



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/vyufbed>



Araştırma Makalesi

Eğitim Yapılarında Enerji Etkin İyileştirme ve Karbonsuzlaştırma: Van YYÜ Veteriner Fakültesi Örneği

Nilay ÖZELER KANAN*¹, Sümeyye Sena BASTEM², Merve KILINÇ
GİLİSİRALIOĞLU³, Merve Nur TAŞCI⁴, Huriye ÖNAL^{2,4}, Ekrem TUNÇBİLEK⁵

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Van, Türkiye

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

³Necmettin Erbakan Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Konya, Türkiye

⁴KTO Karatay Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Konya, Türkiye

⁵Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: nilayozelerkanan@yyu.edu.tr

Öz: Binalar, inşaat sektöründe enerji kullanımı ve CO₂ emisyonlarının oluşumunda önemli bir paya sahiptir. Enerji verimliliği ile karbon emisyonlarının azaltılması hedefleri doğrultusunda mevcut yapıların performansının artırılması kaçınılmaz bir gerekliliktir. Karbonsuzlaştırma kapsamında binalara ısı pompaları ve fotovoltaik (PV) sistemlerin hibrit entegrasyonu, mimarideki güncel teknolojik gelişmeler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi binasının enerji verimliliğini artırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla dört farklı iyileştirme senaryosu geliştirilmiş ve analiz edilmiştir: yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi (S1), aydınlatma sisteminin ve armatürlerin iyileştirilmesi (S2), yapının ısıtma sisteminin ısı pompası olarak değiştirilmesi (S3), yapıya fotovoltaik (PV) panellerin eklenmesi (S4). Her bir senaryo için enerji tüketimi ve karbon emisyonu hesaplanmıştır. Mevcut durum ve iyileştirme analizleri karşılaştırıldığında, ısıtma için harcanan enerjide S3 senaryosu ile %98 oranında verimlilik sağlanmıştır. Isı pompasının elektrik tüketimi de dahil edildiğinde bu oran %90'a düşmektedir. S3'ten sonra etkili müdahale olan S1 ile %80, S2 ile aydınlatma kaynaklı enerji tüketiminde %51, S4 ile elektrik tüketiminde %61.5 oranında verimlilik elde edilmiştir. Karbon emisyonları açısından ise operasyonelde %65, tüm aşamalarda %45 oranında azalma sağlanmıştır. Elde edilen bulgular, eğitim yapılarının enerji etkin biçimde iyileştirilmesiyle hem enerji verimliliği sağlanabileceğini hem de karbon salımının önemli ölçüde azaltılabileceğini ortaya koymaktadır. Çalışma, farklı iklim ve benzer kullanım koşullarına sahip yapılar için ulusal ölçekte enerji verimliliği konusunda, küresel ölçekte karbon salımı konusunda örnek teşkil etmekte; yeşil kampüs yaklaşımının yaygınlaşması için de ayrıca rehberlik etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji etkin iyileştirme, Eğitim yapısı, Bina yaşam döngüsü, Karbonsuzlaştırma

Energy Efficient Improvement and Decarbonization in Educational Buildings: The Case of Van YYU Faculty of Veterinary Medicine

Abstract: Buildings constitute a significant share of energy consumption and CO₂ emissions in the construction sector. Energy efficiency and the reduction of carbon emissions are essential for improving the performance of existing buildings. The hybrid integration of heat pumps and photovoltaic (PV) systems into buildings is the latest architectural strategy for decarbonisation. In this study, four different retrofitting scenarios were developed and analysed to improve the energy efficiency and reduce carbon emissions of the Veterinary Faculty at Van YYU:

Gönderilme Tarihi: 25.10.2025

Kabul Tarihi: 01.03.2026

Nasıl atıf yapılır: Özeler Kanan, N., Bastem S.S., Kılınç Gİlisiralioğlu, M., Taşçı M. N., nal H., Tunçbilek E. (2026). Eğitim Yapılarında Enerji Etkin İyileştirme ve Karbonsuzlaştırma: Van YYÜ Veteriner Fakültesi. Örneği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 203-224 <https://doi.org/10.53433/vyufbed.1791059>

retrofitting the thermophysical properties of the building envelope (S1), improving the lighting system and fixtures (S2), converting the building's heating system to a heat pump (S3), and integrating PV into the building (S4). Results showed that the S3 scenario achieved 98% efficiency in energy consumption for heating. When the electricity consumption of the heat pump is included, this ratio decreases to 90%. Following S3, the most scenario was S1, which achieved 80% efficiency, S2 achieved 51% efficiency in lighting-related energy consumption, and S4 achieved 61.5% efficiency in electricity consumption. Carbon emissions were reduced by 65% operationally and 45% overall. The findings indicate that energy efficiency can be achieved and carbon emissions can be significantly reduced by improving the energy efficiency of educational buildings. The study serves as an example of energy efficiency at the national level for buildings with different climates and similar usage conditions, and of carbon emissions at the global level; it also provides guidance for the widespread adoption of the green campus approach.

Keywords: Energy efficiency design, Educational buildings, Building lifecycle, Decarbonization

1. Giriş

Binaların inşası, işletimi ve yıkımı sürecinde tüketilen enerji ve doğal kaynaklar, yapıların tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel performanslarının değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Küresel ölçekte, bina sektörü toplam birincil enerji tüketiminin yaklaşık %40'ına ve sera gazı emisyonlarının yaklaşık %30'una neden olmaktadır (IEA, 2023b). 2023 yılı verilerine göre binalarda %22,4 doğalgaz, %37,6 elektrik yakıt türüne göre enerji tüketilmiştir (IEA, 2024a; UNEP ve GlobalABC, 2024). 2023 yılında ısı pompaları binalardaki ısıtma ihtiyacının %10'undan fazlasını karşılamıştır (IEA, 2023a); Fotovoltaik (PV) ile elde edilen elektriğin toplam ısıtma sistemlerindeki payı, binalarda giderek daha fazla yenilenebilir elektrikle çalışan ısı pompaları ve elektrikli kazanların kullanılmasına bağlı olarak geçtiğimiz yıllara kıyasla %13'ten %17'ye yükselmiştir (IEA, 2023b; UNEP ve GlobalABC, 2024). PV ile birlikte karbondan arındırma imkanı sunan ve enerji verimli binalarda daha etkili çalışan ısı pompaları gibi sıfır karbon teknolojileri, net sıfıra hazır (net-zero-ready) binaların hayata geçirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

2022 yılı itibarıyla Türkiye'de yaklaşık 9,6 milyona ulaşan bina stokunun %87'sini konut nitelikli yapıların oluşturduğu belirtilmektedir (ETKB, 2024). Yapı kullanma izni istatistikleri ise, Türkiye'nin bina stokuna her yıl 100 000'in üzerinde yeni binanın eklendiğini göstermektedir (ETKB, 2018). Örgün eğitimde kamu ve özel olmak üzere toplam 75 467 okul bulunmaktadır (MEB, 2023). Üniversite Mekanları Envanter Yönetim Sistemi Projesi verilerine göre Türkiye'de 11 701 devlet üniversitesi binası (yönetim, eğitim, sosyal alan, spor alanları, barınma, araştırma, sağlık hizmetleri vb.) bulunmaktadır (CSBB, 2018). Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nin ise yaklaşık %42'si eğitim, araştırma yapılarıdır. Mevcut yapı stoğu göz önüne alındığında neredeyse sıfır hedeflerine ulaşmak için eğitim yapılarının enerji ve karbon etkin iyileştirme gereksinimi daha kritik hale gelmektedir.

Eğitim binaları, kullanım yoğunlukları ve uzun işletme süreleri nedeniyle, çevresel etkiler içerisinde önemli bir paya sahiptir. Literatür incelendiğinde tipik bir üniversite veya okul binasında enerji tüketimi ve karbon emisyonunun %70'ten fazlasının kullanım aşamasında gerçekleştiği ve bunun büyük ölçüde ısıtma, soğutma, aydınlatma ve elektrikli ekipman kullanımı kaynaklı olduğu görülmektedir (Sharma ve ark., 2011; Fenner ve ark., 2020) Bu durum, yaşam döngüsünün özellikle işletme aşamasında enerji verimliliği ve karbon azaltımı stratejilerinin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Böylece, eğitim binalarının tasarım, iyileştirme ve işletme süreçlerinde enerji tüketimini ve çevresel etkileri azaltmaya yönelik müdahaleler erken aşamalarda uygulanabilmektedir.

2000'li yıllardan günümüze kadar tasarım aşamasından başlayarak bina ile ilgili tüm disiplinlerde yasal çerçeve aşamalı olarak gelişmiş; önce enerji tasarrufu, ardından enerji verimliliği ve nihayetinde enerji etkinliği kavramları yapı yönetmeliklerine dahil edilmiştir. Avrupa Birliği'nin 2018 yılında revize ettiği Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)'de Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (NSEB) hedeflerinde her ülkenin iklim koşullarına göre minimum enerji gereksinimlerinin belirlenmesi, yeni bina tasarımlarının ve mevcut bina iyileştirmelerinin yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Avrupa Birliği (AB), 2024 yılında Binaların Enerji Performansı Direktifi'ni güncellemiştir. Bu direktif, Bina Otomasyon Kontrol Sistemlerinin kullanımını teşvik eden önlemlerin alınması ve 2030'dan itibaren tüm yeni binaların sıfır emisyonlu binalar olması gerekliliğini içermektedir (IEA, 2024b). Ayrıca AB, 2024 yılında her yıl kamu binalarının %3'ünün yenilemesi

kuralını genişleterek kamu sektörünün toplam enerji tüketimini yıllık ortalama %1,9 azaltma yükümlülüğünü yürürlüğe koymuştur (EU Directive, 2023).

Ülkemizde 2023 yılında yayımlanan ve 2024-2028 yıllarını kapsayan 12. Kalkınma Planı'nda, akıllı, sürdürülebilir ve iklim dostu şehirler yaklaşımına vurgu yapılarak karbon ayak izinin azaltılması amaçlanmıştır (CSBB, 2023). Bu kapsamda ulusal düzeyde ortaya konulan hedefler ve standartların bölgesel ve yerel koşullara uyarlanması gerekmektedir. 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'nda 2024-2026 yılları arasındaki orta vadeli programda kamu binalarında yüksek enerji performansını sağlamak için NSEB yaklaşımının yaygınlaştırılacağı ifade edilmektedir. Ayrıca farklı bina tipolojilerinde enerji tüketimlerinin karşılaştırılması ve ısı pompası kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik farkındalığın artırılması hedeflenmektedir. Yine aynı eylem planında kamu binalarında 2030 yılına yönelik %30 enerji tasarrufu hedefi yer almaktadır. Haziran 2025'te yayımlanan 'Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik' ile NSEB uygulamalarının önü açılmış; yenilenebilir enerji kullanımı ve asgari performans şartları için güncellemeler yapılmıştır. Bunlarla birlikte ulusal hedefler için hazırlanan basılı tasarım rehberleri, standartlar ve yönetmelikler halihazırda bulunmaktadır.

Binaların inşası, işletimi ve yıkımı boyunca tüketilen enerji ve kaynakları kapsayan tüm yaşam döngüsünün tespit edilmesi için çevresel etki değerlendirmesi yapılması gerekmektedir. Çevresel etki değerlerinin ortaya konulmasına yönelik en etkili yöntemlerden biri Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD)'dir. YDD, maliyet ve performansın yanı sıra doğal kaynakların verimli kullanımı ve sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi sürdürülebilirlik kriterlerini karar verme sürecine dahil ederek, projelere her ölçekte ve aşamada müdahale imkânı sunmaktadır. Bina ölçeğinde yapı malzemeleri, şantiye yönetimi, bina işletmesi ve yıkım süreçlerinde YDD yapılmaktadır.

Eğitim yapılarında enerji etkinlik ve karbonsuzlaştırmaya yönelik mevcut literatürü incelemek amacıyla Scopus ve ScienceDirect veri tabanlarında tarama yapılmıştır. Ulusal ölçekteki çalışmaları değerlendirmek için DergiPark veri tabanı kullanılmıştır. Aramalar özet içerisinde "educational building" AND "energy retrofitting" OR "energy efficiency" AND "decarbonization" OR "carbon emission" AND "cold climate" anahtar kelimeleri ile mantıksal döngüler kullanılarak yapılmıştır. İnceleme makaleleri ve konferans bildirileri taramaya dahil edilmemiştir. Tarama sonucunda Scopus'ta 17, ScienceDirect'te 7 ve DergiPark'ta 0 makaleye ulaşılmıştır. Ulusal literatürün ortaya konulabilmesi amacıyla anahtar kelimeler ikili kombinasyonlar halinde aranmış ve 2 makale elde edilmiştir. Toplamda ulaşılan 26 yayının detaylı analiz edilmesi sonucunda 7 yayın çalışmanın amacıyla doğrudan ilişkili olmadığından elenmiştir. 19 adet birincil yayın bina tipolojisi, bina konumu, analiz yöntemi, simülasyon aracı, iyileştirme yaklaşımı, karbon ve enerji açısından değerlendirmeleri açısından incelenmiş çalışmalara ait bilgiler Çizelge 1' de sunulmuştur.

Literatür taraması kapsamında incelenen makalelerde eğitim yapıları (8), karma yapı grupları (5), konut yapıları (4) gibi farklı yapı tipolojilerinin çalışıldığına ulaşılmıştır. İncelenen birincil çalışmalarda vaka alanları Avrupa ülkeleri (9), Türkiye (5), Çin (2), Afrika ülkeleri (2) ve Kanada (1)'da yer almaktadır. Çalışmalarda analiz yöntemi olarak simülasyon (12), hesaplama (7) ve sınırlı sayıda çalışmada ise anket yönteminin (2) kullanıldığı görülmektedir. Kullanılan simülasyon araçları çeşitlilik gösterse de EnergyPlus ve DesignBuilder yazılımlarının öne çıktığı dikkat çekmektedir. Enerji tüketimi ve karbon salımını azaltmaya yönelik bina kabuğunun iyileştirilmesi ve HVAC sisteminin değiştirilmesine yönelik müdahalelerin ön planda olduğu saptanmıştır. Buna ek olarak ısıtma sisteminin değiştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının (PV, rüzgâr enerjisi, termal enerji) entegrasyonu, aydınlatma verimliliğinin artırılmasına yönelik çözümler ve yenilikçi malzeme önerileri de çalışmalarda ele alınan iyileştirme yaklaşımlardandır. Enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik iyileştirmelerde yukarıda sayılan müdahale yöntemlerinin tamamı kullanılırken; karbon salımının azaltılmasına yönelik çalışmalarda özellikle bina kabuğunun iyileştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve ısıtma sisteminin yenilenmesi yaklaşımları öne çıkmaktadır.

Bu çalışma Van YYÜ Veteriner Fakültesi'nin enerji ve karbon etkinliğini artırmaya yönelik senaryo temelli iyileştirme yaklaşımını, simülasyon tabanlı analizlerle değerlendirmektedir. Çalışmada soğuk iklimde yer alan eğitim yapısının pasif ve aktif tasarım parametreleri ile iyileştirilerek enerji tüketimi ve CO₂ salımının azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda mevcut durum enerji analizi yapılmış, enerji ve karbon etkinliği için yapısal ve teknolojik iyileştirme senaryoları geliştirilmiştir.

Çizelge 1. Enerji etkin iyileştirme ve karbonsuzlaştırma konularına ilişkin literatür taraması özeti.

Yazarlar	Bina Tipi	Bina Konumu	Analiz Yöntemi	Simülasyon Aracı	Değişkenler/ İyileştirmeler	Enerji analizi var mı?	Karbon analizi var mı?
Abusamhadana & Türkmenoğlu (2018)	Karma Yapı Grubu	Türkiye, İzmit	Yerinde İnceleme ve Anket	-	Bina kabuğu ve ısıtma sistemi	+	-
Yılmaz & Oral (2018)	Eğitim Yapısı	Türkiye, İstanbul	Simülasyon	Energy Plus	Bina kabuğu, HVAC, aydınlatma	+	-
Montero ve ark. (2022)	Sağlık Yapısı	İspanya	Sayısal Hesaplama	PVSyst software	Yenilenebilir enerji	+	+
Jokinen ve ark. (2022)	Karma Yapı Grubu	Finlandiya	Sayısal Hesaplama	-	Yenilenebilir enerji kaynağı entegrasyonu	+	+
Aruta ve ark. (2023)	Eğitim Yapısı	İtalya	Simülasyon	DesignBuilder ve Energyplus	Bina kabuğu, yenilenebilir enerji	-	+
Elaouzy & El Fadar (2023)	Konut Yapısı	Fas	Simülasyon ve Sayısal hesaplama	EnergyPlus, PVSyst ve Sketchup	HVAC, Yenilenebilir enerji	+	+
He ve ark. (2023)	Karma Yapı Grubu	Çin	Simülasyon	SketchUp ve Energyplus	HVAC	+	+
Zhuang ve ark. (2023)	Eğitim Yapısı	Birleşik Krallık	Sayısal Hesaplama	TRNSYS	HVAC	+	+
Bentoumi ve ark. (2024)	Konut Yapısı	Cezayir	Simülasyon	DesignBuilder ve TRNSYS	Bina kabuğu, malzeme önerisi	+	-
Jiao ve ark. (2024)	Eğitim Yapısı	Çin	Simülasyon	Ladybug, Honeybee ve EnergyPlus	Bina kabuğu, HVAC, ısıtma sistemi	+	+
Alim, H. (2025)	Konut Yapısı	Türkiye, Sivas	Simülasyon	DesignBuilder ve Energyplus	Bina kabuğu, HVAC, Yenilenebilir enerji	+	-
Balali & Yunusa-Kaltungo, (2025)	-	Birleşik Krallık	Anket	-	Bina kabuğu	+	-
Fahlstedt ve ark. (2025)	Eğitim Yapısı	Norveç	Simülasyon	IDA-ICE	Bina tipi, bina kabuğu, yenilenebilir enerji	+	+
Hainoun ve ark. (2025)	Eğitim Yapısı	Avusturya	Sayısal Hesaplama	-	Yenilenebilir enerji, HVAC	+	+
Krawczyk ve ark. (2025)	Eğitim Yapısı	Polonya	Sayısal Hesaplama	-	Hava-su ısı pompası, yenilenebilir enerji	+	-
Li & Feng (2025)	Karma Yapı Grubu	Kanada	Simülasyon	Sketchup, EnergyPlus, Open Studio ve ArchGIS	Yenilenebilir enerji, bina tipolojisi	+	+
Pallotta ve ark. (2025)	Karma Yapı Grubu	İtalya	Simülasyon	TRNSYS	Yenilikçi ısıtma sistemi	-	+
Tozlu (2025)	Konut Yapısı	Türkiye, Samsun	Simülasyon ve Sayısal hesaplama	DesignBuilder ve Energyplus	Bina kabuğu, HVAC	+	-
Umcu ve ark. (2025)	Eğitim Yapısı	Türkiye, Osmaniye	Simülasyon	Design builder	Yenilenebilir enerji	+	+

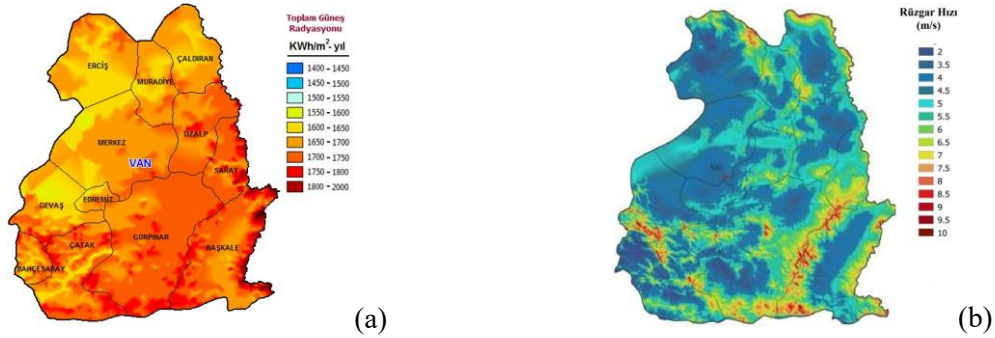
Çalışma, Türkiye’deki üniversite eğitim yapılarının enerji tüketimi ve karbon salımlarının tespit edilmesinde örnek olarak öncülük etmektedir. Simülasyon destekli senaryo analizi, farklı iyileştirme alternatifleri sunarak yatırım önceliklendirmesi ve sürdürülebilirlik stratejilerinin belirlenmesinde karar vericilere kanıta dayalı bir temel sağlamaktadır. Ayrıca, çalışmanın ulusal enerji verimliliği eylem planları ve karbonsuzlaşma hedeflerine uyumlu yürütülmesi, modelin diğer kamu binalarına ölçeklenebilir olmasının yanı sıra, üniversitelerin sürdürülebilirlik hedeflerinden yeşil kampüs yaklaşımını da desteklemektedir.

Makale Giriş, Materyal ve Yöntem, Bulgular ve Tartışma ile Sonuç olmak üzere dört başlık altında kurgulanmıştır. Materyal ve Yöntem bölümünde çalışmanın iş akışı, kullanılan araçlar ve yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bulgular ve Tartışma bölümünde yapının mevcut durumuna ilişkin enerji ve karbon analizi yapılmış, yapının enerji ve karbon etkinliğinin artırılmasına yönelik senaryolar geliştirilmiştir. Bu senaryoların her biri için enerji ve karbon iyileştirilmesine ilişkin analiz sonuçları sunulmuş; bulgular literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılmış ve ortaya çıkan farklılıkların nedenleri tartışılmıştır. Sonuç bölümünde ise gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuş, çalışmanın kısıtları ve yaygın etkisi açıklanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma alanı

TS-825:2024’e göre Van, 5. derece gün bölgesi-çok soğuk iklim bölgesinde yer almaktadır. Van’ın yaz ve kış aylarında günlük güneşlenme süresi 8,4 saat ve toplam güneş ışınımı 538 W/m²’dir (Munda Solar, 2020). Güneş enerjisi potansiyeli açısından en yüksek olan iller arasındadır (Şekil 1a) (ETKB, 2012). Şehrin hâkim rüzgâr yönü doğudur. Bununla birlikte Van Gölü üstünde hâkim rüzgâr yönü günün belirli saatleri içinde farklılık göstermektedir. Üniversite kampüsü ve çalışma alanı Van Gölü kıyısında yer aldığından hâkim rüzgâr yönü kuzeydoğu kabul edilmiştir. Van’ın rüzgâr enerjisi üretimine yönelik potansiyelinin oldukça düşük olduğu görülmektedir (Şekil 1b) (MGM, 2007). Bundan dolayı çalışma kapsamında güneşten kazanç, güneş enerjisi potansiyeli konusuna odaklanılmıştır.



Şekil 1. (a) Van ili güneş enerjisi potansiyel haritası (ETKB, 2012), (b) Van ili rüzgar enerjisi potansiyel haritası (MGM, 2007).

Çalışma kapsamında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (Van YYÜ) Veteriner Fakültesi Binası ele alınmıştır. Binanın mevcut yapısal durumu Şekil 2’de sunulmuştur. Yapı, 1995 yılında inşa edilmiş olup günümüzde eğitim amaçlı kullanılmaktadır. Bina, kuzeybatı–güneydoğu doğrultusunda konumlanmış dikdörtgen plan tipolojisine sahiptir. Bodrum, zemin, iki normal kat ve ara kattan oluşan yapı, toplam 3.202 m² kullanım alanına sahiptir. 2011 Van Depremi sonrasında yapı güçlendirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yerinde gözleme dayalı analizler, güçlendirme projesi üzerinden yapılmıştır. Ancak, enerji tüketim hesapları ve yapısal iyileştirme analizlerinde güçlendirilmiş duvarların kalınlıkları hesaplamaya dahil edilmemiştir. Bina birçok işlevi barındırdığından analizlerin doğruluğunu artırmak için farklı zonlar tanımlanmıştır. Katlar, derslikler, laboratuvarlar, ofisler, ıslak hacimler, sirkülasyon alanları, depo ve teknik hizmetler olarak altı zona ayrılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Yapının fotoğrafı (Yazar, Nilay Özeler Kanan tarafından çekilmiştir.).



Şekil 3. Yapı zemin kat planı.

Van YYÜ Veteriner Fakültesi binası, kampüs yerleşkesi içinde merkezi bir konumdadır. Yerleşkedeki tüm binalar, merkezi ısıtma sistemi ve doğalgaz yakıtı ile ısıtılmaktadır. Ayrıca fakülte binalarının elektrik, su ve yakıt tüketimine dair faturalar ortak gelmektedir. Bu durum yapı özelinde gerçek tüketim verilerinin incelenememesine neden olmuştur. İncelenen fakülte binası 3 411 m² inşaat alanına sahiptir. Mevcut durum analizi ve sonrasındaki senaryolar inşaat alanı m²'sine göre yapılmıştır. Yapı düz bir arazide, kuzeybatı-güneydoğu aksında yer almaktadır ve dikdörtgen formdadır. Yapının kuzeydoğusunda ek bina bulunmaktadır. Yapının kütle yerleşimi ve yönlenmesi nedeniyle, ana yapı hâkim rüzgâra doğrudan maruz kalmamakta; ek bina ise ana yapının negatif basınç bölgesinde konumlanmaktadır. Bu durum soğutmanın istendiği dönemde hava hareketinin kısıtlanmasına ve içerideki nemin dağıtılmamasına neden olmaktadır. Güneş ışınımı açısından yapı yönelimi incelendiğinde geniş cephe güneydoğuda olduğundan yapının güneşin ısıtıcı etkisinden faydalandığı söylenebilir. Ayrıca yapının yakın çevresinde herhangi bir peyzaj ögesi olmadığından güneş ışınimleri doğrudan yapıya ulaşmaktadır. Yapı içerisinde yerinde incelemeler yapıldığında aydınlatma için 2x36 Wattlık floresan kullanıldığı; yapının koridorlarının loş denilecek seviyede olması sebebiyle aydınlatma açısından göz konforu, algılama açısından yetersiz olduğu ve duvarlarda yapılan seramik uygulamaları sebebiyle de insan göz hizasında yansımalarla kaynaklı parlama olduğu görülmüştür (Şekil 4a).

Koridor boyunca üstü tavana kadar camlı, çift kanatlı kapılarla laboratuvar ve derslik mekanlarına girilmektedir (Şekil 4b). Yapının dikey ve yatay sirkülasyonu yaklaşık 900 m²'dir. Yapının %4,7'si dikey sirkülasyon, %21,6'sı yatay sirkülasyon için ayrılmıştır. Sirkülasyon alanlarının yapı genelinde fazla m² alan kapladığı, yangın, aydınlatma gibi konulardaki şartlara uygun olmadığı görülmüştür. Merdivenler mimari tasarım açısından yangın korunumlu olmadığından, bu durum binadaki kullanıcıların herhangi bir yangın anında kaçışını engelleyebilir (Şekil 4c). Bina dış cephesinde 1 adet endüstriyel tipi soğutma ünitesi (Şekil 4d) ve 3 adet split klima olduğu görülmüştür.



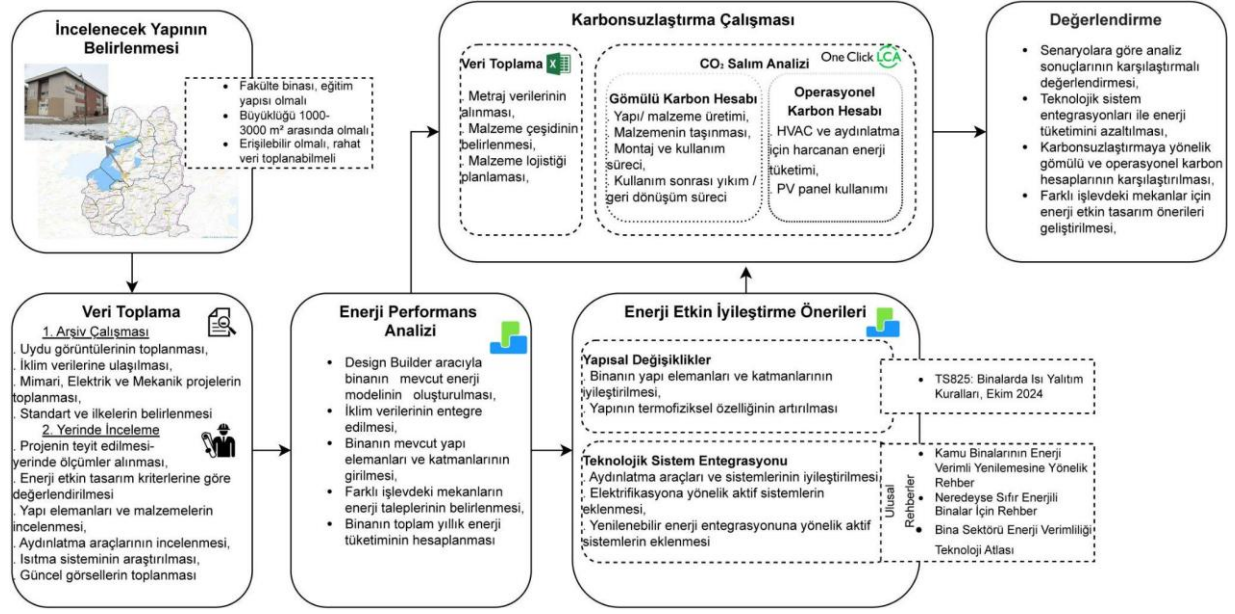
Şekil 4. (a) Yatay sirkülasyon, (b) İç kapılar, (c) Dikey sirkülasyon-merdiven, (d) Soğutma ünitesi.

2.2. Çalışmanın kurgusu

Çalışmada çok soğuk iklimde yer alan yapının pasif ve aktif tasarım parametreleri ile iyileştirilerek enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda mevcut durum enerji analizi, enerji etkin iyileştirme için yapısal, teknolojik ve karbonsuzlaştırmaya yönelik senaryolar geliştirilmiştir. İyileştirme yaklaşımında enerji verimliliği için Kamu Binalarının Enerji Verimli Yenilenmesine Yönelik Rehber (ÇŞİDB, 2020a), Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (NSEB) için Rehber (ÇŞİDB, 2020b), Bina Sektörü Enerji Verimliliği Teknoloji Atlası (ÇŞİDB, 2021) ve TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı (TS825, 2024) kaynakları rehber alınmıştır. Karbon salımı hesaplarında YDD analizi için ISO14040 'Çevre Yönetimi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, İlkeler ve Çerçeve Standardı' ile birlikte EN15978 'Binaların Sürdürülebilirliği, Binaların Çevresel Performansının Değerlendirilmesi, Hesaplama Yöntemi' uluslararası düzeyde kabul görmüş rehberler referans alınmıştır.

Şekil 5'te görüldüğü gibi çalışma vaka alanının belirlenmesi, veri toplanması, enerji performans analizleri, enerji etkin iyileştirme senaryoları, karbonsuzlaştırma çalışması ve değerlendirme olmak üzere altı aşamadan oluşmaktadır. Vaka alanı, yapının yerinde incelenbilmesi, mevcut projelerine ulaşılabilmesi, simülasyon araçlarında tekrarlanabilir analizlere fırsat verebilecek ölçek ve büyüklükte olması kriterlerine göre belirlenmiştir. Bununla birlikte, neredeyse sıfır değerlerine soğuk iklim bölgesinde ulaşılabilme motivasyonu yapı seçiminde etkili olmuştur. Veri toplama aşamasında arşiv çalışması ve yerinde inceleme gerçekleştirilmiştir. Van'ın iklim verileri, yapının mimari, elektrik ve mekanik projeleri; kampüsün ve yapının uydu görüntüleri, ulusal/uluslararası standart ve ilkeler arşiv çalışması kapsamında incelenmiştir. Yerinde gözlem sırasında projeler yapının mevcut hali ile karşılaştırılmıştır. Yapı enerji etkin tasarım kriterlerine göre değerlendirilmiş, yapı elemanları, yapı malzemeleri, aydınlatma araçları açısından incelenmiştir. Yapının güncel fotoğrafları çekilmiştir. Elde edilen verilere göre enerji performans analizleri yapılmıştır. Bu aşamada binanın modeli için dinamik simülasyon araçlarından olan DesignBuilder kullanılmıştır. Modelde mevcut yapı katmanları ve malzemeleri tanımlanmış; iklim verileri girilerek mevcut enerji tüketimine dair hesaplama yapılmıştır. Aynı zamanda mevcut yapı analizine bağlı olarak enerji etkin iyileştirme senaryoları geliştirilmiş ve analiz edilmiştir. İlk senaryo, yapının termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi (S1)'e yönelik TS825 değerlerine ulaşılacak şekilde duvar, pencere, çatı ve zemin temaslı döşeme katmanlarının değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Yapısal müdahaleler sonucunda oluşan iyileştirmelerle beraber yapıya teknolojik sistemler entegre edilerek enerji tüketimi en aza indirilmeye çalışılmıştır. Teknolojik sistem entegrasyonunda öncelikle aydınlatma sistemi ve armatürlerin iyileştirilmesi (S2) senaryosu geliştirilmiştir. Yapının ısıtma sistemi için ısı pompası entegrasyonu (S3) ile hibrit sistem önerilmiştir. Ayrıca yapıya fotovoltaik panel (PV) eklenmesi (S4) ile analizler yapılmıştır. Karbonsuzlaştırma aşamasında ise sonuçlar Excel'e aktarılmış ve One Click LCA programı kullanılarak yapının mevcutta

oluşturduğu operasyonel karbon miktarı, küresel ısınma potansiyeli (GWP) hesaplanmıştır. Alınan her bir iyileştirme kararı sonrasında gömülü ve operasyonel karbon hesapları tekrar yapılmıştır. İyileştirme müdahaleleri sonucunda yapının inşaat sürecinde açığa çıkacak gömülü karbon miktarını azaltmaya yönelik önerilen yapı malzemeleri, üretim sürecinde düşük karbon yaklaşımını benimseyen firmalar ve fabrikaların inşaat alanına uzaklığı göz önünde bulundurularak alternatifler değerlendirilmiştir. Montaj ve kullanım süresi açısından da karbon salımı ve gömülü karbon hesapları yapılmıştır. Son aşamada yapının iyileştirilmesine yönelik yapılan tüm analizler enerji ve karbon salımı açısından değerlendirilerek en uygun değere yönelik kararlar alınmıştır.



Şekil 5. Çalışmanın iş akış şeması.

2.3. Hesaplama ve simülasyon araçları

Çalışma kapsamında ele alınan fakülte binasının ısıtma enerjisi ihtiyaçları, DesignBuilder 7.3.1.003 sürümü kullanılarak hesaplanmıştır. DesignBuilder, bina enerji modellemesi için kullanılan EnergyPlus üzerine geliştirilmiş bir arayüzdür. EnergyPlus ise Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı tarafından geliştirilen açık kaynaklı bir simülasyon yazılımıdır (EnergyPlus, 2025). EnergyPlus yazılımı, bir binanın ısıtma-soğutma için ihtiyaç duyduğu enerjiyi çeşitli iklimlendirme sistemleri ve enerji kaynakları kullanarak hesaplamaktadır. Yazılım, bina ile ilgili enerji sistemlerini farklı çevresel ve işletme koşullarına göre simüle ederek gerçekleştirmektedir. Bina modeli simülasyonu, temel enerji dengesi prensiplerine dayanmaktadır. Yazılım enerji analizlerinde bir binanın ısıtma ve soğutma yüklerini belirlemek için termal bölge enerji dengesi yöntemini kullanmaktadır. Bu hesaplama, binanın her bir termal bölgesi için giren, çıkan ve üretilen enerji miktarlarının denkleştirilmesi prensibine dayanmaktadır (Denklem 1) (ASHRAE, 2025).

$$Q_{Zone} = \sum Q_{Giren} - \sum Q_{Çıkan} + Q_{Üretilen} \quad (1)$$

EnergyPlus yazılımında yapı elemanlarından (duvar, tavan, döşeme vb.) geçen ısı transferini hesaplamak için Conduction Transfer Function (CTF) yöntemi kullanılmaktadır (Denklem 2). CTF yöntemi, geçmişteki ve mevcut sıcaklık verilerine dayanarak zamana bağlı ısı iletimini tahmin eden bir yaklaşımdır. Bu yöntem, Fourier ısı iletim denkleminin dayanmaktadır. Yapı elemanlarında iç sıcaklık dağılımını bulma gereği olmadığından, Finite Difference Method (FDM)'den daha hızlı bir sürede sonuç

vermekte ve yıllık simülasyonların daha kısa zamanda tamamlanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle yazılım, birçok araştırmacı tarafından enerji modellemesi için kullanılmaktadır (Vettorazzi ve ark. 2021; Fang ve ark., 2025).

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{t-j\delta} \quad (2)$$

Yapılan analizlerde CTF yöntemi kullanılmış olup, “number of time steps per hour” değeri yarım saate denk gelecek şekilde ‘2’ olarak alınmıştır. Bu değer birçok bina için enerji simülasyonlarının yapılmasında yeterli olduğu DesignBuilder el kitabında belirtilmiştir (DesignBuilder, 2025). Ayrıca, çok küçük zaman adımı değerlerinin CTF metodu için yakınsama sorunlarına sebep olduğu belirtilmiştir (EnergyPlus, 2025). Seçilen fakülte binasında mevcut ısıtma sistemi, doğalgaz yakıtlı kazana bağlı radyatörler aracılığıyla sağlanmakta olup, yapıda soğutma sistemi bulunmamaktadır. Isıtma sisteminin eski olduğu göz önüne alınarak verimlilik %85 olarak kabul edilmiştir. Ayrıca binada herhangi bir kullanım sıcak suyu (evsel) sistemi bulunmadığı için doğalgaz tüketimi sadece ısıtma sisteminden kaynaklanmaktadır. Analizler sırasında, binanın kullanım zaman çizelgesinde eğitim yapıları için DesignBuilder yazılımında sunulan tanımlı varsayılan veriler esas alınmıştır. Değişkenler için kabul edilen değerler Çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Binaya ilişkin iç mekân değişkenleri ve DesignBuilder yazılımında tanımlı veriler listesi.

Değişkenler	Değerler
Kullanıcı yoğunluğu [kişi/m ²]	0.20
Metabolik faktör [MET]	Oturarak Okuma 0.90
Kullanım zamanları [-]	08.00-17.00
Saatteki hava değişimi [1/h]	1/5
Çalışma yüzeyinin ortalama aydınlatma düzeyi [lux]	500
Isıtma ayarları [°C]	20
Isı pompasının performans katsayısı COP [W/W]	3
Isıtma sezonu	5 ay (150 gün)
PV panel gücü	180 W/m ²
Günlük güneşlenme süresi	8 saat (ortalama)

Kaynak kullanımında çevresel etki değerlerinin ortaya konulmasına yönelik yöntemlerden biri Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD)’sidir. Bu çalışmada One Click LCA yazılım aracı seçilmiştir. Bu araç, Türkiye koşullarına özgü Çevresel Ürün Beyanları verilerinin tüm yaşam döngüsü boyunca değerlendirilmesine olanak tanınması, malzeme verilerinin yerel koşullarla uyumlu hale getirilebilmesi ve farklı verilerin çevrimiçi olarak entegre edilebilmesi nedenleriyle tercih edilmiştir. Aynı zamanda One Click LCA ile malzemelerin üretimi sırasında açığa çıkan karbon emisyonları, her bir malzemenin üretim yerinden sahaya ulaşımına kadarki taşıma mesafesi manuel olarak veri girişi yapılarak veya bu tür bilgiler kütüphanedeki malzeme bilgilerinden alınarak hesaplanmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi analizleri, EN15978 standardı ile uyumlu çalışan “Building LCA” modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında A1–A3 (malzeme üretimi), B4–B5 (taşıma ve inşaat) ve B6 (operasyonel enerji kullanımı) değerlendirilmiş, C1–C4 (yaşam sonu) aşamaları hesaplanmamıştır. Araca ilk olarak binanın türü, yapım sistemi, taban alanı ve kat sayısı bilgileri girilmiştir. Bina tanımlandıktan sonra binada kullanılan yapı malzemesi bilgileri, enerji hesaplarının yapıldığı DesignBuilder aracındaki model üzerinden aktarılmıştır. Bu çalışmada içe aktarma ile malzeme bilgileri Building LCA’ya eklenmiştir. Ardından DesignBuilder’dan elde edilen elektrik ve doğalgaz

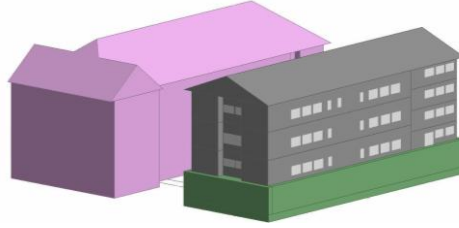
kullanımından kaynaklı operasyonel enerji kullanımı verileri tanımlanmış ve binanın yaşam ömrü 50 yıl olarak belirtildikten sonra hesaplama yapılmıştır. Building LCA'da yapılan yaşam döngüsü değerlendirme hesaplarının sonucunda 7 çevresel etki kategorisi sunulmuştur.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde öncelikle yapının mevcut durumuna ilişkin enerji performansı ve yaşam döngüsü karbon emisyonu analizleri sunulmuştur. Ardından, mevcut durumun enerji etkinliğini artırmaya yönelik yapısal değişiklikler ve teknolojik sistem entegrasyonlarını içeren iyileştirme senaryoları geliştirilmiştir. Senaryolar; yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi (S1), aydınlatma sistemi ve armatürlerin iyileştirilmesi (S2), yapının ısıtma sisteminin değiştirilmesi (S3) ve yapıya fotovoltaik (PV) panellerin eklenmesi (S4) olarak belirlenmiştir.

3.1 Bina enerji performansı, bina yaşam döngüsü ve karbon emisyonu analizi

Van YYÜ Veteriner Fakültesi binasının enerji performans analizi yapılırken dinamik simülasyon yazılımı olan DesignBuilder kullanılmıştır. Ana yapı detayları ile modellenmiş yakın çevresindeki yapılar ise kütsel olarak modele aktarılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Yapının DesignBuilder modeli.

Çizelge 3. Mevcut yapı elemanları, katmanları ve ısıl geçirgenlik kat sayısı (Görsel veri, DesignBuilder'dan alınmıştır).

Yapı Sistemleri Adları	Yapı Sistemi Katmanları	Yapı Sistemleri Katmanları Görseli	Isıl Geçirgenlik Kat Sayısı
Dış Duvar	*Akrilik dış cephe boyası-0.01 m *Çimento katkılı kaba sıva-0.03 m *Tuğla- 0.3 m *Alçı sıva-0.02 m *Akrilik iç cephe boyası- 0.005 m		1.327 W/m ² K
Çatı Üst Örtüsü	*Metal Trapez Çatı kaplaması-0.02 m *OSB-0.03 m *Ahşap oturtma Çatı taşıyıcı mertekleri-0.005 m		1.324 W/m ² K
Zemin	*Karo mozaik zemin kaplaması-0.03 m *Düzeltilme betonu-0.05 m *Betonarme döşeme-0.12 m *Sıkıştırılmış toprak-0.2 m *Blokaj-0.5 m		0.553 W/m ² K
Pencere	*Çift cam 6mm+13mm(hava)+6mm	Analiz programında görsel veri bulunmamaktadır.	2.665 W/m ² K

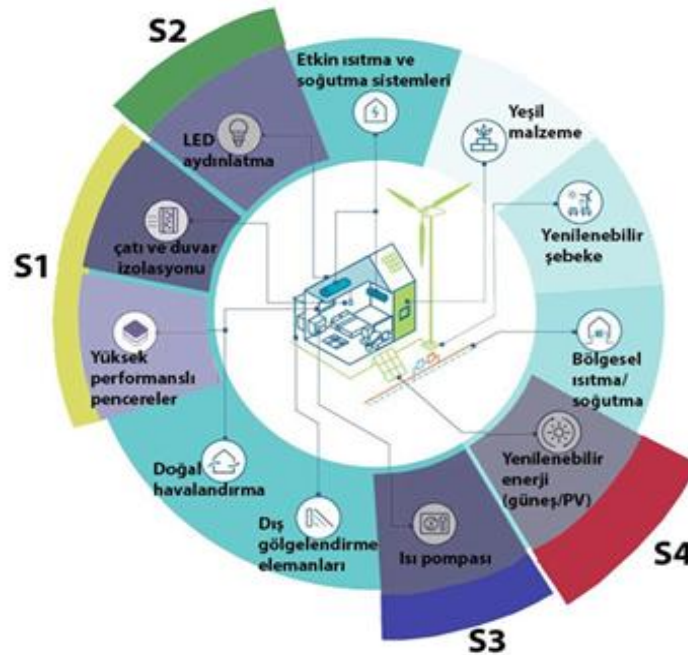
Bina modelinin oluşturulmasının ardından binanın yapı elemanları ve malzemelerine yönelik detaylar eklenmiştir. Bu bilgiler mevcut projenin yerinde incelemesi ile doğrulanmıştır. Buna göre yapı kabuğuna ait termofiziksel özelliklerin hesaplamaları yapılmıştır. Yapı katmanları ve malzeme kullanımına ait bilgiler Çizelge 3’de açıklanmıştır.

Yapı mevcut özellikleri ile modellendiğinde simülasyon sonuçlarına göre yıllık ısıtmadan kaynaklı 61 747 kWh, aydınlatmadan kaynaklı 89 219 kWh enerji harcanmaktadır. Yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerinin düşük olması, ısıtma sisteminin merkezi olması, aydınlatma sisteminin ve armatürlerinin verimli olmaması ve yapı planlanırken iklim elemanlarının dikkate alınmamış olması gibi durumlar yapının enerji etkinliğini düşüren nedenler arasında sayılabilir. İyileştirmede bu durumlar göz önüne alınarak planlamalar yapılmıştır.

Yapının karbon emisyon analizi sonucuna göre gömülü karbon miktarı 1 851 894 kg CO_{2e}, operasyonel karbon miktarı 4 969 136 kg CO_{2e}’dir. Operasyonel karbon miktarına etki eden bileşenler elektrik ve doğal gaz kullanımınıdır. Mevcut durumda elektrik için floresan armatürlerin tükettiği kWh enerji değerleri OneClick LCA’ya aktarılmış ve binanın kullanımında açığa çıkan operasyonel karbon miktarına ulaşılmıştır.

3.2 Enerji etkin iyileştirme analizi

Yapının mevcut enerji performans analizi ve karbon salım analizi yapıldıktan sonra enerji etkin iyileştirmeye yönelik müdahaleler tartışılmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) mevcut bir yapının enerji etkin iyileştirilmesi için etkin ısıtma ve soğutma sistemleri entegrasyonu, yeşil malzeme kullanımı, karbondan arındırılmış şebeke, bölgesel ısıtma soğutma, yenilenebilir enerji, ısı pompası, dış gölgelendirme elemanları, doğal havalandırma, yüksek performanslı pencereler, LED aydınlatma, çatı ve duvar izolasyonu ve duvar yalıtımı uygulamalarının yapılmasını önermektedir (Şekil 7). Son 10 yılda yapı kabuğunda duvar sisteminin yalıtılması (%47), cam sistemi ve türü değişimi (%37), gölgeleme elemanı kullanımı (%16) gibi iyileştirme senaryoları ile çalışmalar yapılmış olup bu iyileştirmelerin enerji tüketiminde %55’lik azaltma sağladığı belirtilmektedir (Dabous ve Hosny, 2025). Bu çalışmada enerji etkin iyileştirmeye yönelik yapısal değişiklikler ve teknolojik sistemlerin entegrasyonuna yönelik farklı senaryolar geliştirilmiştir. Bu senaryolar; yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi (S1), aydınlatma sisteminin ve armatürlerin iyileştirilmesi (S2), yapının ısıtma sisteminin değiştirilmesi (S3), yapıya fotovoltaik (PV) panellerin eklenmesi (S4) olarak belirlenmiştir. Her bir senaryo için enerji tüketim ve karbon emisyon hesabı yapılmıştır (Şekil 7).

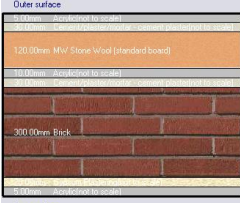

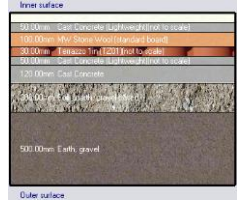


Şekil 7. Sıfır karbon binalarının farklı iyileştirme aşamaları (IEA, 2022) (Görseldeki aşamaların renklendirilmesi yazarlar tarafından hazırlanmıştır).

3.2.1. Termofiziksel özelliklerin iyileştirilmesi

Çalışmada ilk olarak Senaryo 1 (S1)'e göre yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu iyileştirme kapsamında TS825'te 5. bölge için verilen ısıl geçirgenlik kat sayısı değerlerine ulaşılmıştır. İyileştirilmiş yapı kabuğu önerileri Çizelge 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. İyileştirilmiş yapı elemanları, katmanları ve ısıl geçirgenlik kat sayısı, TS825'te istenen ısıl geçirgenlik kat sayısı (Görsel veriler DesignBuilder'den alınmıştır).

Yapı Sistemleri Adları	Yapı Sistemi Katmanları	Yapı Sistemleri Katmanları Görseli	Isıl Geçirgenlik Kat Sayısı	TS 825'te İstenen Isıl Geçirgenlik Kat Sayısı
İyileştirilen Dış Duvar	*Akrilik dış cephe boyası-0.005 m *Çimento katkılı kaba sıva-0.03 m *Taş yünü-0.12 m *Akrilik dış cephe boyası-0.01 m *Çimento katkılı kaba sıva-0.03 m *Tuğla-0.3 m *Alçı sıva-0.02 m *Akrilik iç cephe boyası-0.005 m		0.251 W/m ² K	0.25 W/m ² K
İyileştirilen Soğuk Çatı Üst Örtüsü	*Metal Trapez Çatı kaplaması-0.02 m *OSB-0.03 m *Ahşap oturtma Çatı taşıyıcı mertekleri-0.005 m *Serilebilen çatı altı taşıyıcı rolls yalıtım-0.15 m		0.222 W/m ² K	0.2 W/m ² K
İyileştirilen Zemin-Döşeme	*Mineli Seramik-0.01 m *Seramik yapıştırıcısı-0.005 m *Düzeltilme betonu-0.05 m *Taşyünü pano yalıtım-0.10 m *Karo mozaik zemin kaplaması-0.03 m *Düzeltilme betonu-0.05 m *Betonarme döşeme-0.12 m *Sıkıştırılmış toprak-0.2 m *Blokaj-0.5 m		0.218 W/m ² K	0.25 W/m ² K
İyileştirilen Pencere	*Low E kaplamalı çift cam 6mm+13mm(hava)+6mm	Analiz programında görsel veri bulunmamaktadır.	1.761 W/m ² K	1.8 W/m ² K

Yapı kabuğunda yapılan iyileştirme sonrasında yıllık ısıtmadan kaynaklı enerji tüketimi miktarı toplam 12 396 kWh'dir. Sadece yapı kabuğunda alınan önlem ile %80 enerji verimliliği sağlanmıştır. Şekil 9'da gösterildiği gibi yapı kabuğunda alınan önlem ile operasyonel karbon miktarını %19 azaltarak karbon emisyonu kullanım aşaması için 74,75 kg CO₂e/m²/yıl'a, tüm aşamalarda ise %21 azaltarak 135,7 kg CO₂e/m²/yıl'a düşmüştür. Yapı kabuğunun termal performansındaki iyileştirilmesini inceleyen benzer çalışma sonucunda toplam karbon emisyonu %31 oranında azalmıştır (Blewden ve Petrović, 2023).

3.2.2. Teknolojik sistemlerin entegrasyonu ile iyileştirme

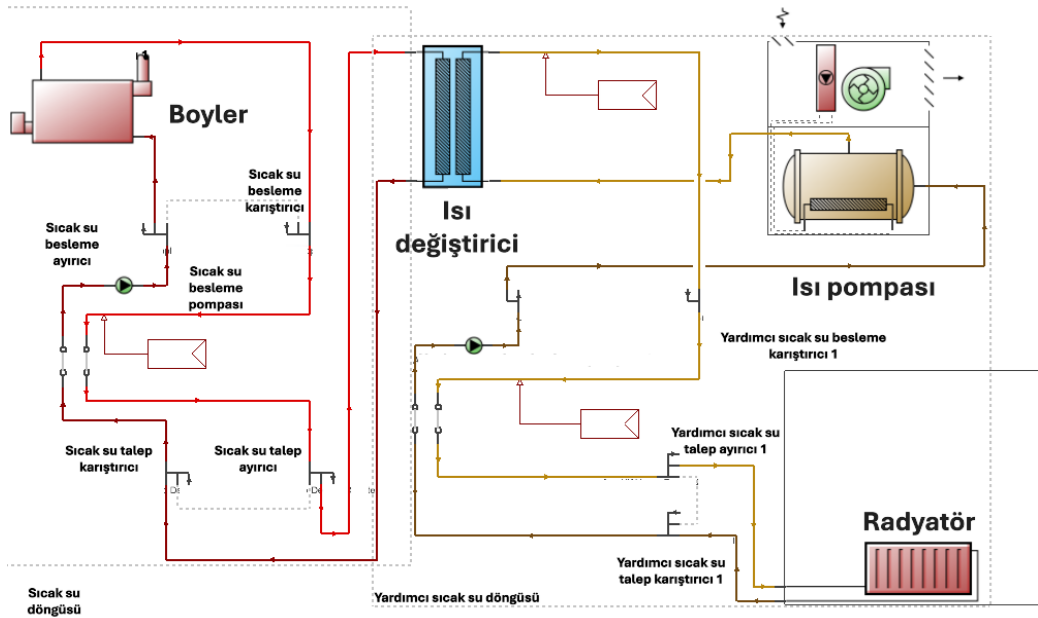
Teknolojik sistemlerin entegrasyonu ile iyileştirme çalışması üç aşamalı olarak yapılmıştır. İlk aşamada Senaryo 2 (S2)'ye göre aydınlatma sisteminin ve armatürlerin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu iyileştirme kapsamında düşük verimlilikte olan aydınlatma sisteminin ve armatürlerinin verimliliği artırılmıştır. Yapının mevcut durumunda aydınlatma sistemi 2x36 Wattlık floresan armatürlerin manuel kontrolü ile çalışmaktadır. Mevcut aydınlatma armatürleri yerine verimli LED ışık kaynakları kullanılmıştır. Işık kaynaklarının simülasyon aracında güncellenmesi ile aydınlatmadan kaynaklı elektrik tüketimi 43 780 kWh'e düşerek %50 enerji verimliliği sağlanmıştır. Şekil 7'de gösterildiği gibi

aydınlatma sisteminde alınan önlem ile operasyonel karbon miktarında %44 iyileşme olup karbon emisyonu kullanım aşaması için 41,75 kg CO₂e/m²/yıl'a, tüm aşamalarda ise %24 iyileşmeyle 102,8 kg CO₂e/m²/yıl'a düşürmüştür. Bina kabuğunun termal performansının artırılması, aydınlatma sisteminin iyileştirilmesi gibi farklı senaryoların karbon emisyonu üzerindeki değişimini inceleyen benzer bir çalışmada aydınlatma ekipmanlarının iyileştirilmesi toplam karbon emisyonunu %45 azaltmıştır (Vavanou vd., 2022).

İkinci aşamada Senaryo 3 (S3)'e göre yapının ısıtma sisteminin değiştirilmesi hedeflenmiştir. Bu iyileştirme kapsamında S3 için ilk yatırım maliyetleri yüksek olmasına rağmen uzun dönemli ısıtma periyodunda enerji tüketimi açısından fayda sağlayan bir sistem önerilmiştir. Isıtma sistemi önerisi, S1 sonucunda elde edilen ısıtma tüketimine göre toplam 12 396 kWh değerinin düşürülmesi için yapılmıştır.

İncelenen yapıda mevcut durumda ısıtma, zemin katta yer alan kazan dairesindeki doğalgaz yakıtlı bir boyler ile sağlanmaktadır. Elde edilen sıcak su, bina içindeki ısıtma suyu sistemine yönlendirilerek radyatörlere dağıtılmaktadır. Bu sistem sayesinde oda ve laboratuvarların iklimlendirilmesi sağlanmakta, iç mekân sıcaklığı istenen konfor seviyesinde tutulmaktadır. Mevcut ısıtma sistemi, S2 senaryosu sonucuna göre yıllık 19 317 kWh enerji tüketmektedir.

Van'ın iklim koşulları göz önünde bulundurularak geleneksel doğalgaz yakıtlı boyler sistemine kıyasla daha yüksek verimlilik sağlayabilecek alternatif çözümler değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, ısıtma yükünün ve doğalgaz tüketimini azaltılması için hibrit bir sistem önerilmiştir. Önerilen hibrit sistem, ısı pompası ve mevcut boyler ile birlikte tasarlanarak fakülte binasına entegre edilmiştir (Şekil 8). Sistem bileşenleri; boyler, ısı değiştirici, ısı pompası, radyatör, sıcak su talep ayırıcı-karıştırıcı, pompa ve vana gibi yardımcı ekipmanlardan oluşmaktadır. Sistem boylerin suyu ısıtarak sıcak su besleme karıştırıcısı üzerinden ısı değiştiriciye veya radyatörlere göndermesi ile başlar. Sıcak su besleme pompası, suyun sistem içinde dolaşmasını; ısı değiştirici ise, boylerden gelen sıcak suyun başka bir devredeki suya ısı transferi yapmasını sağlar. Isı pompası, çevreden aldığı enerjiyle suyu ısıtır ve yardımcı sıcak su besleme karıştırıcı 1 üzerinden radyatörlere yönlendirir. Radyatörler, boyler ve ısı pompasından gelen sıcak suyu kullanarak binanın iç mekanlarını ısıtır. Soğuyan su, sıcak su dönüş hattı üzerinden boylere veya ısı değiştiriciye geri döner.



Şekil 8. Önerilen hibrit ısıtma sistemi şematik gösterimi.

Fakülte binasına entegre edilen bu sistem sayesinde ısıtma için gerekli yıllık enerji tüketimi toplam (boyler + ısı pompası) 6 009 kWh'a düşmüştür. Bu durumda ısı pompası 5 260 kWh elektrik enerjisine ihtiyaç duyarken, boyler sadece 749 kWh'a ihtiyaç duymuştur. Önerilen hibrit sistem

kullanıldığında, sadece doğalgaz ile ısıtma durumuna göre yaklaşık %70 oranında enerji verimliliği sağlanmıştır. Hava kaynaklı ısı pompalarının ısıtma ihtiyacının yaklaşık %80'ini karşılayabileceği ve yüksek ısıtma talebi dönemlerinde “ek” ısıtma için gaz kazanları kullanılabilirliği belirtilmektedir (Zhuang ve ark. 2023). S3 sonucunda kullanım aşamasındaki CO₂ emisyon miktarı yıllık 40,02 kg CO₂e/m²/yıl'a düşerek %4'lük bir azalma sağlanmıştır. Tüm aşamalarda CO₂ emisyon miktarı ise %1,6 iyileşmeyle 101,17 kg CO₂e/m²/yıl'a düşmüştür. S3 e göre yaşam döngüsü aşamalarına ilişkin Şekil 9'da verilmiştir.

Üçüncü aşamada, Senaryo 4 (S4)'e göre yapıya PV panellerin eklenmesi hedeflenmiştir. Bu iyileştirme kapsamında S4 için yenilenebilir enerji kaynaklarının yapıda kullanılarak enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının düşürülmesi önerilmiştir. Alternatif enerji kaynakları yapı özelinde değerlendirildiğinde PV panellerin kullanılması uygun görülmüş ve analizler buna yönelik yapılmıştır. Soğuk iklimlerde, enerji performansını korumak ve uzun dönem toprak termal dengesini sağlamak için toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynakları (özellikle güneş enerjisi) ile hibritlenmesi önerilmektedir (Adebayo ve ark., 2024).

Fakülte binasında ısıtma amacıyla kullanılan ısı pompasının yıllık enerji gereksinimi hesaplanmış ve bu ihtiyacın fotovoltaiik (PV) panellerle karşılanabilmesi için gerekli toplam panel yüzey alanına ilişkin yaklaşık hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Hesaplama, binanın mevcut durumu (yalıtımsız) ve S1 için ayrı ayrı yapılmıştır. Mevcut enerji tüketimi 61 747 kWh, S1 sonrası enerji tüketimi ise 12 396 kWh olarak belirlenmiştir.

TS825 Standardına uygun durum (yalıtlı) (Denklem 3), günlük elektrik enerjisi ihtiyacı (Denklem 4), fotovoltaiik panelin günlük enerji üretimi (Denklem 5) ve gerekli fotovoltaiik panel alanı (Denklem 6) hesaplama sonuçları aşağıda verilmiştir.

$$Q_{gün} = \frac{\text{Sezonluk ısıtma enerjisi ihtiyacı}}{\text{Isıtma sezonu gün sayısı}} = \frac{12.396 \text{ kWh}}{150 \text{ gün}} = 82.64 \text{ kWh/gün} \quad (3)$$

$$E_{gün} = \frac{Q_{gün}}{COP} = \frac{82.64 \text{ kWh/gün}}{3.0} = 27.55 \text{ kWh/gün} \quad (4)$$

$$P_{gün} = 180 \frac{W}{m^2} * 8h = 1.44 \text{ kWh/m}^2 \quad (5)$$

$$A = \frac{27.55 \text{ kWh/gün}}{1.44 \text{ kWh/m}^2} = 19.13 \text{ m}^2 \quad (6)$$

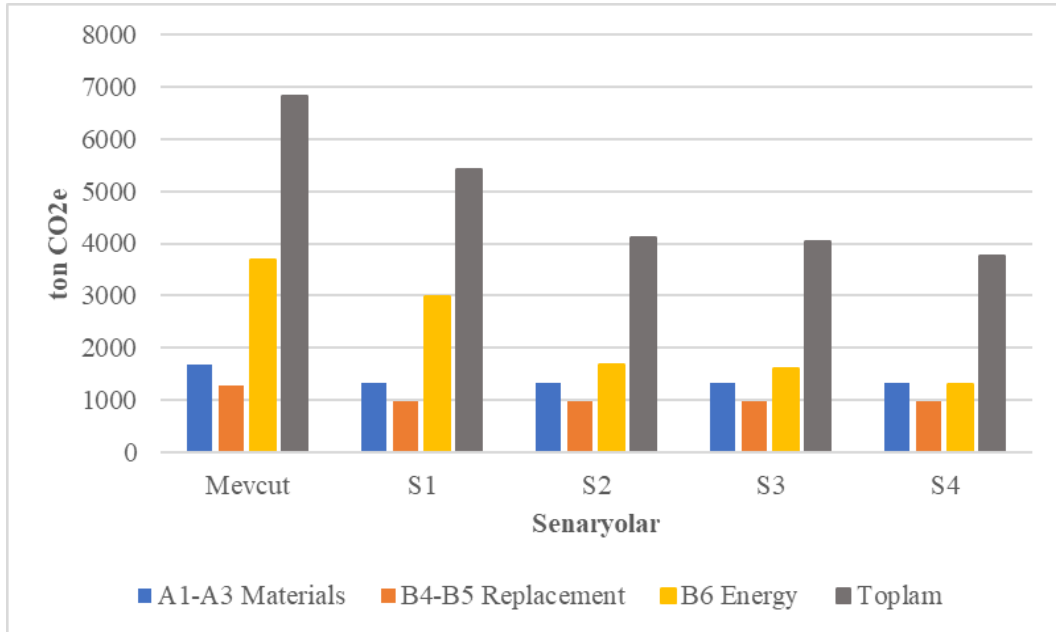
Hesaplama sonucunda fakülte binasının yalıtlı durumda günlük elektrik ihtiyacı yaklaşık 15 adet fotovoltaiik panelle karşılanabilmektedir. Mevcut durum verilerine göre gerekli toplam panel alanı 95,3 m² ve panel sayısı 75 adet olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda ulaşılan 75 adet panel uygulanabilir olmadığından yalıtlı durumdaki fotovoltaiik panel kullanımı dikkate alınmıştır. Bu ön kabul ve hesaplamalar sonucunda, değerlendirmeye alınan ve yalıtlı durumdaki fakülte binasına 20 adet fotovoltaiik panel entegre edilmiştir. Yapılan yıllık analizler sonucunda fotovoltaiik panellerden yaklaşık 9 400 kWh enerji üretildiği görülmüştür. Ön hesaplamalar ile simülasyon sonucu arasında oluşan fark, güneşlenme süresinin az olmasından, güneş ışınlarının gün içerisinde geliş açısına bağlı olarak enerji üretiminin değişmesinden; bulutlanma sebebi ile enerji üretiminin kesilmesinden kaynaklanabilir. Üretilen 9 400 kWh aydınlatmadan kaynaklı enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılacaktır. Şekil 9'da görüldüğü gibi alternatif enerji kaynaklarının eklenmesiyle birlikte bir önceki iyileştirmeye göre operasyonel karbon miktarı %19 azalarak karbon emisyonu kullanım aşaması için 32,5 kg CO₂e/m²/yıl'a, tüm aşamalarda ise %6,9 azalarak 94,15 kg CO₂e/m²/yıl'a düşmüştür.

Van YYU Veterinerlik Fakültesi 30 senelik bir yapıdır, bununla birlikte kullanım ömrü devam ettiği sürece enerji tüketimi ve karbon salımının azaltılması hedefi, bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmuştur. Bu motivasyonla, yapı için planlanan ve analiz edilen enerji etkin iyileştirme çalışmaları sonucunda hem enerji tüketiminin hem de karbon salımının azaltılması yönünde kayda değer sonuçlar

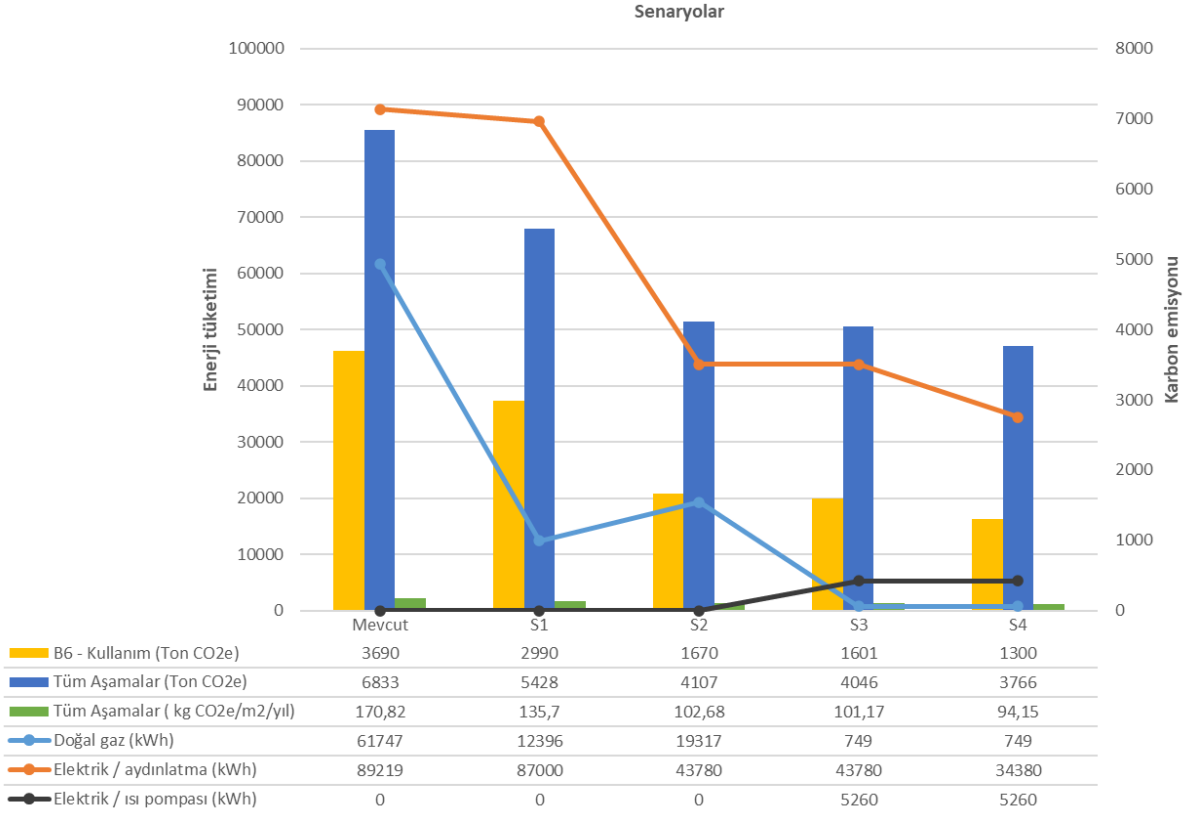
elde edilmiştir. Şekil 10'da her bir senaryo sonucunda ortaya çıkan enerji tüketimi, operasyonel ve gömülü karbon miktarı görselleştirilmiştir. Mevcut durum ve iyileştirme analizleri karşılaştırıldığında ısıtma için harcanan enerji miktarında yapının ısıtma sisteminin değiştirilmesi (S3) ile %98 oranında verimlilik sağlanmıştır. Bununla birlikte ısı pompasından kaynaklanan elektrik enerjisi tüketimi de oluşmaktadır. Isı pompasından kaynaklı elektrik tüketimi de dahil edildiğinde harcanan enerji miktarındaki verimlilik %90 oranına düşmektedir. HVAC sisteminin değiştirilmesiyle %37 oranında enerji tüketimi azaltma potansiyeli elde edilebilir (Khoukhi ve ark., 2020). Yapının ısıtma sisteminin değiştirilmesinden (S3) sonra en etkili müdahale yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi (S1) olmuştur. S1 ile ısıtma için harcanan enerji miktarında %80 verimlilik sağlanmıştır.

Ali & Hashlamun (2019)'a göre yalıtımsız kamu okul binalarında kabuktaki iyileştirmeler ile %54 lük enerji verimliliği sağlanmıştır. Ayrıca Çin'de, ılıman iklim bölgesinde yer alan bir kamu yapısında, yapı kabuğunun U değerinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmada, optimize edilmiş parametrelerin, mevcut örnek binaya kıyasla ısıtma ve soğutma yüklerini %28,26 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir (Liu ve ark., 2022). Tarihi bir okul binasında mikroklima ve sera gazı emisyonları için yıllık birincil enerji talebi yaklaşık %38 oranında azaltılmış ve soğuk döneme ilişkin olarak, aylık enerji tasarrufu %44–47 aralığında değişmiştir (Ascione ve ark., 2015).

Aydınlatma sisteminin ve armatürlerin iyileştirilmesi (S2) sonucunda aydınlatmadan kaynaklı enerji tüketimi %51 oranında azaltılarak enerji verimliliği artırılmıştır. Uygun koşullarda (gün ışığı kontrolü) aydınlatma kontrollerinin entegre edilmesiyle %65 aydınlatma enerjisi tasarrufu sağlanabilir (D'Agostino ve ark., 2021). Floresan armatürlerin LED armatürlerle değişimiyle sağlanan verimlilik aydınlatma kontrol sistemlerinin değişimiyle daha da artacağı düşünülmektedir. Islak hacimler ve sirkülasyon alanları için hareket sensörlü; derslikler, laboratuvarlar, ofisler için ise gün ışığı sensörlü kontrol sistemleri önerilmektedir. Aydınlatma enerjisi tüketimini azaltan bir diğer iyileştirme yaklaşımı ise yapıya fotovoltaik (PV) panellerin eklenmesi (S4) olmuştur. S4 ile elektrikten kaynaklanan enerji tüketiminde %61,5 oranında verimlilik sağlanmıştır. Tiran Politeknik Üniversitesi'ne ait tarihi bir binada PV panel eklenmesi ile %49,10, sürdürülebilir müdahaleler ile ortalama %20,18 oranında enerji verimliliği sağlanmıştır (Bilgin & Hyraj, 2025). Çin'in soğuk iklim bölgesinde yer alan bir toplu konut için enerji ve karbon etkin iyileştirme yaklaşımı kapsamında yapıya fotovoltaik (PV) panellerin entegre edilmesi sonucunda, %19,8 enerji tasarrufu ve %38,8 emisyon azaltımı sağlandığı belirlenmiştir (Liu ve ark., 2023).



Şekil 9. Senaryolara göre yaşam döngüsü aşamalarının karbon emisyonları.



Şekil 10. Senaryolara göre enerji tüketimi ve karbon emisyonu şeması.

Mevcut durum ve iyileştirme senaryolarında operasyonel ve tüm aşamaların karbon döngüleri kıyaslandığında karbon salımı S2 ile operasyonelde %44, tüm aşamalarda %24 oranında azalmıştır. S2 ile en iyi oranda karbon salımı azaltılması elde edilmiştir. Üretim, imalat, nakliye, atık yönetimi, geri dönüşüm gibi faktörler tüm aşamalardaki karbon salım oranını etkilediğinden operasyonel karbon salım oranına göre daha düşüktür. Yapıya fotovoltaik (PV) panellerin eklenmesi (S4) ile operasyoneldeki karbon salım oranını %19 iken tüm aşamalarda %7'ye düşmektedir. Ayrıca operasyonel ve tüm aşamaların karbon döngüleri kıyaslandığında karbon salımı S3 ile operasyonelde %3,6, tüm aşamalarda %1,5 oranında azalmıştır. Karbon salımının azaltılması için en az etki eden müdahalenin S3 olduğu görülmüştür.

Mevcut durum ve iyileştirme analizleri karbon emisyonları açısından karşılaştırıldığında operasyonelde %65, tüm aşamalarda %45 oranında karbon salımı azaldığı görülmektedir. Yapı kabuğu iyileştirilmesi olmadan sadece gaz yakıtlı merkezi kazana ek olarak hava kaynaklı ısı pompası eklenerek oluşan hibrit sistemde en iyi durum senaryolarında CO₂ emisyonlarını %88'e kadar azaltılabilmektedir (Zhuang ve ark. 2023). Enerji etkin ve düşük karbon salım hedefi doğrultusunda gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda önemli düzeyde iyileştirme sağlanmıştır.

4. Sonuç

Çalışma, üniversite binalarının neredeyse sıfır enerji ve karbon hedefine yönelik iyileştirilmesi için adım adım derin tadilat yöntemi uygulanması açısından bir örnek niteliği taşımaktadır. Bu çalışma ile ülkemizde ısıtma dönemi uzun olan soğuk iklim bölgelerinde bulunan fakülte binaları için veriler, analizler, değerlendirme ve sonuçları ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında, enerji verimliliğini artırmak amacıyla hem yapısal iyileştirmeleri hem de teknolojik sistem entegrasyonlarını içeren dört senaryo kurgulanmıştır. Bu senaryolar; yapı kabuğunun ısı iletim performansının artırılması, aydınlatma altyapısının enerji verimli sistemlerle yenilenmesi, mevcut ısıtma sisteminin dönüşümü ve PV sistemlerin entegrasyonu şeklinde sıralanmaktadır. Her bir senaryo için, enerji tüketimi ile birlikte operasyonel ve gömülü karbon emisyonları hesaplanarak değerlendirme yapılmıştır.

Çalışmada, enerji tüketim verileri DesignBuilder aracından, karbon salım hesapları ise One Click LCA aracından alınan analiz sonuçları sunulmuştur. Analiz sonuçlarının doğrulamasını yapmak için yapının mevcut tüketim verilerine erişerek karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Fakat yıllık toplam yakıt ve enerji tüketim faturaları yerleşkedeki tüm binalar için ortak faturalandırıldığından dolayı m²'ye bağlı tüketim verisi tespit edilememiştir. Doğrulamasının yapılamaması çalışmanın kısıtı olmuştur. Gelecek çalışmalarda, üniversite yerleşkesi genelinde farklı binalara ait enerji tüketim verilerine erişimi mümkün kılacak yönetsel süreçlerin tanımlanması ile ortak kullanım alanlarına ilişkin tüketimlerin bina ölçeğinde ayrıştırılmasına yönelik metodolojik ve teknik yaklaşımların geliştirilebilir. Çalışmada farklı zonlar için farklı aydınlatma kontrol sistemleri önerilmiştir. Kontrol sistemlerinin eklenmesi ile yapının enerji verimliliğinin nasıl değişeceğine dair bir hesaplama geliştirilmemiş olması da çalışmanın bir diğer kısıtındandır. Yapı kabuğunun iyileştirilmesi kapsamında gölgeleme elemanları eklenmemiştir. Ancak güneybatı cephesindeki pencereler için yapı kabuğuna güneşin doğrudan ışınlarını, parlamalarını kesmesi için yatay gölgelendirme elemanları eklenmesi toplamda harcanan enerji miktarının azalmasını sağlayacaktır.

Öneriler ile kısa dönemde kullanıcıların enerji etkin iyileştirmeler konusunda farkındalığının oluşturulması amaçlanırken, uzun dönemde eğitim yapılarında enerji verimliliğinin artırılması ve karbon salımının azaltılması amaçlanmaktadır. Yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde senaryoların bir veya birkaçının uygulanması durumunda enerji tüketiminin ve karbon emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Isıtma sisteminin değiştirilmesini içeren S3 senaryosunda %90 enerji tüketimi verimliliği sağlanmıştır. Yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerinin iyileştirildiği S1 senaryosu ile ısıtma amaçlı enerji tüketiminde %80 oranında azalma sağlanmıştır. Karbon salımı açısından yapılan karşılaştırmada, S2 senaryosu operasyonel aşamada %44, tüm yaşam döngüsü aşamalarında ise %24 oranında azalma sağlamıştır. Bu sonuçlara göre, karbon salımının azaltılması açısından en yüksek performans S2 senaryosunda elde edilmiştir. İklim değişikliğinin etkisi altında hem maliyet-optimal hem de neredeyse sıfır enerji senaryoları için gelecekte birincil enerji tüketiminin, toplam maliyetlerin ve CO₂ emisyonlarının neredeyse iki katına çıkma potansiyeli olduğu; tasarrufların %53–63 aralığından %13–30 aralığına düşeceği belirtilmektedir (Ashrafian, 2023). Bu da günümüzde iklime dayalı yapılara yönelik çalışmaların gelecekte farklı iklim koşulları için yeniden ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, iyileştirme senaryolarına ilişkin yapı malzemeleri, aydınlatma armatürleri, ısıtma sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları çeşitlendirilerek alternatif seçenekler geliştirilebilir. PV panellerin üretim, yerleşim ve geri dönüşüm süreçleri dikkate alınarak, bu sistemlerin enerji ve karbon tasarrufu açısından maliyet-etkin olup olmadığı ayrıca değerlendirilebilir. Müdahalelere yönelik inşaat ve enerji tüketim maliyetleri raporlanarak senaryoların uygulanabilirliği irdelenebilir; bu doğrultuda amortisman süreleri belirlenebilir. Son olarak, yalnızca yapı ölçeğinde değil, küresel ölçekte de kar-zarar analizleri yapılması, sürdürülebilirlik stratejilerinin bütüncül değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Yapıların yaşam döngüsü sürecinde senaryo uygulamalarının sürdürülebilirliğini değerlendirmek amacıyla döngüsel ekonomi yaklaşımıyla maliyet-fayda analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca binanın bütüncül olarak değerlendirilmesi için binalarda su verimliliği ve yağmur suyu hasadı gibi su ile ilgili hesaplamalar ve analizler yapılması da önerilmektedir.

Bu araştırma, yeşil kampüs anlayışının benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Gelecek çalışmalarda, yeşil kampüs anlayışının yalnızca genel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda değil, aynı zamanda yapının bulunduğu bölgenin özgün iklim koşulları, mevcut kullanıcı profili ve çevresel-mekânsal bağlam dikkate alınarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu yerel veriler ışığında geliştirilecek tasarım ve iyileştirme stratejileri hem uygulanabilirliğin artırılmasına hem de sürdürülebilirlik performansının daha gerçekçi biçimde belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Teşekkür / Destekleyen Kuruluş

Bu çalışma, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği tarafından düzenlenen IBPSA Türkiye Öğrenci Fikir Projesi Yarışması kapsamında değerlendirilmiş ve birincilik ödülüne layık görülmüştür. Desteklerinden dolayı ilgili kuruma teşekkür ederiz.

Yazarların Katkı Oranı Beyanı

Nilay Özeler Kanan: Sorumlu yazar; makalenin yazımı, vaka alanında yerinde gözlem ve veri toplama süreçlerinin yürütülmesi, Designbuilder yazılım temini, veri analizi (enerji etkinliği değerlendirmeleri), DesignBuilder mekanik model çıktılarının yorumlanması, biçimsel analiz, gözden geçirme ve metnin düzenlenmesi

Sümeyye Sena Bastem: Sorumlu yazara destek; makalenin yazımı, literatür tablosunun hazırlanması, çalışmanın akış şemasının oluşturulması, veri analizi (enerji etkinliği değerlendirmeleri), biçimsel analiz, gözden geçirme ve metnin düzenlenmesi

Merve Kılınc Gilsiraloğlu: Yarışma ekip liderliği; taslak metnin hazırlanması, DesignBuilder modelinin oluşturulması, One Click LCA analizlerinin yürütülmesi ve yorumlanması, araştırma süreçlerine katkı sağlanması ve görsellerin hazırlanması

Merve Nur Taşçı: Yazılım katkısı; DesignBuilder modelinin oluşturulması, dergi formatına uygunluk açısından ilk kontrolün gerçekleştirilmesi ve görsellerin düzenlenmesi

Huriye Önal: One Click LCA yazılım temini, One Click LCA analizlerinin yürütülmesi ve yorumlanması ile görsellerin hazırlanması

Ekrem Tunçbilek: Yazılım katkısı; DesignBuilder mekanik model çıktılarının yorumlanması

Tüm yazarlar: Literatür araştırması, kuramsal çerçevenin geliştirilmesi, bulguların değerlendirilmesi, sonuçların yorumlanması, çalışmanın gözden geçirilmesi ve nihai metnin onaylanması süreçlerine katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uygun hareket edilmiştir.

Etik Kurul Beyanı

Bu çalışma kullanılan materyal ve yöntemle için etik kurul izni gerekmemektedir.

Yapay Zeka Kullanımı

Bu çalışma Chatgpt 4.0 aracı ile metin dilinin geliştirilmesi, ifade akıcılığının artırılması ve bazı cümlelerin akademik yazım kurallarına uygun şekilde düzenlenmesi amacıyla sınırlı ölçüde dil düzenleme desteği ile kaynakça düzenlemesi ve APA7 format kontrolü için destek alınmıştır. İçerik üretimi, veri analizi, sonuç oluşturma veya bilimsel katkı niteliğinde yer alan görsellerin, grafiklerin, tabloların ve bunlara karşılık gelen başlıkların oluşturulmasında herhangi bir üretken yapay zekâ aracı kullanılmamıştır.

Kaynakça

- Abusamhadana, M. S., & Türkmenoğlu, N. (2018). Tarihi okul yapılarında ısı konfor gereksinimleri bağlamında enerji iyileştirme stratejileri: Ulugazi İlköğretim Okulu. *Mimarlık ve Yaşam*, 3(2), 189–206.
- Adebayo, P., Jathunge, C. B., Darbandi, A., Fry, N., Shor, R., Mohamad, A., Wemhöner, C., & Mwesigye, A. (2024). Development, modeling, and optimization of ground source heat pump systems for cold climates: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 320, 114646. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114646>
- Ali, H., & Hashlamun, R. (2019). Envelope retrofitting strategies for public school buildings in Jordan. *Journal of Building Engineering*, 25, 100819. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100819>

- Alim, H. (2025). *Konut binalarının net sıfır enerji yaklaşımı ile mimari tasarım ve uygulama potansiyelinin değerlendirilmesi: Soğuk iklim bölgesi* [Doktora tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2025). *ASHRAE handbook of fundamentals*. ASHRAE Publishing.
- Aruta, G., Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., & Mastellone, M. (2023). Assessment of the incentive rate to favor the energy retrofit of public buildings: A comprehensive approach for an Italian university facility. *Energies*, 16(11), 4483. <https://doi.org/10.3390/en16114483>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., De' Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2015). Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento: Feasibility study of energy savings and respect of the historical value. *Energy and Buildings*, 95, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.044>
- Ashrafian, T. (2023). Enhancing school buildings energy efficiency under climate change: A comprehensive analysis of energy, cost, and comfort factors. *Journal of Building Engineering*, 80, 107969. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107969>
- Balali, A., & Yunusa-Kaltungo, A. (2025). Selection of passive energy consumption optimisation strategies for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115222. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115222>
- Bentoumi, L., Bouacida, T., Bessaih, R., & Boutout, A. (2024). Impact of thermal insulation on energy consumption in buildings. *Journal of Thermal Engineering*, 10(4), 924–935. <https://doi.org/10.18186/thermal.1465954>
- Bilgin, H., & Hyraj, D. (2025). Sustainable interventions in historic buildings: Case of Polytechnic University of Tirana. *Energy and Buildings*, 343, 115921. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115921>
- Blewden, E., & Petrović, E. K. (2023). Whole-of-life carbon comparison of retrofit strategies for Aotearoa New Zealand's existing housing stock. In P. Rajagopalan & M. Andamon (Eds.), *ASA 2023 Proceedings-Sustainability and health: The nexus of carbon neutral architecture and well-being: Proceedings of the 56th International Conference of the Architectural Science Association (ANZAScA)* (pp.722–734). Wellington, New Zealand. <https://doi.org/10.25455/wgtn.26401969>
- Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (CSBB). (2018). *Üniversite Mekanları Envanter Yönetim Sistemi Projesi (MEKSİS)*. Retrieved March 13, 2025, from <https://meksis.sbb.gov.tr/Harita.aspx?Sehir=Turkiye>
- Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *On İkinci Kalkınma Planı: 2024–2028*. Retrieved March 13, 2025, from https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Planı_2024-2028_11122023.pdf
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2020a). *Kamu binalarının enerji verimli yenilenmesine yönelik rehber*. Retrieved March 13, 2025, from <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/kamu-binalarinin-enerji-verimli-yenilemesine-yonelik-rehber-i-99595>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2020b). *Neredeyse sıfır enerjili binalar (nSEB) için rehber*. Retrieved March 13, 2025, from https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/icerikler/nseb_rehber-20201117075919.pdf
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2021). *Bina sektörü enerji verimliliği teknoloji atlası*. Retrieved March 13, 2025, from https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/icerikler/atlas_ocak_small-20210126120540.pdf
- D'Agostino, D., Tzeiranaki, S. T., Zangheri, P., & Bertoldi, P. (2021). Assessing nearly zero energy buildings (NZEBS) development in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100680>
- Dabous, S. A., & Hosny, F. (2025). A review of building envelope retrofitting methods for improving energy efficiency, aesthetic, and indoor environmental quality. *Energy Nexus*, 18, 100407. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100407>

- DesignBuilder Software Ltd. (2025, May 5). *DesignBuilder Section 63 Manual (SBEM/DSM) (Manual v7.3.1)*. DesignBuilder Software Ltd. Retrieved March 14, 2025, from https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/Calculation_Options.htm
- Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency (EED, recast). (2023). *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>
- Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2023). Potential of thermal, electricity and hydrogen storage systems for achieving sustainable buildings. *Energy Conversion and Management*, 294, 117601. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117601>
- EnergyPlus. (2025). *Version 9.4*. Retrieved March 20, 2025, from <https://energyplus.net/>
- EnergyPlus Engineering Reference. (2025). *Conduction transfer function (CTF) calculations in EnergyPlus*. Retrieved March 14, 2025, from <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-016.html#conduction-transfer-function-ctf-calculations-in-energyplus>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2012). *Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası – Van ili*. Retrieved March 08, 2025, from <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/65.aspx>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2018). *Paydaş Etkileşim Planı, AB Katılım Öncesi Mali Yardım Aracı (IPA), 2018 Enerji Sektör Programı – Faz 3 Projesi*. Retrieved March 08, 2025, from https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular//Ek_2_Paydaş_Etkileşim_Planı_Türkçe_Versiyon_202304261600.pdf
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2024). *2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2024–2030)*. Retrieved March 08, 2025, from https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/TürkiyeninEnerjiVerimliliği2030StratejisiVeIIUlusalEnerjiVerimliliğiEylemPlanı_202401161407.pdf
- European Committee for Standardization. (2011). *Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method*. (EN Standard No. 15978:2011)
- European Commission. (2018). *Energy performance of buildings directive*. Retrieved March 11, 2025, from <https://epb.center/>
- Fahlstedt, O., Temeljotov-Salaj, A., Rasmussen, F. N., & Bohne, R. A. (2025). Integrating energy, cost, and carbon assessments into building portfolio management: A case study. *Energy and Buildings*, 336, 115538. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115538>
- Fang, H., Li, W. K., & Dai, P. (2025). Parametric analysis of passive ultra-low energy building envelope performance in existing residential buildings. *Scientific Reports*, 15(1), 23407. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07421-8>
- Fenner, A. E., Kibert, C. J., Li, J., Razkenari, M. A., Hakim, H., Lu, X., & Sam, M. (2020). Embodied, operation, and commuting emissions: A case study comparing the carbon hotspots of an educational building. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122081. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122081>
- Hainoun, A., Stortecky, S., Horak, D., & Serageldin, A. A. (2025). Monitoring and evaluation of integrated energy solutions in a zero-energy building (ZEB) in Vienna. *Energy and Buildings*, 343, 115906. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115906>
- He, X., Huang, J., Liu, Z., Lin, J., Jing, R., & Zhao, Y. (2023). Topology optimization of thermally activated building system in high-rise building. *Energy*, 284, 128637. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128637>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Roadmap for energy-efficient buildings and construction in the Association of Southeast Asian Nations*. Retrieved April 16, 2026, from <https://www.iea.org/reports/roadmap-for-energy-efficient-buildings-and-construction-in-the-association-of-southeast-asian-nations>
- International Energy Agency (IEA). (2023a). *Heat pumps*. Retrieved March 08, 2025, from <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps>
- International Energy Agency (IEA). (2023b). *Renewables 2023: Executive summary*. Retrieved March 08, 2025, from <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>

- International Energy Agency (IEA). (2024a). *World energy outlook 2024*. Retrieved March 08, 2025, from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>
- International Energy Agency (IEA). (2024b). *Energy efficiency 2024*. Retrieved March 08, 2025, from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/f304f2ba-e9a2-4e6d-b529-fb67cd13f646/EnergyEfficiency2024.pdf>
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). *Çevre yönetimi—Yaşam döngüsü değerlendirilmesi—İlkeler ve çerçeveler*. (ISO Standard No. 14040 (A1+A2):2006).
- Jiao, Y., Wei, H., Wang, W., & Zhang, M. (2024). Comparative study of development scenarios to decipher carbon emissions of new/old campuses in China with urban building energy model: A case study of Southeast University. *Building Simulation*, 17(11), 2063–2082. <https://doi.org/10.1007/s12273-024-1125-8>
- Jokinen, I., Lund, A., Hirvonen, J., Jokisalo, J., Kosonen, R., & Lehtonen, M. (2022). Coupling of the electricity and district heat generation sectors with building stock energy retrofits as a measure to reduce carbon emissions. *Energy Conversion and Management*, 269, 115961. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115961>
- Khokhi, M., Darsaleh, A. F., & Ali, S. (2020). Retrofitting an existing office building in the UAE towards achieving low-energy building. *Sustainability*, 12(6), 2573. <https://doi.org/10.3390/su12062573>
- Krawczyk, D. A., Werner-Juszczuk, A., Sadowska, B., Rynkowski, P., Siuta-Olcha, A., Babiarz, B., & Gawryluk, D. (2025). New method of retrofitting of kindergartens resulting in increase of energy self-sufficiency. *Energy and Buildings*, 336, 115595. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115595>
- Li, Y., & Feng, H. (2025). Pathways to urban net zero energy buildings in Canada: A comprehensive GIS-based framework using open data. *Sustainable Cities and Society*, 122, 106263. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106263>
- Liu, C., Ma, W., Hao, J., Luo, D., Zuo, J., & Zhang, C. (2022). Energy retrofitting assessment of public building envelopes in China's hot summer and cold winter climate region. *Buildings*, 12(11), 1866. <https://doi.org/10.3390/buildings12111866>
- Liu, Y., Chen, D., Wang, J., & Dai, M. (2023). Energy-saving and ecological renovation of existing urban buildings in severe cold areas: A case study. *Sustainability*, 15(17), 12985. <https://doi.org/10.3390/su15172985>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2007). *Rüzgar enerjisi potansiyeli atlası – Van ili*. Retrieved March 10, 2025, from <https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx>
- Milli Eğitim Bakanlığı (MEB). (2023). *2023–2024 Eğitim öğretim istatistikleri*. Retrieved March 10, 2025, from <https://www.meb.gov.tr/2023-2024-egitim-ogretim-istatistikleri-aciklandi/haber/34977/tr>
- Montero, I., Miranda, M. T., Barrena, F., Sepúlveda, F. J., & Arranz, J. I. (2022). Analysis of photovoltaic self-consumption systems for hospitals in southwestern Europe. *Energy and Buildings*, 269, 112254. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112254>
- Munda Solar. (2020). *Türkiye güneşlenme süreleri iller aylık yıllık ortalama*. Retrieved March 08, 2025, from <https://mundasolar.com/2020/12/23/turkiye-guneslenme-sureleri-iller-aylik-yillik-ortalama/>
- Pallotta, G., Marrasso, E., Martone, C., Luciano, N., Squarzone, G., Roselli, C., & Sasso, M. (2025). Aquifer thermal energy storage for decarbonising heating and cooling energy supply in southern Europe: A dynamic environmental impact assessment. *Applied Energy*, 394, 126105. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126105>
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871–875. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008>
- Tozlu, S. (2025). Calibration of building energy simulation models for energy-efficient retrofitting: A residential case study in Samsun-Havza. *International Journal of Energy Studies*, 10(2), 595–617. <https://doi.org/10.58559/ijes.1623553>
- Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2024). *Binalarda ısı yalıtım kuralları standardı*. (TS Standard No. 825:2024).

- Umcu, M. E., Acar, U., & Kaşka, Ö. (2025). Life cycle assessment of photovoltaic systems of various sizes: An environmental and economic perspective on an educational building in a hot climate. *International Journal of Energy Studies*, 10(1), 997–1042.
- UN Environment Programme (UNEP) & Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). (2024). *Global status report for buildings and construction 2024/25*. Retrieved March 08, 2025, from <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>
- Vavanou, A., Schwartz, Y., & Mumovic, D. (2022). The life cycle impact of refurbishment packages on residential buildings with different initial thermal conditions. *Journal of Housing and the Built Environment*, 37(2), 951–1000. <https://doi.org/10.1007/s10901-021-09859-4>
- Vettorazzi, E., Figueiredo, A., Rebelo, F., Vicente, R., & Da Cunha, E. G. (2021). Optimization of the passive house concept for residential buildings in the South-Brazilian region. *Energy and Buildings*, 240, 110871. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110871>
- Yılmaz, Y., & Oral, G. K. (2018). Bir ortaokul binasının maliyet ve enerji etkin yenilenmesi için bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 393–408. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406099>
- Zhuang, C., Choudhary, R., & Mavrogianni, A. (2023). Uncertainty-based optimal energy retrofit methodology for building heat electrification with enhanced energy flexibility and climate adaptability. *Applied Energy*, 341, 121111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121111>