



Technical and financial analysis of energy efficiency measures taken for transforming of existing qualified residential buildings into nZEBs: The case of Istanbul

Begüm Diker^{1*}, Fatih Yazıcıoğlu²

¹Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, Özyeğin University, 34794, İstanbul, Türkiye

²Department of Architecture, Faculty of Architecture, İstanbul Technical University, 34367, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Identification of energy efficiency measures for existing building retrofits
- Calculation of building energy consumption and global cost for each scenario
- Comparison of energy and cost efficiency rates

Keywords:

- Building energy performance
- Energy efficient building retrofit
- Energy efficiency measures (EEMs)
- Residential building retrofit
- Global cost analyses

Article Info:

Research Article

Received: 15.10.2024

Accepted: 19.05.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1567069

Acknowledgement:

This study is derived from Begüm Diker's doctoral thesis titled "Conversion of Existing Residential Buildings in Turkey into nZEB with Energy Efficiency Improvements: Financial Barriers and Solution Proposals", which was carried out under the supervision of Assoc. Prof. Dr. Fatih Yazıcıoğlu in the Building Sciences Program of the Department of Architecture at İstanbul Technical University

Correspondence:

Author: Begüm Diker

e-mail:

begum.diker@ozyegin.edu.tr

phone: +90 555 623 2057

Graphical/Tabular Abstract

Building energy efficiency is a key concern due to its significant contribution to overall energy demand and greenhouse gas emissions. To enhance the energy performance of buildings, energy efficiency improvements are necessary, especially in the existing building stock. This research focuses on existing residential buildings in İstanbul, Türkiye to assess the impact of various energy efficiency measures (EEM) applicable to them. The research examines single measures such as building envelope improvements -including insulation on exterior wall (YLTM-D), roof (YLTM-Ç) and glazing improvements (C1-C4)- as well as a radiant heating system (ISITMA-DS), a daylight sensor lighting control system (AYD-KONTROL) and a photovoltaic system. Afterwards, combinations of all single measures (S1-S22) are examined and all EEMs are evaluated in terms of energy efficiency (EE), initial investment cost, annual energy cost and global cost. The primary energy consumption and global costs associated with these EEMs are illustrated in Figure A.

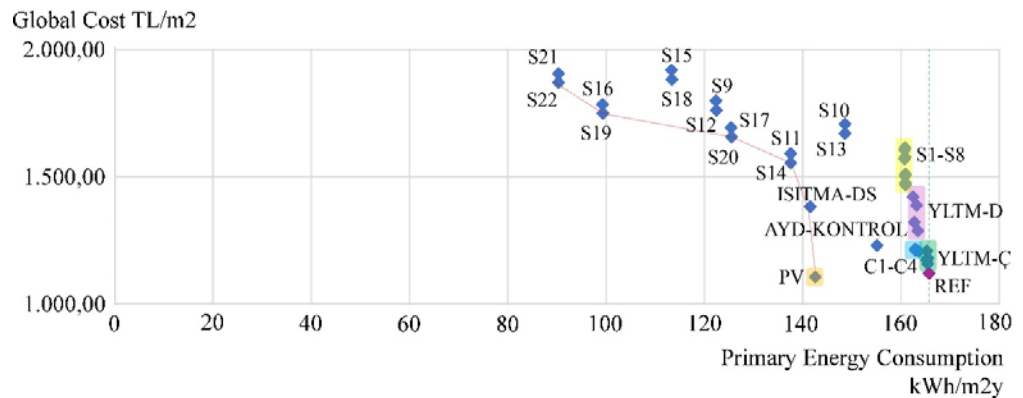


Figure A. Primary energy consumptions and global costs of energy efficiency measures

Purpose: This study aims to conduct a comprehensive technical and financial analysis of the EEMs that can be applied in the transformation process of the existing building stock into nearly zero energy buildings (nZEB), with a particular focus on the city of İstanbul, Türkiye.

Theory and Methods: A reference building, which represents the majority of the building stock in İstanbul, was modelled with all data inputs processed using *DesignBuilder*. After calculation of energy performance of the reference building via *EnergyPlus*, single measures and package of measures applied on the reference building to enhance EE. Each measure was evaluated in terms of energy performance and cost-effectiveness.

Results: When all EEMs applied to the reference building were evaluated, the maximum energy efficiency (EE) rate was 45%, while the highest cost effectiveness rate was 1.34%. In comparison to the reference building, the only cost-optimal scenario was PV system with 14% EE rate and additional cost of 390,49 TL/m².

Conclusion: This study demonstrates that energy performance of existing buildings can be enhanced through various EEMs. However, cost-effectiveness of the scenarios examined in this research is relatively low. To increase cost-effectiveness of scenarios, it is crucial to reduce real discount rates. Additionally, the development of financial instruments aimed at promoting energy efficiency in residential buildings, along with mechanisms to distribute the financial burden among end users, could significantly drive the adoption of energy efficiency projects across the country.



Mevcut nitelikli konut binalarının nSEB'e dönüştürülmesi için alınabilecek enerji verimliliği önlemlerinin teknik ve finansal analizi: İstanbul örneği

Begüm Diker^{1*}, Fatih Yazıcıoğlu²

¹Özyeğin Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34794, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34367, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Mevcut konut binalarının yenilenmesine yönelik enerji verimliliği önlemlerinin belirlenmesi
- Her senaryo için bina enerji tüketimi ve toplam maliyetin hesaplanması
- Enerji ve maliyet verimliliği oranlarının karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.10.2024

Kabul: 19.05.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1567069

Anahtar Kelimeler:

Bina enerji performansı,
enerji verimli bina
iyileştirmesi,
enerji verimliliği önlemleri,
konut binası yenilemesi,
küresel maliyet analizi

ÖZ

Bina enerji verimliliği, toplam enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki belirgin etkisi nedeniyle sürdürülebilir kalkınmanın temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Binaların enerji performansını artırmak için özellikle mevcut yapı stokunda enerji verimliliği iyileştirmeleri gereklidir. Bu çalışma, İstanbul, Türkiye'deki mevcut konut binalarına uygulanabilir çeşitli enerji verimliliği önlemlerinin etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, dış duvar (YLTm-D), çatı (YLTm-Ç) yalıtımı ve cam sistemleri (C1-C4) gibi yapı kabuğu iyileştirmeleri; yerden ısıtma sistemi (ISITMA-DS), gün ışığı sensörlü aydınlatma kontrol sistemi (AYD-KONTROL) ve fotovoltaik sistem gibi tekil önlemler incelenmiştir. Ardından, tüm tekil önlemlerin çeşitli kombinasyonları (S1-S22) değerlendirilmiş ve tüm senaryolar enerji verimliliği, ilk yatırım maliyeti, yıllık enerji maliyeti ve küresel maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Tüm enerji verimliliği önlemleri (EEM) referans binaya uygulandığında, en yüksek enerji verimliliği oranı %45, en yüksek maliyet etkinliği oranı ise %1,34 olarak hesaplanmıştır. Referans bina ile karşılaştırıldığında, tek maliyet-optimum senaryo %14 enerji verimliliği oranına ve 390,49 TL/m² ek maliyete sahip fotovoltaik (PV) sistem olmuştur. Çalışma, mevcut binaların enerji performansının çeşitli enerji verimliliği önlemleriyle artırılabilirliğini; ancak maliyet etkinliğini artırmak için reel iskonto oranlarının düşürülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bunun yanında, konutlarda enerji verimliliğini teşvik eden finansal araçlar ile mali yükün kullanıcılar arasında paylaştırılmasına yönelik mekanizmaların geliştirilmesinin, bu tür projeleri yaygınlaştıracığı düşünülmektedir.

Technical and financial analysis of energy efficiency measures taken for transforming of existing qualified residential buildings into nZEBs: The case of Istanbul

H I G H L I G H T S

- Identification of energy efficiency measures for existing building retrofits
- Calculation of building energy consumption and global cost for each scenario
- Comparison of energy and cost efficiency rates

Article Info

Research Article

Received: 15.10.2024

Accepted: 19.05.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1567069

Keywords:

Building energy
performance, energy
efficient building retrofit,
energy efficiency measures
(EEMs),
residential building retrofit,
global cost analyses.

ABSTRACT

Building energy efficiency is considered one of the key components of sustainable development due to its significant impact on total energy consumption and greenhouse gas emissions. To improve the energy performance of buildings, energy efficiency upgrades are particularly necessary in the existing building stock. This study aims to evaluate the impact of various energy efficiency measures (EEMs) applicable to existing residential buildings in Istanbul, Turkey. The research examines individual measures such as building envelope improvements-including insulation on exterior walls (YLTm-D), roof (YLTm-Ç), and glazing systems (C1-C4); a radiant heating system (ISITMA-DS); a daylight sensor lighting control system (AYD-KONTROL); and a photovoltaic system. Subsequently, various combinations of all individual measures (S1-S22) are assessed, and all scenarios are compared in terms of energy efficiency, initial investment cost, annual energy cost, and global cost. When all EEMs were applied to the reference building, the maximum energy efficiency rate was calculated as 45%, while the highest cost-effectiveness rate was 1.34%. Compared to the reference building, the only cost-optimal scenario was the photovoltaic (PV) system, with a 14% energy efficiency rate and an additional cost of 390.49 TL/m². The study demonstrates that the energy performance of existing buildings can be improved through various EEMs; however, to increase cost-effectiveness, it is necessary to reduce real discount rates. In addition, the development of financial instruments to promote energy efficiency in residential buildings, along with mechanisms to distribute the financial burden among users, is considered likely to support the widespread adoption of such projects.

1. Giriş (Introduction)

Kentler, enerji tüketimi ve antropojenik emisyonların önemli bir kısmından sorumlu tutulmaktadır. Enerji talebindeki sürekli artış ve beraberinde gelen çevresel bozulma, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde çeşitli disiplinler arası platformlarda tartışılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, kentlerdeki binalar enerji tüketiminin %30'unu ve küresel emisyonların %26'sını oluşturmaktadır [1]. Bu doğrultuda, Avrupa Birliği öncülüğünde birçok ülke binaların enerji performansını iyileştirmeye ve emisyonları dengelemeye yönelik stratejik eylem planları oluşturmuştur.

Binaların enerji performans iyileştirilmesine ilişkin başlıca dokümanlardan biri, Avrupa Komisyonu'nun hazırlamış olduğu Binalarda Enerji Performans Direktifi' dir. Bu direktif, binaların enerji verimliliğini artırmaya yönelik en temel düzenleyici çerçevelerden biri olup, bina enerji performansının değerlendirilmesine ve sıfır enerjili bina hedeflerine ulaşılmasına rehberlik etmektedir. İlk olarak 2002 yılında yayımlanan, 2010, 2018 ve son olarak 2024 yılında yenilenen direktifte, sera gazı emisyonu azaltımı, yenilenebilir enerji kullanımı, bina enerji performansının hesaplama metodolojileri gibi konulara yer verilmiştir. 2010 yılında yayımlanan direktifte, ilk defa "neredeyse sıfır enerjili bina (nSEB)" kavramının tanımı yapılmış ve üye devletlerin yerel koşullarına uygun olan nSEB seviyelerinin belirlemeleri istenmiştir. Neredeyse sıfır enerjili bina; "...çok yüksek enerji performansına sahip, sifıra yakın ya da çok düşük miktarda enerji ihtiyacı olan ve bu enerjinin büyük ölçüde yerinde veya yakında üretilen yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı bina" olarak tanımlanmaktadır [2]. Direktife göre bu seviyenin aynı zamanda maliyet optimum olması beklenmektedir. Bu kapsamda, çeşitli ülkelerde yürütülen çalışmalar, nSEB dönüşümlerinin uygulanabilirliği ve maliyet etkinliği açısından farklı yaklaşımlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, binaların enerji performans iyileştirmeleri çok boyutlu bir yaklaşımla ele alınmış ve literatür taraması belirli temalar etrafında yapılandırılmıştır. Öncelikle, enerji performansının hesaplanmasında kullanılan simülasyon yöntemleri ve modelleme yaklaşımlarına odaklanılmıştır. Enerji verimliliği yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik bir parametre olduğundan, enerji ve optimum maliyet analizleri ayrı bir değerlendirme başlığı altında ele alınmıştır. Bina ölçeğindeki yenilemelerde özellikle bina kabuğu üzerinde durulurken, daha geniş ölçekte enerji verimliliği stratejilerinin bölge ve mahalle ölçeğinde nasıl uygulandığı da incelenmiştir. Ayrıca, enerji verimli dönüşümlerin yalnızca teknik müdahalelerle sınırlı olmadığı, kullanıcı konforu ve mekânsal davranış örüntülerinin de bu süreçte belirleyici bir rol oynadığı göz önünde bulundurularak, iç hava kalitesi, ısı konfor ve kullanıcı etkileşimleriyle ilgili çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu başlıklandırma, binalarda enerji verimliliğinin teknik, ekonomik ve kullanıcı odaklı yönlerini bütüncül bir şekilde ele almayı ve konuyla ilgili çok katmanlı bir değerlendirme çerçevesi sunmayı hedeflemektedir.

Binaların enerji performans değerlendirmesinde önemli bir rol oynayan simülasyon araçları, farklı iklim senaryoları ve bina tipolojilerinde enerji tüketimini öngörmek ve optimize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ballarini vd. [3], düşük enerjili binaların enerji performansını tahmin etmek için bir enerji simülasyon yazılımı olan EnergyPlus yazılımından faydalanmışlardır. Corrado vd. [4], İtalyan referans binaların nSEB'e dönüştürülmesi için iklim ve bina tipine bağlı olarak değişen önlem paketleri oluşturmuş ve dinamik enerji simülasyonları kullanarak enerji performans hesaplamaları yapmışlardır. Çalışma, enerji verimliliği önlemlerinin farklı bina tiplerinde nasıl değişkenlik gösterdiğini ortaya koyması

açısından önemlidir. Ascione vd. [5] ise araştırmalarında, konut binalarına odaklanan ve EnergyPlus ile MATLAB®'ı entegre eden 'EMAR' isimli, kullanıcı dostu bir bina enerji simülasyon aracını geliştirmişlerdir.

Enerji ve maliyet optimizasyonu, nSEB dönüşümlerinin uygulanabilirliği açısından kritik bir unsurdur. Corrado vd. [6], Torino'daki bir okul binası üzerinden oluşturdukları model kapsamında, farklı enerji verimliliği önlemlerinin maliyet etkinliğini analiz etmiş ve nSEB hedefleri doğrultusunda hangi önlemlerin uygulanabilir olduğunu belirlemiştir. Çalışmada kullanılan yöntem, enerji tüketimi ve maliyet optimizasyonunun birlikte değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Lorenzati vd. [7], İtalya'nın kuzeyindeki bir sosyal konut binasının nSEB'e dönüşümü sürecinde alınabilecek önlemleri belirleyerek teknik ve mali analizleri gerçekleştirmiştir. Bazı araştırmacılar ise enerji yenilemesi ve sismik güçlendirmeyi birlikte ele almış ve bu kapsamda oluşturulan senaryolar üzerinden bir değerlendirme yapmıştır [8]. Penna vd. [9], konut binalarındaki termal konforsuzluk ile nSEB tanımındaki maksimum ekonomik performans ve enerji tüketiminin en aza indirilmesine yönelik optimal yenileme çözümleri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Bunun için dinamik bir simülasyon aracı ile birleştirilen bir genetik algoritma (NSGA-II) üzerinden çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Ferreira vd. [10-13], Portekiz 'de bina enerji iyileştirmelerinin faydaları ve nSEB yenilemelerinin maliyet uygunluğu hakkında araştırmalar yapmışlardır. De Luca vd. [14], nSEB iyileştirmelerinde yenilenebilir enerji teknolojilerinin etkisini değerlendirmişlerdir. Tarihi binalarda enerji verimliliği iyileştirmelerinin maliyet etkinliği üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur [15, 16].

Mevcut binaların nSEB dönüşümünde bina kabuğu iyileştirmeleri önemli bir yer tutmaktadır. Mauro vd. [17], bina kabuğunun yenilikçi enerji verimli çözümlerle iyileştirilmesi üzerine çalışmış ve bu kapsamda enerji performans ve maliyet analizleri gerçekleştirmişlerdir. Ascione vd. [18], çift cidarlı ve duyarlı cephe sistemleri üzerinden bina kabuğunu güçlendirme çözümlerini araştırmışlardır. Assimakopoulos vd. [19] ise, mevcut binalara cephe dönüşümü yoluyla ek hacimler oluşturmayı hedefleyen çok aşamalı bir yaklaşım önermiş; bu kapsamda ekonomik etkileri en aza indirgeyerek bina sakinleri için konfor koşullarını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamışlardır. Prefabrikte yapıtım elemanları ve modüller paneller kullanılarak mevcut bina kabuğunun iyileştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar da bulunmaktadır [20-22].

Bazı araştırmacılar, mevcut binaların enerji odaklı dönüşüm süreçlerini kullanıcı konfor parametreleri üzerinden analiz etmiştir. De Luca, Ballarini vd. [23-26], nSEB'e dönüştürülmesi hedeflenen mevcut binalarda iç hava kalitesi, ısı ve görsel konfor üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Bazı araştırmalar ise, nSEB yenilemelerinde kullanıcı gereksinimlerinin ve davranışlarının enerji verimliliğine etkileri üzerinde yoğunlaşmıştır [27-29]. Kullanıcı konforu, binaların enerji performansına doğrudan etki eden bir parametre olup, yalnızca enerji tüketim düzeyini değil, aynı zamanda kullanıcı deneyimini de optimize etmeye yönelik stratejiler geliştirilmesini gerektirmektedir.

Araştırmacıların bazıları, çalışmanın finansal boyutu üzerinde yoğunlaşarak nSEB iyileştirme sürecindeki geri ödeme süreleri, mevcut bina yenilemelerinde uygulanabilecek finansal teşvikler ile konut binalarının enerji dönüşüm sürecinde görev alan paydaşlara yönelik öneriler getirmişlerdir. [30-32]. Bu bağlamda, Ferrante vd. [33, 34], geri ödeme süresini azaltmayı ve mevcut binaların kapsamlı yenileme süreçlerinde yatırımcılar ile paydaşları teşvik etmeyi amaçlayan 'ABRACADABRA' isimli bir HORIZON 2020 projesinde görev almıştır.

Enerji verimliliği iyileştirmelerinde yerleşme ölçeğinde yapılan çalışmalar da mevcuttur. Ascione vd. [35], coğrafi bilgi sistemi (GIS) aracılığıyla bölgelerin enerji planlaması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Ayrıca, enerji verimliliği iyileştirmesi kapsamında İtalya’da örnek bir mahalle üzerinden bina kabuğu bileşenleri, HVAC sistemleri ve fotovoltaiik sistemlere ilişkin önlemler almış ve kapsamlı bir enerji ve maliyet optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir [36]. Peron vd. [37], İtalya’nın çeşitli şehirlerinde uygulanmış örnekler üzerinden bölge ölçeğinde yenilenebilir enerji planlamasının avantaj ve dezavantajlarını tartışmışlardır. Benzer şekilde, Rose vd. [38], bölge düzeyinde gerçekleştirilen bina yenileme uygulamaları üzerinden bir değerlendirme yapmışlardır. Bu tür çalışmalar, bina ölçeğinin ötesine geçerek daha geniş bir perspektifte enerji verimliliği stratejilerinin nasıl uygulanabileceğine ilişkin çok katmanlı bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.

Küresel ölçekteki çalışmalara paralel olarak, Türkiye’de enerji verimliliğine ilişkin yasal çerçeve değerlendirildiğinde, 2007 yılında yürürlüğe giren Enerji Verimliliği Kanunu ile bir yasal altyapı oluşturulmuş [39], 2008 Aralık ayında Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği yayımlanmış, 2010 Aralık ayında ise BEP-TR Ulusal Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi Resmi Gazete’de ilan edilmiştir [40, 41]. Binalardaki net ısıtma enerjisi gereksinimlerini belirleyen TS 825 standardı, ilk olarak 1998 yılında yürürlüğe girmiş olup, 2008, 2013 ve 2024 yıllarında güncellenerek günümüz gereksinimlerine uyarlanmıştır. Ayrıca, Enerji Verimliliği Strateji Belgesi (2012-2023), Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planları (2017-2023 ve 2024-2030), “*binaların enerji taleplerini ve karbon emisyonlarını azaltmak, sürdürülebilir ve çevre dostu binaları yaygınlaştırmak*” gibi önemli hedefleri içermektedir.

Bu kapsamda, binalarda enerji verimliliğine yönelik ulusal düzeyde pek çok çalışma yapılmıştır. Acar [42], Türkiye için nSEB tasarımına yönelik bir yaklaşım geliştirerek genetik optimizasyon algoritması ile yapı kabuğu değişkenlerini optimize etmiş ve yenilenebilir enerji sistemlerini entegre etmiştir. Matlab ve EnergyPlus yazılımlarının kullanıldığı çalışmada, dört farklı iklim bölgesinde enerji üretim potansiyelleri değerlendirilmiştir. Çelik [43], Erzurum’da bir üniversite binasında enerji performans ve maliyet analizleri yapmış; Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemleriyle farklı enerji verimliliği senaryolarını karşılaştırmıştır. Sonuçlar, ekonomik parametrelerin diğer kriterlere kıyasla daha belirleyici olduğunu göstermektedir. Arıkan [44], Antalya’da bir otelin enerji performansını analiz ederek pasif sistem önerileri geliştirmiş; ancak nSEB seviyesine ulaşmak için aktif sistemlerin de entegrasyonunun gerekli olduğu sonucuna varmıştır. Sattari [45], Ankara’da bir TOKİ konut binasında yalnızca yapı kabuğuna yönelik tasarım stratejileri ile %3-4 oranında enerji tasarrufu sağlandığını belirlemiştir. Ganiç Sağlam [46], İstanbul, Antalya ve Erzurum’da çok katlı konut binalarının enerji performansını inceleyerek kullanıcı davranışlarını dikkate alan senaryolar oluşturmuş; düşük faizli krediler gibi finansal teşviklerin nSEB hedeflerine ulaşılabilirliği artırabileceğini vurgulamıştır. Kalaycıoğlu [47], EPBD Recast kapsamında belirlenen optimum maliyet ve nSEB seviyelerinin yerleşim ölçeğinde uygulanmasına yönelik bir metodoloji geliştirmiştir. Eskişehir’de farklı bina tipleri için yapılan enerji simülasyonları sonucunda, enerji verimliliği önlemleri ve bölgesel enerji sistemleri senaryoları karşılaştırılmıştır. Çalışma, yüksek yatırım maliyetleri ve uzun geri ödeme sürelerinin Türkiye’de nSEB seviyelerine ulaşılabilirliğin önündeki en büyük engellerden biri olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan literatür taraması, enerji verimliliği odaklı bina dönüşüm süreçlerinin kentsel yerleşme, yapı kabuğu ve yapı bileşeni ölçeklerinde çok katmanlı bir perspektifle incelendiğini ortaya koymaktadır. Mevcut literatürde, ülkelerin yerel koşullarına bağlı olarak neredeyse sıfır enerjili bina (nSEB) ve maliyet-optimum

seviyelerinin belirlenmesine odaklanıldığı görülmektedir. 2022 yılında Türkiye’de nSEB kavramı ulusal mevzuata dahil edilmiştir. Yönetmelikteki tanımına göre; “*Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nSEB): Yüksek enerji performansına ve aynı zamanda belli oranda yenilenebilir enerji kullanımına sahip olan binayı,*” ifade etmektedir. Yönetmelikte, toplam yapı inşaat alanı 2000 m² ve üzere olan binaların nSEB olarak inşa edilmesi ve birincil enerji tüketim değerlerinin en az %10’unun yenilenebilir enerji katnaklarından karşılanması zorunlu tutulmuştur. Mevzuatta tanımlanan nSEB kriterlerinin, mevcut durumda yalnızca yeni yapılacak binalara yönelik olarak kurgulandığı anlaşılmaktadır; Ancak istatistiksel veriler, Türkiye’de 2007-2019 yılları arasında yapı ruhsatı almış – mevcut– binaların %84,60’ının konut kullanımlı olduğunu, söz konusu binaların %53’ünün üç veya daha fazla daire içerdiği, ve ağırlıklı olarak 4, 5 ve 6 katlı binalardan oluştuğunu göstermektedir [48]. Bu binaların yaklaşık 75-80 yıllık bir yaşam ömrüne sahip olduğu göz önüne alındığında, mevcut bina stokunun inşa edildiği enerji performans seviyesinde –zamanla azalan bir verimlilikle- en az 50 yıl daha varlığını sürdüreceği söylenebilir. Dolayısıyla, ulusal enerji verimliliği strateji belgeleri, eylem planları ve 2053 yılı hedefleri doğrultusunda ilgili mevcut bina stokunun da ivedilikle yenilenecek nSEB seviyelerine ulaştırılması gerekmektedir.

Bu araştırma, Türkiye’deki mevcut konut binalarının enerji verimliliği dönüşümüne yönelik teknik önlemleri belirlemekte ve bu önlemlerin uygulanabilirliğini finansal analizler doğrultusunda değerlendirmektedir. Çalışmada, mevcut bina stokunun yoğunlaştığı İstanbul ili odak alınarak, özellikle 2007-2019 yılları arasında yapı ruhsatı almış konut binalarının neredeyse sıfır enerjili bina (nSEB) seviyesine dönüştürülme potansiyeli teknik ve ekonomik parametreler çerçevesinde incelenmiştir.

2. Yöntem (Methodology)

2002 yılında yayımlanan ve 2010 ile 2018 yıllarında güncellenen Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD), sera gazı emisyonlarının azaltılması, yenilenebilir enerji teknolojilerinin binalarda ve yakın çevrede kullanımı ve binalarda enerji tüketiminin hesaplanmasına yönelik ortak bir metodolojik çerçevenin belirlenmesi gibi konuları kapsamaktadır. Özellikle 2010 yılı revizyonunda, neredeyse sıfır enerjili bina (nSEB) tanımı ile optimum maliyet düzeyine ilişkin yeni düzenlemeler getirilmiş ve üye ülkelerin kendi ulusal koşullarına uygun hesaplama metodolojileri geliştirmeleri gerektiği vurgulanmıştır [49]. Bu doğrultuda, Türkiye’de 2010 yılında yayınlanan BEP-TR Ulusal Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi, EN 13790 standardında yer alan basit saatlik dinamik hesaplama yöntemine dayanmakta; ısıtma ve soğutma için net enerji ihtiyacının hesaplanması, aydınlatma enerjisi gereksinimlerinin belirlenmesi ve mekanik sistemler için enerji tüketiminin hesaplanmasına yönelik metodolojik çerçeveler sunmaktadır [41, 50]. Ancak, ulusal hesaplama yöntemi maliyet-optimum seviyelerin belirlenmesine yönelik herhangi bir metodoloji içermemektedir. Bu nedenle, Avrupa Bina Performans Enstitüsü’nün 2010 yılında yayımladığı raporda [51] önerilen bina enerji performansı ve maliyet-optimum seviyelerinin belirlenmesine yönelik işleyiş şeması bu araştırmanın kapsamına uygun olarak yeniden düzenlenmiştir.

Buna göre ilk aşamada, mevcut bina stokunu fiziksel, iklimsel ve karakteristik özellikler bakımından büyük ölçüde temsil eden bir referans bina tanımlanmıştır. Referans bina oluşturma sürecinde “teorik referans bina” metodu kullanılmıştır. Teorik referans bina, mevcut bina stokunda belirli bir kategoriye ait özelliklerin istatistiksel verilerle birleştirilmesi ve en yaygın kullanılan yapı sistemleri ile malzemelerinin tek bir bina özelinde bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır [52, 53].

Referans binaya ilişkin veri toplama sürecinde ağırlıklı olarak literatürden faydalanılmış; bu kapsamda TÜİK veri tabanı, ulusal tez merkezi, resmi kurum ve sektör faaliyet raporları temel veri kaynakları olarak ele alınmıştır. Referans bina modeli *DesignBuilder* programında oluşturulmuş ve gerekli tüm veri girişleri ilgili programda yapılmıştır.

İkinci aşamada, mevcut konut stokunu temsil eden referans binanın enerji performansı *EnergyPlus* isimli bina enerji simülasyon programı ile hesaplanmıştır. Dengeleme sınırı olarak, ısıtma, soğutma, aydınlatma, sıcak su sistemleri ve elektrikli ev aletlerine ilişkin enerji tüketimleri hesaplamalara dahil edilmiştir.

Üçüncü aşamada, referans binanın mevcut durumdaki enerji performansını geliştirmeye yönelik tekil önlemler ve önlem paketleri üzerine odaklanılmıştır. Enerji verimliliği artırıcı önlemlerin belirlenmesi sürecinde duyarlılık analizleri kapsam dışı bırakılmış, söz konusu önlemler güncel literatürden yararlanılarak oluşturulmuştur.

Dördüncü aşamada, kurgulanan her bir enerji verimliliği önleminin enerji performansı hesaplanmıştır. Beşinci aşamada ise, önlemlerin finansal performansının hesaplanabilmesi için küresel maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ağırlıklı olarak Bina Enerji Performans Direktifi'nde belirtilen maliyet-optimum seviyeleri belirleme metodolojileri ile BS EN 15459 standardından

yararlanılmıştır. Altıncı ve son aşamada, çalışılan her bir önlem enerji etkinlik, ilk yatırım ve yıllık enerji maliyetleri ile küresel maliyetler açısından referans bina ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Çalışmanın işleyiş şeması Şekil 1'de verilmektedir.

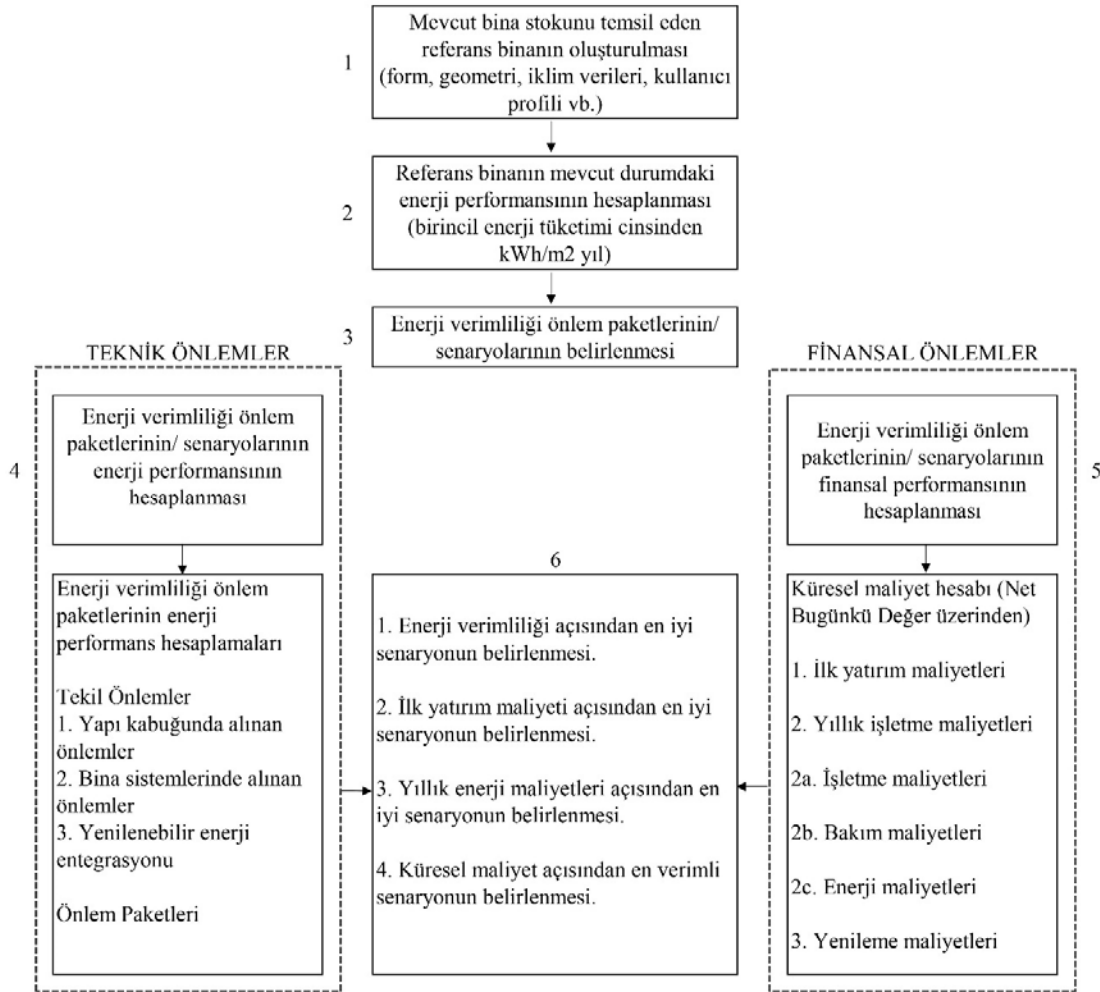
3. Türkiye'deki Mevcut Konut Binalarının Enerji Performansının Hesaplanması

(Energy Performance Assessment of Existing Residential Buildings in Turkey)

Çalışma kapsamında Türkiye'deki konut binalarının enerji performansının belirlenebilmesi amacıyla, binaların fiziksel, iklimsel ve diğer özelliklerini önemli ölçüde temsil eden bir referans bina kurgulanmıştır. Referans binanın, Türkiye'de 2007-2019 yılları arasında yapı ruhsatı almış bir bina olduğu kabul edilmiştir. 2007 öncesi binalar Deprem Yönetmeliği'ne tabi olmadığından ve taşıyıcılık açısından detaylı bir inceleme gerektirdiğinden bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

Referans bina özelliklerinin belirlenebilmesi için Şekil 2'deki veri toplama süreci yürütülmüş ve her bir parametre için gerekli veriler toplanmıştır.

İstatistiksel verilere göre, Türkiye'de 2007-2019 yılları arasında yapı ruhsatı almış binaların %84,60'sı konut kullanımlıdır. Yapılan değerlendirmede, söz konusu binaların %53'ünün üç veya daha fazla



Şekil 1. Çalışmanın işleyiş şeması (Workflow diagram of the study)

daire içerdiği, kat sayısı açısından yapılan incelemede ise 4, 5 ve 6 katlı binaların ağırlıklı olduğu tespit edilmiştir [48]. Çok haneli konut binalarının iklim bölgelerine göre dağılımına bakıldığında, 2. İklim bölgesinde mevcut bina stokunun yoğunlaştığı anlaşılmaktadır [54]. Bu nedenle, çalışmada 2 iklim bölgesini temsilen İstanbul'da 4 katlı (8 daireli) bir konut binası referans bina olarak ele alınmıştır.

Referans binanın ortalama taban alanının bulunurken, TÜİK veri tabanında 2007-2019 yılları arasında yapı ruhsatı alan 4 katlı konut binalarının kat alanlarının yüzölçümleri, her yıl için toplam bina alanı kat sayısına bölünerek aşağıdaki Eş. 1 ile hesaplanmıştır. Eşitlikte;

BORT : Bina Ortalama Taban Alanı

A_i : i yılındaki yapı sayısı

B_i : i yılındaki bina toplam yüzölçümü (m^2)

K: Kat sayısı değerlerini ifade etmektedir.

$$BORT = [B_{i1}/A_{i1} + B_{i2}/A_{i2} + B_{i3}/A_{i3} + \dots] / K \quad (1)$$

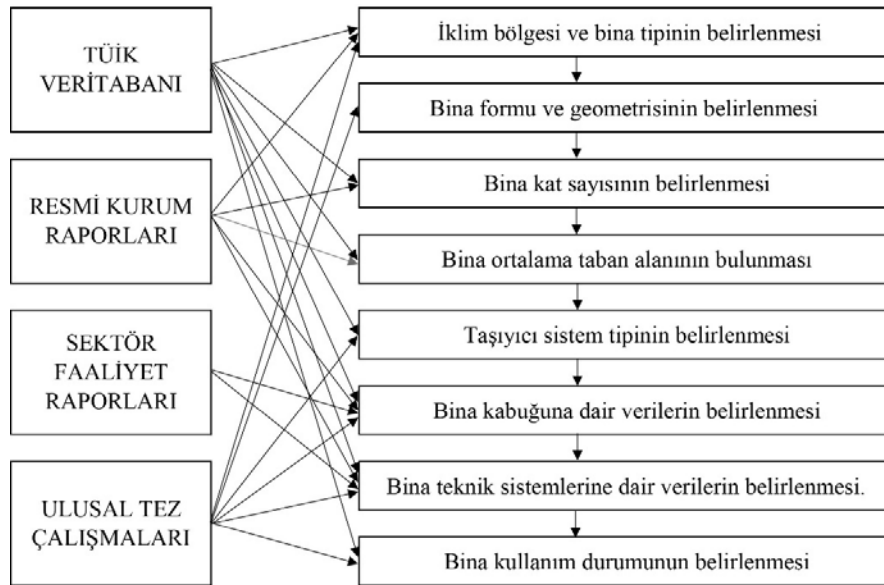
Buna göre çalışma kapsamında seçilen 4 katlı referans binanın taban alanı 223 m^2 olarak hesaplanmıştır. Taşıyıcı sistem tipinin

belirlenmesi sürecinde ise TÜİK verilerinden yararlanılmış; inceleme sonucunda çalışma evrenindeki binaların %99,07'sinin betonarme sistem ile inşa edildiği görülmüştür [48]. Bu nedenle referans binanın taşıyıcı sistem tipi betonarme sistem olarak belirlenmiştir.

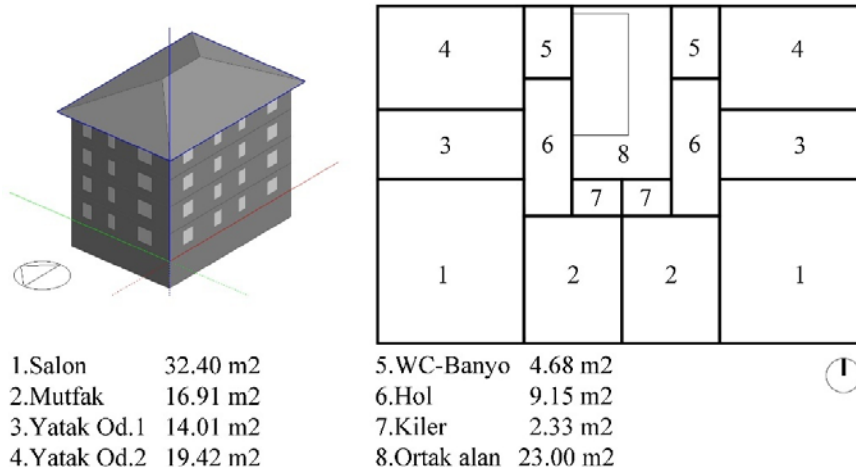
3.1. Referans Binanın Genel Özellikleri (Key Attributes of the Reference Building)

Referans binanın 223 m^2 taban alanına sahip, 1 bodrum kat, 4 normal kat ve çatı arasından oluşan blok nizam bir yapı olduğu kabul edilmiş ve buna göre tipik bir kat planı oluşturulmuştur (Şekil 3).

Binada her katta 2 daire bulunmakta olup, toplamda 8 daireden oluşmaktadır. Yapının toplam inşaat alanı 933,89 m^2 , şartlandırılan alan ise 690,77 m^2 'dir. Binadaki iç kazançları hesaplamalara dahil edebilmek için kullanıcı profili belirlenmiştir. TÜİK verilerine dayanarak hane halkı büyüklüğünün ortalama üç kişi olduğu kabul edilmiş [55], her dairede iki ebeveyn ve bir çocuk yaşadığı varsayılmıştır. Bir ebeveynin çalıştığı, çocuğun ise okul çağında olduğu kabulüyle binanın hafta içi ve hafta sonu kullanım çizelgeleri oluşturulmuştur.



Şekil 2. Referans binada veri toplama süreci (Data acquisition process in the reference building)



Şekil 3. Referans binanın tip kat planı ve üç boyutlu modeli (Typical floor plan and 3D model of the reference building)

3.2. Yapı Kabuğuna İlişkin Veri Girişleri (Input Parameters Related to Building Envelope)

Referans binada yapı kabuğuna ilişkin (dış duvar, döşeme, çatı vd.) veriler belirlenirken, TS 825:2013 standardında belirtilen ısı geçirgenlik değerleri esas alınmıştır. TS 825:2013'e göre 2. İklim bölgesi için verilen ısı geçirgenlik (U) değerleri şu şekildedir: Dış duvar (U_D) 0,57 W/m²K, Tavan (U_T) 0,38 W/m²K, Tabana oturan döşeme (U_i) 0,57 W/m²K, Pencere (U_P) 1,8 W/m²K [56]. Çalışma 2023 yılında tamamlandığından, 1 Nisan 2025 itibarıyla yürürlüğe giren TS 825:2024 standardı ve bu standartla birlikte İstanbul'un 3. İklim bölgesine geçmesiyle tavsiye edilen yeni U değerleri (U_D : 0,40 W/m²K, U_T : 0,30 W/m²K, U_i : 0,35 W/m²K, U_P : 1,8 W/m²K) bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.

Buna göre, referans binanın dış duvarındaki katmanlaşma dıştan içe doğru sırasıyla; 3 mm ısı yalıtım sıvası, 5 cm kalınlığında grafit katkılı 20 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS ısı yalıtım levhası, 2 cm sıva, 18,5 cm'lik düşey delikli hafif tuğla ve 2 cm sıva katmanlarından oluşmakta olup ısı geçirgenlik değeri (U_D) 0,48 W/m²K'dir. Mevcut çatı, dıştan içe doğru 2,5cm kiremit kaplama, 5 cm kiremit altı ahşap çita, 1mm buhar geçiren su yalıtım örtüsü, 8 cm taş yünü ısı yalıtımı (mertekler arasında), 2 cm OSB levha katmanlarından oluşmakta ve ısı geçirgenlik değeri (U_T) 0,38 W/m²K olarak belirlenmiştir. Bodrum kat zeminine oturan döşeme; 15 cm çakıl dolgu, 10 cm grobeton, 5 mm PVC esaslı su yalıtım membranı, 50 cm radye temel, 5 cm kalınlığında grafit katkılı 20 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS ısı yalıtım levhası, 5 cm tesviye betonu, 2 cm çimento esaslı yapııştırma harcı ve 1,5 cm seramik kaplama katmanlarından oluşmakta ve ısı geçirgenlik değeri (U_i) 0,49 W/m²K olmaktadır. Pencerelerdeki cam kombinasyonunun 4 mm+6 mm+4 mm kuru hava dolgulu çift cam olduğu varsayılmıştır.

Çerçeve tipi olarak PVC kabul edilmiştir [43]. Buna göre, referans binada pencerelerin ısı geçirgenlik değeri (U_P) 3,14 W/m²K olarak alınmıştır. Referans binada pencere-duvar oranının (*window-wall ratio- WWR*) belirlenmesi sürecinde ise Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın 2020 yılında yayımladığı rapor dikkate alınmış [57]; bu kapsamda Türkiye'deki apartman binaları için belirlenen pencere-duvar oranı %15 olarak kabul edilmiştir. Referans binanın yapı kabuğundaki katmanlaşmalar Şekil 4'te verilmiştir.

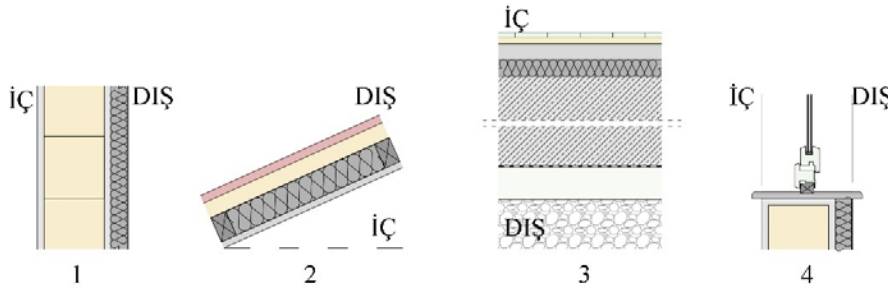
3.3. Isıtma, Soğutma, Havalandırma ve Sıcak Su Sistemlerine İlişkin Veri Girişleri

(Input Parameters Related to Heating, Cooling, Ventilation and Domestic Hot Water Systems)

Referans binada ısıtma sistemi olarak bireysel kombi sistemi seçilmiş; bodrum kat, çatı arası ve ortak merdiven ve hol alanlarının ısıtılmadığı kabul edilmiştir. Soğutma sistemi olarak her bir dairenin salon ve birer yatak odasında birer split klima olduğu varsayılmıştır. Sıcak su sistemi olarak ise bireysel kombi sistemi seçilmiş ve her bir dairenin mutfak ve banyosunda sıcak su kullanımı olduğu varsayılmıştır (Tablo 1). Referans binanın doğal yöntemlerle havalandırıldığı kabul edilmiş ve herhangi bir mekanik sistem kurgulanmamıştır. Ayrıca binanın yenilenebilir enerji teknolojilerini kullanmadığı varsayılmıştır.

Referans binada olduğu kabul edilen ısıtma, soğutma ve sıcak su sistemlerine ilişkin yaz ve kış sezonu için ayrı kullanım çizelgeleri oluşturulmuş ve *DesignBuilder* yazılımında veri girişleri yapılmıştır.

Referans binanın, şehir merkezinde tam korunmalı bir apartman binası olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle hava sızdırmazlık değeri olarak 0,5 ac/h alınmıştır [41].



Şekil 4. Referans binanın yapı kabuğundaki katmanlaşmalar (Stratification of the building envelope in the reference building)

Tablo 1. Referans binada mekanik sistemlere ilişkin veriler (Mechanical system specifications in the reference building)

Bina Sistemi	Yakıt türü		Özellikler	Mekanlar	Anahtar plan
	Doğalgaz	Elektrik			
Isıtma sistemi	X		Bireysel kombi, COP:0.85 Sıcaklık ayar noktası: 20°C Sıcaklık gerileme noktası: 17°C	Bodrum kat, çatı arası ve ortak alanlar hariç tüm mekanlar	
Soğutma sistemi		X	SEER: 6.10, SCOP: 4.60 Sıcaklık ayar noktası: 26°C Sıcaklık gerileme noktası: 28°C	Her dairede 1 salon ve 1 yatak odasında	
Sıcak su sistemi	X		Bireysel kombi, COP: 0.85	Her dairede mutfak ve banyoda	
Havalandırma sistemi	-	-	Doğal havalandırma Sıcaklık ayar noktası: 24°C*	Açıklığı olan tüm mekanlar	

*Referans binada iç mekân sıcaklığı 24°C'nin üzerine çıktığında doğal havalandırmanın devreye girdiği ve pencerelerin açıldığı kabul edilmiştir.

3.4. Aydınlatma Sistemi ve Priz Yüklerine İlişkin Veri Girişleri (Input Parameters Related to Lighting System and Plug Loads)

Referans binada, minimum aydınlık düzeyi çocuk odası (3 numaralı oda) için 300 lux, mutfak için 200 lux, salon, yatak odaları, hol, WC-banyo ve kiler için 100 lux olarak belirlenmiştir [58, 59]. Hesaplamalarda 5,5W, 10W ve 13W gücünde ve 2700 K renk sıcaklığında LED ampuller kullanılmış olup, mekanların aydınlatma güç yoğunlukları ve ortalama aydınlık düzeyleri *Dialux Evo 10.1* yazılımı ile hesaplanmıştır. Binada aydınlatma kontrol sistemi ve dış aydınlatma olmadığı kabul edilmiş, konut kullanımı için hafta içi ve hafta sonu için kullanım çizelgeleri oluşturulmuştur.

Referans binada priz yükleri enerji tüketimine dahil edilmiş; bunun için her dairede bulunduğu varsayılan elektrikli ev aletleri kullanım süreleri göz önünde bulundurularak güç yoğunlukları W/m² cinsinden hesaplanmış (Tablo 2) ve *DesignBuilder* yazılımında veri girişleri yapılmıştır.

Son aşamada, referans binanın bulunduğu İstanbul ilinin iklimsel veri dosyası .epw formatında yazılıma yüklenmiş ve tüm veri girişleri tamamlandıktan sonra, referans binanın mevcut durumdaki ısıtma-soğutma, aydınlatma, sıcak su sistemleri ile priz yüklerine ilişkin enerji tüketim değerleri dinamik simülasyon yöntemi (EnergyPlus) ile saatlik bazda hesaplanmıştır.

3.5. Referans Binanın Enerji Performansının Hesaplanması (Energy Performance Simulation of the Reference Building)

Önceki bölümlerde fiziksel, iklimsel ve karakteristik özellikleri detaylı olarak aktarılan, İstanbul ili için kurgulanan referans binanın mevcut durumda metrekare başına düşen yıllık nihai enerji tüketimi 111,62 kWh/m²y olarak hesaplanmıştır.

Referans binada, şartlandırılan alanda metrekare başına düşen yıllık enerji tüketimleri ise sırasıyla şu şekildedir: Isıtma enerjisi tüketimi 23,82 kWh/m²y, soğutma enerjisi tüketimi 16,22 kWh/m²y, aydınlatma sistemi enerji tüketimi 16,09 kWh/m²y, sıcak su sistemi enerji tüketimi 22,31 kWh/m²y ve priz yükleri 33,18 kWh/m²y. Birincil enerji tüketiminin hesaplanabilmesi için nihai enerji tüketim değerleri birincil enerji dönüşüm katsayıları ile çarpılmıştır. Birincil enerji dönüşüm katsayısı elektrik için 1,826 [60], doğalgaz için 1,00 alınmıştır. Buna göre, referans binanın enerji performansı nihai ve birincil enerji cinsinden Şekil 5'te verilmektedir.

4. Referans Binaya İlişkin Enerji Verimliliği Önlemlerinin Belirlenmesi (Establishment of Energy Efficiency Measures for the Reference Building)

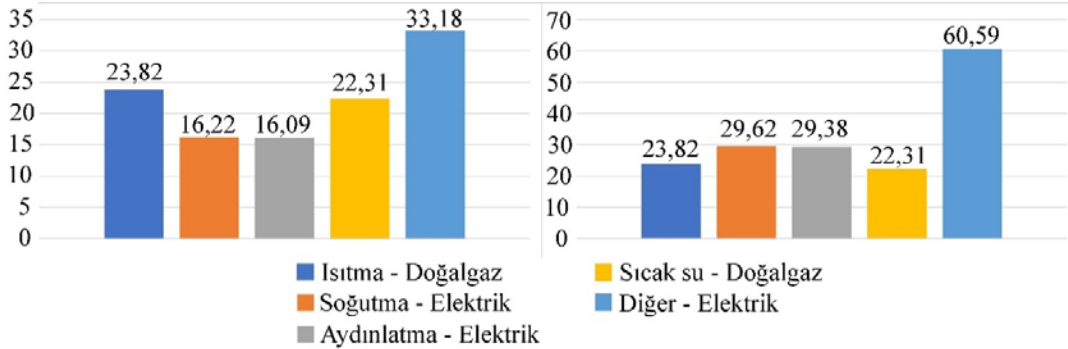
Referans binanın enerji performansının hesaplanmasının ardından, mevcut performansın iyileştirilmesi için bir dizi önlem belirlenmiştir. Önlemler belirlenirken, öncelikli olarak Avrupa Komisyonu'nun 2014 yılında yayımlanan raporu [61] ve ulusal ile uluslararası literatürden faydalanılmış, bu doğrultuda yapı kabuğu, enerji verimli aktif sistemler ve yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik tekil önlemler üzerinde durulmuştur. Bununla birlikte, birlikte kurgulandıklarında enerji verimliliği açısından öne çıkabilecek çoğul önlem paketleri de incelenmiştir (Şekil 6).

4.1. Tekil Önlemlerin Belirlenmesi (Definition of Single Measures)

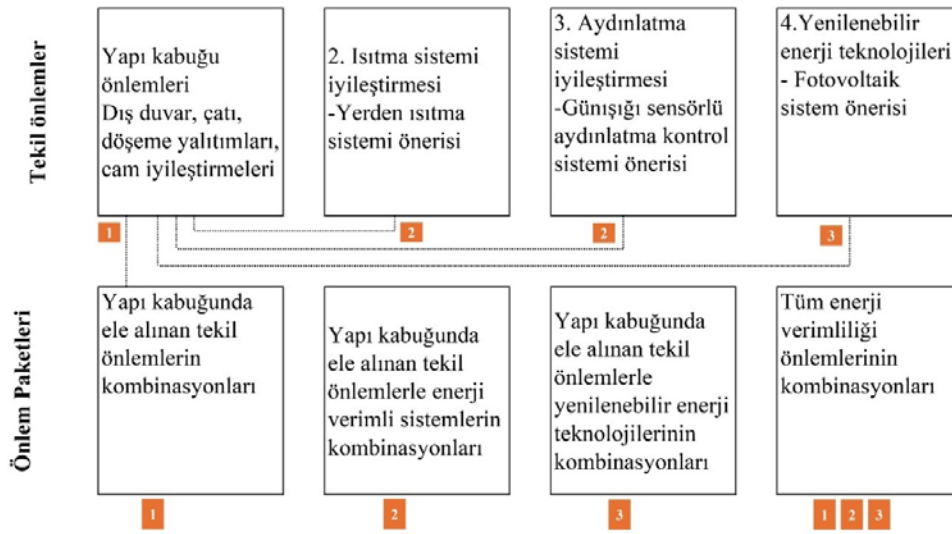
İlk olarak yapı kabuğunda ele alınabilecek enerji verimliliği önlemleri çalışılmıştır. Bu kapsamda mevcut dış duvar, çatı ve bodrum kat tavan döşemesine yapılacak ek yalıtımlar ile mevcut pencereler için cam iyileştirmeleri önerilmiştir.

Tablo 2. Referans binadaki dairelerde için priz yüklerine ilişkin kabuller
(Assumptions regarding plug loads for the units in the reference building).

Beyaz Eşya	Güç (W)	Kullanım Süresi (sa)	Enerji Tüketimi (W.sa) -günlük	kWh
Buzdolabı (A sınıfı)	62	24	1488	1,49
Çamaşır makinesi	800	3	2400	2,40
Bulaşık makinesi	900	2	1800	1,80
Fırın + Ocak	2150	3	6450	6,45
Davlumbaz	300	2	600	0,60
Çay makinesi	1800	3	5400	5,40
Buharlı ütü	2200	1	2200	2,20
55' LED TV	116	6	696	0,70
Laptop	100	4	400	0,40
Elektrikli süpürge	900	1	900	0,90



Şekil 5. Referans binanın nihai ve birincil enerji tüketimi (Final and primary energy consumption of the reference building)



Şekil 6. Araştırma kapsamında çalışılan enerji verimliliği önlemleri (EEMs evaluated within the scope of the study)

Duvar	REF (U= 0,487 W/m ² K)	Döşeme	REF (U=2,426 W/m ² K)
YLTM-D1	Mevcut dış duvara 5cm EPS uygulaması (U= 0,301 W/m ² K)	YLTM-DS1	Bodrum kat tavanına 5cm EPS uygulaması (U=0,699 W/m ² K)
YLTM-D2	Mevcut dış duvara 10cm EPS uygulaması (U= 0,219 W/m ² K)	YLTM-DS2	Bodrum kat tavanına 10cm EPS uygulaması (U=0,373 W/m ² K)
YLTM-D3	Mevcut dış duvara 5cm taşyünü uygulaması (U= 0,286 W/m ² K)	YLTM-DS3	Bodrum kat tavanına 5cm taşyünü uygulaması (U=0,621 W/m ² K)
YLTM-D4	Mevcut dış duvara 10cm taşyünü uygulaması (U= 0,203 W/m ² K)	YLTM-DS4	Bodrum kat tavanına 10cm taşyünü uygulaması (U=0,329 W/m ² K)
Çatı	REF (U= 0,38 W/m ² K)	Cam	REF (U=1,80 W/m ² K)
YLTM-Ç1	Mevcut çatıya 5cm EPS uygulaması (U=0,334 W/m ² K)	C1	4mm cam + 12mm hava + 4mm cam (Tvis:0.79, SHGC: 0.56) U= 1,6 W/m ² K
YLTM-Ç2	Mevcut çatıya 10cm EPS uygulaması (U= 0,235 W/m ² K)	C2	4mm cam + 12mm argon + 4mm cam (Tvis:0.79, SHGC: 0.56) U= 1,3 W/m ² K
YLTM-Ç3	Mevcut çatıya 5cm taşyünü uygulaması (U= 0,315 W/m ² K)	C3	4mm cam + 16mm hava + 4mm cam (Tvis:0.79, SHGC: 0.56) U= 1,3 W/m ² K
YLTM-Ç4	Mevcut çatıya 10cm taşyünü uygulaması (U= 0,217 W/m ² K)	C4	4mm cam + 16mm argon + 4mm cam (Tvis:0.79, SHGC: 0.56) U= 1,1 W/m ² K

Şekil 7. Yapı kabuğunda ele alınan enerji verimliliği önlemleri (Energy efficiency measures taken on the building envelope)

Dış duvar için ikisi grafit katkılı EPS levha (yoğunluk: 20 kg/m³) ikisi taş yünü olmak üzere iki farklı kalınlıkta (5 ve 10 cm) toplamda 4 adet yalıtım uygulaması belirlenmiş olup dış duvarın ısı geçirgenlik değerleri (U_D) ise 0,203 - 0,301 W/m²K aralığında değişmektedir (YLTM D1-D4). Benzer şekilde, mevcut çatıya uygulanmak üzere ikisi grafit katkılı EPS levha (yoğunluk: 20 kg/m³) ikisi taş yünü olmak üzere iki farklı kalınlıkta (5 ve 10 cm) toplamda 4 adet yalıtım uygulaması belirlenmiş olup çatının yeni durumdaki ısı geçirgenlik değerleri (U_T) 0,217 - 0,334 W/m²K aralığında değişmektedir (YLTM Ç1-Ç4). Mevcut binanın bodrum kat tavanına uygulanmak üzere ikisi grafit katkılı EPS levha (yoğunluk: 20 kg/m³) ikisi taş yünü olmak üzere iki farklı kalınlıkta (5 ve 10 cm) toplamda 4 adet yalıtım uygulaması belirlenmiş olup bodrum kat tavanının yeni durumdaki ısı geçirgenlik değerleri 0,329 - 0,699 W/m²K aralığında değişmektedir (YLTM DS1-DS4). Son olarak, mevcut durumdaki pencere camlarını iyileştirmek üzere, ikisi hava dolgu, ikisi argon dolgu olmak üzere toplamda 4 adet ısı yalıtım camı belirlenmiş olup, camların ısı geçirgenlik değerleri 1,1 - 1,6 W/m²K aralığında değişmektedir. Yapı kabuğunda ele alınan enerji verimliliği önlemleri Şekil 7'de gösterilmektedir.

İkinci aşamada, referans binada ısıtmadan kaynaklı enerji tüketimini azaltmaya yönelik yerden ısıtma sistemi (ISITMA-DS) önerilmiştir.

Sistem, zemin kat ile 1.2 ve 3. kat döşemelerinin ısıtılan alanlarında planlanmıştır. Dış ortam düşük ve yüksek sıcaklığında ayar noktası sırasıyla 50°C ve 30°C, dış ortam düşük ve yüksek sıcaklığı ise sırasıyla -2°C ve 20°C alınmış olup kombin verimlilik katsayısı (COP) 0,94 olarak kabul edilmiştir.

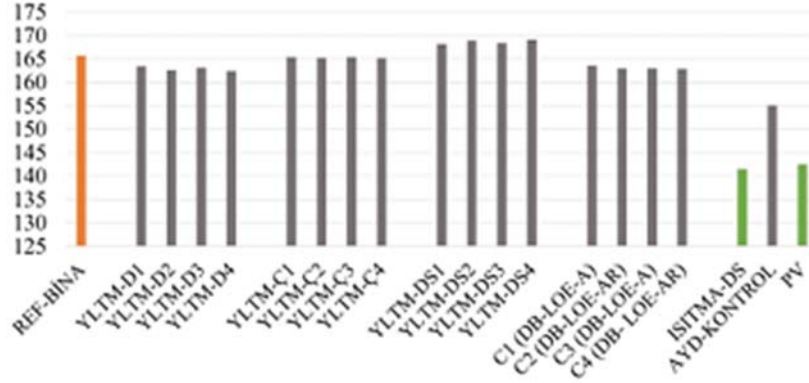
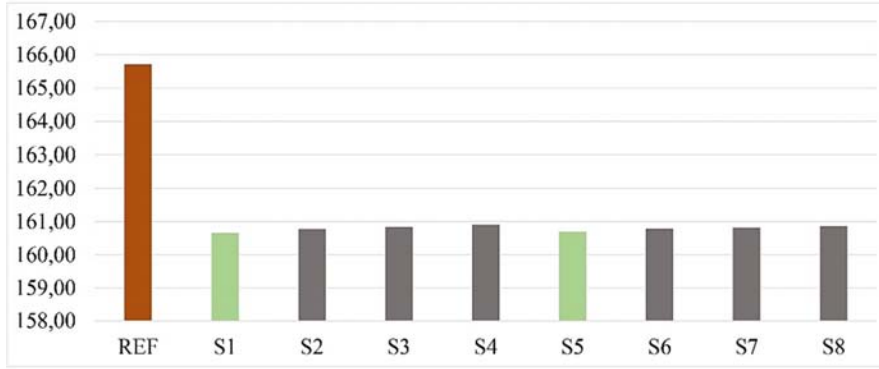
Bir sonraki aşamada, referans binanın aydınlatma kaynaklı enerji tüketimini azaltmak için güneşli sensörlü aydınlatma kontrol sistemi (AYD-KONTROL) önerilmiştir. Aydınlatma kontrolü, çalışma düzlemindeki gün ışığını aydınlık düzeyine göre sensörler aracılığıyla sağlamaktadır. Buna göre, aydınlık düzeyi arttıkça lambaların kısıldığı varsayılmakta (*dimming*); gün ışığının belirli bir seviyeye ulaşmasının ardından ışığın minimum düzeyde yanmaya devam ettiği kabul edilmektedir [62]. Referans binanın mevcut durumdaki elektrik tüketimini azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji teknolojisi olan fotovoltaik sistem (PV) önerisi getirilmiştir. Önerilen sisteme ilişkin veriler Tablo 3'te aktarılmaktadır.

4.2. Tekil Önlemlerin Enerji Performansının Hesaplanması (Calculation of Energy Performance of the Single Measures)

Çalışmada ele alınan tekil önlemlerin enerji performansı *EnergyPlus* yazılımı ile saatlik bazda hesaplanmıştır. Dış duvara uygulanan ilave

Tablo 3. Fotovoltaik panel sistemine ilişkin veriler (Technical specifications of the photovoltaic (PV) panel system)

Kurulu çatı alanı (m ²)	65	Panel gücü (W)	340
Sistem kurulu güç (kWp)	12	Panel boyutu (m ²)	1,63
Panel adedi	40	Panel verimliliği	%19,8
Panel cinsi	Monokristal	Panel eğimi	24°

**Şekil 8.** Referans binaya uygulanan tekil önlemlerin birincil enerji tüketimleri (Primary energy consumption of the single measures applied to the reference building)

S1: YLTM-D4+ YLTM-Ç4+C3
S2: YLTM-D4+ YLTM-Ç4+C4
S3: YLTM-D2+ YLTM-Ç2+C3
S4: YLTM-D2+ YLTM-Ç2+C4
S5: YLTM-D4+ YLTM-Ç2+C3
S6: YLTM-D4+ YLTM-Ç2+C4
S7: YLTM-D2+ YLTM-Ç4+C3
S8: YLTM-D2+ YLTM-Ç4+C4

YLTM-D2: Mevcut dış duvara 10cm EPS uyg.
YLTM-D4: Mevcut dış duvara 10cm taşıyıcı uyg.
YLTM-Ç2: Mevcut çatıya 10cm EPS uyg.
YLTM-Ç4: Mevcut çatıya 10cm taşıyıcı uyg.
C3: 4mm cam + 16mm hava + 4mm cam
(Tvis:0.79, SHGC: 0.56) U= 1,3 W/m2K
C4: 4mm cam + 16mm argon + 4mm cam
(Tvis:0.79, SHGC: 0.56) U= 1,1 W/m2K

Şekil 9. Yapı kabuğunda ele alınan önlem paketlerinin enerji tüketimine etkisi (Impact of building envelope retrofit packages on energy consumption)

yalıtım önlemlerinin en fazla %1,99 oranında enerji tasarrufu sağladığı (YLTM-D4), mevcut çatıya uygulanan yalıtım önlemlerinin (YLTM-Ç) verimliliklerinin ise oldukça düşük düzeyde kaldığı tespit edilmiştir (%0,19-%0,32 aralığında). Bodrum kat tavanında uygulanan yalıtımların (YLTM-DS) ise yıllık bazda ısıtma tüketimini azalttığı; ancak soğutma tüketimini artırdığından yıllık bazda iyileştirme sağlamadığı anlaşılmaktadır. Pencere camlarında yapılan iyileştirmelerde ise (C1-C4) %1,31 ile %1,73 oranında iyileştirme sağlanabilmektedir.

Referans binada yıllık bazda ısıtma, soğutma ve sıcak su sistemlerinden kaynaklı enerji tüketimi toplamı 75,75 kWh/m² iken, yerden ısıtma sistemi önerisi (ISITMA-DS) ile birincil enerji tüketimi 24,21 kWh/m² azalarak referans binaya oranla %14,61 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Güneşli sensörlü aydınlatma kontrol sistemi (AYD-KONTROL) önerisinde, aydınlatma sistemi için harcanan

enerji 29,38 kWh/m²'den 20,41 kWh/m²'ye, soğutma enerjisi ise 29,62 kWh/m²'den 26,75 kWh/m²'ye düşürülmüş ve yıllık bazda %6,42 oranında verimlilik elde edilmiştir. Referans binanın çatısına kurgulanan fotovoltaik panel sistemi önerisi (PV) ile yıllık 23,04 kWh/m² elektrik üretimi yapılabildiği; bu durumda elektrik enerji tüketiminin 15.917,031 kWh'i (yaklaşık %35'i) fotovoltaik panellerden karşılanabildiği görülmüştür. PV önlemi ile tek başına %14 oranında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Çalışma kapsamında ele alınan tekil önlemlerin birincil enerji tüketimleri ve referans bina ile karşılaştırmaları Şekil 8'de verilmektedir.

4.3. Tekil Önlemlerin Kombinasyonlarının Oluşturulması (Formation of Combinations of the Single Measures)

Çalışmanın ikinci adımında, enerji verimliliği açısından en verimli tekil önlemlerin kombinasyonları çalışılmıştır. Bu kapsamda ilk

olarak yapı kabuğunda ele alınmıştır (S1 -S8 senaryoları). Kombinasyonlar belirlenirken, tekil önlemlerde enerji etkinlik açısından diğer önlemlere göre daha iyi performans gösteren önlemler seçilmiştir. Bunlar; dış duvara sırasıyla ilave 10cm EPS ve 10 cm taş yünü uygulaması (YLTM-D2 ve YLTM-D4), mevcut çatıya sırasıyla 10cm EPS ve 10 cm taş yünü uygulaması (YLTM-Ç2 ve YLTM-Ç4) ile cam iyileştirmelerinden 4mm cam + 16mm hava dolgulu + 4mm cam özelliklerine sahip ısı yalıtım camı (C3) ile 4mm cam + 16mm argon dolgulu + 4mm cam özelliklerine sahip ısı yalıtım camıdır (C4). Bodrum kat tavanına yapılan yalıtım önlemleri, yıllık bazda enerji tüketimini artırması sebebiyle çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

Çalışılan önlem paketlerinde iyileştirme yüzdeleri %2,90 ila %3,05 aralığında değişmekte olup, en verimli kombinasyonların sırasıyla, yıllık birincil enerji tüketimi ve iyileştirme yüzdeleri olarak 160,66 kWh/m² ile S1 (%3,05) ve 160,70 kWh/m² ile S5 (%3,03) senaryoları olduğu görülmüştür. S1- S8 senaryolarına ilişkin birincil enerji tüketimi ve referans binaya göre iyileştirme yüzdeleri Şekil 9'da verilmektedir:

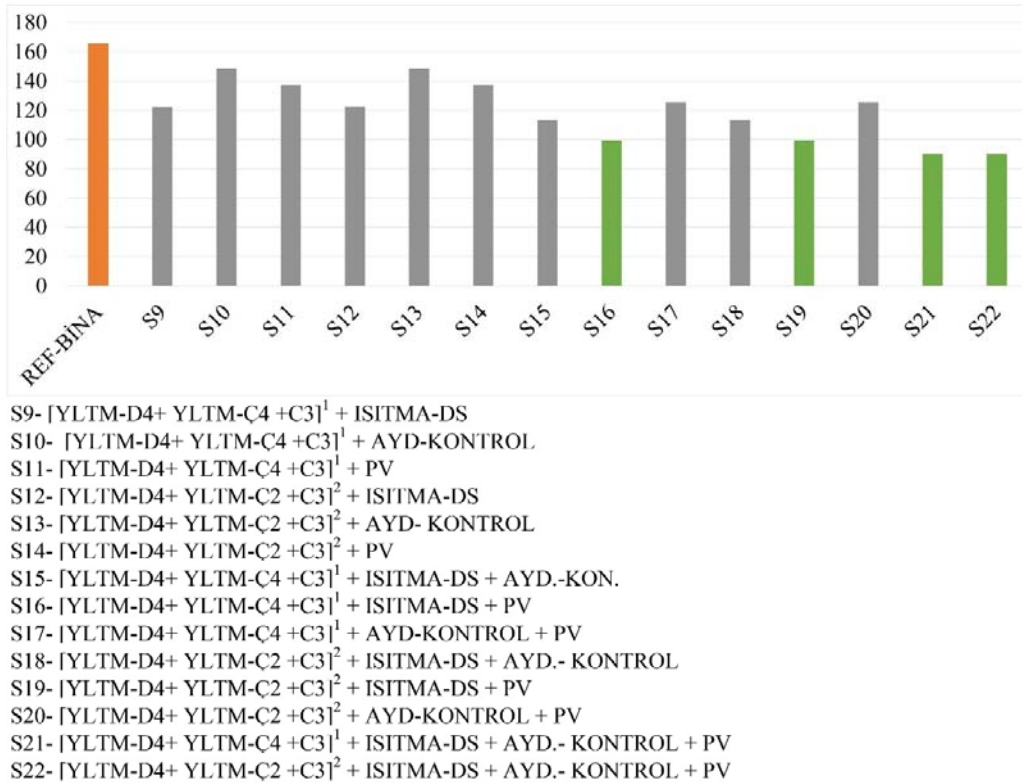
Bir sonraki aşamada, yapı kabuğu özelinde enerji etkinlik açısından öne çıkan S1 ve S5 önlem paketlerine yerden ısıtma sistemi, güneşiği sensörlü aydınlatma kontrol sistemi ve fotovoltaiik sistem önlemleri eklenerek hesaplamalar yeniden yapılmıştır (S9- S22). S1 ve S5 senaryolarına eklenen güneşiği sensörlü aydınlatma kontrol sistemi önerisi ile %10, fotovoltaiik sistem önerisi ile %17, yerden ısıtma sistemi önerisi ile %26 oranında iyileştirme sağlandığı görülmektedir. S15-S20 arası senaryolarda yapı kabuğu önlemlerine ek ikili kombinasyonlar çalışılmış ve en fazla %40 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Tüm önlemlerin uygulandığı S21-S22 senaryolarında ise referans binaya kıyasla %45 oranında iyileştirme sağlanmıştır (Şekil 10).

5. Enerji Verimliliği Önlemlerinin Finansal Performansının Hesaplanması: Küresel Maliyet Analizi (Calculation of Financial Performance of Energy Efficiency Measures: Global Cost Analysis)

Bina Enerji Performansı Direktifi, binalardaki enerji verimliliği uygulamalarının üye devletlerin maliyet-optimum seviyelerine göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır [2]. Bu nedenle, çalışma kapsamındaki enerji verimliliği önlemlerinin enerji performanslarına ek olarak finansal performansları da hesaplanmıştır. Finansal hesaplamalar bireysel son kullanıcı perspektifi ile gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda tüm vergiler ve faiz oranları hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

Küresel maliyet hesabında EN 15459 standardındaki metodoloji izlenmiştir. Bu çerçevede küresel maliyet, ilk yatırım maliyetleri, yıllık işletme maliyetleri ve yenileme maliyetlerinin hesaplama başlangıç yılından itibaren net bugünkü değerinin (NBD) bütününe ifade etmektedir. Uygulanabilir durumlarda, yıkım maliyetlerinin de bu hesaba dahil edilebileceği belirtilmiştir [63].

İlk yatırım maliyetleri (*initial investment costs*), bina ya da bina bileşeninin son kullanıcıya teslimine kadar oluşan maliyetlerdir. Bu çalışmada, mevcut binaya uygulanacak ilave önlemler ilk yatırım maliyeti olarak değerlendirilmiştir. Yıllık işletme maliyetleri, hesaplama periyodu boyunca oluşacak bakım, işletme ve enerji maliyetlerinin toplamını ifade etmektedir. Bakım maliyetleri, binada periyodik olarak alınan önlemleri kapsar. Enerji maliyetleri, yıllık ısıtma, soğutma, aydınlatma, sıcak su vd. sistemlerin enerji tüketim değerleri ve enerji birim fiyatları ile doğrudan ilişkilidir. Yenileme maliyetleri (*replacement costs*), hesaplama periyodu boyunca bina elemanının ya da sisteminin servis ömrüne göre yapılan maliyetleri kapsamaktadır. Hesaplama süresinden daha uzun servis ömrüne sahip olan bina elemanları veya bileşenleri için hurda değer hesabı (*residual*



Şekil 10. S9 -S22 senaryolarının enerji tüketimine etkisi (Impact of S9-S22 scenarios on building energy consumption)

value) yapılmaktadır. Küresel maliyet hesabı Eş. 2 ile hesaplanmaktadır [63].

$$C_g(\tau) = C_i + \sum_j \left[\left(\sum_{i=1}^{\tau} C_{u,i}(j) \cdot R_d(i) \right) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (2)$$

Verilen eşitlikte;

τ : hesaplama periyodu (calculation period)

$C_g(\tau)$: hesaplama periyodu boyunca oluşacak toplam maliyet

C_i : ilk yatırım maliyeti (initial investment costs)

$C_{u,i}(j)$: j bileşeni için i yılındaki yıllık maliyetler (enerji maliyetleri, işletme maliyetleri ve periyodik/ bakım maliyetlerini içerir) (annual costs year i for energy related component j)

$R_d(i)$: i yılı için indirim/ iskonto oranı (Discount rate for year i)

$V_{f,\tau}(j)$: binanın hesaplama periyodu sonunda kalan değeri/bedeli. (Final value of component j at the end of the calculation period – referred to the starting year τ 0) değerlerini ifade etmektedir.

Yenileme maliyetleri için iskonto oranı (R_d), işletme maliyetleri için ise mevcut değer faktörü (f_{pv}) kullanılmaktadır. İskonto oranı Eş. 3 ile hesaplanmaktadır.

$$R_d = \left(\frac{1}{1+R_r} \right)^p \quad (3)$$

Eşitlikte;

R_d : iskonto oranı (discount factor)

R_r : gerçek iskonto oranı (real discount rate)

p : başlangıç döneminden itibaren yıl sayısı değerlerini ifade etmektedir.

Gerçek iskonto oranı R_r enflasyon oranı ve piyasa faiz oranı ile ilişkilidir. Bu oran, Eş. 4 ile hesaplanmaktadır.

$$R_r = \frac{R - R_i}{1 + R_i} \quad (4)$$

Verilen eşitlikte;

R_r : gerçek iskonto oranı (real discount rate)

R_i : enflasyon oranı (inflation rate)

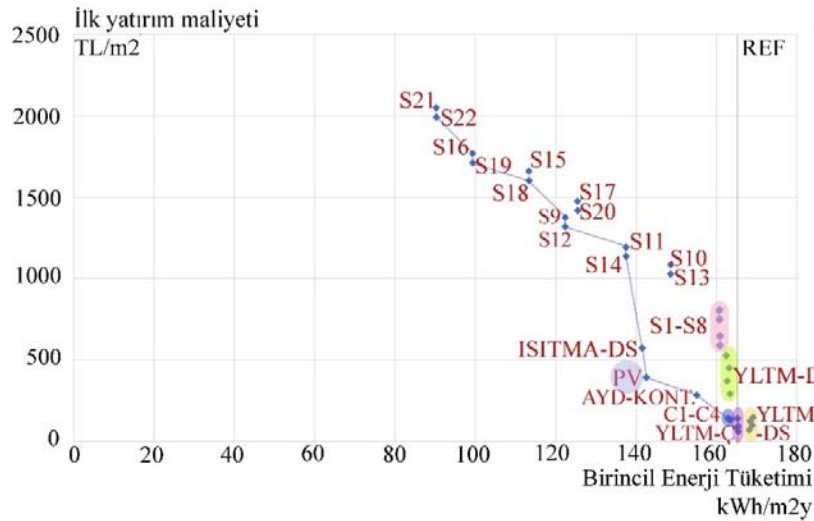
R : piyasa faiz oranı (market interest rate) değerlerini ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen küresel maliyet analizinde hesaplama periyodu 30 yıl seçilmiştir ve hesaplamalar 2022-2051 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Enflasyon ve piyasa faiz oranları için son 10 yılın ortalaması alınmış ve sırasıyla %17,83 ve %10,14 olarak hesaplanmıştır. Enerji maliyetlerinin hesaplanmasında, elektrik birim fiyatı olarak EPDK tarafından yayımlanan Ocak - Aralık 2022 tarifesinin ortalaması alınmıştır [64]. Doğalgaz birim fiyatı için ise İGDAŞ'ın Ocak - Aralık 2022 tarifi baz alınmıştır [65]. Enerji fiyatlarının artış oranı için son 10 yılın ortalaması alınmış ve çıkan değer yakınlığı nedeniyle enflasyon oranına eşit olarak varsayılmıştır. Hesaplamanın başlangıç yılı olarak 2022 yılı kabul edildiğinden, döviz kuru hesaplamasında 2022 yılı ortalaması dikkate alınmıştır. TCMB verilerine göre, her ayın 14-15. günlerinde alınan döviz kurunun ortalaması hesaplamalara dahil edilmiştir [66]. Küresel maliyet hesaplamalarında kullanılan veriler Tablo 4'te özetlenmektedir:

DesignBuilder programına veri girişlerinin tamamlanmasının ardından her bir enerji verimliliği önleminin küresel maliyeti hesaplanmıştır. Hesaplamalara tüm senaryolar için aynı olan ya da bina enerji performansını etkilemeyen maliyetler dahil edilmemiş; çalışma kapsamında ilk yatırım maliyetleri, yıllık bakım-onarım maliyetleri, yenileme maliyetleri, enerji maliyetleri ve hurda değerler hesaplanmıştır.

Tablo 4. Küresel maliyet hesabında kullanılan veriler (Input parameters used in global cost analysis)

Enflasyon oranı (10 yıllık ortalama)	%17,83	
Piyasa faiz oranı (10 yıllık ortalama)	%10,14	
Gerçek iskonto oranı	0.0653	
Döviz kuru (1\$ karşılığı)	16,58 TL	[66]
Döviz kuru (1€ karşılığı)	17,40 TL	[66]
Doğal gaz birim fiyatı	0,43110109 TL/kWh	[65]
Elektrik birim fiyatı	1,423488 TL/kWh	[64]



Şekil 11. Çalışmada kapsamındaki enerji verimliliği önlemlerinin ilk yatırım maliyetleri (Initial investment costs of energy efficiency measures within the scope of the study)

5.1. İlk Yatırım Maliyetlerinin Hesaplanması (Calculation of Initial Investment Costs)

Çalışma kapsamında belirlenen enerji verimliliği önlemlerinin ilk yatırım maliyetleri hesaplanırken 2022 yılı piyasa verileri kullanılmıştır. Bu kapsamda, binada yenileme için kullanılacak her bir malzeme, ürün ya da sistem için üç adet fiyat alınarak ortalamaları hesaplamalara dahil edilmiştir. Fiyat bilgisine erişilemeyen malzeme ve sistemler için 2022 Yılı İnşaat Birim Fiyat Analizleri raporundan faydalanılmıştır [67].

Yapı kabuğunda ele alınan tekil önlemlerde ilk yatırım maliyeti açısından en maliyetli uygulama dış duvar yalıtımıdır (290,46 – 528,11 TL/m²). Tekil önlemler arasında ise ilk yatırım maliyeti en yüksek olan uygulama yerden ısıtma sistemi (ISITMA-DS) önerisidir (574,28 TL/m²). Bunu fotovoltaiik sistem önerisi (PV) takip etmektedir (390,49 TL/m²). Tüm önlem paketleri arasında ise ilk yatırım maliyeti en yüksek olan senaryo S21 senaryosudur (2049,11 TL/m²). Bu senaryoda dış duvar, çatı ve döşeme yalıtımları ile cam iyileştirmelerine ek olarak yerden ısıtma sistemi, günışığı sensörlü aydınlatma kontrol sistemi ve fotovoltaiik sistem önerisi getirilmiştir. Sağladığı enerji performans seviyesi açısından ilk yatırım maliyeti en düşük olan senaryo, fotovoltaiik sistem (PV) önlemidir. Enerji verimliliği önlemlerinin ilk yatırım maliyetleri Şekil 11’de verilmektedir.

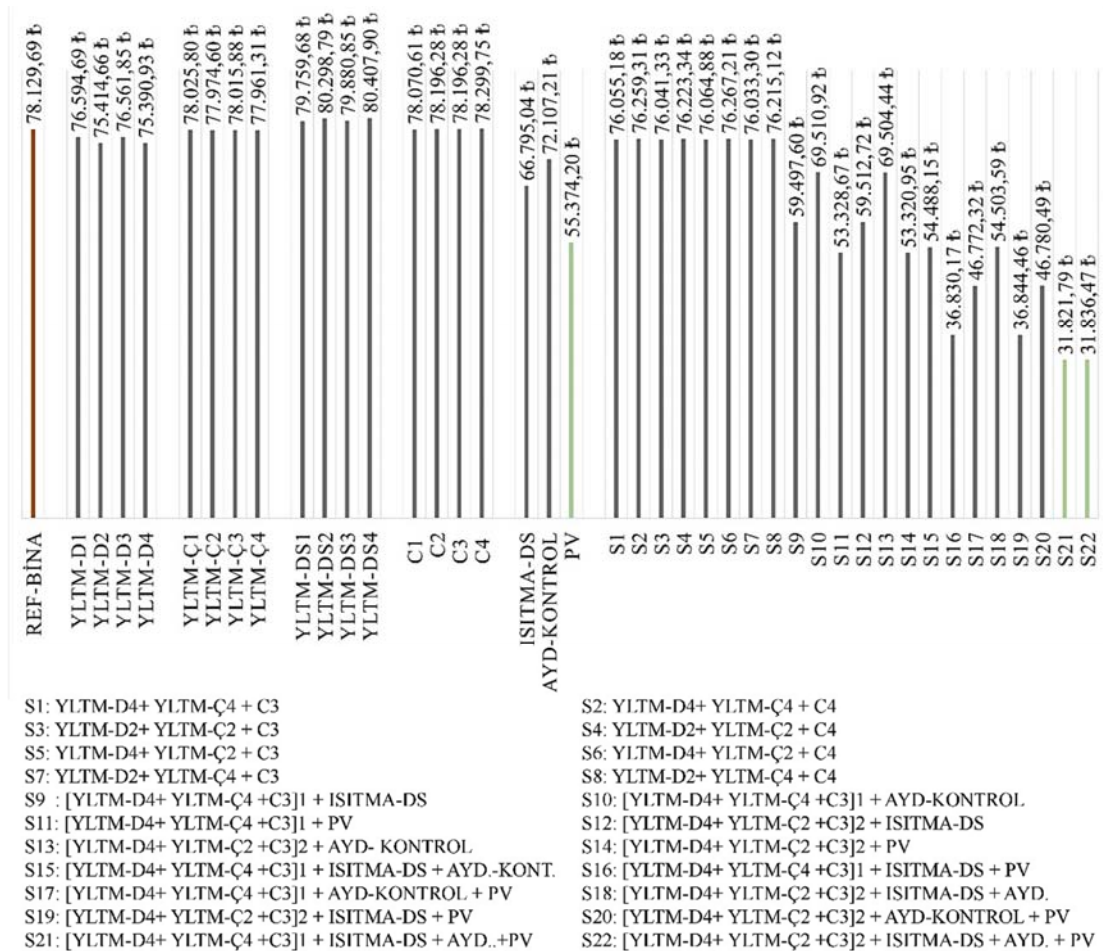
5.2. Yenileme ve Bakım Maliyetlerinin Hesaplanması (Calculation of Maintenance and Replacement Costs)

Yenileme ve bakım maliyetlerinin hesaplanmasında EN 15459 standardından yararlanılmıştır [63]. Yenileme maliyetleri için bina bileşenlerinin yaşam ömrü sonunda yenileneceği kabul edilmiş; hesaplama süresinin sonunda yaşam ömrü dolmayan sistemlerin hurda maliyetleri (*residual value*) hesaplanmış ve küresel maliyetten çıkarılmıştır. Her yıl tekrarlandığı kabul edilen yıllık bakım maliyetleri için ise, her bir ürün/sistem için ilk yatırım maliyetlerinin standarttaki yüzdelik karşılığı yıllık bakım maliyeti olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

5.3. Yıllık Enerji Maliyetlerinin Hesaplanması (Calculation of Annual Energy Costs)

Çalışma kapsamındaki enerji verimliliği önlemlerinin yıllık enerji maliyetlerinin hesaplanması sürecinde, 2022 yılı elektrik (EPDK) ve doğalgaz (İGDAŞ) birim fiyatları baz alınmıştır. Veri girişlerinin *DesignBuilder* programında tamamlanmasının ardından 30 yıllık hesaplama periyodu boyunca oluşan enerji maliyetleri yazılım aracılığıyla hesaplanmıştır.

2022 yılı için yapılan hesaplamada, referans binanın yıllık enerji maliyeti 78.129,69 TL olarak hesaplanmıştır (Şekil 12). En verimli tekil önlem, %29’luk bir tasarruf oranıyla fotovoltaiik sistem (PV) önerisi olmuştur.



Şekil 12. Enerji verimliliği önlemlerinin yıllık enerji maliyetleri (Annual energy costs of energy efficiency measures)

Önlem paketlerinde ise, S21 ve S22 senaryolarının enerji maliyetleri sırasıyla; 31.821,79 TL (%59,27 iyileştirme oranı) ve 31.836,47 TL (%59,25 iyileştirme oranı) olarak hesaplanmıştır. Cam iyileştirmeleri kapsamında uygulanan C2-C4 önlemleri ile bodrum kat tavan döşemesine yönelik yalıtım uygulamalarının (YLTM-DS) soğutma yükünü artırdığı, elektrik birim fiyatının doğalgaz birim fiyatına kıyasla daha yüksek olması nedeniyle de yıllık enerji maliyetleri üzerinde olumsuz bir etki yarattığı tespit edilmiştir.

S1 ve S5 önlem paketlerine yerden ısıtma sistemi, güneşiği sensörlü aydınlatma kontrol sistemi ve fotovoltaiik sistem önlemleri eklenerek S9-S22 önlem paketleri oluşturulmuştur. Bu önlemler arasında küresel maliyeti en düşük olan senaryo, dış duvarda ilave 10 cm taş yünü yalıtım uygulaması, mevcut çatıda ilave 10 cm EPS yalıtım uygulaması ve camlarda 4+16+4 mm ısıcam uygulamasına ek olarak fotovoltaiik sistem (PV) önerisini içeren S14 senaryosudur. Bu senaryo, referans binaya kıyasla enerji verimliliğinde %17,01 oranında iyileştirme sağlarken küresel maliyeti %38,74 oranında artırmıştır. Araştırma kapsamında değerlendirilen tüm tekil önlemler ve önlem paketleri arasında, referans binaya kıyasla küresel maliyeti en düşük olan tek önlem, mevcut çatıya entegre edilen fotovoltaiik panel sistemi önerisi (PV) olmuştur (Şekil 13).

5.4. Küresel Maliyetlerin Hesaplanması (Calculation of Global Costs)

Çalışmada ilk yatırım maliyetleri, yenileme maliyetleri, yıllık bakım-onarım maliyetleri, enerji maliyetleri ve hurda değerler hesaplamaya dahil edilmiş ve referans binanın 30 yıllık küresel maliyeti hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, referans binanın küresel maliyeti 1.675,46 TL/m² olarak hesaplanmıştır. İyileştirme kapsamında ele alınan enerji verimliliği önlemlerinde ilk olarak bina kabuğunda uygulanan tekil önlemlerin enerji verimliliğine ve küresel maliyete olan etkisi incelenmiştir. Referans binaya ek olarak uygulanacak dış duvar yalıtımlarının (YLTM-D) enerji verimliliğinde %1,40-1,99 oranında iyileştirme sağlarken küresel maliyeti %14,72-26,82 oranında artırdığı görülmüştür. Referans bina çatısına uygulanan ek yalıtım önlemlerinin ise (YLTM-Ç) enerji verimliliğinde tek başına anlamlı bir tasarruf sağlamadığı (%0,19-0,32), bununla birlikte küresel maliyeti %3,28-7,74 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, referans binaya uygulanan cam iyileştirmelerinde (C1-C4) %1,31- 1,73 oranında enerji verimliliği sağlarken, küresel maliyetleri %7,62-8,38 oranında artırdığı görülmüştür. Bodrum kat tavan döşemesine yapılan ek yalıtım uygulamaları (YLTM-DS) enerji tasarrufu sağlamadığından küresel maliyet hesaplamalarına dahil edilmemiştir.

Tekil önlemlerden güneşiği sensörlü aydınlatma kontrol sistemi, yerden ısıtma sistemi ve fotovoltaiik panel sistemi önlemlerinin küresel maliyete etkisi incelenmiştir. Bu önlemlerin enerji verimliliğinde sırasıyla, %14,61, %6,42 ve %14 oranında fayda sağladığı görülmüştür. Yerden ısıtma sistemi küresel maliyeti %23,19 oranında artırırken, güneşiği sensörlü aydınlatma kontrol sistemi küresel maliyette %9,61 oranında artışa neden olmaktadır. PV önleminin küresel maliyeti referans binaya kıyasla %1,34 oranında azalttığı görülmüştür.

Bir sonraki adımda tekil önlemlerin kombinasyonlarının denendiği S1-S22 senaryolarının enerji verimliliğine ve küresel maliyete olan etkisi incelenmiştir. Yapı kabuğunda ele alınan tekil önlemlerin kombinasyonları olan S1-S8 senaryolarında küresel maliyeti en az artıran senaryo S3 senaryosudur. Mevcut duvara ve çatıya ek olarak uygulanan 10 cm EPS yalıtım uygulamalarının yanı sıra ısı yalıtım camı önerisinin getirildiği senaryo, enerji verimliliğinde %2,95 oranında iyileştirme sağlarken küresel maliyeti %30,97 oranında artırmıştır. S1 ve S5 senaryoları, mevcut duruma göre sırasıyla %3,05 ve %3,03 enerji tasarrufu sağlarken, küresel maliyeti %43,30 ve %40,07 oranında artırmıştır.

S1 ve S5 önlem paketlerine yerden ısıtma sistemi, güneşiği sensörlü aydınlatma kontrol sistemi ve fotovoltaiik sistem önlemleri eklenerek S9-S22 önlem paketleri oluşturulmuştur. Bu önlemler arasında küresel maliyeti en düşük olan senaryo, dış duvarda ilave 10 cm taş yünü yalıtım uygulaması, mevcut çatıda ilave 10 cm EPS yalıtım uygulaması ve camlarda 4+16+4 mm ısıcam uygulamasına ek olarak fotovoltaiik sistem (PV) önerisini içeren S14 senaryosudur. Bu senaryo, referans binaya kıyasla enerji verimliliğinde %17,01 oranında iyileştirme sağlarken küresel maliyeti %38,74 oranında artırmıştır. Araştırma kapsamında değerlendirilen tüm tekil önlemler ve önlem paketleri arasında, referans binaya kıyasla küresel maliyeti en düşük olan tek önlem, mevcut çatıya entegre edilen fotovoltaiik panel sistemi önerisi (PV) olmuştur (Şekil 13).

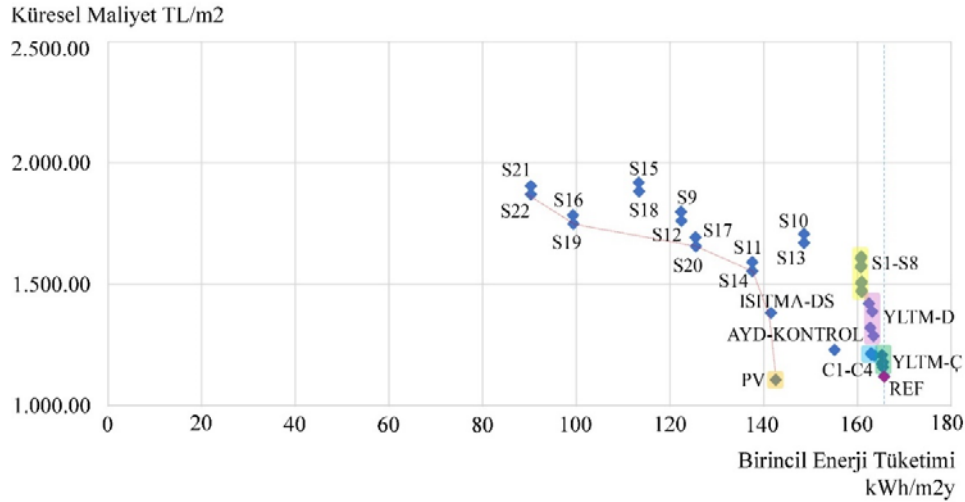
6. Sonuçlar (Conclusions)

Kentlerdeki binaların enerji tüketimi ve emisyonlardaki payı, binaların enerji performans iyileştirmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamdaki literatür incelendiğinde, özellikle Avrupa Birliği ülkelerinin enerji verimliliği konusunda yasal mevzuatlarını ve ülke hedeflerini sürekli olarak güncellediği görülmektedir. Türkiye’de ise, mevzuat gelişimi görece yavaştır. Bu bağlamda, bina enerji performans iyileştirmelerinin, özellikle mevcut konut binalarından başlanarak yapılmasının, ülke geneline daha hızlı etki edeceği ve enerji verimli bina iyileştirmelerinde itici bir güç olabileceği düşünülmektedir.

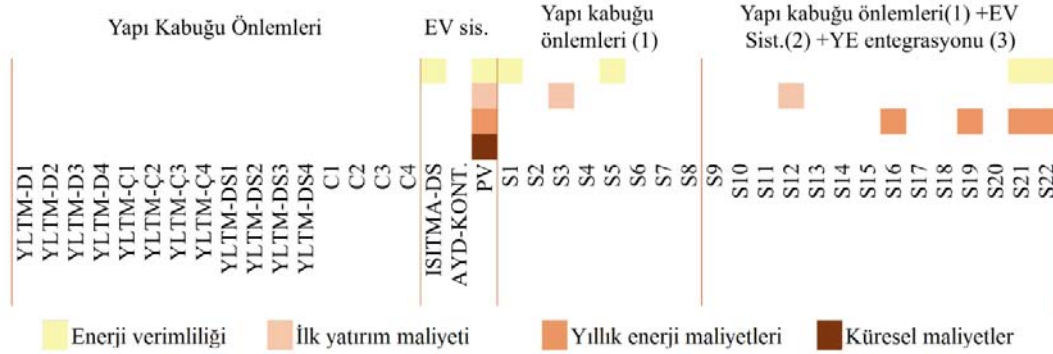
Bu çalışma ile, Türkiye’deki konut binalarının enerji verimli dönüşümünde ele alınabilecek teknik önlemler belirlenmiş; ilgili önlemlerin enerji verimliliğine ve maliyete olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında, 2007-2019 yılları arasında ruhsat izni aldığı ve İstanbul’da olduğu kabul edilen dört katlı bir konut binasını temsil eden hipotetik bir referans bina oluşturulmuştur. Referans binaya ilişkin gerekli istatistiksel veriler toplandıktan sonra *DesignBuilder* yazılımı yardımıyla bina modellenmiş ve veri girişleri tamamlanmıştır. Referans binanın mevcut durumuna ilişkin enerji performansı dinamik simülasyon yöntemi (*EnergyPlus*) ile saatlik bazda hesaplanmıştır. Bir sonraki aşamada, referans binanın mevcut durumdaki enerji performansını iyileştirmeye yönelik toplamda 41 adet tekil önlem ve önlem paketi çalışılmıştır. Çalışma kapsamındaki önlemlerin her biri enerji etkinliği, ilk yatırım ve yıllık enerji maliyetleri ile 30 yıllık küresel maliyetler üzerinden incelenmiştir.

Enerji verimliliği açısından yapılan değerlendirmede, en verimli tekil önlemlerin yerden ısıtma sistemi (%14,61) ile fotovoltaiik sistem (%14) önerisi olduğu görülmüştür. Yapı kabuğunda ele alınan tekil önlemlerin kombinasyonlarının denendiği senaryolarda S1 (%3,05) ve S5 (%3,03) senaryoları öne çıkmaktadır. S1 ve S5 senaryolarına eklenen yerden ısıtma sistemi, güneşiği sensörlü aydınlatma kontrol sistemi ve fotovoltaiik sistem önerileri ile oluşturulan kombinasyonlarda ise en verimli senaryolar sırasıyla; S21 (%45,53), S22 (%45,51), S16 (%40,09) ve S19 (%40,06) olarak belirlenmiştir.

İlk yatırım maliyetlerinin değerlendirilmesinde, sağlanan enerji performans seviyesine göre en düşük ilk yatırım maliyetine sahip senaryolar incelenmiştir. Buna göre; tekil önlemlerde mevcut çatıya uygulanan fotovoltaiik sistem (PV) önerisi, referans binaya kıyasla enerji verimliliğinde %14 oranında bir iyileştirme sağlarken, sadece 390,49 TL/m² ek maliyet getirmiştir. Yapı kabuğunda ele alınan önlem paketleri arasında ilk yatırım maliyeti açısından en etkin senaryo ise S3 senaryosu olmuştur. Mevcut dış duvara ve çatıya ek olarak uygulanan 10 cm’lik EPS yalıtımı ile cam iyileştirmesi (4+16+4mm ısı yalıtım camı) yapılan öneride, enerji verimliliğinde %2,95 oranında iyileştirme sağlanmış; referans binaya 585,43 TL/m² ek maliyet getirmiştir. Yıllık enerji maliyetleri açısından yapılan



Şekil 13. Enerji verimliliği önlemlerinin küresel maliyetleri (Global costs of energy efficiency measures)



Şekil 14. Seçilen kriterler bağlamında en etkin EV önlemlerinin değerlendirilmesi (Evaluation of the most effective EEMs based on selected criteria)

değerlendirmede, 2022 yılı enerji fiyatları üzerinden karşılaştırma yapılmış ve tekil önlemler arasında en verimli önlemin %29,13'lük tasarruf oranı ile fotovoltaik sistem (PV) önerisi olduğu görülmüştür. Önlem paketleri arasında ise yıllık enerji maliyeti açısından en etkin senaryolar sırasıyla; S21 (%59,27), S22 (%59,25), S16 (%52,86) ve S19 (%52,84)'tür. Türkiye'de elektrik birim fiyatı doğalgaz birim fiyatına göre oldukça yüksektir (3,30 katı). Bu durum, elektrik tüketimini azaltan önlemlerin yıllık enerji fiyatları açısından öne çıkmasını sağlamıştır.

30 yıllık hesaplama periyodu boyunca oluşan küresel maliyetler açısından yapılan değerlendirmede ise, referans binaya oranla küresel maliyeti düşük çıkan tek önlem fotovoltaik sistem (PV) önerisi olmuştur. Çalışmada; enerji verimliliği (en düşük enerji tüketimi), ilk yatırım maliyetleri (sağladığı enerji performans seviyesine göre en düşük ilk yatırım maliyeti), yıllık enerji maliyetleri (en düşük yıllık enerji maliyeti) ve küresel maliyetler açısından en etkin önlemler Şekil 14'te gösterilmektedir.

Küresel maliyet hesaplamalarında duyarlılık analizleri çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Ancak hesaplamalarda kullanılan enerji fiyatlarının artış hızı, gerçek iskonto oranı ve hesaplama süresine ilişkin değerlendirmeler aşağıda aktarılmıştır:

- Enerji fiyat artış hızı, küresel maliyet hesaplamalarında yıllık enerji maliyetleri doğrudan etkileyen bir parametredir. Enerji fiyat artış hızı yükseldikçe yıllık olarak tekrarlanan maliyetler (*recurring*

costs) ve dolayısıyla küresel maliyetler artmaktadır. Bu durumda, enerji verimlilik oranı yüksek olan senaryolar küresel maliyet açısından öne çıkmaktadır. Çalışma kapsamında, enerji fiyat artış hızı son 10 yılın ortalaması alınarak hesaplanmış ve yakın bir sonuç vermesi nedeniyle enflasyon oranına (%17,83) eşit kabul edilmiştir. Ancak, son yıllarda enerji fiyatlarındaki düzensiz artış, 30 yıllık bir hesaplama periyodu için maliyet analizini önemli ölçüde zorlaştırmıştır.

- Çalışmada, gerçek iskonto oranı (R_r) %6,53 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, piyasa faiz oranı ile enflasyon oranı ile bağlantılıdır. Gerçek iskonto oranı arttıkça periyodik olarak tekrarlanan maliyetler düşmekte ve enerji verimliliği açısından etkin senaryoların maliyet etkinliği azalmaktadır.
- Avrupa Komisyonu, yüksek iskonto oranının yatırımların değerlendirilmesinde tamamen ticari ve kısa vadeli bir yaklaşımı yansıtacağını, enflasyon hariç %2-4 arasındaki iskonto oranının ise yatırımların bina yaşam döngüsü boyunca bina kullanıcılarına sağladığı yararları daha iyi göstereceğini belirtmiştir [68]. Bu bağlamda, %6,53 olarak hesaplanan iskonto oranı ile yapılan maliyet analizinde, referans binaya kıyasla tek maliyet etkin önlemin PV önlemi olması olasıdır. Maliyet etkin senaryoların artması için gerçek iskonto oranının daha düşük seviyelerde tutulması gerekmektedir.
- Çalışmada küresel maliyet hesaplamaları, EN 15459 standardında tanımlanan metodoloji kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ısıtma, soğutma ve iklimlendirme (HVAC) sistemlerinin verimliliklerinin zaman içinde değişmediği ve kullanım ömürleri

boyunca sabit kaldığı varsayılmıştır. Ancak, gerçekte sistem verimlilikleri zamanla logaritmik olarak azalabilir. Bu durum, çalışmanın bir kısıtı olarak değerlendirilmektedir. Daha kapsamlı bir analiz için, sistemlerin performans düşüşüne ilişkin azalma faktörlerinin hesaplamalara dahil edilmesi faydalı olacaktır.

- Küresel maliyet analizlerinde Bina Enerji Performans Direktifi'nde konut ve kamu binaları için belirlenen hesaplama periyodu 30 yıl olarak belirlenmiştir [69]. Hesaplama periyodu süresince, enerji etkinlik anlamında fayda sağlayacağı düşünülen sistem veya ürünlerin hem ilk yatırım maliyetleri hem de yenileme maliyetleri (servis ömrü 30 yıldan az olan ürün ya da sistemler için) küresel maliyet hesaplamalarına dahil edilmiştir. Bu durumda, enerji etkinliği yüksek olan senaryoların küresel maliyetlerini de artırmıştır. Bu nedenle, daha kısa vadeli küresel maliyet hesaplamalarında (10-15 yıl gibi) maliyet etkin senaryoların artabileceği öngörülmektedir.

Sonuçlar, referans binaya uygulanan 41 adet enerji verimliliği önleminde, enerji etkinlik açısından en fazla %45, maliyet etkinlik açısından ise en fazla %1,34 oranında iyileştirme sağlandığını göstermektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri, oluşturulan referans binanın 2007-2019 yılları arasında yapı ruhsatı almış ve TS 825 standardına tabii olduğunun kabul edilmesi; dolayısıyla eski yapı stokuna kıyasla daha donanımlı olması olabilir. Yalıtım ve çift cam uygulaması olmayan, 2007 öncesinde inşa edilmiş mevcut konut binalarında gerçekleştirilecek enerji verimliliği uygulamalarında daha fazla enerji ve maliyet etkin sonuçlar alınacağı öngörülmektedir. Ancak, 2007 sonrası inşa edilen betonarme binaların yaşam ömrü göz önüne alındığında, bu binaların önümüzdeki 50 yıl boyunca mevcut enerji performans seviyelerinde giderek azalma göstererek varlıklarını sürdürecekleri öngörülmektedir. Bu nedenle, 2007 sonrası yapılan bina stokunun da nSEB seviyesine ulaşması için enerji verimliliği açısından iyileştirilmesi gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan hipotetik referans bina yönteminde, mevcut binalarda yaygın olarak kullanılan malzeme ve sistemlerin bir araya getirildiği varsayılmıştır. Ancak, istatistiksel verilerin yetersiz olduğu durumlarda resmi kurum ve sektör faaliyet raporlarından faydalanılmış, eksik kalan noktalar ise kabuller yapılmıştır. Sonuçların doğruluğunu artırmak adına, resmi kurum ve kuruluşlar tarafından gerçek bina verilerinin envanterinin oluşturulması ve açık kaynak olarak paylaşılması oldukça yararlı olacaktır. Bununla birlikte, küresel ısınmanın etkileri nedeniyle iklim verilerinin güncelliği de çalışmanın kısıtlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle, kullanılan meteorolojik verilerin uzun yıllar ortalamasına dayalı olması, bölgesel ve yerel mikroklima koşullarındaki değişimleri tam olarak yansıtmayabilir. Ayrıca, meteoroloji istasyonlarının konumu ve ölçüm hassasiyeti, bina ölçeğinde yapılan enerji analizleri için kritik bir faktör olup, yerel iklim koşullarına duyarlı daha detaylı veri setlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekteki çalışmalar için iklim değişikliği senaryolarına dayalı projeksiyonların ve bölgesel iklim modellerinin kullanımı faydalı olacaktır.

Buna ek olarak, binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik finansal teşviklerin iyileştirilmesi, özellikle mevcut konut stokunda uygulanacak enerji verimliliği yatırımlarının hızlanmasını sağlayacaktır. Gelecek çalışmalar için, küresel maliyet hesaplamalarına teşvikler, vergi muafiyetleri ve sübvansiyonlar gibi finansal araçların dahil edilmesinin, dönüşüm süreçlerinin ekonomik açıdan daha kapsamlı değerlendirilmesine olanak tanıyacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Begüm Diker'in İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Bilimleri Programı'nda, Doç. Dr. Fatih Yazıcıoğlu danışmanlığında yürütmüş olduğu "Türkiye'deki Mevcut

Konut Binalarının Enerji Verimliliği İyileştirmeleri ile nSEB'e Dönüştürülmesi: Finansal Bariyerler ve Çözüm Önerileri" başlıklı doktora tezinden türetilmiştir.

Kaynaklar (References)

1. International Energy Agency -IEA. Buildings. <https://www.iea.org/topics/buildings>. Yayın tarihi Temmuz, 2023. Erişim tarihi Ağustos 11, 2023.
2. The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2010/31/EU of The European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union, L153/13, 2010.
3. Ballarini, I., Primo, E., & Corrado, V., On the limits of the quasi-steady-state method to predict the energy performance of low-energy buildings, *Thermal Science*, 22 (4), 1117–1127, 2018.
4. Corrado, V., Ballarini, I., Paduos, S., & Primo, E., Refurbishment of the Residential Building Stock toward the Nearly-Zero Energy Target Through the Application of the Building Typology, *Energy Procedia*, 101, 208–215, 2016.
5. Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M., & Mauro, G. M., Conceptualization, development and validation of EMAR: A user-friendly tool for accurate energy simulations of residential buildings via few numerical inputs, *Journal of Building Engineering*, 44, 102647, 2021.
6. Corrado, V., Ballarini, I., Paduos, S., & Tulipano, L., A new procedure of energy audit and cost analysis for the transformation of a school into a nearly zero-energy Building, *Energy Procedia*, 140, 325–338, 2017.
7. Lorenzati, A., Ballarini, I., De Luca, G., & Corrado, V., Social Housing In Italy: Energy Audit And Dynamic Simulation Towards A nZEB Policy, 16th IBPSA International Conference and Exhibition, Roma-İtalya, 4990-4997, 4 Eylül, 2019.
8. Mora, T. D., Pinamonti, M., Teso, L., Boscato, G., Peron, F., & Romagnoni, P., Renovation of a School Building: Energy Retrofit and Seismic Upgrade in a School Building in Motta Di Livenza, *Sustainability*, 10 (4), 969, 2018.
9. Penna, P., Prada, A., Cappelletti, F., & Gasparella, A., Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings, *Energy and Buildings*, 95, 57–69, 2015.
10. Ferreira, M., Almeida, M., & Rodrigues, A., Impact of co-benefits on the assessment of energy related building renovation with a nearly-zero energy target, *Energy and Buildings*, 152, 587–601, 2017.
11. Ferreira, M., Almeida, M., & Rodrigues, A., Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target, *Energy and Buildings*, 133, 724–737, 2016.
12. Ferreira, M., Almeida, M., Rodrigues, A., & Silva, S. M., Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit, *Building Research & Information*, 44 (2), 188–201, 2016.
13. Ferreira, M., Almeida, M., & Rodrigues, A., Cost optimality and net-zero energy in the renovation of Portuguese residential building stock-Rainha Dona Leonor neighbourhood case study, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 5 (4), 306–317, 2014.
14. De Luca, G., Ballarini, I., Lorenzati, A., & Corrado, V., Renovation of a social house into a NZEB: Use of renewable energy sources and economic implications, *Renewable Energy*, 159, 356-370, 2020.
15. Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P., Cost-Effective Refurbishment of Italian Historic Buildings, *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*, Elsevier, 553-600, 2017.
16. Ascione, F., De Masi, R. F., de Rossi, F., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P., NZEB target for existing buildings: Case study of historical educational building in Mediterranean climate, *Energy Procedia*, 140, 194-206, 2017.
17. Mauro, M., Zuzana, P., Umberto, B., Silvana, F. L., Felipe, P.-A., & Teresa, B., The energy retrofit of building façades in 22@ innovation district of Barcelona: Energy performance and cost-benefit analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609 (7), 2019.
18. Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M., & Mauro, G. M., The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review, *Solar Energy*, 224, 703–717, 2021.
19. Assimakopoulos, M.-N., De Masi, R. F., Fotopoulou, A., Papadaki, D., Ruggiero, S., Semprini, G., & Vanoli, G. P., Holistic approach for

- energy retrofit with volumetric add-ons toward nZEB target: Case study of a dormitory in Athens, *Energy and Buildings*, 207, 109630, 2020.
20. Pihelo, P., Kuusk, K., & Kalamees, T., Development and Performance Assessment of Prefabricated Insulation Elements for Deep Energy Renovation of Apartment Buildings, *Energies*, 13 (7), 1709, 2020.
 21. Kuusk, K., Pihelo, P., & Kalamees, T., Renovation of apartment buildings with prefabricated modular panels, *E3S Web of Conferences*, 111, 03023, 2019.
 22. Pihelo, P., Kalamees, T., & Kuusk, K., NZEB Renovation with Prefabricated Modular Panels, *Energy Procedia*, 132, 1006–1011, 2017.
 23. De Luca, G., Ballarini, I., Paragamyran, A., Pellegrino, A., & Corrado, V., On the improvement of indoor environmental quality, energy performance and costs for a commercial nearly zero-energy Building, *Science and Technology for the Built Environment*, 27 (8), 1056–1074, 2021.
 24. De Luca, G., Ballarini, I., Paragamyran, A., Pellegrino, A., & Corrado, V., Optimized Solutions For Thermal And Visual Comfort In The Design Of A Nearly Zero-Energy Building, 16th IBPSA International Conference and Exhibition, Roma-İtalya, 5037–5044. 2- 4 Eylül, 2019.
 25. Ballarini, I., De Luca, G., Paragamyran, A., Pellegrino, A., & Corrado, V., Integration of Thermal and Visual Comfort in the Retrofit of Existing Buildings, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo- İtalya, 1-6, 12- 15 Haziran, 2018.
 26. Ballarini, I., De Luca, G., Paragamyran, A., Pellegrino, A., & Corrado, V., Transformation of an office building into a nearly zero energy building (nzeb): Implications for thermal and visual comfort and energy performance, *Energies*, 12 (5), 895, 2019.
 27. Guerra-Santin, O., Bosch, H., Budde, P., Konstantinou, T., Boess, S., Klein, T., Silvester, S., Considering user profiles and occupants' behaviour on a zero energy renovation strategy for multi-family housing in the Netherlands, *Energy Efficiency*, 11 (7), 1847–1870, 2018.
 28. Escandón, R., Silvester, S., Konstantinou, T., Evaluating the environmental adaptability of a nearly zero energy retrofit strategy designed for Dutch housing stock to a Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 169, 366–378, 2018.
 29. Guerra-Santin, O., Boess, S., Konstantinou, T., Romero Herrera, N., Klein, T., Silvester, S., Designing for residents: Building monitoring and co-creation in social housing renovation in the Netherlands, *Energy Research & Social Science*, 32, 164–179, 2017.
 30. Asdrubali, F., Ballarini, I., Corrado, V., Evangelisti, L., Grazieschi, G., Guattari, C., Energy and environmental payback times for an NZEB retrofit, *Building and Environment*, 147, 461–472, 2019.
 31. Penna, P., Prada, A., Cappelletti, F., Gasparella, A., Multi-objective optimization for existing buildings retrofitting under government subsidization, *Science and Technology for the Built Environment*, 21 (6), 847–861, 2015.
 32. Cappelletti, F., Mora, T. D., Peron, F., Romagnoni, P., Ruggeri, P., Building Renovation: Which Kind of Guidelines could be Proposed for Policy Makers and Professional Owners? *Energy Procedia*, 78, 2366–2371, 2015.
 33. Semprini, G., Ferrante, A., Cattani, E., Fotopoloulou, A., New strategies towards nearly zero energy in existing buildings: The ABRACADABRA Project, *Energy Procedia*, 140, 151–158, 2017.
 34. Ferrante, A., Ungaro, F., Semprini, G., Dragonetti, L., Agliardi, E., Fotopoloulou, A., Deep renovation up to zero energy through Add-ons: The ABRACADABRA Project, 252–262, 2019.
 35. Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., Napolitano, D. F., Knowledge and energy retrofitting of neighborhoods and districts, A comprehensive approach coupling geographical information systems, building simulations and optimization engines, *Energy Conversion and Management*, 230, 113786, 2021.
 36. Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., Napolitano, D. F., Vanoli, G. P., Comprehensive analysis to drive the energy retrofit of a neighborhood by optimizing the solar energy exploitation – An Italian case study, *Journal of Cleaner Production*, 314, 127998, 2021.
 37. Teso, L., Dalla Mora, T., Romagnoni, P., Peron, F., European projects on district energy-renovations and Italian best practices, *E3S Web of Conferences*, 111, 03004, 2019.
 38. Rose, J., Thomsen, K. E., Domingo-Irigoyen, S., Bolliger, R., Venus, D., Konstantinou, T., Mlecnik, E., Almeida, M., Barbosa, R., Terés-Zubiaga, J., Johansson, E., Davidsson, H., Conci, M., Mora, T. D., Ferrari, S., Zagarella, F., Sanchez Ostiz, A., San Miguel-Bellod, J., Monge-Barrio, A., Hidalgo-Betanzos, J. M., Building renovation at district level – Lessons learned from international case studies, *Sustainable Cities and Society*, 72, 103037, 2021.
 39. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, T.C. Resmî Gazete, sayı: 26510, 2 Mayıs 2007.
 40. T.C. Resmî Gazete, *Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği*, sayı: 27075, 5 Aralık 2008.
 41. T.C. Resmî Gazete, *Binalarda Enerji Performansı Ulusal Hesaplama Yöntemine Dair Tebliğ*, EK: Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi, Bina Enerji Performansı – Isıtma ve Soğutma için Net Enerji İhtiyacının Hesaplanması, sayı: 30227, 1 Kasım 2017.
 42. U. Acar, Net Sıfır Enerjili Binaların Türkiye İklim Koşullarında Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Türkiye, 2023.
 43. A. Çelik, Soğuk İklim Bölgelerinde Yaklaşık Sıfır Enerji Bina (nZEB) Konseptinin Bir Eğitim Binası İçin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle İncelenmesi, Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2022.
 44. C. N. Arıkan, AB'nin 20/20/20 Hedeflerinin Türkiye'de Uygulanabilirliği Üzerine Bir İnceleme: Neredeyse Sıfır Enerjili Otel Binaları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2021.
 45. M. Sattari, Yaklaşık Sıfır Enerjili Binaların (nSEB) Türkiye'de Uygulanabilirliği Üzerine Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2021.
 46. N. Ganiç Sağlam, A New Approach to Identify Achievable Nearly-Zero Energy Building Targets for Existing Building Retrofits, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2017.
 47. E. Kalaycıoğlu, A New Approach to Evaluate the Nearly Zero Energy Concept of EPBD Recast at District Scale, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2017.
 48. Türkiye İstatistik Kurumu. Yapı İzin İstatistikleri. <https://biruni.tuik.gov.tr/yapiizin/giris.zul>. Erişim tarihi Mart 20, 2021.
 49. The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2010/31/EU of The European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Official Journal of the European Union*, L153/13, 2010.
 50. EN 13790:2007, Energy Performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling, European Committee for Standardization (CEN), 2007.
 51. Building Performance Institute Europe, Cost-Optimality. Discussing Methodology and Challenges within the Recast Energy Performance of Buildings Directive, BPIE, Brüksel-Belçika, 2010.
 52. Ballarini I., Corgnati S.P., Corrado V., Talà N., Building typology brochure-Italy. Italian TABULA, Ekim, 2011.
 53. Corgnati, S. P., Fabrizio, E., Filippi, M., Monetti, V., Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application, *Applied Energy*, 102, 983-993, 2013.
 54. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Bina Sektörü Enerji Verimliliği Teknoloji Atlası, ÇSB, Ankara, Türkiye, 2021.
 55. TÜİK, “İstatistiklerle Aile 2021,” <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=İstatistiklerle-Aile-2021-45632>, erişim tarihi: 15 Eylül 2023.
 56. Türk Standartları Enstitüsü, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları [Thermal Insulation Requirements for Buildings]. Ankara, Aralık 2013.
 57. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar İçin Rehber Kitap, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye, Kasım, 2020.
 58. Rea, M. S., & Illuminating Engineering Society of North America (Ed.), *The IESNA lighting handbook: Reference & application* (9. ed), IESNA, New York, ABD, 2000.
 59. Sümengen, Ö. & Yener, A. K., Konutlarda Aydınlatma Enerjisi Performansı ve Görsel Konfor Koşulları, 7. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, İzmir- Türkiye, 184-203, 21-24 Kasım, 2015.
 60. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Elektrik Enerjisinin Birincil Enerji ve Sera Gazı Salımı Katsayıları 2021 Yılından İtibaren Kullanılmak Üzere Güncellenmiştir. <https://meslek Hizmetler.csb.gov.tr/elektrik-enerjisinin-birincil-enerji-ve-sera-gazi-salimi-katsayilari-2021-yilindan- itibaren-kullanilmak-uzere-guncellenmistir-duyuru-411795>. Yayın tarihi Aralık 28, 2020, Erişim tarihi Mayıs 25, 2022.
 61. European Commission, Financing the energy renovation of buildings with Cohesion Policy funding, Final Report, 2014.
 62. DesignBuilder, Help. <https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/index.htm>, Erişim tarihi Eylül 15, 2023.

63. EN 15459-1, Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings - Part 1: Calculation procedures, 2017.
64. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu. Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>. Erişim tarihi Aralık 1, 2022.
65. İstanbul Gaz Dağıtım Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi (İGDAŞ). Tarifeler. <https://igdas.istanbul/tarifeler/tr-tr>. Erişim tarihi Aralık 1, 2022.
66. Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası. Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları. <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Doviz+Kurlari/Gosterge+Niteligindeki+Merkez+Bankasi+Kurlarii/> Erişim tarihi Aralık 1, 2022.
67. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2022 Yılı İnşaat Birim Fiyat Analizleri. Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı, Ankara, 2022.
68. European Union, Notices From European Union Institutions, Bodies, Offices And Agencies, Official Journal of the European Union, 2012/C 115/01, 19.04.2012.
69. Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 Supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings by Establishing a Comparative Methodology Framework for Calculating Cost-Optimal Levels of Minimum Energy Performance Requirements for Buildings and Building Elements, 2012.