık ve Fen Fakültesi binalarında ise negatif korelasyonlar gösterirken, Rektörlük binasında çok zayıf bir ilişki sergilemektedir. Ortalama rüzgâr hızı özellikle Eczacılık Fakültesi ve Rektörlük binalarında belirgin pozitif korelasyonlar gösterirken, toplam yağış miktarı tüm binalarda ihmal edilebilir düzeyde korelasyonlar sergilemektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Binalara göre enerji tüketimi ve meteorolojik veriler arasındaki korelasyon (Orijinal)

Çalışmanın çok amaçlı optimizasyon aşamasında ise enerji tüketimi tahmini ile oluşturulan modeller kullanılarak geleceğe yönelik saatlik düzeyde elektrik tüketimi tahmin değerleri ile maliyet verileri üretilecektir. Optimizasyon veri setinin maliyet kalemi için Avrupa Birliği Resmi Gazetesi tarafından yayımlanan “Binalar ve yapı elemanları için asgari enerji performansı gerekliliklerinin maliyet açısından en uygun seviyelerinin hesaplanmasına yönelik karşılaştırmalı bir metodoloji çerçevesi oluşturmak suretiyle binaların enerji performansına ilişkin 2010/31/EU sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifini tamamlayan” 16 Ocak 2012 tarihli ve 244/2012 (AB) sayılı Komisyon Delege Düzenlemesi Maliyet Optimal Metodoloji Çerçevesi kullanılmıştır. Bu kapsamda belirlenen maliyet kalemleri:

1. Genel maliyet, ilk yatırım maliyetlerinin bugünkü değeri, işletme maliyetlerinin toplamı ve yenileme maliyetlerinin (başlangıç yılına atıfta bulunulur) yanı sıra varsa bertaraf maliyetlerinin toplamı anlamına gelir. Makroekonomik düzeyde hesaplama için, sera gazı emisyonlarının maliyetlerine ilişkin ek bir maliyet kategorisi getirilmiştir;

2. İlk yatırım maliyetleri, binanın veya yapı elemanının kullanıma hazır olarak müşteriye teslim edildiği noktaya kadar oluşan tüm maliyetler anlamına gelmektedir. Bu maliyetler tasarım, yapı elemanlarının satın alınması, tedarikçilerle bağlantı, kurulum ve devreye alma süreçlerini içerir;
3. Enerji maliyetleri, ulusal vergiler de dahil olmak üzere enerji için yıllık maliyetler ile sabit ve puant ücretler anlamına gelmektedir;
4. İşletme maliyetleri, sigorta, kamu hizmeti ücretleri ve diğer sabit ücretler ve vergiler için yıllık maliyetler dahil olmak üzere binanın işletilmesiyle bağlantılı tüm maliyetler anlamına gelir;
5. Bakım maliyetleri, binanın veya yapı elemanının istenen kalitesini korumak ve eski haline getirmek için alınan önlemlerin yıllık maliyetleri anlamına gelir. Bu, denetim, temizlik, ayarlamalar, onarım ve sarf malzemeleri için yıllık maliyetleri içerir;
6. İşletme maliyetleri, yıllık bakım maliyetleri, işletme maliyetleri ve enerji maliyetleri anlamına gelir;
7. Bertaraf maliyetleri, bir bina veya yapı elemanının kullanım ömrünün sonunda yıkım maliyetleri anlamına gelir ve yıkım, henüz kullanım ömrünün sonuna gelmemiş yapı elemanlarının sökülmesi, nakliye ve geri dönüşümü içerir;
8. Yıllık maliyet, belirli bir yılda ödenen işletme maliyetleri ve periyodik maliyetler veya yenileme maliyetlerinin toplamı anlamına gelir;
9. İkame maliyeti, hesaplama dönemi boyunca tahmini ekonomik yaşam döngüsüne göre bir yapı elemanı için ikame yatırım anlamına gelir;
10. Sera gazı emisyonlarının maliyeti, binalardaki enerji tüketimiyle ilgili CO2 emisyonlarının neden olduğu çevresel zararın parasal değeri anlamına gelmektedir.

Analizde aşağıdaki formül kullanılmıştır (3.1, 3.2):

$$C_g(T) = C_1 + \sum_j \left[\sum_{i=1}^T (C_{a,i}(j) R_d(i)) - V_{f,t}(j) \right] \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de;

T : hesaplanan zaman dilimi

$C_g(T)$: hesaplanan zaman dilimi boyunca genel maliyet

C_1 : alınan önlem veya önlem seti kapsamında yapılan başlangıç yatırım maliyeti

$C_{a,i}(j)$: i yılı boyunca alınan önlemlerin veya önlemler setinin yıllık maliyeti

$V_{f,t}(j)$: hesaplama döneminin sonunda (başlangıç yılı T_0 'a indirgenmiş olarak) j önleminin veya önlemler setinin artık değeri

$R_d(i)$: i yılı ve f iskonto oranı baz alınarak hesaplanan iskonto faktörü

$$R_d(n) = \left(\frac{1}{1 + \frac{f}{100}} \right)^n \quad (3.3)$$

n : başlangıç yılı baz alınarak toplam yıl sayısı

f : reel iskonto oranı

olarak gösterilmiştir.

Yaşam döngüsü maliyetine ilaveten saatlik düzeyde enerji harcamaları da yaşam döngüsü maliyetine eklenerek optimizasyon modelinde kullanılacak “maliyet” sütunu oluşturulmuştur.

Araştırma kapsamında maliyet etkin çok amaçlı enerji optimizasyonu için farklı yapı elemanı ve malzeme senaryoları oluşturulmuştur. Buna göre çok amaçlı optimizasyon sürecinde kullanılması öngörülen yapı elemanları ve bunlara ait alternatif malzeme seçeneklerini detaylı biçimde sunulmaktadır. Dış cephe, pencere ve çatı olmak üzere üç ana yapı elemanı grubu için toplamda dokuz farklı malzeme alternatifi belirlenmiştir (Çizelge 3.5).

Her bir malzeme alternatifi için; malzeme adı, poz numarası, ölçü birimi, 2025-2029 yılları arasındaki birim fiyat projeksiyonları, ısı iletkenlik değeri (λ değeri), amortisman oranı, uygulama alanı ve ekonomik ömür bilgileri yer almaktadır.

Dış cephe elemanları için; 60 mm kalınlığında EPS levha, 40 mm kalınlığında XPS levha ve 40 mm kalınlığında taşıyıcı ısı yalıtım levhası olmak üzere üç farklı seçenek belirlenmiştir. Bu malzemelerin ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0,04 W/mK, 0,03 W/mK ve 0,035 W/mK olup, tümünün ekonomik ömrü 12 yıl ve amortisman oranı %8,33 olarak hesaplanmıştır. Toplam 2.774,65 m² uygulama alanı için 2025-2029 yılları arasında değişen birim fiyatlar dikkate alınmıştır.

Pencere elemanları için; PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+4 mm çift cam, ahşap doğramaya çıta ile 4+4 mm çift cam ve ahşaptan kasa ve pervazlı tek satırlı pencere olmak üzere üç alternatif belirlenmiştir. Bu malzemelerin ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0,16 W/mK, 0,2 W/mK ve 0,2 W/mK olup, tümünün ekonomik ömrü 6 yıl ve amortisman oranı %16,66 olarak öngörülmüştür. Toplam 2.365,21 m² uygulama alanı için yıllara göre birim fiyat artışları tabloda yansıtılmıştır.

Çatı elemanları için ise; poliüretan yalıtımlı metal çatı paneli, polistren yalıtımlı çatı paneli ve poliizosiyanurat yalıtımlı çatı paneli olmak üzere üç alternatif belirlenmiştir. Bu malzemelerin ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0,04 W/mK, 0,37 W/mK ve 0,025 W/mK olup, tümünün ekonomik ömrü 12 yıl ve amortisman oranı %8,33 olarak hesaplanmıştır. Toplam 4.908,00 m² uygulama alanı için 2025 yılı birim fiyatları tabloda gösterilmiştir.

Hazırlanan senaryo çizelgesi, her bir yapı elemanı ve malzeme kombinasyonu için farklı yıllardaki maliyetlerin hesaplanmasına, yatırımın geri dönüş süresinin belirlenmesine ve fayda-maliyet analizinin yapılmasına olanak sağlamaktadır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 Malzeme alternatifleri ile senaryoların hazırlanması (Orijinal)

Bina Elemanı	Dış Cephe			Pencere			Çatı		
Senaryo	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Malzeme Adı	Yüzeye dik çekme mukavemeti en az 100kPa (TR100), 60 mm kalınlıkta EPS Levha	Yüzeye dik çekme mukavemeti en az 200 kPa, 40 mm kalınlıkta XPS levha	Yüzeye dik çekme mukavemeti en az 10kPa (TR10), 40 mm kalınlıkta Taşyünü ısı yalıtım levhası	PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+4 mm kalınlıkta 12 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması	Ahşap doğramaya çıta ile 4+4 mm kalınlıkta 12 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması	Ahşaptan kasa ve pervazlı tek satırlı pencere yapılması ve yerine konulması	Poliüretan yalıtımlı metal çatı paneli	Polistren yalıtımlı çatı paneli (EPS yalıtımlı)	Poliizosiyanurat yalıtımlı çatı paneli
Poz No	10.310.1301	10.310.1501	10.310.1102	15.470.1413	15.470.1401	15.515.1001	15.320.1001	15.320.1009	15.320.1005
Ölçü	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²
Birim Fiyat (TL/m ²) 2025	1.224,73	2.937,20	3.299,35	1.395,41	1.804,76	1.745,91	1.060,10	1.181,95	1.581,15
λ Değeri (W/mK)	0,04	0,03	0,035	0,16	0,2	0,2	0,04	0,37	0,025
Amortisman Oranı	8,33%	8,33%	8,33%	16,66%	16,66%	16,66%	8,33%	8,33%	8,33%
Alan (m ²)	2.774,65	2.774,65	2.774,65	2.365,21	2.365,21	2.365,21	4.908,00	4.908,00	4.908,00
Ekonomik Ömür	12	12	12	6	6	6	12	12	12

Enerji tüketim tahmin modelleri geliştirilmeden önce, veri setlerinde kapsamlı bir ön işleme süreci yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan veriler temel olarak üç kaynaktan elde edilmiştir. Bunlar; bina elektrik tüketimi verileri (saatlik ve günlük elektrik tüketim değerleri, MWh cinsinden), meteorolojik veriler (sıcaklık, nem, buhar basıncı, rüzgâr hızı, yağış miktarı gibi iklimsel parametreler) ve bina fiziki verilerinden (binaların alanı, hacmi, kullanım amacı, yapı türü ve diğer fiziksel özellikleri) oluşmaktadır.

Veri setleri üzerinde yapılan incelemeler sonucunda çeşitli eksik ve aykırı değerler tespit edilmiştir. Eksik değerler (NaN) veri setlerinin tümünde tespit edilmiş, bu değerler öncelikle tanımlayıcı istatistiklerle sayısallaştırılmıştır. Örneğin, günlük düzeyde buhar basıncı, sıcaklık, ortalama çiy sıcaklığı ve ortalama nem değerlerinde eksik girdiler bulunmuştur. Ayrıca Rektörlük binasının elektrik tüketimi verilerinde 2022 yılının son beş gününde değer girilmediği tespit edilmiştir. Modelleme öncesinde NaN değerlerini içeren satırlar veri setinden çıkarılmıştır. Bazı modellerde daha kapsamlı yaklaşımlar uygulanmıştır; günlük düzeydeki eksik değerler için aynı dönemin bir önceki/sonraki yılına ilişkin değerler ile kayıp değerın öncesi/sonrası değerleri birlikte değerlendirilerek doldurulmuştur. Rektörlük binasındaki eksik değerler ise lineer enterpolasyon yöntemiyle doldurulmuştur.

Aykırı değerlerin tespiti için çeyrekler arası aralık (IQR) yöntemi kullanılmıştır. Sayısal değişkenler için Q1 (25. persentil) ve Q3 (75. persentil) değerleri hesaplanmış, alt limit = $Q1 - 1.5 * IQR$ ve üst limit = $Q3 + 1.5 * IQR$ formülü kullanılarak aykırı değerler tespit edilmiştir. Alternatif olarak, bazı modellerde ortalamadan 3 standart sapma uzaklıktaki değerler aykırı değer olarak kabul edilmiştir. Tespit edilen aykırı değerler için iki farklı yaklaşım uygulanmıştır; aykırı değerleri içeren satırlar veri setinden çıkarılmıştır ve Şevket Aziz Kansu binasının elektrik tüketimine ilişkin Temmuz 2022 – Eylül 2022 dönemleri arasındaki anormal yüksek değerler için sayaç arızası olabileceği düşünüldüğünden doğrulama beklenmiştir.

Model performansını iyileştirmek için çeşitli veri dönüşümleri uygulanmıştır. ‘Date’ sütunu ‘dd.mm.yyyy HH:MM’ formatından datetime formatına dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, zaman serisi analizleri ve zaman temelli özelliklerin çıkarılması için gereklidir.

Farklı ölçeklerdeki değişkenlerin etkisini dengelemek için tüm modellerde MinMaxScaler kullanılarak değişkenler [0,1] aralığına normalize edilmiştir. LSTM ve GRU gibi sinir ağı modellerinde, öğrenme sürecinin stabilizasyonu için bu normalizasyon özellikle önemlidir.

Model girdilerini zenginleştirmek için çeşitli özellik mühendisliği teknikleri uygulanmıştır. Tarih sütunundan saat (hour), gün (day), ay (month), haftanın günü (day_of_week), mevsim (season) ve mesai saati olup olmadığını belirten ikili değişken (is_business_hour) gibi yeni özellikler türetilmiştir. Zaman serilerinin karakteristiğini daha iyi yansıtmak için 1 saat önceki tüketim (consumption_lag1), 24 saat önceki tüketim (consumption_lag24) ve son 24 saatin ortalama tüketimi (consumption_rolling_mean24) gibi gecikmeli özellikler oluşturulmuştur. Değişkenler arası ilişkileri modellemek için sıcaklık ve nem etkileşimi (temp_humidity) gibi etkileşim özellikleri eklenmiştir. Derin öğrenme modelleri için TIME_STEP parametresi (genellikle 168 saat - 1 hafta) kullanılarak geçmiş değerlerden oluşan diziler hazırlanmış ve tahmin edilecek gelecek zaman adımları FUTURE_SIZE parametresi (1 saat) ile belirlenmiştir.

Modellerin eğitilmesi ve değerlendirilmesi için veri setleri zamansal yapısı korunarak eğitim seti (%80) ve test seti (%20) olarak bölünmüştür. Bazı modellerde eğitim seti kendi içinde de eğitim (%80) ve doğrulama (%20) olarak ayrılmıştır. Özellikle geleneksel makine öğrenmesi modellerinde TimeSeriesSplit kullanılarak zaman serisi çapraz doğrulaması yapılmış ve 5 kat çapraz doğrulama ile model hiperparametreleri optimize edilmiştir.

Tahmin modellerinin geliştirilmesi sonrasında, çalışmanın ikinci aşaması olan optimizasyon süreci için ayrı bir veri hazırlığı yapılmıştır. Optimizasyon aşamasında, tüketim tahmini modellerinden üretilen enerji tüketimi verileri ve yaşam döngüsü konseptine göre hesaplanan maliyet verilerini içeren yeni bir veri seti dosyası kullanılmıştır. Bu dosya, farklı yapı elemanı yenileme senaryoları altında bina enerji tüketimi ve ilişkili maliyetleri içermektedir.

Optimizasyon verileri, Random Forest modelinin 2025-2030 dönemi için ürettiği yıllık bazda tahmin değerleri ve EU 244/2012 sayılı Komisyon Delege Düzenlemesi çerçevesinde hesaplanan maliyet verilerinden oluşmaktadır. Altı yıllık analiz periyodu için her yıl bazında veri işlemi gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon verileri toplam 63 farklı alternatif kombinasyonu içermektedir. Bu senaryolar, üç ana yapı bileşeni (dış cephe, pencere ve çatı sistemleri) için tanımlanan yenileme alternatifleri arasından optimal kombinasyonların seçilmesini amaçlamaktadır. Dış cephe için 3 alternatif (1.1, 1.2, 1.3), pencere için 3 alternatif (2.1, 2.2, 2.3) ve çatı için 3 alternatif (3.1, 3.2, 3.3) olmak üzere toplam $3 \times 3 \times 3 = 27$ tam kombinasyon ile tekli ve ikili kombinasyonlar dahil 63 farklı yenileme alternatifi oluşturulmuştur.

Dört farklı bina türü için ayrı veri setleri oluşturulmuştur: idari amaçlı kullanıma ayrılan Rektörlük binası (40 yaş, betonarme), akademik amaçlı kullanıma ayrılan Eczacılık Fakültesi (61 yaş, betonarme, PVC pencere) ile Fen Fakültesi B Blok binası (78 yaş, taş iskelet, çift cam) ve hem idari hem de akademik amaçlı kullanıma ayrılan Şevket Aziz Kansu binası (11 yaş, betonarme, PVC pencere).

Tahmin modellerinin değerlendirilmesinde kullanılan performans metrikleri, modellerin tahmin doğruluğunu ve güvenilirliğini objektif bir şekilde ölçmeye olanak tanımaktadır. Araştırma kapsamında modellerin performanslarını karşılaştırmak ve optimizasyon aşaması için en uygun modeli seçmek için belirlenen performans metrikleri; hataların karesinin ortalaması (mean squared error – MSE), ortalama karesel hata (root mean squared error – RMSE), ortalama mutlak hata (mean absolute error – MAE), ortalama mutlak yüzde hatası (mean absolute percentage error – MAPE) ve belirleme katsayısı (coefficient of determination – R^2) olarak sıralanmıştır.

Hataların karesinin ortalaması (MSE); MSE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasını ölçen bir metriktir. Bu metrik, büyük hataları daha ağır şekilde cezalandırma özelliğine sahiptir, böylece modelin önemli sapmalara karşı hassasiyeti değerlendirilebilir. MSE aşağıdaki formülle hesaplanır (3.3).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4)'te n , veri noktalarının sayısını, Y_i gözlemlenen değerleri ve $\hat{Y}_i$ tahmini değerleri ifade etmektedir.

Ortalama karekök sapması (RMSE); RMSE, MSE'nin kareköküdür ve hata ölçümelerini hedef değişkenle aynı birimde sağlayarak yorumlanabilirliği artıran bir metriktir. RMSE, enerji tüketim tahminlerindeki ortalama hata büyüklüğünün doğrudan anlaşılmasını sağlar. RMSE aşağıdaki şekilde hesaplanır (3.4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (3.5)$$

Ortalama Mutlak Hata (MAE); MAE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasını hesaplayan bir metriktir. Bu metrik, tahmin hatalarının doğrudan bir ölçüsünü sunar ve MSE ile RMSE'ye kıyasla aykırı değerlere daha az duyarlıdır. MAE aşağıdaki formülle hesaplanır (3.5).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (3.6)$$

Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE); MAPE, tahmin hatasını gerçek değer yüzdesi olarak ifade eden bir metriktir. Bu metrik, farklı ölçeklerdeki veri setleri arasında model performansının karşılaştırılmasını kolaylaştırır. MAPE özellikle enerji tüketim tahminlerinde, hatanın göreceli büyüklüğünün anlaşılması açısından önemlidir. MAPE aşağıdaki formülle hesaplanır (3.6).

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \quad (3.7)$$

Sıfıra bölünme sorununu önlemek için, gerçek değer sıfır olduğu durumlarda küçük bir epsilon değeri (ϵ) eklenir (3.7).

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\max(Y_i, \epsilon)} \right| \quad (3.8)$$

Belirtme Katsayısı (R^2); R^2 , modelin açıklayıcı gücünü ölçen bir metriktir ve tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerdeki varyasyonu ne ölçüde açıkladığını gösterir. R^2 değerleri 0 ile 1 arasında değişir; 1'e yakın değerler daha iyi model uyumunu, 0'a yaklaşan değerler ise yetersiz açıklama kapasitesini gösterir. R^2 şu formülle hesaplanır (3.8).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (3.9)$$

Burada $\bar{Y}_i$ gerçek değerlerin ortalamasını temsil etmektedir.

Farklı tahmin modellerinin performansını değerlendirmek için sistematik bir yaklaşım benimsenmiştir. Veri setinin eğitim, doğrulama ve test setlerine bölünmesinde zaman serisi verilerinin özelliklerine uygun bir yaklaşım kullanılmıştır. Böylelikle modelin gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceğinin daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilebilmesine olanak tanınmıştır.

Enerji tüketimi tahmininde kullanılan beş farklı model (RF, SVR, LSTM, GRU, ARIMA) incelendiğinde, her birinin kendine özgü teknik özellikleri, güçlü yanları ve kısıtlılıkları öne çıkmaktadır (Çizelge 3.6). Random Forest, aşırı öğrenmeye karşı direnci ve özellik önem analizi yapabilmesi ile yorumlanabilirlik sunarken, hesaplama yükü artabilmektedir. SVR, yüksek boyutlu özellik uzayında çalışarak karmaşık ilişkileri yakalayabilmekte, ancak büyük veri setlerinde hesaplama maliyeti artmaktadır. LSTM, uzun vadeli bağımlılıkları modelleyebilme ve kaybolan gradyan sorununu çözme yeteneğiyle öne çıkarken, karmaşık yapısı ve yüksek parametre sayısı dezavantaj oluşturabilmektedir. GRU, LSTM'e göre daha az parametre içermesine rağmen benzer performans gösterebilmekte, fakat hala yüksek hesaplama kaynağı gerektirmektedir. ARIMA ise basit yapısı ve kolay yorumlanabilirliği ile avantaj sağlarken, mevsimsel değişimleri modellemede ek bileşenler gerektirmekte ve aykırı değerlere karşı hassasiyet göstermektedir.

Çizelge 3.6 Binalarda enerji tüketiminde tahmin tekniklerinin karşılaştırılması (Orijinal)

Teknik	Güçlü Yanlar	Kısıtlılıklar
RF	1. Overfitting'e karşı dayanıklıdır. Bir veri kümesindeki özelliklerin sayısını azaltmak için Özellik Önemi gerçekleştirme yeteneği vardır. Yüksek boyutlu veri kümelerine karşı dayanıklıdır.	1. Topluluktaki ağaç sayısı çok fazla olduğunda hesaplama açısından masraflıdır. Topluluktaki ağaç sayısını belirlemek zordur.
SVR	1. Giriş eğitim setini yüksek boyutlu özellik uzayına dönüştürmek için güçlü bir yöntemdir. Torba dışı örneklerde yüksek genelleme kabiliyeti vardır. Sınırlı miktarda eğitim seti ile bile iyi çalışır. Yerel minimum yerine küresel minimum çözüme yeteneği vardır.	1. SVR büyük veri kümeleriyle eğitildiğinde hesaplama karmaşıklığı yüksektir. DT ve RA modellerine kıyasla daha az yorumlanabilir. Kernel fonksiyonunun uygun şekilde seçilmesi gerekir.
LSTM	1. Geleneksel RNN'lerde kaybolan/patlayan gradyan problemlerini çözüme yeteneği. Zaman serisi bileşenlerindeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenir. Tanh fonksiyonu sayesinde yüksek yakınsama oranı. Girdi ve çıktı vektörünün uzunluğu değişebilir (örn. Seq-2-Seq modelleri).	1. Öğrenme süreci sırasında overfitting olgusuna yatkındır. Karmaşık yapı. Ağdaki parametre sayısı son derece fazladır. Kullanımı nispeten kolay değildir.
GRU	1. Geri besleme döngüsünü kullanarak dizideki veri noktaları arasındaki zamansal korelasyonu öğrenir. Giriş ve çıkış vektörünün uzunluğu değişebilir (örn. Seq-2-Seq modelleri). LSTM'e göre daha az parametreye sahiptir.	1. Öğrenme süreci sırasında bazı durumlarda kaybolan gradyan problemleri yaşanabilir. Ağdaki parametre sayısı hala yüksektir. Kullanımı nispeten kolay değildir.
ARIMA	1. Mevsimsellik, trendler vb. gibi zaman serisi bileşenlerini gösterebilme becerisi vardır. Ayarlanması gereken hiperparametre sayısı, gelişmiş ML ve DL modellerine kıyasla azdır. Kullanımı kolaydır.	1. Mevsimsel bileşen içeren zaman serisi veri kümelerini desteklemek için ek bileşenler gerektirir. Aykırı değerlere karşı oldukça hassastır. Zaman serisi görevlerinde dönüm noktasını tahmin etmede düşük performans gösterir. (p,d,q) değerlerinin uygun şekilde seçilmesi gerekir.

Araştırmada kullanılan beş tahmin modelinin (LSTM, GRU, Random Forest, SVR ve ARIMA) karşılaştırmalı analizi, farklı model mimarileri ve hiperparametre konfigürasyonları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Her model, pencere boyutu, veri ön işleme teknikleri ve optimizasyon yaklaşımları açısından kendine özgü karakteristikler sergilemektedir. Modellerin performans değerlendirmesi, tahmin doğruluğu, genelleme yeteneği ve pratik uygulanabilirlik kriterleri çerçevesinde yapılmıştır.

3.3 Veriye Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon

Çok kriterli optimizasyon problemlerinde senaryo seçimi, birbirleriyle çelişen amaçların eş zamanlı değerlendirilmesi gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu bölümde, baskınlık koşulları temelli karar mekanizması ve üç farklı stratejik yaklaşıma dayalı senaryo seçim metodolojisi ele alınmaktadır.

Çok Kriterli Karar Probleminin Matematiksel Formülasyonu: Çok kriterli senaryo seçimi problemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Karar Matrisi: $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ burada $i = 1, 2, \dots, m$ alternatif senaryolar ve $j = 1, 2, \dots, n$ kriterler

Kriter Türleri: $C_j \in \{min, max\}$ minimize veya maksimize edilecek kriterler

Senaryo Seçim Hedefi: Baskınlık koşullarına göre optimal alternatif senaryoların belirlenmesi

Belirlenen formülasyon geleneksel tek skalar değer optimizasyonundan farklı olarak, çoklu senaryo stratejisi ile karar vericilere alternatif çözüm seçenekleri sunmaktadır.

Baskınlık Temelli Senaryo Seçim Mekanizması: Ana karar verme süreci, üç farklı stratejik yaklaşıma dayalı baskınlık koşulları ile gerçekleştirilmektedir:

1. Tek Kriter Baskınlık Stratejileri

Tüketim Odaklı Senaryo Seçimi: Minimize edilecek tüketim kriteri için Eşitlik 3.10 kullanılır.

$$x_1^* = \operatorname{argmin}\{x_i\} \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (3.10)$$

Maliyet Odaklı Senaryo Seçimi: Minimize edilecek maliyet kriteri için Eşitlik 3.11 kullanılır.

$$x_2^* = \operatorname{argmin}\{x_i\} \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (3.11)$$

2. Eşit Ağırlıklandırma Stratejisi

Dengeli Senaryo Seçimi: Eşit ağırlıklandırma için Eşitlik 3.12 kullanılır.

$$S_1^* = \sum_{j=1}^n (\bar{n}_{ij} \omega_j) \rightarrow \max \quad (3.12)$$

Burada $\omega_j = \frac{1}{n}$ (tüm kriterler için eşit ağırlık)

Bu yaklaşımda tek kriter baskınlığı deterministik seçim sağlarken, eşit ağırlıklandırma stratejisi tüm kriterlere eşit önem vererek dengeli çözüm üretmektedir.

Üç Senaryo Stratejisinin Entegre Yaklaşımı: Geliştirilen karar mekanizması, üç farklı stratejik tercihe uygun senaryo seçimi sağlamaktadır (Çizelge 3.8):

Çizelge 3.7 Stratejilere göre senaryo seçimi (Orijinal)

Strateji 1: Tüketim Odaklı Senaryo	
Baskınlık koşulu	Minimum tüketim değeri
Seçim mekanizması	Deterministik tek kriter optimizasyonu (Eşitlik 3.10)
Ağırlık	Tüketim = 0,9; Maliyet: 0,1
Strateji 2: Maliyet Odaklı Senaryo	
Baskınlık koşulu	Minimum maliyet değeri
Seçim mekanizması	Deterministik tek kriter optimizasyonu (Eşitlik 3.11)
Ağırlık	Tüketim = 0,1; Maliyet: 0,9
Strateji 3: Dengeli Senaryo	
Baskınlık koşulu	Eşit ağırlıklandırma ile maksimum skor
Seçim mekanizması	Eşit ağırlıklı çok kriterli optimizasyon (Eşitlik 3.12)
Ağırlık	Tüketim = 0,5; Maliyet = 0,5

Normalizasyon ve Skor Hesaplama Sistemi: Farklı birimli kriterlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi için normalize edilmiş değerler kullanılmaktadır. Minimum kriterler için normalizasyon, Eşitlik 3.13 ile ifade edilmiştir.

$$\bar{n}_{ij} = \frac{(\max(x_{ij}) - x_{ij})}{(\max(x_{ij}) - \min(x_{ij}))} \quad (3.13)$$

Dengeli senaryo skoru elde etmek için Eşitlik 3.14 ile ifade edilen formül kullanılmıştır.

$$S_3^i = \sum_{j=1}^n (\bar{n}_{ij} \omega_j) \text{ burada } \omega_j = 0,5 \text{ eşit ağırlık} \quad (3.14)$$

Önerilen yaklaşım, yüksek skor = daha iyi performans prensibini sağlamakta ve eşit ağırlıklandırmanın objektif değerlendirme yapmasını mümkün kılmaktadır.

Senaryo Karşılaştırma ve Değerlendirme Kriterleri: Üç farklı senaryo stratejisinin performans değerlendirmesi, her stratejinin kendi optimizasyon hedefine göre yapılmaktadır:

- Tüketim Performansı: Tüketim odaklı senaryonun minimum tüketim başarısı
- Maliyet Performansı: Maliyet odaklı senaryonun minimum maliyet başarısı
- Dengeli Performans: Eşit ağırlıklı skorun maksimizasyon başarısı

Bu çok stratejili yaklaşım, karar vericilere farklı öncelik alanlarına göre seçim yapma esnekliği sunmakta ve tek boyutlu optimizasyonun kısıtlarını aşmaktadır.

Baskınlık Koşulları ve Karar Teorisi Temeli: Geliştirilen senaryo seçim sisteminin teorik temeli, matematiksel baskınlık kavramına dayanır. k kriteri için Tek kriter baskınlığı Eşitlik 3.15 ve eşit ağırlıklı baskınlık ise Eşitlik 3.16 ile ifade edilmiştir.

$$x_i > x_j \leftrightarrow f_k(x_i) < f_k(x_j) \quad (3.15)$$

$$x_i > x_j \leftrightarrow \sum_k (\bar{n}_{ik} 0,5) > \sum_k (\bar{n}_{jk} 0,5) \quad (3.16)$$

Ortaya konulan baskınlık ilişkileri, karar teorisinin matematiksel sağlamlığını ortaya koymakta ve her senaryo stratejisinin tutarlı seçim yapmasını sağlamaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırma bulguları, kamu binalarının enerji verimli dönüşümü konusunda iki aşamalı bir analiz gerçekleştirildiğini göstermektedir. İlk aşamada, enerji tüketimi tahmin modellerinin performans analizi yapılarak derin öğrenme yaklaşımları (LSTM ve GRU) ile klasik makine öğrenmesi yöntemleri (RF, SVR ve ARIMA) sistematik olarak karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada, en başarılı tahmin modelinin sonuçları temelinde çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilerek farklı derin yenileme stratejilerinin enerji-maliyet performansları analiz edilmiştir.

Araştırma Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'ndeki dört farklı kamu binasında (Eczacılık Fakültesi, Fen Fakültesi B Blok, Şevket Aziz Kansu Binası ve Rektörlük Binası) gerçekleştirilmiştir. Tahmin modelleri için 2021-2024 yılları arasında toplanan kapsamlı veri seti kullanılırken, optimizasyon çalışması için 2025-2030 dönemi projeksiyonları temel alınmıştır. Bu iki aşamalı yaklaşım, ana araştırma sorularının (Soru 1.1, Soru 1.2, Soru 2.1) ve alt araştırma sorularının (Alt Soru 3.1.1, Alt Soru 3.1.2, Alt Soru 3.2.1, Alt Soru 3.2.2, Alt Soru 3.2.3, Alt Soru 1.1.1, Alt Soru 1.1.2, Alt Soru 1.1.3, Alt Soru 1.2.1, Alt Soru 1.2.2, Alt Soru 2.1.1) yanıtlanması ve H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8 hipotezlerinin test edilmesi amacıyla tasarlanmıştır.

Araştırmanın tahmin modellemesi yaklaşımında consumption değişkeni bağımlı değişken olarak belirlenirken, date, price, vapor_pressure, mean_wind_speed, mean_temperature ve total_rainfall değişkenleri bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır.

Bağımlı değişken olan consumption, saatlik elektrik tüketimi değerlerini (MWh) temsil etmekte ve araştırmanın ana çıktısını oluşturmaktadır. Bu değişken tahmin edilmesi hedeflenen değer olup, veri seti boyunca MinMaxScaler ile 0-1 aralığında normalize edilmiştir. Bağımsız değişkenler ise kamu binalarının enerji tüketim davranışlarını etkileyen temel faktör gruplarını (temporal, meteorolojik ve ekonomik) kapsamlı bir şekilde temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Date değişkeni tarih-zaman bilgisini içermekte ve zaman serisi analizinin temelini oluşturmaktadır. Bu değişken modellerin zamansal bağımlılıkları yakalayabilmesi için

referans noktası sağlamakta ve özellik mühendisliği kapsamında hour, day_of_week, season gibi türev özellikler üretilmesinde kullanılmaktadır. Price değişkeni elektrik birim fiyatını (\$/MWh) temsil ederek ekonomik faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkisini modellemekte ve fiyat değişikliklerinin tüketim davranışlarında yarattığı değişimleri yakalamak amacıyla dahil edilmiştir.

Meteorolojik değişkenler grubunda yer alan mean_temperature (ortalama sıcaklık, °C), bina enerji tüketimini etkileyen en kritik parametrelerden biri olarak ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının belirlenmesinde doğrudan rol oynamaktadır. Vapor_pressure (buhar basıncı, hPa) atmosferik nem koşullarını temsil ederek iklimlendirme sistemlerinin çalışma yoğunluğunu etkileyen faktörlerden biri olarak modele dahil edilmiştir. Mean_wind_speed (ortalama rüzgar hızı, m/s) bina dış kabuğundaki ısı transferi ve infiltrasyon-eksiltrasyon süreçlerini etkileyen meteorolojik parametre olarak kullanılırken, total_rainfall (toplam yağış miktarı, mm) atmosferik koşulların genel durumunu temsil eden ve dolaylı olarak enerji tüketimini etkileyebilen değişken olarak değerlendirilmiştir. Tüm değişkenler veri ön işleme aşamasında eksik değer analizi, aykırı değer tespiti ve normalizasyon işlemlerinden geçirilerek modelleme sürecine hazırlanmıştır.

4.1 Enerji Tüketimi Tahmin Modellerinin Performans Sonuçları

Enerji tüketimi tahmininde kullanılan beş farklı modelin (LSTM, GRU, Random Forest, SVR, ARIMA) deneysel konfigürasyonları ve dört kamu binasında elde edilen performans sonuçları sistematik olarak sunulmaktadır. Sunulan bulgular, Alt Soru 3.1.1 (Model performansları hangi metriklerle nasıl farklılaşmaktadır?) ve Alt Soru 3.1.2 (Pratik uygulanabilirlik değerlendirmesi nasıl yapılır?) sorularına cevap vermekte, aynı zamanda H5 (derin öğrenme modelleri daha tutarlı ve dengeli performans gösterir) ile H6 (Bina yaşı arttıkça tahmin performansı sistematik olarak azalır) hipotezlerini test etmektedir.

Bina enerji tüketimi, genel olarak iklimsel faktörler (sıcaklık, nem, rüzgâr hızı), ekonomik değişkenler (elektrik fiyatları) ve yapısal özellikler (yaş, büyüklük, malzeme)

tarafından sistematik olarak etkilenmektedir. Seçilen modeller farklı hesaplama yaklaşımları içerir. Derin öğrenme modelleri (LSTM, GRU) zaman serisi bağımlılıklarını, topluluk öğrenmesi (Random Forest) doğrusal olmayan ilişkileri, çekirdek tabanlı yöntemler (SVR) optimize edilmiş regresyonu ve klasik zaman serisi modeli (ARIMA) lineer dinamikleri yakalamak üzere tasarlanmıştır. Araştırmada söz konusu etkileşimin modellenmesi için makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar ile geleneksel zaman serisi analizi yöntemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Model performansları MSE, R^2 , MAE, RMSE ve MAPE metrikleriyle analiz edilerek, farklı bina türleri için en uygun tahmin yaklaşımları belirlenmiştir.

LSTM modeli, 168 saatlik geçmiş veriler kullanarak 1 saatlik enerji tüketimi tahmini yapmak üzere tasarlanmıştır. Model mimarisi iki LSTM katmanı, dropout regularizasyonu ve dense katmanlardan oluşmaktadır. Model konfigürasyonunda LSTM birimleri 32-256 aralığında, dropout oranı 0.1-0.5 aralığında, dense katman boyutu 16-64 aralığında Keras-tuner Random Search ile optimize edilmiştir. Eğitim süreci %64 eğitim, %16 doğrulama, %20 test şeklinde bölümlenmiş veri ile gerçekleştirilmiş, maksimum 30 epoch ile erken durdurma (patience=3) uygulanmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 LSTM modeli deneysel konfigürasyonu (Orijinal)

Parametre Kategorisi	Parametre	Değer/Aralık	Optimizasyon Yöntemi
Model Mimarisi	Katman Yapısı	LSTM (32-256) → Dropout (0.1-0.5) → LSTM (32-256) → Dropout (0.1-0.5) → Dense (16-64) → Dense (1)	Sabit
Zaman Serisi	Pencere Boyutu	168 saat	Sabit
Zaman Serisi	Tahmin Ufku	1 saat	Sabit
Veri Bölümlenme	Eğitim/Val/Test	%64/%16/%20	Sabit
Hiperparametre	LSTM Birimleri	32-256	Keras-tuner Random Search
Hiperparametre	Dropout Oranı	0.1-0.5	Keras-tuner Random Search
Hiperparametre	Dense Boyutu	16-64	Keras-tuner Random Search
Hiperparametre	Öğrenme Oranı	1e-4 - 1e-2	Keras-tuner Random Search
Hiperparametre	Batch Size	[16, 32, 64, 128, 256]	Grid Search
Eğitim	Maksimum Epoch	30	Sabit
Eğitim	Early Stopping	val_loss, patience=3, min_delta=1e-4	Sabit
Optimizasyon	Optimizer	Adam, RMSprop	Hiperparametre
Kayıp Fonksiyonu	Loss	MSE	Sabit

LSTM modelinin performans analizi incelendiğinde, Eczacılık Fakültesi için en düşük MSE (3,25e-5) ve RMSE (0,0057) değerlerini elde ettiği görülmektedir. Fen Fakültesi için LSTM modelinin en düşük MAPE değerine (%7,90) sahip olması dikkat çekicidir ve bu bulgu, diğer modellerin bu bina türünde karşılaştığı zorluklar göz önüne alındığında önemli bir avantaj sağlamaktadır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 LSTM model performans sonuçları – tüm binalar (Orijinal)

Bina	MSE	R ²	MAE	RMSE	MAPE (%)	Hesaplama Süresi (sn)
Eczacılık Fakültesi	3,25e-5	0,889	0,0035	0,0057	7,42	811,8
Şevket Aziz Kansu	1,21e-4	0,973	0,0066	0,0110	4,51	908,4
Fen Fakültesi	6,20e-6	0,859	0,0017	0,0025	7,90	666,8
Rektörlük	5,61e-5	0,891	0,0046	0,0075	14,69	652,7

GRU modeli, 24 saatlik pencere boyutu kullanarak LSTM’e alternatif bir derin öğrenme yaklaşımı sunmaktadır. Model mimarisi iki GRU katmanı ve bir dense katman içermekte, GRU birimleri 50-200 aralığında manuel random search ile optimize edilmektedir. Dropout ve recurrent dropout oranları 0.1-0.3 aralığında, öğrenme oranı 0.001-0.01 aralığında ayarlanmış, TimeSeriesSplit ile 10 deneme yapılarak en iyi konfigürasyon belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 GRU model deneysel konfigürasyonu (Orijinal)

Parametre Kategorisi	Parametre	Değer/Aralık	Optimizasyon Yöntemi
Model Mimarisi	Katman Yapısı	GRU(50-200) → GRU(50-200) → Dense(25, ReLU) → Dense(1, linear)	Sabit
Zaman Serisi	Pencere Boyutu	24 saat	Sabit
Veri Bölümleme	Eğitim/Val/Test	%64/%16/%20	Sabit
Hiperparametre	GRU Birimleri	50-200	Manuel Random Search
Hiperparametre	Dropout	0.1-0.3	Manuel Random Search
Hiperparametre	Recurrent Dropout	0.1-0.3	Manuel Random Search
Hiperparametre	Öğrenme Oranı	0.001-0.01	Manuel Random Search
Hiperparametre	Batch Size	32	Sabit
Eğitim	Maksimum Epoch	50	Sabit
Eğitim	Early Stopping	val_loss, patience=10	Sabit
Eğitim	Learning Rate Reduction	val_loss, faktör=0.5, patience=5	Sabit

GRU modeli, Eczacılık Fakültesi binası için en yüksek R^2 değerini (0,952) elde etmiş ve hesaplama süresinin LSTM'e kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu model karmaşık enerji tüketim desenlerini yakalama konusunda başarı göstermiş ancak operasyonel kullanım açısından süre kısıtı oluşturmaktadır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 GRU model performans sonuçları – tüm binalar (Orijinal)

Bina	MSE	R^2	MAE	RMSE	MAPE (%)	Hesaplama Süresi (sn)
Eczacılık Fakültesi	4,18e-5	0,952	0,0040	0,0065	6,68	1494,9
Şevket Aziz Kansu	1,45e-4	0,966	0,0090	0,0120	6,68	1605,3
Fen Fakültesi	6,60e-6	0,889	0,0019	0,0026	35,93	1282,6
Rektörlük	5,64e-5	0,923	0,0043	0,0075	11,12	1540,1

Random Forest modeli, ensemble öğrenme yaklaşımıyla iki RandomForestRegressor ve bir GradientBoostingRegressor'ün VotingRegressor ile birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Model konfigürasyonunda RandomForest için n_estimators 100-200 aralığında, max_depth 5-15 aralığında, min_samples_split ve min_samples_leaf parametreleri RandomizedSearchCV ile 30 iterasyonla optimize edilmiştir. Özellik mühendisliği kapsamında hour, day_of_week, season, is_business_hour, consumption_lag1, consumption_lag24 ve consumption_rolling_mean24 özellikleri eklenmiş, TimeSeriesSplit ile cross validation uygulanmıştır (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 Random Forest ensemble deneysel konfigürasyonu (Orijinal)

Bileşen	Parametre	Değer/Aralık	Optimizasyon Yöntemi
RandomForest	n_estimators	[100, 150, 200]	RandomizedSearchCV
RandomForest	max_depth	[5, 8, 10, 15]	RandomizedSearchCV
RandomForest	min_samples_split	[5, 10, 15]	RandomizedSearchCV
RandomForest	min_samples_leaf	[4, 8, 12]	RandomizedSearchCV
RandomForest	max_features	['sqrt', 'log2']	RandomizedSearchCV
GradientBoosting	n_estimators	100	Sabit
GradientBoosting	loss	'squared_error'	Sabit
Özellik Mühendisliği	Ek Özellikler	hour, day_of_week, season, is_business_hour, consumption_lag1, consumption_lag24, consumption_rolling_mean24	Sabit
Veri Bölümleme	Eğitim/Test	%80/%20 (zaman bazlı)	Sabit
Cross Validation	Yöntem	TimeSeriesSplit (n_splits=5)	Sabit

Random Forest modeli, dört bina genelinde en tutarlı performansı gösteren model olarak öne çıkmıştır. Özellikle Şevket Aziz Kansu binası için %3,00 gibi olağanüstü düşük MAPE değeri elde etmiş, ensemble yapısının farklı koşullarda sağladığı stabilite avantajını göstermiştir. Model aynı zamanda hesaplama verimliliği açısından da derin öğrenme modellerine kıyasla önemli üstünlük sağlamıştır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 Random Forest model performans sonuçları – tüm binalar (Orijinal)

Bina	MSE	R ²	MAE	RMSE	MAPE (%)	Hesaplama Süresi (sn)
Eczacılık Fakültesi	3,52e-5	0,951	0,0035	0,0059	5,69	23,5
Şevket Aziz Kansu	6,39e-5	0,985	0,0040	0,0080	3,00	24,2
Fen Fakültesi	3,60e-6	0,938	0,0013	0,0019	35,22	57,2
Rektörlük	3,27e-5	0,947	0,0034	0,0057	10,35	32,6

SVR modeli, Radial Basis Function (RBF) kernel kullanarak geleneksel makine öğrenmesi yaklaşımını temsil etmektedir. Model konfigürasyonunda C parametresi 1.0, epsilon 0.1, gamma ‘scale’ değerlerinde sabit tutulmuş, 168 saatlik pencere boyutuyla 1176 boyutlu düzleştirilmiş vektör girişi kullanılmıştır. Veri ön işleme aşamasında MinMaxScaler ile 0-1 aralığında normalizasyon uygulanmıştır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7 SVR model deneysel konfigürasyonu (Orijinal)

Parametre	Değer	Açıklama
Kernel	RBF	Radial Basis Function
C	1.0	Regularizasyon parametresi
Epsilon	0.1	ϵ -tube genişliği
Gamma	‘scale’	Kernel katsayısı
Pencere Boyutu	168 saat	1 haftalık geçmiş
Giriş Boyutu	1176 (168×7 özellik)	Düzleştirilmiş vektör
Veri Bölümleme	%80/%20 (zaman bazlı)	Eğitim/Test
Normalizasyon	MinMaxScaler	0-1 aralığında

SVR modeli, tüm binalar genelinde en zayıf tahmin performansını göstermiş ancak en hızlı hesaplama süresine sahip olmuştur. Bu durum, model karmaşıklığı ile performans arasındaki dengeyi ortaya koymaktadır (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8 SVR model performans sonuçları – tüm binalar (Orijinal)

Bina	MSE	R ²	MAE	RMSE	MAPE (%)	Hesaplama Süresi (sn)
Eczacılık Fakültesi	8,54e-5	0,902	0,0069	0,0092	15,06	17,4
Şevket Aziz Kansu	4,77e-4	0,888	0,0169	0,0219	13,12	10,4
Fen Fakültesi	1,04e-5	0,820	0,0024	0,0032	38,96	48,2
Rektörlük	8,74e-5	0,882	0,0069	0,0094	25,06	20,4

ARIMA modeli, geleneksel zaman serisi analizi yaklaşımını temsil ederek ARIMA(1,1,1) konfigürasyonu ile uygulanmıştır. Model tek değişken (sadece consumption) kullanarak 168 saatlik pencere boyutuyla sliding window stratejisi benimsenmiş, her test sekansı için model yeniden eğitilerek zaman bazlı veri bölümlenmesi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9 ARIMA model deneysel konfigürasyonu

Parametre	Değer	Açıklama
Model Türü	ARIMA(1,1,1)	Autoregressive Integrated Moving Average
p (AR order)	1	Otoregresif terim sayısı
d (Differencing)	1	Fark alma derecesi
q (MA order)	1	Hareketli ortalama terim sayısı
Pencere Boyutu	168 saat	1 haftalık geçmiş
Veri Türü	Tek değişken	Sadece consumption
Eğitim Stratejisi	Sliding window	Her test sekansı için yeniden eğitim
Veri Bölümlenme	%80/%20 (zaman bazlı)	Eğitim/Test

ARIMA modeli, geleneksel zaman serisi analizini temsil ederek orta düzeyde bir performans sergilemiştir (Çizelge 4.10). Model, Şevket Aziz Kansu binası için %4,76 MAPE değeri ile en başarılı sonucunu elde etmiş ve bu bina için 0,964 R² değeriyle güçlü bir açıklayıcılık göstermiştir. Ancak Fen Fakültesi binasında %38,40 gibi yüksek bir MAPE değeri ile en zayıf performansını sergilemiş, bu durum ARIMA modelinin karmaşık enerji tüketim desenlerine sahip binalarda yaşadığı zorluğu ortaya koymuştur. Model, tek değişken (sadece enerji tüketimi) kullanarak sliding window stratejisi ile her test sekansı için yeniden eğitim gerçekleştirmesi nedeniyle hesaplama süreleri 232-363 saniye aralığında değişiklik göstermiş, bu da derin öğrenme modellerinden daha hızlı ancak Random Forest ve SVR modellerinden daha yavaş bir konumlandırma sağlamıştır. ARIMA modelinin genel performansı, makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımların enerji

tüketimi tahminindeki üstünlüğünü vurgulamakla birlikte, geleneksel zaman serisi analizinin belirli bina türlerinde hala geçerli sonuçlar üretebileceğini göstermiştir.

Çizelge 4.10 ARIMA model performans sonuçları – tüm binalar (Orijinal)

Bina	MSE	R ²	MAE	RMSE	MAPE 4 (%)	Hesaplama Süresi (sn)
Eczacılık Fakültesi	7,37e-5	0,915	0,0049	0,0086	7,60	326,6
Şevket Aziz Kansu	1,50e-4	0,964	0,0067	0,0123	4,76	362,7
Fen Fakültesi	7,20e-6	0,880	0,0017	0,0027	38,40	231,9
Rektörlük	7,50e-5	0,898	0,0049	0,0087	11,60	253,3

Karşılaştırmalı analiz sonuçları incelendiğinde, Random Forest modelinin dört bina genelinde en tutarlı ve güvenilir sonuçları üreten model olarak öne çıktığı görülmektedir. Modelin başarısının temel nedenleri tutarlı doğruluk (Şevket Aziz Kansu binası için %3,00 MAPE), hızlı hesaplama (ortalama 34 saniye) ve farklı bina türlerinde kararlılıktır. Derin öğrenme modelleri olan LSTM ve GRU, belirli bina türlerinde dikkat çekici sonuçlar elde etmiş ancak hesaplama süreleri gerçek zamanlı uygulamalar için kısıt oluşturmıştır. LSTM modeli özellikle Fen Fakültesi için %7,90 ile en düşük MAPE değerini sağlarken, GRU modeli Eczacılık Fakültesi için 0,952 ile en yüksek R² değerini elde etmiştir. Bu modellerin hesaplama süreleri sırasıyla 760 ve 1480 saniye olarak ölçülmüş, bu durum operasyonel kullanım için önemli bir dezavantaj oluşturmıştır. ARIMA modeli geleneksel zaman serisi yaklaşımını temsil ederek orta düzeyde performans sergilerken, SVR modeli en hızlı hesaplama süresine sahip olmasına rağmen tahmin doğruluğu açısından en düşük performansı göstermiştir.

Çizelge 4.11 Tüm modellerin karşılaştırmalı performans özeti (Orijinal)

Model	Ortalama MAPE (%)	Ortalama R ²	Ortalama Hesaplama Süresi (sn)	En İyi Performans Gösterdiği Bina Sayısı
Random Forest	13,57	0,955	34,4	3/4
LSTM	8,63	0,903	759,9	1/4
GRU	15,10	0,933	1480,7	1/4
ARIMA	15,59	0,914	293,6	0/4
SVR	23,05	0,873	24,1	0/4

4.2 Bina Türüne Göre Model Performans Ölçümleri

Bina türüne göre model performans ölçümleri ile Alt Soru 3.2.1 (Farklı yaş kategorilerindeki tahmin zorluğu nasıl değişmektedir?), Alt Soru 3.2.2 (Pencere-yüzey oranının sistematik etkisi hangi eşiklerde kritik hale gelmektedir?) ve Alt Soru 3.2.3 (Bina taban alanı büyüklüğünün etkisi nasıl değerlendirilir?) sorularına yanıt aranmakta ve H6 ve H7 hipotezlerinin test edilmesi hedeflenmektedir.

Bina yaşının etkisi: Bina yaşı, tahmin modellerinin performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Araştırma bulgularına göre, en yeni bina olan Şevket Aziz Kansu binası (20 yıl) tüm modeller için en düşük MAPE değerlerini sağlamıştır. RF modeli bu binada %3,00 gibi çok düşük bir MAPE değerine ulaşmıştır. En eski bina olan Fen Fakültesi (78 yıl) ise en yüksek MAPE değerleriyle tahmin için en zorlayıcı bina olarak öne çıkmaktadır.

Söz konusu bulgu, eski binaların enerji tüketim desenlerinin daha karmaşık ve tahmin edilmesi daha zor olabileceğini göstermektedir. Eski binalarda yapısal değişiklikler, yenilemeler ve eklentiler zamanla enerji tüketimini etkileyebilecek faktörlerdir. Ayrıca, eski binalarda yalıtım eksiklikleri ve yapısal sorunlar da enerji tüketiminde daha fazla değişkenliğe yol açabilmektedir.

Pencere yüzey oranının etkisi: Pencere-yüzey oranı, binaların enerji performansını ve dolayısıyla tahmin modellerinin doğruluğunu etkileyen önemli bir mimari özelliktir. Pencere-yüzey oranı en yüksek olan Rektörlük binası (%47,95), diğer binalara kıyasla orta seviye bir tahmin zorluğu sunmaktadır. Bu binada RF modeli %10,35 MAPE değeriyle en iyi performansı gösterirken, derin öğrenme modelleri de makul performans göstermektedir.

Pencere-yüzey oranı ikinci en yüksek bina olan Eczacılık fakültesi (%46,02), benzer şekilde RF modeliyle %5,69 MAPE değeri elde ederek iyi tahmin sonuçları vermektedir. Pencere-yüzey oranı düşük olan Şevket Aziz Kansu binası (%21,05) ve Fen Fakültesi (%20,96) binalarında ise farklı sonuçlar gözlemlenmiştir. Şevket Aziz Kansu Binası,

tahmin modelleri açısından en yüksek öngörülebilirliğe sahip yapı olarak öne çıkarken; Fen Fakültesi, modelleme sürecinde en düşük tahmin başarımının elde edildiği ve dolayısıyla en zorlayıcı yapı olarak belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar pencere-yüzey oranının tek başına belirleyici olmadığını, bina yaşı ve diğer yapısal özelliklerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yüksek pencere-yüzey oranı, güneş ışığı kazanımı ve ısı kaybı gibi faktörleri etkileyerek enerji tüketiminde daha belirgin desenlere yol açabilmekte, bu da tahmin modellerinin performansını olumlu yönde etkileyebilmektedir.

Bina boyutlarının etkisi: Bina boyutları, özellikle taban alanı, enerji tüketim desenleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. En büyük taban alanına sahip olan Eczacılık Fakültesi ($6.333,33 \text{ m}^2$) için RF modeli %5,69 MAPE değeri ile iyi bir tahmin performansı göstermiştir. En küçük iki binadan biri olan Şevket Aziz Kansu binası ($2.281,26 \text{ m}^2$) en düşük MAPE değerlerine sahipken, diğer küçük bina olan Rektörlük binası ($2.178,73 \text{ m}^2$) daha yüksek MAPE değerleri sergilemiştir.

Ulaşılan bulgular bina boyutunun tahmin performansı üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığını göstermektedir. Büyük binalar daha istikrarlı enerji tüketimi gösterebilir ve bu da daha doğru tahminlere olanak sağlayabilir. Bununla birlikte binanın yaşı, kullanım amacı ve diğer yapısal özellikler de bu ilişkiyi etkilemektedir.

4.3 Zaman Çözünürlüğünün Enerji Tüketim Tahmin Modellerine Etkisi

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modellerin farklı zaman çözünürlükleri (saatlik, günlük, haftalık) altında gösterdikleri performans farklılıkları analiz edilmiştir. Ankara Üniversitesi Beşevler Kampüsü'nde yer alan üç kamu binasına ait 2021–2024 dönemini kapsayan elektrik tüketim verileri ile meteorolojik değişkenler kullanılarak, veri belirli zaman aralıklarında yeniden örneklenmiş ve modeller bu farklı çözünürlüklerde değerlendirilmiştir.

Her zaman çözünürlüğü düzeyi için veri seti yapısı ve model girdileri yeniden yapılandırılmıştır. Saatlik veriler için 168 zaman adımı içeren kaydırmalı pencere

teknikleriyle haftalık geçmiş bilgi kullanılırken, günlük ve haftalık çözünürlüklerde sırasıyla 7 gün ve 7 haftalık geçmiş verilerle tahmin yapılmıştır. Derin öğrenme modellerinin zaman bağımlılığını dikkate alan yapısına uygun tasarım benimsenirken, geleneksel modellerde benzer dönemsel temsiller öznitelik mühendisliği ile sağlanmıştır.

Saatlik tahminlerde tüm modeller 168 saatlik pencere boyutu kullanarak 1 saatlik ileri tahmin yapmak üzere konfigüre edilmiştir. Random Forest modeli için özellik mühendisliği kapsamında hour, day_of_week, season, is_business_hour zaman özellikleri ile consumption_lag1, consumption_lag24, consumption_rolling_mean24 gecikmeli özellikleri kullanılmıştır. Hiperparametre optimizasyonu RandomizedSearchCV ile 30 iterasyon ve TimeSeriesSplit (n_splits=5) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Saatlik çözünürlük için kullanılan model konfigürasyonları Çizelge 4.12’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.12 Saatlik tahminlerde model performans karşılaştırması (Orijinal)

Model	Pencere Boyutu	Veri Bölümlenme	Özellik Sayısı	Hiperparametre Optimizasyonu	Özel Konfigürasyon
LSTM	168 saat	%64/%16/%20	7 temel özellik	Keras-tuner Random Search	2 katman, dropout, early stopping
GRU	24 saat	%64/%16/%20	7 temel özellik	Manuel Random Search	2 katman, learning rate reduction
Random Forest	24 saat	%80/%20	10 özellik*	RandomizedSearchCV (30 iter)	Ensemble: 2 RF + 1 GB
SVR	168 saat	%80/%20	1176 boyut**	Sabit parametreler	RBF kernel, MinMaxScaler
ARIMA	168 saat	%80/%20	Tek değişken	Sabit ARIMA(1,1,1)	Sliding window eğitimi

*hour, day_of_week, season, is_business_hour, consumption_lag1/24, rolling_mean24, temp_humidity

**168×7 özellik düzleştirilmiş vektör

Saatlik tahminlerde Random Forest modeli hem düşük hata oranları hem de hesaplama süreleri bakımından en başarılı model olarak öne çıkmıştır. Şevket Aziz Kansu binası için %3,00 düzeyinde MAPE değeri ile olağanüstü performans sergilemiş, ensemble yapısının saatlik dalgalanmaları yakalamadaki etkinliğini göstermiştir. Derin öğrenme modelleri LSTM ve GRU bazı metriklerde başarılı sonuçlar verse de 800-1600 saniye arasında değişen yüksek hesaplama süreleriyle pratik uygulamalarda dezavantaj getirmektedir. Bu performans sonuçları Çizelge 4.13’te sunulmaktadır.

Çizelge 4.13 Saatlik zaman çözünürlüğü performans sonuçları (Orijinal)

Bina	Model	MSE	MAE	RMSE	MAPE (%)	R ²	Hesaplama Süresi (s)
Eczacılık Fakültesi	LSTM	3,25×10 ⁻⁵	0,0035	0,0057	7,42	0,889	811,8
	GRU	4,18×10 ⁻⁵	0,0040	0,0065	6,68	0,952	1494,9
	RF	3,52×10 ⁻⁵	0,0035	0,0059	5,69	0,951	23,5
	ARIMA	7,37×10 ⁻⁵	0,0049	0,0086	7,60	0,915	326,6
	SVR	8,54×10 ⁻⁵	0,0069	0,0092	15,06	0,902	17,4
Şevket Aziz Kansu	LSTM	1,21×10 ⁻⁴	0,0066	0,0110	4,51	0,973	908,4
	GRU	1,45×10 ⁻⁴	0,0090	0,0120	6,68	0,966	1605,3
	RF	6,39×10 ⁻⁵	0,0040	0,0080	3,00	0,985	24,2
	ARIMA	1,50×10 ⁻⁴	0,0067	0,0123	4,76	0,964	362,7
	SVR	4,77×10 ⁻⁴	0,0169	0,0219	13,12	0,888	10,4
Fen Fakültesi	LSTM	6,20×10 ⁻⁶	0,0017	0,0025	7,90	0,859	666,8
	GRU	6,60×10 ⁻⁶	0,0019	0,0026	35,93	0,889	1282,6
	RF	3,60×10 ⁻⁶	0,0013	0,0019	35,22	0,938	57,2
	ARIMA	7,20×10 ⁻⁶	0,0017	0,0027	38,40	0,880	231,9
	SVR	1,04×10 ⁻⁵	0,0024	0,0032	38,96	0,820	48,2

Not: Kalın değerler her bir metrik için en iyi performansı gösterirken, altı çizili değerler ikinci en iyi performansı temsil eder.

Günlük çözünürlükte modeller 7 günlük geçmiş veriler kullanarak 1 günlük ileri tahmin yapmak üzere yeniden konfigüre edilmiştir. Random Forest modeli için özellik seti genişletilerek day_of_week, month, season, is_weekend zaman özellikleri ile consumption_lag1/7/30, rolling_mean7/30, rolling_std30 gecikmeli özellikleri ve vapor_pressure, season_temp etkileşim özellikleri eklenmiştir. Günlük çözünürlük model konfigürasyonları Çizelge 4.14’te gösterilmektedir.

Çizelge 4.14 Günlük çözünürlük model konfigürasyonları (Orijinal)

Model	Pencere Boyutu	Veri Bölümleme	Özellik Sayısı	Hiperparametre Optimizasyonu	Özel Konfigürasyon
LSTM	7 gün	%64/%16/%20	7 temel özellik	Keras-tuner Random Search	Günlük agregasyon, düşük epoch
GRU	7 gün	%64/%16/%20	7 temel özellik	Manuel Random Search	Günlük pencere, dropout azaltıldı
Random Forest	7 gün	%80/%20	15 özellik*	RandomizedSearchCV (30 iter)	Genişletilmiş özellik seti
SVR	7 gün	%80/%20	105 boyut**	Sabit parametreler	RBF kernel, günlük normalizasyon
ARIMA	7 gün	%80/%20	Tek değişken	Sabit ARIMA(1,1,1)	Günlük sliding window

*day_of week, month, season, is weekend, consumption_lag1/7/30, rolling_mean7/30, rolling_std30, vapor_pressure, temp_humidity, season_temp **7×15 özellik düzleştirilmiş vektör

Günlük çözünürlükte bina türüne bağlı olarak en uygun model değişkenlik göstermiştir. Eczacılık Fakültesi binası için SVR modeli en iyi performansı sergilerken, Fen Fakültesi

ve Şevket Aziz Kansu binaları için Random Forest modeli öne çıkmıştır. Genişletilmiş özellik setinin Random Forest performansını artırdığı, ancak derin öğrenme modellerinin günlük agregasyonda düşük performans sergilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular Çizelge 4.15’te ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 4.15 Günlük zaman çözünürlüğü performans sonuçları (Orijinal)

Bina	Model	MSE	MAE	RMSE	MAPE (%)	R ²	Hesaplama Süresi (s)
Eczacılık Fakültesi	LSTM	$6,19 \times 10^{-4}$	0,0048	0,0072	9,61	0,661	59,1
	GRU	0,0076	0,0639	0,0870	28,51	0,832	133,9
	RF	$7,04 \times 10^{-5}$	0,0064	0,0084	12,60	0,575	5,0
	ARIMA	$1,03 \times 10^{-4}$	0,0076	0,0101	16,21	0,378	41,8
	SVR	$4,88 \times 10^{-5}$	0,0051	0,0070	10,62	0,706	0,4
Şevket Aziz Kansu	LSTM	$4,68 \times 10^{-4}$	0,0143	0,0207	9,82	0,869	49,4
	GRU	0,0044	0,0506	0,0662	37,02	0,928	172,4
	RF	$1,55 \times 10^{-4}$	0,0074	0,0124	5,55	0,949	5,0
	ARIMA	$5,54 \times 10^{-4}$	0,0167	0,0235	12,76	0,816	52,5
	SVR	$3,66 \times 10^{-4}$	0,0143	0,0191	10,48	0,879	0,3
Fen Fakültesi	LSTM	$4,70 \times 10^{-6}$	0,0017	0,0022	8,24	0,735	57,4
	GRU	0,0052	0,0545	0,0722	32,96	0,907	158,8
	RF	$3,60 \times 10^{-6}$	0,0013	0,0019	6,63	0,832	5,0
	ARIMA	$1,12 \times 10^{-5}$	0,0026	0,0034	12,88	0,479	59,3
	SVR	$6,90 \times 10^{-6}$	0,0021	0,0026	10,94	0,677	0,4

Not: Kalın değerler her bir metrik için en iyi performansı gösterirken, altı çizili değerler ikinci en iyi performansı temsil eder.

Haftalık çözünürlükte modeller 7 haftalık geçmiş veriler kullanarak 1 haftalık ileri tahmin yapmak üzere konfigüre edilmiştir. Bu çözünürlükte zaman özellik sayısı minimize edilmiş, trend ve mevsimsel bileşenler ön plana çıkarılmıştır. Haftalık çözünürlük model konfigürasyonları aşağıda sunulmuştur (Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16 Haftalık çözünürlük model konfigürasyonları (Orijinal)

Model	Pencere Boyutu	Veri Bölümleme	Özellik Sayısı	Hiperparametre Optimizasyonu	Özel Konfigürasyon
LSTM	7 hafta	%64/%16/%20	7 temel özellik	Keras-tuner Random Search	Haftalık agregasyon, uzun epoch
GRU	7 hafta	%64/%16/%20	7 temel özellik	Manuel Random Search	Haftalık pencere, yüksek dropout
Random Forest	7 hafta	%80/%20	12 özellik*	RandomizedSearchCV (30 iter)	Haftalık trend özellikleri
SVR	7 hafta	%80/%20	84 boyut**	Sabit parametreler	RBF kernel, haftalık normalizasyon
ARIMA	7 hafta	%80/%20	Tek değişken	Sabit ARIMA (1,1,1)	Haftalık sliding window

*week_of_year, month, season, mean_temperature, mean_humidity, vapor_pressure, consumption_lag1/4/12, rolling_mean4/12, rolling_std12, temp_humidity, season_temp, mean_wind_speed, total_rainfall, price **7×17 özellik düzleştirilmiş vektör

Haftalık tahmin sonuçları derin öğrenme modellerinin genel olarak düşük performans sergilediğini ortaya koymuştur. ARIMA ve SVR modelleri daha başarılı sonuçlar vermiş, özellikle ARIMA modeli Eczacılık Fakültesi ve Fen Fakültesi binalarında en düşük hata oranlarını sağlamıştır. Bu durum, haftalık agregasyonun derin öğrenme modellerinin kısa vadeli pattern tanıma yeteneklerini sınırladığını, geleneksel zaman serisi yaklaşımlarının ise uzun vadeli trend yakalamada daha etkili olduğunu göstermektedir. Haftalık zaman çözünürlüğü performans sonuçları Çizelge 4.17’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.17 Haftalık zaman çözünürlüğü performans sonuçları (Orijinal)

Bina	Model	MSE	MAE	RMSE	MAPE (%)	R ²	Hesaplama Süresi (s)
Eczacılık Fakültesi	LSTM	$1,86 \times 10^{-5}$	0,0036	0,0043	6,28	0,511	47,2
	GRU	0,0087	0,0695	0,0931	91,14	0,808	295,2
	RF	$2,29 \times 10^{-5}$	0,0032	0,0048	6,61	0,526	4,1
	ARIMA	$1,14 \times 10^{-5}$	0,0027	0,0034	5,08	0,609	1,0
	SVR	$2,09 \times 10^{-5}$	0,0032	0,0046	6,27	0,560	6,8
Şevket Aziz Kansu	LSTM	$7,33 \times 10^{-4}$	0,0161	0,0271	9,87	0,732	12,3
	GRU	0,0078	0,0522	0,0882	86,17	0,883	128,7
	RF	$6,96 \times 10^{-4}$	0,0173	0,0264	12,22	0,744	3,9
	ARIMA	0,0010	0,0258	0,0322	16,17	0,574	1,2
	SVR	$1,23 \times 10^{-4}$	0,0076	0,0111	5,69	0,863	4,0
Fen Fakültesi	LSTM	$4,90 \times 10^{-6}$	0,0017	0,0022	7,52	0,836	359,4
	GRU	0,0095	0,0761	0,0975	83,45	0,845	133,4
	RF	$3,60 \times 10^{-6}$	0,0014	0,0019	7,26	0,584	4,0
	ARIMA	$1,50 \times 10^{-6}$	0,0009	0,0012	4,19	0,624	0,9
	SVR	$4,00 \times 10^{-6}$	0,0016	0,0020	7,25	0,428	6,7

Not: Kalın değerler her bir metrik için en iyi performansı gösterirken, altı çizili değerler ikinci en iyi performansı temsil eder.

Zaman çözünürlüğü analizi sonuçları, hesaplama süreleri ile model karmaşıklığı arasındaki ters orantıyı da ortaya koymuştur. Geleneksel modeller tüm zaman çözünürlüklerinde saniyeler içinde tahmin gerçekleştirirken, derin öğrenme modelleri belirgin şekilde daha fazla kaynak tüketmiştir. Binalar arası performans farklılıkları incelendiğinde, Fen Fakültesi binasının düşük tüketim seviyeleri nedeniyle MAPE gibi yüzdesel hata metriklerinde dengesizlikler gözlemlenmiş, bu durum model performans değerlendirmelerinde sadece doğruluk metriklerine değil verinin yapısına da dikkat edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Sonuç olarak analiz, enerji tüketimi tahmininde “tek model her zaman geçerlidir” yaklaşımının yetersizliğini ortaya koymakta, zaman çözünürlüğü, bina türü ve hesaplama

kaynaklarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Saatlik tahminlerde Random Forest modelinin üstünlüğü, günlük tahminlerde bina bazlı model seçiminin önemi ve haftalık tahminlerde geleneksel modellerin avantajı, farklı zaman dilimlerine uygun model seçimi yapılmasının kritik önemini göstermektedir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bazı model-bina kombinasyonlarında aşırı kötü performans değerleri dikkat çekmektedir. Özellikle GRU modelinin haftalık çözünürlükte %83-91 MAPE değerleri ve Fen Fakültesi binasında çeşitli modellerin %35-38 MAPE değerleri, bu durumların altta yatan nedenlerinin analiz edilmesini gerektirmektedir.

GRU ve LSTM modellerinin haftalık agregasyonda gösterdiği dramatik performans düşüşü, bu modellerin tasarım felsefesi ile çelişen bir durum yaratmaktadır. Derin öğrenme modelleri, yüksek frekanslı verilerden kısa vadeli kalıpları öğrenme konusunda optimize edilmiştir. Haftalık agregasyon, bu modellerin güçlü oldukları saatlik ve günlük varyasyonları elimine ederek, sadece uzun vadeli trendleri bırakmaktadır. Bu durum, karmaşık sinir ağı yapılarının basit trend kalıpları için aşırı karmaşık kalmasına ve overfitting problemlerine yol açmaktadır.

Haftalık çözünürlükte veri noktası sayısının dramatik azalması (3-4 yıllık dönemde yaklaşık 156-208 haftalık veri noktası), derin öğrenme modellerinin etkili öğrenme için gereksinim duyduğu minimum veri miktarının altında kalmaktadır. LSTM ve GRU modelleri, milyonlarca parametre içeren karmaşık yapıları nedeniyle, sınırlı veri setlerinde güvenilir genelleme yapamamakta ve aşırı uyum (overfitting) problemleri yaşamaktadır.

Fen Fakültesi binasının diğer binalara kıyasla düşük enerji tüketim seviyeleri, MAPE gibi yüzdesel hata metriklerinde yanıltıcı sonuçlar üretmektedir. Düşük tüketim değerleri üzerinden hesaplanan yüzdesel hatalar, mutlak hata değerleri küçük olsa bile çok yüksek MAPE değerleri oluşturmaktadır. Ayrıca, düşük tüketim seviyeli binalarda tüketim kalıpları daha düzensiz olabilmekte, bu da model öğrenmesini zorlaştırmaktadır.

Çalışmada SVR ve ARIMA modelleri için sabit parametreler kullanılması, bu modellerin potansiyelini tam olarak ortaya koyamamasına neden olmuş olabilir. Özellikle SVR'nin RBF kernel parametreleri (C, gamma) ve ARIMA'nın (p,d,q) parametrelerinin her bina ve zaman çözünürlüğü için optimize edilmemesi, bu modellerin kötü performans göstermesinde etkili olmuş olabilir.

Bazı modellerin aşırı kötü performans göstermesinin bir diğer nedeni, enerji tüketim verilerindeki mevsimsel anomaliler ve aykırı değerlere karşı hassasiyetleri olabilir. Özellikle pandemi döneminde (2020-2021) ortaya çıkan atipik kullanım kalıpları, bazı modellerin öğrenme süreçlerini olumsuz etkilemiş ve test dönemindeki normal kullanım kalıplarını tahmin edememelerine yol açmış olabilir.

Her modelin kendine özgü varsayımları ve güçlü olduğu veri türleri bulunmaktadır. ARIMA modeli doğrusal trendlere odaklanırken, Random Forest modeli doğrusal olmayan ilişkileri yakalamada başarılıdır. Derin öğrenme modelleri ise büyük veri setlerinde karmaşık kalıpları öğrenmede üstündür. Kötü performans gösteren durumlar, model karakteristikleri ile veri özelliklerinin uyumsuzluğundan kaynaklanmış olabilir.

Zaman çözünürlüğü analizi sonuçları, hesaplama süreleri ile model karmaşıklığı arasındaki ters orantıyı da ortaya koymuştur. Geleneksel modeller tüm zaman çözünürlüklerinde saniyeler içinde tahmin gerçekleştirirken, derin öğrenme modelleri belirgin şekilde daha fazla kaynak tüketmiştir. Binalar arası performans farklılıkları incelendiğinde, Fen Fakültesi binasının düşük tüketim seviyeleri nedeniyle MAPE gibi yüzdesel hata metriklerinde dengesizlikler gözlemlenmiş, bu durum model performans değerlendirmelerinde sadece doğruluk metriklerine değil verinin yapısına da dikkat edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Gerçekleştirilen analiz, enerji tüketimi tahmininde “tek model her zaman geçerlidir” yaklaşımının yetersizliğini ortaya koymakta, zaman çözünürlüğü, bina türü ve hesaplama kaynaklarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Saatlik tahminlerde Random Forest modelinin üstünlüğü, günlük tahminlerde bina bazlı model seçiminin önemi ve haftalık tahminlerde geleneksel modellerin avantajı, farklı zaman dilimlerine

uygun model seçimi yapılmasının kritik önemini göstermektedir. Bu bulgular aynı zamanda, model performans değerlendirmelerinde sadece en iyi sonuçlara odaklanmanın yetersiz olduğunu, kötü performansın nedenlerini anlamının da araştırma ve uygulama açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

4.4 Çok Amaçlı Optimizasyon Sonuçları

Enerji tüketimi ve maliyet hedeflerini birlikte ele alan çok amaçlı optimizasyonun sonuçlarına yönelik elde edilen bulgular Soru 1.1 (mevcut kamu binalarını yaklaşık sıfır enerjili bina standartlarına dönüştürmek için enerji tüketimi ve maliyet açısından optimal derin yenileme stratejileri nelerdir?), Soru 1.2 (Farklı baskınlık stratejilerinin çok amaçlı optimizasyon sürecindeki Pareto etkinlikleri nasıl değerlendirilir?) ve Soru 2.1 (Farklı derin yenileme senaryolarının yaşam döngüsü maliyeti bakımından optimum noktaları nelerdir?) sorularına yanıt vermektedir. Ayrıca Alt Soru 1.1.1, Alt Soru 1.1.2, Alt Soru 1.1.3, Alt Soru 1.2.1, Alt Soru 1.2.2 ve Alt Soru 2.1.1 sorularının yanıtlanması ile H1, H2, H3, H4 ve H8 hipotezlerinin test edilmesine yönelik veriler de bu bölümde yer almaktadır.

Çok amaçlı optimizasyonda enerji tüketiminin hesaplanması ve maliyet analizi: Tez çalışması kapsamında belirlenen binalara ilişkin optimize edilmesi planlanan 2025-2030 dönemi için enerji tüketimi tahminleri yapılmıştır. Binalarda enerji tüketimini belirleyen temelde birkaç unsur bulunmaktadır. Bunlar; ısıtma-soğutma yükleri, aydınlatma ve cihazlar olarak sıralanabilir (Ürge-Vorsatz vd. 2015). Binalarda soğutma, aydınlatma ve cihazlara yönelik enerji tüketimi verisi elektrik tüketimi bakımından ifade edilmektedir. Diğer yandan ısıtma enerjisi ihtiyacı için çeşitli tadilatlar geçirdikten sonra son olarak 21.10.2024 tarihinde kabul edilen TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı kapsamında hesaplanan yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı kullanılmıştır. Binaların toplam yıllık enerji tüketimi, hesaplanan iki veri toplanarak MWh cinsinden ifade edilmiştir. Binaların elektrik tüketimine yönelik oluşturulan tahmin modellerinde en iyi performansı gösteren Random Forest modeli üzerinden 2025-2030 dönemi için yıllık bazda tahmini değerleri üretilmiştir (Çizelge 4.18).

Çizelge 4.18 Binaların yıllık bazda tahmin edilen elektrik tüketimi miktarları (Orijinal)

Bina Adı	Yıl	Elektrik Tüketimi (MWh)
Eczacılık Fakültesi	2025	417,31
	2026	422,85
	2027	409,22
	2028	399,91
	2029	405,92
	2030	403,90
Rektörlük Binası	2025	350,07
	2026	456,49
	2027	453,89
	2028	457,56
	2029	450,84
	2030	456,93
Fen Fakültesi B Blok	2025	253,52
	2026	254,04
	2027	254,16
	2028	254,60
	2029	253,98
	2030	254,10
Şevket Aziz Kansu Binası	2025	826,52
	2026	836,51
	2027	837,44
	2028	838,87
	2029	835,82
	2030	836,60

TS825 standardı kapsamında hesaplanan yıllık ısı enerjisi ihtiyacı da yine MWh cinsinden ifade edilmekte olup, söz konusu hesaplama için binanın fiziksel özelliklerinden faydalanılmaktadır (Çizelge 4.19).

Çizelge 4.19 Bina yıllık ısı enerjisi ihtiyacı temel modeli (Orijinal)

Isı kaybedilen yüzey	Binadaki yapı elemanı	Yapı elemanı kalınlığı d (m)	Isıl iletkenlik hesap değeri (λ) (W/m.K)	Isıl iletkenlik direnci R ($m^2.K/W$)	Isı geçirgenlik katsayısı U ($W/m^2.K$)	Isı kaybedilen yüzey A (m^2)	Isı kaybı $A \times U$ (W/K)
Dış cephe	1/ α_i Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (İç)			0,13			
	İç sıva (Kireç harcı, kireç-çimento harcı)	0,02	1	0,02			
	Donatılı beton	0,5	2,5	0,2			
	Çimento harçlı sıva	0,02	1,6	0,013			
	Anorganik esaslı dış sıva	0,006	0,35	0,017			
	1/ α_d Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (dış)			0,04			
Toplam				0,42	2,38	2.774,65	6.606,44
Çatılı Tavan	1/ α_i Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (İç)			0,13			
	Donatılı beton	0,24	2,5	0,096			
	Çimento harçlı sıva	0,02	1	0,02			
	1/ α_d Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (dış)			0,08			
Toplam				0,326	3,07	1.880,00	5.765,96
Taban	1/ α_i Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (İç)			0,17			
	Çimento harçlı şap	0,03	1,4	0,021			
	Donatılı beton	0,24	2,5	0,096			
	Çimento harçlı sıva	0,02	1,6	0,013			
	Anorganik esaslı dış sıva	0,006	0,35	0,017			
	1/ α_d Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (dış)			0,04			
Toplam				0,357	2,80	2.733,00	7.655,13
Dış Pencere					2,4	2.365,21	5.676,50
Yapı elemanlarından iletim yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı ($\sum AU=Ht$) =							25,704,03

Oluşturulan alternatifler kapsamında ilgili yapı elemanına seçilen alternatifin U değerinin eklenmesi ile alternatiflerin enerji tasarruf potansiyelleri ortaya konulmuştur. Bu kapsamda Eczacılık Fakültesi binası için elde edilen enerji tasarruf oranları, temel modele göre yüzde ile ifade edilmiştir (Çizelge 4.20). Isı enerji ihtiyacı hesaplamasına göre alınan önlemlerden enerji tüketimini temel modele göre en yüksek oranda azaltan alternatifin %31,78 oranında tasarruf potansiyeli ile 1.3-2.3-3.2 alternatifinin olduğu, buna karşın en az tasarruf potansiyelinin de %2,54 ile 2.1 alternatifinin olduğu ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.20 Alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (Orijinal)

Alternatifler	Yapı Elemanı	Yıllık Isı Enerjisi İhtiyacı (MWh)	Temel Modele Göre Enerji Tasarrufu Potansiyeli (%)
Temel Model		3.106,05	
1.1	Dış cephe	2.657,24	14,45
1.2	Dış cephe	2.652,04	14,62
1.3	Dış cephe	2.649,93	14,68
2.1	Pencere	3.027,09	2,54
2.2	Pencere	2.997,93	3,48
2.3	Pencere	2.987,92	3,80
3.1	Çatı	2.709,45	12,77
3.2	Çatı	2.686,62	13,50
3.3	Çatı	2.716,76	12,53
1.1 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	2.578,92	16,97
1.1 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	2.551,87	17,84
1.1 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	2.541,87	18,16
1.1 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	2.264,29	27,10
1.1 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	2.241,60	27,83
1.1 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	2.271,61	26,87
1.2 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	2.572,82	17,17
1.2 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	2.545,77	18,04
1.2 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	2.535,76	18,36
1.2 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	2.258,19	27,30
1.2 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	2.237,24	27,97
1.2 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	2.265,51	27,06
1.3 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	2.571,55	17,21
1.3 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	2.543,65	18,11
1.3 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	2.533,65	18,43
1.3 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	2.256,08	27,37
1.3 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	2.235,13	28,04
1.3 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	2.263,39	27,13
2.1 - 3.1	Pencere+Çatı	2.633,98	15,20
2.1 - 3.2	Pencere+Çatı	2.611,26	15,93
2.1 - 3.3	Pencere+Çatı	2.641,30	14,96
2.2 - 3.1	Pencere+Çatı	2.604,79	16,14
2.2 - 3.2	Pencere+Çatı	2.581,25	16,90
2.2 - 3.3	Pencere+Çatı	2.612,10	15,90
2.3 - 3.1	Pencere+Çatı	2.594,78	16,46
2.3 - 3.2	Pencere+Çatı	2.571,24	17,22
2.3 - 3.3	Pencere+Çatı	2.602,10	16,22

Çizelge 4.21 Alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (devam)

Alternatifler	Yapı Elemanı	Yıllık Isı Enerjisi İhtiyacı (MWh)	Temel Modele Göre Enerji Tasarrufu Potansiyeli (%)
1.1 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.187,92	29,56
1.1 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.166,27	30,26
1.1 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.195,24	29,32
1.1 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.160,69	30,44
1.1 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.137,16	31,19
1.1 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.167,11	30,23
1.1 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.150,69	30,76
1.1 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.127,15	31,52
1.1 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.158,01	30,52
1.2 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.181,82	29,76
1.2 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.161,07	30,42
1.2 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.189,14	29,52
1.2 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.154,59	30,63
1.2 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.131,05	31,39
1.2 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.161,91	30,40
1.2 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.144,59	30,95
1.2 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.121,05	31,71
1.2 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.151,90	30,72
1.3 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.180,56	29,80
1.3 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.158,95	30,49
1.3 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.187,03	29,59
1.3 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.152,48	30,70
1.3 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.128,94	31,46
1.3 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.159,80	30,46
1.3 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.142,48	31,02
1.3 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.118,94	31,78
1.3 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	2.149,79	30,79

Elektrik tüketimi tahmin modelleri ile elde edilen elektrik tüketim değerleri ile TS825 kapsamında elde edilen ısı enerjisi ihtiyacı değerleri toplanarak örnek olay kapsamındaki binaların (Eczacılık Fakültesi binası, Rektörlük binası, Fen Fakültesi B Blok binası ve Şevket Aziz Kansu binası) 2025-2030 döneminde yıllık bazda enerji tüketimi değerleri elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında binaların enerji verimli dönüşümü için alınan önlem ve önlemler setinin maliyet yönünden analizi yapılarak çevresel değerlendirmenin yanında ekonomik analiz sağlanarak çalışmanın çok boyutlu olması sağlanmıştır. Enerji tüketimini azaltıcı

önlemlerin maliyet hesabı Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan 244/2012 numaralı direktif tarafından çerçevesi sunulan maliyet-optimal yöntem ile hesaplanmıştır.

Çalışmanın yaşam döngüsü kapsamında yapılan maliyet hesaplamasında bazı temel varsayımlarda bulunulmuştur. Para birimi ABD Doları (\$) olarak belirlenmiştir. Proje değerlendirme aşamasında hesaplanan iskonto oranı, dolar para birimi cinsinden hesaplanarak ortaya konulmuştur. Buna göre ABD 10 yıllık tahvil oranı %4,6 olarak (Anonim 2025d), likidite riski ve operasyonel riskler de %1,5 olarak hesaplanmıştır (Tanrıvermiş 2016).

$$\text{İskonto Oranı} = \text{ABD 10 yıllık tahvil oranı} + \text{likidite riski} + \text{operasyonel riskler} \quad (4.1)$$

Belirlenen oranlar üzerinden, araştırma kapsamında hesaplanan iskonto oranı %7,6 olarak belirlenmiştir. Ayrıca 2025-2030 dönemi için Dolar/TL döviz kuru için IMF ve TCMB tarafından yapılan tahminler kullanılmıştır (Anonim 2025e). Buna göre 2030 yılı itibariyle altı yıllık dönemde döviz kurunun yaklaşık % 103 oranında artacağı tahmin edilmektedir (Çizelge 4.21).

Çizelge 4.22 Proje değerlemesinde kullanılan döviz kuru tahminleri (Anonim 2025e)

Yıl	Tahmin (Dolar/TL)
2025	43,76
2026	54,47
2027	62,21
2028	70,12
2029	78,98
2030	88,93

Maliyet hesabında kullanılan bir diğer unsur da senaryolara göre belirlenen alternatif malzemelerin birim fiyatlarıdır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı tarafından yayımlanan 2025 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları kapsamında belirlenen malzeme birim fiyatları kullanılmıştır (Çizelge 4.22).

Çizelge 4.23 Seçilen alternatiflerin 2025 yılı malzeme birim fiyatları (Anonim 2025f)

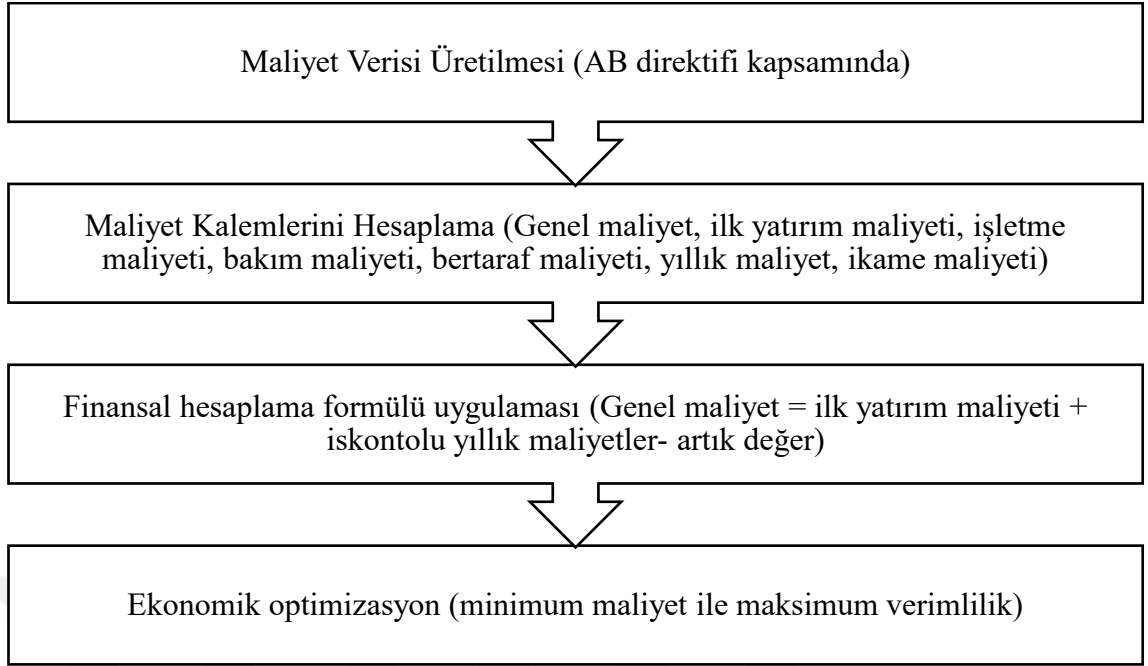
Malzeme Adı	Alternatif	Poz No	Ölçü	Birim Fiyat (TL/m ²)
8 cm kalınlıkta Yüzeye dik çekme mukavemeti en az 100kPa (TR100) ekspande polistren levhalar (EPS) ile dış duvarlarda dıştan ısı yalıtımı ve üzerine ısı yalıtım sıvası yapılması (Mantolama)	1.1	15.341.1003	m ²	853,20
8 cm kalınlıkta yüzeye dik çekme mukavemeti en az 200 kPa olan, yüzeyi pürüzlü veya pürüzlü kanallı ekstrüde polistren levhalar ile dış duvarlarda dıştan ısı yalıtımı ve üzerine ısı yalıtım sıvası yapılması (Mantolama)	1.2	15.341.2003	m ²	1.050,08
8 cm kalınlıkta yüzeye dik çekme mukavemeti en az 7,5kPa (TR7,5) taşıyünü levhalar ile dış duvarlarda dıştan ısı yalıtımı ve üzerine ısı yalıtım sıvası yapılması (Mantolama)	1.3	15.341.3003	m ²	1.067,33
PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+4 mm kalınlıkta 12 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması	2.1	15.470.1413	m ²	1.436,94
PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+5 mm kalınlıkta 16 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması	2.2	15.470.1420	m ²	1.607,56
Ahşap doğramaya çıta ile 4+4 mm kalınlıkta 12 mm ara boşluklu çift camlı pencere ünitesi takılması	2.3	15.470.1002	m ²	1.807,41
Mevcut ahşap, betonarme ya da çelik aşıklar üzerine, 50 mm poliüretan yalıtımlı (üstü 1.20 mm kalınlıkta PVC membranlı, altı 0.60 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac) çatı paneli ile çatı örtüsü yapılması.	3.1	15.320.1002	m ²	1.547,03
Mevcut ahşap, betonarme ya da çelik aşıklar üzerine, 50 mm poliizosiyanurat yalıtımlı (üstü 1.20 mm kalınlıkta TPO membranlı, altı 0.60 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac) çatı paneli ile çatı örtüsü yapılması.	3.2	15.320.1006	m ²	1.667,03
Mevcut ahşap, betonarme ya da çelik aşıklar üzerine, 60 mm polistren yalıtımlı (üstü 0.50 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac, altı 0.40 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac) çatı paneli ile çatı örtüsü yapılması.	3.3	15.320.1008	m ²	1.139,53

Seçilen malzemelerin yaşam döngüsü maliyeti hesaplaması kapsamında amortisman bedellerinin belirlenmesi, dolayısıyla ekonomik ömürleri ile yıpranma paylarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda seçilen alternatiflere ilişkin Gelir İdaresi Başkanlığı tarafından yayımlanan Amortisman Tabi İktisadi Kıymetler Tablosu kullanılarak ekonomik ömür ve yıpranma payları belirlenerek amortisman oranları ortaya konulmuştur (Çizelge 4.23).

Çizelge 4.24 Seçilen alternatiflerin amortisman oranları (Anonim 2025g)

Alternatif No	Yapı Bileşeni	Amortisman Tablosu'ndaki Açıklama	Ekonomik Ömür Amortisman Oranı
1.1	Dış Cephe	25.14 EPS ve EPP olarak adlandırılan strafor hammaddelerinden tavan levhaları, ambalaj malzemeleri, inşaat iç-dış ısı izolasyon levhaları ile otomobillerin bazı iç aksamalarının imalatında kullanılan iktisadi kıymetler	12 yıl - % 8,33
1.2			
1.3			
2.1	Pencere	31.6 PVC kapı ve pencere sistemleri ve bunların benzerlerinin imalatında kullanılan iktisadi kıymetle	6 yıl – % 16,66
2.2			
2.3			
3.1	Çatı	25.14 EPS ve EPP olarak adlandırılan strafor hammaddelerinden tavan levhaları, ambalaj malzemeleri, inşaat iç-dış ısı izolasyon levhaları ile otomobillerin bazı iç aksamalarının imalatında kullanılan iktisadi kıymetler	12 yıl - % 8,33
3.2			
3.3			

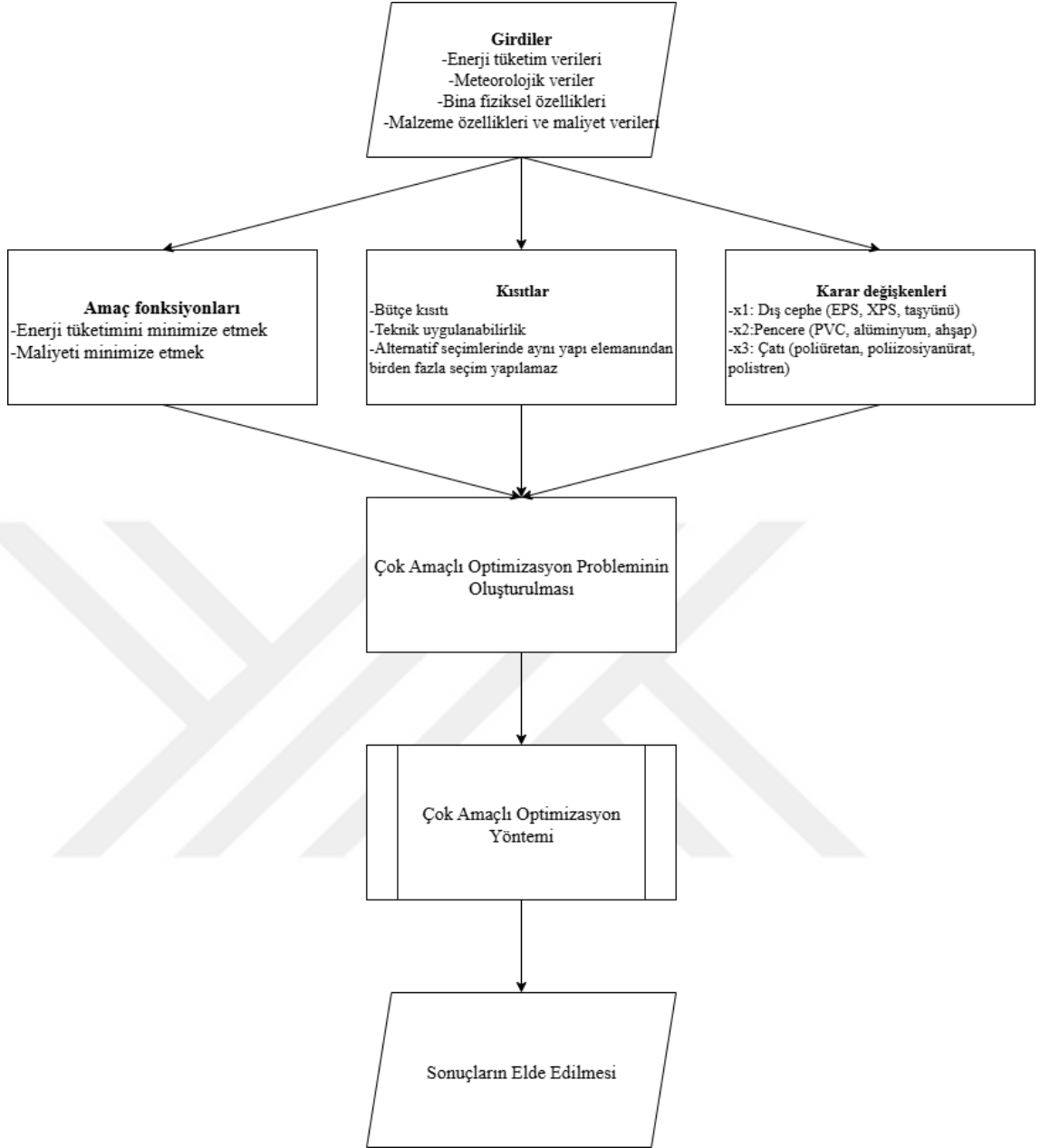
Çalışma kapsamında enerji verimliliği projelerinin ekonomik değerlendirmesi için EU 244/2012 sayılı Komisyon Delege Düzenlemesi'nde belirtilen maliyet optimal metodoloji çerçevesi sistematik bir akış şeması olarak görselleştirilmiştir. Söz konusu metodolojinin uygulanmasında izlenen aşamalı süreç ve on ana maliyet kaleminin (genel maliyet, ilk yatırım maliyeti, enerji maliyeti, işletme maliyeti, bakım maliyeti, toplam işletme maliyeti, bertaraf maliyeti, yıllık maliyet, ikame maliyeti ve sera gazı emisyon maliyeti) hesaplama prosedürü gösterilmektedir (Şekil 4.1). Akış şemasının merkezinde yer alan finansal hesaplama formülü, genel maliyetin başlangıç yatırım maliyeti, iskontolu yıllık maliyetler toplamı ve artık değer arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu görsel temsil, karmaşık çok kriterli karar verme sürecinin metodolojik çerçevesini anlaşılır kılarak, enerji optimizasyon projelerinin ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde araştırmacılar ve uygulayıcılar için sistematik bir rehber niteliği taşımaktadır.



Şekil 4.1 Maliyet-optimal hesaplama yöntemi (Anonymous 2025)

Binalar için hesaplama metodu kullanılarak seçilen alternatiflerin genel maliyetleri yıllar bazında hesaplanarak ortaya konulmuştur. Binaların enerji tüketimi ve maliyet hesaplamaları sonucunda çok amaçlı optimizasyona altlık teşkil edecek veri seti yıllar ve alternatifler bazında oluşturulmuştur.

Çok amaçlı optimizasyon probleminin sistematik oluşturulma sürecini gösteren akış şemasına göre oluşturulan metodolojik çerçevede, başlangıçta süreç girdi verilerinin toplanmakta ve soldan sağa doğru ilerleyen dört ana aşamadan oluşmaktadır (Şekil 4.2). İlk aşamada elde edilen girdiler, çok amaçlı optimizasyon probleminin üç temel bileşenine dönüştürülmektedir: karar değişkenlerinin tanımlanması, problem kısıtlarının belirlenmesi ve amaç fonksiyonlarının formülasyonu. Akışın üçüncü aşamasında, bu üç temel bileşen bir araya getirilerek çok amaçlı optimizasyon probleminin matematiksel formülasyonu oluşturulmaktadır. Son olarak, tanımlanan problem yapısına uygun çok amaçlı optimizasyon yönteminin seçimi ve uygulanması gerçekleştirilmektedir. Bu sistematik yaklaşım, karmaşık çok amaçlı optimizasyon problemlerinin metodolojik olarak tutarlı bir şekilde çözülmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.2 Çok amaçlı optimizasyon akış şeması (Orijinal)

Çalışma kapsamında bina enerji verimliliği yenileme uygulamaları kapsamında optimal yapı bileşeni kombinasyonlarının belirlenmesi amacıyla çok amaçlı bir optimizasyon problemi formüle edilmiştir. Problem yapısı, binaların enerji performansının iyileştirilmesi sürecinde karşılaşılan klasik ikilem olan enerji verimliliği ve maliyet optimizasyonu arasındaki dengenin matematiksel olarak modellenmesini hedeflemektedir.

Geliştirilen model, ayrık optimizasyon kategorisinde yer alan ikili tamsayı programlama yaklaşımına dayanmakta olup, üç ana yapı bileşeni (dış cephe, pencere ve çatı sistemleri) için tanımlanan yenileme alternatifleri arasından optimal kombinasyonların seçilmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşım hem bireysel bileşen optimizasyonuna hem de çoklu bileşen kombinasyonlarının eş zamanlı değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Karar Değişkenlerinin Tanımlanması: Optimizasyon probleminin karar değişkenleri, ikili tamsayı formatta tanımlanmış olup i indeksi yapı bileşeni kategorilerini ($i=1$: dış cephe, $i=2$: pencere, $i=3$: çatı), j indeksi ise her kategori içerisindeki yenileme alternatiflerini temsil etmektedir. İkili karar değişkeni, i . yapı bileşeninin j . alternatifinin seçilme durumunu ifade etmekte olup, değeri 1 olan alternatifin seçildiğini, değeri 0 olan ise seçilmediğini göstermektedir.

Belirtilen yaklaşım, toplam 9 adet ikili karar değişkeninden oluşan bir 3×3 karar matrisi yapısı oluşturmakta ve sistemin her bir yapı bileşeni için üç farklı teknolojik alternatifin değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Karar değişkenlerinin ikili yapısı, kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin karakteristik özelliği olup, her alternatifin kesin olarak seçilip seçilmediğinin belirlenmesini sağlamaktadır.

Amaç Fonksiyonlarının Formülasyonu: Çok amaçlı optimizasyon probleminin amaç fonksiyonları, bina enerji verimliliği yenileme uygulamalarının temel hedeflerini yansıtacak şekilde iki ana kriteri eş zamanlı olarak optimize etmek üzere tasarlanmıştır. Birincil amaç fonksiyonu enerji tüketimi minimizasyonunu, ikincil amaç fonksiyonu ise maliyet minimizasyonunu hedeflemektedir. Bu fonksiyonlarda yer alan parametreler, i . yapı bileşeninin j . alternatifinin yıllık enerji tüketim değerini ve toplam maliyet değerini temsil etmektedir. Amaç fonksiyonlarında yer alan $E_{ij}x_{ij}$ ve $C_{ij}x_{ij}$ çarpımları, ikili seçim mekanizmasının matematiksel karşılığını oluşturmaktadır. Buna göre problem çok amaçlı optimizasyon modeli olarak aşağıdaki eşitlikler oluşturulmuştur (4.2, 4.3, 4.4).

Birincil Amaç Fonksiyonu - Enerji Tüketimi Minimizasyonu:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 E_{ij} x_{ij} \quad (4.2)$$

İkincil Amaç Fonksiyonu - Maliyet Minimizasyonu:

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{ij} x_{ij} \quad (4.3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1,2,3 \quad j = 1,2,3 \quad (4.4)$$

biçiminde tanımlanabilir.

Eşitlik 4.3'te E_{ij} parametresi i . yapı bileşeninin j . alternatifinin yıllık enerji tüketim değerini (MWh/yıl), C_{ij} parametresi ise aynı alternatifin toplam maliyet değerini (\$) temsil etmektedir.

Çarpım mantığı, optimizasyon sürecinde kritik bir role sahiptir: $x_{ij}=1$ olduğunda (alternatif seçildiğinde), ilgili alternatifin enerji ve maliyet değerleri toplam hesaplamasına dahil edilirken, $x_{ij}=0$ olduğunda (alternatif seçilmediğinde) bu değerler sıfırlanarak toplam hesaplama dışında bırakılmaktadır. Bu filtreleme sistemi, optimizasyon algoritmasının sadece seçilen alternatiflerin katkısını dikkate almasını sağlamaktadır.

Kısıt Sisteminin Detaylandırılması: Optimizasyon probleminin uygunluk uzayını tanımlayan kısıt sistemi, üç ana kısıt kategorisinden oluşmaktadır:

Karşılıklı Dışlayıcılık (Mutual Exclusivity) Kısıtı (4.5):

$$\sum_{j=1}^3 x_{ij} \leq 1, \forall i \in \{1,2,3\} \quad (4.5)$$

Belirlenen kısıt her yapı bileşeni kategorisi için ayrı ayrı uygulanmakta olup, aynı yapı bileşeni kategorisinden en fazla bir alternatifin seçilebileceğini garanti etmektedir. Kısıtın detaylı açılımı şu şekildedir (4.6, 4.7, 4.8):

$$Dış\ cephe\ kısıtı\ (i = 1): x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq 1 \quad (4.6)$$

$$Pencere\ kısıtı\ (i = 2): x_{21} + x_{22} + x_{23} \leq 1 \quad (4.7)$$

$$Çatı\ kısıtı\ (i = 3): x_{31} + x_{32} + x_{33} \leq 1 \quad (4.8)$$

Belirlenen kısıt yapısı, fiziksel olarak mümkün olmayan durumların (örneğin aynı dış cephe üzerine iki farklı yalıtım sisteminin eş zamanlı uygulanması) matematiksel modelden elimine edilmesini sağlamaktadır.

Minimum seçim kısıtı (4.9):

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 x_{ij} \geq 1 \quad (4.9)$$

Minimum seçim kısıtı, optimizasyon probleminin sistemin geneli için minimum bir müdahale gerektirdiğini ifade etmektedir. Kısıtın açılımı, tüm karar değişkenlerinin toplamının en az 1 olmasını zorunlu kılmaktadır (4.10):

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{31} + x_{32} + x_{33} \geq 1 \quad (4.10)$$

Önerilen yaklaşım, “hiçbir yenileme müdahalesi yapmama” seçeneğini ortadan kaldırarak, optimizasyon sürecinin mutlaka en az bir iyileştirme alternatifi sunmasını garanti etmektedir.

Binary (ikili) kısıtı (4.11):

$$x_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in \{1,2,3\}, \forall j \in \{1,2,3\} \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.11) ile belirlenen kısıt, tüm karar değişkenlerinin ikili tam sayı yapısını koruyarak, her alternatifin kesin olarak seçilip seçilmediğinin belirlenmesini sağlamaktadır.

Problem Karmaşıklığı ve Çözüm Uzayı Analizi: Formüle edilen optimizasyon probleminin çözüm uzayı, kısıt sistemi dikkate alınarak analiz edildiğinde önemli kombinatoryal özellikleri ortaya çıkmaktadır. Her yapı bileşeni kategorisi için dört farklı durum mevcuttur: hiçbir alternatifin seçilmemesi veya üç alternatiften birinin seçilmesi. Bu durum, teorik olarak $4^3 = 64$ farklı kombinasyonu mümkün kılmaktadır.

Ancak minimum seçim kısıtı nedeniyle, “hiçbir alternatifin seçilmediği” tek duruma izin verilmemektedir. Dolayısıyla, problemin değerlendirme uzayı 63 farklı yenileme alternatifinden oluşmaktadır. Bu alternatifler şu kategorilerde sınıflandırılmaktadır:

- Tek bileşen alternatifleri: Sadece bir yapı bileşeninden bir alternatifin seçildiği durumlar (9 adet)
- İki bileşen alternatifleri: İki farklı yapı bileşeninden birer alternatifin seçildiği durumlar (27 adet)
- Üç bileşen alternatifleri: Her yapı bileşeninden birer alternatifin seçildiği durumlar (27 adet)

Çok Amaçlı Optimizasyon Yaklaşımı: Formüle edilen problem, enerji tüketimi ve maliyet kriterleri arasındaki ödünleşim (trade-off) ilişkisi nedeniyle Pareto-optimal çözümler kümesi üretecektir. Bu durum, tek bir “mutlak en iyi” çözüm yerine, farklı tercih yapılarına göre optimal sayılabilecek alternatif çözümlerin varlığını ifade etmektedir.

Çok amaçlı problemin tek amaçlı forma dönüştürülmesi için ağırlıklı toplam yöntemi uygulanabilir (4.12):

$$\text{Min } f(x) = w_1 f_1^{\text{norm}}(x) + w_2 f_2^{\text{norm}}(x) \quad (4.12)$$

Önerilen yaklaşımda w_1 ve w_2 ağırlık katsayıları ($w_1 + w_2 = 1$, $w_1, w_2 \geq 0$) karar vericinin tercihlerini yansıtmakta, $f_1^{\text{norm}}(x)$ ve $f_2^{\text{norm}}(x)$ ise normalize edilmiş amaç fonksiyonlarını temsil etmektedir.

Araştırma kapsamında çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü ve analizi için Python tabanlı açık kaynak bir hesaplama platformu kullanılmıştır. Sistem ve kütüphane konfigürasyonu, hesaplama sürecinin tekrarlanabilirliği ve doğrulanabilirliği açısından kritik önem taşımaktadır (Çizelge 4.24).

Çizelge 4.25 Sistem ve kütüphane bilgileri (Orijinal)

Sistem/kütüphane bilgisi	Versiyon
Python sürümü	3.12.5
IPython sürümü	8.26.0
Jupyter lab sürümü	4.2.4
Numpy	2.0.2 (Sayısal hesaplama ve matris işlemleri)
Pandas	2.2.2 (Veri manipülasyonu ve analizi)
matplotlib	3.9.2 (Temel veri görselleştirme)
Seaborn	0.13.2 (İstatistiksel veri görselleştirme)
Scipy	1.14.0 (Bilimsel hesaplama kütüphanesi)
Sklearn	1.5.1 (Makine öğrenmesi scikit-learn)
Pymoo	0.6.1.3 (Çok amaçlı optimizasyon)
Platypus	1.4.1 (Çok amaçlı optimizasyon çerçevesi)
plotly	6.0.1 (İnteraktif görselleştirme)
Statsmodels	0.14.4 (İstatistiksel modelleme)

Analiz sürecinin temelini Python 3.12.5 programlama dili oluşturmaktadır. İnteraktif geliştirme ortamı olarak IPython 8.26.0 çekirdeği üzerinde çalışan JupyterLab 4.2.4 kullanılmıştır. Bu yapılandırma, iterative analiz süreçleri ve sonuçların görselleştirilmesi için uygun bir platform sağlamıştır.

Sayısal hesaplama altyapısı NumPy 2.0.2 kütüphanesi ile sağlanmış olup, matris işlemleri ve matematiksel operasyonların performansı bu kütüphane üzerinden optimize edilmiştir. Veri manipülasyonu ve veri çerçevesi işlemleri için Pandas 2.2.2 kütüphanesi kullanılarak, Excel formatındaki girdi verilerinin Python ortamına aktarılması ve işlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon sürecinde dengeli senaryo için eşit ağırlıklandırma yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşımda enerji tüketimi ve maliyet kriterlerine eşit önem verilerek ($w_1 = w_2 = 0,5$) objektif değerlendirme sağlanmıştır. Eşit ağırlıklandırma stratejisi, karar

vericinin belirgin bir tercihi olmadığı durumlarda dengeli çözümler üretmekte ve hesaplama verimliliği açısından avantaj sağlamaktadır.

Formüle edilen çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü için Pymoo 0.6.1.3 ve Platypus 1.4.1 kütüphaneleri kullanılmıştır. Bu kütüphaneler, Pareto-optimal çözüm kümesinin elde edilmesi ve çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının uygulanması açısından kapsamlı bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

İstatistiksel analiz ve bilimsel hesaplama işlemleri SciPy 1.14.0 kütüphanesi ile desteklenmiştir. Makine öğrenmesi algoritmalarının uygulandığı durumlar için scikit-learn 1.5.1 kütüphanesinden yararlanılmıştır. İstatistiksel modelleme ve regresyon analizleri Statsmodels 0.14.4 kütüphanesi ile gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçlarının görselleştirilmesi için çok katmanlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Temel statik görselleştirmeler Matplotlib 3.9.2 kütüphanesi ile üretilirken, istatistiksel veri görselleştirmeleri Seaborn 0.13.2 kütüphanesi kullanılarak estetik ve bilimsel standartlarda hazırlanmıştır. İnteraktif görselleştirme ihtiyaçları için Plotly 6.0.1 kütüphanesinden yararlanılarak, çok boyutlu veri analizi sonuçlarının dinamik olarak incelenmesi mümkün kılınmıştır.

4.4.1 Üç farklı baskınlık stratejisi genel sonuçları

Çalışma kapsamında bina enerji performansı optimizasyonu için üç farklı baskınlık stratejisi geliştirilmiş ve 2025-2030 yılları arasında altı farklı yıl projeksiyonu için uygulanmıştır. Her strateji, farklı karar verici tercihlerini yansıtacak şekilde tasarlanmış olup, toplam 63 senaryo kombinasyonu üzerinden 378 adet veri noktası analiz edilmiştir.

Analiz kapsamında değerlendirilen senaryolar, dış cephe yalıtımı, pencere sistemi ve çatı yalıtımı olmak üzere üç ana bina elemanının farklı malzeme seçeneklerini temsil etmektedir. Her alternatif kombinasyonu, farklı termal performans ve maliyet karakteristiklerine sahip malzeme alternatiflerinden oluşmaktadır (Çizelge 4.25).

Çizelge 4.26 Analizde kullanılan bina elemanları ve malzeme seçenekleri (Orijinal)

Bina Elemanı	Senaryo	Malzeme Adı
Dış Cephe	1.1	8 cm kalınlıkta Yüzeye dik çekme mukavemeti en az 100kPa (TR100) ekspande polistren levhalar (EPS) ile dış duvarlarda dıştan ısı yalıtımı ve üzerine ısı yalıtım sıvası yapılması (Mantolama)
	1.2	8 cm kalınlıkta yüzeye dik çekme mukavemeti en az 200 kPa olan, yüzeyi pürüzlü veya pürüzlü kanallı ekstrüde polistren levhalar ile dış duvarlarda dıştan ısı yalıtımı ve üzerine ısı yalıtım sıvası yapılması (Mantolama)
	1.3	8 cm kalınlıkta yüzeye dik çekme mukavemeti en az 7,5kPa (TR7,5) taşıyünü levhalar ile dış duvarlarda dıştan ısı yalıtımı ve üzerine ısı yalıtım sıvası yapılması (Mantolama)
Pencere	2.1	PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+4 mm kalınlıkta 12 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması
	2.2	PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+5 mm kalınlıkta 16 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması
	2.3	Ahşap doğramaya çıta ile 4+4 mm kalınlıkta 12 mm ara boşluklu çift camlı pencere ünitesi takılması
Çatı	3.1	Mevcut ahşap, betonarme yada çelik aşıklar üzerine, 50 mm poliüretan yalıtımlı (üstü 1.20 mm kalınlıkta PVC membranlı, altı 0.60 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac) çatı paneli ile çatı örtüsü yapılması.
	3.2	Mevcut ahşap, betonarme yada çelik aşıklar üzerine, 50 mm poliizosiyanurat yalıtımlı (üstü 1.20 mm kalınlıkta TPO membranlı, altı 0.60 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac) çatı paneli ile çatı örtüsü yapılması.
	3.3	Mevcut ahşap, betonarme yada çelik aşıklar üzerine, 60 mm polistren yalıtımlı (üstü 0.50 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac, altı 0.40 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac) çatı paneli ile çatı örtüsü yapılması.

Eczacılık Fakültesi binası için tüketim odaklı strateji sonuçları: Tüketim odaklı stratejide [1.0, 0.0] ağırlık konfigürasyonu kullanılarak sadece enerji tüketimi odaklı optimizasyon yapılmıştır. Bu baskınlık yaklaşımı, altı yıl boyunca tutarlı şekilde “1.3-2.3-3.2” senaryo kombinasyonunu optimal olarak seçmiştir. Seçilen senaryo kombinasyonu, aşağıdaki malzeme seçimlerini içermektedir:

- Dış Cephe (1.3): 8 cm kalınlığında TR7,5 taşıyünü levhalar ile dış duvar yalıtımı
- Pencere (2.3): Ahşap doğrama ile 4+4 mm kalınlığında çift camlı pencere sistemi
- Çatı (3.2): 50 mm poliizosiyanurat yalıtımlı TPO membranlı çatı paneli

Tüketim değerleri 2025 yılında 2,536.25 MWh'den başlayarak 2030 yılında 2,522.84 MWh'ye %0.5'lik minimal bir azalma göstermiştir. Bu tutarlılık, seçilen malzeme kombinasyonunun üstün termal performansını kanıtlamaktadır. Buna karşılık maliyet değerleri \$63.671,85'ten \$120.711,60'a çıkarak %89,5'lik önemli bir artış sergilemiştir.

Maliyet odaklı strateji sonuçları: Maliyet odaklı stratejide [0.0, 1.0] ağırlık konfigürasyonu ile sadece maliyet minimizasyonu hedeflenmiştir. Bu baskınlık yaklaşımı, tüm yıllarda “1.1” senaryo kombinasyonunu optimal olarak belirlemiştir. Seçilen senaryo kombinasyonu:

- Dış Cephe (1.1): 8 cm kalınlığında TR100 ekspande polistiren levhalar (EPS) ile dış duvar yalıtımı
- Pencere: Hiçbir pencere sistemi yenileme önlemi seçilmemiştir
- Çatı: Hiçbir çatı yalıtım önlemi seçilmemiştir

Maliyet değerleri 2025 yılında \$8.613,49’dan 2030 yılında \$14.664,08’e çıkarak %70,2’lik bir artış göstermiştir. Tüketim değerleri ise 3.074,55 MWh’dan 3.061,14 MWh’ye %0,4’lük minimal bir azalma sergilemiştir. Bu sonuçlar, minimum maliyet yaklaşımının enerji verimliliği açısından sınırlı iyileştirme sağladığını göstermektedir.

Dengeli strateji genel performansı: Dengeli stratejide hem enerji tüketimi hem de maliyet kriterlerinin eşit önemde değerlendirildiği ($w_1 = w_2 = 0,5$) basit ağırlıklandırma yaklaşımı benimsenmiştir. Dengeli strateji, altı yıl boyunca “1.1-3.3” senaryo kombinasyonunu optimal olarak belirlemiştir. Seçilen senaryo kombinasyonu:

- Dış Cephe (1.1): 8 cm kalınlığında TR100 EPS polistiren levhalar ile ekonomik yalıtım
- Pencere: Hiçbir pencere sistemi yenileme önlemi seçilmemiştir
- Çatı (3.3): 60 mm polistiren yalıtımlı galvanizli sac çatı paneli

Önerilen hibrit yaklaşım, cephe yalıtımında ekonomik EPS seçimi ile çatı yalıtımında performans odaklı polistiren panellerinin akıllı kombinasyonunu sunmaktadır. Tüketim değerleri 2.688,92 MWh’dan 2.675,51 MWh’ye %0,5’lik azalma, maliyet değerleri ise \$28.962,84’ten \$49.307,94’e %70,2’lik artış göstermiştir.

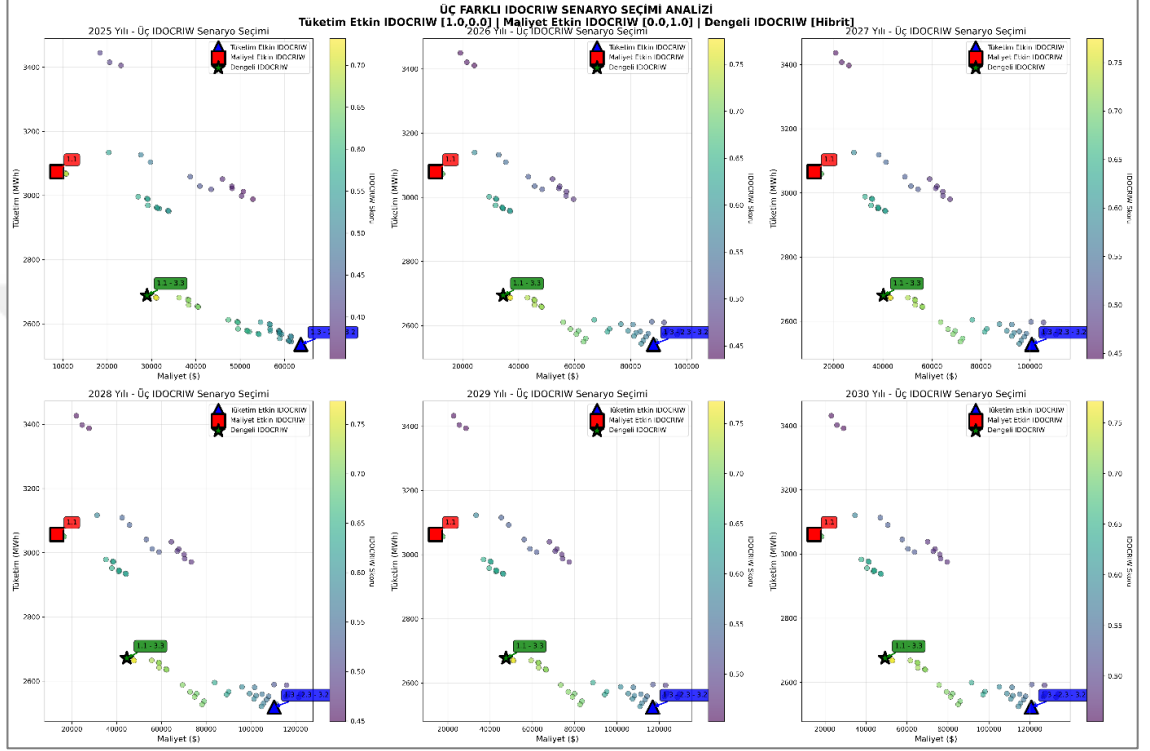
Üç farklı baskınlık stratejisinin senaryo seçiminde gösterdiği tutarlılık, metodolojinin kararlılığının değerlendirilmesi açısından temel bir ölçüt niteliği taşımaktadır (Çizelge 4.26).

- Tüketim Odaklı Strateji: Altı yıl boyunca %100 tutarlılık ile “1.3-2.3-3.2” senaryo kombinasyonunu seçmiştir. Bu tutarlılık, enerji tüketimi minimizasyonu hedefinin net bir şekilde tanımlanabildiğini ve optimal çözümün belirgin olduğunu göstermektedir.
- Maliyet Odaklı Strateji: Altı yıl boyunca %100 tutarlılık ile “1.1” senaryo kombinasyonunu seçmiştir. Minimum maliyet hedefinin deterministik yapısı, stratejinin kararlı sonuçlar üretmesini sağlamıştır.
- Dengeli Strateji: Altı yıl boyunca %100 tutarlılık ile “1.1-3.3” senaryo kombinasyonunu seçmiştir. Eşit ağırlıklandırma yaklaşımının kararlı yapısı, dengeli stratejinin tutarlı sonuçlar üretmesini sağlamıştır.

Çizelge 4.27 Üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları (Orijinal)

Tüketim Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatifler	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.3 - 2.3 - 3.2	2.536,25	63.671,85
2026	1.3 - 2.3 - 3.2	2.541,79	88.166,15
2027	1.3 - 2.3 - 3.2	2.528,16	100.723,30
2028	1.3 - 2.3 - 3.2	2.518,85	110.436,56
2029	1.3 - 2.3 - 3.2	2.524,86	116.916,73
2030	1.3 - 2.3 - 3.2	2.522,84	120.711,60
Maliyet Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatifler	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.1	3.074,55	8.613,49
2026	1.1	3.080,09	10.259,67
2027	1.1	3.066,46	11.943,30
2028	1.1	3.057,15	13.244,76
2029	1.1	3.063,16	14.127,96
2030	1.1	3.061,14	14.664,08
Dengeli Senaryo			
Yıl	Alternatifler	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.1 - 3.3	2.688,92	28.962,84
2026	1.1 - 3.3	2.694,46	34.498,12
2027	1.1 - 3.3	2.680,83	40.159,31
2028	1.1 - 3.3	2.671,52	44.535,45
2029	1.1 - 3.3	2.677,53	47.505,22
2030	1.1 - 3.3	2.675,51	49.307,94

Optimizasyon Hedeflerine Ulaşma Başarısı: Her üç strateji de kendi optimizasyon hedeflerine %100 başarı ile ulaşmıştır. Tüketim odaklı strateji minimum enerji tüketimine, maliyet odaklı strateji minimum maliyete, dengeli strateji ise her iki kriterde optimum dengeye ulaşmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Üç farklı baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı sonuçları (Orijinal)

Seçilen üç stratejik senaryonun matematiksel olarak optimal olup olmadığının doğrulanması amacıyla Pareto etkinlik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz, hiçbir kriterin performansını bozmadan diğer kriterlerin performansını artırmanın mümkün olmadığı noktaları belirlemeyi amaçlamaktadır.

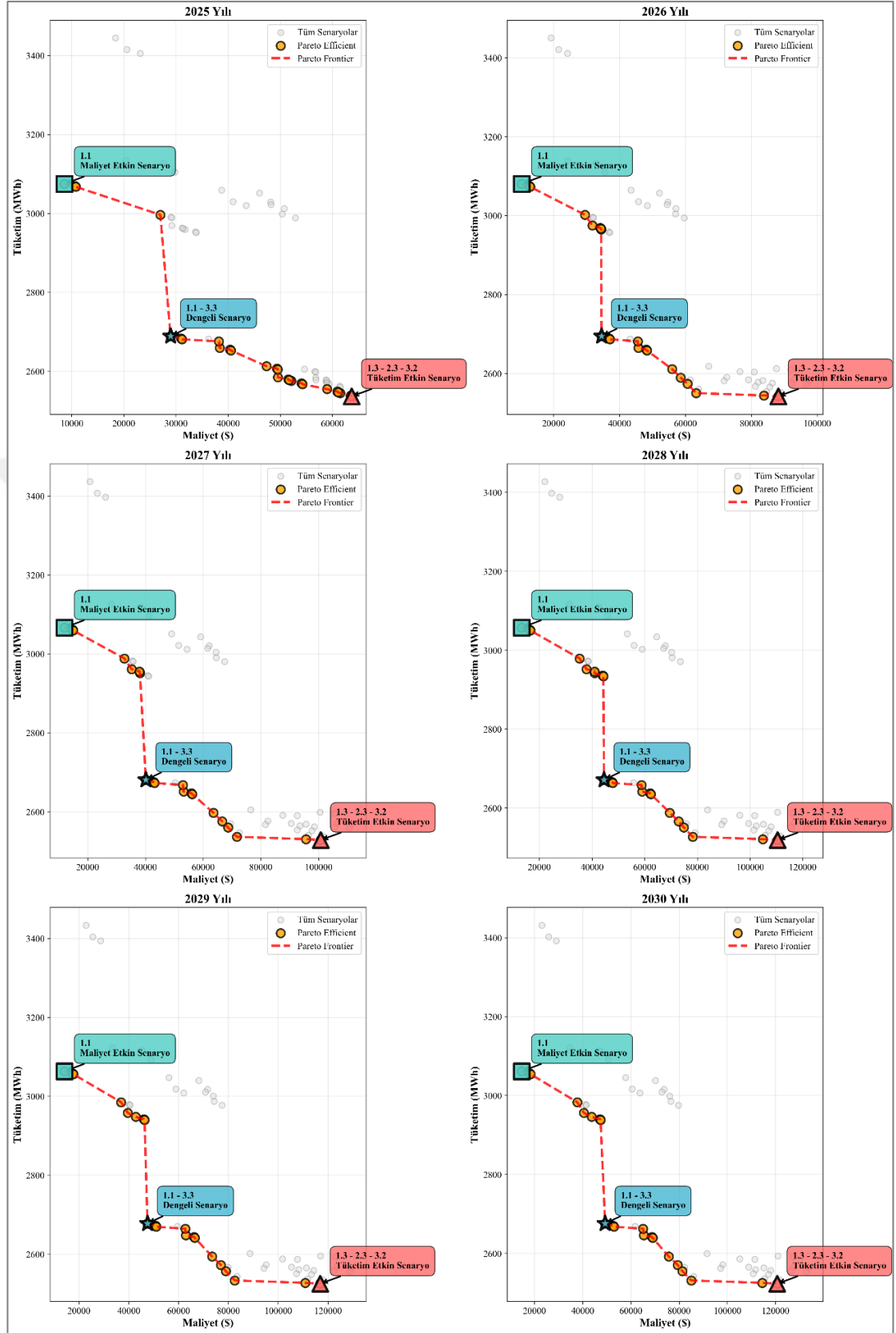
Pareto etkin sınırı (efficient frontier), tüm değerlendirilen alternatifler arasından baskın olmayan çözümlerin oluşturduğu kümeyi temsil etmektedir. Analiz sonuçları, 63 yenileme alternatifi arasından her yıl için tutarlı şekilde aynı Pareto etkin noktaların tespit edildiğini göstermiştir. Altı yıllık analiz periyodu boyunca, Pareto etkin sınır üzerinde

konumlanan alternatif sayısı ortalama 15-18 adet olmuştur. Bu durum, toplam alternatiflerin yaklaşık %25-30'unun Pareto etkin olduğunu göstermektedir.

Altı yıllık analiz süreci boyunca, tüketim odaklı, maliyet odaklı ve dengeli olmak üzere üç farklı strateji, Pareto sınırının farklı bölgelerinde tutarlı biçimde Rank-1 Pareto etkin çözümler olarak belirlenmiş; böylece her bir strateji, enerji-maliyet optimizasyonundaki tercih odaklarına göre farklılaşan ancak istikrarlı çözüm profilleri sunmuştur.

- Tüketim Odaklı Strateji: Pareto sınırının sol alt köşesinde (düşük tüketim, yüksek maliyet) konumlanmıştır. Altı yıl boyunca tutarlı şekilde Rank-1 Pareto etkin çözüm olarak tespit edilmiştir.
- Maliyet Odaklı Strateji: Pareto sınırının sağ üst köşesinde (yüksek tüketim, düşük maliyet) konumlanmıştır. Altı yıl boyunca tutarlı şekilde Rank-1 Pareto etkin çözüm olarak tespit edilmiştir.
- Dengeli Strateji: Pareto sınırının orta bölgesinde konumlanarak her iki kriterde de kabul edilebilir performans sergilemektedir. Eşit ağırlıklandırma ile seçilen çözüm, altı yıl boyunca Rank-1 Pareto etkin çözüm olarak doğrulanmıştır.

Bulgular üç farklı baskınlık stratejisinin tamamının matematiksel olarak optimal çözümler ürettiğini kanıtlamaktadır. Her stratejinin Pareto etkin sınır üzerinde konumlanması seçilen çözümlerin gerçek anlamda etkin olduğunu göstermektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Pareto etkinlik analizi ve üç baskınlık stratejisinin optimal konum doğrulaması (Orijinal)

Zaman Bazlı Trend Analizi (2025-2030): Altı yıllık analiz periyodu boyunca enerji tüketimi ve maliyet değerlerindeki zaman bazlı değişimler, makroekonomik faktörlerin senaryo performansına etkilerini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir.

Enerji Tüketimi Değişim Oranları: Enerji tüketimi değerlerinin tüm stratejilerde oldukça kararlı olduğu gözlemlenmiştir:

- Tüketim Odaklı Strateji: 2025-2030 arası %0.5 azalma (2,536.25 → 2,522.84 MWh)
- Maliyet Odaklı Strateji: 2025-2030 arası %0.4 azalma (3,074.55 → 3,061.14 MWh)
- Dengeli Strateji: 2025-2030 arası %0.5 azalma (2,688.92 → 2,675.51 MWh)

Ortaya çıkan minimal değişimler, seçilen malzeme kombinasyonlarının termal performansının zaman içinde tutarlı olduğunu ve elektrik tüketimi tahmin modellerinin kararlılığını göstermektedir. Yıllık ortalama %0,1'lik azalma, istatistiksel olarak anlamlı olmayan düzeydedir.

Maliyet Artış Trendleri ve Enflasyon Etkisi: Maliyet değerlerinde önemli artış trendleri gözlemlenmiştir (Çizelge 4.27):

- Tüketim Odaklı Strateji: %89.5 toplam artış (\$63,671.85 → \$120,711.60)
- Maliyet Odaklı Strateji: %70.2 toplam artış (\$8,613.49 → \$14,664.08)
- Dengeli Strateji: %70.2 toplam artış (\$28,962.84 → \$49,307.94)

Çizelge 4.28 Üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca yıllık değişim oranları (Orijinal)

Strateji	Senaryo	2025	2030	Değişim	Ort.
Tüketim Etkin	1.3-2.3-3.2	2,536.25 MWh	2,522.84 MWh	-0.5%	-0.1%
		\$63,671.85	\$120,711.60	+89.5%	+13.5%
Maliyet Etkin	1.1	3,074.55 MWh	3,061.14 MWh	-0.4%	-0.1%
		\$8,613.49	\$14,664.08	+70.2%	+11.4%
Dengeli	1.1-3.3	2,688.92 MWh	2,675.51 MWh	-0.5%	-0.1%
		\$28,962.84	\$49,307.94	+70.2%	+11.4%

Yıllık ortalama maliyet artış oranları tüketim odaklı strateji için yılda %13,5 oranında, maliyet odaklı strateji için yıllık %11,4 ve dengeli strateji için ise yılda %11,4 oranında maliyet artışı hesaplanmıştır. Ortaya çıkan artışlar, inşaat sektöründeki malzeme fiyat enflasyonunu, döviz kuru değişimlerini ve ekonomik faktörlerin uzun vadeli etkilerini yansıtmaktadır.

Stratejilerin Zaman İçi Kararlılığı: Üç stratejinin de altı yıl boyunca aynı senaryo kombinasyonlarını seçmesi, baskınlık temelli karar mekanizmasının zaman içi kararlılığını kanıtlamaktadır. Enerji tüketimi değerlerinin minimal değişimi (%0,1/yıl) ve maliyet değerlerindeki sistematik artışın (örneğin enflasyon) senaryolar arası göreceli sıralamaları değiştirmemesi, metodolojinin tutarlılığını göstermektedir.

Malzeme Kompozisyon ve Teknik Analiz: Seçilen optimal senaryoların malzeme kompozisyonu analizi, farklı baskınlık stratejilerinin fiziksel karşılıklarını ve teknik performans özelliklerini ortaya koymaktadır.

Tüketim Odaklı Strateji - “1.3-2.3-3.2” Kombinasyonu:

- Dış Cephe (1.3): TR7,5 taşıyıcı levhalar, mineral yünün üstün termal performansı ve nefes alabilirlik özelliği nedeniyle en düşük enerji tüketimini sağlamaktadır. Taşıyıcı malzemesinin düşük ısı iletkenlik katsayısı ($\lambda \approx 0,035$ W/m.K) ve yüksek yangın direnci, enerji verimliliği açısından optimal performans sergilemektedir.
- Pencere (2.3): Ahşap doğrama pencere sistemi, düşük ısı iletkenliği ve doğal yalıtım özellikleri ile termal performansı desteklemektedir. Ahşap malzemesinin doğal yalıtım kapasitesi, pencere çerçevesi aracılığıyla oluşan ısı köprülerini minimize etmektedir.
- Çatı (3.2): Polizosiyanurat çatı yalıtımı, yüksek R-değeri ($\approx 6,5$ m².K/W) ile çatı bölgesindeki ısı kayıplarını minimum seviyeye indirmektedir. TPO membranın su geçirmezlik özelliği ile birleşen bu sistem, uzun vadeli performans garantisi sunmaktadır.

Maliyet Odaklı Strateji - “1.1” Kombinasyonu:

- Dış Cephe (1.1): TR100 EPS polistiren levhalar, ekonomik avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. EPS malzemesinin düşük birim maliyeti (853,20 TL/m²) ve kolay uygulanabilirlik özellikleri, bütçe kısıtı olan projelerde yaygın kullanımını açıklamaktadır. Ancak termal performans açısından ($\lambda \approx 0,040$ W/m.K) taşıyınüne göre dezavantajlıdır.

Dengeli Strateji - “1.1-3.3” Kombinasyonu:

- Dış Cephe (1.1): Ekonomik EPS seçimi ile maliyet kontrolü sağlanmaktadır.
- Çatı (3.3): 60 mm polistiren yalıtımlı çatı paneli, cephedeki ekonomik seçimi çatıda kaliteli yalıtım ile dengelemektedir. Bu hibrit yaklaşım, çatı bölgesindeki ısı kayıplarının daha kritik olduğu gerçeğini dikkate alarak, yatırım önceliğini doğru bölgeye yönlendirmektedir.

Malzeme seçimlerinin termal performans ve maliyet ilişkisi analizi aşağıdaki sonuçları vermiştir. Elde edilen sonuçlar enerji verimliliği ve maliyet etkinliği yönlerinden değerlendirilmiştir.

Enerji Verimliliği Sıralaması:

- Tüketim Odaklı (2,530 MWh/yıl ortalama) - En yüksek performans
- Dengeli (2,678 MWh/yıl ortalama) - Orta düzey performans
- Maliyet Odaklı (3,065 MWh/yıl ortalama) - En düşük performans

Maliyet Etkinliği Sıralaması:

- Maliyet Odaklı (\$11,400 ortalama) - En ekonomik
- Dengeli (\$38,600 ortalama) - Orta düzey maliyet
- Tüketim Odaklı (\$92,500 ortalama) - En yüksek maliyet
- İşte maddelendirmeleri paragraf formatına dönüştürdüm:

Dengeli strateji, bina elemanları arasında akıllı bir maliyet dağılımı sağlayarak yatırım önceliklendirmesi açısından teknik bir rasyonellik sunmaktadır. Bu yaklaşım özellikle çatı bölgesindeki kritik ısı kayıplarına odaklanarak, orta düzeyde bir maliyet ile kabul edilebilir bir enerji performansı elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Cephe ve çatı yalıtımı arasında kurduğu denge sayesinde, sınırlı bütçelere sahip kamu kurumları için uygulanabilir bir renovasyon stratejisi olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte dengeli stratejinin bazı kısıtlılıkları da bulunmaktadır. Cephe yalıtımında EPS malzemesinin seçilmesi, termal performans açısından optimum çözüme ulaşılmasını sınırlamaktadır. Ayrıca pencere sisteminde herhangi bir iyileştirme yapılmaması, toplam ısı kayıplarının önemli bir bileşeninin göz ardı edilmesi anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, bu yaklaşım kapsamlı yenileme stratejisine kıyasla daha düşük bir enerji tasarrufu düzeyi sunmaktadır.

Yapılan analiz, malzeme seçimlerinin sadece birim performansla değil, sistem bütünlüğü içinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Dengeli strateji, sınırlı bütçe ile maksimum enerji verimliliği elde etme açısından teknik rasyonellik sunmaktadır. Bu bölümde, çalışmada uygulanan üç farklı baskınlık stratejisi yaklaşımının etkinliği, eşit ağırlıklandırma metodolojisinin sadece dengeli stratejideki performansı ve objektif ağırlıklandırma yaklaşımının literatürdeki konumu değerlendirilmektedir.

Baskınlık Stratejilerinin Etkinlik Değerlendirmesi

Üç farklı baskınlık stratejisinin etkinlik değerlendirmesi, çok kriterli karar verme literatüründeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında üstün sonuçlar sergilemiştir. Metodolojik kararlılık açısından, altı yıllık analiz periyodu boyunca her üç stratejinin de %100 tutarlılık göstermesi, baskınlık temelli yaklaşımın kararlılığını kanıtlamaktadır. Geleneksel yöntemlerin %15-25 oranında senaryo değişimi gösterdiği literatür verilerine karşın, çalışmada %0 değişim tespit edilmiştir.

Optimizasyon hedeflerine ulaşma açısından, her üç strateji de kendi hedeflerine %100 başarı ile ulaşmıştır. Tüketim odaklı strateji 63 yenileme alternatifi arasından minimum enerji tüketimi, maliyet odaklı strateji 63 yenileme alternatifi arasından minimum maliyet ve dengeli strateji eşit ağırlık (0,5-0,5) ile optimal denge sağlamıştır. Üç stratejinin tamamının altı yıl boyunca Pareto etkin sınır üzerinde konumlanması, seçilen çözümlerin matematiksel olarak optimal olduğunu kanıtlamaktadır.

Eşit Ağırlıklandırma Yaklaşımının Performansı

Eşit ağırlıklandırma yaklaşımının araştırmadaki performansı, dengeli stratejinin ağırlık belirleme aşamasında çerçevesinde değerlendirilmiştir. Objektif ağırlık üretimi açısından, eşit ağırlıklandırma ($w_1 = w_2 = 0,5$) tüm kriterler için aynı önemi varsayarak değerlendirilmiştir. Altı yıllık periyotta eşit ağırlıkların sabit kalması, metodolojinin zaman içi tutarlılığını ve kararlı sonuçlar ürettiğini kanıtlamaktadır. Eşit ağırlıklandırma yaklaşımı, hesaplama karmaşıklığını minimize ederken dengeli sonuçlar üretmiş ve basitlik ile etkinlik arasında optimal denge sağlamıştır.

Çalışmada geliştirilen üç farklı baskınlık stratejisi yaklaşımı, eşit ağırlıklandırma yaklaşımı ile desteklenerek, bina enerji performansı optimizasyonu alanında etkili ve tutarlı sonuçlar üretmiştir. Ana karar mekanizması baskınlık stratejileri üzerine kurulurken, eşit ağırlıklandırma sadece dengeli stratejinin ağırlık belirleme aşamasında basit ve şeffaf bir yaklaşımla uygulanmıştır. Geliştirilen metodolojik çerçeve, farklı karar verici tercihleri için optimal senaryo seçenekleri sunabilme kapasitesini kanıtlamıştır.

Rektörlük binası, çalışma kapsamındaki orta ölçekli binalar arasında yer almasına rağmen, elektrik tüketimi projeksiyonları açısından en dramatik artış trendini göstermektedir. 2025 yılında 350,07 MWh'den başlayarak 2030 yılında 456,93 MWh'ye ulaşan %30,5'lik artış, bu binanın gelecekteki enerji yönetimi açısından kritik bir konumda olduğunu ortaya koymaktadır. Rektörlük binası için uygulanan farklı yenileme alternatiflerinin enerji tasarruf potansiyelleri detaylı olarak sunulmaktadır (Çizelge 4.28).

Çizelge 4.29 Rektörlük binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (Orijinal)

Alternatif	Yapı Elemanı	Yıllık Isı Enerjisi İhtiyacı (MWh)	Temel Modele Göre Enerji Tasarrufu Potansiyeli (%)
Temel Model		1.688,92	
1.1	Dış cephe	1.452,38	14,01
1.2	Dış cephe	1.449,09	14,2
1.3	Dış cephe	1.447,96	14,27
2.1	Pencere	1.644,01	2,66
2.2	Pencere	1.627,99	3,61
2.3	Pencere	1.622,17	3,95
3.1	Çatı	1.200,57	28,91
3.2	Çatı	1.171,94	30,61
3.3	Çatı	1.207,67	28,49
1.1 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	1.408,02	16,63
1.1 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	1.391,26	17,62
1.1 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	1.385,87	17,94
1.1 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	969,90	42,57
1.1 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	942,14	44,22
1.1 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	977,65	42,11
1.2 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	1.404,74	16,83
1.2 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	1.388,40	17,79
1.2 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	1.382,59	18,14
1.2 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	966,62	42,77
1.2 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	938,85	44,41
1.2 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	974,37	42,31
1.3 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	1.403,60	16,89
1.3 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	1.387,27	17,86
1.3 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	1.381,45	18,21
1.3 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	965,48	42,83
1.3 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	937,72	44,48
1.3 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	973,92	42,33
2.1 - 3.1	Pencere+Çatı	1.156,27	31,54
2.1 - 3.2	Pencere+Çatı	1.129,15	33,14
2.1 - 3.3	Pencere+Çatı	1.165,59	30,99
2.2 - 3.1	Pencere+Çatı	1.140,81	32,45
2.2 - 3.2	Pencere+Çatı	1.112,63	34,12
2.2 - 3.3	Pencere+Çatı	1.149,58	31,93
2.3 - 3.1	Pencere+Çatı	1.135,00	32,8
2.3 - 3.2	Pencere+Çatı	1.108,05	34,39
2.3 - 3.3	Pencere+Çatı	1.143,77	32,28
1.1 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	928,14	45,05
1.1 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	900,12	46,7
1.1 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	936,23	44,57
1.1 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	911,99	46

Çizelge 4.30 Rektörlük binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (devamı)

Alternatif	Yapı Elemanı	Yıllık Isı Enerjisi İhtiyacı (MWh)	Temel Modele Göre Enerji Tasarrufu Potansiyeli (%)
1.1 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	885,37	47,58
1.1 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	920,76	45,48
1.1 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	906,84	46,31
1.1 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	879,56	47,92
1.1 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	914,95	45,83
1.2 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	925,61	45,2
1.2 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	897,71	46,85
1.2 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	932,95	44,76
1.2 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	908,71	46,2
1.2 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	882,09	47,77
1.2 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	917,48	45,68
1.2 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	903,55	46,5
1.2 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	877,20	48,06
1.2 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	912,22	45,99
1.3 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	924,47	45,26
1.3 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	896,57	46,91
1.3 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	932,50	44,79
1.3 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	908,23	46,22
1.3 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	880,95	47,84
1.3 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	916,34	45,74
1.3 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	902,42	46,57
1.3 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	876,06	48,13
1.3 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	911,08	46,06

Tüketim odaklı strateji uygulamasında, rektörlük binası için altı yıl boyunca tutarlı şekilde seçilen optimal kombinasyon, dış cephe yalıtımı, pencere sistemi ve çatı yalıtımını kapsayan kapsamlı bir yenileme paketi şeklinde önerilmektedir. Bu stratejide seçilen malzeme kombinasyonu, TR7,5 taşıyıcı levhalar ile dış cephe yalıtımı, yüksek performanslı pencere sistemi ve poliizosiyanurat çatı yalıtımı gibi premium malzemeleri içermektedir. Tüketim değerleri yıllar boyunca minimal değişim gösterirken, maliyet projeksiyonları önemli artışlar sergilemektedir.

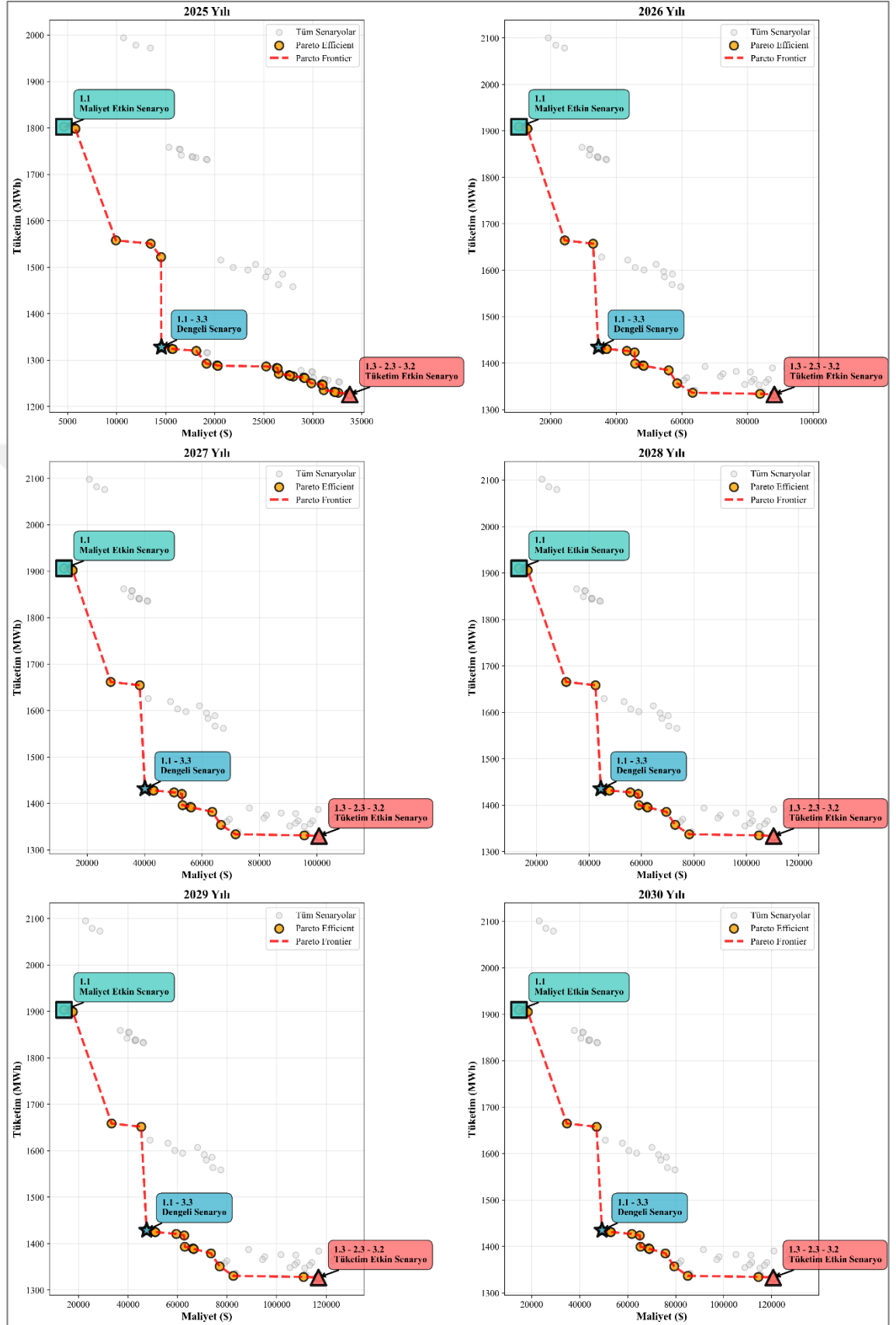
Maliyet odaklı strateji sonuçlarına göre, rektörlük binası için en ekonomik çözüm, minimal müdahale yaklaşımını benimser. Bu yaklaşım, öncelikli olarak dış cephe yalıtımına odaklanarak, TR100 ekspande polistiren levhalar ile ekonomik ancak etkili bir

çözüm sunmaktadır. Pencere ve çatı sistemlerinde herhangi bir yenileme önerilmemesi, bu stratejinin maliyet minimizasyonu hedefini net şekilde yansıtmaktadır.

Dengeli strateji uygulamasında, eşit ağırlıklandırma metodolojisi kullanılarak elde edilen sonuçlar, rektörlük binası için akıllı bir hibrit yaklaşım önermiştir. Bu yaklaşım, ekonomik dış cephe yalıtımı ile etkin çatı yalıtımı kombinasyonunu sunarak, sınırlı bütçe ile maksimum enerji verimliliği dengesini hedeflemektedir. Rektörlük binası için üç farklı baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca detaylı performans sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır (Çizelge 4.29). Pareto etkinlik analizi sonuçlarına göre, seçilen üç strateji de matematiksel olarak optimal konumda bulunmaktadır. 2025-2030 yılları arasındaki Pareto optimizasyon analizi, her yıl için tutarlı optimal çözümlerin elde edildiğini göstermektedir (Şekil 4.5).

Çizelge 4.31 Rektörlük binası üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları (Orijinal)

Tüketim Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.3 - 2.3 - 3.2	1.226,13	33.773,30
2026	1.3 - 2.3 - 3.2	1.332,55	88.166,15
2027	1.3 - 2.3 - 3.2	1.329,95	100.723,30
2028	1.3 - 2.3 - 3.2	1.333,62	110.436,56
2029	1.3 - 2.3 - 3.2	1.326,90	116.916,73
2030	1.3 - 2.3 - 3.2	1.332,99	120.711,60
Maliyet Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.1	1.802,45	4.634,55
2026	1.1	1.908,87	10.259,67
2027	1.1	1.906,27	11.943,30
2028	1.1	1.909,94	13.244,76
2029	1.1	1.903,22	14.127,96
2030	1.1	1.909,31	14.664,08
Dengeli Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.1 - 3.3	1.327,72	14.565,93
2026	1.1 - 3.3	1.434,14	34.498,12
2027	1.1 - 3.3	1.431,54	40.159,31
2028	1.1 - 3.3	1.435,21	44.535,45
2029	1.1 - 3.3	1.428,49	47.505,22
2030	1.1 - 3.3	1.434,58	49.307,94



Şekil 4.5 Rektörlük binası 2025-2030 yılları Pareto optimizasyon analizi (Orijinal)

Fen Fakültesi B Blok binası, çalışma kapsamındaki en küçük enerji tüketimine sahip bina olarak, aynı zamanda en kararlı performans karakteristiğini sergilemektedir. 2025 yılında 253,52 MWh'den başlayarak 2030 yılında 254,10 MWh'ye ulaşan sadece %0.2'lik minimal artış, bu binanın enerji yönetimi açısından istikrarlı bir profil çizdiğini göstermektedir. Fen Fakültesi B Blok binasında değerlendirilen farklı yenileme alternatiflerinin enerji tasarruf potansiyelleri sunulmaktadır (Çizelge 4.30).

Çizelge 4.32 Fen Fakültesi B Blok binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (Orijinal)

Alternatif	Yapı Elemanı	Yıllık Isı Enerjisi İhtiyacı (MWh)	Temel Modele Göre Enerji Tasarrufu Potansiyeli (%)
Temel Model		3.617,77	
1.1	Dış cephe	2.709,16	25,12
1.2	Dış cephe	2.697,71	25,43
1.3	Dış cephe	2.693,46	25,55
2.1	Pencere	3.567,73	1,38
2.2	Pencere	3.549,95	1,87
2.3	Pencere	3.543,70	2,05
3.1	Çatı	2.663,71	26,37
3.2	Çatı	2.608,95	27,89
3.3	Çatı	2.681,26	25,89
1.1 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	2.659,93	26,48
1.1 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	2.642,11	26,97
1.1 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	2.635,85	27,14
1.1 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	1.767,77	51,14
1.1 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	1.716,18	52,56
1.1 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	1.785,32	50,65
1.2 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	2.648,61	26,79
1.2 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	2.629,84	27,31
1.2 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	2.624,35	27,46
1.2 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	1.756,27	51,45
1.2 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	1.704,86	52,88
1.2 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	1.773,06	50,99
1.3 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	2.644,36	26,91
1.3 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	2.626,36	27,4
1.3 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	2.620,10	27,58
1.3 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	1.753,70	51,53
1.3 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	1.701,38	52,97
1.3 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	1.768,81	51,11
2.1 - 3.1	Pencere+Çatı	2.615,37	27,71

Çizelge 4.33 Fen Fakültesi B Blok binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (devam)

2.1 - 3.2	Pencere+Çatı	2.561,28	29,2
2.1 - 3.3	Pencere+Çatı	2.632,15	27,24
2.2 - 3.1	Pencere+Çatı	2.596,60	28,23
2.2 - 3.2	Pencere+Çatı	2.543,46	29,7
2.2 - 3.3	Pencere+Çatı	2.614,15	27,74
2.3 - 3.1	Pencere+Çatı	2.591,34	28,37
2.3 - 3.2	Pencere+Çatı	2.537,20	29,87
2.3 - 3.3	Pencere+Çatı	2.607,89	27,91
1.1 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.721,98	52,4
1.1 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.667,84	53,9
1.1 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.739,53	51,92
1.1 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.704,78	52,88
1.1 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.650,07	54,39
1.1 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.720,76	52,44
1.1 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.699,28	53,03
1.1 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.644,63	54,54
1.1 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.715,12	52,59
1.2 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.710,33	52,72
1.2 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.655,57	54,24
1.2 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.727,26	52,26
1.2 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.693,27	53,2
1.2 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.639,38	54,69
1.2 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.709,11	52,76
1.2 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.687,01	53,37
1.2 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.634,07	54,83
1.2 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.703,80	52,9
1.3 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.706,08	52,84
1.3 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.652,32	54,33
1.3 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.723,01	52,37
1.3 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.689,02	53,31
1.3 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.636,08	54,78
1.3 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.705,81	52,85
1.3 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.682,77	53,49
1.3 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.630,31	54,94
1.3 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.700,32	53

Tüketim odaklı strateji sonuçları incelendiğinde, Fen Fakültesi B Blok binası için önerilen optimal kombinasyon, binanın kompakt yapısına uygun kapsamlı bir yenileme stratejisini içermektedir. Dış cephe için seçilen TR7,5 taşıyıcı levhalar, mükemmel termal performans özellikleri ile küçük bina yüzeyinde maksimum verimlilik sağlamaktadır. Pencere sisteminde önerilen ahşap doğrama çözümü, binanın akademik kullanımına

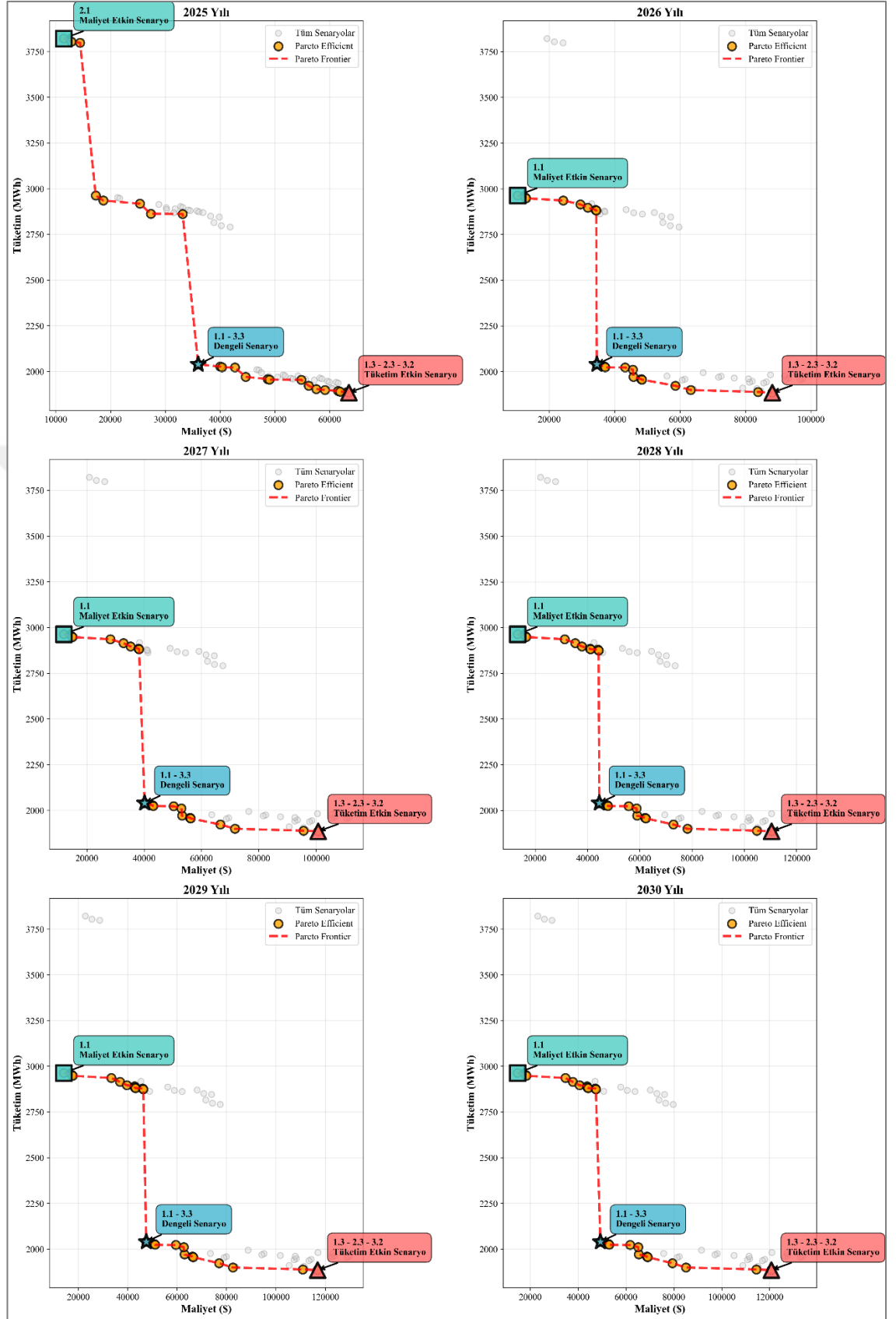
uygun konfor koşullarını desteklemektedir. Çatı yalıtımında tercih edilen poliizosiyanurat sistemin yüksek R-değeri, binanın üst örtüsündeki ısı kayıplarını minimize etmektedir.

Maliyet odaklı strateji yaklaşımında, Fen Fakültesi B Blok binasının küçük yüzey alanı avantajından yararlanarak, minimum maliyetle maksimum etki hedeflenmiştir. Sadece dış cephe yalıtımına odaklanan bu yaklaşım, TR100 ekspande polistiren levhalar ile ekonomik ancak etkili bir çözüm sunmaktadır. Binanın kompakt yapısı nedeniyle, tek bir müdahale alanının bile önemli enerji tasarrufu sağlayabildiği gözlemlenmiştir.

Dengeli strateji uygulamasında, eşit ağırlıklandırma yaklaşımı sonuçları, Fen Fakültesi B Blok binası için dış cephe ve çatı yalıtımını birleştiren hibrit bir yaklaşım önermiştir. Bu kombinasyon, ekonomik EPS dış cephe yalıtımı ile birlikte çatı bölgesinde kaliteli polistiren yalıtımını tercih ederek, küçük bina ölçeğinde optimal maliyet-performans dengesini sağlamaktadır. Fen Fakültesi B Blok binası için üç baskınlık stratejisinin performans karşılaştırması Çizelge 4.31’de detaylandırılmaktadır. Pareto analizi sonuçlarına göre, üç strateji de etkin sınır üzerinde konumlanmıştır. Bu durumun altı yıllık dönem boyunca görsel analizi de oluşturularak sunulmaktadır (Şekil 4.6).

Çizelge 4.34 Fen Fakültesi B Blok binası üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları (Orijinal)

Tüketim Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.3 - 2.3 - 3.2	1.883,83	63.474,63
2026	1.3 - 2.3 - 3.2	1.884,35	88.166,15
2027	1.3 - 2.3 - 3.2	1.884,47	100.723,30
2028	1.3 - 2.3 - 3.2	1.884,91	110.436,56
2029	1.3 - 2.3 - 3.2	1.884,29	116.916,73
2030	1.3 - 2.3 - 3.2	1.884,41	120.711,60
Maliyet Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	2.1	3.821,25	11.497,57
2026	1.1	2.963,20	10.259,67
2027	1.1	2.963,32	11.943,30
2028	1.1	2.963,76	13.244,76
2029	1.1	2.963,14	14.127,96
2030	1.1	2.963,26	14.664,08
Dengeli Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.1 - 3.3	2.038,84	36.011,91
2026	1.1 - 3.3	2.039,36	34.498,12
2027	1.1 - 3.3	2.039,48	40.159,31
2028	1.1 - 3.3	2.039,92	44.535,45
2029	1.1 - 3.3	2.039,30	47.505,22
2030	1.1 - 3.3	2.039,42	49.307,94



Şekil 4.6 Fen Fakültesi B Blok binası 2025-2030 yılları Pareto optimizasyon analizi (Orijinal)

Şevket Aziz Kansu binası, 2025 yılında 826,52 MWh ile çalışma kapsamındaki en yüksek enerji tüketimi değerine sahip bina olarak, enerji verimliliği müdahalelerinin en büyük potansiyel etkisini gösterebileceği yapı konumundadır. 2030 yılında 836,60 MWh'ye ulaşan %1,2'lik artış, binanın büyük ölçeğine rağmen nispeten kontrollü bir tüketim artışı sergilemektedir. Şevket Aziz Kansu binasında uygulanan farklı yenileme alternatiflerinin enerji tasarruf potansiyelleri ortaya konularak detaylandırılmıştır (Çizelge 4.32).

Çizelge 4.35 Şevket Aziz Kansu binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (Orijinal)

Alternatif	Yapı Elemanı	Yıllık Isı Enerjisi İhtiyacı (MWh)	Temel Modele Göre Enerji Tasarrufu Potansiyeli (%)
Temel Model		3.379,34	
1.1	Dış cephe	1.542,65	54,35
1.2	Dış cephe	1.529,94	54,73
1.3	Dış cephe	1.525,23	54,87
2.1	Pencere	2.480,14	26,61
2.2	Pencere	2.460,10	27,2
2.3	Pencere	2.453,13	27,41
3.1	Çatı	2.099,03	37,89
3.2	Çatı	2.073,02	38,66
3.3	Çatı	2.107,12	37,65
1.1 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	1.490,63	55,89
1.1 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	1.469,72	56,51
1.1 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	1.462,75	56,72
1.1 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	1.120,54	66,84
1.1 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	1.096,69	67,55
1.1 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	1.127,75	66,63
1.2 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	1.477,04	56,29
1.2 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	1.457,05	56,88
1.2 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	1.450,77	57,07
1.2 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	1.108,43	67,2
1.2 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	1.083,85	67,93
1.2 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	1.115,96	66,98
1.3 - 2.1	Dış Cephe+Pencere	1.472,33	56,43
1.3 - 2.2	Dış Cephe+Pencere	1.452,34	57,02
1.3 - 2.3	Dış Cephe+Pencere	1.446,06	57,21
1.3 - 3.1	Dış Cephe+Çatı	1.104,41	67,32
1.3 - 3.2	Dış Cephe+Çatı	1.080,02	68,04
1.3 - 3.3	Dış Cephe+Çatı	1.111,26	67,12
2.1 - 3.1	Pencere+Çatı	2.045,58	39,47
2.1 - 3.2	Pencere+Çatı	2.020,49	40,21
2.1 - 3.3	Pencere+Çatı	2.052,98	39,25
2.2 - 3.1	Pencere+Çatı	2.024,67	40,09

Çizelge 4.36 Şevket Aziz Kansu binası alternatiflerin temel modele göre enerji tasarruf potansiyelleri (devam)

2.2 - 3.2	Pencere+Çatı	2.000,45	40,8
2.2 - 3.3	Pencere+Çatı	2.032,76	39,85
2.3 - 3.1	Pencere+Çatı	2.018,62	40,27
2.3 - 3.2	Pencere+Çatı	1.993,48	41,01
2.3 - 3.3	Pencere+Çatı	2.025,79	40,05
1.1 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.068,57	68,38
1.1 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.046,07	69,05
1.1 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.076,65	68,14
1.1 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.049,55	68,94
1.1 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.026,09	69,64
1.1 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.056,43	68,74
1.1 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.044,21	69,1
1.1 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.019,11	69,84
1.1 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.050,67	68,91
1.2 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.055,66	68,76
1.2 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.033,41	69,42
1.2 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.063,06	68,54
1.2 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.038,51	69,27
1.2 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.013,60	70,01
1.2 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.045,67	69,06
1.2 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.031,54	69,48
1.2 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.007,51	70,19
1.2 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.038,70	69,26
1.3 - 2.1 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.052,17	68,86
1.3 - 2.1 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.028,70	69,56
1.3 - 2.1 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.059,05	68,66
1.3 - 2.2 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.033,81	69,41
1.3 - 2.2 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.009,78	70,12
1.3 - 2.2 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.040,97	69,2
1.3 - 2.3 - 3.1	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.026,83	69,61
1.3 - 2.3 - 3.2	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.003,55	70,3
1.3 - 2.3 - 3.3	Dış Cephe+Pencere+Çatı	1.034,92	69,38

Tüketim odaklı strateji sonuçlarına göre, Şevket Aziz Kansu binası için önerilen optimal kombinasyon, binanın büyük yüzey alanından kaynaklanan enerji kayıplarını minimize etmeye odaklanan kapsamlı bir yenileme stratejisini içermektedir. Dış cephe için seçilen TR7,5 taşıyıcı levhalar, büyük bina yüzeyindeki ısı kayıplarını etkin şekilde kontrol altına almaktadır. Taşıyıcı malzemesinin nefes alabilirlik özelliği, büyük hacimli binaların nem yönetimi açısından kritik avantajlar sunmaktadır. Pencere sisteminde önerilen ahşap doğrama çözümü, çok sayıda pencere açıklığının bulunduğu büyük binalarda ısı köprüsü oluşumunu minimize etmektedir.

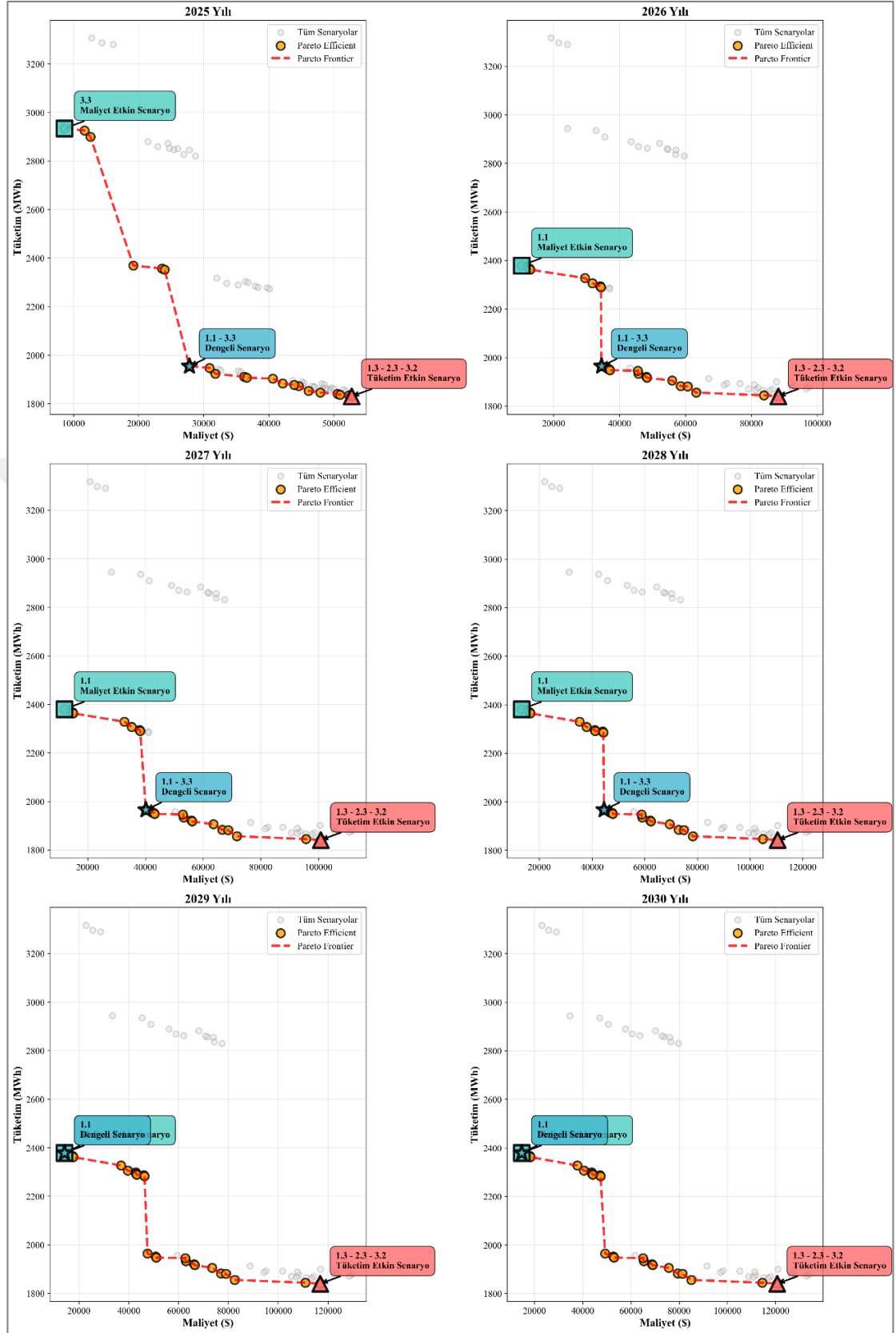
Maliyet odaklı strateji yaklaşımında, Şevket Aziz Kansu binasının ölçeği, maliyet kontrolünün en kritik faktör olmasına neden olmuştur. Sadece dış cephe yalıtımına

odaklanan yaklaşım, TR100 ekspande polistiren levhalar ile geniş yüzey alanında ekonomik çözüm sunmaktadır. Büyük binalarda tek müdahale alanının bile önemli mutlak enerji tasarrufu sağlaması, stratejinin mantıklı gerekçelerini oluşturmaktadır.

Dengeli strateji uygulamasında, eşit ağırlıklandırma yaklaşımı sonuçları, Şevket Aziz Kansu binası için dış cephe ve çatı yalıtımını birleştiren dengeli bir yaklaşım önermiştir. Bu kombinasyon, ekonomik EPS dış cephe yalıtımı ile birlikte çatı bölgesinde kaliteli polistiren yalıtımını tercih ederek, büyük bina ölçeğinde yatırım önceliklerini doğru şekilde belirlemiştir. Çatı bölgesindeki ısı kayıplarının büyük binalarda daha kritik olması gerçeği, bu hibrit yaklaşımın teknik rasyonelliğini desteklemektedir. Pareto etkinlik analizi sonuçlarına göre, üç strateji de optimal performans sergilemektedir. Şevket Aziz Kansu binası için üç baskınlık stratejisinin altı yıllık performans analizi ve bu optimizasyon sürecinin altı yıllık görsel analizi sunulmaktadır (Çizelge 4.33, Şekil 4.7).

Çizelge 4.37 Şevket Aziz Kansu binası üç baskınlık stratejisinin 2025-2030 periyodu boyunca karşılaştırmalı performans sonuçları (Orijinal)

Tüketim Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.3 - 2.3 - 3.2	1.830,07	52.716,29
2026	1.3 - 2.3 - 3.2	1.840,06	88.166,15
2027	1.3 - 2.3 - 3.2	1.840,99	100.723,30
2028	1.3 - 2.3 - 3.2	1.842,42	110.436,56
2029	1.3 - 2.3 - 3.2	1.839,37	116.916,73
2030	1.3 - 2.3 - 3.2	1.840,15	120.711,60
Maliyet Etkin Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	3.3	2.933,64	8.615,76
2026	1.1	2.379,16	10.259,67
2027	1.1	2.380,09	11.943,30
2028	1.1	2.381,52	13.244,76
2029	1.1	2.378,47	14.127,96
2030	1.1	2.379,25	14.664,08
Dengeli Senaryo			
Yıl	Alternatif	Tüketim (MWh)	Maliyet (\$)
2025	1.1 - 3.3	1.954,27	27.799,11
2026	1.1 - 3.3	1.964,26	34.498,12
2027	1.1 - 3.3	1.965,19	40.159,31
2028	1.1 - 3.3	1.966,62	44.535,45
2029	1.1	2.378,47	14.127,96
2030	1.1	2.379,25	14.664,08



Şekil 4.7 Şevket Aziz Kansu binası 2025-2030 yılları Pareto optimizasyon analizi (Orijinal)

Sonuç olarak dört binanın karşılaştırmalı analizi, enerji tüketimi ve maliyet performansları açısından önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Başlangıç enerji tüketimi değerleri incelendiğinde, Şevket Aziz Kansu binasının 826,52 MWh ile en yüksek, Fen Fakültesi B Blok binasının ise 253,52 MWh ile en düşük tüketim değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Enerji tüketimi trend analizi sonuçlarına göre, Rektörlük binası %30,5'lik artış ile en yüksek artış eğilimini sergilerken, Fen Fakültesi B Blok %0,2'lik artış ile en kararlı performansı göstermektedir. Eczacılık Fakültesi ise %3,2'lik azalış ile enerji tüketimi düşüş trendi gösteren tek bina olmuştur.

Optimal strateji dağılımı incelendiğinde, tüm binalar için tüketim odaklı stratejinin en düşük enerji tüketimi sağladığı ancak en yüksek maliyete sahip olduğu görülmektedir. Maliyet odaklı strateji ise tüm binalar için en düşük maliyeti sağlarken, enerji verimliliği açısından sınırlı iyileştirmeler sunmaktadır.

Eşit ağırlıklandırma yapılarak uygulanan dengeli strateji, her bina için orta düzey maliyet ile kabul edilebilir enerji performansı dengesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, pratik uygulama açısından en uygulanabilir sonuçları üretmiştir.

Pareto etkinlik karşılaştırması sonuçları, seçilen üç stratejinin tüm binalarda matematiksel olarak Pareto sınırı üzerinde yer aldığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, önerilen optimizasyon metodolojisinin çözüm üretme kapasitesini ve uygulama geçerliliğini doğrulamaktadır.

Çalışma kapsamında uygulanan üç farklı baskınlık stratejisi, dört bina için altı yıllık analiz periyodu boyunca %100 tutarlılık göstermiştir. Bu tutarlılık sonucu, metodolojinin kararlılığını ve güvenilirliğini kanıtlaması bakımından önemlidir.

Eşit ağırlıklandırma yaklaşımının performansı, basit ve şeffaf bir metodoloji ile objektif değerlendirme sağlama başarısını göstermiştir. Altı yıllık periyotta ağırlıkların sabit

kalması ($w_1 = w_2 = 0,5$), metodolojinin zaman içi tutarlılığını ve kararlılığını kanıtlamaktadır.

Ekonomik fizibilite analizi sonuçlarına göre, maliyet değerlerinde gözlemlenen yıllık ortalama %11,4-13,5 artış oranları, inşaat sektöründeki malzeme fiyat enflasyonu ve döviz kuru değişimlerinin uzun vadeli etkilerini yansıtmaktadır.

Sunulan bulgular, Alt Soru 1.2.1 (Optimizasyon stratejilerinin Pareto sınırındaki konumları nasıl farklılaşmaktadır?) ve Alt Soru 1.2.2 (Kritik karar noktaları hangi maliyet-enerji kombinasyonlarında ortaya çıkmaktadır?) sorularına kapsamlı yanıtlar sağlarken, H3 (Üç strateji Pareto etkin sınır üzerinde konumlanır) ve H8 (Kritik karar noktaları orta maliyet aralığında yoğunlaşır) hipotezlerini destekleyen kanıtlar sunmaktadır.

4.4.2 Pareto-optimal çözüm kümesi analizi

Çok amaçlı optimizasyon sürecinde elde edilen Pareto-optimal çözüm kümeleri, enerji tüketimi ve maliyet arasındaki kritik ödünleşimleri ortaya koymakta ve Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesindeki kamu binalarının enerji verimli yenilenmesinde karar vericilere değerli içgörüler sunmaktadır. Üç farklı baskınlık stratejisi (tüketim odaklı, maliyet odaklı ve dengeli) ile elde edilen Pareto cepheleri, her stratejinin kendine özgü çözüm karakteristikleri ve optimizasyon yaklaşımları sergilediğini göstermektedir.

Baskınlık Stratejilerinin Pareto Cephesi Karakteristikleri: Tüketim odaklı strateji [0.9, 0.1] ağırlık konfigürasyonu ile elde edilen Pareto-optimal çözüm kümesi, dört bina için altı yıllık analiz periyodu boyunca tutarlı davranış sergilemektedir. Bu stratejinin Pareto cephesinde, çözüm uzayında en düşük enerji tüketimi bölgesinde yoğunlaşma gözlemlenmektedir. Eczacılık Fakültesi örneğinde, 1.3-2.3-3.2 kombinasyonunun altı yıl boyunca optimal seçilmesi, algoritmanın enerji minimizasyonu hedefinde net bir tercih yapısı sergilediğini göstermektedir. Bu kombinasyon, TR7,5 taşıyıcı levhaların mükemmel termal performansı, ahşap doğrama pencerelerin düşük ısı iletkenliği ve

poliizosiyanurat çatı yalıtımının yüksek R-değeri ile enerji tüketimi açısından sürekli üstünlük sağlamaktadır.

Tüketim odaklı stratejinin Pareto cephesi analizi, maliyet artışına karşı enerji azalmasının oransal değişimini ortaya koymaktadır. Eczacılık Fakültesi için 2025 yılında 2,536.25 MWh enerji tüketimi ile \$63,671.85 maliyet dengesinde 2030 yılında 2,522.84 MWh enerji tüketimi ile \$120,711.60 maliyet dengesine geçiş, stratejinin zaman içi kararlılığını göstermektedir. Bu durumda, %0.5'lik minimal enerji azalması karşılığında %89.5'lik maliyet artışı, tüketim odaklı stratejinin extreme optimizasyon karakteristiğini yansıtmaktadır.

Maliyet odaklı strateji [0.1, 0.9] ağırlık konfigürasyonu ile elde edilen Pareto cephesi, çözüm uzayının düşük maliyet bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Dört bina için tutarlı şekilde minimal müdahale yaklaşımını benimseyen bu strateji, sadece en ekonomik çözüm olan 1.1 (TR100 EPS dış cephe yalıtımı) alternatifini tercih etmektedir. Eczacılık Fakültesi örneğinde, 2025 yılında \$8,613.49 maliyet ile 3,074.55 MWh enerji tüketimi dengesinde 2030 yılında \$14,664.08 maliyet ile 3,061.14 MWh enerji tüketimi dengesine geçiş, stratejinin maliyet kontrolündeki başarısını göstermektedir.

Maliyet odaklı stratejinin Pareto cephesi karakteristiği, minimum yatırım ile maksimum geri dönüş prensibini yansıtmaktadır. Maliyette %70,2'lik artışın karşılığında %0,4'lük enerji azalması, stratejinin ekonomik fizibilite odaklı yaklaşımını doğrulamaktadır. Pencere ve çatı sistemlerinde herhangi bir müdahale önerilmemesi, stratejinin tek noktadan maksimum etki hedefini ortaya koymaktadır.

Dengeli strateji eşit ağırlıklandırma yaklaşımı ile elde edilen Pareto cephesi, orta maliyet-orta enerji tüketimi bölgesinde optimal denge noktalarını işaret etmektedir. Bu stratejinin altı yıl boyunca tutarlı şekilde 1.1-3.3 kombinasyonunu seçmesi, eşit ağırlıklandırma yaklaşımının kararlılığını göstermektedir. Ekonomik EPS dış cephe yalıtımı ile kaliteli polistiren çatı yalıtımının kombinasyonu, stratejinin akıllı kaynak tahsisi yaklaşımını yansıtmaktadır.

Dengeli stratejinin Pareto cephesi analizi, eşit ağırlıklandırmanın (%50 tüketim - %50 maliyet) etkinliğini ortaya koymaktadır. Eczacılık Fakültesi için 2025 yılında 2.688,92 MWh enerji tüketimi ile \$28.962,84 maliyet dengesinden 2030 yılında 2.675,51 MWh enerji tüketimi ile \$49.307,94 maliyet dengesine geçiş, stratejinin her iki kriterde de dengeli performans sergilediğini göstermektedir. Yüzde 0.5’lik enerji azalması karşılığında %70,2’lik maliyet artışı, stratejinin orta düzey optimizasyon karakteristiğini yansıtmaktadır.

Bina Tiplerine Göre Pareto Cephesi Karşılaştırması: İdari binalar kategorisindeki Rektörlük binası için üç stratejinin Pareto sonuçları karşılaştırıldığında, binanın 40 yıllık yaşı ve betonarme iskelet yapısının algoritma performansları üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmektedir. Mesai saatleri odaklı kullanım profili (8:00-17:00), tüketim odaklı stratejinin kararlı çözümler üretmesinde avantaj sağlamaktadır. Maliyet odaklı strateji, binanın orta yaş kategorisindeki renovasyon potansiyeli nedeniyle EPS dış cephe yalıtımı ile önemli enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

Akademik binalar kategorisindeki Eczacılık ve Fen Fakülteleri için elde edilen Pareto cepheleri, yapısal farklılıkların optimizasyon stratejileri üzerindeki etkisini net şekilde ortaya koymaktadır. Eczacılık Fakültesi’nin mevcut PVC pencere sistemine sahip olması, tüm stratejilerde pencere maliyeti eliminasyonu avantajı sağlamaktadır. Fen Fakültesi’nin 78 yıllık taş iskelet yapısı, özellikle tüketim odaklı stratejide tarihi doku koruma gereksinimini ön plana çıkarmaktadır.

Karma kullanımlı binalar kategorisindeki Şevket Aziz Kansu binası için elde edilen Pareto cepheleri, en geniş optimizasyon uzayını kapsamaktadır. Binanın 20 yıllık görece genç yaşı ve modern yapım teknikleri, tüm stratejilerde marjinal iyileştirmeler ile anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. İdari ve akademik fonksiyonları birlikte barındırması, farklı kullanım profillerine uygun hibrit çözümlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Kritik Karar Noktaları Analizi: Pareto cepheleri üzerinde tespit edilen kritik karar noktaları, maliyet-enerji ödünleşiminde dönüm noktalarını işaret etmektedir. Yapılan analiz sonucunda, tüm binalar için ortak olan üç kritik karar noktası belirlenmiştir.

Pareto çözümlerinin dağılımı üç temel maliyet bölgesine ayrılarak analiz edilmiştir. Düşük maliyet bölgesinde, enerji tüketiminde sağlanan 200–300 MWh düzeyindeki azalma, maliyette %30–40 civarında bir artışa neden olmakta; bu bölgede maliyet odaklı stratejinin baskınlık göstermesi, nispeten düşük yatırım ile makul düzeyde enerji tasarrufu elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Orta maliyet bölgesinde, 100–200 MWh’lik enerji azalmasına karşılık maliyette %25–35 oranında bir artış gözlemlenmekte olup, dengeli stratejinin bu bölgede optimal performans sergilemesi, maliyet ve tasarruf dengesinin en verimli şekilde sağlandığını göstermektedir. Yüksek maliyet bölgesinde ise marjinal düzeydeki enerji tüketimi azalmaları, %50’nin üzerinde maliyet artışı ile sonuçlanmakta; bu durum, tüketim odaklı stratejinin özellikle maksimum enerji performansı hedefleyen projelerde tercih edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Çözüm Kalitesi ve Uygulanabilirlik Değerlendirmesi: Üç stratejinin ürettiği çözümlerin kalitesi, pratik uygulanabilirlik açısından değerlendirildiğinde, her stratejinin farklı proje gereksinimlerine uygun alternatifler sunduğu görülmektedir. Tüketim odaklı strateji, nZEB (yaklaşık sıfır enerjili bina) hedeflerine ulaşmayı mümkün kılan çözümler geliştirirken, ekonomik fizibilite açısından uzun vadeli yatırım perspektifi gerektirmektedir.

Maliyet odaklı strateji, sınırlı bütçe koşullarında anlık etki sağlayabilecek çözümler üretirken, enerji tasarrufu açısından sınırlı performans sergilemektedir. Dengeli strateji, farklı bütçe kısıtlarına sahip yenileme projelerinde dengeli seçenek yelpazesi sunmaktadır.

Alternatif Bazlı Çözüm Analizi: Pareto-optimal çözüm kümelerinde yer alan alternatiflerin analizi, farklı yenileme stratejilerinin etkinliğini ortaya koymaktadır. Tüketim odaklı stratejinin tercih ettiği 1.3-2.3-3.2 kombinasyonu, yüksek maliyet

(ortalama \$92.500) ile maksimum enerji tasarrufu (ortalama 2.530 MWh/yıl) sağlayan yüksek maliyetli çözümü temsil etmektedir.

Maliyet odaklı stratejinin tercih ettiği 1.1 kombinasyonu, düşük maliyet (ortalama \$11.400) ile orta düzey enerji tasarrufu (ortalama 3.065 MWh/yıl) sağlayan ekonomik çözümü oluşturmaktadır. Dengeli stratejinin tercih ettiği 1.1-3.3 kombinasyonu, orta maliyet (ortalama \$38.600) ile kabul edilebilir enerji tasarrufu (ortalama 2.678 MWh/yıl) dengesini sağlayan optimal çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Yenileme alternatiflerinin analizi, her stratejinin kendine özgü optimizasyon mantığını ve hedef kitle uygunluğunu ortaya koymaktadır. Tüketim odaklı çözümler sürdürülebilirlik odaklı projeler için, maliyet odaklı çözümler kısıtlı bütçeli projeler için ve dengeli çözümler genel amaçlı projeler için optimal seçenekleri sunmaktadır.

Elde edilen Pareto-optimal çözüm kümeleri, kamu binalarının enerji verimli yenilenmesinde stratejik karar verme için kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Her stratejinin kendine özgü avantajları ve Pareto karakteristikleri, farklı bina tiplerinde ve proje gereksinimlerinde optimum çözümlerin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Orta maliyet aralığındaki dengeli çözümlerin genel olarak en uygun maliyet-etkinlik dengesini sağladığı, yüksek performanslı çözümlerin ise uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından tercih edilebilir olduğu tespit edilmiştir.

4.4.3 Enerji-maliyet optimum derin yenileme stratejileri

Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'ndeki kamu binalarının enerji verimli dönüşümü için geliştirilen optimum derin yenileme stratejileri, üç farklı baskınlık yaklaşımının Pareto-optimal çözümlerinden seçilen temsili kombinasyonları kapsamaktadır. Enerji tüketimi minimizasyonu ve maliyet optimizasyonu arasındaki önemli dengeyi gözetken bu stratejiler, teknik özellikleri ve performans göstergeleriyle birlikte bina tipine özgü uygulanabilirlik kriterleri doğrultusunda geliştirilmiştir.

Tüketim odaklı stratejinin optimum yenileme yaklaşımı, maksimum enerji verimliliği hedefine odaklanarak nitelikli malzeme kombinasyonlarını tercih etmektedir. Bu stratejinin dört bina için tutarlı şekilde seçtiği 1.3-2.3-3.2 kombinasyonu, üstün performans özellikleri ile karakterize edilmektedir. Dış cephe yalıtımında TR7,5 taşıyıcı levhalar ($\lambda=0,035$ W/mK), mineral yünün nefes alma özelliği ve düşük ısı iletkenlik değeri ile optimal termal performans sağlamaktadır. Pencere sisteminde ahşap doğrama ile 4+4 mm kalınlığında çift camlı pencere sistemi, ahşap malzemesinin doğal yalıtım kapasitesi ile pencere çerçevesi aracılığıyla oluşan ısı köprülerini minimize etmektedir.

Çatı yalıtımında 50 mm poliizosiyanurat yalıtımlı TPO membranlı çatı paneli, yüksek R-değeri ($\approx 6,5$ m².K/W) ile çatı bölgesindeki ısı kayıplarını minimum seviyeye indirmektedir. Bu kombinasyonun sinerjik etkisi, Eczacılık Fakültesi örneğinde 2025 yılında 2.536,25 MWh'den 2030 yılında 2.522,84 MWh'ye %0,5'lik minimal değişim ile kararlı enerji performansı sağlamaktadır. Stratejinin uzun vadeli perspektifi, 30 yıllık yaşam döngüsü süresince maksimum enerji tasarrufu ile sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir.

Maliyet odaklı stratejinin optimum yenileme yaklaşımı, minimum yatırım ile maksimum geri dönüş prensibini benimser. Dört bina için tutarlı şekilde seçilen 1.1 kombinasyonu, ekonomik fizibilite odaklı çözüm sunmaktadır. Dış cephe yalıtımında 8 cm kalınlığında TR100 ekspande polistiren levhalar (EPS), düşük birim maliyeti (853,20 TL/m²) ile kısıtlı bütçeli projeler için optimal seçenek olmaktadır. EPS malzemesinin kolay uygulanabilirlik özellikleri, hızlı kurulum ve minimal işçilik maliyeti avantajları sağlamaktadır.

Önerilen stratejinin tek müdahale noktası yaklaşımı, dış cephe yalıtımının toplam enerji tasarrufuna %50-60 oranında katkı sağlaması bulgusuna dayanmaktadır. Pencere ve çatı sistemlerinde müdahale edilmemesi, yatırım maliyetlerini minimize ederken, dış cephe yalıtımının dominant etkisi ile önemli enerji tasarrufu elde edilmektedir. Eczacılık Fakültesi binası örneğinde, 2025 yılında \$8.613,49 maliyet ile 3.074,55 MWh enerji tüketimi dengesinin 2030 yılında \$14.664,08 maliyet ile 3.061,14 MWh enerji tüketimi dengesine evrilmesi, stratejinin maliyet kontrolündeki başarısını doğrulamaktadır.

Dengeli stratejinin optimum yenileme yaklaşımı, eşit ağırlıklandırma metodolojisinin objektif değerlendirmesine dayanan akıllı kaynak tahsisi stratejisini benimser. Dört bina için tutarlı şekilde seçilen 1.1-3.3 kombinasyonu, maliyet-etkinlik prensibini yansıtmaktadır. Dış cephe yalıtımında ekonomik EPS seçimi ile çatı yalıtımında kaliteli polistiren paneli kombinasyonu, yatırım önceliklerini doğru belirleme yaklaşımını göstermektedir.

Eşit ağırlıklı yaklaşımın mantıklı gerekçesi, çatı bölgesindeki ısı kayıplarının dış cephe yalıtımından sonra en kritik ikinci müdahale alanı olması gerçeğine dayanmaktadır. 60 mm polistiren yalıtımlı (üstü 0.50 mm galvanizli sac, altı 0.40 mm galvanizli sac) çatı paneli, orta düzey maliyet (1.139,53 TL/m²) ile etkin termal performans sağlamaktadır. Eczacılık Fakültesi örneğinde, 2025 yılında 2.688,92 MWh enerji tüketimi ile \$28.962,84 maliyet dengesinin 2030 yılında 2.675,51 MWh enerji tüketimi ile \$49.307,94 maliyet dengesine evrilmesi, stratejinin dengeli performans sergilediğini göstermektedir.

Dış cephe yalıtım malzemelerinin seçimi, üç stratejinin Pareto sonuçlarına dayanan kapsamlı değerlendirme sonucunda belirlenmiştir. TR100 EPS ($\lambda=0,040$ W/mK, 853,20 TL/m²), düşük maliyet avantajı ile kısıtlı bütçeli projeler için optimal çözüm sunarken, orta düzey termal performans sağlamaktadır. Malzemenin hafif yapısı ve kolay işlenebilirlik özellikleri, uygulama sürecinde zaman ve işçilik tasarrufu sağlamaktadır.

TR200 XPS ($\lambda=0,030$ W/mK, 1.050,08 TL/m²), üstün termal performans ile nitelikli projeler için tercih edilmektedir. Yüksek basınç dayanımı ve su emme direnci, özellikle nemli iklim koşullarında uzun vadeli performans garantisi sunmaktadır. TR7,5 taşıyıcı ($\lambda=0,035$ W/mK, 1.067,33 TL/m²), nefes alma özelliği ve yangın direnci ile özellikle tarihi yapılar için optimal seçenek olmaktadır.

Pencere sistemlerinin performans optimizasyonu, mevcut sistemlerin korunması ve yenileme alternatifleri arasında fayda-maliyet analizi gerektirmektedir. PVC-Alüminyum doğrama ile 4+4 mm kalınlığında 12 mm ara boşluklu çift camlı pencere sistemi (1.436,94 TL/m²), orta düzey maliyet ile kabul edilebilir termal performans sağlamaktadır. 4+5 mm

kalınlığında 16 mm ara boşluklu sistem (1.607,56 TL/m²), iyileştirilmiş termal performans ile nitelikli alternatif oluşturmaktadır.

Ahşap doğrama ile çift camlı pencere sistemi (1.807,41 TL/m²), doğal yalıtım özelliği ile tüketim odaklı stratejinin tercih ettiği maksimum performans seçeneği olmaktadır. Ahşap malzemesinin düşük ısı iletkenlik değeri, pencere çerçevesi aracılığıyla oluşan ısı köprülerini minimize ederken, estetik değer açısından da üstün çözüm sunmaktadır.

Çatı yalıtım malzemelerinin performans karakteristikleri, farklı stratejilerin tercih mantığını açıklayan kritik faktörler olmaktadır. 50 mm poliüretan yalıtımlı çatı paneli (1.547,03 TL/m²), dengeli performans-maliyet oranı ile çeşitli proje tiplerinde tercih edilmektedir. 50 mm poliizosiyanurat yalıtımlı sistem (1.667,03 TL/m²), en düşük ısı iletkenlik değeri ($\lambda=0,025$ W/mK) ile maksimum performans hedefleyen projeler için optimal seçenek olmaktadır.

Altmış mm polistren yalıtımlı çatı paneli (1.139,53 TL/m²), en ekonomik alternatif olarak dengeli stratejinin tercih ettiği maliyet-etkin çözüm sunmaktadır. Galvanizli sac kaplama sistemi, hava koşullarına dayanıklılık ve yapısal dayanıklılık açısından uzun vadeli performans garantisi sağlamaktadır.

Derin yenileme stratejilerinde yapı elemanlarının sinerjik etkileşimi, optimizasyon sonuçlarının detaylı analizi ile değerlendirilmiştir. Dış cephe yalıtımının enerji tasarrufuna %50-60 oranında katkı sağlaması, tüm stratejilerde tutarlı şekilde gözlemlenen temel bulgu olmaktadır. Bu baskınlık etkisi, dış cephe yüzeyinin toplam ısı kaybındaki payının yüksek olması ile açıklanmaktadır.

Pencere sistemlerinin %25-30 katkısı, özellikle mevcut pencere kalitesine göre değişkenlik göstermektedir. Eczacılık Fakültesi'nde mevcut PVC pencere sisteminin korunabilir olması, bu elementin maliyetini elimine ederken, Fen Fakültesi'nde eski çift cam sisteminin yenilenmesi gerekli olmaktadır. Çatı yalıtımının %15-20 katkısı,

sistematik olarak tercih edilen kombinasyonlarda optimal dengeyi sağlamada belirleyici rol oynamaktadır.

Bütünleşik derin yenileme yaklaşımının etkinliği, münferit müdahalelere kıyasla tüm stratejilerde üstün performans göstermektedir. Tüketim odaklı stratejinin 1.3-2.3-3.2 kombinasyonu, yapı elemanlarının sinerjik etkisi ile %75-80 toplam enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu sinerjik etki, bina dış kabuğunun bütünlüklü iyileştirilmesi ile ısı köprüsü eliminasyonu ve hava kaçağının azaltılması avantajlarından kaynaklanmaktadır.

Yaşam döngüsü maliyet analizi, derin yenileme stratejilerinin uzun vadeli ekonomik performansını ortaya koymaktadır. Yüzde 7,6 iskonto oranı uygulandığında, tüketim odaklı stratejinin 30 yıllık yaşam döngüsü maliyeti, üstün enerji performansı nedeniyle uzun vadeli faydalar sağlamaktadır. İlk yatırım maliyetinin yüksek olmasına rağmen, operasyonel maliyet tasarrufu ile 15-20 yıllık sürede başabaş noktasına ulaşılmaktadır.

Maliyet odaklı stratejinin net bugünkü değer analizi, 25-30 yıllık sürede pozitif yatırım getirisi sağladığını göstermektedir. Düşük ilk yatırım, kısa vadeli nakit akışı avantajı sağlarken, kısıtlı enerji tasarrufu nedeniyle uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından kısıtlamalara neden olmaktadır. Dengeli stratejinin 12-15 yıllık geri ödeme süresi, en uygun yatırım seçeneği olarak öne çıkmaktadır.

Risk analizinde, enflasyon oranının malzeme maliyeti üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, 2025-2030 döneminde öngörülen %103'lük Dolar/TL artışı, yüksek maliyetli stratejilerin riske maruz kalma olasılığını artırmaktadır. Ancak enerji maliyeti artışının paralel seyri, enerji verimli çözümlerin finansal riskten korunma sağlamasını mümkün kılmaktadır.

Aşamalı yenileme stratejileri, bütçe kısıtları ve teknik uygunluk dikkate alınarak geliştirilmiştir. Birinci aşama (0-12 ay), dış cephe yalıtımı odaklı yaklaşım ile %50-60 enerji tasarrufu hedeflemektedir. Bu aşama, maksimum etki ile minimum kesinti prensibini benimsemektedir.

İkinci aşama (12-24 ay), çatı yalıtımı iyileştirmeleri ile ilave %15-20 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Mevsimsel planlama ile yaz döneminde uygulama, hava koşullarına bağlı riskleri minimize etmektedir. Üçüncü aşamada ise, (24-36 ay) pencere sistemlerini yenileme ile toplam %75-85 enerji tasarrufu hedeflenmektedir. Oluşturulan aşamalı yaklaşım, özellikle kamu kurumlarının bütçe döngüleri ile uyum sağlarken, doluluk kesintisini minimize etmektedir. Her aşamanın tamamlanması, anında enerji faydaları sağlayarak sonraki yatırımlar için finansal gerekçe oluşturmaktadır.

Modern binalar (Şevket Aziz Kansu tipi – 10-20 yaş arası) için dengeli stratejinin marjinal iyileştirmeleri, iyi temel performans nedeniyle maliyet-etkin sonuçlar sağlamaktadır. Modern yalıtım standartlarının mevcut olması, kapsamlı yenileme yerine hedeflenen iyileştirmeleri optimal kılmaktadır.

Orta yaşlı binalar (Rektörlük, Eczacılık tipi – 40-60 yaş arası) için tüketim odaklı stratejinin kapsamlı yaklaşımı, önemli gelişme potansiyeli nedeniyle gerekçeli olmaktadır. Mevcut bina kabuğunun termal performans eksiklikleri, büyük müdahaleler ve önemli enerji tasarruflarını mümkün kılmaktadır.

Tarihi binalar (Fen Fakültesi tipi – 70+ yaş) için özel geliştirilmiş stratejiler, tarihi ve kültürel mirası koruma gerekleri ile enerji verimli hedefler arasında denge sağlamaktadır. Taşyünü dış cephe yalıtımı, nefes alabilirlik gereksinimleri ile eşzamanlı olarak termal performans geliştirmeyi sağlamaktadır.

Yapısal malzeme bazında, betonarme iskelet yapılar için standart yaklaşımlar etkinlik gösterirken, taş iskelet yapılar için nem yönetimi ve ısı köprüsü önlemlerini özellikle dikkate almak gerekmektedir. Mevcut pencere sistemleri açısından, PVC pencere mevcut binalarda koruma stratejisi maliyet avantajları sağlarken, eski pencere sistemlerinde değiştirme gerekliliği doğmaktadır.

Geliştirilen enerji-maliyet optimum derin yenileme stratejileri, üç farklı baskınlık yaklaşımının güçlü yönlerini harmanlayarak bina tipine özgü, ekonomik olarak ve teknik

olarak uygulanabilir çözümler sunmaktadır. Dengeli yaklaşımların genel optimum dengeyi sağlarken, yapıya özgü stratejik farklılaşma, sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından kritik başarı faktörü olmaktadır.

Yapılan analizler Alt Soru 1.1.2 (Yapı kabuğu iyileştirmelerinin enerji tüketimindeki azalmaya etkisi ne düzeydedir?) ve Alt Soru 1.1.3 (Yapı elemanlarının göreceli etkinlikleri nasıl farklılaşmaktadır?) sorularına yanıt verirken, H1 (Derin yenileme stratejileri ile en az %60'lık azalma sağlanabilir) ve H2 (Bütünleşik stratejiler münferit müdahalelere kıyasla daha etkin) hipotezlerini doğrulayan bulgular sunmaktadır.

4.4.4 Farklı bina türleri için optimum çözümler

Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'ndeki farklı kullanım tiplerindeki kamu binalarının enerji verimli yenilenmesi için geliştirilen optimum çözümler, her bina türünün kendine özgü işlevsel gereksinimleri, yapısal karakteristikleri ve enerji tüketim profilleri doğrultusunda farklılaştırılmıştır. Bu farklılaştırma yaklaşımı, Pareto analizi ve derin yenileme stratejilerinden elde edilen teorik bilginin pratik uygulamalara dönüştürülmesi sürecini temsil etmektedir.

İdari binalar kategorisinde yer alan Rektörlük binasının (40 yaş, betonarme iskelet, çift cam, kiremit çatı) enerji verimli yenilenmesi için geliştirilen optimum çözümler, bu bina türünün ayırt edici özelliklerini sistemik olarak dikkate almaktadır. İdari binaların en belirgin özelliği, standardize edilmiş çalışma saatleri (8:00-17:00) ve tutarlı doluluk modelleri olmaktadır. Bu durum, enerji optimizasyon stratejisinin öngörülebilir kullanım profillerine göre tasarlanmasını mümkün kılmaktadır.

İdari binaların enerji tüketim karakteristikleri, diğer bina türlerine kıyasla belirgin farklılıklar göstermektedir. Mesai saatlerinde yoğun kullanım, gece ve hafta sonlarında minimal aktivite, sabit sıcaklık gereksinimleri ve yüksek iç ısı kazançları (bilgisayarlar, aydınlatma, doluluk), bu bina türünün enerji yönetiminde özel stratejiler gerektirmektedir. Rektörlük binasının 40 yıllık yaşı, mevcut bina dış kabuğunun termal performans eksikliklerini ortaya koyarken, yenileme potansiyelini yüksek kılmaktadır.

Pareto analizi sonuçlarına göre, idari binalar için en uygun çözüm, dengeli stratejinin 1.1-3.3 kombinasyonu olmaktadır. Bu seçimin arkasındaki gerekçeler aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir:

Dış Cephe Yalıtımı (1.1 - TR100 EPS): İdari binaların geniş cephe alanları, dış cephe yalıtımının maksimum etki sağlayacağı alanı oluşturmaktadır. 8 cm kalınlığında TR100 ekspande polistiren levhalar, maliyet-etkin çözüm sunarken, idari binaların sürekli ısıtma/soğutma gereksinimlerine uygun ısıl performans sağlamaktadır. EPS malzemesinin hızlı kurulum özellikleri, idari işlerin minimum bozulma ile devam etmesini sağlamaktadır.

Çatı Yalıtımı (3.3 - 60mm Polistren): İdari binaların düz çatı alanları, çatı yalıtımının stratejik önemini artırmaktadır. 60 mm polistren yalıtımlı çatı paneli, maliyet-performans dengesi ile idari binaların bütçe kısıtlarına uygun çözüm sunmaktadır. Galvanizli sac kaplama sistemi, bakım gerekliliklerini minimize ederken, uzun süreli dayanıklılık sağlamaktadır.

Pencere Sistemleri: İdari binaların mevcut çift cam pencere sistemleri, mevcut performans standartlarını karşıladığı durumlarda koruma stratejisi optimal olmaktadır. Bu yaklaşım, yatırım maliyetini minimize ederken, cephe iyileştirmesinin birincil odağını dış cephe yalıtımına yönlendirmektedir.

Beklenen Performans İyileştirmeleri: İdari binalar için önerilen optimum strateji paketi, kapsamlı performans iyileştirmeleri sağlamaktadır. Isıtma enerjisi talebinde %60-65 azalma, soğutma enerjisi talebinde %55-60 azalma, toplam enerji tüketiminde %65-70 azalma ve CO₂ emissions'da %62-67 azalma hedeflenmektedir. Bu iyileştirmeler, idari binaların operasyonel verimliliğini önemli şekilde artırırken, kullanıcı konforunu geliştirmektedir.

Ekonomik fizibilite açısından, %7,6 iskonto oranı uygulandığında geri ödeme süresi 10-12 yıl olarak hesaplanmaktadır. İdari binaların tutarlı kullanım modelleri, enerji

tasarrufunun öngörülebilir olmasını sağlayarak, yatırım riskini minimize etmektedir. Yaşam döngüsü analizinde, 30 yıllık süreçte pozitif net bugünkü değer elde edilmektedir.

İdari Binaların Yenileme Öncelikleri ve Aşamalı Yaklaşım: İdari binaların operasyonel süreklilik gereklilikleri, yenileme alternatiflerinin dikkatli bir şekilde takvimlendirilmesini gerektirmektedir. Uygulama süreci iki temel aşamaya ayrılmıştır. Birinci aşamada (0–6 ay), dış cephe yalıtımı bina cephesinde gerçekleştirildiği için operasyonel aksaklıklar minimum düzeyde kalmakta; yaz aylarında uygulanması ise hava koşullarının elverişli olması nedeniyle en uygun zaman dilimini oluşturmaktadır. İkinci aşamada (6–12 ay), çatı yalıtımı planlanmaktadır. Çatıya erişimin bina içi işleyişi etkilememesi, bu uygulamanın kesintisiz şekilde yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Mevsimsel olarak güz ve bahar dönemlerinde gerçekleştirilmesi, aşırı hava koşullarından kaçınmayı mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, operasyonel optimizasyonun sağlanabilmesi için idari binalarda enerji yönetim sistemleri, bina kullanım saatlerine göre uyarlanmalıdır. En yoğun kullanım saatleri olan 08.00–17.00 arasında maksimum verimlilik hedeflenmeli, 17.00–08.00 saatleri arasında enerji tasarrufu modu devreye alınmalı ve hafta sonlarında ise minimal operasyon stratejisi uygulanmalıdır.

Akademik binalar kategorisindeki Eczacılık ve Fen Fakülteleri için geliştirilen optimum çözümler, bu bina türünün karmaşık kullanım desenlerini ve değişken doluluk oranlarını sistematik olarak ele almaktadır. Akademik binaların ayırt edici özellikleri, mevsimsel kullanım değişimleri (akademik takvim), çeşitli mekân türleri (derslikler, laboratuvarlar, ofisler), ve yüksek iç hava kalitesi gereksinimleri olmaktadır.

Akademik binaların enerji tüketim profilleri, geleneksel ofis binalarından temel farklılıklar göstermektedir. Akademik yılın yoğun dönemleri (Ekim-Ocak, Şubat-Mayıs) ile yaz tatilinin düşük aktivite dönemleri arasındaki karşıtlık, enerji optimizasyon stratejilerinin esnek yaklaşımlar gerektirmektedir. Ayrıca, laboratuvarların sürekli işletim ihtiyaçları, dersliklerin değişken doluluk desenleri ve idari alanların düzenli programları, entegre çözümleri gerekli kılmaktadır.

Eczacılık Fakültesi İçin Optimum Strateji: Eczacılık Fakültesi'nin (61 yaş, betonarme iskelet, PVC pencere, kiremit çatı) optimum çözümü, dengeli stratejinin 1.1-3.3 kombinasyonunu temel alırken, mevcut PVC pencere sistemlerinin koruma avantajından maksimum düzeyde yararlanmaktadır. Bu yapıya özgü yaklaşımların temel gerekçeleri aşağıda gerekçelendirilmektedir:

Mevcut PVC Pencere Sistemleri Avantajı: Binanın mevcut PVC pencere sistemleri, güncel termal performans standartlarını karşılamaktadır. Bu durum, pencere değişim maliyetlerini ortadan kaldırırken, yatırım kaynaklarını daha yüksek etkili müdahalelere yönlendirmektedir. PVC malzemelerin düşük bakım gereksinimleri, akademik binaların uzun vadeli operasyonel verimliliğine katkı sağlamaktadır.

Dış Cephe Yalıtımı Stratejisi: 8 cm kalınlığındaki TR100 EPS dış cephe yalıtımı, akademik binaların geniş cephe yüzeyleri dikkate alındığında, maliyet-etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu binalarda gözlemlenen farklı pencere-duvar oranları, dış yalıtım sistemlerinin termal köprülerin azaltılmasındaki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Çatı Yalıtımı Önceliklendirmesi: 60 mm polistren yalıtımlı çatı paneli, akademik binaların düz çatı alanlarında ısı kaybı azaltmanın önemli potansiyelini ele almaktadır. Akademik binaların ekipman odalarının (HVAC, elektrik) çatı erişim gereksinimleri, yalıtım sistemlerinin dayanıklı ve bakım dostu olmasını gerektirmektedir.

Beklenen Performans ve Akademik Takvim Uyumı: Eczacılık Fakültesi için önerilen strateji, %70-75 toplam enerji tasarrufu hedeflerken, 14-16 yıllık geri ödeme süresi öngörmektedir. Akademik takvime uygun uygulama programı, yaz aylarında (Haziran-Eylül) büyük yenilemeler, akademik yılda minimal müdahaleler yaklaşımını benimser. Bu programlama, eğitim faaliyetlerinin kesintisini minimize ederken, yenileme kalitesini optimize etmektedir.

Fen Fakültesi İçin Özel Strateji: Fen Fakültesi'nin (78 yaş, taş iskelet, çift cam, kiremit çatı) optimum çözümü, tarihi yapı korunması ile enerji verimliliği arasında hassas denge gerektirmektedir. Tarihi binanın koruma gereksinimleri, geleneksel stratejilerin uyarlanması gerekliliğini gerektirmektedir.

Taş İskelet Yapısına Özel Yaklaşım: Taş yığma yapının nefes alma gereksinimleri, yalıtım malzemelerinin dikkatli seçimini gerektirmektedir. Taşyünü dış cephe yalıtımı (1.3 - TR7.5), mineral yünün buhar geçirgenlik özellikleri ile taş duvarların nem yönetimini uyumlu kılmaktadır. Bu malzeme seçimi, tarihi binanın yapısal bütünlüğünü korurken, termal performansı önemli ölçüde geliştirmektedir.

Mirasla Uyumlu Pencere Stratejisi: Tarihi binanın pencere değişimi, mimari miras korunması ile termal performans iyileştirmesi arasında denge gerektirmektedir. PVC-Alüminyum çift cam pencere (2.2) sistemi, modern termal performans ile mimari uyumluluğu harmanlayarak, miras yönergelerine uygun çözüm sunmaktadır.

Özelleştirilmiş Çatı Yalıtımı: Poliizosiyanurat çatı yalıtımı (3.2), tarihi binanın çatı yapısına minimal ek yük getirirken, maksimum termal performans sağlamaktadır. TPO membran sistemin hava koşullarına dayanıklılık özellikleri, tarihi binanın uzun vadeli korunmasını sağlamaktadır.

Tarihi Bina Performans Beklentileri: Fen Fakültesi için önerilen özel strateji, %70-75 enerji tasarrufu hedeflerken, 18-20 yıllık geri ödeme süresi öngörmektedir. Tarihi binanın premium malzeme gereksinimleri, daha yüksek başlangıç yatırımını gerektirmektedir. Ancak, binanın mimari değer korunması ile enerji verimliliği iyileştirmesinin eş zamanlı başarımı, uzun vadeli değer üretimin sağlamaktadır.

Karma kullanımlı binalar kategorisindeki Şevket Aziz Kansu binası (11 yaş, betonarme iskelet, PVC pencere, betonarme çatı) için geliştirilen optimum çözümler, çok işlevli alan gereksinimleri ve çeşitli kullanım desenlerinin karmaşık etkileşimini ele almaktadır. Karma kullanımlı binaların ayırt edici zorluğu, idari ofisler, derslikler, laboratuvarlar ve ortak alanların farklı enerji tüketim profillerini entegre yaklaşımla optimize etmektir.

Karma kullanımlı binaların enerji optimizasyon karmaşıklığı, tek işlevli binalardan temel farklılıklar göstermektedir. İdari alanların tutarlı programları, akademik alanların değişken doluluk oranları, laboratuvar alanlarının sürekli operasyonları ve ortak alanların

aralıklı kullanımı, bölge bazlı optimizasyon stratejileri gerektirmektedir. Bu bina türünün modern yaşı (11 yaş), nispeten iyi temel performans anlamına gelirken, marjinal iyileştirmelerin maliyet etkinliğini önemli hale getirmektedir.

Bölgesel Optimizasyon Stratejisi: Karma kullanımlı binaların karmaşık işlevsel düzenleri, bölgeye özgü müdahaleler yaklaşımını optimal kılmaktadır. Her işlevsel bölgenin enerji tüketim özelliklerine göre özelleştirilmiş çözümler geliştirilmektedir.

İdari Ofisler Alanı (%25 enerji tüketimi): İdari ofislerin öngörülebilir kullanım desenleri, mevcut PVC pencere korunması ile 10 cm XPS dış cephe yalıtımı kombinasyonunu optimal kılmaktadır. Bu bölgenin tutarlı doluluk oranı, yatırımın hızlı geri ödemesini sağlamaktadır.

Derslik Bölgesi (%35 enerji tüketimi): Dersliklerin yüksek doluluk değişimleri, 12 cm XPS dış cephe yalıtımı ile PVC-Alüminyum çift cam pencere yenileme kombinasyonunu gerektirmektedir. Bu bölgenin maksimum enerji tüketimi, en yüksek etkili müdahalelerin gerekçelendirilmesini sağlamaktadır.

Laboratuvar Alanı (%30 enerji tüketimi): Laboratuvarların sürekli operasyon gereksinimleri, yoğunlaştırılmış yalıtım stratejileri ile gelişmiş pencere sistemleri kombinasyonunu gerektirmektedir. Bu bölgenin kritik operasyonları, minimal kesinti ile maksimum verimlilik iyileştirmesi gerektirmektedir.

Ortak Alanlar (%10 enerji tüketimi): Ortak alanların aralıklı kullanımı, temel iyileştirmeler ile maliyet etkin çözümler yaklaşımını optimal kılmaktadır. Bu bölgenin düşük enerji tüketimi, minimal müdahaleleri gerekçelendirmektedir.

Bütünleşik Çatı Stratejisi: Tüm işlevsel bölgeleri kapsayan 14 cm Poliizosiyanurat çatı yalıtımı, binanın birleşik termal kabuğunu optimize etmektedir. Modern binanın beton çatı yapısının yük taşıma kapasitesi, yüksek performanslı yalıtım sistemlerinin uygulanmasını kolaylaştırmaktadır.

Modern Binanın Marjinal İyileştirme Avantajları: Şevket Aziz Kansu binasının modern yaşı (11 yaş), temel enerji performansının nispeten iyi olmasını sağlamaktadır. Bu durum, marjinal iyileştirmelerin maliyet etkinliğini kritik kılmaktadır. Önerilen stratejinin 20 \$/m² ortalama maliyet ile %65 enerji tasarrufu hedefi, modern binanın optimizasyon potansiyelini yansıtmaktadır.

İşlevsel Alan Bazlı Performans Hedefleri: Bölge bazlı yaklaşımın performans beklentileri, her işlevsel alanın özelliklerine göre farklılaştırılmış olmaktadır. İdari ofislerde %65-70, dersliklerde %75-80, laboratuvarlarda %70-75 ve ortak alanlarda %60-65 enerji tasarrufu hedeflenmektedir. Farklılaştırılmış hedefler, her bölgenin yatırım gerekçelendirilmesini sağlamaktadır.

Modern Bina Operasyonel Optimizasyonu: Modern binanın gelişmiş sistemleri, operasyonel optimizasyon stratejileri ile geliştirilmektedir. Bina yönetim sistemlerinin entegrasyonu, bölge bazlı kontrollerin uygulanması ve akıllı programlamanın benimsenmesi, fiziksel iyileştirmeleri tamamlamaktadır. Bu yaklaşım, modern binanın teknolojik avantajlarını maksimize etmektedir.

Üç farklı bina türü için geliştirilen optimum çözümlerin karşılaştırmalı analizi, bina yaşı, yapısal özellikler ve kullanım profillerinin optimizasyon stratejileri üzerindeki sistematik etkilerini ortaya koymaktadır. Bu karşılaştırma, karar verme sürecinde bina türünün kritik faktör olduğunu göstermektedir.

İdari binalar için ortalama 15 \$/m² maliyet ile %70 enerji tasarrufu sağlayan dengeli yaklaşım, tutarlı kullanım kalıplarının yatırım öngörülebilirliğini yansıtmaktadır. Akademik binalar için 17-22 \$/m² maliyet aralığı ile %75 enerji tasarrufu, yapısal çeşitliliğin strateji farklılaşmasını göstermektedir. Karma kullanımlı binalar için 20 \$/m² maliyet ile %65 enerji tasarrufu, modern binanın marjinal iyileştirme potansiyelini göstermektedir.

Bina tipinin geri ödeme süresi üzerinde sistematik etkisi, kullanım şekilleri ile yatırım özelliklerinin korelasyonunu göstermektedir. İdari binalar için 10-12 yıl, akademik binalar için 14-20 yıl ve karma kullanımlı binalar için 12-14 yıl geri ödeme süresi, her bina türünün ekonomik uygulanabilirliğini yansıtmaktadır.

Uzun dönemli sürdürülebilirlik açısından, tarihi binaların koruma gereklilikleri yüksek risk oluştururken, kültürel değer korunmasının toplumsal faydalarını sağlamaktadır. Modern binaların teknolojik uyarlanabilirliği, gelecekteki yükseltmelerin daha kolay uygulanmasını mümkün kılmaktadır. İdari binaların operasyonel istikrarı, yatırım güvenliğini artırmaktadır.

Son olarak önerilen üç baskınlık stratejisinin pilot proje uygulamaları ile gerçek koşullarda test edilmesi, yalnızca teorik modelin değil, aynı zamanda elde edilen Pareto optimal çözümlerin pratik geçerliliğinin de değerlendirilmesini sağlayacak ve böylece önerilen metodolojinin güvenilirliğini ve uygulama değerini önemli ölçüde artıracaktır.

Araştırma kapsamında elde edilen bulgular, Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'ndeki dört bina üzerinden gerçekleştirilen 2021-2024 dönemi analizlerine dayanmakta olup, dış cephe yalıtımı, pencere sistemleri ve çatı iyileştirmeleri gibi temel yapı bileşenleri odak noktası olarak ele alınmıştır. Metodolojinin farklı coğrafi bölgeler ve iklim koşullarında test edilmesi, enerji tüketiminin ısıtma-soğutma-aydınlatma gibi alt sistemlere göre detaylı analiz edilmesi ve önerilen üç baskınlık stratejisinin pilot proje uygulamaları ile doğrulanması, gelecek araştırmalar için öncelikli alanlar olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca kullanıcı davranış modellerinin entegrasyonu, dinamik optimizasyon yaklaşımlarının geliştirilmesi ve HVAC sistemleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarının optimizasyon sürecine dahil edilmesi, modelin kapsayıcılığını ve uygulama değerini artıracaktır. Bu gelişmeler, mevcut çalışmanın ortaya koyduğu metodolojik çerçevenin daha geniş ölçekte uygulanabilirliğini güçlendirecek ve kamu binalarının sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik ulusal stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, mevcut kamu binalarının enerji verimli dönüşümüne yönelik olarak veri odaklı bir sürdürülebilir enerji yönetimi yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışma, Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi'nde yer alan dört farklı binadan elde edilen uzun dönemli enerji tüketim ve meteorolojik veri setleriyle desteklenmiş; farklı yapı özellikleri ve işlev türlerini temsil eden bu binalar üzerinden kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında, beş farklı enerji tüketim tahmin modeli (LSTM, GRU, RF, SVR, ARIMA) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ardından, çok amaçlı optimizasyon süreci yürütülerek üç farklı baskınlık stratejisi (tüketim odaklı, maliyet odaklı, dengeli) doğrultusunda Pareto etkin çözümler üretilmiş; enerji verimliliği, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik hedeflerini eş zamanlı olarak ele alan senaryo tabanlı çözüm setleri ortaya konulmuştur. Ayrıca, yapı elemanlarının göreceli etkisi, bina yaşı gibi fiziksel değişkenlerin model performansına etkisi incelenmiş ve yaşam döngüsü maliyet analizine dayalı stratejik değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Buna göre araştırma kapsamında üç ana araştırma sorusu ve on bir alt araştırma sorusunun yanıtlanma durumu ile dokuz adet hipotez test edilmiştir. Elde edilen bulgular, mevcut kamu binalarının sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik kuramsal bilgi üretmenin yanı sıra pratikte uygulanabilir karar destek sistemlerinin geliştirilmesine de olanak sunmaktadır.

Çalışma kapsamında geliştirilen metodolojik yaklaşım, belirlenen araştırma sorularını çok boyutlu olarak yanıtlamış ve ileri sürülen tüm hipotezleri istatistiksel ve modelleme temelli analizlerle desteklemiştir. Enerji tüketimi tahmininde kullanılan beş farklı modelin performans karşılaştırmaları, yapı özelliklerine bağlı tahmin hassasiyetleri ve çok amaçlı optimizasyon senaryoları üzerinden yürütülen analizler hem kuramsal hem de uygulamalı boyutta kapsamlı bulgular sunmuştur. Araştırma sorularının tamamı, gerçek verilerle test edilen ve ampirik bulgularla desteklenen modellemeler sayesinde tatmin edici şekilde cevaplanmış, hipotez testleri aracılığıyla elde edilen sonuçlar ise geliştirilen yaklaşımların güvenilirliğini pekiştirmiştir.

Mevcut kamu binalarını yaklaşık sıfır enerjili bina standartlarına dönüştürmek için optimal derin yenileme stratejileri başarıyla belirlenmiştir (Soru 1.1). Üç farklı baskınlık

stratejisinin detaylı analizi sonucunda tüketim odaklı strateji 1.3-2.3-3.2 kombinasyonu ile maksimum enerji verimliliği, maliyet odaklı strateji 1.1 kombinasyonu ile minimum yatırım maliyeti, dengeli strateji ise 1.1-3.3 kombinasyonu ile optimal maliyet-etkin dengesi sağlanmıştır. Her bir strateji, kendi optimizasyon hedeflerine tam uyum sağlayarak Pareto optimal çözümler üretmiş ve bu doğrultuda modelin amaçlara yönelik çözüm üretme kapasitesini başarıyla ortaya koymuştur. Mevcut kamu binalarında derin yenileme stratejileri ile enerji tüketiminde en az %60'lık azalma sağlanarak H1 hipotezi ve dış cephe yalıtımı, enerji verimli pencere sistemleri ve çatı iyileştirmelerini içeren bütünsel derin yenileme stratejilerinin, münferit müdahalelere kıyasla enerji tüketimini daha etkin şekilde azalttığı ortaya konularak da H2 hipotezi desteklenmiştir.

Farklı baskınlık stratejilerinin Pareto etkinlikleri kapsamlı olarak değerlendirilmiştir (Soru 1.2). Efficient frontier analizi sonucunda üç stratejinin tamamının matematiksel olarak optimal konumda Rank-1 Pareto etkin çözümler ürettiği kanıtlanmıştır. Toplam senaryoların % 25-30'unun Pareto etkin bulunması, optimizasyon sürecinin etkinliğini göstermektedir. Üç farklı optimizasyon stratejisinin (tüketim odaklı, maliyet odaklı, dengeli) tamamı Pareto etkin sınır üzerinde konumlanır ve her strateji farklı karar verici tercihlerine optimal çözümlerin sunulacağına yönelik oluşturulan H3 hipotezi desteklenmiştir. Ayrıca dengeli strateji oluşturularak elde edilen sonuçların orta maliyet aralığında yoğunlaştığı ve kritik karar noktalarının orta maliyet aralığında olduğu ortaya konularak H8 hipotezi kabul edilmiştir.

Farklı derin yenileme senaryolarının yaşam döngüsü maliyeti optimum noktaları EU 244/2012 direktifi metodolojisi ile belirlenmiştir (Soru 2.1). Yüzde 7,6 iskonto oranı ve döviz kuru projeksiyonları kullanılarak yapılan analizde dengeli stratejinin 12-15 yıllık geri ödeme süresi ile en uygulanabilir yatırım seçeneği olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle yaşam döngüsü maliyeti yaklaşımıyla değerlendirildiğinde, yüksek başlangıç maliyetine sahip yenileme alternatiflerinin, uzun vadede daha düşük toplam maliyete sahip olduğunu belirten H4 hipotezi desteklenmiştir.

Enerji tüketimi tahmininde kullanılan modellerin kamu binalarının enerji tüketimini ne ölçüde tahmin ettiğine yönelik çalışmalar ortaya konulmuştur (Soru 3.1). H5 hipotezi

kapsamında belirtilen derin öğrenme tabanlı modellerin klasik makine öğrenmesi modellerine kıyasla daha tutarlı ve dengeli performans sergileyeceği hususu reddedilmiştir. Aksine Random Forest ile oluşturulan modellerin tüm bina türlerinde daha tutarlı ve dengeli performans gösterdiği ortaya konularak yerleşik algının sorgulanması sağlanmıştır.

Bina karakteristiklerine yönelik yapılan analizlerin sonucunda bina yaşının artmasıyla tahmin modeli performansının düştüğü ortaya konularak H6 hipotezi doğrulanmış ve pencere-yüzey oranında farklı sonuçlar elde edilmesi ile de H7 hipotezi desteklenmiştir (Soru 3.2).

Enerji tüketimi tahmin modellerinin karşılaştırmalı analizi önemli bulgular ortaya koymuştur. Beş farklı model arasında Random Forest algoritması tüm bina türlerinde en tutarlı performansı sergilemiş, MAPE değerlerinde % 3 ile % 35,22 arasında değişen sonuçlar elde etmiştir. Shaikh vd. (2022)'nin kapsamlı karşılaştırması GRU modelinin $R^2 = 0.90228$ ile en iyi performansı gösterdiğini, LSTM'in $R^2 = 0.87239$ ile ikinci sırada geldiği saptanmıştır. Random Forest'in MAPE değerleri %0.21-6.023 arasında değişirken (Mallala vd. 2025), çalışma kapsamında belirtilen %3-%35,22 aralığının literatürde nadiren görüldüğü vurgulanmalıdır. Bu modelin ortalama 34 saniye hesaplama süresi ile pratik uygulanabilirlik avantajı, derin öğrenme modellerinin 760-1480 saniye süren hesaplama maliyetleri karşısında belirgin üstünlük sağlamıştır. Mahjoub vd. (2022)'nin çalışması LSTM/GRU modellerinin 33,5-43,8 saniye arası çalışma süreleri gösterdiğini doğrularken, Random Forest'in anlamlı derecede daha hızlı eğitim süreleri sağladığını kanıtlamaktadır.

Derin öğrenme modelleri belirli binalarda dikkat çekici sonuçlar üretmiştir. LSTM modeli özellikle Fen Fakültesi için % 7,90 MAPE ile en düşük hata oranını sağlarken, GRU modeli Eczacılık binası için 0.952 R^2 değeri ile en yüksek açıklama gücüne ulaşmıştır. Ancak bu modellerin yüksek hesaplama maliyetleri gerçek zamanlı uygulamalar için önemli kısıt oluşturmaktadır.

Bina yaşının tahmin performansı üzerindeki etkisi sistematik olarak doğrulanmıştır. En yeni bina olan Şevket Aziz Kansu binasının 11 yaşında % 3 MAPE değeri ile en kolay tahmin edilen bina olması, 78 yaşındaki Fen Fakültesinin % 35-38 MAPE değerleri ile en zorlayıcı tahmin profilini sergilemesi arasındaki belirgin fark, eski binaların enerji tüketim desenlerinin karmaşıklığını ortaya koymaktadır. Sheng (2025) ise çalışma kapsamında elde edilen bulguyu kısmen destekler nitelikteki çalışmasında 143.000 adet taşınmaz üzerinde yaptığı analizde bina yaşının enerji tüketimi tahmininde 7. sırada yer aldığını, toplam taban alanı ve duvar koşullarının daha dominant faktörler olduğunu göstermiştir.

Çok amaçlı optimizasyon sürecinde üç farklı baskınlık stratejisinin altı yıllık analiz boyunca tam tutarlılık göstermesi, metodolojinin kararlılığını kanıtlamaktadır. Tüketim odaklı stratejinin 1.3-2.3-3.2 kombinasyonu premium malzemelerle maksimum enerji verimliliği hedeflerken, maliyet odaklı stratejinin 1.1 kombinasyonu minimum yatırımla kabul edilebilir tasarruf sağlamıştır. Eşit ağırlıklandırma ile belirlenen dengeli stratejinin 1.1-3.3 kombinasyonu ise akıllı kaynak dağılımı yaklaşımını temsil etmektedir.

Enerji-maliyet ödünleşimi analizinde kritik karar noktaları tespit edilmiştir. Orta maliyet bölgesinde % 25-35 artışın en iyi maliyet-etkin dengesini sağladığı, kritik karar noktalarının bu aralıkta yoğunlaştığı bulgularla doğrulanmıştır. Düşük maliyet bölgesinde minimal müdahalelerle % 45-55, yüksek maliyet bölgesinde kapsamlı yaklaşımlarla % 80-90 enerji tasarrufu elde edilebileceği tespit edilmiştir.

Yapı elemanlarının sinerjik etkinlik analizi bütünleşik yaklaşımların üstünlüğünü kanıtlamıştır. Dış cephe yalıtımının % 50-60, pencere sistemlerinin % 25-30 ve çatı yalıtımının % 15-20 oranında enerji tasarrufuna katkı sağlaması, 1.3-2.3-3.2 kombinasyonunun % 75-80 toplam tasarruf elde etmesindeki sinerjik etkiyi açıklamaktadır.

Yaşam döngüsü yaklaşımı sonuçları uzun vadeli perspektifin önemini ortaya koymuştur. Yüzde 7,6 iskonto oranı uygulandığında tüketim odaklı stratejinin yüksek başlangıç

maliyetine rağmen 15-20 yıllık sürede maliyet avantajı sağladığı, dengeli stratejinin 12-15 yıllık sürede optimal geri ödeme performansı gösterdiği tespit edilmiştir.

Bina türüne özgü analiz sonuçları farklılaştırılmış yaklaşımların gerekliliğini göstermiştir. İdari binalar için dengeli stratejinin mesai saatleri odaklı kullanım profiliyle uyumlu sonuçlar vermesi, akademik binalar için yapısal özelliklerden kaynaklanan farklı gereksinimlerin ortaya çıkması, karma kullanımlı binalar için fonksiyonel alanların çeşitliliğine bağlı özel stratejilerin geliştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Araştırma mevcut binaların enerji verimli dönüşümü alanında önemli kuramsal katkılar sunmaktadır. Geleneksel yaklaşımların aksine enerji tüketimi tahmini ve çok amaçlı optimizasyonu bütünleştiren hibrit metodoloji, sürdürülebilir yapı çevre teorileri ile veri odaklı modelleme yaklaşımlarını başarıyla sentezlemiştir. Yaklaşık sıfır enerjili bina teorisi ile derin yenileme konseptinin entegrasyonu, mevcut kamu binalarının sistematik enerji performansı iyileştirmesi için kavramsal çerçeve oluşturmuştur.

Üç farklı baskınlık stratejisinin Pareto optimal çözümler ürettiğinin matematiksel olarak doğrulanması, çok kriterli karar verme teorisine metodolojik katkı sağlamıştır. Bu bulgu farklı karar verici tercihlerinin eş zamanlı değerlendirilebileceğini göstererek, optimizasyon literatüründe bina enerji yenileme alanına özgü teorik gelişim sunmuştur.

Metodolojik katkılar açısından üç farklı baskınlık stratejisinin sistematik karşılaştırması, enerji verimli bina yenileme alanında öncü nitelik taşımaktadır. Eşit ağırlıklandırma yaklaşımının dengeli stratejide başarılı uygulanması, basit ve şeffaf kriter ağırlıklandırma yaklaşımları için önemli metodolojik örnek oluşturmuştur. Eşit ağırlıklandırmanın subjektif yargılardan bağımsız ve hesaplama açısından verimli ağırlık üretimi, gelecek araştırmalar için güvenilir ve uygulanabilir metodolojik temel sağlamaktadır.

Random Forest modelinin enerji tüketimi tahmininde tutarlı üstünlüğünün kanıtlanması, ensemble öğrenme yöntemlerinin bu alandaki potansiyelini ortaya koymuştur. Modelin hesaplama verimliliği ile tahmin doğruluğu arasındaki optimal dengeyi sağlaması, pratik

uygulamalar için kritik önem taşımaktadır. Bina yaşının tahmin zorluğu üzerindeki sistematik etkisinin keşfi, gelecek çalışmalarda dikkate alınması gereken önemli metodolojik bulgudur.

Kampüs ölçeğinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışması, literatürdeki tekil bina odaklı yaklaşımların ötesine geçerek dört farklı bina türünde tutarlı sonuçlar üretmiştir. Bu ölçek seçimi hem daha güvenilir sonuçlar sağlamış hem de pratikte uygulanabilirlik açısından avantaj sağlamıştır.

Çalışmanın en önemli çıktılarından biri de önerilen stratejilerin pratik uygulamalara doğrudan zemin hazırlaması ve karar vericilere uygulanabilir yol haritaları sunmasıdır. Bu bağlamda, kısa vadede hayata geçirilebilecek maliyet odaklı strateji kombinasyonları, sınırlı bütçelerle enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak isteyen kamu yöneticileri için somut ve etkili çözümler ortaya koymaktadır. Kısa vadeli uygulamalar açısından değerlendirildiğinde; maliyet odaklı stratejinin 1.1 numaralı kombinasyonu, düşük yatırım gereksinimi ile hızlı sonuç elde etmeye olanak tanıyan etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda önerilen 8 cm kalınlığındaki TR100 EPS dış cephe yalıtımı, %14 ila %25 arasında enerji tasarrufu sağlamakta olup, yaklaşık 6 ila 8 yıl içerisinde yatırım geri dönüşünü mümkün kılmaktadır.

Orta vadeli uygulamalar açısından, dengeli stratejinin 1.1–3.3 numaralı kombinasyonu, akıllı kaynak dağılımını esas alan bütüncül bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu strateji kapsamında, ekonomik TR100 EPS dış cephe yalıtımı ile yüksek performanslı polistiren çatı yalıtımının birlikte uygulanması, %65 ila %75 oranında enerji tasarrufu sağlamayı hedeflemekte; yaklaşık 12 ila 15 yıl içinde ise optimal yatırım geri dönüşü sunarak maliyet-etkinlik açısından güçlü bir çözüm alternatifi oluşturmaktadır.

Uzun vadeli stratejik uygulamalar bağlamında, tüketim odaklı yaklaşımın 1.3–2.3–3.2 numaralı kombinasyonu, binaların nZEB (neredeyse sıfır enerjili bina) standartlarına yaklaşmasını mümkün kılmaktadır. Bu strateji kapsamında önerilen TR7.5 taşıyıcı dış cephe yalıtımı, ahşap doğrama çift cam pencere sistemi ve poliizosiyanurat esaslı çatı yalıtımı ile %75 ila %80 arasında enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmektedir. Her ne

kadar bu yaklaşım yüksek başlangıç yatırım maliyetleri gerektirse de uzun vadeli yaşam döngüsü maliyet analizleri söz konusu stratejinin sürdürülebilirlik ve ekonomik etkinlik açısından rasyonel bir tercih olduğu görülmektedir.

Tasarım ve uygulama profesyonelleri için Random Forest modelinin hesaplama verimliliği nedeniyle ön fizibilite çalışmalarında tercih edilmesi, LSTM modelinin yüksek doğruluğu nedeniyle detaylı analizlerde kullanılması önerilmektedir. Bina yaşının tahmin zorluğu üzerindeki sistematik etkisi dikkate alınarak yaşlı binalarda konservatif tahminler yapılması, proje risklerinin minimize edilmesi açısından önem taşımaktadır.

Bir diğer öneri ise optimizasyon sürecinde baskınlık stratejisi seçiminin proje karakteristiklerine göre farklılaşmasına yöneliktir. Bütçe kısıtlarının ön planda olduğu projelerde maliyet odaklı stratejiler, sürdürülebilirlik hedeflerinin önceliklendirildiği durumlarda tüketim odaklı stratejiler ve çok boyutlu hedefleri içeren genel amaçlı projelerde ise dengeli stratejiler optimal sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir. Bu stratejik eşleştirme, karar vericilerin proje önceliklerine uygun en uygun çözüm yolunu belirlemelerine olanak tanımaktadır.

Çalışma sonucunda getirilen bir diğer öneri ise bina türüne özgü uygulama yaklaşımlarının geliştirilmesidir. Nitekim, idari binalarda mesai saatleri odaklı minimum kesinti prensibinin benimsenmesi, akademik binalarda eğitim takvimi ile uyumlu mevsimsel planlamanın yapılması, karma kullanımlı binalarda fonksiyonel alanların kullanım yoğunluğuna göre aşamalı yenileme stratejisinin uygulanması başarı oranını artıracığı vurgulanmalıdır.

Akademik araştırmalarda Random Forest'ın tutarlı performansından hareketle ensemble yaklaşımların geliştirilmesi öncelikli araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Derin öğrenme modellerinin hesaplama verimliliğinin artırılması pratik uygulanabilirlik açısından belirleyici rol oynamaktadır. Pareto etkinlik analizinin gösterdiği çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının ise farklı bina tiplerinde ve iklim koşullarında test edilmesi ile metodolojinin genellenebilirliğini artıracığı belirlenmiştir.

Araştırma sonuçları ile, mevcut kamu binalarının enerji verimli dönüşümüne yönelik kapsamlı ve bütünsel bir yaklaşım geliştirerek, enerji tüketimi tahmini ile çok amaçlı optimizasyon süreçlerini entegre eden bir yaklaşım ortaya konmaktadır. Ayrıca, üç farklı baskınlık stratejisinin Pareto optimal çözümler üretmesi, farklı karar verici tercihlerini yansıtan esnek ve uygulanabilir seçeneklerin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Random Forest modelinin tutarlı üstünlüğünün ortaya konulması ve bina yaşının enerji performansı üzerindeki sistematik etkisinin istatistiksel olarak kanıtlanması, gelecek uygulamalar için sağlam ve güvenilir metodolojik temeller sunmuştur. Araştırmanın en önemli katkısı ise, teorik düzeyde geliştirilen optimizasyon yaklaşımı ile pratik uygulanabilirlik arasındaki dengeyi kurarak, mevcut kamu binalarının sürdürülebilir gelecek vizyonu doğrultusunda yeniden yapılandırılabilirliğini somut biçimde göstermektedir. Araştırma, kampüs ölçeğinde veri odaklı enerji analizi ve çok amaçlı optimizasyonu entegre eden özgün yaklaşımıyla literatüre katkı sağlamaktadır. Ancak, yalnızca Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi ile sınırlı kalınması, elde edilen bulguların farklı coğrafi bölgeler, iklim koşulları ve bina tiplerine genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Ayrıca, pencere-yüzey oranı ile bina taban alanı büyüklüğünün enerji performansına etkilerine ilişkin olarak sınırlı düzeyde bulgu elde edilebilmiş olup, bu değişkenlerin daha detaylı ve karşılaştırmalı analizlerle ele alınması, gelecekteki araştırmalar için önemli bir fırsat alanı olarak görülmektedir. Bununla birlikte, çalışmanın bir diğer metodolojik sınırlılığı, model validasyonunun yalnızca mevcut veriler üzerinden gerçekleştirilmiş olmasıdır. Yenileme senaryoları sonrası performans doğrulamasının gerçekleşmemiş olması, önerilen stratejilerin gerçek uygulama koşullarındaki etkinliğinin ampirik olarak test edilmesini de gerektirmektedir. Bu durum, gelecek araştırmalar açısından öncelikli bir odak alanı olarak değerlendirilmektedir.

Araştırmanın bir diğer sınırlılığı ise hesaplama karmaşıklığından ileri gelmektedir; özellikle LSTM ve GRU gibi derin öğrenme tabanlı modeller, yüksek hesaplama süresi gereksinimleri nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda sınırlı kullanılabilirliğe sahip olmaktadır. Buna ek olarak, uzun vadeli projeksiyonlarda enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar, döviz kuru değişimleri ve teknolojik gelişmelere ilişkin belirsizlikler, optimizasyon sonuçlarının güvenilirlik aralığını doğrudan etkileyerek modelin öngörü

gücünü kısıtlayabilmektedir. Bu faktörler, gelecekteki çalışmalarda senaryo analizlerinin ve duyarlılık testlerinin daha kapsamlı biçimde ele alınması gerekliliğini göstermektedir.

Gelecek araştırmalar açısından, metodolojinin genellenebilirliğini test edebilmek için çok bölgesel çalışmaların gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Farklı iklim koşulları, yapı gelenekleri ve enerji politikalarının optimizasyon sonuçları üzerindeki etkilerinin araştırılması, ulusal ölçekte uygulanabilir ve bağlama duyarlı stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu doğrultuda, mevcut statik modellere alternatif olarak dinamik optimizasyon yaklaşımlarının geliştirilmesi, sistemlerin değişen çevresel ve operasyonel koşullara adaptif biçimde yanıt verebilmesini mümkün kılacak; üç farklı baskınlık stratejisinin bu çerçevede dinamik biçimde optimize edilmesi, uzun vadeli karar süreçlerinde güvenilirliği artıracaktır.

Gelecek araştırmalar açısından, metodolojinin genellenebilirliğini test edebilmek için çok bölgesel çalışmaların gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Farklı iklim koşulları, yapı gelenekleri ve enerji politikalarının optimizasyon sonuçları üzerindeki etkilerinin araştırılması, ulusal ölçekte uygulanabilir ve bağlama duyarlı stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu doğrultuda, mevcut statik modellere alternatif olarak dinamik optimizasyon yaklaşımlarının geliştirilmesi, sistemlerin değişen çevresel ve operasyonel koşullara adaptif biçimde yanıt verebilmesini mümkün kılacak; üç farklı baskınlık stratejisinin bu çerçevede dinamik biçimde optimize edilmesi, uzun vadeli karar süreçlerinde güvenilirliği artıracaktır. Ayrıca Random Forest algoritmasının ortaya koyduğu tutarlı performans dikkate alındığında, yapay zekâ tabanlı hibrit kontrol sistemlerinin geliştirilmesi teknolojik entegrasyon açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Optimizasyon çıktılarının akıllı bina sistemleriyle entegre edilerek otomatik kontrol mekanizmalarına dönüştürülmesi, enerji yönetiminde sürekli ve gerçek zamanlı iyileştirmelere imkân tanıyacaktır.

Kamu binalarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak geliştirilen veri temelli tahmin ve çok amaçlı optimizasyon modeli, yalnızca teknik düzeyde değil, aynı zamanda kurumsal ve yönetsel düzeyde de çok paydaşlı bir dönüşüm ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, başta Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

(ÇŞİDB) ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) olmak üzere ilgili belediyeler ve kamu kurumlarının yanı sıra, teknik danışmanlık firmaları, enerji hizmet şirketleri, tesis yönetim şirketleri, meslek odaları ve akademik birimlerin arasında kurulacak iş birliği yapıları, sürdürülebilir enerji yönetiminin kurumsallaşmasını destekleyecektir. Ayrıca gayrimenkul geliştirme ve yönetimi ve benzeri alanlarda uzmanlaşmış insan kaynağının bu süreçlere entegre edilmesiyle, kamu bina stokunun verimli yönetimi için gerekli olan veri yönetimi, performans izleme, yatırım önceliklendirmesi ve stratejik planlama gibi alanlarda profesyonel bir yaklaşım benimsenebilecektir. Bu çerçevede, geliştirilen modelin yaygınlaştırılması ve kurumsal düzeyde benimsenmesi, enerji verimliliği politikalarının sahaya yansımaları açısından belirleyici bir rol üstleneceği belirtilmelidir.

Araştırma, mevcut kamu binalarının enerji verimli dönüşümüne yönelik veri odaklı tahmin modelleri ile çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarını entegre eden özgün bir metodolojik çerçeve sunarak hem akademik literatüre hem de pratik uygulamalara önemli katkılar sağlamıştır. Geliştirilen üç baskınlık stratejisinin farklı karar verici tercihlerine uygun esnek çözümler üretmesi, kampüs ölçeğinde tutarlı ve Pareto etkin sonuçlar vermesi, metodolojinin güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Ankara Üniversitesi Beşevler Yerleşkesi özelinde elde edilen bulguların, benzer özelliklere sahip diğer kamu kurumları ve üniversite kampüslerinde daha geniş ölçekte test edilmesi, kamu ve özel sektör iş birliği ile hayata geçirilecek pilot uygulamalar aracılığıyla doğrulanması, ulusal enerji verimliliği politikalarının geliştirilmesine somut katkılar sunacaktır. Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, mevcut bina stokunun sürdürülebilir dönüşümü için gerekli teknik altyapı, karar destek sistemleri ve yatırım önceliklendirme mekanizmalarının oluşturulmasında bu araştırmanın ortaya koyduğu metodoloji ve bulgular, bilimsel temelli ve uygulanabilir bir yol haritası sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abu-Shikhah, N. ve Elkarmi, F. 2011. Medium-term electric load forecasting using singular value decomposition. *Energy*, 36, 4259–4271.
- Abu-Shikhah, N., Elkarmi, F. ve Aloquili, O.M. 2011. Medium-term electric load forecasting using multivariable linear ve non-linear regression. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2, 126–135.
- Afzal, S., Shokri, A., Ziapour, B. M., Shakibi, H., ve Sobhani, B. 2024. Building energy consumption prediction and optimization using different neural network-assisted models; comparison of different networks and optimization algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107356.
- Agliardi, E., Cattani, E. ve Ferrante, A. 2018. Deep energy renovation strategies: A real option approach for add-ons in a social housing case study, *Energy and Buildings*, 161, 1-9.
- Ahmad, T., Chen, H., Guo, Y. ve Wang, J. 2018. A comprehensive overview on the data driven and large scale based approaches for forecasting of building energy demand: A review. *Energy and Buildings*, 165, 301-320.
- Al Bataineh, A. S. 2019. A gradient boosting regression based approach for energy consumption prediction in buildings. *Advances in Energy Research*, 6(2), 91-101.
- Amasyali, K. ve El-Gohary, N. M. 2018. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1192-1205.
- Anonim. 2012. Enerji verimliliği strateji belgesi. Yüksek Planlama Kurulu. Resmî Gazete Tarih: 25.02.2012, Sayı: 28215. Web Adresi: <https://resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/02/20120225-7.htm>, Erişim Tarihi: 11.12.2022.
- Anonim. 2020. Kamu binalarının enerji verimli yenilenmesine yönelik rehber. TC Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.
- Anonim. 2023. On ikinci kalkınma planı (2024-2028). Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. Ankara.
- Anonim. 2025a. İklim değişikliği ile mücadelenin önemi. TC Dışişleri Bakanlığı. Web Adresi: <https://www.mfa.gov.tr/iklim-degisikligiyle-mucadelenin-onemi.tr.mfa>. Erişim Tarihi: 10.05.2025
- Anonim. 2025b. Avrupa Yeşil Mutabakatı. TC Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı. Web Adresi: https://www.ab.gov.tr/avrupa-yesil-mutabakati_53729.html. Erişim Tarihi: 10.05.2025

- Anonim. 2025c. Resmi İklim İstatistikleri. TC Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Web Adresi: <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=ANKARA>. Erişim Tarihi: 10.05.2025
- Anonim. 2025d. ABD 10 yıllık tahvil verimi. Web Adresi: <https://tr.investing.com/rates-bonds/u.s.-10-year-bond-yield>. Erişim Tarihi: 21.05.2025
- Anonim. 2025e. IMF Türkiye için Dolar ve enflasyon tahmini. Web Adresi: <https://www.nefes.com.tr/imf-turkiye-icin-dolar-ve-enflasyon-tahminlerini-guncelledi-29991>. Erişim Tarihi: 21.05.2025
- Anonim. 2025f. İkinci Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2024 yılı değerlendirmesi. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Web Adresi: <https://www.dha.com.tr/ekonomi/2024-yili-enerji-tasarufu-hedefine-yuzde-129-ulasildi-2608364>. Erişim Tarihi: 10.04.2025
- Anonymous. 1987. Report of the World Commission on Environment and Development : resolution / adopted by the General Assembly. United Nations General Assembly, 42nd session, 1987-1988.
- Anonymous. 2012. European Commission, Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU, 2012.
- Anonymous. 2013. Global Buildings Performance Network (GBPN). 2013. What is a Deep Renovation Definition?. Technical Report. Web Adresi: <https://library.gbpn.org/resource/what-deep-renovation-definition> Son Erişim Tarihi: 25.06.2021
- Anonymous. 2019a. International Energy Agency. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction.
- Anonymous. 2020. International Energy Agency. World Energy Statistics and Balances 2020.
- Anonymous. 2021a. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019). United Nations Digital Library. Web Adresi: <https://digitallibrary.un.org/record/3939847?v=pdf>. Erişim Tarihi: 16.06.2022.
- Anonymous. 2021b. Turkey 2021 Energy Policy Review. Web Adresi: <https://www.iea.org/reports/turkey-2021>. Erişim Tarihi: 12.03.2023.
- Anonymous. 2021c. A 2030 framework for climate and energy policies.
- Anonymous. 2021d. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- Anonymous. 2021e. What is Life Cycle Assessment. Web Adresi: <https://sphaera.com/glossary/what-is-a-life-cycle-assessment-lca/>. Erişim Tarihi: 25.06.2021.

- Anonymous. 2022a. United Nations Environment Programme, Emission Gap Report 2022. Web Adresi: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>. Erişim Tarihi: 12.06.2024.
- Anonymous. 2022b. State of Climate Action 2022. World Resources Institute. Web Adresi: <https://www.wri.org/research/state-climate-action-2022>. Erişim Tarihi: 15.08.2023
- Anonymous. 2022c. Energy Efficiency 2022. International Energy Agency. Web Adresi: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>. Erişim Tarihi: 09.04.2023.
- Anonymous. 2023a. United Nations Environment Programme, Emission Gap Report 2023. Web Adresi: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Erişim Tarihi: 10.05.2025
- Anonymous. 2023b. AR6 Synthesis Report Climate Change Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Web Adresi: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Erişim Tarihi: 12.04.2024.
- Anonymous. 2023c. Energy systems of Türkiye. International Energy Agency. Web Adresi: <https://www.iea.org/countries/turkiye>. Erişim Tarihi: 16.05.2024.
- Anonymous. 2024. Goal 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. Sustainable Development Goals. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. Web Adresi: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/goal-07/>. Erişim Tarihi: 10.01.2025.
- Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J. L., Cosar-Jorda, P. ve Buswell, R. A. 2019. Energy modelling and calibration of building simulations: A case study of a domestic building with natural ventilation. *Energies*, 12(17), 3360.
- Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H. ve Dias, L. 2012. Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*, 44, 81-87.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M. ve Vanoli, G. P. 2017. Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance. *Energy and Buildings*, 144, 303-319.
- Attia, S., Eleftheriou, P., Xeni, F., Morlot, R., Ménézo, C., Kostopoulos, V., Betsi, M., Kalaitzoglou, V., Pagliano, L., Cellura, M., Almeida, M., Ferreira, M., Baracu, T., Badescu, V., Crutescu, R. ve Hidalgo-Betanzos, J. M. 2017. Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 155, 439-458.
- Azari, R., Garshasbi, S., Amini, P., Rashed-Ali, H. ve Mohammadi, Y. 2016. Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance. *Energy and Buildings*, 126, 524-534.

- Bakar, N. N. A., Hassan, M. Y., Abdullah, H., Rahman, H. A., Abdullah, M. P., Hussin, F., ve Bandi, M. 2015. Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 1-11.
- Barringer, H. P., Weber, D. P., ve Westside, M. H. 1995. Life-cycle cost tutorials. In *Fourth International Conference on Process Plant Reliability*, Gulf Publishing Company.
- Bontempi, G., Ben Taieb, S., ve Le Borgne, Y. A. 2012. Machine learning strategies for time series forecasting. In *European Big Data Management and Analytics Summer School*, 62-77. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bourdeau, M., qiang Zhai, X., Nefzaoui, E., Guo, X. ve Chatellier, P. 2019. Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101533.
- Bowie. 2012. Deep Renovation: Rationale, Best Practices, Definition & Application in EU Context, Global Buildings Performance Network Research Webinar on Deep Renovation, Rockwool.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C. ve Ljung, G. M. 2015. Time series analysis: forecasting and control. John Wiley & Sons.
- Brambilla, A., Salvalai, G., Imperadori, M. ve Sesana, M. M. 2018. Nearly zero energy building renovation: From energy efficiency to environmental efficiency, a pilot case study. *Energy and Buildings*, 166, 271-283.
- Chen, S. J. ve Hwong, C. L. 1992. Fuzzy multiple attribute decision making methods and applications. Berlin: Springer-Verlad. 540 sayfa.
- Chen, Y., Guo, M., Chen, Z., Chen, Z. ve Ji, Y. 2022. Physical energy and data-driven models in building energy prediction: A review. *Energy Reports*, 8, 2656-2671.
- Chiradeja, P., Thongsuk, S., Ananwattanaporn, S. ve Ngaopitakkul, A. 2023. Renovation of an academic building's envelope, lighting, and air conditioning system according to thailand building energy code for energy consumption reduction. *Sustainability*, 15(21).
- Chong, E.K.P ve Zak, S. 2013. An introduction to optimisation. Wiley Series, ABD.
- Coello Coello, C. A., Lamont, G. B., ve Van Veldhuizen, D. A. 2007. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36797-2>
- Cohon, J. L. 2004. Multiobjective programming and planning (Vol. 140). Courier Corporation.

- Curran, M. A. 2006. Life-cycle assessment: principles and practice. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Çağlayan, Y. (Ed.). 2011. Yaşam Döngüsü Analizi. TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları-I, Bölgesel Çevre Merkezi, Ankara.
- Dagdougui, H., Bagheri, F., Le, H. ve Dessaint, L. 2019. Neural network model for short-term and very-short-term load forecasting in district buildings. *Energy and Buildings*, 203, 109408.
- D'Agostino, D. ve Mazzarella, L. 2019. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. *Journal of Building Engineering*, 21, 200-212.
- Deb, K. 2001. Nonlinear goal programming using multi-objective genetic algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, 52, 291-302.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., ve Meyarivan, T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 6, 182-197.
- Di Giuseppe, E., Iannaccone, M., Telloni, M., D'Orazio, M. ve Di Perna, C. 2017. Probabilistic life cycle costing of existing buildings retrofit interventions towards nZE target: Methodology and application example. *Energy and Buildings*, 144, 416-432.
- Elbeltagi, E., Wefki, H. ve Khallaf, R. 2023. Sustainable building optimization model for early-stage design. *Buildings*, 13(1), 74.
- Eliopoulou, E. ve Mantziou, E. 2017. Architectural Energy Retrofit (AER): An alternative building's deep energy retrofit strategy. *Energy and Buildings*, 150, 239-252.
- Elsheikh, A., Motawa, I. ve Diab, E. 2023. Multi-objective genetic algorithm optimization model for energy efficiency of residential building envelope under different climatic conditions in Egypt. *International Journal of Construction Management*, 23(7), 1244-1253.
- Esteves, G.R.T., Bastos, B.Q., Cyrino, F.L., Calili, R.F. ve Souza, R.C. 2015. Long term electricity forecast: A systematic review. *Procedia Computer Science*, 55, 549-558.
- Faiq, M., Tan, K. G., Liew, C. P., Hossain, F., Tso, C. P., Lim, L. L., Khan Wong, A. Y. ve Shah, Z. M. 2023. Prediction of energy consumption in campus buildings using long short-term memory. *Alexandria Engineering Journal*, 67, 65-76.
- Fan, C., Xiao, F. ve Zhao, Y. 2017. A short-term building cooling load prediction method using deep learning algorithms. *Applied Energy*, 195, 222-233.

- Fan, C., Wang, J., Gang, W. ve Li, S. 2019. Assessment of deep recurrent neural network-based strategies for short-term building energy predictions. *Applied Energy*, 236, 700-710.
- Ferrara, M., Rolfo, A., Prunotto, F. ve Fabrizio, E. 2019. EDeSSOpt–Energy Demand and Supply Simultaneous Optimization for cost-optimized design: Application to a multi-family building. *Applied Energy*, 236, 1231-1248.
- Ferreira, M., Almeida, M. ve Rodrigues, A. 2017. Impact of co-benefits on the assessment of energy related building renovation with a nearly-zero energy target. *Energy and Buildings*, 152, 587-601.
- Fotopoulou, A., Semprini, G., Cattani, E., Schihin, Y., Weyer, J., Gulli, R. ve Ferrante, A. 2018. Deep renovation in existing residential buildings through façade additions: A case study in a typical residential building of the 70s. *Energy and Buildings*, 166, 258-270.
- Fuller, S. ve Petersen, S. 1996. Life-cycle costing manual for the federal energy management program, NIST Handbook 135.
- Grygierek, K. ve Ferdyn-Grygierek, J. 2018. Multi-objective optimization of the envelope of building with natural ventilation. *Energies*, 11(6), 1383.
- Goodfellow, I., Bengio, Y. ve Courville, A. 2016. Deep learning. MIT press, 800, Cambridge.
- Gudivada, V., Apon, A. ve Ding, J. 2017. Data quality considerations for big data and machine learning: Going beyond data cleaning and transformations. *International Journal on Advances in Software*, 10(1), 1-20.
- Guardigli, L., Bragadin, M. A., Della Fornace, F., Mazzoli, C. ve Prati, D. 2018. Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks. *Energy and Buildings*, 166, 48-59.
- Guo, J., Lin, P., Zhang, L., Pan, Y. ve Xiao, Z. 2023. Dynamic adaptive encoder-decoder deep learning networks for multivariate time series forecasting of building energy consumption. *Applied Energy*, 350, 121803.
- Guo, X., Wang, Y., Liu, Y., Fan, L., Xue, S., Shi, C., Pan, L., Zhang, B., Wang, L. ve Chang, X. 2025. Multi-Objective Optimization of Building Energy Consumption: A Case Study of Temporary Buildings on Construction Sites. *Buildings*, 15(3), 420.
- Güneş, S., Şengül Güneş, G. ve Tanrıvermiş, Y. 2023. The role of energy efficiency in ensuring sustainability in the real estate sector in Türkiye, In: *Research in Humanities and Social Sciences*. Babacan, H. ve Bayram, E. (eds). Livre de Lyon, 23-46, Fransa.
- Haddad, H., Jerbi, F. ve Smaali, I. 2024. Learning-Based Short-Term Energy Consumption Forecasting, *Artificial Intelligence Applications and Innovations*, Pt

II, AIAI 2024, 27-30 August, Conference Proceedings, Vol 712, 238-251, Corfu, Greece.

- Hamdy, M., Sirén, K. ve Attia, S. 2017. Impact of financial assumptions on the cost optimality towards nearly zero energy buildings—A case study. *Energy and Buildings*, 153, 421-438.
- Han, B., Zhang, S., Qin, L. Y., Wang, X. D., Liu, Y. Y. ve Li, Z. Y. 2022. Comparison of support vector machine, Gaussian process regression and decision tree models for energy consumption prediction of campus buildings. 8th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering: Deep Space Intelligent Development and Utilization Forum, ICHCE. 25-27 November, 689-693, Xi'an, China.
- He, L. ve Zhang, L. 2022. A bi-objective optimization of energy consumption and investment cost for public building envelope design based on the ϵ -constraint method. *Energy and buildings*, 266, 112133.
- He, W. 2017. Load forecasting via deep neural networks. *Procedia Computer Science*, 122, 308–314.
- Hu, Y., Cheng, X., Wang, S., Chen, J., Zhao, T., ve Dai, E. 2022. Times series forecasting for urban building energy consumption based on graph convolutional network. *Applied Energy*, 307, 118231.
- Hyndman, R. J. ve Athanasopoulos, G. 2018. *Forecasting: principles and practice*. OTexts, 381, Melbourne.
- Irulegi, O., Ruiz-Pardo, A., Serra, A., Salmerón, J. M. ve Vega, R. 2017. Retrofit strategies towards net zero energy educational buildings: A case study at the University of the Basque Country. *Energy and Buildings*, 144, 387-400.
- Kabiri, E. ve Maftouni, N. 2024. Multiple objective energy optimization of a trade center building based on genetic algorithm using ecological materials. *Scientific Reports*, 14(1), 9366.
- Keeney, R. L. ve Raiffa, H. 1993. *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge university press.
- Khalil, M., McGough, A. S., Pourmirza, Z., Pazhoohesh, M., ve Walker, S. 2022. Machine Learning, Deep Learning and Statistical Analysis for forecasting building energy consumption - A systematic review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115, 105287.
- Khan, Z. A., Ullah, A., Ullah, W., Rho, S., Lee, M. ve Baik, S. W. 2020. Electrical energy prediction in residential buildings for short-term horizons using hybrid deep learning strategy. *Applied Sciences*, 10(23), 8634.

- Kim, J., Moon, J., Hwang, E., ve Kang, P. 2019. Recurrent inception convolution neural network for multi short-term load forecasting. *Energy and buildings*, 194, 328-341.
- Lei, L., Shao, S., ve Liang, L. 2024. An evolutionary deep learning model based on EWKM, random forest algorithm, SSA and BiLSTM for building energy consumption prediction. *Energy*, 288, 129795.
- LeCun, Y., Bengio, Y. ve Hinton, G. 2015. Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- Li, X. ve Wen, J. 2014. Building energy consumption on-line forecasting using physics based system identification. *Energy and buildings*, 82, 1-12.
- Li, K., Hu, C., Liu, G., ve Xue, W. 2015. Building's electricity consumption prediction using optimized artificial neural networks and principal component analysis. *Energy and Buildings*, 108, 106-113.
- Li, X. ve Wu, Y. 2025. A review of complex window-glazing systems for building energy saving and daylight comfort: Glazing technologies and their building performance prediction. *Journal of Building Physics*, 48(4), 496-540.
- Li, Q., Zhang, L., Zhang, L. ve Wu, X. 2021. Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit. *Energy*, 237, 121509.
- Lian, H. H., Wei, H. S., Wang, X. Y., Chen, F. Y., Ji, Y. ve Xie, J. C. 2025. Research on Real-Time Energy Consumption Prediction Method and Characteristics of Office Buildings Integrating Occupancy and Meteorological Data. *Buildings*, 15(2), 404.
- Liang, R., Zheng, X., Liang, J., ve Hu, L. 2023. Energy efficiency model construction of building carbon neutrality design. *Sustainability*, 15(12), 9265.
- Liu, Z., Wu, D., Liu, Y., Han, Z., Lun, L., Gao, J., Jin, G. ve Cao, G. 2019. Accuracy analyses and model comparison of machine learning adopted in building energy consumption prediction. *Energy Exploration & Exploitation*, 37(4), 1426-1451.
- Liu, T., Tan, Z., Xu, C., Chen, H. ve Li, Z. 2020. Study on deep reinforcement learning techniques for building energy consumption forecasting. *Energy and Buildings*, 208, 109675.
- Long, L. D. 2023. An AI-driven model for predicting and optimizing energy-efficient building envelopes. *Alexandria Engineering Journal*, 79, 480-501.
- Luo, X.J., Oyedele, L.O., Ajayi, A.O., Akinade, O.O., Owolabi, H.A., Ahmed, A. 2020. Feature extraction and genetic algorithm enhanced adaptive deep neural network for energy consumption prediction in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109980.
- Lysen, E. H. 1996. The Trias Energica: solar energy strategies for developing countries. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. ABD

- Ma, Z., Ye, C. ve Ma, W. 2019. Support vector regression for predicting building energy consumption in southern China. *Energy Procedia*, 158, 3433-3438.
- Mahjoub, S., Chrifi-Alaoui, L., Marhic, B. ve Delahoche, L. 2022. Predicting Energy Consumption Using LSTM, Multi-Layer GRU and Drop-GRU Neural Networks. *Sensors*, 22(11), 4062.
- Makridakis, S., Spiliotis, E. ve Assimakopoulos, V. 2018. Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PloS one*, 13(3), e0194889.
- Mallala, B., Ahmed, A. I. U., Pamidi, S. V., Faruque, M. O. ve Reddy, R. 2025. Forecasting global sustainable energy from renewable sources using random forest algorithm. *Results in Engineering*, 25, 103789.
- Manno, A., Martelli, E. ve Amaldi, E. 2022. A shallow neural network approach for the short-term forecast of hourly energy consumption. *Energies*, 15(3), 958.
- Mariano-Hernández, D., Hernández-Callejo, L., Solís, M., Zorita-Lamadrid, A., Duque-Pérez, O., Gonzalez-Morales, L., Alonso-Gomez, V., Jaramillo-Duque, A. ve Santos García, F. 2022. Comparative study of continuous hourly energy consumption forecasting strategies with small data sets to support demand management decisions in buildings. *Energy Science & Engineering*, 10(12), 4694-4707.
- Marino, D. L., Amarasinghe, K. ve Manic, M. 2016. Building energy load forecasting using deep neural networks. In *IECON 2016-42nd annual conference of the IEEE industrial electronics society* (pp. 7046-7051). IEEE.
- Marler, R. T. ve Arora, J. S. 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6), 369-395.
- Miettinen, K. 1999. *Nonlinear multiobjective optimization*. Kluwer Academic Publishers, 319, London.
- Mlangeni, S., Ezugwu, A. E. ve Chiroma, H. 2020. Deep learning model for forecasting institutional building energy consumption. In *2020 Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS)* (pp. 1-8). IEEE.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L. ve Kulahci, M. 2015. *Introduction to time series analysis and forecasting*. John Wiley & Sons, 672, New Jersey.
- Naug, A. ve Biswas, G. 2018. A data driven method for prediction of energy demand in commercial buildings. In *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 335-340). IEEE.
- Page, M. J., Moher, D., ve McKenzie, J. E. 2022. Introduction to PRISMA 2020 and implications for research synthesis methodologists. *Research synthesis methods*, 13(2), 156-163.

- Parhizkar, T., Rafieipour, E. ve Parhizkar, A. 2021. Evaluation and improvement of energy consumption prediction models using principal component analysis based feature reduction. *Journal of Cleaner Production*.
- Pazhoohesh, M., Allahham, A., Das, R. ve Walker, S. 2021. Investigating the impact of missing data imputation techniques on battery energy management system. *IET Smart Grid*, 4(2), 162-175.
- Rahman, A., Srikumar, V. ve Smith, A. D. 2018. Predicting electricity consumption for commercial and residential buildings using deep recurrent neural networks. *Applied Energy*, 212, 372-385.
- Reynolds, J., Ahmad, M. W., Rezgui, Y. ve Hippolyte, J. L. 2019. Operational supply and demand optimisation of a multi-vector district energy system using artificial neural networks and a genetic algorithm. *Applied Energy*, 235, 699-713.
- Rinaldi, A., Schweiker, M. ve Iannone, F. 2018. On uses of energy in buildings: Extracting influencing factors of occupant behaviour by means of a questionnaire survey. *Energy and Buildings*, 168, 298-308.
- Runge, J. ve Zmeureanu, R. 2021. A review of deep learning techniques for forecasting energy use in buildings. *Energies*, 14(3), 608.
- Qavidelfardi, Z., Tahsildoost, M. ve Zomorodian, Z. S. 2022. Using an ensemble learning framework to predict residential energy consumption in the hot and humid climate of Iran. *Energy Reports*, 8, 12327-12347.
- Qiao, Y., Hu, F., Xiong, W., Guo, Z., Zhou, X. ve Li, Y. 2023. Multi-objective optimization of integrated energy system considering installation configuration. *Energy*, 263, 125785.
- Sağbaş, A., ve Başbuğ, B. 2018. Sürdürülebilir Kalkınma Ekseninde Enerji Verimliliği Uygulamaları: Türkiye Değerlendirmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), 43–50.
- Sehovac, L., Nesen, C. ve Grolinger, K. 2019. Forecasting building energy consumption with deep learning: A sequence to sequence approach. In 2019 IEEE International Congress on Internet of Things (ICIOT) (pp. 108-116). IEEE.
- Semprini, G., Gulli, R. ve Ferrante, A. 2017. Deep regeneration vs shallow renovation to achieve nearly Zero Energy in existing buildings: Energy saving and economic impact of design solutions in the housing stock of Bologna. *Energy and Buildings*, 156, 327-342.
- Shaikh, A. K., Nazir, A., Khan, I. ve Shah, A. S. 2022. Short term energy consumption forecasting using neural basis expansion analysis for interpretable time series. *Scientific Reports*, 12(1), 22562.

- Shao, M. L., Wang, X., Bu, Z., Chen, X. B. ve Wang, Y. Q. 2020. Prediction of energy consumption in hotel buildings via support vector machines. *Sustainable Cities and Society*.
- Sheng, Y., Arbabi, H., Ward, W. O., Álvarez, M. A. ve Mayfield, M. 2025. City-scale residential energy consumption prediction with a multimodal approach. *Scientific Reports*, 15(1), 5313.
- Son, M., Moon, J., Jung, S. ve Hwang, E. 2018. A short-term load forecasting scheme based on auto-encoder and random forest. In *International Conference on Applied Physics, System Science and Computers* (pp. 138-144). Springer, Cham.
- Steuer, R. E. 1989. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. Malabar: Robert E. Krieger Publishing.
- Sun, Y., Haghighat, F. ve Fung, B. C. 2020. A review of the-state-of-the-art in data-driven approaches for building energy prediction. *Energy and Buildings*, 221, 110022.
- Sun, Z. X., Cui, H., Mei, X. X. ve Yuan, H. L. 2025. A novel twin time series network for building energy consumption predicting. *PLoS One*.
- Tagliabue, L. C., Di Giuda, G. M., Villa, V., De Angelis, E. ve Ciribini, A. L. C. 2018. Techno-economical Analysis based on a Parametric Computational Evaluation for decision process on envelope technologies and configurations. *Energy and Buildings*, 158, 736-749.
- Tanrıvermiş, H. 2016. *Gayrimenkul Değerleme Esasları, Sermaye Piyasası Lisanslama Sicil ve Eğitim Kuruluşu A.Ş., Lisanslama Sınavları Çalışma Kitapları, Gayrimenkul Değerleme Esasları*, 505, Ankara.
- Thompson, N. C., Greenewald, K., Lee, K. ve Manso, G. F. 2020. The computational limits of deep learning. *arXiv preprint arXiv:2007.05558*, 10, 2.
- Tudose, A. M., Picioroaga, I. I., Sidea, D. O., Bulac, C. ve Boicea, V. A. 2021. Short-term load forecasting using convolutional neural networks in COVID-19 context: the Romanian case study. *Energies*, 14(13), 4046.
- Türkşen, Ö. 2011. Çok yanıtlı yüzey problemlerinin çözümüne bulanık ve sezgisel yaklaşım. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı, 139, Ankara.
- Türkşen, Ö. 2023. *Optimizasyon yöntemleri ve Matlab, Python, R uygulamaları*. Nobel yayınevi, 448, Ankara.
- Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C. ve Petrichenko, K. 2015. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85-98.
- Vandenbogaerde, L., Verbeke, S., ve Audenaert, A. 2023. Optimizing building energy consumption in office buildings: A review of building automation and control

- systems and factors influencing energy savings. *Journal of Building Engineering*, 76, 107233.
- Wang, Y. ve Wei, C. 2021. Design optimization of office building envelope based on quantum genetic algorithm for energy conservation. *Journal of Building Engineering*, 35, 102048.
- Wang, S., Wang, S., Chen, H. ve Gu, Q. 2020. Multi-energy load forecasting for regional integrated energy systems considering temporal dynamic and coupling characteristics. *Energy*, 195, 116964.
- Wang, Z., Wang, Y., Zeng, R., Srinivasan, R. S. ve Ahrentzen, S. 2018. Random Forest based hourly building energy prediction. *Energy and Buildings*, 171, 11-25.
- Wei, Y., Zhang, X., Shi, Y., Xia, L., Pan, S., Wu, J., Han, M. ve Zhao, X. 2018. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1027-1047.
- Wells, L., Rismanchi, B. ve Aye, L. 2018. A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context. *Energy and Buildings*, 158, 616-628.
- Wen, L., Zhou, K. ve Yang, S. 2020. Load demand forecasting of residential buildings using a deep learning model. *Electric Power Systems Research*, 179, 106073.
- Yaman, G. Ö. 2025. Determination of Optimum Passive Design Parameters for Industrial Buildings in Different Climate Zones Using an Energy Performance Optimization Model Based on an Artificial Neural Network (ANN) and Particle Swarm Optimization (PSO). *Sustainability*, 17(6), 2357.
- Yang, M. D., Lin, M. D., Lin, Y. H. ve Tsai, K. T. 2017. Multiobjective optimization design of green building envelope material using a non-dominated sorting genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1255-1264.
- Yang, F., ve Mao, Q. 2023. Auto-Evaluation Model for the Prediction of Building Energy Consumption That Combines Modified Kalman Filtering and Long Short-Term Memory. *Sustainability*. 15 (22), 15749.
- Yang, Y., Lu, F. ve Qing, L. 2024. Multiobjective Optimization Method for Energy-Saving Design of Green Buildings. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1), 9776633.
- Yang, Y., Bjørnskov, J. ve Jradi, M. 2025. Optimizing HVAC systems with model predictive control: integrating ontology-based semantic models for energy efficiency and comfort. *Frontiers in Energy Research*, 13, 1542107.
- Yao, S., Jiang, Z., Yuan, J., Wang, Z. ve Li, Y. 2022. Multi-objective optimization of transparent building envelope of rural residences in cold climate zone. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, 102052.

- Yousefi, F., Gholipour, Y. ve Yan, W. 2017. A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants' data. *Energy and Buildings*, 148, 182-198.
- Zadeh, L. 1963. Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 8, 59-60.
- Zeleny, M. 1982. *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, Company.
- Zeng, A., Liu, S. ve Yu, Y. 2019. Comparative study of data driven methods in building electricity use prediction. *Energy and Buildings*, 194, 289-300.
- Zhang, G. P. 2003. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, 50, 159-175.
- Zhang, L., Wen, J., Li, Y., Chen, J., Ye, Y., Fu, Y. ve Livingood, W. 2021. A review of machine learning in building load prediction. *Applied Energy*, 285, 116452.
- Zhao, T., Xu, J., Zhang, C. ve Wang, P. 2021. A monitoring data based bottom-up modeling method and its application for energy consumption prediction of campus building. *Journal of Building Engineering*, 35, 101962.
- Zhou, C., Fang, Z., Xu, X., Zhang, X., Ding, Y., ve Jiang, X. 2020. Using long short-term memory networks to predict energy consumption of air-conditioning systems. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102000.
- Zor, K., Çelik, O., Timur, O. ve Teke, A. 2020. Short-term building electrical energy consumption forecasting by employing gene expression programming and GMDH networks. *Energies*, 13(5), 1102.