



A stepwise approach to nZEB transition and GHG emission reduction in public buildings in Türkiye: A case study of the IMM Fatih Sports Centre

Alpay Akgüç^{1*}, Gözde Gali Taşçı²

¹Istanbul Bilgi University, Faculty of Architecture, 34060, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye

²Istanbul Beykent University, Faculty of Engineering Architecture, Ayazağa, Sarıyer, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Public sports facility retrofitted to meet Türkiye's nZEB and GHG reduction targets.
- EPC improved from class C to B; 47% reduction in GHG emissions achieved.
- Half-cut PV panels covered over 10% of the building's primary energy consumption

Keywords:

- nZEB
- GHG emission reduction
- Building energy performance simulation
- BEP-TR
- Half-cut PV panel

Article Info:

Research Article

Received: 21.07.2025

Accepted: 11.11.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1742046

Graphical/Tabular Abstract

This study evaluates a comprehensive retrofit strategy for the Istanbul Metropolitan Municipality (IMM) Fatih Sports Centre to meet Türkiye's updated nearly zero energy building (nZEB) requirements and 2030 national greenhouse gas emission (GHG) reduction targets. Passive design measures and renewable integration led to marked improvements in energy performance and GHG reduction. Figure A presents a comparative view of the building's primary energy consumption, energy performance certificate (EPC) rating, and GHG emissions before and after retrofitting. The energy class improved from C to B, renewable energy share exceeded 10%, and total emissions dropped by 48%, surpassing national goals.

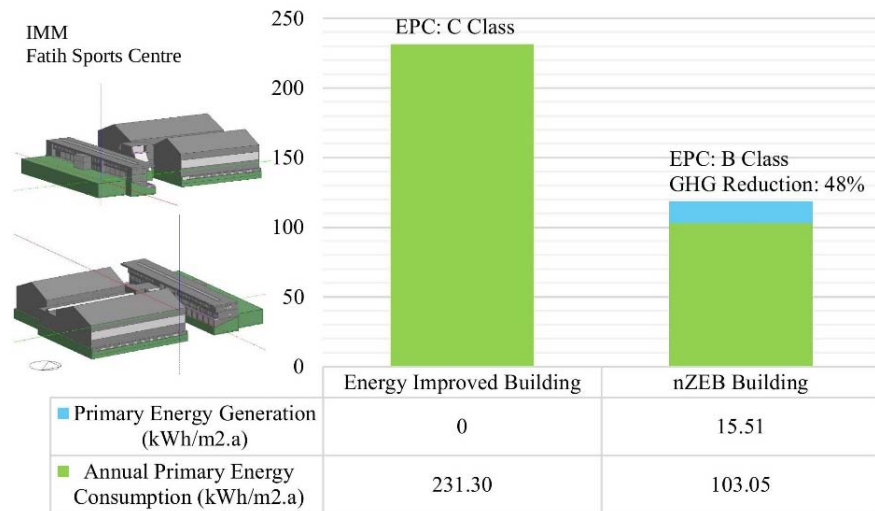


Figure A. EPC and GHG emission reduction ratings of IBB Fatih Spor Centre after retrofittings.

Correspondence:

Author: Alpay Akgüç

e-mail:

alpay.akguc@bilgi.edu.tr

phone: +90 444 0 428

Purpose: This study aims to develop a replicable transformation strategy for public buildings in Türkiye to meet the nZEB criteria defined in the 2022 revision of the Turkish Building Energy Performance Regulation and contribute to the 2030 national GHG emission reduction targets.

Theory and Methods: A comprehensive retrofit approach was applied to the IMM Fatih Sports Centre, including thermal envelope improvement based on TS825:2024 standard, lighting optimization per ANSI/ASHRAE 90.1:2022 standard, and the integration of half-cut PV panels. Dynamic simulations were conducted using DesignBuilder to analyze the energy performance and GHG emissions under improved scenarios. Energy performance classification followed BEP-TR metrics.

Results: The retrofit measures improved the building's EPC from Class C to Class B, achieving a 48% reduction in GHG emissions. The annual primary energy consumption was reduced from 231.3 to 103.1 kWh/m².year. PV panels contributed ~15% of the total primary energy, satisfying the nZEB requirement of ≥10% renewable energy contribution.

Conclusion: The study demonstrates that the nZEB and decarbonization targets in Türkiye can be realistically achieved through passive envelope strategies, efficient lighting design, and renewable integration in public service buildings. The method provides a valuable roadmap for public building retrofits toward net-zero emissions.



Kamu binalarında NSEB geçişi ve SGE azaltımı için aşamalı bir yaklaşım: İBB Fatih Spor Kompleksi örnek vaka çalışması

Alpay Akgüç^{1*}, Gözde Gali Taşçı²

¹İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, 34060, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Beykent Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Ayazağa, 34398, Sarıyer, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Türkiye'nin NSEB ve SGE azaltım hedefleri doğrultusunda kamuya ait bir spor tesisi iyileştirilmiştir
- EKB sınıfı C'den B'ye yükseltilmiş, SGE'sinde %48 oranında azalma sağlanmıştır
- Yarım hücre PV paneller, binanın birincil enerji tüketiminin %10'undan fazlasını karşılamıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.07.2025

Kabul: 11.11.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1742046

Anahtar Kelimeler:

NSEB,
SGE azaltımı,
bina enerji performans
simülasyonu,
BEP-TR,
yarım hücreli PV panel

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'de kamuya ait spor tesislerinin neredeyse sıfır enerjili bina (NSEB) dönüşüm potansiyelini değerlendiren öncü bir çalışmadır. Araştırmanın ana amacı, İstanbul'daki Fatih Spor Kompleksi'nin Binalarda Enerji Performansı (BEP) Yönetmeliği'nde tanımlanan NSEB kriterlerine ve Türkiye'nin 2030 yılı karbon emisyon azaltım hedefine (%41) uygun hale getirilmesidir. Çalışma üç temel adımda yürütülmüştür: İlk olarak, bina kabuğu bileşenlerinin TS825:2024 standardında tanımlanan termofiziksel özellikler doğrultusunda iyileştirilmesi ve yapay aydınlatma sistemlerinin ANSI/ASHRAE 90.1:2022 standardındaki aydınlatma güç yoğunluğu (LPD) sınırlarına uygun şekilde yeniden düzenlenmesiyle, yapının enerji kimlik belgesi (EKB) sınıfı B seviyesine yükseltilmiştir. İkinci adımda, çatıya yerleştirilen her biri 550 Wp gücünde toplam 225 adet yarım hücreli fotovoltaik (PV) panel ile elde edilen elektrik üretimi sayesinde, binanın birincil enerji tüketiminin %11'inin yenilenebilir kaynaklardan karşılanması sağlanmıştır. Üçüncü adımda ise, tüm bu iyileştirmelerin sonucunda binanın toplam sera gazı emisyonlarında (SGE) %48 oranında bir azalma sağlandığı gösterilmiştir. Bu çalışmanın özgün değeri, Türkiye'de ilk kez bir kamu spor tesisinde NSEB dönüşüm sürecinin enerji performansı, yenilenebilir enerji katkısı ve SGE azaltımı boyutlarıyla birlikte detaylı olarak modellenmiş ve simülasyon tabanlı olarak analiz edilmiş olmasıdır. Elde edilen sonuçlar, kamu binalarının NSEB dönüşümünde izlenebilecek bütüncül bir yol haritası sunarak, Türkiye'nin ulusal karbon nötr hedeflerine ulaşma potansiyeline model oluşturacak niteliktedir.

A stepwise approach to nZEB transition and GHG emission reduction in public buildings in Türkiye: A case study of the IMM Fatih Sports Centre

HIGHLIGHTS

- Public sports facility retrofitted to meet Türkiye's nZEB and GHG emission reduction targets
- EPC improved from class C to B; 48% reduction in GHG emissions achieved
- Half-cut PV panels covered over 10% of the building's primary energy consumption

Article Info

Research Article

Received: 21.07.2025

Accepted: 11.11.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1742046

Keywords:

nZEB,
GHG emission reduction,
building energy performance
simulation,
BEP-TR,
half-cut PV panel

ABSTRACT

This study pioneers the evaluation of nearly zero-energy building (nZEB) transformation potential in publicly owned sports facilities in Türkiye. Focusing on the Fatih Sports Complex in Istanbul, the research aims to align the building with the nZEB criteria defined in the Building Energy Performance (BEP) Regulation and support Türkiye's 2030 greenhouse gas (GHG) emission reduction target of 41%. The study followed a three-phase approach. In the first phase, the building envelope was upgraded in line with the TS825:2024 standard, and artificial lighting systems were redesigned to meet ANSI/ASHRAE 90.1:2022 lighting power density (LPD) limits, raising the building's Energy Performance Certificate (EPC) rating to Class B. In the second phase, 225 half-cut photovoltaic (PV) panels (550 Wp each) were installed on the roof, supplying 11% of the building's primary energy demand from renewable sources. In the third phase, the combined measures achieved a 48% reduction in total GHG emissions. The originality of this study lies in being the first in Türkiye to model and simulate a comprehensive nZEB transformation of a public sports facility, integrating energy performance improvements, renewable energy integration, and emission reduction. The results offer a practical roadmap for public buildings in achieving national energy efficiency and carbon neutrality goals.

1. Giriş (Introduction)

Binaların işletimi, küresel nihai enerji tüketiminin %30'unu ve enerjiyle ilgili küresel emisyonların %26'sını oluşturmaktadır (bu emisyonların %8'i binalardaki doğrudan emisyonlar, %18'i ise binalarda kullanılan elektrik ve ısının üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlardır) [1]. Enerji tüketimi ve emisyonların azaltımı amacıyla AB'nin düzenlemekte ve çeşitli zamanlarda güncellemekte olduğu Binalarda Enerji Performansı Direktifi'nde (EPBD) yer alan stratejiler Türkiye'nin kabul ettiği yasal çerçevelerin oluşumunda da etkili olmaktadır. Bu doğrultuda, 2010 yılında revize hali yayınlanan EPBD, neredeyse sıfır enerjili binalar (NSEB) kavramını tanıtmış ve sayılarının artırılması için ulusal planlar yapılmasını öngörmüştür [2]. NSEB, yüksek enerji performansına sahip ve enerji ihtiyacı çok düşük olan, ihtiyaç duyduğu enerjinin büyük bir kısmını yerinde veya yakınındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılayan binaları ifade etmektedir [3]. Direktif hem yeni binaların hem de büyük yenileme gerektiren mevcut binaların, minimum enerji performansı hedeflerini karşılamalarını önermektedir. Buna yönelik olarak AB ülkeleri için referans değerler belirlenmiştir. Örneğin; Akdeniz iklim kuşağında, yeni tek aileli konutlara yönelik NSEB referans değerleri net birincil enerji tüketimi (BET) için 0–15 kWh/m².yıl, toplam BET için ise 50–65 kWh/m².yıl aralığında olup, bunun yaklaşık 50 kWh/m².yılının yerinde yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması öngörülmektedir [4]. 2018 yılında yenilenen EPBD, her Üye Devletin, kamuya ait ve özel olmak üzere, konut ve konut dışı ulusal bina stokunun 2050 yılına kadar yüksek enerji verimliliğine sahip ve karbonsuzlaştırılmış bir yapı stokuna dönüştürülmesini desteklemek amacıyla, uzun vadeli bir yenileme stratejisi geliştirmesini öngörmektedir. Söz konusu strateji, mevcut binaların maliyet optimum bir şekilde NSEB'ye dönüştürülmesini desteklemeyi amaçlamaktadır [5]. Direktif'e göre maliyet optimum seviye, bir binanın tahmini ekonomik yaşam döngüsü boyunca en düşük maliyete yol açan enerji performans seviyesini ifade eder [2]. Bu yeni hedef ile, binaların enerji performansının iyileştirilmesinde sadece enerji verimliliği artırımı değil, aynı zamanda karbonsuzlaştırma stratejilerinin entegrasyonu da öncelikli hale gelmiştir. 2024 yılında yeniden revize edilen direktifte (EPBD 2024/1275), AB'nin iklim ve enerji hedefleri daha ileriye taşınarak, binalar için yeni bir vizyon sunulmuştur. Bunun sonucunda çok düşük enerji talebine sahip, fosil yakıt kaynaklı sıfır yerinde karbon emisyonu ve sıfır ya da çok düşük operasyonel sera gazı emisyonuna (SGE) sahip, sıfır emisyonlu binalar kavramı tanıtılmıştır. Tüm yeni binaların 2030 yılına kadar sıfır emisyonlu olması ve mevcut binaların ise 2050 yılına kadar sıfır emisyonlu binalara dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, 2018 yılında direktifte yer alan yenileme stratejilerinin, 2024 yılındaki direktif takiben tanımlanarak ilk adımın NSEB'leri sağlamak, ardından sıfır emisyonlu binalara ulaşmak olduğu açıklanmıştır [6]. Böylece NSEB, sıfır emisyon binaları sağlamanın bir adımı haline gelmiştir.

EPBD 2018/844 direktifini takiben, Türkiye'de bina enerji verimliliği ve kimliklendirme uygulamalarını düzenleyen Binalarda Enerji Performansı (BEP) Yönetmeliği 2022 yılında revize edilmiş; bu revizyon kapsamında NSEB tanımı ve ilgili hedefler yönetmeliğe dahil edilmiştir. Yönetmelikte NSEB kavramı, bu niteliğe sahip binaların Enerji Kimlik Belgesinde (EKB) enerji performans sınıfının B veya daha iyi olması ve aynı zamanda binanın birincil enerji ihtiyacının en az %10'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması zorunluluğunu içermektedir. Ayrıca NSEB kriterlerini sağlayan binalara düzenlenen EKB'de, bu durumun belirtilecek olması da Türkiye'de NSEB kavramı ile EKB'nin birleştiğini göstermiştir [7]. NSEB tanımı genel kapsamının yapılması dışında net kriterlere bağlı tanımlanmadığı için sınırlar ülkeler arasında farklılıklar göstermektedir. Maduta, vd. [8] bu sınırların iklimsel,

sosyal ve ekonomik koşullar dikkate alınarak farklılaştığını ve böylece çok çeşitli tanımların ortaya çıkmasına ve buna bağlı olarak farklı düzeylerde hedeflerin belirlenmesine yol açtığını belirtmiştir. Sönmez ve Maçka Kalfa [9] bazı üye ülkeler ile Türkiye'nin tanımını kıyaslamış; enerji performansı göstergeleri ve yenilenebilir enerji kaynağı ve katkı miktarlarında farklılıklar tespit etmişlerdir. Türkiye'de enerji performansı göstergesi BET'in azaltımıdır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak sabit bir kaynak belirtilmemekle birlikte, katkı miktarı %10 olarak ifade edilmiştir. Türkiye'deki binaların NSEB olabilmesi için EKB seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. EKB, BEP-TR yazılımı kullanılarak verilmektedir. Yönetmelik doğrultusunda EKB alacak olan yeni binalar D sınıfı ve daha fazla enerji tüketimine ve CO₂ salımına sahip olamazken [10], 2022 yılında gelen NSEB tanımıyla EKB seviyesinin B sınıfı olması gerekmektedir. Zengin, vd. [11] çalışmalarında EKB'nin EPBD'ye bağlı olarak verilmesi zorunluluğunu aktarmış ve üç örneklem üzerinde BEP-TR ile analiz yapmışlardır. Ancak bu analizlerin NSEB ile bağlantısını ortaya koymamışlardır. BEP-TR ile ilgili yayınlar çoğunlukla programın kullanımına yönelik olup [12-15], Türkiye'de BEP-TR ile NSEB'i birleştiren bilimsel çalışmaların sayısı azdır. Bu çalışmalardan bazılarında aşağıda yer verilmiştir.

Şentürk ve Özcan [16] konut binalarında NSEB uygulamaları için örnek oluşturabilecek çalışmalarında, üç katlı bir konut binasında BEP Yönetmeliği'nde yer alan NSEB tanımı ve Türkiye'nin 2030 karbon azaltım hedefleri doğrultusunda, referans bina üzerinde sırasıyla bina kabuğu opak ve saydam bileşenlerinde ve aydınlatma sistemlerinde iyileştirme, ısıtma sisteminde değişim ve çatıya fotovoltaik (PV) panel eklenmesi adımlarını uygulamışlardır. Bu uygulamalar sonucunda, en verimli senaryonun EKB sınıfı A olarak belirlenmiş, yenilenebilir enerji katkısı birincil enerji ihtiyacının %49,40'ı olarak hesaplanmış, aynı senaryonun CO₂ emisyonu yılda -0,042 kg CO₂/m² azaltım olarak belirlenmiştir. DesignBuilder simülasyonu aracı kullanılarak yapılan bu hesaplamaların sonucunda maliyet hesabı da yapılarak, yapılan tüm iyileştirmelerin 6 yılda geri ödendiği belirlenmiştir. Turhan vd. [17], henüz Türkiye'nin NSEB tanımı belirli değilken yapmış oldukları çalışmalarında, bir okul binasında NSEB hedefine ulaşabilmesi için bazı senaryolar test etmiştir. Çalışmanın ana amacı NSEB dönüşümünde yenilenebilir enerji sistemlerinin katkısının ortaya konmasıdır. Çalışmada öncelikle binanın oda termostat sıcaklıklarında değişim ve bina kabuğu saydam bileşenlerinde iyileştirme yapılmıştır. Ardından sırasıyla PV panel, güneş kolektörü ve üç kanatlı rüzgâr türbini eklenmiştir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin katkıları ayrı ayrı incelenmemiş, PV panel ile başlayarak sistemler eklenmiştir. Bu nedenle tüm sistemlerin bir arada olduğu senaryo oldukça verimli olarak belirlenmiştir. DesignBuilder simülasyonu aracı kullanılarak yapılan bu çalışmanın sonunda tüm senaryolar için geri ödeme süreleri de hesaplanmıştır. Gediz Taşkın ve Carlak [18] havalimanlarında NSEB yaklaşımına yönelik çalışmalarında, enerji verimliliğinin sağlanması için tüm bina sistemlerine bütüncül bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Çalışmanın sonunda CO₂ emisyon hesabı da yapılmıştır. Yapının tüm ek binaları ile birlikte NSEB'e dönüşümünün sağlanıp LEED sertifikasını alabilecek puanı elde edebilmesi hedeflenmiştir. Ancak çalışmanın sonunda, önerilen tüm iyileştirme adımları uygulansa bile yüksek tüketimi nedeniyle NSEB'in üzerinde çalışılan tüm havalimanı için sağlanamayacağı belirlenmiştir. Ekşi ve Özcan [19] tek katlı, yalıtımsız bir konut binasının NSEB dönüşümünü sağlayabilmek için bina kabuğu opak ve saydam bileşenlerinde ve aydınlatma sistemlerinde iyileştirme yapmış, iklimlendirme sistemini toprak kaynaklı ısı pompası ile değiştirmiş ve çatıya PV panel eklemiştir. Bunların sonucunda binada önemli oranda iyileşme sağlanarak enerji kimlik sınıfı G'den B'ye çıkarılmıştır. Yenilenebilir enerji sisteminin katkısı ise %90,91 olarak belirlenmiştir. Çalışma, Türkiye'nin 2053 net sıfır karbon hedefi ile de birleştirilmiş ve yapılan iyileştirmeler

sonucunda CO₂ emisyonunda %80 azaltım sağlanmıştır. Çalışmalarında DesignBuilder simülasyon aracını kullanmışlardır. Gür vd. [20] çalışmalarında, NSEB tüketimine sahip binalar için özel olarak tasarlanmış güneş destekli bir yerden ısıtma sisteminin tasarımına odaklanmıştır. Bu amaçla bir konteynır oda seçilmiş ve sistemin birincil ısı kaynağı PV/T (PV/Termal) kolektör olarak belirlenmiştir. Sistemin performansını artırmak amacıyla, yerden ısıtma borusunun etrafına farklı kalınlıklarda yerleştirilen ceplerde nano takviyeli faz değiştiren malzeme kullanılmıştır. Bu yaklaşımın temel amacı, güneş ışınının bulunmadığı gece saatlerinde, ilave bir enerji tüketimi olmadan oda sıcaklığını sağlamakdır. Çalışma, NSEB tüketimli binalar için güneş destekli yerden ısıtma sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonuna yönelik bilgiler sunmaktadır.

Türkiye’de yürütölmüş olan bu çalışmaların yanı sıra büyük çoğunluğu Avrupa Birliği’nde (AB) olmakla birlikte, AB dışındaki diğer ölkelerde NSEB ve maliyet optimum seviyelerin belirlendiği sayısız çalışma bulunmaktadır. AB’nin enerji verimliliğine yönelik hedefleri doğrultusunda mevcut binaların NSEB seviyesine dönüştürölmüş çevresel olduğu kadar ekonomik açıdan da büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, farklı iklim bölgeleri ve bina tipolojileri için maliyet optimum enerji yenileme stratejilerini değerlendiren çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Ferreira vd. [21], Portekiz’deki konut stoğu için temsil niteliğindeki referans binaları analiz ederek maliyet optimum ve NSEB kavramlarını karşılaştırmıştır. Çalışmada, NSEB seviyelerine en düşük maliyetle ulaşmanın mümkün olup olmadığı değerlendirilmiş ve mevcut bina kabuğuna yenilenebilir enerji sistemlerinin eklenmesiyle bu dönüşümün maliyet-etkin şekilde sağlanabileceği ortaya konmuştur. Benzer şekilde, Mateus vd. [22], Portekiz’in Porto kentindeki bir tekil aile konutu için farklı enerji yenileme senaryolarını inceleyerek, güneş enerjisi sistemlerinin NSEB seviyesine ulaşmadaki katkısını ve çevresel ile ekonomik etkilerini değerlendirmiştir. Sonuçlar, bu sistemlerin enerji ihtiyaçlarını karşılamada etkili olduğunu ve kısa geri ödeme süreleri sunduğunu göstermektedir. Monzón-Chavarrias vd. [23], Portekiz ve İspanya’daki düşük enerji performanslı konutların NSEB standartlarına göre yenilenmesini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışma, bina kabuğu ve aktif sistemlerin çeşitli kombinasyonlarıyla yapılan yenilemelerin CO₂ emisyonlarını ne ölçüde azalttığını değerlendirmektedir. Sonuçlar, bu tür konutların yenilenmesiyle CO₂ emisyonlarında %80–96 (Portekiz) ve %71–94 (İspanya) oranında azalma sağlanabileceğini göstermektedir. Fernandez-Luzuriaga vd. [24], İspanya’nın Bilbao kentindeki konut stokunu analiz etmiş olup, derin enerji yenilemelerinin yüksek başlangıç maliyeti ve uzun geri ödeme süresi nedeniyle yaygınlaşmadığını belirterek, bu sorunu aşmak için maliyet optimum yöntemini kentsel ölçekte uygulamayı önermiştir. Ferrara vd. [25, 26], Fransa’daki tekil aile konut tipolojilerinin maliyet optimum enerji performans seviyesini belirlemek için TRNSYS ve GenOpt yazılımlarını kullanmıştır. Farklı yapı bileşenlerinin ve HVAC sistemlerinin kombinasyonlarını optimize ederek yıllık BET’ini azaltıldığı NSEB tasarımlarını geliştirmiştir. Guardigli vd. [27], İtalya’nın Bologna kentindeki büyük ölçekli sosyal konutlar için karar destek sistemleriyle oluşturulan senaryoların hem enerji verimliliğini hem de maliyet etkinliğini sağladığına ortaya koymuştur. Carpino vd. [28], 1970’lerde İtalya’da inşa edilmiş enerji tüketimi yüksek bir sosyal konutu iki farklı iklim bölgesinde analiz ederek, bina kabuğunun iyileştirilmesi, PV panellerin entegrasyonu ve ısı pompasıyla birlikte çalışan güneş panelleri kullanarak ısıtma, soğutma ve sıcak su için enerji gereksinimini azaltacak uygun müdahaleleri belirlemiştir. Designbuilder bina simülasyon aracıyla yapılan analizler, NSEB hedefi ve mevzuatın öngördüğü asgari müdahaleler arasındaki farkları ortaya koymuş; bu çözümlerin başlangıç koşulları ve iklimden etkilendiğini göstermiştir. Ascione vd. [29], bina kabuğu enerji tasarımı için bir genetik algoritma ile çalışan çok amaçlı bir

optimizasyon yaklaşımı önermiştir. MATLAB ve EnergyPlus araçlarının entegrasyonu ile bir İtalyan konutu için yapılan analizde, bir yandan BET, global maliyet ve konforsuz saatler en aza indirilirken, diğer yandan NSEB ve monokristal PV panellerin de bulunduğu maliyet-optimal çözümler elde edilmiştir. Çalışma, farklı iklim bölgeleri için düşük BET (62,0–91,9 kWh/m²yıl) ve global maliyet (456–665 €/m²) değerleriyle kamu ve özel sektör için etkili tasarım stratejileri sunmaktadır. Araştırmacı bir diğer çalışmasında ise [30] güney İtalya’da Akdeniz iklimine uygun olarak inşa edilen ve 82 m² alana sahip olan NSEB bir tekil aile konutunu incelemiştir. Binada, yenilenebilir enerji sistemi olarak 16 adet 330 Wp gücünde monokristal silikon PV paneller kullanılmıştır. Gerçek koşullarda yapılan yaz dönemi izleme verileriyle enerji performansı bir arada değerlendirilmiş, tasarım çözümlerinin etkinliği test edilmiştir. Binanın performansı, yasal standarttaki ve yenilenmemiş bir bina ile karşılaştırılmış; ayrıca bu tasarımın diğer Akdeniz şehirlerine (Lizbon, Montpellier, Madrid, Sevilla ve Atina) uygulanabilirliği araştırılmıştır. Pallis vd. [31], Yunanistan’daki mevcut konut stokuna yönelik, içinde iklimlendirme sistemlerine entegre edilmiş PV panellerin de olduğu farklı enerji verimliliği önlemlerinin maliyet-etkinliğini analiz ederek, NSEB tanımıyla maliyet-optimal çözümler arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Tekil ve çok aileli konut tipleri için yatırım, işletme ve bakım maliyetleri Avrupa yönetmeliklerine göre hesaplanmıştır. Sonuçlar, birçok durumda NSEB düzeyinin maliyet-optimal seviyenin ötesinde kaldığına ortaya koymuştur. Araştırmacı bir diğer çalışmasında [32], Yunanistan’daki yeni tekil ve çok aileli konutlar için farklı enerji önlemlerinin maliyet-etkinliğini ve enerji tasarrufu potansiyelini incelemiştir. Isı pompalarının, özellikle daha yüksek ısıtma/soğutma yüklerinde ve sert iklim koşullarında daha rekabetçi hale geldiği; ayrıca PV sistemlerin, yüksek maliyetlerine rağmen, özellikle ısı pompalarıyla birlikte kullanıldığında net sıfır enerji hedefi için vazgeçilmez olduğu vurgulanmıştır. Kıbrıs Lefkoşa’da gerçekleştirilen bir çalışmada Theokli vd. [33], bir binaya entegre edilen termal (BIPV/T) çift cephe sistemi ile operasyonel enerji tüketiminde anlamlı azalmalar sağlandığını ve geri ödeme süresinin yaklaşık 14,5 yıl olduğunu bildirmiştir. İrlanda’da yapılan bir çalışmada Moran vd. [34], bir konut binasında ısı yalıtımı uygulaması, ısıtma sistemi yenilenmesi ve PV panel entegrasyonunu içeren beş aşamalı enerji iyileştirme stratejisini, ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri dikkate alan sürdürülebilirlik endeksi çerçevesinde değerlendirmiş ve birincil enerji kullanımında maksimum %75 azalma elde etmiştir. Brezilya’da Costa vd. [35], ofis binalarının enerji iyileştirmesini cephe elemanlarının optik ve termofiziksel özellikleri, gölgeleme, saydamlık oranı, havalandırma ve iklimlendirme stratejileri açısından incelemiştir. Ancak, diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada ekonomik etki ve sürdürülebilirlik endeksleri değerlendirme kapsamı dışında tutulmuş, 69 senaryo arasından yalnızca 11 alt bileşenden oluşan bir yenileme paketiyle NSEB hedefi yakalanabilmiştir. Eğitim yapıları ise enerji yenileme araştırmalarının odak noktalarından biri olarak öne çıkmaktadır. Ascione vd. [36], İtalya’daki Sannio Üniversitesi’nde bina kabuğu, HVAC ve yenilenebilir enerji sistemlerine yönelik çoklu optimizasyon stratejileri uygulamış ve birincil enerji tüketimini 12 kWh/m².yıl değerinin altına indirerek maliyet optimum NSEB düzeyine ulaşmıştır. Asdrubali vd. [37], İtalya Torino’daki bir lise binasında bina kabuğu, HVAC, aydınlatma, gölgeleme elemanları ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonuna dayalı senaryoları değerlendirmiş; NSEB dönüşüm senaryolarının enerji ve karbon geri ödeme sürelerinin mevcut binanın yaşam döngüsünden daha kısa olduğunu göstermiştir. Moazzen vd. [38], Türkiye’nin nemli ılıman ve soğuk iklim bölgelerinde yer alan iki eğitim yapısında bina kabuğunun optik ve ısı özelliklerinin iyileştirilmesi ile aydınlatma ve ısıtma sistemlerine yönelik stratejileri maliyet ve CO₂ emisyonları açısından analiz etmiş; sonuçta sırasıyla %50–62 ve %44–57 oranlarında birincil enerji kullanımında azalma elde edilmiştir. Benzer şekilde, Zuhaib ve Goggins [39], bir üniversite binasında dış duvar ve

çatı yalıtımı, aydınlatma ve kontrol sistemlerinin iyileştirilmesi, pencere camlarının değiştirilmesi, hava sızdırmazlığının artırılması ve ısı geri kazanımlı mekanik sistem ile PV panellerin entegrasyonunu içeren üç farklı iyileştirme senaryosu uygulanmış; bunun sonucunda birincil enerji tüketiminde %60, konforsuz saatlerde ise %38 oranında azalma sağlanmışlardır. İskandinav ülkelerinde NSEB alanında yapılan çalışmalar da dikkat çekicidir. Marszal ve Heiselberg [40], Danimarka'daki çok aileli bir NSEB için yaşam döngüsü maliyet analizini uygulayarak, enerji tüketiminin asgari düzeye indirilmesi ve kalan ihtiyacın yenilenebilir kaynaklarla karşılanmasını maliyet-etkinliği sağladığını ortaya koymuşlardır. Hasan vd. [41], Finlandiya'da tek aileli bir konutta bina kabuğu ve HVAC sistemlerine ilişkin seçilmiş tasarım değişkenlerini optimize ederek yaşam döngüsü maliyetini minimize etmiştir. Bu çalışmalarda görüldüğü gibi, NSEB seviyesine ulaşabilmek için maliyet optimal seviyenin belirlenmesi Direktif'in bir gereğidir ve bu gerekliliğin sağlanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu kaynaklar arasında en yaygın ve etkin olanlardan biri güneş enerjisidir [42]. PV sistemler, pazar hâkimiyeti ve uygulama çeşitliliği nedeniyle bina uygulamalarında öne çıkan yenilenebilir enerji teknolojisi [43]. Cephelelerde, cam yüzeylerde veya çatılarda kullanılan bina ile bütünleşik fotovoltaik (BIPV) sistemler, yerel çevresel ve iklim koşullarına kolayca uyum sağlayabilmektedir [44]. Gelişen teknoloji sayesinde, bu sistemlerde kullanılan yeni nesil ince film güneş hücreleri artık daha esnek, daha hafif ve yüksek verimlidir. Bu hücreler; cam, polimer ve metal yüzeyler dâhil olmak üzere pencere, kiremit, ışıklık gibi farklı bina bileşenlerine entegre edilebilmektedir [45]. Son yıllarda, yapı sektöründe derin karbon azaltımını sağlamak amacıyla yapılan araştırmalar, NSEB'lerin geliştirilmesi ve uygulanmasına giderek daha fazla odaklanmaktadır. D'Agostino vd. [73] Avrupa Birliği'nin, EPBD ve Enerji Verimliliği (EED) direktifleri kapsamında, NSEB kavramını düşük karbonlu dönüşüm politikalarının merkezine yerleştirdiğini ve özellikle mevcut kamu ve ticari yapı stokunun yenilenmesinin bu süreçte temel bir zorluk oluşturduğunu belirtmiştir. Benzer biçimde, Paduos ve Corrado [74], Avrupa ülkelerindeki kamu binalarının NSEB düzeyine dönüştürülmesine yönelik maliyet-optimum yaklaşımları karşılaştırmalı olarak incelemiş ve enerji verimliliği ile yenilenebilir enerji entegrasyonunun ekonomik uygulanabilirliğinin bölgesel ve iklimsel koşullara bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuşlardır. Çalışma sonuçları, kamu binalarının NSEB dönüşümünün enerji ve karbon azaltımı açısından yüksek potansiyel taşıdığını, ancak bu potansiyelin etkin biçimde değerlendirilebilmesi için ülkeye özgü politika ve teşvik mekanizmalarının oluşturulmasının kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) tarafından 2015 yılında düzenlenen Taraflar Konferansı'nda (COP21) Paris Anlaşması [46] kabul edilmiş ve 2016 yılında yürürlüğe girmiştir. Anlaşma doğrultusunda 2020 sonrası için ilk kez küresel ölçekte anlaşmaya taraf olan bütün ülkeler SGE azaltımı taahhüdünde bulunmuşlardır. Türkiye, Paris Anlaşması çerçevesinde, 2030 yılına kadar emisyon azaltım hedefini %21 olarak açıklamıştır. 2021 yılında düzenlenen COP26'da ortaya konan hedefler doğrultusunda, küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme kıyasla 1,5°C ile sınırlandırılabilmesi için yüzyıl ortasına kadar net sıfır emisyonun ulaşılmasının hayati önem taşıdığı belirtilmiştir. Bu hedefe ulaşmak için mevcut SGE'lerinin 2020 yılına kadar en az %70 oranında azaltılması gerekmektedir. Aynı zamanda, fosil yakıt ithalatına olan bağımlılığın azaltılması ve enerji talebinde yenilenebilir enerji kaynaklarının rolünün artırılması kritik bir öncelik haline gelmiştir. Bu bağlamda, fosil yakıt temelli sistemlerden yenilenebilir enerji çözümlerine geçiş destekleyen politikaların sayısı artmış, özellikle binaların karbon salınımını azaltılması hükümetlerin enerji dönüşüm stratejilerinde temel hedeflerden biri olarak öne çıkmıştır [47]. 2022 yılında Mısır'da düzenlenen 27. Taraflar Konferansı'nda (COP27)

ise, Türkiye 2030 yılına kadar %21'e varan artıştan azaltım hedefini güncelleyerek, %41'e yükselttiğini açıklamıştır [48]. Bununla beraber Türkiye, 2053 yılına yönelik net sıfır emisyon hedefini açıklamıştır [49]. Bu hedefler, EPBD 2024/1275'in kapsamında bulunan sıfır emisyon bina hedefi ile de uyumaktadır. Bu sebeple, net sıfır emisyon hedefinin ilk adımı olan NSEB için analiz yapılırken, emisyon hesapları da bazı çalışmalara dahil edilmiştir [16, 19]. Türkiye'de bu konuda yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yukarıda NSEB kapsamında bu çalışmalardan bazılarını yer verilmiştir [16, 18, 19]. Bununla birlikte, yalnızca emisyon azaltım hedefini sağlamak amaçlı yapılmış bazı çalışmalar da bulunmaktadır. Sümer ve Güngör [50], net sıfır karbon hedefine yönelik yapmış oldukları çalışmalarında, Antalya'da konut ısıtmasında fosil yakıt yerine gün ısı sisteminin kullanımını test etmişlerdir ve bir alternatif olabileceğini belirtmişlerdir. Atmaca ve Atmaca [51], Türkiye'deki konut binaları için karbon ayak izi araştırmalarını, binanın tüm yaşam döngüsünü dahil ederek yapmışlardır. Bunun için standart bir konut binası üzerinde emisyon hesaplarını yapmış ve emisyon azaltımı için bina kabuğu iyileştirmeleri, yenilenebilir enerji kullanımı, malzemelerin geri dönüşümü, vb. yaşam döneminin her adımı için önerilerde bulunmuşlardır. Karanfil vd. [75] ise, gelişmekte olan ülkeler için NSEB ofis binalarına yönelik bir "karbonsuzlaşma olgunluk ölçeği ve yol haritası" geliştirmiştir. Türkiye örneği üzerinden yapılan analiz, ulusal NSEB tanımlarının gelişmekte olduğunu ancak uygulamaların henüz erken aşamada kaldığını, operasyonel ve gömülü karbonun bütüncül biçimde ele alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, NSEB'lerin küresel karbon azaltım hedefleriyle yerel yapı pratikleri arasında kritik bir köprü işlevi gördüğü ve bütüncül, yaşam döngüsü temelli, bağlama duyarlı stratejilerin karbon nötr yapılaşma sürecinde temel önem taşıdığı sonucuna varılmaktadır.

Türkiye, AB'ye aday bir ülke olarak enerji verimliliği, SGE'lerinin azaltımı ve NSEB yaygınlaştırılması konularında AB direktifleriyle uyumlu yasa ve yönetmelikler geliştirmektedir. Ancak bu yasal altyapının varlığı, uygulamada etkinliğin sağlandığı ve denetim mekanizmalarının yeterince işlediği anlamına gelmemektedir. NSEB uygulamaları özelinde değerlendirildiğinde, Türkiye'de bu alandaki gelişmelerin yavaş ve sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir. 2030 ve 2050 yıllarına yönelik ulusal sera gazı azaltım hedeflerine ulaşabilmesi için hem mevzuat uygulamaları hem de piyasa dinamikleri açısından önemli adımların atılması gerekmektedir. Halihazırda yürürlükte olan yönetmelikler, yalnızca enerji performansı açısından minimum gereklilikleri belirlemekte olup, NSEB kriterlerinin açık ve ölçülebilir biçimde tanımlanmamış olması, proje tasarımlarında bu hedeflere uygun kararların alınmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir bina dönüşümünde tasarım sürecinden uygulama aşamasına kadar çok sayıda belirsizliğe neden olmakta ve standartlaşmayı engellemektedir. Mevcut uygulamalarda karşılaşılan temel zorluklar arasında; fosil yakıtların kullanımının azaltılmasına yönelik önlemlerin yetersizliği, yenilenebilir enerji sistemlerine yönelik teşvik mekanizmalarının sınırlılığı, birincil enerji ve CO₂ emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan dönüşüm katsayılarına ilişkin kaynakların eksikliği ya da erişim güçlüğü, maliyet-optimal yaklaşımlar ile yasal zorunluluklar arasındaki tutarsızlıklar ve tasarım aşamasında iç mekân çevre kalitesi, kullanıcı konforu ve yaşam döngüsü etkilerinin yeterince dikkate alınmaması yer almaktadır. Ayrıca, BEP Yönetmeliği'nin NSEB kriterlerini kapsayacak şekilde revize edilmemiş olması, Türkiye'de konut ve hizmet binalarında NSEB dönüşümünün teknik ve ekonomik potansiyeline rağmen yaygınlaşmasını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Yönetmelikte maliyet-optimal seviyelere ilişkin sınır değerlerin ve hesaplama metodolojisinin yer almaması da özellikle mevcut bina stokunun NSEB dönüşümüne uygun biçimde yönlendirilmesini zorlaştırmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Türkiye’de NSEB dönüşümüne ve karbon emisyon azaltım hedeflerine ulaşmaya yönelik uygulamaların sayısı oldukça sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Bunun başlıca nedeni, NSEB kavramının BEP Yönetmeliği’ne yeni dahil edilmiş olmasına karşın, ilgili teknik ve performans kriterlerinin henüz net olarak tanımlanmamış olmasıdır. Ayrıca, Türkiye’de karbon emisyonlarının azaltımı ile NSEB hedefleri arasındaki ilişkinin yeterince açık biçimde kurulmamış olması da bu süreci yavaşlatmaktadır. Bunların yanı sıra, yapılan akademik ve teknik çalışmaların çoğu konut binalarına odaklanmakta olup, konut dışı binalardan eğitim ve sağlık gibi kamu hizmet binalarına yönelik uygulama örneklerinin sayısı oldukça sınırlıdır; kamu binalarına bağlı spor tesisi örneğine ise hiç rastlanmamaktadır. AB direktiflerinde ve bu direktiflere paralel olarak hazırlanan Türkiye’deki ulusal strateji belgelerinde, bina enerji verimliliği uygulamalarına öncelikle kamu binalarından başlanması gerektiği açıkça ifade edilmektedir. Bu bağlamda, 2017–2023 dönemini kapsayan I. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı’nda yer alan B8 eyleminde, “Kamu binalarının özel sektöre örnek teşkil edecek şekilde belgelendirilmesi sağlanacaktır” ifadesi yer almakta ve kamu binalarının enerji verimliliği dönüşümünde öncü rol oynaması gerektiği vurgulanmaktadır [52]. Bu doğrultuda, Türkiye’deki kamu kurumlarına bağlı spor tesislerinin NSEB’ e dönüştürülmesi için gerekli adımların belirlenmesi büyük önem teşkil etmektedir.

Bu çalışma, 2012–2015 yılları arasında AB tarafından desteklenen CIP ICT PSP programı kapsamında geliştirilen SmartSpaces projesinin İstanbul pilot bölgesinde yer alan İBB Fatih Spor Kompleksi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 19 Şubat 2022 tarihli ve 31755 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik”te [7] tanımlanan NSEB minimum gerekliliklerini ve 2024–2030 İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı’nda [49] belirlenen %41 SGE azaltım hedefini karşılayacak şekilde, kamuya ait bir spor tesisinde kapsamlı iyileştirme önerileri sunarak bu binanın NSEB’ e dönüşüm adımlarını belirlemektir. Bu çalışmanın özgün değeri, Türkiye’de ilk kez kamuya bağlı bir spor tesisi tipolojisinde, NSEB dönüşümüne ve karbon emisyonu azaltımına yönelik adımların, kapsamlı bir biçimde ele alınarak belirlenmiş olmasıdır.

2. Araştırmanın Yöntemi (Methodology of Research)

Bu çalışmada, İBB Fatih Spor Kompleksi’nin Türkiye’nin 2030 karbon emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda, NSEB kriterlerine uygun hale getirilmesi amacıyla izlenen yöntem, üç ana adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, örnek vaka çalışmasının EKB sınıfının ‘B’ seviyesine yükseltilmesi hedeflenmiş; ikinci adımda ise yenilenebilir enerji katkı oranının %10’un üzerine çıkarılmasına yönelik stratejik adımlar uygulanmıştır. Son adımda ise, birinci ve ikinci adımlar doğrultusunda yapılan hesaplamalarla, COP27 sonrasında Türkiye tarafından açıklanan %41’lik emisyon azaltım hedefinin sağlanabilir olduğu ortaya konulmuştur.

Birinci adımda, Türkiye’de yürürlükte olan BEP Yönetmeliği doğrultusunda, binanın EKB sınıfının minimum B seviyesine çıkarılması hedeflenmiştir. Bu yönetmelik, Türkiye’deki binalarda enerji verimliliğini artırmak, enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlamak ve SGE’lerini azaltmak amacıyla hazırlanmıştır. Yönetmelik, yeni ve mevcut binaların tasarımı, inşası, işletimi ve yenilenmesi süreçlerinde enerji performansına ilişkin asgari gereklilikleri tanımlar. Kapsam itibarıyla, toplam kullanım alanı 50 m²’nin üzerinde olan ve dört aydan fazla sürede sürekli kullanılan tüm binaları kapsar [7]. Yönetmelik çerçevesinde, EKB düzenlenmesi, ısı yalıtımı, mekanik sistemlerin enerji verimliliği, aydınlatma sistemleri ve yenilenebilir enerji kullanımı gibi unsurlar değerlendirilmekte; NSEB dönüşüm hedefleri kapsamında yeni yapılacak binalar için en az B seviyesi öngörülmektedir. Bu yönetmelik, AB’nin enerji performansı direktifleri ile uyumlu olarak, sürdürülebilir yapılaşmayı destekleyen temel yasal düzenlemelerden biridir. Türkiye’de, bu yönetmelik kapsamında geliştirilen BEP-TR yazılımı aracılığıyla, binalara EKB verilmektedir. BEP-TR yazılımı, basit saatlik yarı dinamik hesaplama yöntemine dayalı olup, binaların enerji performansını doğruya en yakın şekilde tahmin edebilmektedir. Ancak, daha karmaşık bina tiplerinde, detaylı dinamik hesaplama yöntemini temel alan yazılımlar, saatlik yarı dinamik hesaplama yöntemine kıyasla gerçeğe daha yakın sonuçlar sunmaktadır [12]. Bu nedenle, bu çalışmada gerçekleştirilen bina performans analizleri, detaylı dinamik hesaplama yöntemini kullanan DesignBuilder bina simülasyon aracı ile yapılmıştır. Bu araç kullanılarak binanın mevcut enerji performans seviyesi analiz edilirken; bina kabuğu bileşenleri (duvar, pencere, çatı vb.) Türkiye’nin ulusal standardı olan TS 825:2024 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları [53] çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bu standardın amacı, ülkemizdeki binaların ısıtılması ve soğutulmasında kullanılan enerji miktarlarını sınırlamak, enerjiden tasarruf etmek, net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının belirlenmesi sırasında kullanılacak standart hesap metodunu belirlemektir. Ayrıca bu standart, Türkiye’nin farklı iklim bölgelerine göre belirlenmiş, tavsiye edilen U-değerlerini esas alarak, bina kabuğu bileşenleri için gerekli ısı yalıtım düzeylerini tanımlayarak, binaların enerji sınıfını belirleme süreçlerinde temel referans olarak kullanılmaktadır. Bu standart hem yeni inşa edilecek hem de mevcut yapılar üzerinde yapılacak kapsamlı tadilatlar için geçerli olup, BEP Yönetmeliği ve NSEB hedefleriyle uyumlu şekilde, enerji performansı yüksek binaların yaygınlaştırılmasına katkı sağlamaktadır. TS 825 standardı, Türkiye’deki illeri ortalama sıcaklık ve güneş ışınım şiddeti göz önünde bulundurularak derece gün bölgelerine ayırmıştır. Buna göre İstanbul üçüncü derece gün bölgesi olan ılıman iklim bölgesinde yer almaktadır. Bu doğrultuda, örnek vaka binasının kabuğu için bölgelere göre tavsiye edilen U-değerleri tablosunda, üçüncü derece gün bölgesi (İstanbul) için yer alan değerler kabul edilmiştir (Tablo 1).

Mevcut binada yapılan iyileştirmeler (bina kabuğu U değerleri, TS825:2024’te tavsiye edilen değerlere uygun olacak şekilde düzenlenmiştir) sonucunda, bina kabuğunun ısı performansında önemli bir artış sağlanmıştır. Buna ek olarak, iç aydınlatma sistemleri ASHRAE 90.1:2022 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise

Tablo 1. Bölgelere göre tavsiye edilen en yüksek U-değerleri [53] (Recommended maximum U-values by region)

Derece Gün Bölgeleri	Duvar U _D (W/m ² K)	Tavan/Çatı U _T (W/m ² K)	Döşeme U _i (W/m ² K)	Pencere U _P (W/m ² K)	g (-)
1. Bölge	0,45	0,35	0,4	1,8	≤ 0,45
2. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	≤ 0,45
3. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	≤ 0,45
4. Bölge	0,35	0,25	0,3	1,8	≥ 0,55
5. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	≥ 0,55
6. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	≥ 0,55

Tablo 2. Birincil enerjiye göre referans göstergesi (RG kWh/m².yıl) [55]
(Reference indicator based on primary energy (RI, kWh/m².y))

Bina Tipleri	Kullanım Amaçları	1.ısıtma bölgesi (RG)	2.ısıtma bölgesi (RG)	3.ısıtma bölgesi (RG)	4.ısıtma bölgesi (RG)
Konutlar	Tek ve İkiz Aile Evleri	165	240	285	420
	Apartman Blokları	180	255	300	435
Hizmet Binaları	Ofis ve Büro Binaları	240	300	360	495
	Eğitim Binaları (okullar, yurtlar, spor tesisleri vb.) Sağlık Binaları (hastaneler, huzurevleri, yetiştirme yurtları, sağlık ocakları vb.)	180	255	300	450
Ticari Binalar	Otel, Motel, Restoran vb.			540	
	Alışveriş ve Ticaret Merkezleri			750	

Residential Buildings [54] standardı doğrultusunda yenilenecek, yapay aydınlatmadan kaynaklı enerji tüketimi azaltılmıştır. Bu standart, az katlı konut yapıları hariç tüm binalarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiş uluslararası bir standarttır. Standart, binaların tasarım, yapım ve işletim adımlarında enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen minimum performans kriterlerini belirlemektedir. Ayrıca, ısıtma, soğutma, havalandırma, mekanik sistemler, aydınlatma, bina kabuğu ve su ısıtma sistemlerine ilişkin teknik gereklilikleri kapsamaktadır. Bu standartta farklı bina türleri ve alan kullanımına göre maksimum izin verilen aydınlatma güç yoğunlukları (LPD) tanımlanmıştır. LPD, bir binadaki aydınlatma sistemlerinin enerji verimliliğini değerlendirmek için kullanılan bir ölçüttür ve bir binada belirli bir alan için kurulu toplam aydınlatma gücünün (Watt) o alanın yüzölçümüne (m²) oranıdır. Bu kapsamda standardın 9.5.1. no'lu tablosunda yer alan bina alanı yöntemine göre belirlenmiş olan LPD sınır değerleri dikkate alınmıştır.

İyileştirilen binanın EKB'sinin hangi seviyede olduğunu tespit etmek için öncelikle BEP Yönetmeliği'nin Ekler kısmında yer alan Ek-4a: Birincil Enerjiye Göre Referans Göstergesi (RG) tablosunun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu göstergeler Tablo 2'de yer almaktadır. Bu tablo, TS 825 standardının 2008 versiyonu dikkate alınarak hazırlanmış için tabloda sadece dört farklı bölge gün bölgesi görülmektedir. İstanbul, standardın 2008 versiyonunda 2. Derece gün bölgesinde yer almakta idi. Buna göre, örnek vaka binası bina tipi olarak hizmet binalarından olup, kullanım amacı spor tesisi olduğu için RG olarak 255 kWh/m².yıl değeri göz önünde bulundurulmuştur.

Daha sonra, belirlenen RG değeri yönetmeliğin Ek-5a tablosunda (Tablo 3) yer alan katsayılarla çarpılarak, BET'e göre enerji sınıfı endeksi (EP) değerinin aralığı belirlenmelidir. Bu çalışmada EP değeri, simülasyonlar sonucu elde edilen binanın yıllık toplam enerji tüketiminin birincil enerji dönüşüm katsayılarıyla çarpımı neticesinde belirlenmiştir. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından birincil enerji hesabında kullanılmak üzere belirlenen dönüşüm katsayıları; elektrik için 1,788 [56], doğalgaz için ise 1,1 olarak alınmıştır [57]. Yapılan dönüşüm sonucunda, EP değerinin Tablo 3'teki hangi aralığa karşılık geldiği tespit edilerek binanın enerji sınıfı belirlenmiştir. Yukarıda bahsedilen kapsamlı iyileştirmelerin ardından, vaka binasının enerji performans sınıfı C sınıfından B sınıfına yükseltilmiştir.

Çalışmanın ikinci adımında, NSEB kriterleri doğrultusunda binanın yıllık birincil enerji ihtiyacının en az %10'unun hangi yenilenebilir enerji sistemleri ile en verimli şekilde karşılanabileceği araştırılmıştır. Analiz sonucunda, örnek vaka binasının yıllık elektrik tüketiminin oldukça yüksek olduğu belirlenmiş ve bu durum, elektrik yükünü azaltmaya yönelik etkili bir çözüm gereksinimini ortaya koymuştur. Yapılan değerlendirmeler neticesinde, söz konusu enerji ihtiyacının karşılanmasında en uygun sistemin, sınırlı sayıda panel kullanımıyla

yüksek verim elde edilebilen yarım hücre (half-cut) teknolojisine sahip PV paneller olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, binanın çatı alanına entegre edilen yarım hücreli PV paneller aracılığıyla güneş enerjisinden elektrik üretimi sağlanmıştır. PV panellerin yıllık elektrik üretimleri, DesignBuilder bina enerji simülasyon aracılığıyla hesaplanmış olup bu doğrultuda, binanın toplam enerji ihtiyacı içerisindeki payı belirlenmiştir. Toplamda 225 adet PV panel kullanılmış olup, bu paneller güneybatı doğrultusunda ve İstanbul için en yüksek verimliliği sağlayan 26°'lik eğim açısıyla yerleştirilmiştir.

Tablo 3. BET'e göre enerji sınıfı (EP - kWh/m².yıl) [55] (Energy performance class according to primary energy consumption (PEC) (EP - kWh/m².y))

Bina Enerji Sınıfı	BET'e Göre Enerji Sınıfı Endeksi (EP)
A	EP < 0,4*RG
B	0,4*RG ≤ EP < 0,8*RG
C	0,8*RG ≤ EP < RG
D	RG ≤ EP < 1,20*RG
E	1,20*RG ≤ EP < 1,40*RG
F	1,40*RG ≤ EP < 1,75*RG
G	1,75*RG ≤ EP

Bakanlığın NSEB tanımlamasında yer alan yenilenebilir enerji katkısının oranının tespit edilmesi için öncelikle binanın ve PV panellerden elde edilen elektrik enerjisinin birincil enerji cinsinden hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama sonrasında, binaya yenilenebilir enerji katkısının belirlenmesi için Eş. 1 kullanılmıştır. Bu eşitlikte kullanılan değişkenler:

- YEK: Yenilenebilir Enerji Katkısı
- PVPÜE: PV Panellerin Ürettiği Enerji
- MBTET: Mevcut Binanın Toplam Enerji Tüketimi

$$YEK (\%) = \frac{PVPÜE}{MBTET} \times 100 \quad (1)$$

Bakanlığın NSEB tanımında yenilenebilir enerji katkısının minimum %10 oranında olması gerekliliği bulunmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, binanın toplam birincil enerji ihtiyacının ~%11'lik kısmının yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla karşılanabiliyor olduğu tespit edilmiştir. Bu iyileştirmeler sonucunda, ikinci adımın da gerekliliği sağlanarak örnek vaka binasının NSEB kriterlerine uygun olduğu belirlenmiştir.

Üçüncü adımda, Türkiye'nin 2030 yılı için belirlediği %41'lik SGE azaltım hedefi kapsamında, örnek vaka binasında uygulanan enerji verimliliği önlemleri sayesinde mevcut duruma kıyasla yıllık toplam sera gazı salımında sağlanan azaltım oranı hesaplanmıştır. Bu amaçla, enerji tüketimine bağlı olarak oluşan SGE'leri, Türkiye'ye özgü emisyon katsayıları ile çarpılarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda,

elektrik için 0,481 tCO₂-eşd./MWh [58], doğalgaz için ise 0,2 tCO₂-eşd./MWh [58] emisyon katsayıları kullanılmıştır. SGE azaltım oranının hesaplanması için Eş. 2'den faydalanılmıştır. Bu eşitlikte kullanılan değişkenler:

- SGE AO: Sera Gazı Emisyonu Azaltım Oranı
- MBT SGE: Mevcut Binanın Toplam Sera Gazı Emisyonu
- İBT SGE: İyileştirilen Binanın Toplam Sera Gazı Emisyonu

$$SGE AO (\%) = \frac{MBT SGE - İBT SGE}{MBT SGE} \times 100 \quad (2)$$

Gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde, binanın toplam karbon salımında %48'lik bir azalma sağlanmış ve böylece %41 hedefinin üzerine çıktığı gösterilmiştir. Bu üç adımdan oluşan yaklaşım, kamu binalarının NSEB statüsüne dönüştürülmesi sürecinde uygulanabilecek stratejik bir yöntem olarak önerilmekte ve Türkiye'nin ulusal katkı beyanında belirlediği hedeflere ulaşma yolunda somut bir uygulama modeli sunmaktadır.

3. Örnek Vaka Binasının Tanımlanması (Definition of Case Study Building)

2007 yılında inşa edilen İBB Fatih Spor Kompleksi, İstanbul'un Fatih ilçesinde, Karagümrük Mahallesi'nde yer alan kapsamlı bir spor tesisidir. Tesis, yönetim binası ve spor tesisi olmak üzere iki ana bölüme ayrılmıştır.

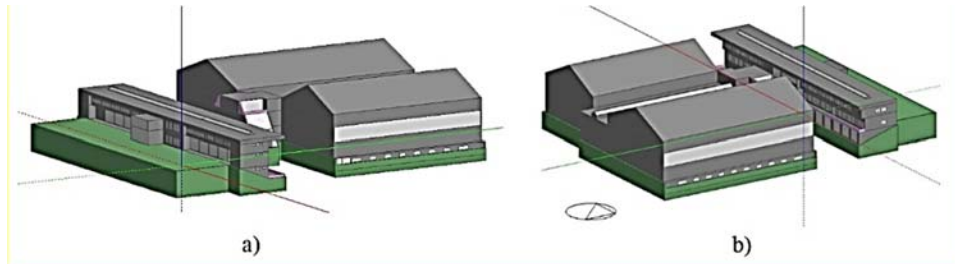
Tesis bünyesinde basketbol, aero dans, spinning, temel hareket eğitimi, pilates, fitness, step-aerobik ve yüzme gibi çeşitli spor dalları için gerekli olan mekânlar yer almaktadır. Sosyal olanaklara da sahip olan tesiste sauna, kafeterya ve toplantı odaları da bulunmaktadır. Bunların yanı sıra tesiste, açık ve kapalı otopark alanları da mevcuttur. Kompleks, İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından işletilmekte olup, Spor A.Ş. tarafından yönetilmektedir. Tesisin hizmet saatleri, idari ofisler dışında, hafta içi 06:30-10:30 ve hafta sonu 08:00-21:00 arasındadır. Şekil 1'de, İBB Fatih Spor Kompleksi (yönetim binası ve spor tesisi) ve çevresini gösteren kuş bakışı görselinin yanı sıra, idari ofis binası, kapalı yüzme havuzu, basketbol salonu ve fitness merkezine ait fotoğraflar yer almaktadır.

3.1. Binanın Mimari Sistemlerinin Tanımlanması ve Modellenmesi (Definition and Modelling of the Building's Architectural Systems)

İBB Fatih Spor Kompleksi'nin enerji performansı analizi için oluşturulan model binası, toplamda 19.809 m² alana sahip olacak şekilde birbirine bağlı 2 binadan oluşmaktadır. Bu binalardan giriş kısmı ve idari ofisleri içeren kısım cadde tarafında yer alan ince uzun yapıdır (Şekil 1 yönetim binası). Arka tarafta yer alan büyük yapı spor tesisi kısımlarını oluşturmaktadır. İdari bina ile spor tesisi yapısı arasında bağlantı girişleri bulunmakta olup, bu alanlar aracılığıyla iki bina arasındaki sirkülasyon sağlanmaktadır. Yapının tamamı, bina enerji performansı modelleme aracı DesignBuilder'da modellenmiştir. Modelin bina geometrisine ait görselleri Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 1. İBB Fatih Spor Kompleksi genel çevre ve iç mekân görselleri [59, 60]
(General exterior and interior images of IMM Fatih Sports Centre)



Şekil 2. İBB Fatih Spor Kompleksi'nin a) ön cepheden ve b) arka cepheden enerji modeli görselleri
(Energy model views of the IMM Fatih Sports Complex: a) front façade, b) rear façade)

Bina kabuğunu oluşturan opak ve saydam bileşenlere ait veriler, İBB Fatih Spor Kompleksi idari ekibi tarafından sağlanan bilgilere göre düzenlenmiştir. Bu bilgiler; yerinde yapılan proje incelemeleri ve toplantılar, idari ekip tarafından gönderilen projelerin ve doldurulan bilgi formlarının incelenmesi ile, yerinde gerçekleştirilen kontroller aracılığıyla elde edilmiştir. Bina kabuğunun opak yapı bileşenlerine ait hesaplanan ısı geçirgenlik katsayıları (U değerleri) Tablo 4'te, saydam yapı bileşenlerine ait hesaplanan U değerleri de Tablo 5'te detaylandırılmaktadır.

Tablo 4. İBB Fatih Spor Kompleksi'nin mevcut bina kabuğunun opak bileşenlerine ait U değerleri
(U-values of the opaque components of the existing building envelope of the IMM Fatih Sports Centre)

Opak Yapı Bileşeni	U değeri (W/m ² K)
Seramik Giydirme Dış Duvar	2,824
Sadece Boyalı Dış Duvar	3,2
Toprak Temaslı Dış Duvar	2,952
Düz Çatı	3,472
Kırma Çatı	3,958
Zemine Oturan Döşeme	1,159

Tablo 5. İBB Fatih Spor Kompleksi'nin mevcut bina kabuğunun saydam bileşenlerine ait U değerleri
(U-values of the transparent components of the existing building envelope of the IMM Fatih Sports Centre)

Saydam Yapı Bileşeni	U değeri (W/m ² K)
Cephe Camları	2,7
Çatı Işıklık Camları	2,178

Kompleks bir yapı olan bina, farklı mahal tipolojilerine sahiptir. Bina enerji performansı analizlerinde 132 ısı zona ayrılmış ve bunların 100'ü iklimlendirilmektedir. Zonların tanımlanmasında iklimlendirme sistemlerinin varlığı, kullanım türü, çalışma saatleri ve yaz-kış oda termostat sıcaklıkları dikkate alınmıştır. Çalışma programlarına ilişkin veriler, idari ekipten temin edilmiş ve yerinde incelemelerle doğrulanmıştır. Yapının karmaşık işlevi modellemeye yansıtılırken, enerji karakteristiklerini daha doğru temsil etmek amacıyla bina üç ana bölüme ayrılmıştır: Yönetim Binası, Spor Tesisi ve bodrum katta yer alan Otopark. Tablo 6'da ısı zon grupları ile öngörülen yaz-kış oda termostat sıcaklıkları sunulmaktadır; 'daima çalışır' seçeneği dışındaki zonlarda ise çalışma saatleri, mahal kullanım süreleriyle uyumlu olarak tanımlanmaktadır.

İnsan kaynaklı iç ısı kazancı verileri, idari ekibin sağladığı tabloya dayanmaktadır. Yerinde incelemeler ile mahallerin çalışma saatleri ve her mahalde kaç kişi çalıştığı teyit edilmiştir. Ekipman listesi idari ekip tarafından hazırlanmış olup, ekipmanlardan kaynaklı iç ısı kazancı verileri ASHRAE Fundamentals 2005: 30 SI [61] kaynaklarına göre belirlenmiştir. Aydınlatma planları yerinde yapılan

kontroller ile teyit edilmiş ve modelleme buna uygun olarak yapılmıştır. Aydınlatma sistemlerine ait iç ısı kazancı verileri, idari ekibin hazırlanmış olduğu tablodan alınmış, eksik veriler ise ASHRAE 90.1-2007 [62] standardına göre, ofis ve spor tesisi kullanım alanları için tanımlanan LPD'ler temel alınarak tamamlanmıştır.

3.2. Binanın İklimlendirme Sistemlerinin Tanımlanması ve Modellenmesi

(Definition and Modelling of the Building's HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) Systems)

Komplekste yer alan yönetim binası ve spor tesisi yüksek kapasiteli ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri tarafından ortak olarak koşullandırılmaktadır. Binanın ısıtma ihtiyacı doğalgaz yakıtlı kazanlar, soğutma ihtiyacı ise elektrikli soğutma grupları aracılığıyla karşılanmaktadır. Koşullandırılan mekânlar, mevcut kazanlar ve soğutma gruplarıyla entegre çalışan radyatörler ve fan-coil üniteleriyle iklimlendirilmektedir. Ancak mevcut sistemin yeterli olmadığı zamanlarda, bazı mekânların ısıtılmasında ve soğutulmasında split klimalar destek olmaktadır. Bunların yanı sıra, kapalı yüzme havuzu alanında yerden ısıtma sistemi kullanılarak mekânın ısıtılması sağlanmaktadır. Binanın havalandırması ise, mevcut kazanlar ve soğutma gruplarıyla entegre klima santralleri aracılığıyla yapılmaktadır. Genel olarak tüm koşullandırılan mekânlar karışım havalı klima santralleriyle, kazan daireleri ise taze havalı klima santralleriyle iklimlendirilmektedir. Binanın bazı bölümlerinde, WC alanları ve mini mutfaklar gibi noktalarda egzoz sistemleri desteği bulursa da bu alanların havalandırması genellikle doğal yollarla sağlanmaktadır. Binanın sıhhi sıcak su ihtiyacı, kazanlara entegre edilmiş sıcak su depolama tanklarından temin edilmektedir.

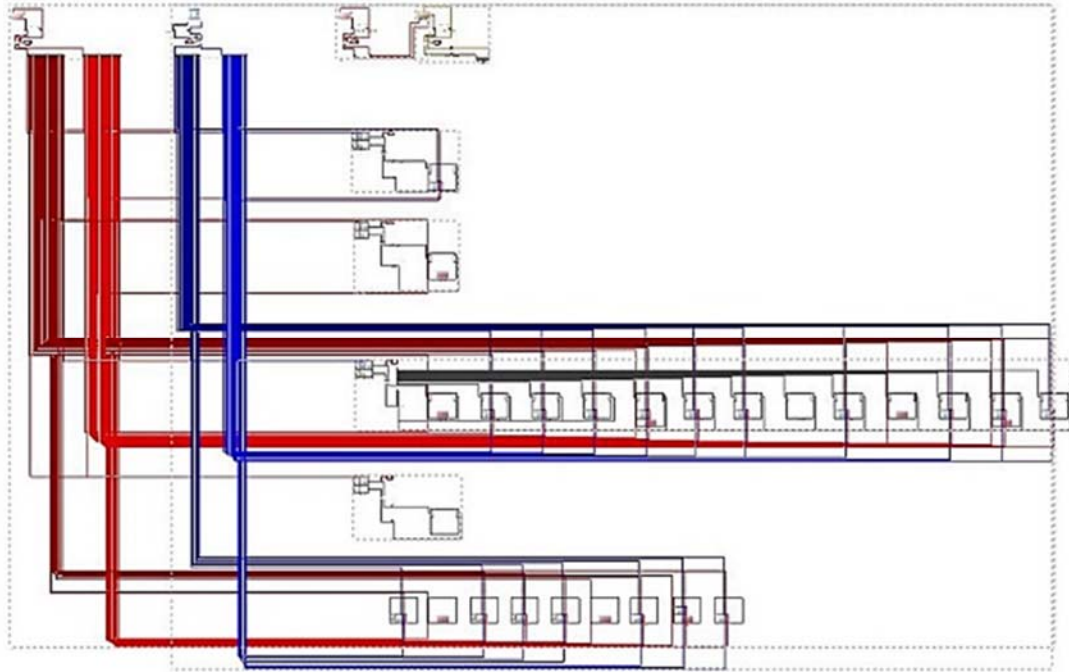
2015 yılı öncesinde binada herhangi bir bina otomasyon sistemi bulunmadığından, tüm iklimlendirme sistemleri manuel olarak yönetilmekte ve HVAC ekipmanları sabit sıcaklık ve debi değerleriyle çalışmaktaydı. Bu duruma örnek olarak, koşullandırılan mahallerde ve otopark alanlarında taze hava beslemesi manuel olarak sağlanırken, mevcut hava işleme ünitelerinde ne ısı geri kazanım sistemi ne de ekonomizer bulunmaması verilebilir. Bu durum, sistemlerin verimsiz olarak çalışmasına yol açmaktaydı. Şekil 3'te binanın mevcut iklimlendirme sistemlerinin enerji modeli görseli yer almaktadır.

3.3. AB Destekli SmartSpaces Projesi Kapsamında İBB Fatih Spor Kompleksi'nin Enerji Performansının Değerlendirilmesi (Assessment of the Energy Performance of the İBB Fatih Sports Centre within the Scope of the EU-Funded SmartSpaces Project)

İBB Fatih Spor Kompleksi binası, 2012-2015 yılları arasında CIP ICT PSP tarafından finanse edilen ve AB tarafından desteklenen SmartSpaces isimli projede yer almıştır. Proje, 1 Ocak 2012 tarihinde başlamış olup üç yıl boyunca sekiz ülkede, on bir pilot şehirde uygulanmış ve toplamda 25 paydaş tarafından yürütülmüştür.

Tablo 6. Isıl zon gruplarına göre yaz-kış oda termostat sıcaklıkları
(Room thermostat temperatures for summer and winter by thermal zone groups)

Isıl Zon Grubu	Kış Oda Termostat Sıcaklığı (°C)	Yaz Oda Termostat Sıcaklığı (°C)	Çalışma Takvimi
Ofisler, Toplantı Odaları, Revir, Yemekhane, Mescitler	24	25	Hafta içleri
Girişler & Koridorlar	22	25	Hafta içleri
Çay Ocağı, Depolar & Arşivler	18	25	Hafta içleri
UPS Odası	23	23	Daima Çalışır
Havuz	30	---	Tüm hafta
Basketbol Sahası	24	25	Tüm hafta
Giyinme Odaları, Merdivenler	22	25	Tüm hafta
Kafeterya & Lobiler	22	25	Hafta içleri
Kazan Dairesi	18	---	Tüm hafta
WC, Otopark ve Depolama	18	---	Hafta içleri



Şekil 3. Mevcut iklimlendirme sistemlerinin enerji modeli görseli (Energy model image of the existing HVAC systems)



Şekil 4. AB destekli SmartSpaces projesinin paydaşları ve proje kapsamında değerlendirilen pilot bölgeler [63]
(Stakeholders of the EU-supported SmartSpaces project and the pilot regions evaluated within the project scope)

Yaklaşık 7 milyon Avro bütçeye sahip bu proje, AB'nin kamu binalarında enerji ve su talebini hem toplamda hem de pik seviyede kayda değer ölçüde azaltmayı hedeflemiştir. Bu amaç doğrultusunda, yenilikçi bilgi ve iletişim teknolojilerine dayalı enerji karar destek, farkındalık artırma ve yönetim hizmet bileşenlerinden oluşan bütüncül bir hizmet sistemi geliştirilmesi planlanmıştır. Proje, kamu binalarının yıllık enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik bir AB girişimi olarak önemli bir rol oynamaktadır [63]. Şekil 4'te proje paydaşları ve pilot bölgeler gösterilmektedir.

Türkiye'deki pilot uygulama alanı olarak İstanbul seçilmiş olup, SmartSpaces Enerji Yönetimi Sistemi (EMS) ve Enerji Karar Destek Sistemi (EDSS), İBB Fatih Spor Kompleksi'nde uygulanmıştır. Proje öncesinde, binanın mekanik ve mimari tasarımı enerji verimliliği açısından yetersizdi. Yapıda kullanılan kazanlar, soğutma grupları, klima santralleri ve yarı iletken balastlı aydınlatma sistemleri yetersiz ve verimsiz olup bu sistemler tamamen manuel kontrolle işletilmekteydi. SmartSpaces projesi kapsamında, Siemens ve İTÜ ARI Teknokent bünyesinde bir AR-GE firması olan Ekomim iş birliğiyle bina enerji verimliliği yönetimi ve otomasyonuna yönelik entegre bir sistem geliştirilmiştir. Bu süreçte, binanın mevcut durumu

analiz edilmiş, enerji performansı modellemesi gerçekleştirilmiş ve iklimlendirme sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik iyileştirme adımları belirlenerek Ekomim tarafından raporlanıp uygulanmak üzere sunulmuştur.

3.3.1. Örnek Vaka Binasının Enerji Verimliliğinin Artırılmasına Yönelik Yapılan İyileştirmeler (Energy Efficiency Improvements of Case Study Building)

Binanın iklimlendirme sistemlerinin iyileştirilmesi için önerilecek olan sistemlerin binanın verimliliğine etkisini test etmek amacıyla DesignBuilder simülasyon aracı kullanılmıştır. Bu amaçla, öncelikle binanın mevcut mimari ve mekanik sistemlerinin modellemesi yapılmış ve mevcut durum simülasyon yoluyla analiz edilerek binanın yıllık enerji tüketimi hesaplanmıştır. Ardından binanın enerji verimliliğini iyileştireceği öngörülen sistemler, binadaki mevcut iklimlendirme sistemlerine entegre edilerek yapılan simülasyonlar sonucunda, bu sistemlerin binanın enerji verimliliğine etkisi ortaya konulmuştur. Aşağıda, binanın iklimlendirme sistemlerinin enerji verimliliğinin iyileştirilmesi için önerilen verimlilik önlemleri yer almaktadır.

- Sirkülasyon Pompalarına Frekans Konvertörü Entegrasyonu: Binadaki sirkülasyon pompaları sabit debi ile çalışmakta olup, bu durum sistemlerin iç ve dış ortam koşullarındaki değişikliklere bakılmaksızın aynı debide çalışmasına neden olmakta, dolayısıyla kazan, soğutma grubu ve klima santralleri gibi ekipmanların yüksek enerji tüketimine yol açmaktaydı. Bu nedenle pompa motorlarına frekans konvertörleri entegre edilerek, sistemin debisi fark basınç sensörlerinden alınan geri besleme sinyaliyle oransal olarak kontrol altına alınmıştır. Böylece pompalar, yalnızca ihtiyaç duyulan debi kadar enerji harcayarak kısmi yük koşullarında daha verimli çalışmakta ve toplam elektrik tüketiminde önemli bir azalma sağlanmaktadır.
- Klima Santrallerinin Fanlarına Frekans Konvertörü Entegrasyonu: Binada, klima santralleri sabit debili fanlarla çalışmakta olup, koşullandırılan mekânlara taze hava beslemesi belirli zaman dilimlerinde manuel olarak sağlanmaktaydı. Ancak bu işlemin manuel olarak gerçekleştirilmesi, hem iç mekân kullanıcılarının sağlığı açısından uygun değildi hem de havalandırma standartlarına aykırı bir uygulama oluşturmaktaydı. Bununla birlikte, fanların iç ve dış ortam koşullarındaki değişimlere bakılmaksızın sabit debiyle çalışması, sistemin yüksek enerji tüketimine yol açmaktaydı. Bu nedenle fan motorlarına frekans konvertörleri entegre edilerek, fan hızı karbon dioksit (CO₂) sensörleri ve basınç farkı geri beslemeleriyle otomatik olarak ayarlanmıştır. Böylece sistem, sadece gerekli hava debisini sağlayarak kısmi yük koşullarında enerji tasarrufu sağlamış ve iç hava kalitesi sürekliliği iyileştirilmiştir.
- Klima Santrallerine Serbest Soğutma (Free Cooling) Sisteminin Entegrasyonu: Dış hava sıcaklığı, iç ortam sıcaklığından düşük olduğunda (özellikle gece veya mevsim geçişlerinde), klima santrali dışarıdan daha fazla taze hava alacak şekilde çalıştırılır. Böylece, mekanik soğutma ihtiyacı azalır veya tamamen ortadan kalkar. Bu yöntem hem enerji tüketimini azaltır hem de ekipmanların çalışma süresini kısaltarak bakım maliyetlerini düşürür. Serbest soğutma stratejisinin uygulanabilirliği, dış hava sıcaklığı ve nem koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Buna göre, dış hava sıcaklığının 11-25 °C aralığında ve bağıl nemin %60'ın altında olduğu koşullarda, soğutma mevsimlerinde serin dış hava binaya yönlendirilerek tüm binada serbest soğutma sağlanmıştır.

Binanın enerji verimliliğinin iyileştirilmesi için yapılan sistem önerileri dışında koşullandırılan mekânların oda termostat sıcaklıkları, Türkiye'nin ulusal bina enerji performansı hesaplama yöntemi BEP-TR'nin hesap modüllerinin yer aldığı BEP Yönetmeliği'ne göre güncellenmiştir. Bu güncelleme öncesinde ısıtma ve soğutma oda termostat sıcaklıkları sırasıyla 24 °C ve 25 °C olup, manuel olarak kontrol edilmekteydi. Bu sıcaklık değerleri, BEP Yönetmeliği'ne göre sırasıyla 20 °C ve 26 °C olarak güncellenmiştir [57]. Böylece, mekânların termostat sıcaklık değerleri güncellenmiş ve kontrol stratejisi otomatik kontrole dönüştürülmüştür. Yapılan tüm bu yenilikler sonrasında mevcut ve iyileştirilen binanın enerji tüketimleri ile binada meydana gelen enerji iyileştirme oranı Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Yapılan performans iyileştirme testleri sonrasında binada meydana gelen enerji iyileştirme oranı
(Energy improvement rate in the building after performance enhancement tests conducted)

	Yıllık Toplam Enerji Tüketimi (kWh/m ² .yıl)	Enerji İyileştirme Oranı (%)
Mevcut Bina	243,28	33,83
İyileştirilen Bina	160,97	

4. Örnek Vaka Binasını NSEB ve SGE Azaltım Hedeflerine Yaklaştran Adımlar (Progressive Steps Toward Achieving nZEB and GHG Emission Reduction in the Case Study Building)

Bu bölümde, örnek vaka binasının NSEB kriterlerine ve SGE azaltım hedeflerine ulaşması amacıyla izlenen aşamalı iyileştirme adımları açıklanmaktadır. Bir önceki bölümlerde binanın mevcut durumu ve enerji performansı detaylı biçimde değerlendirilmiş olup, bu bölümde ise performansın artırılmasına yönelik uygulama adımları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Alt başlıklarda, sırasıyla enerji verimliliği iyileştirmeleri, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ve emisyon azaltım analizleri sunulurken, her bir adımın binanın genel enerji dengesi ve karbon azaltım potansiyeline katkısı ortaya konulmaktadır. Bu yapı, çalışmanın metodolojik kurgusundaki aşamalı ilerleyişi yansıtarak, binanın NSEB statüsüne ulaşma sürecini sistematik biçimde ortaya koymaktadır.

4.1. Birinci Adım: Bina Kabuğunun Isıl Performansının ve Yapay Aydınlatma Sistemlerinin Verimliliğinin İyileştirilmesi (Step 1: Improving the Thermal Performance of the Building Envelope and the Efficiency of Artificial Lighting Systems)

Binalarda enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik stratejiler içerisinde, bina kabuğunun ısı performansının iyileştirilmesi öncelikli ve temel bir pasif tasarım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, mimarın erken tasarım aşamalarındaki kararları belirleyici bir rol üstlenmektedir. Bina kabuğunun yüksek ısı performansına sahip olması, mekanik sistemlerin daha düşük kapasiteli ve yüksek verimli seçeneklerle tasarlanmasına olanak tanıyarak hem enerji tüketimini azaltmakta hem de sistem optimizasyonuna katkı sağlamaktadır. Bu doğrultuda, araştırmanın birinci adımında, mevcut bina kabuğu iyileştirmesi TS 825:2024 standardına uygun olacak şekilde yapılmış ve bu iyileştirme aynı zamanda NSEB hedefine yaklaşmanın en öncü adımını oluşturmuştur. Mevcut bina 2007 yılında, TS 825:2008 [64] standardının öncesinde inşa edilmiştir. Bina kabuğu incelendiğinde kabukta ısı yalıtımı kullanılmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, bina kabuğu ısı performansı bu standardın gerekliliklerini sağlayamamaktadır. Standart 2024'te güncellenmiş olup, bina kabuğu bileşenleri için tavsiye edilen optik ve termofiziksel özellikler ısı kayıplarını en aza ineceği şekilde revize edilmiştir. Araştırmanın bu adımında, mevcut bina kabuğunun ısı performansının iyileştirilmesi için TS 825 standardının 2024 versiyonunda tavsiye edilen U değerleri dikkate alınmıştır. Tablo 8'de, kabuk bileşenlerinin revize edilen optik ve termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Bina kabuğunda yapılan bu iyileştirmenin, binanın yıllık BET'ine olan etkisi Tablo 9'da gösterilmektedir. Bu tabloda belirtilen 'İyileştirilen Bina', SmartSpaces projesi sonrasında gerçekleştirilen önlemleri içeren son durumu temsil ederken, 'Hedeflenen Bina' ise binayı NSEB ve SGE azaltım hedeflerine yaklaştırmak amacıyla bu çalışma kapsamında önerilen ilave iyileştirmeleri içeren durumu ifade etmektedir. İstanbul, ılımlı-nemli iklim bölgesinde yer almakta olup örnek vaka binası bir kamu binası olsa da yıllık ısıtma yükü, soğutma yükünden belirgin oranda daha yüksektir. Tablo 9'da da görüldüğü üzere iyileştirilen binada yapılan kabuk iyileştirilmesi sonrasında yaklaşık 60 kWh/m².yıl'lık doğalgaz tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Bu tasarruf, gözle görülür biçimde yüksek bir tasarruf olup, İstanbul iklimindeki binalarda bina kabuğunun ısı performansının artırılması yönünde yapılacak iyileştirmelerin ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Öte yandan, yapılan iyileştirme sonrasında binanın yıllık elektrik tüketiminde bir miktar artış olduğu saptanmıştır. Bu durum, binanın ısı kayıplarının azaltılmış olmasından kaynaklanmaktadır. İyileştirme sonrasında iç mekânlarda ısı korunumu artmış, bu da özellikle yaz döneminde soğutma sistemlerinin (soğutma grubu ve fan-coil üniteleri) daha uzun süre devrede kalmasına neden olmuştur. Simülasyonlarda, binanın mevcut

Tablo 8. Bina kabuğu bileşenlerinin optik ve termofiziksel özellikleri
(Optical and thermophysical properties of building envelope components)

Yapı Bileşeni	U değeri (W/m ² K)	SHGC (%)	T _{vis} (%)
Seramik Giydirme Dış Duvar	0,375	-	-
Sadece Boyalı Dış Duvar	0,374	-	-
Toprak Temaslı Dış Duvar	0,344	-	-
Düz Çatı	0,295	-	-
Kırma Çatı	0,296	-	-
Zemine Oturan Döşeme	0,333	-	-
Cephe ve Çatı Işıklık Camları	1,6	0,44	0,72

Tablo 9. İyileştirilen ve hedeflenen binanın BET'lerinin karşılaştırması (Comparison of PECs of improved and target buildings)

	Doğalgaz Kaynaklı Yıllık BET (kWh/m ² .yıl)	Elektrik Kaynaklı Yıllık BET (kWh/m ² .yıl)	Yıllık Toplam BET (kWh/m ² .yıl)
İyileştirilen Bina	90,06	141,23	231,29
Hedeflenen Bina	31,76	143,30	175,06

Tablo 10. İyileştirilen ve hedeflenen binanın LPD karşılaştırması (LPD comparison between the improved and target buildings)

Isıl Zonlar	İyileştirilen Bina LPD (W/m ²)	Hedeflenen Bina LPD (W/m ²)
Giriş Alanları	14-29 aralığında	8,6
Merdivenler	6	5
Hol ve Koridorlar	5-25 aralığında	4,8
Ofisler	9-18 aralığında	6,7
Havuz Alanı	30,75	8,1
Basketbol Sahası	35,7	8,1
Fitness Alanı	11,4	8,1
Sauna	4,3	4,3
Soyunma Odaları	4-14 aralığında	10,3
Mescitler	5-13 aralığında	7,1
Islak Hacimler	10	10
Yemekhane	10,7	7,5
Kantin Alanları	10-13 aralığında	3,9
Depolar	3	3
Teknik Hacimler	5-13 aralığında	4,8
TOPLAM	15,6	7

Tablo 11. Hedeflenen binanın yıllık BET'leri (Annual PECs of the target building)

Doğalgaz Kaynaklı Yıllık BET (kWh/m ² .yıl)	Elektrik Kaynaklı Yıllık BET (kWh/m ² .yıl)	Yıllık Toplam BET (kWh/m ² .yıl)
41,16	94,04	135,20


kullanım profili ve çalışma saatleri sabit tutulmuş, yalnızca kabuk bileşenleri iyileştirilmiştir; dolayısıyla elektrik tüketimindeki artış, kabuğun ısı performans değişimine bağlı sistem yük dengesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, elektriğin birincil enerjiye dönüşüm katsayısının doğalgaza kıyasla daha yüksek olması nedeniyle, kabuğun ısı performansının iyileştirilmesi sonrasında elektrik ve doğalgaz tüketimleri arasındaki fark birincil enerji düzeyinde daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, enerji tüketim bileşenlerinin toplam birincil enerji üzerindeki etkisini değerlendirmede dönüşüm katsayılarının önemini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma neticesinde binanın yıllık toplam BET'i 56,23 kWh/m².yıl azalmıştır.

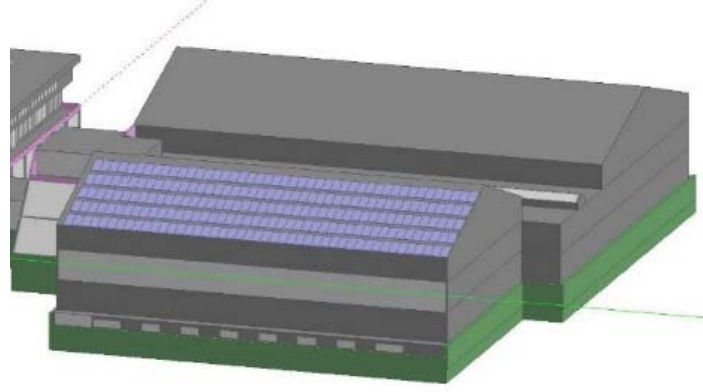
Hedeflenen binanın BEP-TR sistemine göre B enerji sınıfına dâhil olup olmadığının analiz edilebilmesi amacıyla, Tablo 2'de belirtilen birincil enerji referans değeri olan 255 kWh/m².yıl değerinin Tablo 3'te tanımlanan 0,4 ve 0,8 katsayıları ile çarpılması gerekmektedir. Bu çarpımlar sonucundan elde edilen aralık 102-204 kWh/m².yıl olmalıdır. İyileştirilen binanın enerji sınıfı C iken Tablo 9'da hedeflenen binanın yıllık toplam BET değerinin gerekli aralığı sağladığı ve B enerji sınıfında olduğu anlaşılmaktadır. Bina kabuğunda yapılan iyileştirmeler ile bina NSEB hedefi kapsamında istenilen enerji sınıfını sağlamıştır. Ancak, mevcut binada yer alan yapay aydınlatma sistemlerinin LPD'leri incelendiğinde, herhangi bir bina standardını sağlamadığı ve buna bağlı olarak aydınlatmadan

kaynaklı elektrik enerjisi tüketiminin oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, binadaki aydınlatma sistemlerinin LPD'leri, mahallerin fonksiyonlarına uygun olacak şekilde ASHRAE 90.1 standardının 2022 versiyonuna göre güncellenmiştir. Tablo 10'da mahallerin LPD'lerinin iyileştirilen ve hedeflenen binalar için değerleri verilmiştir.

Tablo 11'de bina kabuğunun ısı performansının iyileştirilmesine ek olarak aydınlatma sistemlerinin iyileştirilmesinin, hedeflenen binanın yıllık BET'lerine etkisi gösterilmektedir. Tablo 11 analiz edildiğinde, Tablo 9'un aksine bu defa binanın elektrik tüketiminde 49,26 kWh/m².yıl düşüş sağlanarak, önemli bir tasarruf elde edilmiştir. Öte yandan, binanın doğalgaz tüketiminde yaklaşık 10 kWh/m².yıl artış gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun nedeni, LPD'lerdeki azalma sonucunda binanın aydınlatma sistemlerinden kaynaklanan ısı kazançların bir miktar düşmesi ve buna bağlı olarak ısıtma ihtiyacının artmasıyla, doğalgaz tüketiminde bir miktar artış olmasıdır. Aydınlatma sistemlerinde yapılan iyileştirme sonrasında BEP-TR enerji sınıfının yeniden tespit edilmesi gerekmektedir. Bu adımda hedeflenen binanın BET değeri, B sınıfı için geçerli olan aralığı sağlamaya devam etmekle birlikte, bina kabuğunda yapılan iyileştirme çalışmasına kıyasla yaklaşık 40 kWh/m².yıl düzeyinde ek bir iyileşme sağladığı görülmektedir.

Tablo 12. Yarım hücre güneş panellerinin teknik özellikleri [70] (Technical specifications of half-cut solar panels)

STC* Maksimum Güç (W)	550	
Açık Devre Gerilimi (Voc) (V)	49,90	
Kısa Devre Akımı (Isc) (A)	13,60	
Maksimum Güç Gerilimi (Vmp) (V)	42,62	
Maksimum Güç Akımı (Imp) (A)	13,00	
STC Modül Verimi (%)	21,17	
Voc Sıcaklık Katsayısı (%/°C)	-0,237	
Isc Sıcaklık Katsayısı (%/°C)	+0,04	
NOCT** (°C)	45±2	*Standart Test Koşulları **Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı

**Şekil 5.** Yarım hücre PV panelleri enerji modeli görseli (Energy model view of simulated half-cut PV panels)**Tablo 13.** Hedeflenen binanın BET'leri ve yenilenebilir enerji katkısı (PEC and renewable energy contribution of the target building)

Doğalgaz Kaynaklı Yıllık BET (kWh/m ² .yıl)	Elektrik Kaynaklı Yıllık BET (kWh/m ² .yıl)	Yıllık Birincil Enerji Üretimi (kWh/m ² .yıl)	Yıllık Toplam BET (kWh/m ² .yıl)
41,68	92,40	15,51	118,57

4.2. İkinci Adım: PV Panellerin Entegrasyonu ile Binanın Enerji Performansının İyileştirilmesi (Step 2: Enhancing the Building's Energy Performance through the Integration of PV Panels)

Birinci adım sonucunda, hedeflenen binada hem TS 825:2024 standardının hem de BEP Yönetmeliği'nin gereklilikleri yerine getirilmiştir. İkinci adımda ise, BEP Yönetmeliği kapsamında NSEB hedefinin bir diğer bileşeni olan yenilenebilir enerji kaynaklarının katkısı değerlendirilmeye alınmıştır. Yapılan araştırmalar kapsamında, 2022'de İBB'nin binanın enerji verimliliğinin artırılması amacıyla SmartSpaces projesi sonrasında iyileştirilen binanın çatısına PV panel kurulumu gerçekleştirmiş olduğu tespit edilmiştir. Yönetim bölümünün tüm çatı ışıklığı üzerine ve spor tesisi bölümünün çatı alanının tamamına PV paneller yerleştirilmiş olup, toplamda 1667 adet panel ile 550 kWp kapasitesinde kurulum gerçekleştirilmiştir [65]. Bu da panel başına 330 W'lık güce karşılık gelmektedir. Bu panellerden yıllık olarak 741.000 kWh elektrik enerjisi üretilmesi hedeflenmiştir. Üretilen elektrik enerjisi birincil enerjiye çevrildiğinde yıllık 1.324.908 kWh elektrik üretimine karşılık gelmekte olup, bu üretimin iyileştirilen binaya yaklaşık %29 yenilenebilir enerji katkısı sağladığı anlaşılmaktadır. Bu durum NSEB için gerekli olan minimum %10 yenilenebilir enerji katkısının üzerinde verim elde edildiğini göstermektedir. Ancak çatı alanı, örnek vaka binasında olduğu kadar geniş olmayan diğer kamu binalarında, yerleşim kısıtları nedeniyle sınırlı sayıda PV panel kullanımı söz konusu olacağından, daha yüksek verimlilik sağlayan ve ileri teknolojiye sahip PV panellerin tercih edilmesi kritik öneme sahiptir.

Çalışmanın ikinci adımında, NSEB kriterleri doğrultusunda binanın yıllık birincil enerji ihtiyacının en az %10'unun hangi yenilenebilir enerji sistemleri ile en verimli şekilde karşılanabileceği araştırılmıştır. Bu hedef doğrultusunda, daha az sayıda ancak yüksek verimlilikte ve ileri teknolojiye sahip PV panellerin kullanımı durumunda, söz konusu sistemlerin binanın genel enerji performansını üzerindeki etkisinin test edilmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmalar, eski tip olarak adlandırılan tam hücreli güneş panellerinde hücre seviyesinde ölçülen elektriksel performansın modül seviyesine aktarımı sırasında; hücre-modül geçiş kayıpları ve akım uyumsuzluklarının modül çıkış gücünü olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır [66]. Son dönemde yapılan araştırmalar, yarım kesilmiş hücre veya üçte bir oranında kesilmiş hücre yapısına sahip modüllerin, daha düşük seri direnç kaybı ve artırılmış optik verim sayesinde hücreden modüle enerji kaybını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır [67, 68]. Ayrıca, bu modüller kısmi gölgelenme gibi olumsuz çevresel koşullar altında dahi daha yüksek performans sergileyebilmektedir [69]. Yarım hücre güneş paneli teknolojisinde, hücreler bir lazer yardımıyla çok hassas bir şekilde ikiye bölünür ve böylece panele daha fazla hücre sığabilir. Hücreler ikiye bölündüğünde hücreler içindeki akım da ikiye bölünmüş olur. Bu durum akım yoluyla hareket eden enerjiden kaynaklanan direnç kayıplarını azalttığı için güneş panellerinin enerji çıkışı artırır. İkinci adım kapsamında, spor tesisi bölümünün sadece güneybatıya bakan çatısı kullanılarak bu alanda 26° eğimle 225 adet yarım hücre PV panel kullanılmıştır. Bu panellerin teknik özellikleri Tablo 12'de gösterilmektedir. Bu PV panellerin yıllık elektrik enerjisi üretiminin analizi için DesignBuilder simülasyon aracı kullanılmış olup, Şekil 5'te PV panellerin enerji modeli görseline yer verilmiştir.

Yapılan simülasyon sonucunda, yarım hücre PV panellerinden elektrik kaynaklı olarak yıllık birincil enerji üretimi 15,51 kWh/m².yıl olarak hesaplanmıştır (Tablo 13). Bu üretimin, binanın yıllık toplam BET'inin ne kadarını karşıladığını hesap edebilmek amacıyla Eş. 1 kullanılmıştır. Bu hesaplama sonucuna göre, PV'lerden elde edilen elektrik üretiminin, binanın yıllık toplam BET'inin %11,57'sini karşılamakta olduğu tespit edilmiştir. Bu adımın sonucunda, BEP Yönetmeliği çerçevesinde NSEB hedefi doğrultusunda tanımlanan asgari %10 yenilenebilir enerji katkısı gerekliliği de karşılanmıştır. Böylece, birinci ve ikinci adımların birlikte değerlendirilmesiyle, hedeflenen binanın NSEB kriterlerini sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.3. Üçüncü Adım: Yapılan İyileştirmeler Sonucunda Binanın SGE'sinin Değerlendirilmesi (Step 3: Evaluation of the Building's GHG Emissions Following the Implemented Improvements)

Bu son adımda, birinci ve ikinci adımlarla yapılan iyileştirmeler sonucunda örnek vaka binasının Türkiye'nin 2030 %41 SGE azaltım hedefine ne kadar yaklaştığının değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu değerlendirmelerin yapılabilmesi için Eş. 2 kullanılmış olup, tüm adımlar için elde edilen sonuçlar Tablo 14'te gösterilmiştir.

Tabloda sunulan verilere göre, birinci adım kapsamında gerçekleştirilen bina kabuğu ısı performansının iyileştirilmesi, doğal gaz tüketiminde anlamlı düzeyde bir tasarruf sağlamıştır. Ancak, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirlenen SGE çarpanları incelendiğinde, doğal gazın çarpan değerinin elektrikten daha düşük olması nedeniyle, söz konusu tasarruf enerji performansı açısından önemli bir iyileşme sağlasa da SGE azaltım oranı açısından aynı ölçekte bir etki yaratmamıştır. Bu durumun temel nedeni, doğal gazın doğrudan kullanılan bir enerji kaynağı olmasına karşın, elektriğin çeşitli üretim süreçlerinden geçirilerek elde edilen ikincil bir enerji kaynağı olmasıdır. Elektrik üretimindeki süreçler, beraberinde enerji kaybı ve çevresel maliyetler getirdiğinden, elektrik için tanımlanan SGE çarpanı doğal gaza kıyasla daha yüksek belirlenmiştir. Bu farklılık, SGE analiz sonuçlarına doğrudan yansımaktadır. Tam da bu noktada, aydınlatma sistemlerinin iyileştirilmesinin SGE azaltım oranında neden bu kadar etkili olduğu anlaşılmaktadır. Elektrik enerjisinden elde edilen bu ciddi tasarruf neticesinde, SGE azaltım oranı çarpıcı bir biçimde azaltılmış olsa da %41 SGE azaltım hedefinin altında kaldığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle, binada daha farklı iyileştirmelerin yapılması gerekliliği ortaya çıkıp, NSEB hedefi de düşünüldüğünde bu iyileştirmelerin yenilenebilir enerji sistemleri çerçevesinde yapılmasının uygun olacağı anlaşılmıştır. Bu doğrultuda, ikinci adımda gerçekleştirilmiş olan yenilenebilir enerji sistemlerinin katkısı SGE azaltım oranı açısından da değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucuna göre %48 oranında azaltım gerçekleştirilerek %41 hedefinin üzerine çıkmıştır.

Örnek vaka binası bir kamu yapısı olup, konut binalarına kıyasla daha yüksek düzeyde elektrik enerjisi ihtiyacına sahiptir. Bu nedenle, bu araştırmanın bulguları doğrultusunda da görüldüğü üzere, kamu binalarında enerji performansını artırmaya yönelik iyileştirmelerde, öncelikli olarak elektrik enerjisi ihtiyacını destekleyecek pasif sistem

stratejilerine ve yenilenebilir enerji teknolojilerine ağırlık verilmesi kritik bir önem taşımaktadır.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde, Türkiye'deki yenilenebilir enerji sistemlerine ilişkin mevzuatlar değerlendirilmiş; iyileştirilen ve hedeflenen binalara entegre edilen PV sistemlerin yasal çerçeveye uygun şekilde işletilmesine yönelik analiz ve yorumlara yer verilmiştir.

Bu bağlamda en temel düzenleme, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından ilk kez 2019 yılında yayımlanan ve zaman içerisinde çeşitli güncellemelerle geliştirilen Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliğidir. Söz konusu yönetmeliğin son güncellemesi, 17 Aralık 2024 tarihinde yayımlanmıştır. Bu yönetmeliğin amacı; elektrik piyasasında, tüketicilerin elektrik ihtiyaçlarını tüketim noktasına en yakın kendi üretim tesisinden karşılaması, arz güvenliğinin sağlanmasında küçük ölçekli üretim tesislerinin ülke ekonomisine kazandırılması ve küçük ölçekli üretim kaynaklarının etkin kullanımının sağlanması ile elektrik şebekesinde meydana gelen kayıp miktarlarının düşürülmesi amacıyla lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğü olmaksızın, elektrik enerjisi üretebilecek, gerçek veya tüzel kişilere uygulanacak usul ve esasların belirlenmesidir [71]. Yönetmeliğin 2. maddesinde belirtildiği üzere, bu düzenleme; lisanssız üretim kapsamındaki tesislerin kurulumu, başvuru süreci, üretim ve tüketim fazlası enerjiye ilişkin uygulamalar, tesislerin devri ve denetimi ile ilgili tarafların hak ve yükümlülüklerini kapsamaktadır. Bu doğrultuda, Türkiye'de binalara entegre edilen yenilenebilir enerji sistemlerinin, özellikle güneş enerjisi santrallerinin, şebeke yükünü azaltacak şekilde kurulması ve yönetmelikte belirtilen kriterlere uygun biçimde işletilerek binanın enerji maliyetlerinin azaltılması mümkündür.

İyileştirilen binada, tüm çatı alanını kaplayan ve yıllık yaklaşık 741.000 kWh elektrik üretim kapasitesine sahip bir PV panel sistemi kuruludur. Bu sistem, binanın yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık %29'unu karşılamaktadır. Öte yandan, hedeflenen binada yarım hücreli PV panellerin kullanıldığı yeni bir kurulum senaryosu simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre bu sistem, yıllık yaklaşık 178.888,1 kWh elektrik üretmekte olup, binanın pasif sistemlerinin iyileştirilmesi neticesinde binanın enerji tüketiminin %11,57'sini karşılamaktadır. Her iki bina da (iyileştirilen ve hedeflenen) PV paneller yardımıyla ürettikleri elektriği doğrudan tükettikleri için, yönetmeliğin 5. maddesinin 1. fıkrasının (ç) bendi kapsamında değerlendirilmekte ve "ürettiği enerjinin tamamını iletim veya dağıtım sistemine vermeden kullanan, üretimi ve tüketimi aynı ölçüm noktasında olan, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleri" kategorisine girmektedir. Şebekeye verilen enerjinin nasıl değerlendirileceği ise, 11 Ağustos 2022 tarihli değişiklikle yönetmeliğin 16. maddesine eklenen 16. fıkrada tanımlanmıştır. Buna göre, "12/5/2019 tarihinden sonra yapılan başvurular neticesinde bağlantı anlaşmasına çağrı mektubu almaya hak kazanan kişilerin, ihtiyacının üzerinde satışa konu edilebilecek üretim miktarı, ilişkili tüketim tesisinin toplam elektrik enerjisi tüketimini geçemez. Bu miktarın üzerinde sisteme verilen enerji Yenilenebilir Enerji

Tablo 14. Hedeflenen bina için önerilen her bir ilave iyileştirme adımı sonucunda ulaşılan SGE azaltım oranı (Greenhouse gas (GHG) reduction ratio achieved after each additional improvement measure proposed for the target building)

Kabuk Isıl Performans İyileştirmesi (%)	Aydınlatma Sistemleri İyileştirmesi (%)	Yenilenebilir Enerji Katkısı (%)
18,47	39,70	48,02

Kaynakları Destekleme Mekanizması'na (YEKDEM) bedelsiz katkı olarak dikkate alınır. Bu fıkra hükmü, kurulu gücü 50 kW ve altındaki mesken abone grubundaki tüketim tesisleri ile ilişkilendirilen üretim tesisleri için uygulanmaz. Bu fıkranın uygulanmasına ilişkin usul ve esaslar Kurul tarafından belirlenir" [72]. YEKDEM, Türkiye'de yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik üretim tesislerini desteklemek amacıyla oluşturulmuş bir mekanizmadır. Bu sistem, tesislerin ilk işletmeye alındığı tarihten itibaren 10 yıl boyunca devlet tarafından belirlenen sabit fiyat üzerinden elektrik satışı yapılmasına olanak tanımaktadır. Kamu binalarında ise 10 yıl süreyle devletin belirlediği bazı muafiyetlerden yararlanılabilmektedir [72]. PV sistemlerin üretim ve tüketim arasındaki enerji dengesinin sağlanması, "mahsuplaşma" kavramı çerçevesinde ele alınmaktadır. Yönetmeliğin 4. maddesinin (ö) bendine göre, mahsuplaşma; belirli bir zaman dilimi içinde gerçekleşen üretim ve tüketim değerlerinin birbirinden düşülerek net tüketim veya net üretim değerinin kWh cinsinden hesaplanmasıdır [71]. Üretim ve tüketim aynı ölçüm noktasında ise, şebekeye verilen enerji saatlik bazda izlenir ve bu veriler doğrultusunda aylık mahsuplaşma yapılır. Üreticilerin fazla elektriği, 10 yıl boyunca tedarik şirketi tarafından satın alınabilmekte, ancak tüketimi aşan miktarın belirli sınırların üzerinde olması durumunda, bu enerji YEKDEM'e bedelsiz olarak aktarılmaktadır.

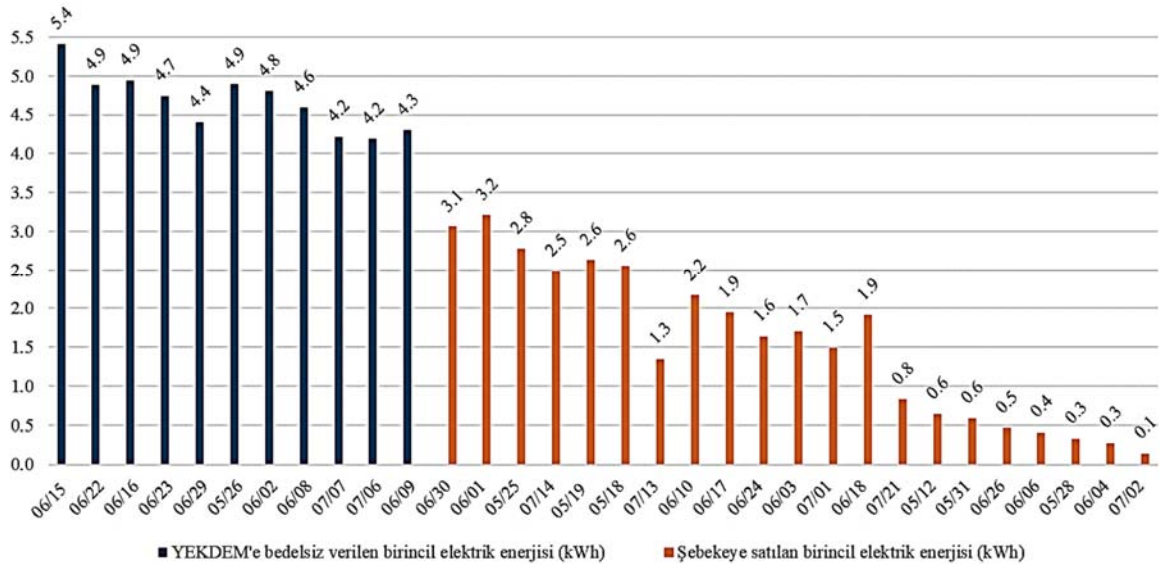
Bu çerçevede, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği'nin 11 Ağustos 2022 tarihli güncellemesi, hedeflenen bina özelinde değerlendirilmiştir. Hedeflenen binaya ilişkin enerji modelleme sonuçlarına göre PV panellerin elektrik üretiminin yıl boyunca toplam 8760 saatin yalnızca 21 saatinde, binanın tüketim miktarını aştığı; bu saatlerin ise genellikle binanın açılış saatinden önceki düşük tüketimli saatlere denk geldiği görülmüştür. Ayrıca yalnızca 11 saatte, üretim miktarı tüketimin iki katını az farkla geçmiştir. Bu da sistemin büyük oranda kendi ihtiyacını karşılamak üzere çalıştığını ve bedelsiz katkı oranının oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, yıl boyunca sadece 32 saat üretimin tüketimi aştığı tespit edilmiştir. Bu saatlerdeki fazla üretim miktarları ve tüketim oranlarına ilişkin detaylar Şekil 6'da sunulmaktadır.

İyileştirilen binada ise mevcut PV sistemin üretiminin, tüketimi aştığı saatlerin ve YEKDEM'e yapılan bedelsiz katkı miktarlarının belirlenmesi kurum dışından kişilerle bilgi paylaşımı söz konusu olmadığı için mümkün olmamıştır. Ancak, sistemin daha yüksek kapasiteli olduğu göz önüne alındığında, tüketimi aşan saat sayısının 32'den fazla olacağı varsayılabilir. Bu durum, söz konusu kurulumun gerçekleştirildiği 2022 yılından başlayarak, 2032 yılına kadar olan 10 yıllık sürede, EPDK tarafından onaylanan tarife üzerinden belirlenen dağıtım bedeli ile daha yüksek oranda şebekeye satış imkânı sunabileceğini göstermektedir. Aynı şekilde, bedelsiz katkı olarak değerlendirilecek enerji miktarının da daha yüksek olabileceği anlaşılmaktadır.

Dolayısıyla, yıllık yenilenebilir enerji katkı oranı %10'un üzerinde olan PV sistem kurulumlarında, ön fizibilite çalışmalarının mutlaka yapılması, kurulacak sistemin ekonomik verimliliğinin sağlanması adına şebekeye yapılacak satış miktarı ve bedelsiz katkı miktarlarının dikkatle hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, PV panellerin düzenli bakımları yapıldığında yaklaşık 25 yıllık bir kullanım ömrüne sahip olduğu dikkate alınırsa, kurulumdan sonraki 10 yılın ardından geriye kalan 15 yıl boyunca da sistemin enerji üretimine devam edeceği öngörülmektedir. Ancak bu sürenin ikinci yarısında, başlangıçta sağlanan bazı muafiyetlerin sona erebileceği, şebekeye satılan enerjiye ilişkin birim fiyatların düşebileceği ve destek mekanizmalarının değişebileceği unutulmamalıdır. Netice itibarıyla, PV sistemlerinin uzun vadeli performansı ve yatırım geri dönüşü açısından bu tür düzenlemeler ve sınırlar, teknik planlama sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak dikkate alınmalıdır.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma, Türkiye'de kamuya ait bir spor tesisinin, NSEB kriterlerine uygun şekilde dönüşümünü kapsamlı bir yöntemle ele alan ilk örneklerden biri olma özelliğini taşımaktadır. İstanbul'daki İBB Fatih Spor Kompleksi üzerinden yürütülen analizler; binanın enerji performansının artırılması, yenilenebilir enerji katkısının sağlanması ve karbon emisyonunun azaltılması gibi çok boyutlu hedefleri eş



Şekil 6. PV panellerin yıl boyunca hedeflenen binanın enerji tüketiminin üstünde üretim yaptığı günler ve bu üretim miktarının birincil enerji cinsinden değeri
(Days throughout the year when the PV panels produce energy exceeding the target building's consumption, and the amount of this excess production expressed in terms of primary energy)

zamanlı olarak gerçekleştirmiştir. Simülasyon temelli değerlendirmeler neticesinde, bina kabuğu ve aydınlatma sistemlerinde yapılan iyileştirmeler sayesinde enerji kimlik sınıfı "B" seviyesine yükseltilmiş; çatıda kurulan PV sistemleri ile binanın BET'inin %11'i yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanmıştır. Bu kapsamda binanın NSEB tanımındaki tüm teknik gereklilikleri sağladığı ortaya konmuştur. Buna ek olarak, elektrik ve doğalgaz kullanımına dayalı toplam SGE'si %48 oranında azaltılarak, Türkiye'nin 2030 yılı için belirlediği %41'lik emisyon azaltım hedefinin de ötesine geçilmiştir. Bu bulgular, yalnızca teknik bir başarı değil; aynı zamanda Türkiye'nin Paris Anlaşması çerçevesindeki uluslararası taahhütlerine katkı sağlayacak uygulanabilir bir model sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan üç aşamalı dönüşüm yaklaşımı - enerji sınıfı iyileştirme, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve karbon salımı hesaplaması - hem kamu politikalarının şekillenmesinde hem de benzer bina tipolojileri için örnek teşkil etmesi açısından önem arz etmektedir.

Bu bağlamda, çalışma yalnızca belirli bir yapının performans optimizasyonuna odaklanmakla kalmamış, aynı zamanda Türkiye'deki NSEB dönüşüm sürecine yönelik yeni bir metodolojik çerçeve önermiştir. İlerleyen süreçte, benzer projelerin sayısının artırılması, BEP Yönetmeliği'nin NSEB hedefleri doğrultusunda yeniden yapılandırılması ve kamu binalarının dönüşümünde bu çalışmada önerilen stratejik yaklaşımın yaygınlaştırılması, ulusal ve uluslararası sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında kritik rol oynayacaktır.

Kaynaklar (References)

1. International Energy Agency. Buildings. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>. Erişim tarihi Temmuz 9, 2025.
2. Official Journal of the European Union, L 153, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj/eng>. Yayın tarihi Mayıs 19, 2010. Erişim tarihi Temmuz 9, 13–35, 2025.
3. European Commission, Energy Performance of Buildings Directive. Nearly-zero energy and zero-emission buildings. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en#nearly-zero-energy-buildings. Erişim tarihi Temmuz 9, 2025.
4. Official Journal of the European Union, L 208, Commission Recommendation (EU) 2016/1318 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016H1318&from=ES>. Yayın tarihi Temmuz 29, 2016. Erişim tarihi Temmuz 9, 46–50, 2025.
5. Official Journal of the European Union, L 156, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj/eng>. Yayın tarihi Haziran 19, 2018. Erişim tarihi Temmuz 9, 75–91, 2025.
6. Official Journal of the European Union, L 2024/1275, Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive. Yayın tarihi Nisan 19, 2024. Erişim tarihi Temmuz 9, 1–70, 2025.
7. T.C. Resmî Gazete sayı: 31755. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. <https://resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/02/20220219-2.htm>. Yayın tarihi Şubat 19, 2022. Erişim tarihi Temmuz 9, 2025.
8. Maduta C., D'Agostino D., Tsemekidi-Tzeiranaki S., Castellazzi L., From nearly zero-energy buildings (NZEBs) to zero-emission buildings (ZEBs): Current status and future perspectives. *Energy Build.*, 328, makale no. 115133, 2025.
9. Sönmez N., Maçka Kalfa S., Avrupa Birliği Binaların Enerji Performansı Direktifi bağlamında üye ülkelerin yaklaşık sıfır enerji bina yaklaşımları ve Türkiye'de mevcut durum analizi. *Yapı Dergisi*, 451, 60–65, 2022.
10. T.C. Resmî Gazete sayı: 27590. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/04/20100401-5.htm>. Yayın tarihi Nisan 1, 2010. Erişim tarihi Temmuz 9, 2025.
11. Zengin B., Polat H., Yurtcan, U. E., Türkiye'de enerji verimliliği için BEP-TR yöntemi kullanımının maliyet ve malzeme analizi: Örnek bir model değerlendirmesi. *Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 4 (2), 19–26, 2023.
12. Gali, G., Comparative analysis of dynamic and simplified energy performance methods for hospital buildings, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
13. Şener F., Yıldırım Ünnü S., Binalarda Aydınlatma Enerjisi Performansının BEP-TR Yöntemi ile Belirlenmesi: Örnekler, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir-Türkiye, 839-849, 13-16 Nisan, 2011.
14. Aydın Ö., Saylam Canım D., Binalarda Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi (BEP-TR)'nin kullanılabilirliğinin ve EKB uygulamasının değerlendirilmesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 2 (2), 265–277, 2017.
15. Bilen K., Urmamen E., Topcu M. T., Solmaz, İ., Evaluations on the Energy Identity Certificate and the usability of calculation method of Building Energy Performance (BEP). *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, 11 (1), 103–113, 2020.
16. Şentürk A., Özcan, M., Nearly zero energy building design and optimization: A residential building transformation in Türkiye. *Energy Explor. Exploit.*, 42 (3), 997–1026, 2023.
17. Turhan C., Bal Koçyiğit F., Zinkçi M. A., Sayesthnom, M., Feasibility of nearly-zero energy building retrofits by using renewable energy sources in an educational building. *Journal of Scientific Perspectives*, 3 (4), 311–318, 2019.
18. Gediz Taşkın H., Carlak H. F., Sıfır enerji konseptli binalarda enerji optimizasyon. *Akdeniz Mühendislik Dergisi*, 3 (1), 112–121, 2025.
19. Ekşi M., Özcan M., Towards nearly zero energy buildings: Energy and environmental analysis of retrofit scenarios for a residential building in İzmir. *Eng. Res. Express*, 7, makale no. 025339, 2025.
20. Gür M., Öztop H. F., Selimefendil F., Analysis of solar underfloor heating system assisted with nano enhanced phase change material for nearly zero energy buildings approach. *Renewable Energy*, 218, makale no. 119265, 2023.
21. 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 Build.*, 133, 724–737, 2016.
22. Mateus R., Silva S. M., de Almeida M. G., Environmental and cost life cycle analysis of the impact of using solar systems in energy renovation of Southern European single-family buildings. *Renewable Energy*, 137, 82–92, 2019.
23. Monzón-Chavarrias M., López-Mesa B., Resende J., Corvacho H., The nZEB concept and its requirements for residential buildings renovation in Southern Europe: The case of multi-family buildings from 1961 to 1980 in Portugal and Spain. *J. Build. Eng.*, 34, makale no. 101918, 2021.
24. Fernandez-Luzuriaga J., del Portillo-Valdes L., Flores-Abascal I., (2021). Identification of cost-optimal levels for energy refurbishment of a residential building stock under different scenarios: Application at the urban scale, *Energy Build.*, 240, makale no. 110880, 2021.
25. Ferrara M., Fabrizio E., Virgone J., Filippi M., A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. *Energy Build.*, 84, 442–457, 2014.
26. Ferrara M., Fabrizio E., Virgone J., Filippi M., Energy systems in cost-optimized design of nearly zero-energy buildings, *Autom Constr.*, 70, 109–127, 2016.
27. Guardigli L., Bragadin M. A., Della Fornace F., Mazzoli C., Prati D., Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks, *Energy Build.*, 166, 48–59, 2018.
28. Carpino C., Bruno R., Arcuri N., Social housing refurbishment in Mediterranean climate: Cost-optimal analysis towards the n-ZEB target, *Energy Build.*, 174, 642–656, 2018.
29. Ascione F., Bianco N., Mauro G. M., Napolitano D. F., Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy

- consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. *Energy*, 174, 359–374, 2019.
30. Ascione F., Borrelli M., De Masi R. F., de Rossi F., Vanoli G. P., A framework for NZEB design in Mediterranean climate: Design, building and set-up monitoring of a lab-small villa, *Sol. Energy*, 184, 11–29, 2019.
 31. Pallis P., Gkonis N., Varvagiannis E., Braimakis K., Karellas S., Katsaros M., Vourliotis P., Cost effectiveness assessment and beyond: A study on energy efficiency interventions in Greek residential building stock, *Energy Build.*, 182, 1–18, 2019.
 32. Pallis P., Gkonis N., Varvagiannis E., Braimakis K., Karellas S., Katsaros M., Vourliotis P., Sarafianos, D., Towards NZEB in Greece: A comparative study between cost optimality and energy efficiency for newly constructed residential buildings, *Energy Build.*, 198, 115–137, 2019.
 33. Theokli C., Elia C., Markou M., Vassiliades C., Energy renovation of an existing building in Nicosia Cyprus and investigation of the passive contribution of a BIPV/T double façade system: A case-study, *Energy Rep.*, 7, 8522–8533, 2021.
 34. Moran P., Connell J. O., Goggins J., Sustainable energy efficiency retrofits as residential buildings move towards nearly zero energy building (NZEB) standards, *Energy Build.*, 211, makale no. 109816, 2020.
 35. Costa J. F. W., Amorim C. N. D., Silva J. C. R., Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia, *J. Build. Eng.*, 32, makale no. 101680, 2020.
 36. Ascione F., Bianco N., De Masi R. F., Mauro G. M., Vanoli G. P., Energy retrofit of educational buildings: transient energy simulations, model calibration and multiobjective optimization towards nearly zero-energy performance, *Energy Build.*, 144, 303–319, 2017.
 37. Asdrubali F., Ballarini I., Corrado V., Evangelisti L., Grazieschi G., Guattari C., Energy and environmental payback times for an NZEB retrofit, *Build. Environ.*, 147, 461–472, 2019.
 38. Moazzen N., Ashrafian T., Yilmaz A. Z., Karagüler M. E., A multi-criteria approach to affordable energy-efficient retrofit of primary school buildings, *Appl. Energy*, 268, makale no. 115046, 2020.
 39. Zuhair S., Goggins J., Assessing evidence-based single-step and staged deep retrofit towards nearly zero-energy buildings (nZEB) using multi-objective optimisation, *Energy Effic.*, 12, 1891–1920, 2019.
 40. Hasan A., Vuolle M., Siren K., Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation, *Build. Environ.*, 43, 2022–2034, 2008.
 41. Marszal A. J., Heiselberg P., Life cycle cost analysis of a multi-store residential Net Zero Energy Building in Denmark, *Energy*, 36, 5600–5609, 2011.
 42. Marszal A. J., Heiselberg P., Bourrelle J. S., Musall E., Voss K., Sartori I., Napolitano, A., Zero energy building – a review of definitions and calculation methodologies, *Energy Build.*, 43, 971–979, 2011.
 43. Allouhi A., Rehman S., Buker M. S., Said Z., Up-to-date literature review on Solar PV systems: technology progress, market status and R&D, *J. Cleaner Prod.*, 362, makale no. 132339, 2022.
 44. Skandalos N., Wang M., Kapsalis V., D'Agostino D., Parker D., Bhuvad S. S., Udayraj, Peng J., Karamanis, D., Building PV integration according to regional climate conditions: BIPV regional adaptability extending Köppen-Geiger climate classification against urban and climate-related temperature increases, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 169, makale no. 112950, 2022.
 45. Ghaleb B., Asif M., Application of solar PV in commercial buildings: utilizability of rooftops, *Energy Build.*, 257, makale no. 111774, 2022.
 46. United Nations. Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Yayın tarihi 2015. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 47. Kapsalis V., Maduta C., Skandalos N., Bhuvad S. S., D'Agostino D., Yang R. J., Udayraj, Parker D., Karamanis, D., Bottom-up energy transition through rooftop PV upscaling: Remaining issues and emerging upgrades towards NZEBs at different climatic conditions, *Renewable Sustainable Energy Transition*, 5, makale no. 100083, 2024.
 48. T.C. Dışişleri Bakanlığı. Paris Anlaşması. <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>. Erişim tarihi Temmuz 9, 2025.
 49. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030). [https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi%20Azalt%C4%B1m%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan%C4%B1%20\(2024-2030\).pdf](https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi%20Azalt%C4%B1m%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan%C4%B1%20(2024-2030).pdf). Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 50. Sümer Y., Güngör A., Antalya ili için solar termal ısıtma teknolojilerinin karbon ayak izini azaltma potansiyeli / Carbon footprint reduction of solar thermal heating technologies for Antalya province, *Bilar: Bilim Armoni Dergisi*, 6 (2), 52–58, 2023.
 51. Atmaca A., Atmaca N., Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey, *J. Cleaner Prod.*, 340, makale no. 130691, 2022.
 52. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı I. <https://enerji.gov.tr/evced-enerji-verimliliği-uevcp>. Erişim tarihi Temmuz 9, 2025.
 53. Türk Standartları Enstitüsü. TS 825:2024 – Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı, 2024.
 54. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings, 2022.
 55. T.C. Resmî Gazete sayı 27075. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ekleri Dosya No. 20081205-9-1. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/12/20081205-9.html>. Yayın tarihi Aralık 5, 2008. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 56. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Elektrik enerjisinin birincil enerji ve sera gazı salımı katsayıları. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/mesleki hizmetler/icerikler/elektrik-enerjisinin-birincil-enerji-ve-sera-gazi-salimi-katsayilari-agustos-2022den-sonra-20220825085911.pdf>. Yayın tarihi Ağustos, 2022. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 57. T.C. Resmî Gazete sayı 30227. Ek 1: Bina Enerji Performansı – Isıtma ve soğutma için net enerji ihtiyacının hesaplanması. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/11/20171101M1-1-1.pdf>. Yayın tarihi Kasım 1, 2017. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 58. Güven M., TS825 standardında önerilen pencere termo-fiziksel özelliklerinin 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2025.
 59. Google Earth. Fatih Spor Kompleksi, İstanbul, Türkiye, ekran görüntüsü. <https://earth.google.com/web/> Erişim tarihi Temmuz 9, 2025.
 60. Salon Sporları. İBB Fatih Spor Kompleksi. <https://salonsporlari.com/ibb-fatih-spor-kompleksi.html>. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 61. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE fundamentals 2005: 30 SI, 2005.
 62. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Standard 90.1-2007: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2007.
 63. Empirica. SmartSpaces Final Report. https://empirica.com/wp-content/uploads/2024/11/SMARTSPACES_Final_Report_FINAL.pdf Yayın tarihi Kasım, 2024. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 64. Türk Standartları Enstitüsü. TS 825: Binalarda Isı yalıtım kuralları, 2008.
 65. İstanbul Yeşil. Kamuoyu raporu. <https://yesil.istanbul/storage/public/2022/11/30/63874a81565af-kamuoyu-19.pdf>. Yayın tarihi Kasım 30, 2022. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 66. Peters I. M., Khoo Y. S., Walsh T. M., Detailed current loss analysis for a PV module made with textured multicrystalline silicon wafer solar cells, *IEEE J. Photovoltaics*, 4 (2), 585–593, 2014.
 67. Gabor A. M., Janoch R., Anselmo A., Field H., Solar Panel Design Factors to Reduce the Impact of Cracked Cells and the Tendency for Crack Propagation, NREL PV Module Reliability Workshop, Denver, CO - USA, 24 Şubat, 2015.
 68. Qian J., Clement C. E., Ernst M., Khoo Y. S., Thomson A., Blakers A., Analysis of hotspots in half cell modules undetected by current test standards, *IEEE J. Photovoltaics*, 9 (3), 842–848, 2019.
 69. Hanifi H., Schneider J., Bagdahn J., Reduced Shading Effect on Half-Cell Modules – Measurement and Simulation, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg-Almanya, 2529–2533, 14-18 Eylül, 2015.
 70. ZES. ZES-540-550-HC182-BF-01 teknik dokümanı. https://zes.net/Uploads/Page/zes-540-550-hc182-bf-01_090524_2.pdf. Erişim tarihi Temmuz 8, 2025.
 71. T.C. Resmî Gazete sayı 30772. Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği.

- <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/05/20190512-1.htm>. Yayın tarihi Mayıs 12, 2019. Erişim tarihi Temmuz 12, 2025.
72. T.C. Resmi Gazete sayı 31970. Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği. Yayın tarihi Ekim 1, 2022. Erişim tarihi Temmuz 12, 2025.
73. D'agostino D., Zangheri P., Castellazzi L., Towards nearly zero energy buildings in Europe: A focus on retrofit in non-residential buildings, *Energies*, 10 (1), 117, 2017.
74. Paduos S., Corrado, V., Cost-optimal approach to transform the public buildings into nZEBs: An European cross-country comparison, *Energy Procedia*, 140, 314-324, 2017.
75. Karanfil B. Y., Kayaçetin N. C., Tereci A., Biyikli N., Gilisiralioğlu M. K., Karaer D., From global evidence to local action plan: a novel building decarbonization maturity scale and roadmap for nZEB office buildings in developing contexts– case of Türkiye, *Energy Build.*, 348, makale no. 116443, 2025.