



Development of a framework system to perform environmental impact assessment of the construction and utilization of the buildings

Tuğba Erzurum^{ID}, Önder Halis Bettemir*^{ID}

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, İnönü University, 44280, Malatya, Türkiye

Highlights:

- Environmental Product Declaration of construction materials are derived
- Life-cycle analysis of buildings are conducted by 7 environmental performance indicators
- Renewal or repair of the building portions are considered
- Design of the building is revised to reduce the amounts of the environmental performance indicators

Keywords:

- Environmental Product Declaration
- Environmental performance indicators
- Life cycle analysis
- Green building

Graphical/Tabular Abstract

The graphical abstract presents an integrated framework that combines “EPD-based environmental impact assessment,” “cost evaluation,” and “TSE 825-based heating energy analysis for different heating types” to enable targeted design optimization.

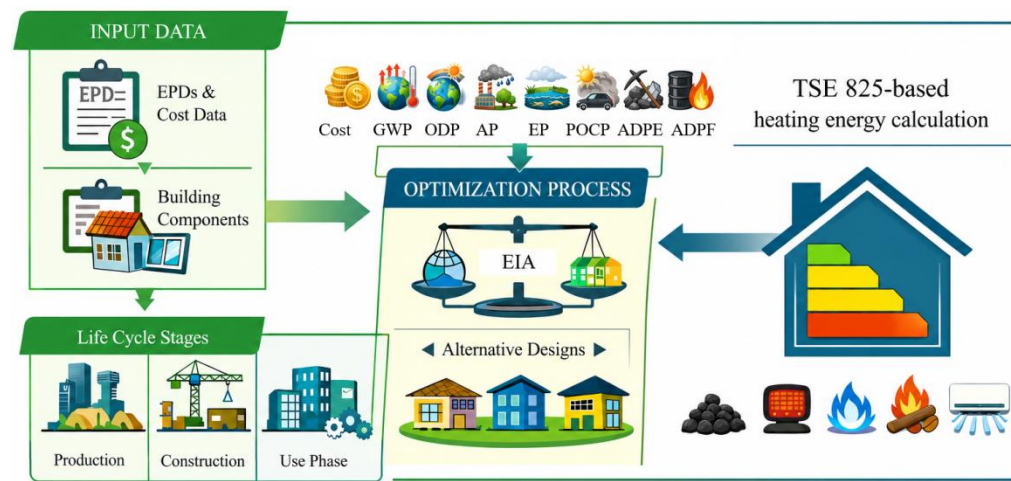


Figure A. Representations of the modules of the developed framework

Article Info:

Research Article

Received: 04.08.2023

Accepted: 28.03.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1338056

Correspondence:

Author: Önder Halis Bettemir
e-mail:

onder.bettemir@inonu.edu.tr

phone: +90 542 218 1111

Purpose: A framework system is developed to evaluate and reduce the environmental impacts that occur during the construction and utilization of buildings by considering the environmental performance indicators and cost of construction materials and energy sources.

Theory and Methods: A method is developed to perform life cycle analysis at the work-item level by evaluating cost and seven environmental impact indicators, and to improve environmental performance through a limited number of design revisions. Environmental impacts are calculated by matching quantity take-off data, construction specifications, and environmental indicator values. The applied method determines, based on the revised building designs, according to which indicator and/or life cycle stage the design yielding the greatest improvement should be selected. The impacts of maintenance and replacement during the building's service life are also considered. In addition, material changes affecting the building envelope are evaluated for five heating types, and their 50-year environmental and cost impacts are calculated, enabling analysis of energy demand variations across different fuel options.

Results: The work items that contributed the most to the environmental performance indicators and cost, as well as the construction alternatives that provide the most improvement for each indicator, are determined; the design is revised, environmental impact analyses are repeated, and the percentage changes in all environmental performance indicators and cost are calculated. As a result, it was determined that the new building design obtained from the analysis made according to the ADPF indicator gave the highest improvement. However, the heating energy analysis of the new building design that gave this result does not give the most appropriate result.

Conclusion: The developed framework facilitates targeted design optimization by focusing on high-impact components, enabling substantial performance improvements with limited intervention.



Binaların yapım ve kullanımı boyunca çevresel etki değerlendirmesini gerçekleştiren çerçeve sistemin geliştirilmesi

Tuğba Erzurum^{ID}, Önder Halis Bettemir*^{ID},

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yapı malzemelerinin Çevresel Ürün Beyanı oluşturuldu
- Binaların yaşam döngüsü analizi, 7 çevresel performans göstergesi kullanılarak gerçekleştirildi
- Çevresel performans göstergelerinin miktarını azaltmak için bina tasarımı revize edildi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 04.08.2025

Kabul: 28.03.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1338056

Anahtar Kelimeler:

Çevresel ürün beyanı,
çevresel performans
göstergeleri,
yaşam döngüsü analizi,
yeşil bina

ÖZ

Bu çalışmada binaların yapım ve kullanım aşamalarında ortaya çıkan çevresel etkilerin değerlendirmesini yapan çerçeve bir sistem tasarlanmış ve faaliyete geçirilmiştir. Bina inşaatlarında kullanılan binlerce yapı malzemesinin 7 çevresel performans göstergesini içeren Çevresel Ürün Beyanı ve bina inşaatı ile ilgili iş kalemlerinin her biri için yapım alternatifleri Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yapım analizlerinden derlenerek oluşturulan veri tabanına kaydedilmiştir. Metraj değerleri, yapım tarifleri ve tariflerdeki malzemelerin Çevresel Ürün Beyanları eşleştirilerek inşaat sürecinin çevresel etki değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapının kullanım ömrü boyunca yenilenmesi veya onarılması gereken iş kalemlerinin çevresel etkileri de değerlendirilmiştir. Buna ek olarak yapının ısı kaybı TS825'e göre hesaplanmış ve kullanımı boyunca ihtiyaç duyulacak ısıtma enerjisi farklı ısıtma türlerine göre hesaplanmıştır. Elde edilen çevresel performans göstergelerine ve maliyete en fazla katkı yapan iş kalemleri belirlenmiş ve her bir çevresel performans göstergesi için en fazla iyileşmeyi sağlayan yapım alternatifleri tespit edilerek tasarım revize edilmiş ve çevresel etki analizleri tekrarlanarak tüm çevresel performans değerlerindeki yüzdelik değişimler hesaplanmıştır. En fazla toplam iyileşmeyi sağlayan alternatif tercih edilerek en az tasarım revizyonu ile en fazla faydanın elde edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen çerçeve sistem sayesinde maliyet etkin ve çevreci yapıların tasarlanması daha az emek ve sürede gerçekleştirilebilecektir.

Development of a framework system to perform environmental impact assessment of the construction and utilization of the buildings

H I G H L I G H T S

- Environmental Product Declaration of construction materials were derived
- Life-cycle analysis of buildings were conducted by 7 environmental performance indicators
- Design of the building was revised to reduce the amounts of the environmental performance indicators

Article Info

Research Article

Received: 04.08.2023

Accepted: 28.03.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1338056

Keywords:

Environmental product
declaration,
environmental performance
indicators,
life cycle analysis,
green building

ABSTRACT

In this study, a framework system to evaluate the environmental impacts that occur during the construction and utilization of buildings has been designed and implemented. The Environmental Product Declaration of thousands of building materials which includes 7 environmental performance indicators are derived from the manufacturers' declarations, and the construction alternatives for each work item of building construction are compiled from the construction analyzes of the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. The environmental impact assessment of the construction process is carried out by matching the quantity take-off values, job descriptions and Environmental Product Declarations of the materials. Moreover, the environmental effects of the work items that need to be renewed or repaired during the life-cycle of the building are also evaluated. Furthermore, the thermal conductivity of the building is evaluated according to TS825 and the heating energy required during the life-cycle of the building is calculated by considering different heating types. The work items that contributed the most to the environmental performance indicators and cost are determined, the construction alternatives that provide the most improvement for each environmental performance indicator are determined, the design is revised and the environmental impact analyzes are repeated and the percentage changes in all environmental performance values are calculated. The proposed method aims to obtain the most benefit with the least design revision by choosing the alternative that provides the most total improvement. Cost-effective and environmentally friendly designed structures will be realized in less effort and time by the developed frame system.

1. Giriş (Introduction)

Çevresel problemler günümüzün en önemli sorunlarından biridir. İnşaat sektörü artan konut taleplerini karşılamak için doğanın ekolojik dengesine zarar vermektedir. İnşaat sektörünün sürdürülebilir olmasının gereklerinden biri kaynak kullanımını kontrol altında tutarak çevresel etkiyi azaltmaktır. Bunun için yapıların tasarım sürecinde sürdürülebilir tasarım kriterlerine dikkat edilmektedir. Yaşam döngüsü analizi (YDA), bir ürün ya da üretim sürecinin tüm girdi ve çıktılarını çevresel performans göstergeleri (ÇPG) biriminde ifade etmektedir. Performans göstergelerinin en önemlileri GWP (*Global Warming Potential*- Küresel Isınma Potansiyeli), ODP (*Ozone Depletion Potential*- Ozon İncelmesi Potansiyeli), AP (*Acidification Potential*- Asidifikasyon Potansiyeli), EP-Freshwater (*Eutrophication potential*- Ötrofikasyon Potansiyeli), POCP (*Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants*- Fotokimyasal Oksidasyon Oluşma Potansiyeli), ADPE (*Abiotic depletion potential for non-fossil resources*- Fossil Olmayan Kaynak Kullanım Potansiyeli), ADPF (*Abiotic depletion potential for fossil resources*- Fossil Kaynak Kullanım Potansiyeli) olarak gösterilebilir [1, 2]. Belirtilen etkenlerle gerçekleştirilen YDA ile inşaat sürecinin çevresel etkileri belirlenir. İnşaat sektörü için YDA; yapım, kullanım ve yaşam sonu için yapılabilirken çevresel etki analizi çalışmaları daha çok işletme aşamasına odaklanmıştır [3-5]. Bu durumun en büyük nedeninin ulusal ve uluslararası düzeyde yürürlükte olan yönetmelikler olduğu değerlendirilmektedir. Yapılar için ısı yalıtım yönetmeliği [6], yağmursuyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri hakkında yönetmelik [7], Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik [8] ve benzeri yönetmelikler yapıların işletme dönemlerinde gerçekleşecek su ve enerji tüketimini azaltmayı amaçlamaktadır. Yapıların inşaat aşamasında ortaya çıkan gömülü enerji ve karbon salınımını doğrudan azaltmayı amaçlayan bir yönetmelik bulunmamaktadır. Buna ek olarak kullanım süresince gerçekleşecek enerji ve su tüketiminin düşürülmesi doğrudan geniş tüketici kitlesinin masrafında azalma sağlayacaktır, ancak inşaat sürecinde gerçekleşecek karbon salınımının ve gömülü enerjinin azaltılmasının doğrudan ekonomik bir katkısı bulunmamaktadır. Bununla birlikte 2026 yılında kısmen yürürlüğe giren Emisyon Ticaret Sistemi Yönetmeliği ile inşaat aşamasında ortaya çıkan karbonun düşürülmesi üzerine çalışmaların artması öngörülmektedir [9].

Günümüzde yapıların işletme dönemindeki gömülü enerjiyi ve karbon salınımını analiz eden birçok araç bulunmasına rağmen AP, EP, ODP, POCP gibi diğer çevresel performans göstergeleri için bir hesaplama aracı bulunmamaktadır. Literatürde binaların yapım aşamasının çevresel etki değerlerinin hesaplanması konusunda az sayıda çalışma bulunmaktadır. Tüm kriterleri ele alan çalışmalar genellikle kısıtlı birimlerin analizlerini yapmıştır. Örneğin; yapının sadece dış kabuğunun, taşıyıcı sisteminin ya da yalıtımının ayrı ayrı gömülü enerji ve gömülü karbon analizi çalışılmıştır [10-12].

Bütünsel bir YDA için yapıda kullanılan tüm yapı malzemelerinin tamamının değerlendirildiği çalışmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca literatürde yapının karbon salınımı ve enerji tüketimi dışında diğer çevresel performans göstergelerini ve bir yapıyı oluşturan bütün yapı malzemelerini bir arada analiz eden bir çalışma da bulunmamaktadır. Yapıların çevresel etkilerinin hesaplanması; sektörde kullanılan yapı malzemeleri hakkında çevresel etki verilerinin kısıtlı olması ve ayrıca yapı malzemelerinin kalitesinin ve yapım alternatiflerinin çok çeşitlilik göstermesi nedenleriyle oldukça zordur.

Mevcut analizlerde inşaat dönemi için kullanılan kaynak genellikle ICE (The Inventory of Carbon and Energy) veritabanıdır [13, 14]. Ayrıca ICE veritabanı, inşaat sektöründe yoğun kullanılan yapı

malzemelerinin gömülü karbon ve enerjilerini kilogram referans biriminde sunmaktadır. Bu nedenle bir inşaat iş kaleminin karbon ve enerji değerini hesaplamak için öncelikle ilgili iş kalemi için kullanılması gereken tüm malzemelerin birim ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Çok fazla yapım alternatifi ve yapı malzemesi seçeneğinin olmasına ek olarak karbon ve enerji değerlerini hesaplamak için birim çevirisinin gerekmesi, inşaat sektörü için çevresel etkiyi değerlendirmeyi daha sistematik biçimde hesaplanmayı gerektirmektedir. Çoklu ortamdan gelen veriler ve veri dönüşümlerinin gerekliliği sadece çevresel etkilerin hesaplanmasını değil aynı zamanda yapım işlerine teknoloji entegrasyonunu da zorlaştırmaktadır [15, 16].

Avrupa birliği ülkelerindeki binalarda enerji tüketimi azalırken ülkemizde tüketim artmaktadır [17]. Dünya genelinde bina yapım ve işletim süreçlerinin enerji, su ve tarımsal alanlar üzerindeki etkisi %40'ın üzerindedir [18]. Ülkemiz en çok sera gazını atmosfere salan 20. ülkedir ve ulusal katkı beyanında 2030 yılına kadar emisyonlarını en fazla %21 oranında azaltacağını taahhüt etmiştir. Climate Action Tracker (CAT) Türkiye'nin Paris taahhüdünü "kritik derecede yetersiz" olarak değerlendirmiş ve tüm ülke hedeflerinin Türkiye'nin hedeflerine yakın olması halinde ısınmanın 4°C artacağını hesaplamıştır [19]. Karbon salınımlarını azaltmak amacıyla oluşturulan 'Karbon Ticaret Sistemi' henüz ülkemizde gönüllü yürütülse de hem şirketler hem de bankalar ülkemizin taraf olduğu uluslararası sözleşmelerden dolayı bu sisteme hazırlık yapmaktadır. Bu nedenle yapılardan kaynaklanan emisyonların düşürülmesine rehberlik edecek daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat literatürde, yapım projelerinin bütün çevresel performans göstergelerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalar yapının sadece kaba inşaatla kullanılan malzemeleri veya birkaç ince iş kaleminin karbon ve enerji değerlerini analiz ettiği için ortaya konan sonuçlar bütün yapıyı temsil edememektedir.

Binaların inşaatı ve kullanımı sırasında oluşan olumsuz çevresel etkilerin değerlendirilmesinde yapı malzemelerinin tamamının üretim sürecindeki çevresel etkilerinin bilinmemesi, çevresel etki değerlendirmesinde çok fazla etkenin bulunması, iş kalemlerinin yapımı için çok fazla yapım alternatifinin olması, binaların farklı mimarilerde inşa edilmesi karşılaşılan güçlüklerin bazılarıdır. Belirtilen nedenlerden dolayı bütünsel biçimde binaların inşaat ve kullanımı boyunca çevresel etkilerinin analizini yapacak yöntem ve araçlar geliştirilmemiştir. Bu çalışmada, belirtilen hesaplama güçlüğü en aza indirerek çevresel etki analizini yapan, çevresel etki değerlerinin en olumsuz olduğu iş kalemlerini belirleyerek maliyet etkin biçimde çevreye verilen zararı azaltacak tasarım revizyonlarını öneren bir çerçeve sistem geliştirilmiştir. Buna ek olarak mevcut YDA sonuçlarına göre yapının incelenen tüm hesap kriterlerinde, yapı tasarımında en az revizyonla en yüksek toplam iyileşmeyi sağlayabilecek bir yol haritası oluşturulmuş ve vaka çalışması ile yöntem uygulanmıştır. Makalenin ikinci bölümünde konu ile ilgili kaynak taraması sunulmuş, üçüncü bölümde yapının çevresel performans göstergelerinin, maliyetin ve ısı analizinin hesaplama süreci açıklanmıştır. Geliştirilen çerçeve sistemin uygulandığı vaka çalışması dördüncü bölümde sunulmuştur. Beşinci bölümde geliştirilen yöntemin uygulanması ile çevresel etki değerlerinde sağlanan iyileştirmeler değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Son bölümde çalışmanın katkısı ve sonuçlar sunulmuştur.

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Yapı malzemelerinin üretim ve yapıların inşası aşamasındaki çevresel etkilerin belirlenmesi önemli bir çalışma alanıdır. Literatürde binaların çevresel etkisi sadece işletme, sadece inşaat ve inşaat ile

işletme dönemlerinin beraber incelendiği çalışmalar yer almaktadır. İlgili literatür bu durum dikkate alınarak alt başlıklar halinde sunulmuştur.

2.1. İşletme dönemi (Operational period)

Fay vd. [12] Melbourne kentinde müstakil bir evin yaşam döngüsü enerjisini araştırmışlar ve yapının yalıtım katmanlarının artırılması ile ortalama 12 yıl içinde yaşam döngüsünde gömülü enerjinin geri ödendiğini belirlemişlerdir. Ayrıca yapının 50 yıllık yaşam dönemi için toplam enerji tüketimi 76 GJ/m^2 olarak bulunmuştur. Ek yalıtım yapılarak evin toplam enerjisinin $3,4 \text{ GJ/m}^2$ azaltılabileceği fakat elde edilen tasarrufun 100 yıllık yaşam döngüsü boyunca toplam gömülü ve işletim enerjilerinin %6'sından az olacağı ortaya konulmuştur. Öztok ve Menlik [20], ülkemizdeki 4 ısıtma bölgesi için TSE 825'e göre farklı fosil enerji kaynağı kullanımını yakıt maliyetini, sera gazı salınımını ve kurulum maliyetini dikkate alınarak incelemişlerdir. Yapılan ısı hesapları sonucu arasından doğalgazın çevreye en az zarar verdiği belirlenmiştir. Süt vd. [21] analitik hiyerarşi ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak kampüs içi yeşil ulaşım alternatiflerini farklı teknolojilere sahip seçenekler belirleyerek değerlendirmişlerdir. Yakıt türü, motor gücü, kapasite, enerji verimliliği, engelsiz ulaşım gibi kriterler göz önüne alınmış ve elektrikli araç tavsiye edilmiştir. Özeler vd. [22] enerji verimli giydirme cephe sistemleri ve yapı kabuğu konularının yaşam döngüsü çalışmalarında baskın araştırmayı oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Akgül ve Dino [23], iklim değişikliğinin konutlar üzerindeki etkisini farklı karbon salınım seviyelerini temsil eden senaryolar kullanarak 10 katlı bir TOKİ binasını enerji simülasyonu üzerinden araştırmışlardır. Sıcaklık artışının yapılarda soğutma için gereken enerji miktarının ve yapı kullanıcılarının ısıl konforunun üzerinde etkili olabileceği, daha düşük karbon açığa çıkaran elektrik üretim sistemlerinin karbon ayak izini azaltmada önemli olduğu ortaya konmuştur. Akköse vd. [24], iklim değişikliğinin eğitim binaları üzerindeki enerji tüketimi ve ısıl konforu etkisini yapıdaki pencere özelliklerinin yapının performansı üzerine etkisi ile karşılaştırarak incelemişlerdir. Yapıda tercih edilen pencere özelliklerinin, yapının enerji performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Sunulan iyileştirme seçenekleri sonucunda tüketilen toplam enerji yaklaşık %50 azalmıştır. Akköse vd. [25] iklim değişikliği ve kentsel ısı adasının yapılar üzerindeki etkisini enerji kullanımı, küresel ısınma potansiyeli ve termal konfor performans göstergelerini temel olarak araştırmış ve bu etkiyi %50 oranında azaltan güçlendirme senaryoları sunmuştur. Dino ve Akgül [26] iklim değişikliğinin belirtilen üç performans göstergesi üzerindeki etkilerini 4 farklı iklim özelliğinde inşa edilmiş örnek bir yapı üzerinde araştırarak soğutma enerjisi değerlerinin kullanıcı konforu üzerinde etkili olduğunu ve elektrik üretiminde salınan karbonun azaltılmasının iklim değişikliği üzerinde etkili olduğunu belirlemişlerdir.

2.2. İnşaat dönemi (Construction period)

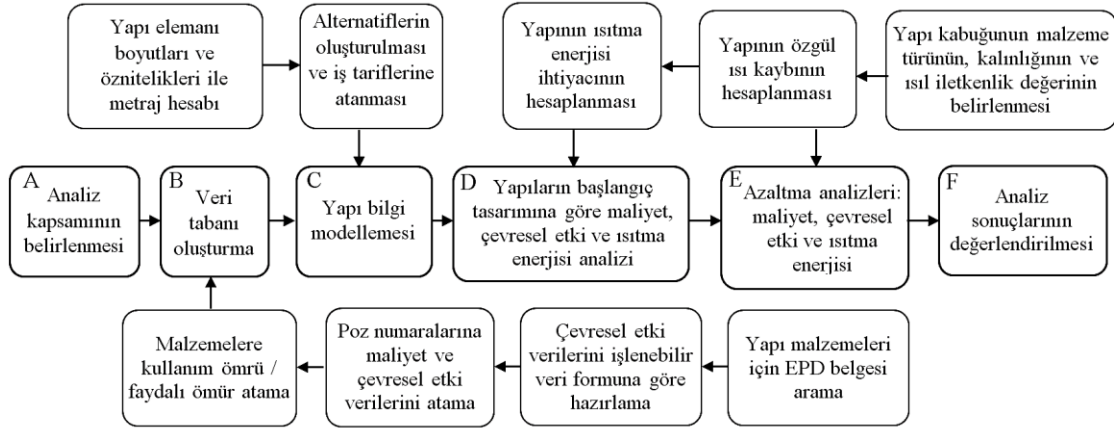
Son yıllarda yapılan çalışmalar yapıların üretim dönemini temsil eden gömülü çevresel değerlerinin, tüm yaşam dönemi çevresel değerlerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmektedir [27, 28]. Asif vd. ahşap, alüminyum, cam, beton ve seramik gibi malzemeleri üzerinden yarı müstakil bir evin gömülü enerji ve gömülü karbon miktarını incelemişlerdir. Toplam gömülü enerji miktarı $227,4 \text{ GJ}$ olan malzemelerin %61'ini ve malzemeler arasında en yüksek karbondioksit emisyonunu beton oluşturmaktadır [29]. Karimpour vd. [30], ılıman bölgelerde inşa edilen yapılarıdaki yaşam döngüsü enerji analizlerinde gömülü enerjinin toplam enerjinin %35'ini oluşturmasıyla göz ardı edilmeyecek bir paya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Shukla vd. [31] kerpiç evlerin geleneksel binalara göre daha az gömülü enerji ve karbona sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Dixit vd. [32] gömülü karbon çalışmalarında tutarlı ve karşılaştırılabilir bir veri tabanının geliştirilmesi için literatür analizi yapıp ve mevcut çalışmaların doğruluğunu geliştirmek için tek tip hesaplama yönteminin tanımlanması gerektiğini vurgulamışlardır. Ekundayo vd. [33] gömülü karbon tahmini için bazı açık kaynaklı araçları karşılaştırarak bu araçların sınır tanımlarında, ölçüm birimlerinde ve metodolojik hesaplamalarda farklılıklarının bulunduğunu belirtmişlerdir. Gömülü karbon tahmini için inşaat endüstrisi tarafından kabul edilen bir veri yapısı ve ortak yöntemin gerekli olduğunu, ayrıca bir veritabanı ile metraj listesini eşleştirip sürdürülebilirlik analizi yapan bir uygulamayla sorunun çözülebileceğini belirtmiştir. Marosky vd. [34] CAD ve çevresel değerlendirme araçları arasında veri aktarım ara yüzlerinin geliştirilmesini başlatmak için, "CAD-SolidEdge" ve "LCA-SimaPro" arasında karşılıklı veri aktarımını açıklayan bir algoritma geliştirmiştir. Erzurum ve Bettemir [35, 36] örnek bir kırsal yapıyı iş kalemlerine ayırıp gömülü enerji ve karbonu her bir iş kaleminin poz tariflerini hazırlayıp hesap tablosu temelli bir uygulama ile metraj verilerinden malzeme miktarlarını elde ederek hesaplamışlardır.

Yapılarda işletme yaşam döneminde kullanılan enerji üzerine yapılan çalışmalar işletme döneminde tüketilen enerjiyi azaltırken, bu değişimin inşaat dönemindeki etkilerinin araştırılmasına yol açmıştır. Fakat yapıların inşaat yaşam dönemi için yapılan analizler farklı veri kaynakları, yapılan kabuller ve nihayetinde hesaplanan sonuçlar arasındaki farklar gibi zorluklar sebebiyle inşaat dönemindeki çevresel etkileri yapılan YDA'lara dâhil edilmemiştir [37, 38]. Yapıların gömülü çevresel etkilerini karbon ve/veya enerji açısından araştıran çalışmalar bulunmaktadır [21, 39, 40]. Fakat bu etkilerin belirlenmesinde GWP'nin tek kriter gibi kullanılması AP, EP, ODP gibi diğer çevre göstergelerinin etkisini bastırabilir [41]. Küresel ısıma potansiyeli, asidifikasyon, ozon oluşumu, ötrofikasyon şeklinde farklı çevresel göstergeler bulunmaktadır [42, 43]. Literatürde karbon ve enerji dışındaki çevresel etki göstergelerini araştıran oldukça az sayıda çalışma vardır [26, 44]. Çevresel etkileri araştıran çalışmalar az sayıda olsa da ardından bu etkilerin azaltılmasına yönelik çalışmaları da teşvik etmiştir. Pomponi ve Moncaster [45] yapıda gömülü karbonu azaltmak için düşük çevresel etkiye sahip malzeme kullanımının ve yapının tasarımında yapılan iyileşmelerle malzeme verimliliğinin sağlanması gerektiğini belirtmektedirler.

2.3. İnşaat ve işletme dönemi (Construction and operational period)

Guan vd. [10], yapıların inşasında ve gerekli malzemelerin üretiminde harcanan enerjinin %10-30 arasında, işletme enerjisinin %65-90 arasında, yıkım için gereken enerjinin ise %4 civarında olduğunu hesaplamıştır. Adalberth [11] konut yapılarının inşaat ve 50 yıllık kullanım sonucu toplam enerji tüketimini $7600\text{--}8800 \text{ kWh/m}^2$ olarak hesaplamıştır. Bettemir [46], geçici afet yapılarının inşası ve kullanım süresi boyunca karbon salınımını ve maliyet karşılaştırmasını yapmıştır. Sartori ve Hestnes [47] geleneksel ve düşük enerjili binalar arasındaki enerji kullanımını araştırmak için 60 vaka çalışmasını inceleyerek düşük enerjili binaların toplam yaşam döngüsü enerjisinde azalışa, gömülü enerjide artışa neden olduğunu belirlemişlerdir. Bir binanın yaşam döngüsü karbonunu azaltmayı amaçlarken, sadece işletme dönemindeki karbonu değil aynı zamanda inşaat sürecindeki karbonu da azaltmaya odaklanılması önerilmiştir. Adalberth vd. [48] sera gazı potansiyeli, asidifikasyon, ötrofikasyon, fotokimyasal ozon oluşturma potansiyelleri ve insan toksisitesi çevresel etkilerini 4 yapı için 50 yıllık yaşam döngü süresini temel alarak analiz etmiştir. Toplam etkinin yaklaşık %70-90'ını oluşturan işletme aşamasının en yüksek çevresel etkiye sahip olduğu, ikinci baskın zaman aşamasının, %10-20 ile yapı ve tesisat malzemeleri imalatının olduğu, toplam küresel ısınma potansiyelinin yaklaşık $1,5 \text{ tonCO}_2$ eşdeğeri/ $\text{m}^2/50$ yıl olduğu, toplam asitlenmenin yaklaşık $8\text{--}10 \text{ kgSO}_2$ eşdeğeri/ $\text{m}^2/50$ yıl, ötrofikasyonun her bina için yaklaşık $4\text{--}5$



Şekil 1. Analizin temel akış şeması (Basic flowchart of the analysis)

kg NO₃ eşdeğeri/m²/50 yıl olduğu hesaplanmıştır. İşletme sürecindeki toplam fotokimyasal ozon oluşumunun yaklaşık %75-80'inin %70'i ısıtmadan kaynaklanan enerji kullanımı oluşturmaktadır [48]. Bettemir ve Erzurum geçici afet yapılarının zemin türü ve temel derinliği ilişkisini incelemiş ve yapıların yer seçimine bağlı olarak temel işlerinin gömülü enerji ve karbon emisyonunun %60'a kadar azaltılabileceği görülmüştür. Bununla birlikte kış şartlarının göreceli olarak daha ılıman olduğu düşük kotlu bölgelerin tercih edilmesi ise ısıtma enerjisini %50'ye yakın düşürebildiği ve inşaat + işletme dönemi dikkate alındığında en düşük çevresel etkinin uzun dönemli kullanımda ılıman bölgelerde derin temel tercih edilerek yapılacak afet konutlarında görüleceği belirlenmiştir [49].

2.4. Motivasyon (motivation)

Düşük çevresel etkiye sahip alternatif yapı malzemelerinin kullanımını araştıran çalışmalar enerji ve karbon göstergesi üzerinden yapıldığından [50, 51], diğer çevresel etki göstergeleri analizlere dâhil edilmemiştir ve bu göstergeleri içeren bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra, yapılarda kullanılan iş kalemlerine olası bütün alternatiflerin atanmasıyla elde edilen yeni yapı tasarımlarının çevresel etkileri nasıl değiştireceği konusunda da bir literatür boşluğu bulunmaktadır [52]. Geçici afet yapıları üzerine gerçekleştirilen iyileştirme analizleri bulunsu da binaların tamamını kapsayacak bütüncül bir çalışma bulunmamaktadır [53]. Bu çalışmada önerilen alternatifler kapsamında uygulanabilir farklı iş kalemlerinin optimizasyonu sonucu sadece maliyetin ve karbonun değil 8 farklı göstergenin de en yüksek iyileşme miktarları farklı yaşam dönemleri için hesaplanarak belirtilen literatür boşluğunun giderilmesi hedeflenmektedir.

3. Yöntem (Methodology)

Yapıların tasarım sürecinde çevresel etkilerini azaltan sistematik bir yöntem literatürde bulunmamaktadır. Var olan çalışmalar çoğunlukla belirli iş kalemlerine yoğunlaşmış sadece karbon emisyonu ve gömülü enerji ile sınırlıdır. Bu çalışmada, belirtilen literatür boşluğunu doldurmak için yapı projelerinin yaşam döngüsü analizini tüm iş kalemleri için maliyet ve 7 çevresel etki faktörünü inceleyerek gerçekleştiren ve elde edilen değerler ışığında çevresel etkileri en az tasarım revizyonu ile iyileştiren bir çerçeve sistemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Belirtilen amaç doğrultusunda, projelerin metraj verilerini yapı tarifleri ile eşleştirerek çevresel performans göstergelerini ve inşaat maliyetini hesaplayan bir sistem geliştirilmiştir. Hesaplamalar sayesinde yapının maliyet ve çevresel performans göstergelerini en çok etkileyen sıcak noktalar ve ilgili iş

kalemlerinin daha düşük çevresel etkiye sahip alternatifleri belirlenip tasarım güncellenerek yapıdaki iyileşmeler analiz edilecektir. Ayrıca analizlerde sadece karbon ve enerji göstergeleri değil aynı zaman da asidifikasyon, ötrofikasyon gibi diğer çevresel performans göstergeleri de hesaplanabilecektir. Çalışmada uygulanacak yöntemin detayları, çalışmanın kapsamı ve kısıtları bu bölümde sunulmaktadır. Yapılan analizlerin temel işlem adımları Şekil 1'de sunulmuştur.

Şekil 1'de verilen harf notasyonuna göre çalışmanın genel akışı sırasıyla aşağıdaki bölümler altında yürütülmektedir:

A. Analiz kapsamının belirlenmesi: Yapıda 50 yıllık kullanım ömrü boyunca onarım, yenileme gibi nedenlerle oluşan malzeme kullanımlarının ve malzeme seçiminin hem gömülü çevresel etkiler üzerindeki etkisini hem de enerji kullanımına etkisini gözlemlemek için analizler iki dönem için yapılacaktır. Birincisi "inşaat" yaşam dönemi, yapıyı inşa etmek için gereken yapı malzemelerini ifade eder. İkincisi "inşaat+işletme" yaşam dönemidir. İşletme/kullanım dönemi; yapıda kullanılan malzemelerin yenilenme, değiştirme ve onarım benzeri sebeplerle değişimini ve yapıda kullanım döneminde tüketilen enerjiyi temsil etmektedir. Yapıda kullanılan malzemelerin kullanım ömürlerinin etkisini de belirlemek amacıyla iki dönem için de analizler yapılır. Örneğin, yer kaplaması iş kaleminin inşaat döneminde etki yüzdesi düşükken, yapı kullanımında yenilenme süresi kısa olduğundan dolayı yer kaplaması iş kalemi diğerlerine göre daha çok yenilenir ve bu nedenle 'işletme' dönemindeki etki oranı artar.

B. Veri tabanı oluşturma: Bu aşama yapı malzemeleri için EPD belgesi derleme, derlenen belgelerdeki verileri malzemelerin poz numaralarına atama ve bu iş kalemlerine faydalı ömür atama adımlarından oluşmaktadır. Bu makalenin ön çalışması olarak inşaat sektöründe kullanılan yapı malzemelerinin çevresel performans göstergelerinin ve maliyetinin değerini sunan bir veri tabanı oluşturulmuştur [54]. Bu veri tabanındaki malzemeler ve iş tarifleri 'Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının (CSB) 2022/3 (01.07.2022 tarihli) birim fiyat analizi' listesi ile sınırlanmıştır [55]. Hesaplamalarda EPD belgelerinden elde edilen A1-2-3 dönemine ait çevresel performans göstergelerine ait veriler kullanılmıştır. Veri tabanında, poz numaralarına birim iş kalemlerine GWP, ODP, AP, EP, POCP, ADPE, ADPF çevresel performans gösterge değerleri ve maliyet değeri atanmıştır. Ayrıca iş kalemlerine, faydalı ömür atanarak kullanım sırasında gereken yenileme sayısı ve yenilenmenin çevresel etkisi analiz sonuçlarına eklenerek 'inşaat+işletme' dönemi yaşam döngüsü analizinde malzemenin etkisi hesaplanır. Bu sayede her bir birim pozun bir diğer ifadeyle bir birim işin çevresel ve maliyet etkisi farklı yaşam dönemi kapsamına göre analiz edilebilecektir.

C. Yapı bilgi modellemesi: Yapıların metraj hesabının yapılması ve iş tariflerinin oluşturulması işlemidir. Metraj hesaplamaları yapının geometrisi ile yapısal ve mimari elemanlar ilişkilendirilerek gerçekleştirilmektedir [56-59]. Bu aşamada metraj özetinde bulunan her bir iş kalemine poz numarası atanır ve ardından iş kalemlerine alternatifler oluşturulur. Malzeme zayıfları da dikkate alınarak malzeme miktarları hesaplanır.

D. Yapıların başlangıç tasarımına göre yaşam döngüsü ve ısıtma enerjisi ihtiyacı analizi: Yapıların çevresel etki göstergelerinin, maliyetinin ve ısıtma enerji miktarlarının başlangıç tasarıma göre hesaplanmasıdır. Hesaplanan 8 gösterge, “inşaat” ve “inşaat+işletme” yaşam dönemlerinin her ikisi için de ayrı ayrı yapılır. Ayrıca TS825’e göre yapının ısı kaybı ve enerji ihtiyacı hesaplanır ve bu ihtiyacı karşılayan 5 farklı ısıtma türünün kullanım miktarı bulunarak yakıt miktarlarının karbon, enerji ve maliyet değerleri hesaplanır [6, 60]. Bu aşamada belirlenen değerler, analizin iyileşmesini hesaplamak için karşılaştırmaya temel olarak kullanılmaktadır.

E. Yapıların çevresel etki, maliyet ve enerji ihtiyacı azaltma analizi: Bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmanın uygulanması ile yapı tasarımının en az revizesi ile yapının çevresel etkisini en yüksek etkide azaltan tasarımın elde edilmesi hedeflenmektedir. Çevresel performans göstergeleri ve maliyeti azaltmak için yapıda kullanılan yapı malzemelerine alternatif malzemeler atayarak bunun malzemeden ve ısıtma enerjisinden kaynaklanan çevresel performans göstergeleri ve maliyet üzerindeki etkisinin araştırılması aşağıda sunulan işlem adımlarından oluşmaktadır.

- Yapının “inşaat” yaşam dönemine göre yapılan hesaplarında maliyeti ve çevresel performans göstergelerinin her birini en çok etkileyen ilk 10 iş kalemine alternatif atanması ve 8 göstergenin her birini azaltan 8 yeni yapı tasarımına sahip yapıların tüm göstergelerinin iki yaşam dönemi için yeniden hesaplanması,
- Yapının “inşaat+işletme” yaşam dönemine göre yapılan hesaplarında maliyeti ve çevresel performans göstergelerinin her birini en çok etkileyen ilk 10 iş kalemine alternatif atanması ve 8 göstergenin her birini azaltan 8 yeni yapı tasarımına sahip yapıların tüm göstergelerinin iki yaşam dönemi için yeniden hesaplanması,
- Önceki adımlarda her iki yaşam dönemi için göstergelerde azalma veren 16 yeni yapının iyileşme yüzdeleri D aşamasında belirlenen değerlerle karşılaştırılıp hesaplanarak yaşam döngüsü matrislerinin oluşturulması ve en çok iyileşmeyi sağlayan yaşam dönemi ve göstergenin belirlenmesi,
- Alternatif atanan iş kalemlerinden dolayı oluşan 16 yeni yapı tasarımının her birinde 5 farklı ısıtma türünü için ısıtma enerjisi hesabı ile kullanılan yakıtın enerji, karbon ve maliyet değerleri hesaplanarak değişen yapı tasarımlarının enerji ihtiyacındaki etkisinin belirlenmesi.

Alternatifler, göstergeleri en çok etkileyen iş kalemleri ile değiştirilerek 8 göstergedeki iyileşme oranları hesaplanır. Yapının başlangıç tasarımını oluşturan iş kalemlerinin etkisi ‘inşaat’ ve ‘inşaat+işletme’ dönemleri için değişiklik gösterebileceğinden dolayı iki dönem için de 8 göstergenin her birini en çok etkileyen 10 iş kalemi belirlenir. Bu 10 iş kalemi içerisinde yapının statik hesabında değişime sebep olabilecek beton ve donatı gibi iş kalemlerine alternatif atanmamıştır. Bunun yanı sıra 10 iş kaleminden alternatif olmayanlar ve/veya en uygun seçeneği kendisi olanlar da alternatifsiz olduğundan 8 göstergenin her biri için değiştirilen iş kalemi sayısı değişkenlik göstermektedir. Belirlenen iş kalemlerine alternatif atanırken hesaplanan göstergenin değerini en çok azaltan iş kalemi ile yapı tasarımı yenilenir. Alternatif iş kalemlerinin atanması ile oluşan yeni yapı tasarımının 8 göstergesi de yeniden hesaplanır. Bunun sebebi 8 göstergedeki birini azaltmak için değiştirilen iş kaleminin bütün göstergelerdeki birim değerlerinin değişmesidir. Örneğin AP göstergesini azaltmak için, AP’yi en çok etkileyen değişime uygun ilk

10 iş kalemine alternatifler oluşturulur. İş kaleminin AP göstergesi dikkate alarak yapılan tasarım değişiklikleri hem AP göstergesini hem de EP, ADPF, POCP gibi kalan 7 göstergeyi ve inşaat maliyetini de değiştirmektedir. İş kalemlerinin değişimi sonucu her bir göstergenin en iyi sonucu veren yani en düşük sonucunu veren yapı tasarımları ortaya çıkmaktadır. Bu yeni yapı tasarımlarının da ‘inşaat’ ve ‘inşaat+işletme’ yaşam dönemleri için 8 göstergeyi içeren analizleri yeniden yapılır. Bir başka ifadeyle, her bir göstergeyi azaltmak için farklı yeni yapı tasarımları oluşmaktadır ve her bir yeni yapı tasarımının yeniden iki yaşam dönemi için çevresel etki analizi yapılır. Elde edilen analiz sonuçlarıyla yeni yapı tasarımlarının başlangıç yapı tasarımına göre iyileşmesini veren yaşam döngüsü matrisleri elde edilir ve uygulanan algoritma sona erer. Son olarak elde edilen yeni yapı modellerinde yapının dış kabuğunu etkileyen değişimler enerji ihtiyacında değişikliğe sebep olduğundan dolayı, yeni yapı tasarımlarına 5 farklı ısıtma türü için gereken yakıt miktarı 3. ısıtma derece-gün bölgesine göre hesaplanarak bu yakıtın karbon, enerji ve maliyet değerleri belirlenir. Bu sayede yapının çevresel performans göstergeleri temelinde yeniden modellenmesi ile enerji ihtiyacındaki değişim farklı ısıtma türlerine göre enerji, maliyet ve karbon indisleri için analiz edilir.

F. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi: Analiz sonuçlarının iyileşme yüzdeleri, en yüksek iyileşmeyi hangi hesap kriterinin ve yaşam döneminin sunduğu, en fazla iyileşmeyi sunan tasarımın yapının ısıtma enerjisindeki ve ısıtma türündeki değişiminin çevresel ve mali etkisi bütüncül bir şekilde değerlendirilir. Bu değerlendirme ile ön tasarım aşamasında yapıların çevresel etkisini azaltacak strateji farklı göstergelere, yaşam dönemine ve verilere göre araştırılır.

Yapıların YDA için öncelikle çevresel etki analizlerinde kullanılan performans gösterge verilerine ihtiyaç vardır. Bu veriler EPD belgelerinden elde edilmiştir ve bu belgeleri geliştiren çeşitli EPD operatörleri mevcuttur. Bu operatörler The International EPD System, Institut Bauen und Umwelt e.V., BRE Global Ltd, INIES, Bau EPD GmbH, Aenor ve EPD Norway’dır. Bu kuruluşlar tarafından yayınlanan EPD belgelerine “Global Construction Products- LCA Database” [61] ve “The International EPD System” [62] veritabanlarından erişilmiştir.

Çalışmada çevresel performans göstergeleri ve maliyet değerleri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının inşaat yapı malzemeleri poz numaralarına atanmıştır. Bu sayede, malzemelerin çevresel etkilerinin hesaplanması için sistematik bir yöntem oluşmuş ve yapı malzemesi çeşitliliği sınırlandırılmıştır. Bunun yanı sıra hesaplamalarda poz numarasının kullanımı uzun iş tanımlarının yerini alarak araştırmacıların erişebileceği malzeme kodları şeklinde kullanılmıştır. Projelerde kullanılan iş kalemlerinin yapım tarifleri, bakanlığın birim tariflerinden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bu birim tariflerde yapı malzemesinin yanı sıra makine ve işçilik miktarları da bulunur. Bu makalede sadece yapı malzemelerinin çevresel performans göstergeleri ve maliyeti hesaplanmıştır. Birim tariflerde bulunan makine ve işçilik miktarları sadece maliyet kriterine dâhil edilerek bunların çevresel etkileri hesaplanmamıştır. Ayrıca literatür taraması bölümünde de verildiği gibi analizlerde yapının kullanım süresi 50 yıl olarak kabul edilmiştir. İş kalemleri, bu kalemlerin alternatifleri ve kriterlerin birim değerleri Erzurum [63] tarafından yapılan çalışmada detaylandırılmıştır. Yapının ‘inşaat’ dönemi analizinde iş kalemlerinin maliyet ve çevresel etki hesapları yapının sadece ilk inşasında kullanılan malzemeleri içermektedir. Fakat ‘inşaat+işletme’ dönemi analizinde, hesaplar 50 yıl için yapılır ve iş kalemlerinin hem yapının ilk inşasındaki hem de yapının 50 yıllık kullanımı esnasında yenilenmesindeki etkileri analize dâhil edilir. Hesaplamalarda elektronik tablo temelli uygulama kullanılmıştır.

4. Vaka Analizi (Case Study)

Çalışmanın bu bölümünde yöntem kısmında belirtilen işlemler örnek bir yapı üzerinde analiz edilmiştir.

4.1. İncelenen Yapı (Analyzed Building)

Bu makalede İnönü Üniversitesi OSB Meslek Yüksekokulu Derslik bloğu analiz edilmiştir (Şekil 2). Derslik bloğu, 1326 m² zemin oturma alanına ve 4296,98 m² toplam inşaat alanına sahiptir. Belirtilen yapı alüminyum dış cephe kaplaması ve alüminyum pencere doğramalarına sahiptir. Buna ek olarak gösterişli olarak nitelendirilebilecek yer döşemesi ve asma tavan imalatlarına sahiptir. Seçili binanın tasarımında kullanılan malzemeler hem eğitim binalarına hem de işyeri ve ticaret merkezlerinin tasarımı ile benzerlik göstermektedir. Yaygın biçimde uygulanma olasılığının olması ve revize edilerek çevresel etki değerlerinin azaltılabileceği iş kalemlerine sahip olması nedeniyle vaka çalışması olarak seçilmiştir.



Şekil 2. Analizi yapılan bina (The analyzed building)

Yapının iş kalemleri ile metraj listesindeki “sıra no” ile belirtilen numaralandırmaları ve poz numaraları, yapıda kullanılan malzeme miktarları ve tanımlanan kullanım ömürleri, analizin tamamında kullanılan poz numaralarının birim çevresel performans gösterge değerleri ve birim maliyet değeri verilerinin kaynakları bu makalenin veri kaynağını oluşturan çalışmalarda sunulmuştur [53, 63]. Çalışmada iş kalemleri, sıra numaraları ve poz numaraları ile birlikte temsil edilmektedir.

4.2. Yapının 'İnşaat' Dönemi için Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Analysis for the 'Construction' Period of the Building)

Derslik bloğunda imal edilen yapıların ‘sıra no’ notasyonlarına göre çevresel performans göstergesi ve maliyet sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur. Tabloda italik yazılan hücreler ilgili göstergesi (sütunu) en fazla yükselten ilk 10 iş kalemini belirtmektedir. Sütunlar, iş kaleminin gösterge değerini ve o değerin toplamdaki etki yüzdesini temsil edecek şekilde ardışık sunulmaktadır. Tablo 1’de belirtilen göstergelerin tamamını en çok etkileyen iş kalemleri beton ve donatıdır. Bunu genel olarak doğrama imalatı, kalıp ve duvar/yer kaplamaları takip etmektedir. Tablodaki değerler malzemelerin inşaat yaşam dönemindeki etki analizi hesaplamalarının sonucunu temsil etmektedir. Bu hesaplar, yapının inşaatında başlangıçta bir defa kullanılan iş kalemlerinin maliyet ve çevresel etkilerinin toplanmasıyla yapılır. Birim alan gösterge değerleri: Maliyet 305,16 \$/m², GWP değeri 453,72 KgCO₂/m², ODP değeri 3,24E-05 KgCFC11/m², AP değeri 1,88 mol H⁺/m², EP değeri 0,11 KgP/m², POCP değeri 0,67 KgNMVOC/m², ADPE değeri 21,73 KgSb/m² ve ADPF değeri 4605,45 MJ/m² olarak hesaplanmıştır.

Her bir kriter için en yüksek etkiye sahip iş kalemleri yaşam dönemlerine göre Tablo 2’te gösterildiği gibi önce sıralanmış ve

ardından Tablo 3’te gösterildiği gibi her bir iş kalemine alternatifler üretilerek her bir gösterge değerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Tablo 3’de her bir göstergesi en çok etkileyen 10 iş kalemi içinden alternatif iş kalemi üretilenler sunulmuştur. Alternatifler belirlenirken yapının statisini etkileyebilecek beton, donatı ve alüminyum giydirme cephe kaplama kalemleri kapsam dışı tutulmuştur. Bunun dışında kalıp imalatı için kullanılan ahşap kalıptan daha düşük çevresel etkisi olan iş kalemi seçeneğinin bulunmaması gibi durumlarda alternatif üretilmemiştir. Bu sebeple her bir gösterge için farklı sayıda iş kalemi güncellenmiştir. Tablo 3’de verilen 8 göstergenin her birini en çok etkileyen iş kalemleri için maliyet kriteri dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler ve sonuçları Tablo 2 ve 3’te sunulmuştur. Tablo 3’de en yüksek değere sahip iş kalemi ve yerine önerilen alternatifi alt alta gösterilmektedir. İlk satır iş kaleminin mevcut değerini ikinci satır önerilen alternatifi değerini sunmaktadır. Poz No sütununda, iş kaleminin ve alternatifinin poz numarası, dördüncü sütunda birimi ve diğer sütunlar ise göstergelerin mevcut iş kalemindeki ve alternatifindeki birim değerleri sunulmaktadır. Poz numaraları kullanılarak ÇŞİDB’nin verilerinden ulaşılabilmektedir [55].

İnşaat maliyetini azaltmak için maliyeti kriterini en çok etkileyen iş kalemlerinin alternatifleri Tablo 3’de sunulmuştur. Tablo 3’de beşinci sütunda iş kalemleri ve alternatiflerinin birim maliyet değerleri verilmiştir. Ahşap kalıp (sıra no: 58) için tünel kalıp, plywood ve sac kalıp seçenekleri sunulmuştur fakat maliyeti en düşük seçenek ahşap kalıp olduğundan bu kalem için alternatif oluşturulamamıştır. Alüminyum doğrama imalatı (sıra no: 13) yerine plastik doğrama ve ahşap doğrama incelenmiş ve en çok iyileşmeyi ahşap doğrama sağladığı için bu alternatif seçilmiştir. Porselen karo döşeme kaplaması (sıra no:10) yerine pvc yer döşemesi, seramik yer karosu, mermer agregalı terrazo karo, washbeton yüzey işlemleri karo, mermer kaplama, traverten kaplama olmak üzere 6 alternatif incelenmiştir. En uygun maliyeti seramik yer karosu vermektedir. Titanyum-çinko kenet çatı kaplaması (sıra no: 25) kaleminin alternatifleri; düz alüminyum levha kaplama, trapezoidal alüminyum levha kaplama, elyaf takviyeli çimentodan yapılmış oluklu levha, oluklu bitümlü levha, bakır levha ile çatı örtüsü kaplamasıdır. En uygun maliyeti ise oluklu bitümlü levhalar sunmaktadır. Delikli alüminyum plakadan gizli taşıyıcı sistem asma tavan (sıra no: 2) yerine 6 alternatif önerilmiştir. Önerilen alternatifler: alçı levhalar ile çift iskeletli askı sistemli asma tavan, deliksiz sıcak daldırma galvanize sac plakadan oturmali sistem asma tavan, deliksiz alüminyum plakadan gizli taşıyıcı sistem asma tavan, arka yüzü akustik kumaş kaplı delikli sıcak daldırma galvanize sac plakadan sarkmalı sistem asma tavan, arka yüzü akustik kumaş kaplı delikli alüminyum plakadan gizli taşıyıcı sistem asma tavan ve sert pvc’den yapılmış asma tavan karoları ile asma tavadır. En uygun maliyeti pvc tavan karoları sunmaktadır. Tablo 1’de her kriter için sunulan en etkili 10 iş kalemi arasında bunların dışında beton, donatı, alüminyum cephe kaplaması ve çelik iş iskelesi kalemleri de vardır. Fakat hem yapısal kaygılardan hem de ikamesi olmayan iş kalemlerini oluşturdıklarından dolayı, bu kalemlerin alternatifi yoktur. Tablo 3’de sunulduğu gibi Maliyet göstergesini azaltmak için yapılan tasarım, sadece Maliyet göstergesini değil sütunlardaki bütün göstergeleri değiştirdiğinden ortaya çıkan yeni yapı tasarımının maliyet ve çevresel gösterge değerleri her iki yaşam dönemi için yeniden hesaplanır. Benzer alternatif belirleme işlemleri diğer 7 gösterge için de tekrarlanarak sonuçlar Erzurum’un [63] çalışmasında “Derslik yapısının çevresel etki ve maliyet kriterlerini azaltmak için oluşturulan alternatif iş kalemleri ve birim değerleri” isimli tabloda ve Ek M’de verilmektedir. Derslik yapısı için asma tavan, döşeme, doğrama, cephe kaplaması, çatı örtüsü, duvar türü ve yalıtım gibi iş kalemlerinde tasarım değişimi yapılmıştır.

Tablo 1. Yapının 'inşaat' dönemi için maliyet ve çevresel performans göstergesi sonuçları
(Cost and environmental performance indicator results for the 'construction' period of the building)

Sıra No	Maliyet (\$)	Maliyet etki %	GWP (kgCO ₂ eq)	GWP etki %	ODP (kgCFC11 eq)	ODP etki %	AP (mol H+ eq)	AP etki %	EP-Freshwater (kgP eq)	EP etki %	POCP (kgNMVOC eq)	POCP etki %	ADPE (kgSb eq)	ADPE etki %	ADPF (MJ)	ADPF etki %
1	1,35E+4	1,03	5,05E+3	0,26	4,92E-4	0,35	3,71E+1	0,46	3,75E+	0,81	1,37E+1	0,47	1,04E-1	0,00	8,94E+4	0,45
2	4,49E+4	3,42	1,02E+5	5,25	6,15E-3	4,41	7,96E+2	9,82	3,73E+1	8,05	2,57E+2	8,90	1,28E+0	0,001	1,03E+6	5,19
3	2,96E+3	0,23	3,53E+3	0,18	1,88E-4	0,13	2,74E+1	0,34	1,35E+	0,29	7,08E+0	0,24	6,80E-2	0,000	3,61E+4	0,18
4	4,87E+2	0,04	4,66E+2	0,02	1,90E-4	0,14	2,44E+	0,03	1,38E-1	0,03	1,22E+0	0,04	6,97E-3	0,000	9,61E+3	0,05
5	3,18E+4	2,42	4,85E+4	2,49	1,12E-3	0,81	9,50E+1	1,17	5,78E+	1,25	5,06E+1	1,75	1,42E-1	0,000	3,29E+5	1,66
6	9,60E+3	0,73	1,39E+4	0,71	8,88E-4	0,64	1,24E+2	1,53	4,15E+	0,90	1,61E+1	0,56	2,74E-2	0,000	7,46E+5	3,77
7	3,55E+2	0,03	3,93E+2	0,02	6,35E-8	0,00	3,53E+	0,04	6,47E-2	0,01	3,07E-1	0,01	7,95E-2	0,000	4,61E+3	0,02
8	1,38E+2	0,01	2,01E+2	0,01	1,47E-5	0,01	2,36E+	0,03	7,41E-2	0,02	2,36E-1	0,01	1,13E-1	0,000	2,62E+3	0,01
9	8,47E+1	0,01	4,60E+1	0,00	3,37E-6	0,00	5,41E-1	0,01	1,70E-2	0,00	5,40E-2	0,00	2,57E-2	0,000	5,98E+2	0,00
10	4,98E+4	3,80	6,08E+4	3,12	9,02E-3	6,47	1,41E+2	1,74	7,19E+	1,55	9,30E+1	3,21	3,97E-1	0,000	9,81E+5	4,96
11	1,21E+4	0,92	1,34E+4	0,69	5,45E-4	0,39	9,81E+1	1,21	4,62E+	1,00	1,64E+1	0,57	2,59E-2	0,000	9,29E+4	0,47
12	6,65E+3	0,51	1,02E+4	0,52	1,27E-3	0,91	8,00E+1	0,99	3,57E+	0,77	3,42E+1	1,18	5,19E-1	0,001	1,06E+5	0,54
13	7,75E+4	5,91	1,24E+5	6,35	1,56E-2	11,16	8,87E+2	10,96	5,96E+1	12,86	4,13E+2	14,27	6,27E+0	0,007	1,53E+6	7,72
14	3,07E+2	0,02	4,99E+2	0,03	4,65E-5	0,03	3,04E+	0,04	7,97E-2	0,02	2,23E+0	0,08	2,60E-3	0,000	5,20E+3	0,03
15	3,46E+3	0,26	3,18E+2	0,02	2,33E-5	0,02	3,44E+	0,04	1,84E-1	0,04	8,82E-1	0,03	7,78E-3	0,000	4,69E+3	0,02
16	2,47E+3	0,19	4,54E+3	0,23	4,58E-4	0,33	2,48E+1	0,31	9,33E-1	0,20	1,20E+1	0,41	2,60E-2	0,000	6,83E+4	0,35
17	2,61E+4	1,99	2,71E+4	1,39	2,01E-3	1,44	2,00E+2	2,47	8,73E+	1,88	1,07E+2	3,69	1,58E-1	0,000	3,97E+5	2,00
18	5,22E+4	3,98	4,39E+4	2,25	4,36E-3	3,13	3,16E+2	3,91	1,85E+1	3,99	1,50E+2	5,18	1,41E+0	0,002	6,38E+5	3,22
20	3,10E+2	0,02	3,43E+2	0,02	1,40E-5	0,01	2,52E+	0,03	1,19E-1	0,03	4,22E-1	0,01	6,65E-4	0,000	2,39E+3	0,01
21	1,09E+3	0,08	1,00E+2	0,01	7,32E-6	0,01	1,08E+	0,01	5,79E-2	0,01	2,78E-1	0,01	2,45E-3	0,000	1,47E+3	0,01
23	2,22E+3	0,17	8,61E+2	0,04	1,21E-3	0,86	4,76E+	0,06	7,09E-2	0,02	3,35E+0	0,12	5,14E-3	0,000	1,58E+4	0,08
24	1,22E+4	0,93	2,11E+4	1,08	1,59E-4	0,11	4,91E+1	0,61	2,47E+	0,53	1,26E+1	0,44	6,70E-2	0,000	4,03E+5	2,04
25	4,77E+4	3,63	2,07E+4	1,06	1,22E-4	0,09	1,52E+2	1,87	6,11E+	1,32	1,66E+1	0,57	2,81E+0	0,003	1,83E+5	0,93
29	1,75E+4	1,33	5,20E+3	0,27	5,35E-4	0,38	4,07E+1	0,50	2,08E+	0,45	1,50E+1	0,52	2,63E-2	0,000	6,69E+4	0,34
30	3,99E+3	0,30	1,19E+3	0,06	1,22E-4	0,09	9,31E+	0,11	4,76E-1	0,10	3,44E+0	0,12	6,02E-3	0,000	1,53E+4	0,08
32	1,73E+3	0,13	0,00E+	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+	0,00	0,00E+	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,000	0,00E+	0,00
33	7,39E+3	0,56	0,00E+	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+	0,00	0,00E+	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,000	0,00E+	0,00
34	5,98E+3	0,46	4,84E+3	0,25	5,58E-4	0,40	4,40E+1	0,54	5,95E+	1,28	1,75E+0	0,06	2,08E-3	0,000	6,14E+4	0,31
35	2,20E+3	0,17	6,33E+2	0,03	7,30E-5	0,05	5,75E+	0,07	7,77E-1	0,17	2,28E-1	0,01	2,72E-4	0,000	8,02E+3	0,04
36	9,50E+3	0,72	1,15E-3	0,00	1,15E-3	0,82	6,85E+1	0,85	5,87E+	1,27	5,83E+1	2,02	2,55E-2	0,000	1,14E+5	0,57
37	6,75E+3	0,51	7,67E-4	0,00	7,67E-4	0,55	4,58E+1	0,57	3,92E+	0,85	3,90E+1	1,35	1,70E-2	0,000	7,59E+4	0,38
38	5,21E+3	0,40	4,69E+4	0,00	4,69E-4	0,34	3,47E+1	0,43	2,94E+	0,63	2,94E+1	1,02	1,18E-2	0,000	4,91E+4	0,25
39	1,08E+4	0,83	5,01E+4	2,57	1,92E-3	1,38	1,15E+2	1,42	2,15E+1	4,64	1,46E+1	0,50	3,14E-2	0,000	2,96E+5	1,49
40	5,62E+2	0,04	2,65E+3	0,14	9,64E-5	0,07	5,98E+	0,07	1,14E+	0,25	7,60E-1	0,03	1,55E-3	0,000	1,55E+4	0,08
41	1,52E+5	11,55	8,35E+5	42,85	3,63E-2	26,06	2,16E+3	26,72	1,67E+2	36,13	2,19E+2	7,57	1,25E+0	0,001	4,73E+6	23,88
42	1,10E+3	0,08	1,18E+2	0,01	1,08E-5	0,01	6,59E-1	0,01	5,61E-2	0,01	2,70E-2	0,00	4,08E-4	0,000	1,02E+3	0,01
43	4,05E+2	0,03	9,65E+2	0,05	4,07E-5	0,03	2,86E+	0,04	2,04E-1	0,04	2,56E-1	0,01	4,85E-4	0,000	6,43E+3	0,03
44	3,49E+4	2,66	1,00E+5	5,14	4,23E-3	3,03	2,97E+2	3,66	2,12E+1	4,57	2,66E+1	0,92	5,04E-2	0,000	6,68E+5	3,38
45	2,24E+4	1,71	6,75E+4	3,46	2,85E-3	2,04	2,00E+2	2,47	1,43E+1	3,08	1,79E+1	0,62	3,39E-2	0,000	4,50E+5	2,27
46	8,48E+2	0,06	1,58E+3	0,08	2,85E-7	0,00	2,30E+	0,03	6,97E-2	0,02	3,36E-1	0,01	1,12E-3	0,000	1,00E+4	0,05
47	3,26E+3	0,25	6,12E+3	0,31	1,11E-6	0,00	8,94E+	0,11	2,71E-1	0,06	1,31E+0	0,05	4,37E-3	0,000	3,90E+4	0,20
48	3,70E+3	0,28	3,73E+3	0,19	2,85E-4	0,20	2,14E+1	0,26	1,74E+	0,38	9,08E+0	0,31	2,39E-2	0,000	1,96E+5	0,99
49	5,88E+2	0,04	4,58E+2	0,02	3,28E-5	0,02	3,69E+	0,05	1,73E-1	0,04	1,54E+0	0,05	1,53E-3	0,000	4,53E+3	0,02
50	5,38E+2	0,04	6,69E+2	0,03	4,53E-5	0,03	5,39E+	0,07	2,33E-1	0,05	2,20E+0	0,08	6,43E-3	0,000	6,72E+3	0,03
51	7,53E+2	0,06	7,66E+2	0,04	3,24E-4	0,23	4,00E+	0,05	2,35E-1	0,05	2,09E+0	0,07	1,19E-2	0,000	1,62E+4	0,08
52	2,66E+4	2,03	7,08E+3	0,36	1,78E-3	1,28	3,33E+1	0,41	1,94E+	0,42	1,73E+2	5,97	5,69E-2	0,000	2,31E+5	1,17
53	8,75E+2	0,07	8,92E+2	0,05	5,49E-5	0,04	2,68E+	0,03	9,19E-2	0,02	1,35E+0	0,05	4,46E-4	0,000	1,39E+4	0,07
54	7,34E+2	0,06	4,68E+2	0,02	5,29E-5	0,04	1,59E+	0,02	1,25E-1	0,03	1,10E+0	0,04	2,47E-3	0,000	6,54E+3	0,03
55	9,21E+3	0,70	7,14E+3	0,37	1,46E-4	0,10	6,12E+1	0,76	3,80E-1	0,08	1,96E+1	0,68	1,70E-1	0,000	9,74E+4	0,49
56	5,26E+3	0,40	7,69E+3	0,39	1,43E-4	0,10	3,08E+1	0,38	9,67E-1	0,21	2,10E+1	0,72	2,00E-2	0,000	1,68E+5	0,85
57	1,67E+3	0,13	3,91E+2	0,02	3,53E-5	0,03	1,65E+	0,02	6,71E-2	0,01	1,34E+0	0,05	4,51E-3	0,000	9,08E+3	0,05
58	9,45E+4	7,21	3,07E+4	1,58	4,11E-3	2,95	2,64E+2	3,26	9,80E+	2,11	1,34E+2	4,65	8,92E-1	0,001	5,82E+5	2,94
59	3,53E+4	2,69	1,20E+4	0,62	9,76E-3	7,00	6,22E+1	0,77	6,97E-1	0,15	4,67E+1	1,61	3,91E-2	0,000	1,28E+5	0,65
60	7,33E+3	0,56	1,66E+3	0,08	1,85E-3	1,33	8,49E+	0,10	9,83E-2	0,02	6,59E+0	0,23	5,56E-3	0,000	1,83E+4	0,09
61	2,10E+4	1,60	5,04E+3	0,26	6,52E-3	4,68	2,61E+1	0,32	3,06E-1	0,07	1,98E+1	0,68	1,70E-2	0,000	5,62E+4	0,28
62	2,88E+4	2,20	1,70E+4	0,87	2,25E-3	1,61	1,47E+2	1,81	5,30E+	1,14	7,44E+1	2,57	5,48E-1	0,001	3,19E+5	1,61
63	6,01E+3	0,46	1,74E+3	0,09	1,47E-3	1,05	1,56E+1	0,19	5,52E-1	0,12	8,44E+0	0,29	2,58E-2	0,000	5,02E+4	0,25
64	2,59E+2	0,02	1,62E+2	0,01	8,23E-6	0,01	8,88E-1	0,01	8,76E-3	0,00	4,91E-1	0,02	2,31E-4	0,000	1,55E+3	0,01
65	8,90E+4	6,79	5,45E+4	2,80	2,91E-3	2,09	2,97E+2	3,67	2,75E+	0,59	1,67E+2	5,77	8,10E-2	0,000	5,18E+5	2,62
66	1,71E+5	13,06	1,07E+5	5,49	5,71E-3	4,10	5,84E+2	7,21	5,41E+	1,17	3,28E+2	11,33	1,59E-1	0,000	1,02E+6	5,14
67	9,06E+3	0,69	2,56E+3	0,13	1,32E-4	0,09	1,43E+1	0,18	1,39E-1	0,03	5,16E+0	0,18	6,02E-3	0,000	2,44E+4	0,12
68	6,06E+3	0,46	4,30E+3	0,22	1,93E-10	0,00	1,02E+1	0,13	2,73E-1	0,06	1,47E+0	0,05	2,53E-3	0,000	4,70E+4	0,24
69	1,31E+3	0,10	3,83E+2	0,02	2,04E-5	0,01	2,06E+	0,03	1,90E-2	0,00	2,65E-2	0,00	5,75E-4	0,000	3,65E+3	0,02
70	1,19E+3	0,09	5,75E+3	0,30	1,13E-3	0,81	3,24E+1	0,40	1,96E+	0,42	3,46E+0	0,12	9,33E+4	99,981	1,99E+6	10,06
71	1,05E+3	0,08	1,10E+3	0,06	7,63E-5	0,05	9,53E+	0,12	3,03E-1	0,07	1,36E+0	0,05	1,05E-2	0,000	5,19E+4	0,26
72	6,20E+2	0,05	9,46E+2	0,05	6,17E-5	0,04	8,21E+	0,10	2,84E-1	0,06	1,25E+0	0,04	1,95E-3	0,000	4,83E+4	0,24
73	1,73E+4	1,32	2,80E+3	0,14	2,70E-4	0,19	1,59E+1	0,20	8,80E-1	0,19	9,83E+0	0,34	3,23E-2	0,000	4,55E+4	0,23

Tablo 1 (devamı). Yapının ‘inşaat’ dönemi için maliyet ve çevresel performans göstergesi sonuçları
(Cost and environmental performance indicator results for the 'construction' period of the building)

Sıra No	Maliyet (\$)	Maliyet etki %	GWP (kgCO ₂ eq)	GWP etki %	ODP (kgCFC11 eq)	ODP etki %	AP (mol H+ eq)	AP etki %	EP- Freshwater (kgP eq)	EP etki %	POCP (kgNMVOC eq)	POCP etki %	ADPE (kgSb eq)	ADPE etki %	ADPF (MJ)	ADPF etki %
82	1,25E+3	0,10	1,44E+3	0,07	1,28E-4	0,09	8,41E+0	0,10	2,30E-1	0,05	6,16E+0	0,21	6,80E-3	0,000	1,44E+4	0,07
83	2,82E+2	0,02	3,13E+2	0,02	2,76E-5	0,02	1,82E+0	0,02	4,98E-2	0,01	1,33E+0	0,05	1,53E-3	0,000	3,11E+3	0,02
84	6,42E+2	0,05	6,45E+2	0,03	6,06E-5	0,04	3,96E+0	0,05	1,03E-1	0,02	2,90E+0	0,10	3,53E-3	0,000	6,79E+3	0,03
85	2,36E+2	0,02	3,17E+2	0,02	1,29E-5	0,01	2,33E+0	0,03	1,10E-1	0,02	3,90E-1	0,01	6,15E-4	0,000	2,21E+3	0,01
86	5,80E+3	0,44	6,97E+3	0,36	2,28E-4	0,16	1,91E+1	0,24	1,12E+0	0,24	1,32E+1	0,46	1,00E-2	0,000	3,04E+4	0,15
87	1,36E+3	0,10	2,26E+3	0,12	4,68E-5	0,03	4,62E+0	0,06	2,81E-1	0,06	2,69E+0	0,09	2,01E-3	0,000	1,28E+4	0,06
88	1,48E+2	0,01	1,78E+2	0,01	4,92E-6	0,00	4,35E-1	0,01	2,58E-2	0,01	2,86E-1	0,01	2,16E-4	0,000	8,72E+2	0,00
89	7,98E+3	0,61	1,10E+4	0,56	3,56E-4	0,26	2,98E+1	0,37	1,74E+0	0,38	2,08E+1	0,72	1,58E-2	0,000	4,76E+4	0,24
90	3,30E+2	0,03	4,54E+2	0,02	1,48E-5	0,01	1,24E+0	0,02	7,29E-2	0,02	8,62E-1	0,03	6,55E-4	0,000	1,98E+3	0,01
91	1,16E+4	0,88	2,24E+4	1,15	7,43E-4	0,53	6,21E+1	0,77	3,74E+0	0,81	4,24E+1	1,46	3,22E-2	0,000	9,90E+4	0,50
92	7,43E+2	0,06	4,84E+2	0,02	4,35E-5	0,03	1,50E+0	0,02	9,36E-2	0,02	8,42E-1	0,03	2,96E-3	0,000	5,92E+3	0,03
93	1,91E+4	1,46	1,12E+4	0,57	1,02E-3	0,73	3,56E+1	0,44	2,46E+0	0,53	1,92E+1	0,67	3,33E-2	0,000	1,39E+5	0,70
Toplam	1,31E+6	100	1,95E+6	100	1,39E-1	100	8,10E+3	100	4,63E+2	100	2,89E+3	100	9,34E+4	100	1,98E+7	100

Tablo 2. Maliyet göstergesini en çok etkileyen iş kalemleri (The work items that most affect the cost- indicator)

A1-2-3-5 yaşam dönemi				A1-2-3-5/B3-4-5 yaşam dönemi			
Sıra No	Maliyet Etki Yüzdesi	Poz no	Önerilen Alt.No	Sıra No	Maliyet Etki Yüzdesi	Poz no	Önerilen Alt.No
66	13,25%	151601004	-	73	10,02%	155401256	-
41	11,72%	151501007	-	66	9,90%	151601004	-
58	7,31%	151801002	-	13	8,96%	154601010	13/Alt-2
65	6,88%	151601003	-	41	8,76%	151501007	-
13	6,00%	154601010	13/Alt-2	10	5,76%	153901008	10/Alt-2
18	4,03%	111111111	-	58	5,46%	151801002	-
10	3,85%	153901008	10/Alt-2	65	5,15%	151601003	-
25	3,69%	153251001	25/Alt-4	74	5,06%	155401325	-
2	3,47%	155351026	2/Alt-6	18	3,02%	111111111	-
59	2,73%	151851006	-	25	2,75%	153251001	25/Alt-4
44	2,70%	152251010	44/Alt-4	2	2,59%	155351026	2/Alt-6
62	2,23%	153001001	-	93	2,21%	154701419	93/Alt-1
52	2,06%	152551006	-	59	2,04%	151851006	-
5	1,97%	27.525/A2	-	44	2,02%	152251010	44/Alt-4
45	1,73%	152251012	45/Alt-2	62	1,67%	153001001	-
61	1,62%	151851014	-	52	1,54%	152551006	-
17	1,61%	102002401	17/Alt-5	76	1,49%	153901070	76/Alt-1
93	1,48%	154701419	93/Alt-1	5	1,47%	27.525/A2	-
73	1,34%	155401256	-	45	1,30%	152251012	45/Alt-2
29	1,11%	Özel tarif	-	61	1,21%	151851014	-

Tablo 3. Yapının ‘inşaat’ dönemi Maliyet değerini düşürmek için önerilen alternatiflerin birim değeri
(Unit value of proposed alternatives to reduce the 'construction' period Cost value of the building)

Maliyet	Sıra	Poz no	Birim	Maliyet	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF
Mevcut:	58	15.180.1002	m²	1,03E+01	3,35E+00	4,49E-07	2,88E-02	1,07E-03	1,47E-02	9,74E-05	6,35E+01
Önerilen											
Mevcut	13	15.460.1010	kg	8,55E+00	1,37E+01	1,72E-06	9,79E-02	6,57E-03	4,55E-02	6,91E-04	1,68E+02
Önerilen											
Mevcut	10	15.390.1008	m²	1,48E+01	1,80E+01	2,68E-06	4,17E-02	2,13E-03	2,76E-02	1,18E-04	2,91E+02
Önerilen											
Mevcut	25	15.325.1001	m²	3,47E+01	1,51E+01	8,89E-08	1,10E-01	4,44E-03	1,20E-02	2,05E-03	1,33E+02
Önerilen											
Mevcut	2	15.535.1026	m²	1,88E+01	4,29E+01	2,58E-06	3,33E-01	1,56E-02	1,08E-01	5,36E-04	4,30E+02
Önerilen											
Mevcut	2	15.535.1051	m²	1,08E+01	7,89E+00	3,26E-07	4,15E-02	1,67E-03	1,78E-02	1,23E-04	1,59E+02
Önerilen											

Tablo 1’de sunulan maliyet ölçeğine göre gerçekleştirilen tasarım revizyonu örnek teşkil etmesi için detaylı biçimde metin içinde açıklanmıştır. Diğer kriterlere göre gerçekleştirilen revizyonlar aynı iş akışı takip edilerek gerçekleştirildiği için detaylı olarak metin içinde anlatılmamıştır ve Erzurum [63]’te sunulmuştur.

Yapının başlangıç tasarımına göre ‘inşaat’ yaşam dönemi temel alınarak yapılan azaltma analizleri sonucunda 8 göstergenin her birini azaltmak için elde edilen 8 yeni yapı tasarımının maliyet ve çevresel göstergeleri yeniden hesaplanarak yeni 8 yapıdaki iyileşme miktarı elde edilir. Bu hesaplama hem ‘inşaat’ hem de ‘inşaat+işletme’ yaşam dönemleri için ayrı ayrı yapılarak Tablo 4 ve 5’te sunulan iyileşme

yüzdelere veren yaşam döngüsü matrisleri elde edilir. Tablo 4’te en son satırda sütun numaraları verilmiştir. Tablo 4 ve 5’te birinci sütundaki göstergeler azaltılması hedeflenen 8 göstergesi temsil etmektedir. Matris tablolarındaki satırlar ise her bir gösterge için yapılan iş kalemi değişimi sonucunun, ikinci satırda verilen başlangıç yapı tasarımı değerlerine göre 8 gösterge üzerindeki yüzde değişimini yani göstergenin azalma miktarını göstermektedir. Örneğin, GWP göstergesini azaltan yeni yapı tasarımının 8 göstergedeki iyileşme miktarı Tablo 4’te dördüncü satırda verilmiştir. Tablolarda maliyet ve çevresel etkilerin azalması durumu negatif olarak temsil edilmiştir. Her bir satırdaki göstergeye göre yapılan analizlerin, 8 gösterge üzerindeki iyileşme miktarı ikinci ve dokuzuncu sütunlar arasında

sunulmaktadır. Bu sütunların toplanmasıyla 8 göstergeliyi içeren toplam iyileşme miktarı onuncu sütunda verilmiştir. Göstergelerin iyileşme miktarları toplanırken, göstergenin ağırlığı bir diğer ifadeyle YDA'ya etkisi eşit kabul edilerek her bir modelin toplam iyileşme yüzdeleri hesaplanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında elde edilen matrislerde en yüksek iyileşmeyi veren gösterge ve yaşam döngüsü belirlenerek yapıların ön tasarım aşamasında referans alınacak kriterler belirlenir. Matrislerde her bir sütunda verilen renkli hücreler, ilgili göstergede elde edilen en iyi iyileşme değerini sunmaktadır.

Tablo 4 ve 5'te verilen matrisler incelendiğinde, 8 göstergenin her birinde 10 iş kalemi değişimi sonucunda en iyi azalmayı %-284,59 değeri ile ADPF göstergesine göre yapılan yeni yapı tasarımının verdiği belirlenmiştir. Ek olarak literatürde yoğun araştırmaya sahip GWP göstergesinin ise en düşük iyileşmelerden birini vermiştir.

4.3. 'İnşaat+İşletme' Dönemi için Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Analysis for the 'Construction+ Operation' Period)

Bölüm 4.2'de yapılan iş adımları bu bölümde 'inşaat+işletme' dönemi için tekrar edilmiş ve çevresel performans göstergesi ve maliyet

sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur. Bunun yanı sıra her bir kriteri azaltmak için oluşturulan iş kalemleri ve alternatiflerinin birim değerleri ve etki yüzdesi tabloları Erzurum'un [63] çalışmasında "Derslik yapısının çevresel etki ve maliyet kriterlerini azaltmak için oluşturulan alternatif iş kalemleri ve birim değerleri" isimli tabloda ve Ek M'de verilmektedir. İş kalemlerinin hem yapının başlangıcında yapıyı inşa etmek için bir defa kullanımından kaynaklanan etkileri hem de yapının 50 yıllık kullanım ömründe yenilenmesinden kaynaklanan etkileri analizlere dâhil edilir. Bu sayede yapının kullanım süresinde iş kalemlerinin tekrarlı kullanımlarının etkisi hesaplanmaktadır. Yapının mevcut tasarımında birim alan başına düşen performans göstergeleri: Maliyet 406,93 \$/m², GWP değeri 523,88 kgCO₂/m², ODP değeri 4,14E-05 kgCFC11/m², AP değeri 2,28 mol H+/m², EP değeri 0,13 kgP/m², POCP değeri 0,86 kgNMVOC/m², ADPE değeri 43,45 kgSb/m² ve ADPF değeri 6196,64 MJ/m² olarak hesaplanmıştır.

Yapının 'inşaat+işletme' yaşam döngüsü matrisleri Tablo 7 ve 8'de sunulmuştur. En iyi çevresel etki azalması Tablo 7'de sunulduğu üzere %-284,58 değeri ile ADPF göstergesine göre yapılan yeni yapı tasarımının verdiği belirlenmiştir.

Tablo 4. Derslik binası modelleme sonrası 'inşaat' dönemi yaşam döngüsü matrisi (inşaat dönemi modellemesi)
(Classroom building post-modeling 'construction' period lifecycle matrix (model of the construction period))

	Maliyet	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	Toplam
Başlangıç Durum	1,31E+06	1,95E+06	1,39E-01	8,10E+03	4,63E+02	2,89E+03	9,34E+04	1,98E+07	
Maliyet	-10,68%	-12,17%	-16,41%	-21,18%	-20,97%	-21,95%	-0,011%	-12,30%	-115,66
GWP	-6,77%	-18,94%	-23,03%	-24,24%	-25,40%	-21,17%	-0,008%	-16,87%	-136,43
ODP	-6,58%	-15,69%	-25,98%	-25,53%	-25,16%	-28,51%	-0,009%	-17,38%	-144,84
AP	-6,63%	-17,87%	-22,25%	-29,07%	-29,26%	-28,90%	-0,009%	-17,83%	-151,81
EP	-7,77%	-19,47%	-24,28%	-28,88%	-31,02%	-26,67%	-0,009%	-18,14%	-156,23
POCP	-6,72%	-13,14%	-24,25%	-22,24%	-19,32%	-37,28%	-0,008%	-17,88%	-140,83
ADPE	-7,06%	-18,82%	-22,57%	-23,66%	-20,98%	-28,57%	-99,994%	-26,14%	-247,78
ADPF	-5,79%	-15,70%	-26,49%	-24,86%	-23,68%	-28,42%	-99,980%	-28,69%	-253,62
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tablo 5. Derslik binası modelleme sonrası 'inşaat +işletme' dönemi yaşam döngüsü matrisi (inşaat dönemine göre modelleme)
(Classroom building after modeling 'construction + operation' period life cycle matrix (modeling by construction period))

	Maliyet	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	Toplam
Başlangıç Durum	1,75E+06	2,25E+06	1,78E-01	9,80E+03	5,62E+02	3,69E+03	1,87E+05	2,66E+07	
Maliyet	-12,83%	-16,77%	-23,34%	-26,58%	-27,88%	-28,18%	-0,01%	-15,97%	-151,56
GWP	-6,57%	-22,31%	-30,15%	-28,31%	-29,10%	-28,30%	-0,01%	-19,03%	-163,78
ODP	-6,43%	-19,49%	-32,46%	-29,38%	-28,90%	-34,05%	-0,01%	-19,41%	-170,13
AP	-7,78%	-20,64%	-25,32%	-32,61%	-34,41%	-33,05%	-0,01%	-18,56%	-172,38
EP	-9,78%	-22,92%	-29,12%	-32,78%	-36,07%	-31,59%	-0,01%	-20,16%	-182,44
POCP	-5,68%	-17,11%	-30,71%	-26,50%	-23,99%	-40,64%	-0,01%	-19,63%	-164,26
ADPE	-7,08%	-22,82%	-30,74%	-28,86%	-26,28%	-34,96%	-99,99%	-33,65%	-284,39
ADPF	-5,48%	-19,61%	-33,50%	-28,91%	-27,87%	-34,03%	-99,98%	-35,20%	-284,59

Tablo 6. Yapının 'inşaat+işletme' dönemi için maliyet ve çevresel performans göstergesi sonuçları
(Cost and environmental performance indicator results for the 'construction+operation' period of the building)

Sıra No	Maliyet (\$)	Maliyet etki %	GWP (KgCO ₂ eq)	GWP etki %	ODP (KgCFC11 eq)	ODP etki %	AP (mol H+ eq)	AP etki %	EP- Freshwater (KgP eq)	EP etki %	POCP (KgNMVOC eq)	POCP etki %	ADPE (KgSb eq)	ADPE etki %	ADPF (MJ)	ADPF etki %
1	1,35E+4	0,77	5,05E+3	0,22	4,92E-4	0,28	3,71E+1	0,38	3,75E+0	0,67	1,37E+1	0,37	1,04E-1	0,000	8,94E+4	0,34
2	4,49E+4	2,57	1,02E+5	4,55	6,15E-3	3,46	7,96E+2	8,12	3,73E+1	6,63	2,57E+2	6,97	1,28E+0	0,001	1,03E+6	3,85
3	2,96E+3	0,17	3,53E+3	0,16	1,88E-4	0,11	2,74E+1	0,28	1,35E+0	0,24	7,08E+0	0,19	6,80E-2	0,000	3,61E+4	0,14
4	9,75E+2	0,06	9,32E+2	0,04	3,80E-4	0,21	4,87E+0	0,05	2,76E-1	0,05	2,44E+0	0,07	1,39E-2	0,000	1,92E+4	0,07
5	3,18E+4	1,82	4,85E+4	2,16	1,12E-3	0,63	9,50E+1	0,97	5,78E+0	1,03	5,06E+1	1,37	1,42E-1	0,000	3,29E+5	1,23
6	9,60E+3	0,55	1,39E+4	0,62	8,88E-4	0,50	1,24E+2	1,26	4,15E+0	0,74	1,61E+1	0,44	2,74E-2	0,000	7,46E+5	2,80
7	3,55E+2	0,02	3,93E+2	0,02	6,35E-8	0,00	3,53E+0	0,04	6,47E-2	0,01	3,07E-1	0,01	7,95E-2	0,000	4,61E+3	0,02
8	1,38E+2	0,01	2,01E+2	0,01	1,47E-5	0,01	2,36E+0	0,02	7,41E-2	0,01	2,36E-1	0,01	1,13E-1	0,000	2,62E+3	0,01
9	8,47E+1	0,00	4,60E+1	0,00	3,37E-6	0,00	5,41E-1	0,01	1,70E-2	0,00	5,40E-2	0,00	2,57E-2	0,000	5,98E+2	0,00
10	9,97E+4	5,70	1,22E+5	5,40	1,80E-2	10,14	2,81E+2	2,87	1,44E+1	2,56	1,86E+2	5,04	7,94E-1	0,0004	1,96E+6	7,37
11	1,21E+4	0,69	1,34E+4	0,59	5,45E-4	0,31	9,81E+1	1,00	4,62E+0	0,82	1,64E+1	0,44	2,59E-2	0,000	9,29E+4	0,35
12	1,33E+4	0,76	2,05E+4	0,91	2,53E-3	1,42	1,60E+2	1,63	7,14E+0	1,27	6,85E+1	1,85	1,04E+0	0,001	2,13E+5	0,80
13	1,55E+5	8,87	2,48E+5	11,01	3,11E-2	17,48	1,77E+3	18,12	1,19E+2	21,20	8,26E+2	22,35	1,25E+1	0,007	3,05E+6	11,47
14	3,07E+2	0,02	4,99E+2	0,02	4,65E-5	0,03	3,04E+0	0,03	7,97E-2	0,01	2,23E+0	0,06	2,60E-3	0,000	5,20E+3	0,02
15	6,91E+3	0,40	6,37E+2	0,03	4,65E-5	0,03	6,88E+0	0,07	3,68E-1	0,07	1,76E+0	0,05	1,56E-2	0,000	9,37E+3	0,04
16	4,95E+3	0,28	9,08E+3	0,40	9,16E-4	0,51	4,96E+1	0,51	1,87E+0	0,33	2,39E+1	0,65	5,21E-2	0,000	1,37E+5	0,51
17	2,61E+4	1,49	2,71E+4	1,21	2,01E-3	1,13	2,00E+2	2,04	8,73E+0	1,55	1,07E+2	2,89	1,58E-1	0,000	3,97E+5	1,49
18	5,22E+4	2,98	4,39E+4	1,95	4,36E-3	2,45	3,16E+2	3,23	1,85E+1	3,29	1,50E+2	4,06	1,41E+0	0,001	6,38E+5	2,40

Tablo 6 (devamı). Yapının 'inşaat+işletme' dönemi için maliyet ve çevresel performans göstergesi sonuçları
(Cost and environmental performance indicator results for the 'construction+operation' period of the building)

Sıra No	Maliyet (\$)	Maliyet etki %	GWP (KgCO ₂ eq)	GWP etki %	ODP (KgCFC11 eq)	ODP etki %	AP (mol H+ eq)	AP etki %	EP-Freshwater (KgP eq)	EP etki %	POCP (KgNMVOC eq)	POCP etki %	ADPE (KgSb eq)	ADPE etki %	ADPF (MJ)	ADPF etki %
20	3,10E+2	0,02	3,43E+2	0,02	1,40E-5	0,01	2,52E+0	0,03	1,19E-1	0,02	4,22E-1	0,01	6,65E-4	0,000	2,39E+3	0,01
21	2,17E+3	0,12	2,00E+2	0,01	1,46E-5	0,01	2,16E+0	0,02	1,16E-1	0,02	5,55E-1	0,02	4,90E-3	0,000	2,95E+3	0,01
23	2,22E+3	0,13	8,61E+2	0,04	1,21E-3	0,68	4,76E+0	0,05	7,09E-2	0,01	3,35E+0	0,09	5,14E-3	0,000	1,58E+4	0,06
24	1,22E+4	0,70	2,11E+4	0,94	1,59E-4	0,09	4,91E+1	0,50	2,47E+0	0,44	1,26E+1	0,34	6,70E-2	0,000	4,03E+5	1,52
25	4,77E+4	2,73	2,07E+4	0,92	1,22E-4	0,07	1,52E+2	1,55	6,11E+0	1,09	1,66E+1	0,45	2,81E+0	0,002	1,83E+5	0,69
29	1,75E+4	1,00	5,20E+3	0,23	5,35E-4	0,30	4,07E+1	0,42	2,08E+0	0,37	1,50E+1	0,41	2,63E-2	0,000	6,69E+4	0,25
30	3,99E+3	0,23	1,19E+3	0,05	1,22E-4	0,07	9,31E+0	0,10	4,76E-1	0,08	3,44E+0	0,09	6,02E-3	0,000	1,53E+4	0,06
32	1,73E+3	0,10	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,000	0,00E+0	0,00
33	7,39E+3	0,42	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,00	0,00E+0	0,000	0,00E+0	0,00
34	5,98E+3	0,34	4,84E+3	0,22	5,58E-4	0,31	4,40E+1	0,45	5,95E+0	1,06	1,75E+0	0,05	2,08E-3	0,000	6,14E+4	0,23
35	2,20E+3	0,13	6,33E+2	0,03	7,30E-5	0,04	5,75E+0	0,06	7,77E-1	0,14	2,28E-1	0,01	2,72E-4	0,000	8,02E+3	0,03
36	9,50E+3	0,54	1,15E+3	0,00	1,15E-3	0,64	6,85E+1	0,70	5,87E+0	1,04	5,83E+1	1,58	2,55E-2	0,000	1,14E+5	0,43
37	6,75E+3	0,39	7,67E-4	0,00	7,67E-4	0,43	4,58E+1	0,47	3,92E+0	0,70	3,90E+1	1,06	1,70E-2	0,000	7,59E+4	0,29
38	5,21E+3	0,30	4,69E-4	0,00	4,69E-4	0,26	3,47E+1	0,35	2,94E+0	0,52	2,94E+1	0,80	1,18E-2	0,000	4,91E+4	0,18
39	1,08E+4	0,62	5,01E+4	2,22	1,92E-3	1,08	1,15E+2	1,18	2,15E+1	3,82	1,46E+1	0,40	3,14E-2	0,000	2,96E+5	1,11
40	5,62E+2	0,03	2,65E+3	0,12	9,64E-5	0,05	5,98E+0	0,06	1,14E+0	0,20	7,60E-1	0,02	1,55E-3	0,000	1,55E+4	0,06
41	1,52E+5	8,66	8,35E+5	37,11	3,63E-2	20,41	2,16E+3	22,09	1,67E+2	29,78	2,19E+2	5,93	1,25E+0	0,001	4,73E+6	17,75
42	1,10E+3	0,06	1,18E+2	0,01	1,08E-5	0,01	6,59E-1	0,01	5,61E-2	0,01	2,70E-2	0,00	4,08E-4	0,000	1,02E+3	0,00
43	4,05E+2	0,02	9,65E+2	0,04	4,07E-5	0,02	2,86E+0	0,03	2,04E-1	0,04	2,56E-1	0,01	4,85E-4	0,000	6,43E+3	0,02
44	3,49E+4	1,99	1,00E+5	4,45	4,23E-3	2,37	2,97E+2	3,03	2,12E+1	3,76	2,66E+1	0,72	5,04E-2	0,000	6,68E+5	2,51
45	2,24E+4	1,28	6,75E+4	3,00	2,85E-3	1,60	2,00E+2	2,04	1,43E+1	2,54	1,79E+1	0,48	3,39E-2	0,000	4,50E+5	1,69
46	8,48E+2	0,05	1,58E+3	0,07	2,85E-7	0,00	2,30E+0	0,02	6,97E-2	0,01	3,36E-1	0,01	1,12E-3	0,000	1,00E+4	0,04
47	3,26E+3	0,19	6,12E+3	0,27	1,11E-6	0,00	8,94E+0	0,09	2,71E-1	0,05	1,31E+0	0,04	4,37E-3	0,000	3,90E+4	0,15
48	7,39E+3	0,42	7,46E+3	0,33	5,69E-4	0,32	4,28E+1	0,44	3,48E+0	0,62	1,82E+1	0,49	4,78E-2	0,000	3,93E+5	1,48
49	5,88E+2	0,03	4,58E+2	0,02	3,28E-5	0,02	3,69E+0	0,04	1,73E-1	0,03	1,54E+0	0,04	1,53E-3	0,000	4,53E+3	0,02
50	5,38E+2	0,03	6,69E+2	0,03	4,53E-5	0,03	5,39E+0	0,06	2,33E-1	0,04	2,20E+0	0,06	6,43E-3	0,000	6,72E+3	0,03
51	7,53E+2	0,04	7,66E+2	0,03	3,24E-4	0,18	4,00E+0	0,04	2,35E-1	0,04	2,09E+0	0,06	1,19E-2	0,000	1,62E+4	0,06
52	2,66E+4	1,52	7,08E+3	0,31	1,78E-3	1,00	3,33E+1	0,34	1,94E+0	0,34	1,73E+2	4,68	5,69E-2	0,000	2,31E+5	0,87
53	8,75E+2	0,05	8,92E+2	0,04	5,49E-5	0,03	2,68E+0	0,03	9,19E-2	0,02	1,35E+0	0,04	4,46E-4	0,000	1,39E+4	0,05
54	7,34E+2	0,04	4,68E+2	0,02	5,29E-5	0,03	1,59E+0	0,02	1,25E-1	0,02	1,10E+0	0,03	2,47E-3	0,000	6,54E+3	0,02
55	9,21E+3	0,53	7,14E+3	0,32	1,46E-4	0,08	6,12E+1	0,62	3,80E-1	0,07	1,96E+1	0,53	1,70E-1	0,000	9,74E+4	0,37
56	5,26E+3	0,30	7,69E+3	0,34	1,43E-4	0,08	3,08E+1	0,31	9,67E-1	0,17	2,10E+1	0,57	2,00E-2	0,000	1,68E+5	0,63
57	1,67E+3	0,10	3,91E+2	0,02	3,53E-5	0,02	1,65E+0	0,02	6,71E-2	0,01	1,34E+0	0,04	4,51E-3	0,000	9,08E+3	0,03
58	9,45E+4	5,41	3,07E+4	1,37	4,11E-3	2,31	2,64E+2	2,69	9,80E+0	1,74	1,34E+2	3,64	8,92E-1	0,0005	5,82E+5	2,18
59	3,53E+4	2,02	1,20E+4	0,53	9,76E-3	5,48	6,22E+1	0,63	6,97E-1	0,12	4,67E+1	1,26	3,91E-2	0,000	1,28E+5	0,48
60	7,33E+3	0,42	1,66E+3	0,07	1,85E-3	1,04	8,49E+0	0,09	9,83E-2	0,02	6,59E+0	0,18	5,56E-3	0,000	1,83E+4	0,07
61	2,10E+4	1,20	5,04E+3	0,22	6,52E-3	3,67	2,61E+1	0,27	3,06E-1	0,05	1,98E+1	0,54	1,70E-2	0,000	5,62E+4	0,21
62	2,88E+4	1,65	1,70E+4	0,76	2,25E-3	1,26	1,47E+2	1,50	5,30E+0	0,94	7,44E+1	2,02	5,48E-1	0,0003	3,19E+5	1,20
63	1,20E+4	0,69	3,48E+3	0,15	2,93E-3	1,65	3,12E+1	0,32	1,10E+0	0,20	1,69E+1	0,46	5,15E-2	0,000	1,00E+5	0,38
64	2,59E+2	0,01	1,62E+2	0,01	8,23E-6	0,00	8,88E-1	0,01	8,76E-3	0,00	4,91E-1	0,01	2,31E-4	0,000	1,55E+3	0,01
65	8,90E+4	5,09	5,45E+4	2,42	2,91E-3	1,63	2,97E+2	3,03	2,75E+0	0,49	1,67E+2	4,52	8,10E-2	0,000	5,18E+5	1,95
66	1,71E+5	9,80	1,07E+5	4,76	5,71E-3	3,21	5,84E+2	5,96	5,41E+0	0,96	3,28E+2	8,87	1,59E-1	0,000	1,02E+6	3,82
67	9,06E+3	0,52	2,56E+3	0,11	1,32E-4	0,07	1,43E+1	0,15	1,39E-1	0,02	5,16E+0	0,14	6,02E-3	0,000	2,44E+4	0,09
68	6,06E+3	0,35	4,30E+3	0,19	1,93E-10	0,00	1,02E+1	0,10	2,73E-1	0,05	1,47E+0	0,04	2,53E-3	0,000	4,70E+4	0,18
69	1,31E+3	0,07	3,83E+2	0,02	2,04E-5	0,01	2,06E+0	0,02	1,90E-2	0,00	2,65E-2	0,00	5,75E-4	0,000	3,65E+3	0,01
70	2,38E+3	0,14	1,15E+4	0,51	2,26E-3	1,27	6,48E+1	0,66	3,93E+0	0,70	6,91E+0	0,19	1,87E+5	99,986	3,98E+6	14,96
71	7,33E+3	0,42	7,72E+3	0,34	5,34E-4	0,30	6,67E+1	0,68	2,12E+0	0,38	9,49E+0	0,26	7,38E-2	0,000	3,63E+5	1,36
72	6,20E+3	0,35	9,46E+3	0,42	6,17E-4	0,35	8,21E+1	0,84	2,84E+0	0,51	1,25E+1	0,34	1,95E-2	0,000	4,83E+5	1,81
73	1,73E+5	9,91	2,80E+4	1,24	2,70E-3	1,52	1,59E+2	1,62	8,80E+0	1,56	9,83E+1	2,66	3,23E-1	0,000	4,55E+5	1,71
74	8,76E+4	5,01	1,98E+4	0,88	1,85E-3	1,04	1,22E+2	1,24	5,82E+0	1,03	6,98E+1	1,89	3,51E-1	0,000	3,16E+5	1,19
75	5,37E+3	0,31	5,51E+3	0,24	8,18E-4	0,46	1,27E+1	0,13	6,52E-1	0,12	8,44E+0	0,23	3,60E-2	0,000	8,90E+4	0,33
76	2,57E+4	1,47	2,46E+4	1,09	3,66E-3	2,06	5,70E+1	0,58	2,91E+0	0,52	3,77E+1	1,02	1,61E-1	0,000	3,98E+5	1,49
77	2,50E+3	0,14	6,80E+3	0,30	1,36E-3	0,77	2,83E+1	0,29	4,56E-1	0,08	1,99E+1	0,54	2,02E-2	0,000	1,12E+5	0,42
78	3,21E+3	0,18	3,41E+3	0,15	1,64E-4	0,09	3,84E+1	0,39	1,72E+0	0,31	2,25E+0	0,06	8,01E-3	0,000	3,13E+4	0,12
79	1,85E+3	0,11	3,01E+3	0,13	2,80E-4	0,16	1,83E+1	0,19	4,80E-1	0,09	1,34E+1	0,36	1,57E-2	0,000	3,14E+4	0,12
80	7,45E+3	0,43	9,22E+3	0,41	9,29E-4	0,52	6,00E+1	0,61	1,47E+0	0,26	4,41E+1	1,19	5,00E-2	0,000	1,03E+5	0,39
81	1,44E+3	0,08	1,73E+3	0,08	1,53E-4	0,09	1,01E+1	0,10	2,76E-1	0,05	7,39E+0	0,20	8,16E-3	0,000	1,72E+4	0,06
82	1,25E+3	0,07	1,44E+3	0,06	1,28E-4	0,07	8,41E+0	0,09	2,30E-1	0,04	6,16E+0	0,17	6,80E-3	0,000	1,44E+4	0,05
83	2,82E+2	0,02	3,13E+2	0,01	2,76E-5	0,02	1,82E+0	0,02	4,98E-2	0,01	1,33E+0	0,04	1,53E-3	0,000	3,11E+3	0,01
84	6,42E+2	0,04	6,45E+2	0,03	6,06E-5	0,03	3,96E+0	0,04	1,03E-1	0,02	2,90E+0	0,08	3,53E-3	0,000	6,79E+3	0,03
85	2,36E+2	0,01	3,17E+2	0,01	1,29E-5	0,01	2,33E+0	0,02	1,10E-1	0,02	3,90E-1	0,01	6,15E-4	0,000	2,21E+3	0,01
86	5,80E+3	0,33	6,97E+3	0,31	2,28E-4	0,13	1,91E+1	0,19	1,12E+0	0,20	1,32E+1	0,36	1,00E-2	0,000	3,04E+4	0,11
87	1,36E+3	0,08	2,26E+3	0,10	4,68E-5	0,03	4,62E+0	0,05	2,81E-1	0,05	2,69E+0	0,07	2,01E-3	0,000	1,28E+4	0,05
88	1,48E+2	0,01	1,78E+2	0,01	4,92E-6	0,00	4,35E-1	0,00	2,58E-2	0,00	2,86E-1	0,01	2,16E-4	0,000	8,72E+2	0,00
89	7,98E+3	0,46	1,10E+4	0,49	3,56E-4	0,20	2,98E+1	0,30	1,74E+0	0,31	2,08E+1	0,56	1,58E-2	0,000	4,76E+4	0,18
90	3,30E+2	0,02	4,54E+2	0,02	1,48E-5	0,01	1,24E+0	0,01	7,29E-2	0,01	8,62E-1	0,02	6,55E-4	0,000	1,98E+3	0,01
91	1,16E+4	0,66	2,24E+4	1,00	7											

Tablo 7. Derslik binası modelleme sonrası ‘inşaat’ dönemi yaşam döngüsü matrisi (inşaat+işletme dönemine göre modelleme)
(Classroom building post-modeling 'construction' period life cycle matrix (modeling by construction+operation period))

	Maliyet	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	Toplam
Başlangıç Durum	1,31E+06	1,95E+06	1,39E-01	8,10E+03	4,63E+02	2,89E+03	9,34E+04	1,98E+07	
Maliyet	-9,23%	-7,88%	-12,55%	-12,58%	-13,79%	-14,51%	-0,010%	-9,02%	-79,58
GWP	-6,77%	-18,94%	-23,03%	-24,24%	-25,40%	-21,17%	-0,008%	-16,86%	-136,43
ODP	-6,58%	-15,69%	-25,98%	-25,53%	-25,16%	-28,51%	-0,009%	-17,38%	-144,84
AP	-6,24%	-18,56%	-26,99%	-27,38%	-26,92%	-27,83%	-0,009%	-19,20%	-153,12
EP	-6,93%	-18,28%	-23,34%	-26,60%	-29,24%	-23,35%	-0,009%	-16,34%	-144,09
POCP	-5,37%	-12,91%	-23,03%	-21,94%	-18,95%	-31,42%	-0,008%	-16,97%	-130,61
ADPE	-7,06%	-18,81%	-22,57%	-23,65%	-20,98%	-28,57%	-99,99%	-26,14%	-247,78
ADPF	-5,79%	-15,70%	-26,49%	-24,86%	-23,68%	-28,42%	-99,98%	-28,69%	-253,62

Tablo 8. Derslik binası modelleme sonrası ‘inşaat + işletme’ döneminin yaşam döngüsü matrisi
(Life cycle matrix of classroom building post-modeling for 'construction+ operation' period)

	Maliyet	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	Toplam
Başlangıç Durum	1,75E+06	2,25E+06	1,78E-01	9,80E+03	5,62E+02	3,69E+03	1,87E+05	2,66E+07	
Maliyet	-11,74%	-13,06%	-20,32%	-19,46%	-21,96%	-22,36%	-0,01%	-13,54%	-122,45
GWP	-6,57%	-22,31%	-30,15%	-28,31%	-29,10%	-28,30%	-0,01%	-19,03%	-163,78
ODP	-6,43%	-19,49%	-32,46%	-29,38%	-28,90%	-34,05%	0%	-19,41%	-170,13
AP	-6,17%	-21,98%	-33,25%	-30,91%	-30,35%	-33,52%	0%	-20,76%	-176,95
EP	-10,01%	-22,07%	-28,78%	-31,05%	-34,70%	-29,28%	0%	-18,98%	-174,87
POCP	-4,66%	-16,91%	-29,76%	-26,26%	-23,69%	-36,05%	0%	-18,95%	-156,29
ADPE	-7,08%	-22,82%	-30,74%	-28,86%	-26,28%	-34,96%	-99,99%	-33,65%	-284,39
ADPF	-5,48%	-19,61%	-33,50%	-28,91%	-27,87%	-34,03%	-99,98%	-35,20%	-284,58

belirlenmiştir. Bu hesaplamalar için TSE 825’ te tarif edilen formüller, hesap yöntemleri ve tablolar kullanılmıştır [6, 60]. Bu sayede modelleme sonrası yeni yapıların enerji ihtiyacındaki değişimi farklı ısıtma türlerine göre enerji, maliyet ve karbon göstergeleri için analiz edilerek yeni yapı tasarımlarının enerji ihtiyacındaki etkisi belirlenir.

4.4.1. İlk tasarımın enerji ihtiyacı hesabı (Energy requirement calculation of initial design)

Yapı malzeme tercihleri, yapının lokasyonu, pencere alanı gibi seçenekler yapının ısı kaybını etkilemektedir. Bunun yanı sıra yapıda ısıtma için kullanılan kömür, odun, klima gibi ısıtma türleri de hem çevresel etkiler açısından hem de maliyet açısından önem teşkil etmektedir. Bu bölümde yapının başlangıç tasarımına göre ısı ihtiyacı analizi TSE 825’te tarif edilen hesap yöntemleri ve tablolar kullanılarak gerçekleştirilmiştir [6]. Analiz sonunda yapının 50 yıllık yaşam döneminde ihtiyacı olan ısı belirlenerek 5 ısıtma türü alternatifine göre operasyonel enerji, maliyet ve operasyonel karbon salınımı değerleri belirlenmiştir. Bu analizin sonuçları, yeni yapı tasarımlarının enerji analizi sonuçlarıyla kıyaslanmak için kullanılır.

Hesaplamalarda doğal havalandırma kabulü ile tek hacimli hesap metodu kullanılmıştır. Binanın bulunduğu Malatya ili 3. ısıtma derece-gün bölgesinde olduğu için sıcaklık farkı hesaplamalarında iklim sertliğini temsil eden ısı bölgesi olarak üçüncü bölge seçilmiştir. Dış yüzeylerdeki kolonların yüzeyine profiller ile tutturulmuş kompozit panel cephe kaplaması da hesaplamalara dâhil edilmemiştir.

Tablo 9’da yönetmelikte tarif edildiği gibi hesaplanan binanın özgül ısı kaybı hesabı, kabuk katmanları ve kalınlıkları ile ısı iletkenlik değerleri verilmektedir. Derslik binası başlangıç yapı tasarımına göre havalandırma ve taşınım yolu ile ısı kaybı 8073,75 W/K’dir. Tablo 10, yapının yıllık ısıtma enerji ihtiyacının hesabını sunmaktadır. Derslik bloğunun yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 1415,87 GJ/Yıl olarak hesaplanmıştır. Yapıda kullanım alanı başına düşen ısıtma enerjisi 67,47 kWh/m²’dir. En yüksek ısıtma enerjisi Ocak ve Şubat aylarındadır. Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında ısıtma ihtiyacı yoktur.

Yıllık ısıtma enerjisi tespit edilen yapı için bir sonraki işlem adımı ısıtma için gerekli olan ısıtma türüne göre yakıt miktarını

hesaplamaktır. Tablo 11’de beş farklı ısıtma türünün literatürdeki birim emisyon değerleri sunulmuştur. Tablo 10’da hesaplanan ısıtma enerjisi ihtiyacı yardımıyla her bir ısıtma türü için gereken operasyonel enerji miktarı belirlenir. Tablo 12’de bu beş farklı ısıtma türü için birim enerji, yapıda kullanım için gereken miktarı, ısıtma türünün maliyeti ve karbon emisyonu hesap sonuçları verilmiştir. Yapıda ısıtma için kullanılan yakıtın sadece operasyonel karbon, enerji ve Maliyet göstergelerinin hesaplanmasının sebebi, diğer göstergeler için literatürde veri bulunmamasıdır. Tablo 12’de en çok yakıt kullanımı elektrikli ısıtıcı ve en az yakıt kullanımı doğalgaz olarak belirlenmiştir. Maliyet analizinde de aynı pik indisler elde edilmiştir. Karbon salınımında en yüksek değer kömürün ve en az değer ise odun ısıtma türüne aittir.

Klima hesabında ‘ısıtma COP değeri’ 3 olarak kabul edilmiştir. Kömürün verim katsayısı 0,75 ve birim fiyatı 0,47 \$/kg alınmıştır. Elektrik birim fiyatı 0,12 \$/kWh, doğalgazın verim katsayısı 0,95, doğalgazın birim fiyatı 0,26 \$/m³, odunun birim fiyatı 0,18 \$/kg’dır. Derslik binasının toplam alanı 3280,285 m²’dir. Tablo 13’te 50 yıllık kullanımı boyunca yapının ısıtma türlerine göre hesaplanan maliyet, operasyonel karbon ve enerji değerlerinin hesap sonuçları verilmiştir. Tablo 10’da hesaplanan ısıtma enerjisi ihtiyacı sabit olduğundan dolayı operasyonel enerji değeri sabit olan ısıtma türlerinin analizi sonucu, yapının 50 yıllık kullanımında başlangıç tasarımına göre maliyet açısından en uygun ısıtma türünün doğalgaz ve operasyonel karbon açısından en uygun ısıtma türünün odun olduğu tespit edilmiştir.

4.4.2. ‘İnşaat’ ve ‘İnşaat+İşletme’ Dönemlerine göre Yapılan İyileştirme Sonrası Enerji İhtiyacı Hesabı (Energy Requirement Calculation After Improvement According to 'Construction' and 'Construction + Operation' Periods)

Bölüm 4.2-4.3’teki 16 modele göre yapının modelleme sonrası hem ‘inşaat’ hem de ‘inşaat+işletme’ dönemine göre enerji ihtiyacı hesaplanarak karbon, gömülü enerji ve Maliyet göstergelerinin sonuçları Tablo 14’te sunulmuştur. Hesaplamalar tek hacimli bina çözümü kullanıldığından dolayı her bir modelleme için yapının dış kabuğunu değiştiren iş kalemleri dikkate alınmıştır. Bu iş kalemleri, Bölüm 4.2-4.3’te belirtilen alternatifleri sunan tablolarda belirtilmiştir. Örneğin, karbon referans alınarak yapılan modellemede kalıbin, asma tavanın ve iç duvarların alternatif iş kalemleri enerji

Tablo 9. Binanın özgül ısı kaybı hesaplama çizelgesi (Specific heat loss calculation chart of the building)

1	2	3	4	5	6	7
Binadaki yapı elemanları	Yapı elemanı kalınlığı d (m)	Isıl iletkenlik hesap değeri λ (W/mK)	Isıl iletkenlik direnci R (m ² K/W)	Isı geçirgenlik katsayısı U (W/m ² K)	Isı kaybedilen yüzey A (m ²)	Isı kaybı A x U W/K
R _i			0,130			
Duvar yüzeyi 1	alçı sıva	0,006	0,51			
	kireç-çimento sıva	0,02	1			
	gazbeton	0,25	0,2			
	kireç-çimento sıva	0,028	1			
	R _e		0,040			
Toplam			1,480	0,676	1418,690	958,727
R _i			0,130			
Duvar yüzeyi 2	kireç-çimento sıva	0,012	1			
	betonarme	0,5	2,5			
	taşyünü ısı yalıtım	0,05	0,035			
	kireç-çimento sıva	0,012	1			
	R _e		0,040			
Toplam			1,823	0,549	457,450	250,992
R _i			0,130			
Duvar yüzeyi 3	kireç-çimento sıva	0,012	1			
	betonarme	0,3	2,5			
	taşyünü ısı yalıtım	0,05	0,035			
	kireç-çimento sıva	0,012	1			
	R _e		0,040			
Toplam			1,743	0,574	72,525	41,620
R _i			0,13			
Duvar yüzeyi 4	kireç-çimento sıva	0,02	1			
	betonarme	0,5	2,5			
	kireç-çimento sıva	0,02	1			
	R _e		0,04			
Toplam			0,41	2,439	17,580	42,878
R _i			0,130			
Tavan döşemesi - kenet çatı	beton	0,1	1,65			
	poliüretan ısı yalıtım	0,06	0,04			
	betonarme	0,15	2,5			
	R _e		0,080			
Toplam			1,831	0,437	1237,000	540,586
R _i			0,130			
Tavan döşemesi-teraz çatı	beton	0,12	1,65			
	poliüretan ısı yalıtım	0,06	0,04			
	betonarme	0,15	2,5			
	kireç-çimento sıva	0,012	1			
	R _e		0,040			
Toplam			1,815	0,551	65,000	35,818
R _i			0,170			
Taban	karo	0,02	2,8			
	beton	0,03	1,65			
	betonarme	0,15	2,5			
	geotekstil keçe	0,002	0,06			
	XPS	0,05	0,03			
	çakıl dolgu	1,32	0,7			
	betonarme	0,6	2,5			
	beton	0,15	1,65			
	çakıl dolgu	0,1	0,7			
	R _e		0,000			
Toplam			4,315	0,116	1326	153,657
Dış kapı				5	9,1	45,5
Pencere: Duvar yüzeyi 1.2- Silikon Cephe Kaplama (6+12+6-ısıcam+hava)				2,3	472	1085,6
Pencere: Duvar yüzeyi 5.3 (cam yüzeyler)- Al.pencere (4+16+4-ısıcam+hava)				2,1	508,7	1068,27
Yapı elemanlarından iletim yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı =						4223,647
Yapı elemanlarından Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı =						3850,099
Taşınm ve Havalandırma (doğal) yoluyla ısı kaybı: H = H _T + H _v =						8073,746

analizini etkilememektedir. Fakat dış duvarlar, döşeme kaplaması, mantolama ve doğrama imalatı gibi yapının kabuğunda bulunan iş kalemi değişimleri dikkate alınmıştır. Bölüm 4.4.1'de sunulan hesaplamalarda kullanılan yönetmelik ve yöntem değişmemiştir.

Enerji ihtiyacı hesabı, 16 yeni yapı tasarımının her biri için tekrarlanarak sonuçlar ve iyileşmeler bu bölümde sunulmaktadır.

Tablo 14'te verilen sonuçlarda 8 göstergenin her biri için ısıtma türü

Tablo 10. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı hesaplama çizelgesi (Annual heating energy requirement calculation chart)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aylar	Isı kaybı	Sıcaklık farkı	Toplam ısı kayıpları	İç ısı kazancı	Güneş enerjisi kazancı	Toplam ısı kazancı	KKO	Kazanç kullanım faktörü	Isıtma enerjisi ihtiyacı
	$H=H_T+H_v$ (W/K)	$\theta_i-\theta_e$ (K, °C)	$H(\theta_i-\theta_e)$ (W)	ϕ_i (W)	ϕ_s (W)	$\phi_T=\phi_i+\phi_s$ (W)	γ (-)	η_{ay} (-)	Q_{ay} (kJ)
Ocak		20,3	163897,036		21013,421	50180,835	0,31	0,96	3,00E+08
Şubat		19,9	160667,537		26984,880	56152,294	0,35	0,94	2,79E+08
Mart		15,9	128372,555		33918,432	63085,846	0,49	0,87	1,91E+08
Nisan		9,9	79930,081		39112,762	68280,176	0,85	0,69	8,51E+07
Mayıs		5,6	45212,975		46585,488	75752,902	1,68	0,45	2,89E+07
Haziran	8073,746	1,5	12110,618	29167,414	49278,730	78446,144	0,00	0,00	0,00E+00
Temmuz		0	0,000		47879,069	77046,483	0,00	0,00	0,00E+00
Ağustos		0	0,000		44045,443	73212,858	0,00	0,00	0,00E+00
Eylül		2,8	22606,488		35724,778	64892,192	0,00	0,00	0,00E+00
Ekim		8,4	67819,463		27637,594	56805,008	0,84	0,70	7,32E+07
Kasım		14,4	116261,937		20160,394	49327,808	0,42	0,91	1,86E+08
Aralık		18,7	150979,043		18247,968	47415,382	0,31	0,96	2,74E+08
$Q_{yıl} = \sum Q_{ay} =$									1,42E+09

Tablo 11. Isıtma türlerinin birim emisyon değerleri (Unit emission values of heating types)

Isıtma türü	Emisyon Değeri emisyonu	Birim
Kömür	2,93	kgCO ₂ /kg
Elektrikli ısıtıcı	0,43	kgCO ₂ /kWh
Odun	0,00144	kgCO ₂ /kg
Doğalgaz	2,1857	kgCO ₂ /m ³
Klima	0,43	kgCO ₂ /kWh

Tablo 12. Isıtma türü tercihi göre yıllık maliyet ve karbon emisyonu (Annual cost and carbon emission according to heating type preference)

Isıtma türü	Birim enerji verileri	Gerekli yakıt miktarı	Yakıt Birimi	Maliyet (\$)	Operasyonel karbon (kgCO ₂)
Kömür	6000 kcal/kg = 25104 kJ/kg	7,52E+04	Kg	3,59E+04	2,20E+05
Elektrikli Isıtıcı	1 kWh	3,94E+05	kWh	4,70E+04	1,69E+05
Doğalgaz	10,64 kWh/m ³	3,89E+04	m ³	9,96E+03	8,51E+04
Odun	2500 kcal/kg = 10460 kJ/kg	1,80E+05	Kg	3,23E+04	1,08E+03
Klima	1 kWh	1,23E+05	kWh	1,47E+04	5,29E+04

Tablo 13. İlk tasarımda yapıda kullanılacak olan ısıtma türüne göre 50 yıllık maliyet, karbon ve enerji değerleri (50-year cost, carbon and energy value according to the heating type to be used in the initial design of the building)

Isıtma türü	Maliyet (\$)	O. Enerji (MJ)	O. Karbon (kgCO ₂)
Kömür	1,80E+06	7,08E+07	1,10E+07
Elektrikli ısıtıcı	2,35E+06	7,08E+07	8,46E+06
Doğalgaz	4,98E+05	7,08E+07	4,26E+06
Odun	1,62E+06	7,08E+07	5,41E+04
Klima	7,35E+05	7,08E+07	2,64E+06

fark etmeksizin bir tane operasyonel enerji değeri bulunmaktadır ve en düşük enerji değeri karbon, AP, EP modeline göre yapılan tasarımlardan elde edilmiştir. Bunun yanı sıra en düşük ADPF değeri iki yaşam dönemi için farklı modellerde bulunmaktadır. Maliyet ve karbon göstergelerinin en düşük değerini karbon modeline göre yapılan yapının tasarımı vermiştir. Maliyet göstergesi için en düşük değeri karbon modelinde doğalgaz, karbon için odun ısıtma türü vermiştir. Belirtilen değerler Tablo 14'te italik gösterilmektedir. Tablo 14'te sunulan değerler arasındaki yakınlığın sebebi, göstergeleri en çok etkileyen 10 iş kalemi ile bu iş kalemleri yerine geçen ikamelerin benzer olmasıdır. Sonuç olarak, yapının başlangıç yapı tasarımının yakıt tüketim değerleriyle karşılaştırılmadığında, Tablo 14'e göre yapılan 16 modellemelerden en uygununu diğer bir ifadeyle en düşük değerlere sahip olanını 'inşaat+işletme' yaşam dönemi için karbon göstergesine göre yapılan yapı tasarımı vermektedir.

Tablo 14'te farklı ısıtma türleri için sunulan 16 yeni yapı modelinin ısıtmadan kaynaklanan karbon, enerji ve maliyet değerlerinin yapının

başlangıç tasarımına göre değişim miktarları Tablo 15'te verilmiştir. Çevresel etki göstergelerindeki iyileşme yani azalma tabloda negatif değer olarak temsil edilmektedir. Tablo 15'te yapının 'inşaat+işletme' yaşam dönemine göre GWP göstergesi için yapılan yapı tasarımının ısıtmadan kaynaklanan en yüksek iyileşmeyi verildiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra en düşük Maliyeti %-14,71 azalmayla odun ısıtma türünün, en düşük ADPF'yi %-14,54 azalmayla doğalgaz ısıtma türünün ve en düşük GWP'yi %-14,672 azalmayla elektrikli ısıtıcının verdiği belirlenmiştir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussion)

Ülkemiz Paris Sözleşmesi başta olmak üzere taraf olduğu uluslararası antlaşmalardan dolayı sera gazı emisyonunun azaltılması taahhüdünde bulunmuştur. Bunun yanı sıra salınan her ton karbondioksit için ödenecek vergi olan karbon piyasaları Avrupa Birliği Yeşil Mutabakat ile ticareti etkilemeye başlamıştır. Konutların işletme aşamalarındaki çevresel etkileri çoğunlukla enerji kaynağı ve enerji tüketim miktarının hesaplanmasıyla ölçülebilmektedir. Fakat

Tablo 14. İyileştirilmiş tasarımlarda kullanılacak olan ısıtma türüne göre 50 yıllık maliyet, karbon ve enerji değerleri (50-year cost, carbon and energy value according to the type of heating to be used in the improved designs)

Gösterge türü	Isıtma türü	'İnşaat' dönemine göre yenilenen 8 yeni yapı modelinin sonuçları			'İnşaat+işletme' dönemine göre yenilenen 8 yeni yapı modelinin sonuçları		
		Maliyet (\$)	Enerji (MJ)	Karbon (kgCO ₂)	Maliyet (\$)	Enerji (MJ)	Karbon (kgCO ₂)
Maliyet modeli	Kömür	1,78E+06		1,08E+07	1,78E+06		1,08E+07
	Elektrikli ısıtıcı	2,32E+06		8,30E+06	2,32E+06		8,30E+06
	Doğalgaz	4,92E+05	6,98E+07	4,20E+06	4,92E+05	6,98E+07	4,20E+06
	Odun	1,60E+06		5,34E+04	1,60E+06		5,34E+04
GWP modeli	Klima	7,25E+05		2,61E+06	7,25E+05		2,61E+06
	Kömür	1,56E+06		9,58E+06	1,54E+06		9,42E+06
	Elektrikli ısıtıcı	2,03E+06		7,32E+06	2,01E+06		7,22E+06
	Doğalgaz	4,31E+05	6,14E+07	3,70E+06	4,25E+05	6,05E+07	3,64E+06
ODP modeli	Odun	1,41E+06		4,68E+04	1,38E+06		4,62E+04
	Klima	6,37E+05		2,28E+06	6,29E+05		2,25E+06
	Kömür	2,03E+06		1,24E+07	1,78E+06		1,08E+07
	Elektrikli ısıtıcı	2,65E+06		9,57E+06	2,32E+06		8,30E+06
AP modeli	Doğalgaz	5,62E+05	8,00E+07	4,82E+06	4,91E+05	6,98E+07	4,20E+06
	Odun	1,83E+06		6,11E+04	1,60E+06		5,33E+04
	Klima	8,33E+05		2,98E+06	7,25E+05		2,60E+06
	Kömür	1,54E+06		9,42E+06	1,54E+06		9,42E+06
EP modeli	Elektrikli ısıtıcı	2,01E+06		7,23E+06	2,01E+06		7,22E+06
	Doğalgaz	4,26E+05	6,05E+07	3,65E+06	4,27E+05	6,05E+07	3,64E+06
	Odun	1,39E+06		4,63E+04	1,38E+06		4,63E+04
	Klima	6,29E+05		2,26E+06	6,29E+05		2,25E+06
POCP modeli	Kömür	1,54E+06		9,42E+06	1,54E+06		9,42E+06
	Elektrikli ısıtıcı	2,01E+06		7,23E+06	2,01E+06		7,23E+06
	Doğalgaz	4,26E+05	6,05E+07	3,65E+06	4,26E+05	6,05E+07	3,65E+06
	Odun	1,39E+06		4,63E+04	1,39E+06		4,63E+04
ADPE modeli	Klima	6,29E+05		2,26E+06	6,29E+05		2,26E+06
	Kömür	1,78E+06		1,08E+07	1,78E+06		1,08E+07
	Elektrikli ısıtıcı	2,32E+06		8,30E+06	2,32E+06		8,30E+06
	Doğalgaz	4,91E+05	6,98E+07	4,20E+06	4,91E+05	6,98E+07	4,20E+06
ADPF modeli	Odun	1,60E+06		5,33E+04	1,60E+06		5,33E+04
	Klima	7,25E+05		2,60E+06	7,25E+05		2,60E+06
	Kömür	1,78E+06		1,08E+07	1,78E+06		1,08E+07
	Elektrikli ısıtıcı	2,32E+06		8,30E+06	2,32E+06		8,30E+06
ADPF modeli	Doğalgaz	4,91E+05	6,98E+07	4,20E+06	4,91E+05	6,98E+07	4,20E+06
	Odun	1,60E+06		5,33E+04	1,60E+06		5,33E+04
	Klima	7,25E+05		2,60E+06	7,25E+05		2,60E+06
	Kömür	1,78E+06		1,08E+07	1,78E+06		1,08E+07

yapının üretim aşamasındaki çevresel etki hesaplanması oldukça karmaşıktır. Bu çalışmada yapıların yapım ve kullanım sürecindeki çevresel etkileri araştırılarak en az tasarım revizyonu ile en yüksek iyileştirmenin yapılabilmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemle maliyet ve 7 çevresel göstergeden oluşan toplam 8 göstergeye göre başlangıç yapı tasarımı revize edilerek, yapının maliyet ve çevresel etkilerini en çok azaltan tasarımı veren gösterge ve yaşam dönemi belirlenmiştir. Literatürde ve uygulamada genellikle karbon odaklı çevresel etki analizleri yapılmakta ve diğer etkiler ihmal edilmektedir. Bu çalışmada 8 kriter ele alınarak yapı tasarımında bütüncül bir çevresel iyileşme elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada çevresel etki ve maliyet analizi sadece inşaat/üretim süreci ile sınırlı tutulmamış ve yapının işletme döneminde yapı malzemelerinin tekrarlı kullanımları da dikkate alınmıştır. Bu sayede hem yapı malzemelerinin kullanım ömrünün yapı üzerindeki etkisi hem de hangi yapı malzemesinin yapının çevresel göstergelerinde sıcak nokta oluşturduğu tespit edilebilmiştir. Analizler, yapı malzemelerinin kullanım ömürlerinin dikkate alınarak yapının kullanımı boyunca yıpranan kısımlarının onarılması veya yenilenmesinin analize dâhil edilmesiyle binanın sadece yapı malzemeleri dikkate alındığı durum için çevresel etkilerini ortalama %24 artırdığını göstermektedir. Bu oran; maliyet için %25 ve diğer

çevresel etkileri doğrudan etkileyen küresel ısınma potansiyeli için %13, fosil kaynak kullanım potansiyeli için %26 olarak hesaplanmıştır.

Başlangıç yapı tasarımına göre analiz edilen yapının 'inşaat' yaşam dönemi için hesaplanan 8 göstergesinin sonucu, bir diğer ifadeyle yapı malzemelerinin faydalı ömrünün analizlere dahil edilmediği analizlerde; Maliyet göstergesi 305,16 \$/m², GWP göstergesi 453,72 kgCO₂/m², ODP göstergesi 3,24E-05 kgCFC₁₁/m², AP göstergesi 1,88 mol H⁺/m², EP göstergesi 0,11 kgP/m², POCP göstergesi 0,67 kgNMVOC/m², ADPE göstergesi 21,73 kgSb/m² ve ADPF göstergesi 4605,45 MJ/m² olarak hesaplanmıştır. Analizler 'inşaat+işletme' yaşam dönemi için tekrarlandığında yani yapının 50 yıllık kullanımında yapıda malzeme değişiminden kaynaklanan etkiler de analizlere dahil edildiğinde; Maliyet 406,93 \$/m², GWP değeri 523,88 kgCO₂/m², ODP değeri 4,14E-05 kgCFC₁₁/m², AP değeri 2,28 mol H⁺/m², EP değeri 0,13 kgP/m², POCP değeri 0,86 kgNMVOC/m², ADPE değeri 43,45 kgSb/m² ve ADPF değeri 6196,64 MJ/m² olarak hesaplanmıştır. Yapının maliyet ve çevresel etkisini azaltmak için yapılan analizler sonucunda elde edilen 4 yaşam döngüsü matrisi incelendiğinde en yüksek iyileşmeyi her iki yaşam dönemi için de %284,59 değeri ile (Tablo 5) ADPF göstergesine göre

Tablo 15. İyileştirilmiş tasarımlarda kullanılacak olan ısıtma türüne göre 50 yıllık maliyet, karbon ve enerji iyileşme yüzdeleri (50-year cost, carbon and energy improvement percentages according to the type of heating to be used in the improved designs)

Gösterge türü	Isıtma türü	'İnşaat' dönemine göre yenilenen 8 yeni yapı modelinin iyileşme yüzdeleri			'İnşaat+işletme' dönemine göre yenilenen 8 yeni yapı modelinin iyileşme yüzdeleri		
		Maliyet (\$)	Enerji (MJ)	Karbon (kgCO ₂)	Maliyet (\$)	Enerji (MJ)	Karbon (kgCO ₂)
Maliyet modeli	Kömür	-1,32%		-1,44%	-1,32%		-1,44%
	Elektrikli ısıtıcı	-1,35%		-1,87%	-1,35%		-1,87%
	Doğalgaz	-1,27%	-1,34%	-1,30%	-1,27%	-1,34%	-1,30%
	Odun	-1,47%		-1,32%	-1,47%		-1,32%
	Klima	-1,29%		-1,20%	-1,29%		-1,20%
GWP modeli	Kömür	-13,22%		-12,95%	-14,54%		-14,39%
	Elektrikli ısıtıcı	-13,47%		-13,46%	-14,48%		-14,672%
	Doğalgaz	-13,35%	-13,31%	-13,22%	-14,63%	-14,54%	-14,53%
	Odun	-13,24%		-13,45%	-14,71%		-14,62%
	Klima	-13,27%		-13,47%	-14,46%		-14,670%
ODP modeli	Kömür	12,78%		12,95%	-1,32%		-1,44%
	Elektrikli ısıtıcı	12,79%		13,08%	-1,35%		-1,87%
	Doğalgaz	12,88%	12,98%	13,04%	-1,43%	-1,45%	-1,30%
	Odun	13,24%		12,87%	-1,47%		-1,46%
	Klima	13,27%		12,87%	-1,29%		-1,50%
AP modeli	Kömür	-14,54%		-14,39%	-14,54%		-14,39%
	Elektrikli ısıtıcı	-14,48%		-14,58%	-14,48%		-14,65%
	Doğalgaz	-14,47%	-14,53%	-14,34%	-14,63%	-14,53%	-14,53%
	Odun	-14,22%		-14,47%	-14,70%		-14,62%
	Klima	-14,46%		-14,37%	-14,46%		-14,670%
EP modeli	Kömür	-14,54%		-14,39%	-14,54%		-14,39%
	Elektrikli ısıtıcı	-14,48%		-14,58%	-14,48%		-14,58%
	Doğalgaz	-14,47%	-14,53%	-14,34%	-14,47%	-14,53%	-14,34%
	Odun	-14,22%		-14,47%	-14,22%		-14,47%
	Klima	-14,46%		-14,37%	-14,46%		-14,37%
POCP modeli	Kömür	-1,32%		-1,44%	-1,32%		-1,44%
	Elektrikli ısıtıcı	-1,35%		-1,87%	-1,35%		-1,87%
	Doğalgaz	-1,43%	-1,45%	-1,30%	-1,43%	-1,45%	-1,30%
	Odun	-1,47%		-1,46%	-1,47%		-1,46%
	Klima	-1,29%		-1,50%	-1,29%		-1,50%
ADPE modeli	Kömür	-1,32%		-1,44%	-1,32%		-1,44%
	Elektrikli ısıtıcı	-1,35%		-1,87%	-1,35%		-1,87%
	Doğalgaz	-1,43%	-1,45%	-1,30%	-1,43%	-1,45%	-1,30%
	Odun	-1,47%		-1,46%	-1,47%		-1,46%
	Klima	-1,29%		-1,50%	-1,29%		-1,50%
ADPF modeli	Kömür	-1,32%		-1,44%	-1,32%		-1,44%
	Elektrikli ısıtıcı	-1,35%		-1,87%	-1,35%		-1,87%
	Doğalgaz	-1,43%	-1,45%	-1,30%	-1,43%	-1,45%	-1,30%
	Odun	-1,47%		-1,46%	-1,47%		-1,46%
	Klima	-1,29%		-1,50%	-1,29%		-1,50%

yapılan analizin verdiği belirlenmiştir. Sonuçlar çevresel etkiyi ve maliyeti azaltmak için yapı malzemelerinin faydalı ömrünün dikkate alınarak tasarım yapılması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. ADPF göstergesinde en fazla mali ve çevresel iyileşmeyi veren tasarımı oluşturmak için başlangıç yapı tasarımında değiştirilen iş kalemleri; alüminyum doğrama yerine ahşap doğrama, porselen karo yerine pvc karo, çinko çatı kaplaması yerine bitümle levha kaplaması, alüminyum asma tavan yerine alçı levhadan asma tavan, gaz beton yerine bimsbeton atanmıştır. Atanan iş kalemleri sadece ADPF göstergesini değil, 8 göstergenin her birinin maliyet ve çevresel gösterge değerlerini azalmıştır. Tüm göstergelerin yapı revizyonunda iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Ek olarak literatürde yoğun araştırmaya sahip GWP göstergesinin ise en düşük iyileşmelerden birini verdiği görülmektedir.

Yapının çevresel etkisi üzerinde en fazla azalmayı/iyileşmeyi Tablo 5'te sunulan revizyon vermektedir. Analiz edilen göstergelerin en fazla azalma değerleri Maliyet için %-12,83, GWP için %-22,31, ODP için %-32,46, AP için %-32,61, EP için %-36,07, POCP için %-40,64, ADPE için %-99,99 ve ADPF için %-35,20 olarak belirlenmiştir. Revizyonlarda toplam iyileşme yüzdelерinin birbirlerine yakın olmasının sebebi, farklı yaşam dönemlerindeki değiştirilen 10 iş kaleminin çoğunlukla benzer olmasından kaynaklanmaktadır.

Değiştirilen iş kalemlerinin 8 göstergenin her birine etki yüzdesi değişse de türü değişmediğinden sonuçlar birbirine yakın çıkmaktadır. Yapılan analizlerde 8 göstergesi en çok beton, donatı, profil ve polimer türevleri yani PVC, PP, PE'den oluşan temel inşaat malzemelerinin oluşturduğu sonucuna varılmaktadır.

Tablo 4, 5, 7 ve 8'in diyagonallerindeki değerler ilgili çevresel etki göstergesi dikkate alınarak yapılan tasarım revizyonlarında aynı çevresel etki göstergesi için ne kadar değişimin olduğunu ifade etmektedir. Diyagonal dışı elemanlarda ise elemanın bulunduğu satırdaki çevresel gösterge dikkate alınarak yapılan tasarım revizyonuna göre elemanın yer aldığı sütundaki gösterge değerinde ne kadar değişim olduğu belirtilmektedir. Belirtilen tablolar incelendiğinde tüm matris elemanlarının negatif değerde veya sıfır olduğu görülecektir. Negatif değerler tasarım revizyonları sayesinde tüm çevresel etki değerlerinde azalma sağlandığını belirtmektedir. Bir başka ifade ile bir çevresel etki ölçeği dikkate alınarak yapılan revizyon başka bir çevresel etki ölçeğinde de azalma sağlamaktadır. Bunun sonucunda tüm çevresel etki parametrelerinin kendi aralarında korelasyona sahip olduğu çıkarımı yapılabilir.

İş kalemlerinin değişimiyle oluşan yeni yapı modellerinde, yapının dış kabuğunu etkileyen malzeme değişimleri ısıtma enerjisi ihtiyacını

değiştirebilir. Bundan dolayı yapının başlangıç tasarımı ve 16 yeni yapı tasarımı için gereken yakıt miktarı 5 farklı ısıtma türü için hesaplanarak her bir yakıt türünün 50 yıllık karbon salınımı, gömülü enerji ve maliyet değerleri belirlenir. Bu sayede modelleme sonrası yeni yapıların enerji ihtiyacındaki değişim analiz edilir. Yapının başlangıç tasarımına göre yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 1415,87 GJ/yıl olarak hesaplanmıştır. Yapıda kullanım alanı başına düşen ısıtma enerjisi 67,47 kWh/m²'dir. Kömür, elektrikli ısıtıcı, doğalgaz, odun ve klima ısıtma türlerinden en çok yakıt kullanımı elektrikli ısıtıcı ve en az yakıt kullanımı doğalgaz olarak belirlenmiştir. Maliyette de bu değerler aynıdır. Karbon salınımında en yüksek değer kömürün ve en az değer ise odun ısıtma türüne aittir. Yapının 50 yıllık kullanımında başlangıç tasarımına göre maliyet açısından en uygun ısıtma türünün doğalgaz ve karbon açısından en uygun ısıtma türünün odun olduğu tespit edilmiştir. Enerji ihtiyacı hesabı, 16 yeni yapı tasarımının her biri için tekrarlanmıştır. GWP göstergesine göre yapılan yapı tasarımı 'inşaat+işletme' yaşam dönemi için en uygun sonuçları vermiştir. Yapının başlangıç tasarımı ile 16 yeni yapı modeli arasında ısıtmadan kaynaklanan karbon, enerji ve maliyet değerlerindeki değişime (artış veya azalış) göre de yapının 'inşaat+işletme' yaşam dönemine göre karbon salınımı için yapılan yapı tasarımının ısıtmadan kaynaklanan en yüksek iyileşmeyi verildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak en fazla mali ve çevresel iyileşmeyi sağlayan ADPF göstergesine göre yapılan yapı tasarımının ısıtma enerjisi analizi en uygun sonuçları vermemektedir. Gerçekleştirilen hesaplamalar fazla yer işgal etmemesi için bu çalışmada sadece bir üniversite binası kapsamında incelenmiştir. Yöntem farklı bina tipleri ve iklim koşulları için doktora çalışması kapsamında başarı ile uygulanmıştır [63]. Yöntem tüm bina türleri ve ısıtma sistemleri için metraj verileri ve yapı tarifleri tanımlandıktan sonra kolaylıkla uygulanabilmektedir. Yöntemin detayları yöntem kısmında ve doktora tezinde [63] detayları ile anlatıldığı için araştırmacılar tarafından kolaylıkla uygulanabilecektir.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Çevresel problemler günümüzün en önemli sorunlarından biridir ve yapı çevrenin bu problemler üzerindeki etkisi tartışılmazdır. Literatürde inşaat sektörünün çevresel etkilerini araştıran çalışmalar sıklıkla yapıların işletme yaşam dönemini veya karbon-enerji göstergelerini analiz etmektedir. Yapıların tasarım sürecinde çevresel etkilerini hesaplamak ve azaltmak için literatürde sistematik bir yöntem bulunmamaktadır. Bu çalışmada, belirtilen literatür boşluğunu doldurmak için projelerin yaşam döngüsü analizini tüm iş kalemleri için maliyet ve 7 çevresel etki faktörünü inceleyerek gerçekleştiren ve elde edilen değerler ışığında çevresel etkileri en az tasarım yenilemesiyle iyileştiren bir yöntem uygulanmıştır. Bu çalışmada uygulanan yöntem sayesinde yapıların sadece karbon ve enerji göstergeleri değil, 7 çevre göstergesinin ve maliyetinin etkileri hesaplanmıştır. Uygulanan yöntem ile en düşük maliyet ve çevresel etkiyi veren yapı tasarımının hangi göstergeye ve/veya yaşam dönemine göre yapılacağı belirlenmektedir. Çalışmanın kabul edilen çerçevesinde yapılan analizlerin sonuçları ADPF göstergesine göre yapılan tasarımın en iyi iyileşmeyi sağladığını göstermektedir. Ayrıca yapı malzemelerinin kullanım ömürlerinin analize dâhil edilmesinin yapım için çevresel etkilerini ortalama %24 artırdığından dolayı, çevresel etkiyi ve maliyeti azaltmak için yapı tasarımı yapılırken yapı malzemelerinin faydalı ömrünün dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Yapının başlangıç tasarımı ile yeni yapı modelleri arasında ısıtmadan kaynaklanan karbon, enerji ve maliyet değerlerindeki değişime göre yapının ısıtmadan kaynaklanan en yüksek iyileşmeyi değerini GWP göstergesi için yapılan yapı tasarımının verdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak en fazla mali ve çevresel iyileşmeyi sağlayan ADPF göstergesine göre yapılan yapı tasarımının ısıtma enerjisi analizinde en uygun sonuçları vermemektedir. Yapının üretim aşamasında çevreye ne kadar zarar verdiğini bütün çevresel performans göstergeleri ile araştıran çalışma

sayısı azdır. Bu çalışma inşaat sektöründe birçok yönden eksik olan çevresel etki analizine kapı açmakla kalmayıp, birçok araştırmacının yararlanacağı bir analizi sunmaktadır. Bu çalışmada yapılan kapsamlı ve yoğun hesaplamalar literatürde belirtilen boşlukları doldurdu da bazı gelecek çalışmaların tetiklenmesine yol açmıştır. Önerilen yöntem çevresel etki değerlerinin iyileştirilmesini sağlamakta fakat mümkün olan en yüksek iyileşmenin elde edilmesini kesin biçimde garanti edememektedir. Elde edilen iyileştirmenin artırılabilmesi için sisteme üst-sezgisel bir algoritmanın eklenmesi yöntemin faydasını arttırabilecektir. Ayrıca, bu analizin dört ısıtma derece-gün bölgesi için çok sayıda farklı kullanım türüne ve/veya farklı taşıyıcı sistem türüne sahip yapılar da tekrarlanmasıyla elde edilen bulgular ile yeterli araştırma hafızasına erişilerek araştırma doğrultusunda geliştirilen modelin genellenebilirliği test edilerek yapılar hakkında çıkarımlar sağlanmalıdır.

Kaynaklar (References)

1. Azapagic, A., Emsley, A., Hamerton, I., *Polymers: the environment and sustainable development*, John Wiley and Sons, 2003.
2. EPA, LCA database. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2008.
3. Adalberth, K., Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples, *Building and environment*, 32 (4), 321-329, 1997.
4. Nematshoua, M. K., Sendrahasina, R. M., Malmady, C., Orosa, J. A., Simo, E., & Reiter, S., Analysis of environmental impacts and costs of a residential building over its entire life cycle to achieve nearly zero energy and low emission objectives, *Journal of Cleaner Production*, 373, 133834, 2022.
5. Norouzi, M., Haddad, A. N., Jiménez, L., Hoseinzadeh, S., Boer, D., Carbon footprint of low-energy buildings in the United Kingdom: Effects of mitigating technological pathways and decarbonization strategies, *Science of The Total Environment*, 882, 163490, 2023.
6. TSE 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, 2008.
7. Gazete, R., Yağmursuyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri hakkında yönetmelik. Web sayfası: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/06/20170623-8.htm>(Erişim tarihi: Aralık 2020), 2017.
8. Gazete, R., Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 2022. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/02/20220219-2.htm> ve <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf>.
9. ÇŞİDB Emisyon Ticaret Sistemi Yönetmeliği Taslağı, <https://iklim.gov.tr/taslaklar-i-2124>, 2026.
10. Guan, L., Walmsely, M., Chen, G., Life cycle energy analysis of eight residential houses in Brisbane, Australia, *Procedia Engineering*, 121, 653-661, 2015.
11. Adalberth, K., Energy use during the life cycle of buildings: a method. *Building and Environment*, 32 (4), 317-320, 1997.
12. Fay, R., Treloar, G., Iyer-Raniga, U., Life-cycle energy analysis of buildings: a case study, *Building Research & Information*, 28 (1), 31-41, 2000.
13. Hammond, G., Jones, C., *Inventory of carbon & energy: ICE (Vol. 5)*, Bath: Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Version 1, 2008.
14. Hammond, G., Jones, C., Lowrie, E. F., Tse, P., *Embodied carbon, The inventory of carbon and energy (ICE) Version (2.0)*, 2011.
15. Ceylan, E. Z., Dijital İkizler ve İnşaat Sektöründeki Yeri, *Yapı Bilgi Modelleme*, 1 (2), 53-61, 2019.
16. Göktürk, İ., İnşaat sektöründe fizibilite aşamasında maliyet tahmini yapmakta karşılaşılan zorluklar ve çözüm önerileri üzerine bir değerlendirme, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
17. International Energy Agency. Energy End-uses and Efficiency Indicators Data Explorer. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-end-uses-and-efficiency-indicators-data-explorer>. Erişim Tarihi: 11.06.2023.
18. Edwards, B., Sürdürülebilirlik Kültürü ve Mimari Tasarımın Önündeki Güçler, *Ekolojik Mimarlık ve Planlama Ulusal Sempozyumu*, Antalya, 22-24, 2007.
19. Carbon Brief. Carbon Brief Türkiye Profili. <https://www.carbonbrief.org/carbon-brief-turkiye-profil/>. Erişim Tarihi: 11.06.2023.

20. Öztok, M., Menlik, T., Energy Economy and Carbon Emission Potential Comparison of Heating Systems by Using Multi Criteria Decision Making Methods (AHP, VIKOR and TOPSIS). *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 8 (2), 320-335, 2022.
21. Süt N.İ., Hamurcu M., Tamer E., An Application of Green Transportation in Campus: A DecisionMaking Process for Selection of Ring Vehicles, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 5 (1), 9-21, 2019.
22. Özeler Kanan, N., Gültekin, A., Çelebi, G., Yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi kapsamında enerji verimli cephe sistemlerine ilişkin bir literatür araştırması, 2. Uluslararası Bina Sempozyumu, Ankara, 2015.
23. Akgül M.C., Gürsel Dino İ., Climate change impact assessment in residential buildings utilizing RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1665-1684, 2020.
24. Akköse G., Duran A., Gürsel Dino İ., Meral Akgül Ç., Machine learning based evaluation of window parameters on building energy performance and occupant thermal comfort under climate change, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (4), 2069-2084, 2023.
25. Akkose, G., Akgul, C. M., & Dino, I. G., Educational building retrofit under climate change and urban heat island effect. *Journal of Building Engineering*, 40, 102294, 2021.
26. Dino, I. G., & Akgül, C. M., Impact of climate change on the existing residential building stock in Turkey: An analysis on energy use, greenhouse gas emissions and occupant comfort, *Renewable energy*, 141, 828-846, 2019.
27. Iyer-Raniga, U., & Wong, J. P. C., Evaluation of whole life cycle assessment for heritage buildings in Australia, *Building and Environment*, 47, 138-149, 2012.
28. Azzouz, A., Borchers, M., Moreira, J., & Mavrogianni, A., Life cycle assessment of energy conservation measures during early stage office building design: A case study in London, UK. *Energy and Buildings*, 139, 547-568, 2017.
29. Asif, M., Muneer, T., & Kelley, R., Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and environment*, 42 (3), 1391-1394, 2007.
30. Karimpour, M., Belusko, M., Xing, K., Bruno, F., Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. *Building and environment*, 73, 106-114, 2014.
31. Shukla, A., Tiwari, G. N., Sodha, M. S., Embodied energy analysis of adobe house. *Renewable Energy*, 34 (3), 755-761, 2009.
32. Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., Culp, C. H., Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review, *Energy and buildings*, 42 (8), 1238-1247, 2010.
33. Ekundayo, D., Perera, S., Udeaja, C., Zhou, L., Carbon review and qualitative comparison of selected carbon counting tools, In *RICS COBRA Research Conference*, 2012.
34. Marosky, N., Dose, J., Fleischer, G., Ackermann, R., Challenges of data transfer between CAD and LCA software tools, In *3rd International Conference on Life Cycle Management*, University of Zurich at Irchel, 2007.
35. Erzurum, T., Bettemir, Ö. H., Sustainability Analysis for the Construction of Temporary Houses, *14th International Congress on Advances in Civil Engineering- ACE 2020-21*, 354-360, 2021.
36. Erzurum, T., Bettemir, Ö. H., Sustainability Analysis for the Construction of Rural Houses, *7th International Project and Construction Management Conference- IPCMC2022*, 1292-1303, 2022.
37. Anand, C. K., Amor, B., Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 67, 408-416, 2017.
38. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilarinho, V., Pérez, G., Castell, A., Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 29, 394-416, 2014.
39. EN, B. 15804; Sustainability of Construction Works-Environmental Product Declarations-Core Rules for the Product Category of Construction Products. The British Standards Institution, 2012.
40. Emami, N., Marteinsson, B., Heinonen, J., Environmental impact assessment of a School building in Iceland using LCA-including the effect of long distance transport of materials, *Buildings*, 6 (4), 46, 2016.
41. Pomponi, F., Moncaster, A., Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment-What does the evidence say?, *Journal of environmental management*, 181, 687-700, 2016.
42. Säynäjoki, A., Heinonen, J., Junnila, S., Horvath, A., Can life-cycle assessment produce reliable policy guidelines in the building sector?, *Environmental Research Letters*, 12 (1), 013001, 2017.
43. De Wolf, C. C. E. L., Material quantities in building structures and their environmental impact, *Doctoral Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 2014.
44. Chastas, P., Theodosiou, T., Kontoleon, K. J., Bikas, D., Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO2 emissions of residential buildings, *Building and Environment*, 130, 212-226, 2018.
45. Pomponi, F., Moncaster, A., Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2431-2442, 2018.
46. Bettemir, Ö. H., "Recommendations on the solution of accommodation problem and recovery after destructive earthquakes", *International Journal of Emergency Management*, 12 (2), 168-184, 2016.
47. Sartori, I., Hestnes, A. G., Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article, *Energy and buildings*, 39 (3), 249-257, 2007.
48. Adalberth, K., Almgren, A., Petersen, E. H. Life cycle assessment of four multi-family buildings, *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 2, 2001.
49. Bettemir, Ö. H., & Erzurum, T., Comparative Life Cycle Assessment of Post-Disaster Housing According to Ground Type-Outdoor Temperature-Lifespan Relationship: Carbon, Energy and Cost. *Journal of Building Engineering*, 113388, 2025.
50. Vukotic, L., Fenner, R. A., Symons, K., Assessing embodied energy of building structural elements, In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 163 (3), 147-158, 2010.
51. Cui, H. Z., Sham, F. C., Lo, T. Y., Lum, H. T., Appraisal of alternative building materials for reduction of CO2 emissions by case modeling, *Int. J. Environ. Res.*, 5 (1), 93-100, 2011.
52. Gauch, H. L., Hawkins, W., Ibell, T., Allwood, J. M., Dunant, C. F., Carbon vs. cost option mapping: A tool for improving early-stage design decisions, *Automation in Construction*, 136, 104178, 2022.
53. Bettemir, Ö. H., & Erzurum, T., Comparative Life cycle assessment of post-disaster housing according to ground type-outdoor temperature-lifespan relationship: Carbon, energy and cost. *Journal of Building Engineering*, 111, 113388, 2025.
54. Bettemir Ö.H. and Erzurum T., Collection of environmental performance indicator data and comparison with inventory of carbon and energy data, *3rd International Civil Engineering and Architecture Conference (ICEARC'23)*, 150-173, 2023.
55. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Rayiç ve Analizler (2022/3), <https://yfk.csb.gov.tr/birim-fiyatlar-i-100468>, Erişim Tarihi: 02/09/2022.
56. Bettemir, Ö.H., Gündüz, E., Akkurt, O., Hilal, E., Arslan, M.A., Detection of Variability of Cash-Flow of Construction Activities Due To Schedule, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7 (1), 211-223, 2019.
57. Ergen F., Bettemir Ö.H., BIM-driven software and algorithm for optimal floor tile layout minimizing material waste. *Automation in Construction*, 173, 106115, 2025.
58. Ergen F., Bettemir Ö.H., Development of ontological algorithms for exact QTO of reinforced concrete construction items. In *Structures*, 60, 105907, Elsevier, February 2024.
59. Ergen F., Bettemir Ö.H. Yüksek doğrulukta kaba inşaat kalemlerinin metrajını hesaplayan YBM tabanlı prototip yazılımın geliştirilmesi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13 (1), 86-105, 2023.
60. Erzurum T., Bettemir Ö.H., Tek katlı Kırsal Bölge Yapısının Gömülü Enerji ve Karbon Salınımının Analizi, *Politeknik Dergisi*, 2023.
61. Global Construction Products. LCA Database. <https://lcadatabase.com/>. Erişim Tarihi: 02/09/2022.
62. International EPD System. EPD Database. <https://www.environdec.com/library>. Erişim Tarihi: 02/09/2022.
63. Erzurum T., Yapıların çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için çok kriterli karar destek sistemi geliştirilmesi, İnönü Ü., FBE, Doktora Tezi, 2024.