



Comparison of the energy and economic performance of a LEED certified educational building located in a cold climate region with the national standard

Ali Çelik^{1*}, Eyüphan Manay¹, Bayram Şahin²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Erzurum Technical University, 25100, Erzurum, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, İstanbul Technical University, 34437, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Creating an environmentally friendly, energy-saving campus
- Performance of green building certificates in cold climate regions
- Cost analysis of measures to increase energy efficiency and reduce carbon emissions

Keywords:

- Building Energy Performance
- Energy Efficient Design
- Sustainable (green) Building
- CO₂ Emissions
- Economic Analysis

Article Info:

Research Article

Received: 31.10.2023

Accepted: 08.08.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1383681

Correspondence:

Author: Ali Çelik

e-mail:

ali.celik@erzurum.edu.tr

phone: +90 533 264 1320

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the energy analysis of the LEED Silver (Leadership in Energy and Environmental Design) certified Erzurum Technical University Faculty of Engineering and Architecture building in Erzurum, one of the provinces located in the severe cold regions of Turkey, was performed, and it was evaluated whether the building reached the energy performance foreseen in the project phase during the operation period. Furthermore, the status of constructing the same building in accordance with the Turkish Thermal Insulation Standards was compared by taking into account its energy consumption, CO₂ emission, and economic criteria. Within the scope of the LEED-Silver Certificate criteria, the cost of \$ 1153458.88 for the relevant building will be amortized after 2 years and 7 months (Table A). Considering the 20-year economic life of the payback period found, it can be interpreted that the investment made is quite advantageous.

Table A. Cumulative net cash flows between the years 2023 to 2042

Investment cost (\$)	Economic Life(year)	2023	2024	2025	2026	2027
1153458,88	NPV (\$)	-1070664.91	-771095.92	346478.04	4587604.05	20904316.06
	Economic Life(year)	2028	2029	2030	2031	2032
	NPV (\$)	84352149.46	333084905.11	1314150266.32	5201241814.12	20653478312.89
	Economic Life(year)	2033	2034	2035	2036	2037
	NPV (\$)	82228896285.87	32803041455.199	13104835793.16.51	52408738920.59.46	20975078754.464.90
	Economic Life(year)	2038	2039	2040	2041	2042
	NPV (\$)	83992250412.624.90	33646828251.2911.00	13482502903.58090.00	54036103600.09510.00	21660075732.792900.00

Purpose:

The purpose of this study; To ensure the creation of new national standards and regulations in line with international norms and standards, where energy is prioritized, and which includes criteria that will make a positive contribution to the environment without the need for foreign certification.

Theory and Methods:

With the methods of this study; 1. Finding the primary energy consumption and emission values of the LEED certified reference building, 2. Evaluation of the energy performance of the reference building after use, 3. Conducting energy modeling and determining the energy consumption and emission values for the reference building if it is designed according to national standards, 4. Energy and emission data for both cases are evaluated for the reference building.

Results:

The additional costs incurred for a LEED certified building, especially those aimed at reducing energy consumption, can finance themselves in a very short time. Therefore, although measures that increase energy efficiency and reduce carbon emissions have additional costs, they provide continuous savings throughout the life of the building. For this reason, it is necessary to evaluate the expenditures on measures to increase energy efficiency not as an economic cost but as an investment with high medium and long-term returns.

Conclusion:

This work; It also shows that LEED certification assessment tools will not give the same results for different climate zones. For this reason, it is emphasized that countries should determine their green building priorities.



Soğuk iklim bölgesinde bulunan LEED sertifikalı bir eğitim binasının enerji ve ekonomik performansının ulusal standartla karşılaştırılması

Ali Çelik^{1*}, Eyüphan Manay¹, Bayram Şahin²

¹Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25100, Erzurum, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34437, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Çevre dostu, enerji verimlilik odaklı kampüs oluşturulması
- Soğuk iklim bölgelerinde yeşil bina sertifikalarının performansı
- Enerji verimliliğini artırıcı, karbon salımını azaltıcı tedbirlerin maliyet analizleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.10.2023

Kabul: 08.08.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1383681

Anahtar Kelimeler:

Bina enerji performansı,
enerji etkin tasarım,
sürdürülebilir (yeşil) bina,
CO₂ emisyonları,
ekonomik analiz

ÖZ

Binalarda enerji verimliliğini sağlamak için proje tasarımında aşmasında; iklim koşulları, maliyet, teknik hususlar bir arada göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada; Türkiye'nin en soğuk iklim bölgesinde yer alan Erzurum'da LEED SILVER (Leadership in Energy and Environmental Design) sertifikalı Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasının enerji analizi yapılmış ve işletme sürecinde, binanın proje aşamasında öngörülen enerji performansına ulaşip ulaşmadığının değerlendirilmiştir. Ayrıca; aynı binanın enerji tüketimi, CO₂ salımı ve ekonomik kriterleri dikkate alınarak Türkiye'de geçerli "Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği (TS 825)" ne uygun yapılması durumu ile de karşılaştırılmıştır. Önce mevcut LEED SILVER sertifikalı binanın enerji simülasyonu yapılarak gerçek durumu karşılaştırılmış ve enerji tüketimleri arasındaki fark %7,3 olarak bulunmuştur. Analizlerde HAP 5.11 (Hourly Analysis Program) programı kullanılmıştır. LEED SILVER sertifikasına sahip eğitim binasının ulusal standartlara göre yapılmış olması durumuna göre enerji verimliliği bakımından yaklaşık %23 ve CO₂ salımın da ise %17,81 oranında avantajlı olduğu belirlenmiştir. LEED SILVER Sertifikası kriterleri kapsamında referans binaya için yapılacak olan 1153458,88 \$ tutarındaki harcama, 2 yıl 7 ay sonra amorti edilecektir. Ancak inşaat metrekare birim maliyeti, üniversite kampüsünde ulusal standartlara göre yapılan diğer bir eğitim binasından ortalama %3 daha yüksektir. Bu sonuçlar enerji etkin bina tasarımında yol gösterici parametreler olarak kabul edilebilir.

Comparison of the energy and economic performance of a LEED certified educational building located in a cold climate region with the national standard

HIGHLIGHTS

- Creating an environmentally friendly, energy efficiency focused campus
- Performance of green building certificates in cold climate regions
- Cost analysis of measures to increase energy efficiency and reduce carbon emissions

Article Info

Research Article

Received: 31.10.2023

Accepted: 08.08.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1383681

Keywords:

Building energy
performance,
energy efficient design,
sustainable (green) building,
CO₂ emissions,
economic analysis

ABSTRACT

In the design of buildings that provide high energy performance; climatic conditions, cost and technical issues should be taken into consideration together. In this study, the energy analysis of the LEED SILVER (Leadership in Energy and Environmental Design) certified Erzurum Technical University Faculty of Engineering and Architecture building in Erzurum, one of the provinces located in the severe cold regions of Turkey, was performed, and it was evaluated whether the building reached the energy performance foreseen in the project phase during the operation period. Moreover, an evaluation was conducted comparing the adherence to Turkish Thermal Insulation Standards in the construction of identical buildings, considering their energy consumption, CO₂ emissions, and economic factors. First, the energy simulation of the existing LEED SILVER certified building was performed and compared with the actual situation, and the difference between energy consumption was found to be 7.3 %. The analyses were conducted using HAP 5.11 (Hourly Analysis Program). It has been determined that the education building with LEED SILVER certificate is built according to national standards, it is advantageous in terms of energy efficiency by 23% and CO₂ emission by 16,5%. Within the scope of the LEED SILVER Certificate criteria, the expenditure of \$ 1153458,88 for the reference building will be amortized after 2 years and 7 months. However, the square meter unit cost of construction is on average 3% higher than another educational building built according to national standards on the university campus. These results can be accepted as guiding parameters in energy efficient building design.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ali.celik@erzurum.edu.tr, emanay@erzurum.edu.tr, baysahin@itu.edu.tr /
Tel: +90 533 264 1320

1. Giriş (Introduction)

Dünyada ülkelerin siyasi ve ekonomik gücünü belirleyen en önemli unsur enerjidir. Binalar dünya genelinde enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının büyük bir bölümüne sebep olduklarından enerji verimliliği çalışmalarında önemli bir yer tutarlar. Binalarda enerji verimliliği adına yapılacak çalışmalar işletme periyodunda değil de proje aşmasından başlayarak yaşam döngüsünü de içine alan bir planlama yapılması gerekmektedir. Binalarda enerji sarfiyatının azaltılması için her ülke kendi ulusal şartlarına ve iklimlerine uygun olacak şekilde enerji verimliliği ile ilgili mevzuatlar hazırlamaktadırlar.

Artan nüfus ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak tüm dünyada her yıl katlanarak büyüyen enerji tüketimi ve buna bağlı olarak doğal kaynakların giderek azalmasından dolayı enerjinin verimli ve planlı bir şekilde kullanılması zorunlu hale gelmiştir. 2019 yılı verilerine göre yaklaşık olarak dünyada toplam enerji tüketiminin %35'i ve sera gazı emisyonlarının da %38'i bina sektöründen kaynaklanmaktadır [1]. Bundan dolayı bu sektörde enerji tasarruf potansiyeli oldukça büyüktür. Bütün ülkeler bina sektöründeki bu potansiyelden faydalanmak üzere ulusal şartlarına bağlı olarak ilgili yasal mevzuatlarını geliştirmektedir. Ayrıca 2060 yılına kadar binalarda enerji tüketiminin %50 oranında artacağı ve dolayısıyla karbon emisyonlarının da artacağı tahmin edilmektedir [2]. Paris Anlaşması kapsamında birçok ülke uzun vadeli planlarında enerji verimliliğinin artırılması ve düşük karbonlu ekonomik büyüme hedeflerine yer vermiştir [3].

Avrupa Birliği, iklim koşullarının, konfor gerekliliklerinin ve maliyetlerin dikkate alınarak binaların enerji performansının artırılması amacıyla "Binalarda Enerji Performansı Direktifi" yayınlanmıştır. Bu direktife istinaden 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerinin %80-95'ine kadar azaltmayı taahhüt etmiştir [4]. Yine Avrupa Birliği; 2030 yılına kadar enerji verimliliğinde %27 oranında iyileştirme yapacağını taahhüt etmiştir [5]. Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı, 2008 yılında yayınladığı "Enerji Verimliliği İçin Ulusal Eylem Planı Vizyon 2025" ile tüm eyaletler tarafından uygulanacak şekilde, asıl hedef enerji tüketiminin %50 oranında azaltılması ve bunun sonucunda da sera gazı salımında da belirgin şekilde azalma sağlamayı hedeflemiştir [6]. Türkiye'de enerji kaynaklarının etkin kullanılması için 2008 yılında "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği" yürürlüğe girmiştir [7]. Bu yönetmelikle, 2010 yılında tüm binaların sertifikalandırılması amacı ile geliştirilen ulusal hesap metodu (Bep-Tr) kullanılarak enerji kimlik belgesi verilmesi zorunlu hale getirilmiştir [8]. Bu amaç doğrultusunda; Türkiye'de kamu binalarında enerji verimliliği projesi uygulanması kapsamında, kamu binalarında 2023 yılı sonuna kadar asgari %15 oranında enerji verimliliği sağlanması hedefi belirlenmiştir [9]. Toplam enerji tüketimi içerisinde önemli bir paya sahip olan binalarda enerji tüketimiyle ilgili çalışmalara olan ilgi dünyadaki diğer ülkelerde olduğu gibi Türkiye'de de artmaktadır.

Binalarda enerji tüketimiyle ilgili çok sayıda çalışmaların yanında çevre dostu, sürdürülebilir ve enerji performansı yüksek yapıların avantajlarını vurgulayan çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada; kampüsteki eğitim binasının enerji etüdü yapılarak binanın güncel enerji tüketimi analiz edilmiş ve alınacak tasarruf tedbirleri ile CO₂ salımın minimum seviyelere indirilebileceği vurgulanmıştır. [10]. Başka bir çalışmada; enerji etkin bina tasarımı, tasarımda etkili olan parametreler ve enerji etkin bina tasarımında önlemlerin gerekliliğinin önemi vurgulanmakta, sonraki adımda Türkiye ve dünyada konuyla ilgili iyileştirme çalışmalarından, yasa, yönetmelik, standart ve gönüllü yeşil bina değerlendirme sistemlerinden bahsedilmektedir [11]. Amerika Birleşik

Devletleri'nde binalarda enerji verimliliğini artırmak ve çevreye olumsuz etkilerini azaltmak için LEED yeşil bina derecelendirme sistemi geliştirilmiştir. LEED sertifikalı binalar; su tüketimini, enerji tüketimini düşürmek ve kullanılan malzemelerin çevreye olumsuz etkilerini azaltmak için proje, inşaat ve işletme süreçlerinin planlanmış olması ile tanımlanır [12]. Yeşil bina elde etmek için kullanılan teknolojiler her iklim bölgesinde de farklı olarak uygulanır [13]. Yeşil binalarda kullanılan teknolojilerin belirlenmesinde iklim şartları gibi bölgesel özellikler etkilidir [14]. Bu çalışmada; LEED sertifikalı dokuz okulun enerji, çevre ve ekonomik olarak değerlendirilmesi yapılmıştır [15]. Sonuç olarak yeşil binalar için yapılan yatırımların amortisman süresinin kısa olduğu belirlenmiştir.

Üniversite kampüsleri kalabalık nüfusları ve farklı işlevli binalarıyla enerji tasarruf potansiyeli çok yüksek yerleşkedir. Bu nedenle enerji verimlilik odaklı kampüs yapılması ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar büyük önem kazanmaktadır. Üniversiteler gibi yoğun enerji kullanımına sahip kampüsler için iklim koşulları ve bina tipolojileri göz önüne alınarak bölgesel enerji politikaları geliştirilmelidir. Hem enerji maliyetlerinin üniversite bütçesi üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak hem de çevreye dolaylı olarak da olsa zararlı etkilerini hafifletmek için enerjinin etkin kullanıldığı kampüslerin oluşturulması gelecek için mecburi hale gelmiştir.

Üniversite binalarında enerji kullanımını azaltmak için alternatiflerin araştırılması, ülkenin zaman içinde sürdürülebilirliği ve ekonomik gelişimi için önemli bir yaklaşımdır. Sürdürülebilir kalkınma da enerji tüketimi önemli olduğu için yapı sektöründe enerji verimliliği ile ilgili alternatif yöntemler geliştirilmelidir. Güney Kore ölçeğinde yapılan bir çalışmada üniversite binalarının enerji analizi yapılmış ve enerji tasarruf potansiyelinin %6-%30 aralığında olduğu tespit edilmiştir [16]. Üniversitelerde yüksek enerji tüketimi olduğu için enerji tüketim değerlerinin düşürülmesi hem enerji maliyetlerinin üniversite bütçesindeki payını azaltacak hem de sürdürülebilir bir üniversite olma yolunda önemli avantajlar sağlayacaktır [17].

Soğuk iklim bölgelerinde sıcaklıklar olağan koşulların altındadır. Bu bölgelerde binaların enerji verimliliklerinin analiz edilmesi ve verimliliklerinin de artırılması oldukça önemlidir. Ancak, soğuk iklim bölgeleriyle ilgili literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların birinde Çin'in soğuk iklim bölgesinde bulunan Hangzhou'da bulunan üniversite araştırma binasının enerji analizleri yapılarak enerji verimliliğini artırıcı önlemler belirlenmiştir. Enerji performansı artıracak stratejilerin tespiti için simülasyon araçları kullanılmış ve binaya ait iç ortam konfor, soğutma ve ısıtma davranışları ile enerji tüketimi tespit edilmiştir. Bina dış kabuğu ve iç ortam konfor parametrelerinin önemine vurgu yapılmıştır [18]. Başka bir çalışmada ise çok soğuk iklim bölgesinde bulunan binaların enerji tüketiminde morfoloji faktörlerin önemli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca uzun ısıtma sürelerinin olduğu çok soğuk bölgelerde binaların enerji verimliliğinde önemli olan parametreler istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Harbin 'deki 73 ofis binasının teorik ve gerçek enerji tüketimleri hesap edilmiş ve bina formunun ısıtma enerjisinin azaltılmasında önemli olduğu vurgulanmıştır [19]. Bu çalışmada; farklı iklim özelliklerinin yaşandığı bölgelerdeki yeşil binaların değerlendirme parametreleri için bir çerçeve oluşturulmuştur. Sonuç olarak; iklim bölgelerine göre yeşil bina puan kategorileri ve kriterlerinin farklı ağırlık alabileceği belirlenmiştir [20]. Bu çalışmalarda; binalarda enerji verimliliğinin artırılması için yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolanması ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Özellikle binalarda enerji tüketiminin azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına odaklanılmıştır. Araştırmacılar, enerji tüketimi ile binalarda konfor seviyeleri arasındaki karmaşık ilişkiyi detaylı olarak incelemişlerdir. Deneysel araştırmalar ve teorik çerçeveler aracılığıyla, akademisyenler optimal

termal koşulların yanı sıra enerji verimliliğini teşvik etmeyi amaçlamaktadırlar [21-24]. Bu çalışmada; birçok ülkede uygulanan bina sertifikalandırma sistemlerine ve uygulama adımlarına alternatif yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen bu yöntemle; binaların kullanıcı kimliği ve kullanım amacına göre sertifikalandırılması gerektiği vurgulanmaktadır [25].

Soğuk iklim bölgelerinde sıcaklıklar genel olarak düşük olduğundan dolayı ısınma giderleri enerji maliyetinde önemli bir yer kaplamaktadır. Bu nedenle soğuk iklim bölgelerinde bina tasarımlarıyla ilgili özel düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut literatür incelendiğinde soğuk iklim bölgeleri için binalarda enerji verimliliğini artırıcı tedbirler ve sertifika sistemleri ile standartlar üzerine az sayıda çalışma yapıldığı belirlenmiştir. Türkiye özelinde binalarda enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik yapılan çalışmalar genel kapsamlı olup henüz gelişmiş ülkelerin enerji tasarruf hedeflerinin de gerisindedir. Bu çalışmada; soğuk iklim bölgelerindeki kampüslerde karbon salımını azaltan, maliyet etkin enerji verimlilik odaklı ulaşılabilir hedeflerin sonuçları değerlendirilmektedir. Ulusal şartlara bağlı olarak soğuk iklim bölgelerine ait maliyet optimum enerji verimliliği seviyesinin tespiti için mevcut uygulamaların düzeltilmesinin gerekliliği sayısal verilerle vurgulanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, özellikle soğuk iklim bölgelerinde çevre dostu, sürdürülebilir ve enerji verimliliği fazla yapılar inşa edilebilmesi için yeni yönetmelikler, standartlar ve sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini yerel bir örnekle ortaya koymaktır. Ayrıca soğuk iklim bölgeleri için maliyet etkin enerji verimlilik kavramının ulusal şartlara bağlı olarak tanımlanmasına rehber olunması da hedeflenmiştir. Yine maliyet optimum enerji verimliliğini artırıcı ve karbon salımını azaltıcı tedbirlere yapılan harcamaların uzun vadeli getirisi yüksek yatırımlar olduğu da gösterilmektedir.

Bu kapsamda; Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde bulunan ve LEED SILVER sertifikasına sahip olan Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasının enerji analizi yapılarak işletme sürecinde, binanın proje aşamasında öngörülen enerji verimliliğine ulaşip ulaşmadığının değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca, bu binanın Türkiye'de geçerli "Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği (TS 825)" ne uygun tasarlanması durumu için de enerji ve ekonomik analizi yapılarak her iki durum için karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçta referans bina için enerji verimliliğini artırıcı tedbirlerin hem enerji etkinliği ve hem ekonomik analizi hem de karbon salım analizinin değerlendirilmesi yapılmaktadır.

2. Yöntem (Method)

Bu çalışmanın metodolojisi dört ana adımdan oluşmaktadır. Birinci aşamada; LEED kriterlerine [26] göre tasarlanıp SILVER seviyesinde sertifikaya sahip olan referans binanın (RB) nihai enerji tüketimleri tespit edilip dönüşüm katsayıları kullanılarak birincil enerji tüketimi ve emisyon salım miktarının hesaplanması yapılmıştır. İkinci aşamada; referans binanın projelendirme aşamasında öngörülen enerji performans seviyesinin kontrolü için kullanım sonrası değerlendirilmesinin yapılmıştır. Üçüncü aşamada; referans binanın ulusal standartlar ve referans değerlere göre projelendirilmiş olması durumu göz önüne alınarak enerji modellemesinin yapıp enerji tüketimi ve emisyon salım miktarının hesaplanması yapılmıştır.

Dördüncü aşamada ise referans bina için her iki duruma ait enerji ve emisyon verilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucu elde edilen bulgulardan hareketle uluslararası yeşil bina sertifikalarına ihtiyaç duyulmaksızın yönetmelikler, standartlar ve sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi için önerilerde bulunulmuştur. Çalışmaya ait akış şeması Tablo 1'de gösterilmiştir.

2.1. Referans Binanın İklim Koşulları (Climatic Conditions of The Reference Building)

Farklı şehirlerden alınan meteorolojik verilere göre referans binanın bulunduğu Erzurum soğuk iklim bölgesindedir [27]. Meteoroloji istasyonlarındaki yaklaşık 80 yılı bulan gözlem sonuçlarına göre en soğuk ay ortalaması $-8,6^{\circ}\text{C}$, en sıcak ay ortalaması $19,6^{\circ}\text{C}$, en düşük sıcaklık -35°C ve en yüksek sıcaklık ise 35°C olarak tespit edilmiştir. Kar yağışlı gün sayısı 50 ve karın yerde kalma süresi ise 114 gün civarındadır [28]. İklim parametrelerinin LEED sertifika değerlendirme kriterleri üzerinde etkisi yüksektir. Referans bina soğuk iklim bölgesinde olduğundan LEED puanlamasında enerji ve atmosfer kategorisi daha yüksek etkiye sahiptir.

2.2. Referans Binanın Tanımlanması (Description of The Reference Building)

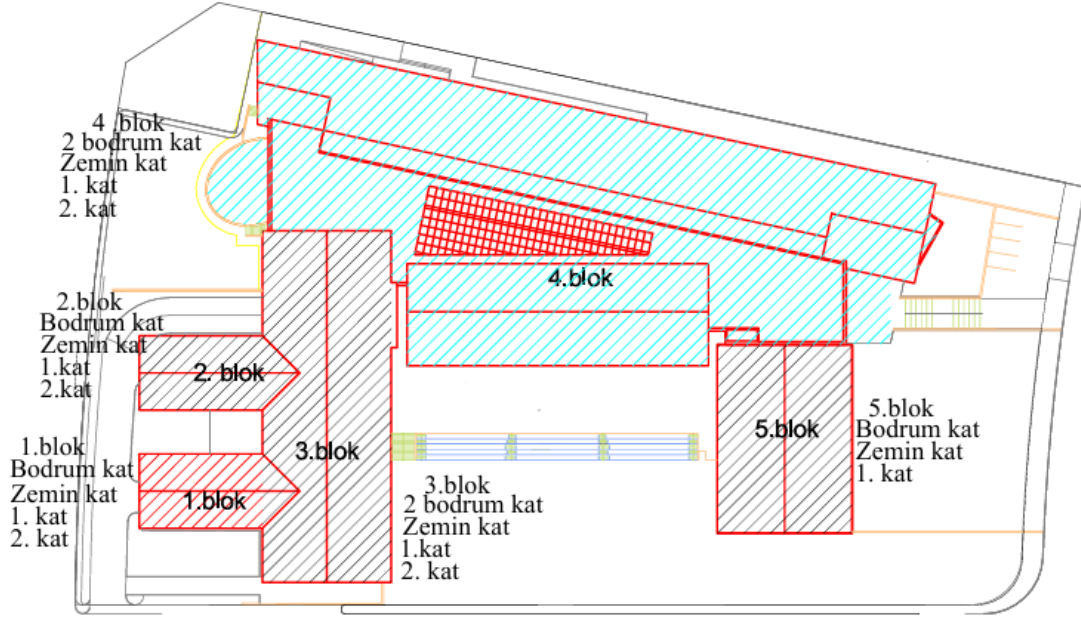
Çalışmada referans olarak kullanılan yapı, Erzurum Teknik Üniversitesi kampüsünde yer alan Mühendislik ve Mimarlık Fakültesidir. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi şehir merkezinden 3 km uzakta ve $39^{\circ}92' \text{N}$, $41^{\circ}24' \text{E}$ coğrafi koordinatlarındadır. Eğitim binası olarak kullanılan bina 25245 m^2 kapalı alana sahiptir ve LEED SILVER sertifikasına göre tasarlanmış ve yapılmıştır. 1998 yılında kullanılmaya başlanan, dünyanın en yaygın kullanılan ve tanınan yeşil bina sertifikasyon sistemi olan LEED, Amerikan Yeşil Binalar Konseyi (U.S. Green Building Council-USGBC) tarafından geliştirilmiştir [29]. LEED SILVER sertifikasyon sistemi yeşil binaların enerji verimliliğini ve performansını birçok kategoride değerlendirir. Şekil 1'den görüleceği üzere LEED SILVER sertifikasına sahip olan referans bina toplam 5 bloktan oluşmaktadır. 1, 2 ve 3'üncü bloklarda öğretim üyelerinin çalışma ofisleri, 4'üncü bloкта derslikler, 5'inci bloкта da dekanlık ofisleri bulunmaktadır.

Bina dış kabuğunu; dış duvarlar, döşemeler, çatı ve cam yüzeyler oluşturmaktadır. Referans binanın dış cephesi; mekanik sistem granit ve giydirmeye cam sisteminden oluşmaktadır. Cephede ışık geçirgenliği %35, güneş ısısı geçirgenlik katsayısı 0,24 olan giydirmeye bir cam sistemi vardır. Çatı örtüsü ise boyalı sac kaplamadır. Referans bina kabuğunu oluşturan yapı malzemelerine ve kalınlıklarına göre toplam ısı geçirgenlik katsayıları (U) ile Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği (TS 825-2013)'nin [30] önerdiği ısı geçirgenlik katsayıları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Referans binasının ısıtma sisteminde her biri yaklaşık 500 kW kapasiteye sahip 4 adet yüksek verimli doğalgazlı kazan kullanılmıştır. Referans binanın ısıtılması; yüksek verimli doğal gaz kazanları, radyatörler, hava apareyleri ve HVAC sistemleriyle yapılmaktadır. Referans binanın ısıtma yükü çok yüksek olduğundan ısı enerjisini azaltmak için uygulanacak tasarruf tedbirleri büyük önem taşımaktadır. Sınıflardaki ve diğer şartlandırılmış bölgelerdeki minimum havalandırma oranlarında ASHRAE Standardı 62,1 [31]

Tablo 1. Çalışma akış şeması (Research flow chart)

Soğuk iklimde LEED Sertifikalı eğitim binası performansının analizi			
LEED sertifikalı RB'nin enerji, emisyon salım ve ekonomik analizi	LEED Sertifikalı RB'nin kullanım sonrası değerlendirilmesi	RB'nin TS 825 standartına göre modellenmesi (enerji ve emisyon salım analizi)	RB'nin LEED Sertifikalı durumu ve TS 825 standart durumu için enerji, emisyon salım karşılaştırılması



Şekil 1. Referans binanın vaziyet planı (Reference building's site plan)

Tablo 2. Referans bina kabuğu yapı elemanlarının ısı geçirenlik katsayıları
(Thermal conductivity coefficients of the construction elements of the reference building envelope)

Yapı Elmanı	Dış Duvar (Perde)	Dış Duvar (Tuğla)	Tavan (Çatılı)	Taban Döşeme	Giydirme Cam Sistemi
Referans bina yapı bileşenleri U (W/m ² °C)	0,260	0,235	0,177	0,367	1,1
TS 8252'e göre önerilen U (W/m ² °C)	0,370	0,324	0,209	0,397	2,2

baz alınmıştır. TS825-2013'e göre belirlenen konfor sıcaklığını elde etmek için binadaki set sıcaklıkları mahallerde 20-22°C arasındadır. Referans binasında ısıtma sisteminin çalışma zamanları ile çalışma sıcaklıkları hafta içi ve hafta sonunda ders saatlerine göre programlanmıştır. Referans binada iklim ve kullanım şartlarına bağlı olarak belirli mahallerde soğutma, hava kaynaklı değişken debili soğutucu akışkan hacmi (Variable Refrigerant Volume, VRV) ve klima santrali ile yapılmaktadır. Referans binada bütün mahallerde aydınlatmada floresan armatürler kullanılmıştır. Aydınlatma sistemlerinin çalışma saatleri hafta içi ve hafta sonu ders saatlerine göre programlanmaktadır.

2.3. RB'nin Enerji Tüketimi ve Karbon Salımının Hesaplanması (Calculation of Energy Consumption and Carbon Emission of RB)

Binanın enerji verilerini aynı koşullarda karşılaştırmak için hesaplanan tüketim değerlerinin birincil enerjiye çevrilmesi gerekmektedir. Her ülke için nihai enerjiyi birincil enerjiye dönüştürmede farklı enerji faktörleri kullanılmaktadır. Türkiye'de nihai enerjileri birincil enerjiye dönüştürmede; elektrik için 2,36 doğal gaz ve diğer yakıtlar için 1 katsayıları kullanılmaktadır [332]. Karbon emisyonu dönüşüm faktörleri; 2020 yılında elektrik için 0,484 (kg eşdeğer CO₂/kWh) [33], doğal gaz için de 0,234 (kg eşdeğer CO₂/kWh) olarak kabul edilmektedir [34]. Referans bina için toplam birincil enerji Eş. 1 ve Eş. 2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Sigma BE = [e_{\text{doğal gaz}} \times 1] + [e_{\text{elektrik}} \times 2,36] \quad (1)$$

$$\Sigma CE_{(CO_2)} = (0,234 \times e_{\text{doğal gaz}}) + (0,484 \times e_{\text{elektrik}}) \quad (2)$$

Eş. 1 ve Eş. 2'de; BE toplam birincil enerji tüketimini [kWh/m² yıl], e_{doğalgaz} toplam doğalgaz enerji tüketimini [kWh/yıl], e_{elektrik} toplam elektrik enerjisi tüketimini [kWh/yıl], CE (CO₂) toplam karbon emisyonunu [kg m²/yıl] göstermektedir. Üniversitelerde pandemiden dolayı eğitim öğretim faaliyetlerine ara verildiğinden ve daha sonra da 6 Şubat deprem felaketinden dolayı uzaktan eğitim yapıldığından binaların enerji tüketimleri çok düşüktür ve gerçeği de yansıtmamaktadır. Bu nedenle referans bina ile ilgili yapılan analizlerde; enerji tüketiminin gerçekleri yansıtmaması için öğrencinin yoğunluğunun olduğu 2017, 2018 ve 2019 yılları ortalama enerji tüketim değerleri kullanılmıştır.

2.4. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardına Genel Bakış (Overview of The Insulation Standard in Türkiye)

Türkiye'de kamuya ait binalar yürürlükteki enerji performans yönetmeliğine göre projelendirilerek yapılmaktadır. 2008 yılında yayınlanan bu yönetmelik; binalardaki ısı kayıplarının azaltılmasını ve enerji verimliliğinin sağlanmasını esas almakta ve uygulamaya dair usul ve esasları düzenlemektedir. Bu standart; ısı yalıtımı ile enerji verimliliğinin sağlanmasını amaçlamaktadır. Teknik anlamda TS 825; yapılarda kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik hesap değerlerini belirler. Bu standartta belirtilen hesap metodunda, iletim, taşınım ve havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kayıpları ile iç ısı kazançları ve güneş enerjisi kazançları dikkate alınmaktadır.

2.5. Bina Enerji Analizinde Kullanılan Enerji Simülasyon Programı (Simulation Program Used In Building Energy Analysis)

Binaların ısıtma, soğutma, havalandırma ve klima (HVAC) sistemlerinin tasarımında kullanılan Carrier'in saatlik analiz programı HAP, enerji simülasyonu yapmak amacı için hazırlanmış bir programdır. HAP programı ile cihaz kapasiteleri, sistemlerin enerji analizi ve enerji maliyetleri hesaplanabilir. Enerji analizi hesaplamalarında yılın 8760 saati hava verilerini kullanarak gerçek bir saatlik veri elde edilmektedir [35].

2.6. Ekonomik Analiz (Economic Analysis)

Referans binada enerji performansını iyileştirmek için Türkiye'de binalarda enerji yönetmelikleri kriterlerinden daha iyi teknik değerlere sahip; izolasyon, cephe sistemi, havalandırma ve ısıtma sistemleri kullanılmıştır. Genellikle, ekonomik değeri olan yatırımlar bir yılı aşan sürelerde gerçekleşir. Aynı şekilde beklenen gelirler de bir yıldan fazla sürede tahsil edilebilir. Bu sebeple; yatırım için yapılan giderler ve sağlanan gelirler aynı değerde olmazlar. Gerçekçi bir analiz için, yatırımın ekonomik ömrü süresince yapılan gider ve elde edilen gelirlerin dinamik yöntemlerle değerlendirilmesi gerekmektedir. Yapılan ekonomik analiz de paranın zaman değerini dikkate alan sermaye bütçeleme yöntemlerinden; geri ödeme süresi (GÖS) yöntemi, net bugünkü değer (NBD) ve iç kârlılık (verimlilik) oranı (İKO) gibi dinamik (paranın zaman değerini dikkate alan) yöntemler kullanılmıştır [36].

2.6.1. Net bugünkü değer (NBD) yöntemi (Net present value (NPV) method)

Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi; paranın zaman değerini hesaba katan ve gelecekteki tasarruf miktarının belirli bir iskonto oranı ile bugüne indirgeyen bir yöntemdir [37]. Daha sonrada elde edilen bu indirgenmiş değerler toplanarak nakit akışının toplam net bugünkü değeri elde hesaplanır. İskonto oranı, ülkenin dönemsel faiz oranları ve enflasyon oranı kullanılarak hesaplanır. Yapılan yatırım harcamaları nakit çıkışı gerektirdiği için negatif, kazançlar ise pozitif alındığı için bir net sonuç verecektir. NBD negatif ise yatırım projesinin ekonomik açıdan avantajlı olmadığı, pozitif değerde ise projenin ekonomik açıdan avantajlı olduğu söylenebilir. NBD' nin sıfır olması ise yatırım sonucunda ne kâr ne de zarar oluştuğunu yani kazançların toplam maliyetlere eşit olduğunu ifade etmektedir. Net bugünkü değer Eş. 3'deki gibi hesaplanır.

$$NBD = \sum_{t=0}^n \left(\frac{Bt}{(1+i)^t} \right) - \sum_{t=0}^n \left(\frac{Ct}{(1+i)^t} \right) \quad (3)$$

Eş. 3'de; Bt, t yılındaki proje gelirlerini, Ct, t yılındaki proje giderlerini, i iskonto oranını, n projenin ekonomik ömrünü göstermektedir.

2.6.2. Geri ödeme süresi (GÖS) (Payback period (PBP))

NBD' nin kümülatif nakit akışlarının pozitif değer olduğu ilk yıl geri ödeme süresi (GÖS) olarak tanımlanır. Yani geri ödeme süresi projenin tasarruf toplamının, ilk yatırım bedeline ulaştığı süredir. Geri ödeme süresi; yıllar bazında nakit akışının düzenli ya da düzensiz olmasına göre hesaplanır. Eğer nakit akışı düzenli ise; geri ödeme süresi ilk yatırım maliyetinin dönem başına nakit akışına oranı ile hesaplanır. Eğer nakit akışı düzenli değil ise toplam geri ödeme süresi; yılın başında yatırımın geri ödenmemiş geri ödemesinin takip eden yıldaki nakit akışına oranı eklenerek hesaplanır [38]. Geri ödeme süresi kısaltıkça yatırımın daha az riskli olduğu, katma değerinin yüksek olduğu ve likiditenin artabileceği sonucu da çıkarılabilir [36]. Geri ödeme süresi Eş. 4'deki gibi hesaplanmaktadır [38].

$$GÖS = \frac{İY}{NA} \quad (4)$$

Eş. 4'de; İY ilk yatırımı, NA ise dönem başına nakit akışını göstermektedir.

2.6.3. İç kârlılık oranı (İKO) (Internal rate of return (IRR))

İç kârlılık oranı yatırımların ekonomik analizinde oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Genel olarak yatırım maliyetlerinin bugünkü değerini, gelirlerin bugünkü değerine eşitleyen oranın değeri iç kârlılık oranı olarak tanımlanmaktadır [36]. İç kârlılık oranı Eş. 5'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$İKO = \sum [B_t / (1 + i)^t] = \sum [C_t / (1 + i)^t] \quad (5)$$

Kazanç ve yatırım maliyet oranları arasındaki faiz getirisi olarak da tanımlanan İKO, yatırımdan beklenen getiri oranına eşit veya yüksek ise proje kârlı olarak kabul edilmekte tam tersi durumda ise yatırım kârlı olarak kabul edilmeyecektir [36].

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. Bina Enerji Modelini Doğrulama (Validating The Building Energy Model)

Modelin doğrulanmasında; binaya ait gerçek aylık elektrik tüketim değerleri referans bina için ölçülemediğinden için sadece binanın aylık ölçülen doğal gaz gerçek tüketim değerleri kullanılmıştır. CV_RMSE = 10,42 ve NMBE = 3,85 olarak hesap edildiğinden AHSRAE standart 14'te [39] önerilen sınırlar içerisinde. Bu sonuçlar enerji modelindeki hata paylarının kabul edilebilir olduğunu ve bina modelinin doğru olmasından dolayı gerçek binayı temsil edebileceğini göstermektedir.

3.2. Referans Binanın Enerji Analizi (Energy Analysis of The Reference Building)

Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinin 2017, 2018 ve 2019 yıllarına ait sayaçtan okunan aylık gerçek doğalgaz tüketim değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Yine referans binanın simülasyon sonucu belirlenen aylık doğalgaz tüketimleri de Tablo 4'te verilmiştir. Referans binanın 2017, 2018 ve 2019 yılı elektrik tüketim değerleri; binanın talep gücünün merkezi sayaçtan okunan yıllık gerçek tüketim değerlerine oranlanması usulü ile tespit edilmiştir. 2017,2018 ve 2019 yıllarına ait yıllık ortalama elektrik tüketim değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Şekil 2'de ise referans binanın enerji tüketimi dağılımı verilmiştir. Gerçek tüketim değerlerinin birincil enerji tüketimine dönüştürülmesinin ardından birim alan başına hesaplanan enerji tüketim verileri karşılaştırmada referans olarak kullanılmaktadır.

Bu verilere göre referans binanın yıllık toplam enerji tüketimi 2857723,23 kWh dir. Bu tüketimin %76'sını doğalgaz, %24'ünü elektrik oluşturmaktadır.

Referans binanın yıllık toplam spesifik birincil enerji tüketimi 3800206,63 kWh/yıl dır. Toplam spesifik birincil enerji tüketiminin birim alan başına hesaplanan verisi ise; 150,54 kWh/m² yıl olarak tespit edilmiştir. Bu değer Türkiye 'de yürürlükte olan Binalarda Isı Yalıtım Kurallarının (TS 825 2013) 4A [30] ekinde belirtilen eğitim binaları için önerilmiş 450 kWh/m²yıl dan çok düşük olduğu ve %66,6 daha tasarruflu olduğu görülmektedir.

Referans binanın projelendirme aşamasında öngörülen enerji performans seviyesinin kontrolü için kullanım sonrası değerlendirilmesi yapılmıştır. Simülasyon programı ile hesaplanan nihai enerji tüketimleri dönüşüm katsayıları kullanılarak birincil

Tablo 3. Referans binanın 2017, 2018 ve 2019 yıllarına ait aylık ortalama doğalgaz tüketimi
(Average monthly natural gas consumption of the reference building for the years 2017 to 2019)

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi doğalgaz tüketim bilgileri					
		2017	2018	2019	Üç yıl tüketilen enerjinin ortalaması z(kWh)
No	Dönemi	Tüketilen enerji (kWh)	Tüketilen enerji (kWh)	Tüketilen enerji (kWh)	
1	Ocak	383135	427130	446768	419011
2	Şubat	350796	345411	470326	388845
3	Mart	271631	306841	319907	299460
4	Nisan	67256	96297	208213	123923
5	Mayıs	0	59207	3446	30218
6	Haziran	0	7793	0	2598
7	Temmuz	0	0	0	0
8	Ağustos	0	0	0	0
9	Eylül	0	0	0	0
10	Ekim	157221	120593	185904	154573
11	Kasım	363122	300406	396011	353180
12	Aralık	400505	439750	338481	392913
Toplam		1993670	2103433	2397060	2164720

Tablo 4. Referans binanın simülasyon programı ile hesap edilen aylık doğalgaz tüketimi
(Monthly natural gas consumption of the reference building calculated with the simulation program)

Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Tüketilen enerji (kWh)	396211	377656	250338	132778	52132	0	0	0	0	151928	337438	389855

Tablo 5. Referans binanın 2017, 2018 ve 2019 yıllarına ait yıllık ortalama elektrik tüketimi
(Annual average electricity consumption of the reference building for the years 2017, 2018, and 2019)

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	
Yıllar	Elektrik tüketimi (kWh)
2017	62604,66
2018	719726,09
2019	729676,75
Üç yıl tüketilen enerjinin ortalaması (kWh)	693002,50

enerji cinsinden veriler elde edilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen toplam birincil enerji tüketimi 3526314,70 kWh/yıl olarak tespit edilmiştir. Referans binanın simülasyon sonucu birim alan başına yıllık birincil enerji tüketimi ise 139,6 kWh/m²yıl olarak bulunmuştur. Gerçek ve simülasyon enerji tüketimleri arasındaki fark %7,3 olarak bulunmuştur. Simülasyon aracı yardımıyla hesaplanan nihai enerji tüketimleri ve gerçek verilerin karşılaştırması Şekil 3'de sunulmuştur. Binanın spesifik enerji tüketiminin simülasyon sonucu elde edilen enerji tüketiminden fazla olma sebebi ısıtma ve aydınlatma sistemlerinin gerçek çalışma koşullarının (konfor sıcaklıkları ve çalışma saatleri) enerji modellemesi için kabul edilen değerlerden daha fazla olacak şekilde manuel olarak çalıştırılmasından kaynaklanmaktadır.

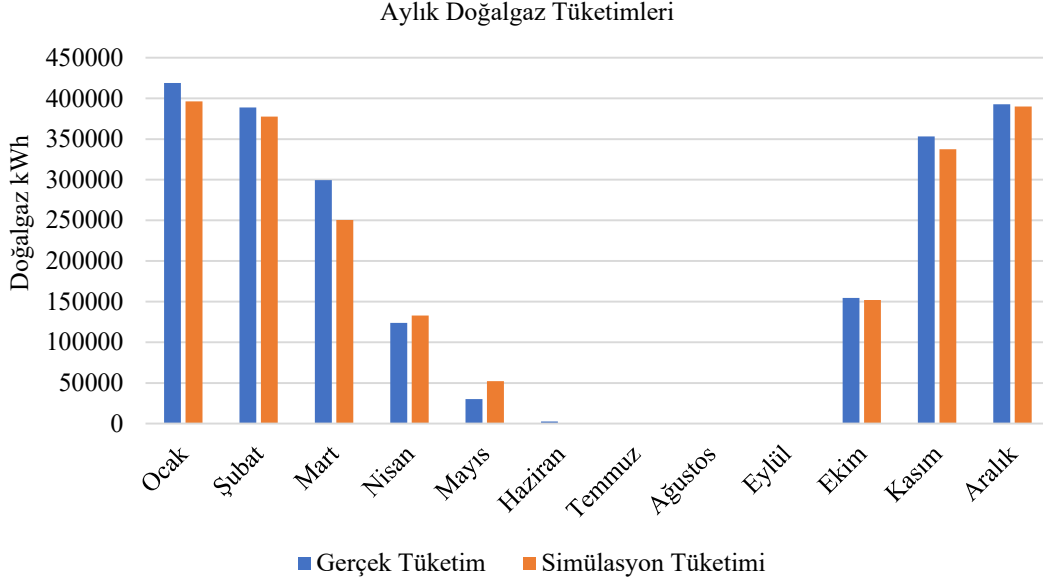
3.3. Referans Binanın CO₂ Salımının Analizi (CO₂ Emission Analysis of Reference Building)

Referans binanın karbon salımı 840957,86 kg CO₂ /yıl olarak tespit edilmiştir. Bunun sonucunda birim alan başına karbon salımı ise 33,31 kg CO₂ /m² yıl olarak hesap edilmiştir. Referans bina için HAP 5.11 simülasyon programı sonucu elde edilen yıllık karbon salım miktarı 783578,11 kg CO₂ /yıl olarak bulunmuştur. CO₂ salım miktarı enerji tüketimine paralel olarak azalmıştır. Bina için birim alan başına karbon salımı ise 31,03 kg CO₂ /m² yıl olarak hesap edilmiştir. Bu değerlerin ülkemizde yürürlükte olan TS 825-2013 Standardında eğitim binaları için belirlenen karbon salım seviyesinden (75 kg CO₂ /m² yıl) çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

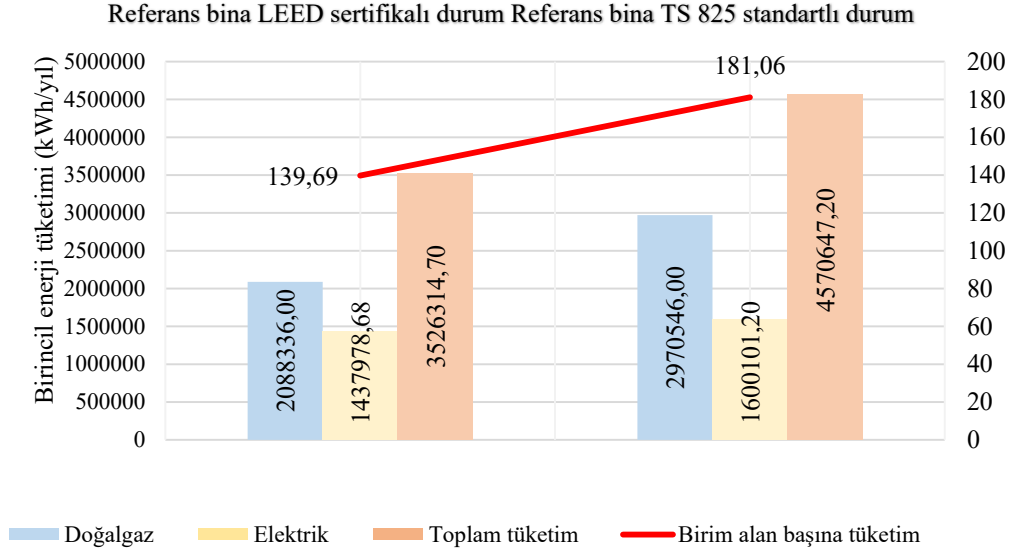
3.4. Referans Binanın TS 825-2013 Standardında Göre Tasarlanmış Olmasına Göre Birincil Enerji Tüketimi ve Karbon Salımının Hesaplanması (Calculation of Primary Energy Consumption and Carbon Emissions According to The Design of The Reference Building in Accordance with TS 825-2013 Standard)

Referans binanın enerji modellemesi TS 825-2013 Standardına göre projelendirilmesi durumuna göre HAP 5.11 dinamik simülasyon programı ile yapılmıştır. Enerji performans parametreleri ile mimari, mekanik ve elektrik proje verileri programa girilmiştir. Simülasyon programı ile hesaplanan nihai enerji tüketimleri dönüşüm katsayıları kullanılarak birincil enerji cinsinden veriler elde edilmiştir. Referans binanın hem LEED sertifikalı durumu için simülasyon sonucu elde edilen hem de TS 825-2013 standardına göre simülasyon programı ile hesaplanan birincil enerji tüketim değerleri Şekil 4'de karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Referans binanın TS 825-2013 Standardına göre hazırlanmış olan enerji modellemesi sonucu birincil enerji tüketimi 4 570647,20 kWh/yıl olarak hesaplanmış, birim alan başına simülasyon sonucu yıllık birincil enerji tüketimi ise 181,05 kWh/m² olarak bulunmuştur.

TS 825-2013 Standardına göre referans binanın projelendirilmiş durumu için HAP 5.11 simülasyon programı sonucu elde edilen yıllık karbon salım miktarı 1023264,12 kg/yıl olarak belirlenmiştir. Bina için birim alan başına karbon salımı ise 40,53 kg CO₂ /m² yıl olarak hesap edilmiştir. Referans binanın TS 825-2013 Standardına göre



Şekil 2. Referans binasının gerçek doğalgaz tüketimi ile simülasyon sonucu aylık doğalgaz tüketimleri (Actual natural gas consumption of the reference building and the monthly natural gas consumption as a result of simulation)



Şekil 3. Referans bina LEED sertifika ve TS 825 standardına göre simülasyonları sonucu elde edilen birincil enerji tüketimleri (Primary energy consumption obtained as a result of simulations of the reference building according to the LEED certificate and TS 825 standard)

projelendirmiş durumu ile LEED SILVER sertifikalı mevcut durumda karbon salımlarının karşılaştırılması Şekil 4'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bu verilere göre; LEED SILVER yeşil bina sertifikasına sahip bir binanın ulusal standartlara göre yapılmış binaya göre yaklaşık %23 oranında enerji verimliliği ve %17,81 civarında da karbon salımı bakımından avantajlı olduğu belirlenmiştir. Referans binada enerji ve atmosfer kategorisi içerisindeki LEED puanları sayesinde enerji verimliliği sağlanmıştır. Bu kategori içerisindeki; optimize energy performance (enerji performansının optimize edilmesi), enhanced commissioning (kapsamlı devreye alma), enhanced refrigerant mgmt

(gelişmiş soğutma yönetimi), measurement and verification (ölçüm ve onaylama) kriterlerinden puan alınmıştır. Bu kategoride 35 puandan 16 puan alınması bile yaklaşık ¼ oranında enerji verimliliğinin sağlandığını göstermektedir.

3.5. Referans Binanın Ekonomik Analizi (Economic Analysis of the Reference Building)

Referans binanın yatırım maliyeti hesabında; inşaat kalemleri maliyetleri hariç tutularak, bina yapılırken enerji performansı artıracak önlemlerden; yüksek performanslı havalandırma ve ısıtma sistemleri, ısı yalıtımı, üç camlı giydirme cephe sistemlerinin

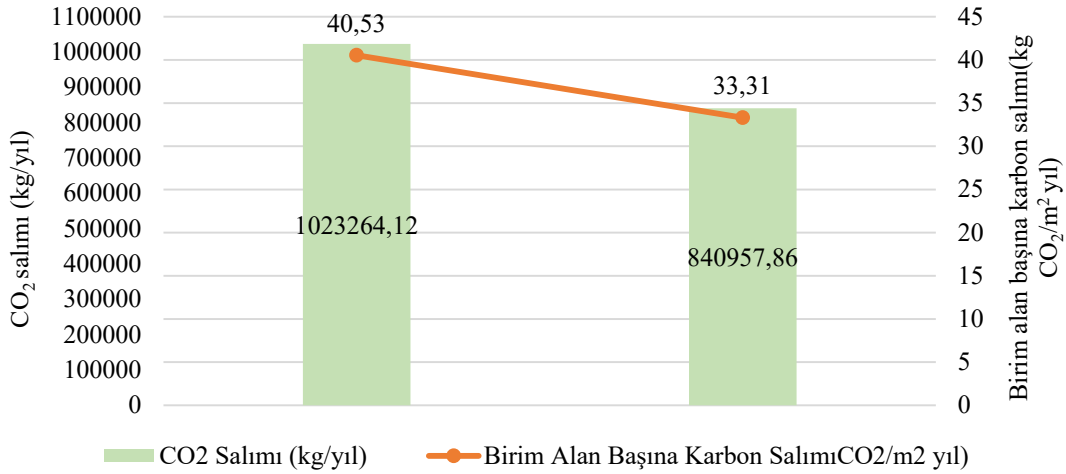
maliyetleri dikkate alınmıştır. Ekonomik analiz hesaplamalarında kullanılan ilk yatırım maliyetlerinde 2023 yılı Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na ait İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları kullanılmıştır [40]. Birim fiyat kitabında tanımlanmamış olan enerji iyileştirme tedbirlerine ait ilk yatırım maliyetlerinde ise 2023 yılı piyasa fiyatları kullanılmıştır. Maliyet hesaplamaları TL (Türk lirası) olarak yapılmıştır. Döviz cinsinden belirlenen fiyatlar için de hesap yapıldığı ayın ortalama döviz kurları kullanılmıştır. Buna göre, €/TL 28,97, \$/TL ise 27,62 [41] olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Hesaplamalarda; enflasyon oranı 2023 yılı Eylül ayına göre yıllık %61,53 [42], iskonto oranı %1, piyasa faiz oranı da yine 2023 yılı Eylül ayına göre yıllık %37 [43] olarak alınmıştır.

Erzurum için doğal gaz birim fiyatı 0,050 \$/kWh [44], elektrik birim fiyatı 0,132 \$/kWh [45] olarak (KDV ve hizmet bedelleri dahil) alınmıştır. Maliyet analizinde kullanılan toplam enerji miktarı, sistemlerin çalışma şartları, bakım maliyetleri, iklim koşulları ile ülkedeki enflasyona bağlı olarak enerji fiyatlarındaki olabilecek artışlardan dolayı %20 artırılmıştır. Bu çalışmada bina enerji verimliliğini artırıcı sistemlerin ekonomik ömürleri yaklaşık 20 yıl olarak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 2020 yılında yayımlanan Kamu Binalarının Enerji Verimli Yenilenmesine Yönelik Rehberi'nden alınmıştır [46]. Ayrıca bina enerji verimliliğini artırıcı imalatlar için net bugünkü değer hesaplanmasına esas olacak olan getiri oranı %1 olarak kullanılmış ve hurda değerleri dikkate alınmamıştır.

Türkiye'de enerji birim fiyatlarındaki artış LEED SILVER sertifikalı referans binanın enerji verimliliğini öne çıkarmaktadır. Gelişmekte olan bir ülke ve enerjisinin büyük bir kısmını ithal eden bir ülke olarak Türkiye ekonomisi için enerji büyük önem arz etmektedir. Enerji fiyatlarının sürekli olarak değişiyor olması da ülke ekonomisi ve firma maliyetleri için önemli bir belirsizlik ortaya koymakta ve karar alma

süreçlerinde karar vericiler için etken olmaktadır. Bu nedenle çalışmada gelecek yirmi yıllık süreçte enerji fiyatlarındaki oluşacak fiyat değişimlerini tahmin etmek amacıyla geçmiş yıllara ait elektrik ve doğalgaz fiyat değişimleri incelenerek, ortalama fiyat değişiminin gelecek yıllarda da süreceği varsayılmıştır. Elektrik ve doğalgaz birim fiyatlarındaki değişim Tablo 6'da gösterilmektedir [47]. Referans binanın yatırım maliyetine ait net bu günkü değerleri ve enerji maliyetlerinden sağlanacak olan kazanç sebebiyle oluşacak nakit akışları enerji fiyatlarındaki hesaplanmış olan ortalama artış tutarları ile hesap edilerek kümülatif net nakit akışları Tablo 7'de gösterilmiştir. Yıllar bazında nakit akış düzensiz olduğundan dolayı geri ödeme süresi hesap prosedürü bölümünde anlatılan yöntemle hesaplanmıştır. Referans binada enerji verimliliğini artırıcı imalatların geri ödeme süresi yaklaşık 2 yıl 7 ay olarak tespit edilmiştir. LEED SILVER sertifikası kriterleri kapsamında ilgili bina için yapılacak olan 1153458,88 \$ tutarındaki maliyet, yaklaşık 2 yıl 7 ay sonra amorti edilmiş olacaktır. Diğer bir ifadeyle, bulunan geri ödeme süresi zaman dilimi 20 yıllık ekonomik ömür dikkate alındığında yapılan yatırımın oldukça avantajlı olduğu şeklinde yorumlanabilir. Referans binanın LEED SILVER sertifikasına ait imalatları için iç kârlılık oranı eşitlik 5 ile hesaplanmış ve yaklaşık %10,40 olarak bulunmuştur. Hesaplanan olan İKO katlanılacak maliyetin yatırımın ekonomik ömrü olan yirmi yıllık süreç içerisinde enerjiden sağlanmış olacak olan maliyet avantajının yaklaşık %10,40 oranında bir kazanç sağlayacağını ifade etmektedir.

Yeşil bina sertifikalı bir eğitim binası olan referans binanın 2023 yılı Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatlarına [40] göre inşaat metrekare birim maliyeti 499,59 \$'dır. Üniversite kampüsünde bulunan ulusal yönetmeliklere göre yapılan diğer bir eğitim binasının 2023 yılı birim fiyatları ile inşaat metrekare birim maliyeti de 484,03 \$'dır. LEED SILVER sertifikalı referans bina ortalama %3 oranında daha maliyetlidir.



Şekil 4. Referans binanın LEED sertifikalı ve TS 825 standart durumunun simülasyonları sonucuna göre karbon salımı (Carbon emissions according to the simulation results of the LEED certification status and TS 825 standard status of the reference building)

Tablo 6. 2020-2022 yıllarındaki elektrik ve doğalgaz ortalama birim fiyatları
(Average unit prices of electricity and natural gas in 2020 to 2022)

Elektrik ve doğalgaz ortalama birim fiyatları	2020		2022	
	2.Dönem	1.Dönem	2.Dönem	1.Dönem
Elektrik (\$/kWh)	2,07	2,35	3,5	7,87
Doğal gaz (\$/m ³)	6,74	6,59	12,24	38,76

Tablo 7. 2023-2042 yılları arasındaki kümülatif net nakit akışları (Cumulative net cash flows between the years 2023 to 2042)

Yatırım Maliyeti(\$)	Ekonomik Ömür (yıl)	2023	2024	2025	2026	2027
1153458,88	NBD(\$)	-1070664,91	-771095,92	346478,04	4587604,05	20904316,06
	Ekonomik Ömür (yıl)	2028	2029	2030	2031	2032
	NBD(\$)	84352149,46	333084905,11	1314150266,32	5201241814,12	20653478312,89
	Ekonomik Ömür (yıl)	2033	2034	2035	2036	2037
	NBD(\$)	82228896285,87	328030414551,99	1310483579316,51	5240873892059,46	20975078754464,90
	Ekonomik Ömür (yıl)	2038	2039	2040	2041	2042
NBD(\$)		83992250412624,90	336468282512911,00	1348250290358090,00	5403610360009510,00	21660075732792900,00

5. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışma kapsamında; LEED SILVER sertifikalı bir binanın referans alınması ile çevre dostu, enerji verimlilik odaklı kampüs oluşturulması ve geliştirilmesine yönelik adımların önemi belirtilmiştir. Bu adımlarla; binaların enerji tasarımından sorumlu mühendislik disiplinlerinin ve mimarların yürütecekleri ekip çalışması ile binaların tasarım aşamasında alınan pasif ve aktif enerji sistemlerine yönelik tüm kararların binanın kullanım ve işletim döneminde tüketileceği enerji ve CO₂ salım miktarında belirleyici olduğu vurgulanmaktadır.

Referans binanın birincil enerji tüketimi 3800206,63 kWh/yıl dır. Birim alan başına tüketim ise; 150,54 kWh/m² yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değer Türkiye şartlarında eğitim binaları için önerilen sınır değerden çok düşük ve %66,6 daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. LEED SILVER sertifikalı referans binanın simülasyonu sonucu birincil enerji tüketimi 139,6 kWh/m² olarak bulunmuştur. Aynı şekilde referans binanın TS 825 standardına göre hazırlanmış projesi için enerji modelleme sonucu birincil enerji tüketimi ise 181,05 kWh/m² olarak bulunmuştur. Uluslararası yeşil sertifikaya sahip bir binanın ulusal standartlara göre yapılmış binaya göre enerji verimliliği bakımından yaklaşık %23 oranında avantajlı olduğu tespit edilmiştir. LEED sertifika kriterlerinden alınan puanlardan da yaklaşık ¼ oranında enerji verimliliği sağlandığı görülmektedir. Referans binanın karbon salımı salımı 33,31 kg CO₂/m² yıl ve simülasyon sonucu karbon salımı ise 31,03 kg CO₂/m² yıl olarak hesap edilmiştir. Bu veriler Türkiye için belirlenen karbon salım sınır değerinin çok altındadır. Referans binanın TS 825-2013 Standardına göre projelendirmiş durumuna ait simülasyon verilerinden elde edilen karbon salım miktarı ise 40,53 kg CO₂/m² yıl olarak hesap edilmiştir. LEED SILVER yeşil bina sertifikasına sahip bir binanın karbon salımı bakımından %17,81 oranında daha fazla çevreye duyarlı olduğu belirlenmiştir.

LEED SILVER sertifikalı binanın ortalama %3 oranında daha fazla maliyeti, uzun vadede enerji ve çevre performansı ile kapatılacaktır. Yapılan ekonomik analiz ile referans binanın LEED SILVER sertifikasına ait imalatları için Net Bugünkü Değer (NBD) miktarı 573937931,55 \$ olarak hesaplanmıştır. NBD > 0'dan büyük olduğu için yatırımın yapılması uygun olarak değerlendirilebilir. NBD değişkenliği ülkedeki faiz, enflasyon ve enerji birim fiyatlarındaki artış oranlarıyla doğru orantılıdır. Maliyet çalışması ile LEED SILVER sertifikasına ait yapılan imalatlar için GÖS yaklaşık 2 yıl 7 ay olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde LEED SILVER sertifikasına ait imalatlar için İKO yaklaşık %10,40 olarak hesaplanmıştır. Referans binanın enerji etkinliği ve emisyon salımları ile beraber hem iç karlılık oranına göre hem de NBD ile geri ödeme süresinin de baz olarak alınıp değerlendirilmesinin daha gerçekçi olacağı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma; LEED sertifikası değerlendirme araçlarının farklı iklim bölgeleri için aynı sonuçları vermeyeceğini de göstermektedir. Bu sebeple ülkelerin yeşil bina önceliklerini belirlemesi gerektiği de vurgulanmaktadır. Daha sonraki çalışmalarda; ülkelerin enerji verimli bina önceliklerinin performans değerlendirilmesi yapılabilir. Sertifikalı bina elde etmek için ödenen maliyetlerinin düşürülmesi ile ilgili çalışmalarda yapılabilir. Yurt dışı sertifikasyona ihtiyaç duymadan ve sertifika almak için yapılan ekstra harcamaların olmadığı çevreye olumlu katkı sağlayacak kriterleri içeren, enerjinin ön planda tutulduğu uluslararası norm ve standartlardan da esinlenerek ülkemize özgü yeni standartlar ve yönetmelikler oluşturulmalıdır. LEED sertifikalı bina için oluşan ek maliyetlerde özellikle enerji tüketimini azaltmaya yönelik olanlar çok kısa bir sürede kendisini finanse edebilmektedir. Dolayısıyla hem enerji verimliliğini artırıcı hem de karbon salımını azaltıcı tedbirlerin ek maliyetleri olsa da binanın yaşam süresi boyunca sürekli bir tasarruf sağlamaktadırlar. Bunun için enerji verimliliğini artırıcı tedbirlere yapılan harcamaları ekonomik bir maliyet olarak değil de orta ve uzun vadeli getirisi yüksek bir yatırım olarak değerlendirmek gerekir.

Kaynaklar (References)

1. United Nations Environmental Program (UNEP)., 2020 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/34572>. Erişim tarihi Ekim 4, 2023.
2. Liu J., Chen X., Yang H., Shan, K., Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage, *Applied Energy*, 290, 11673, 2021.
3. Bodansky D., The Paris climate change agreement: a new hope? *The American Journal of International Law*, 110 (2), 288-319, 2016.
4. EU Energy Performance of Buildings Directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en. Erişim tarihi Eylül 5, 2023.
5. European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en. Erişim tarihi Ekim 1, 2023.
6. Haberl J., Cho S., Literature review of uncertainty of analysis methods, *Energy Systems Laboratory, Texas A&M University System*, 23, 2004.
7. Aydın Ö., Canım D.S., Assessment of the usability of energy calculation method (BEP-TR1) and EKB implementation in buildings, *Journal of Architecture and Life*, 2 (2), 265-277, 2017.
8. Resmi Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/04/20100401-5.htm>. Yayın tarihi Aralık 5, 2008.
9. T.C.Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/Eleventh-development-plan.pdf>. Erişim tarihi Eylül 25, 2023.
10. Yıldız Y., Koçyiğit M., A study on the energy-saving potential of university campuses in Turkey, *Engineering Sustainability*, 173 (8), 379-396, 2020.
11. Gazioglu A., An improvement study to reduce heating energy expenditures in the design of an energy efficient building, Master's Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul, 2012.

12. Y Geng., X Han., H Zhang., Shi L., Optimization and cost analysis of thickness of vacuum insulation panel for structural insulating panel buildings in cold climates, *Journal of Building Engineering*, 33,101853, 2021.
13. Elkhapery B., Kianmehr P., Doczy R., Benefits of retrofitting school buildings in accordance to LEED v4, *Journal of Building Engineering*, 33, 101798, 2021.
14. Su Y., Linwei Wang, L., Feng, W., Zhou, N., Wang L., Analysis of green building performance in cold coastal climates: An in-depth evaluation of green buildings in Dalian, China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111149, 2021.
15. Mytafides C.K., Dimoudi A., Zoras S., Transformation of a university building into a zero-energy building in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 155, 98-114, 2017.
16. Chung M.H., Rhee E.K., Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus: A field survey in Korea, *Energy and Buildings*, 78, 176-182, 2014.
17. Rüßen S.E., Topçu M.A., Celep G.K., Çeltek S.A., Rüßen, A., Energy study for university campus buildings: A case study, *Journal of Çukurova University Faculty of Engineering and Architecture*, 33 (2), 83-92, 2018.
18. Ge J., Wu J., Chen S., Wu J., Energy efficiency optimization strategies for university research buildings with hot summer and cold winter climate of China based on the adaptive thermal comfort, *Building Engineering*, 18, 321-330, 2018.
19. Leng H., Chen X., Ma, Y., Wong H.N., Ming T., Urban morphology and building heating energy consumption: Evidence from Harbin, a severe cold region city, *Energy and Buildings*, 224, 110143, 2020.
20. Sadeghi M., Naghedri R., Behzadian K., Shamshirgaran A., Tabrizi M.R., Maknoon R., Customisation of green buildings assessment tools based on climatic zoning and experts judgement using K-means clustering and fuzzy AHP, *Building and Environment*, 223, 109473, 2022.
21. Şirin C., Selimefendigil F., Experimental analysis of a solar desalination system with graphene nanoplatelet-embedded latent heat thermal energy storage unit, *Heat Transfer Research*, 55, 3, 2024.
22. Selimefendigil, F., Şirin C., Enhancing the performance of a greenhouse dryer with natural dolomite powder-embedded latent heat thermal energy storage unit and air-to-air heat recovery system, *Solar Energy*, 262, 111881, 2023.
23. Şirin C., Goggins J., Hajdukiewicz M., A review on building-integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings, *Applied Thermal Engineering*, 120607, 2023.
24. Şirin C., Tuncer A. D., Khanlari Ataollah., Improving the Performance of Unglazed Solar Air Heating Walls Using Mesh Packing and Nano-Enhanced Absorber Coating: An Energy-Exergy and Enviro-Economic Assessment, *Sustainability*, 15, 21, 15192, 2023.
25. İkinci C. E., Building certification methods and a new proposed method: biohamological conformity assessment, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (2), 717-728, 2024.
26. U.S. Green Building Council. <https://www.usgbc.org/leed>. Erişim tarihi Eylül 8, 2023.
27. Koca Ö., An approach for determining energy efficient settlement and building design principles in hot dry and hot humid climate zones, Master's Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul, Türkiye, 2006.
28. Bakırcı K., Özyurt Ö., Yılmaz M., Erdoğan S., Climate and meteorological data for energy studies in Erzurum province., *Journal of Plumbing Engineering*, 95, 19-26, 2006.
29. U.S. Green Building Council-USGBC. [http://www.xn--leedsertifikas-jgc.com/leed-v4-\(2014\).html](http://www.xn--leedsertifikas-jgc.com/leed-v4-(2014).html). Erişim tarihi Eylül 28, 2023
30. TS 825., Thermal insulation requirements for buildings, Turkish standardization institute, Ankara, Türkiye, 2013.
31. ANSI/ASHRAE standard 62.1., Ventilation for acceptable indoor air quality. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, Atlanta, USA., 2013.
32. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/neredeysse-sifir-enerjili-binalar-nseb-icin-rehber-i-99831>. Erişim tarihi Ekim 2, 2023.
33. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru>. Erişim tarihi Şubat 7, 2024.
34. Turkish green building council (CEDBIK)., Green building certification guide for new houses, Ankara, Türkiye, 2013.
35. ASHRAE Handbook Fundamentals (SI), Chapter 19., Energy estimating and modeling methods, Atlanta, USA., 2009
36. Gedik T., Akyüz K.C., Akyüz İ., Preparation and evaluation of investment projects (examination of internal rate of return and net present value methods), *ZKÜ Bartın Journal of the Faculty of Forestry*, 7 (7), 51-61, 2005.
37. Kahraman M.Ü., Techno-economic analysis of solar and wind energy potentials in Kütahya region, Master's Thesis, Dumlupınar University, Institute of Science and Technology, Kütahya, 2018.
38. Afonso P., Cunha, J., Determinants of the use of capital investment appraisal methods: Evidence from the field, *European Applied Business Research Conference (Eabrc)*, Prague Czech Republic, June 8-11, 2009.
39. Ruiz G.R., Bandera C.F., Validation of calibrated energy models: Common errors, *Energies*, 10 (10), 1587, 2017.
40. Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change., <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/2023-2-birim-fiyatlar-170723-20230717105538.pdf>. Erişim tarihi Ekim 2, 2023.
41. Central Bank of Turkey., 2023, Indicative exchange rates, <https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/202310/04102023.xml>. Erişim tarihi Ekim 4, 2023.
42. TurkStat., Consumer Price Index, [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Eylul-2023-49659#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20Kurumsal&text=T%C3%9CFE'deki%20\(2003%3D100,%55%2C30%20olarak%20ger%C3%A7ikle%C5%9Fti](https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Eylul-2023-49659#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20Kurumsal&text=T%C3%9CFE'deki%20(2003%3D100,%55%2C30%20olarak%20ger%C3%A7ikle%C5%9Fti). Erişim tarihi Ekim 4, 2023.
43. Central Bank of the Republic of Turkey Administrative Center., Press Release on Interest Rates (2023-25), <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/en/tcmb+en/main+menu/announcements/press+releases/2023/ano2023-35>. Erişim tarihi Ekim 6, 2023.
44. Palen. <https://www.palen.com.tr/evsel-musteri/satis-tarifeleri>. Erişim tarihi Ekim 5, 2023.
45. Turkish Statistical Institute., 2023, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tabloları>. Erişim tarihi Ekim 5, 2023.
46. Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change., Guide to Energy Efficient Renovation of Public Buildings, 2021. <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/kamu-binalarinin-enerji-verimli-yenilemesine-yonelik-rehber-i-99595>. Erişim tarihi Ekim 5, 2023.
47. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Elektrik-ve-Dogal-Gaz-Fiyatları-I.-Donem--Ocak-Haziran-2022-45567>. Erişim tarihi Ekim 5, 2023.

