



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Tek katlı kırsal bölge yapısının gömülü enerji ve karbon salınımının analizi

Analysis of embodied energy and carbon emission of a single story rural area structure

Yazar(lar) (Author(s)): Tuğba ERZURUM¹, Önder Halis BETTEMİR²

ORCID¹: 0000-0003-4788-6999

ORCID²: 0000-0002-5692-7708

To cite to this article: Erzurum T. ve Bettemir Ö. H., “tek katlı kırsal bölge yapısının gömülü enerji ve karbon salınımının analizi”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1565-1580, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Erzurum T. ve Bettemir Ö. H., “Tek katlı kırsal bölge yapısının gömülü enerji ve karbon salınımının analizi”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1565-1580, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1207484

Tek katlı Kırsal Bölge Yapısının Gömülü Enerji ve Karbon Salınımının Analizi

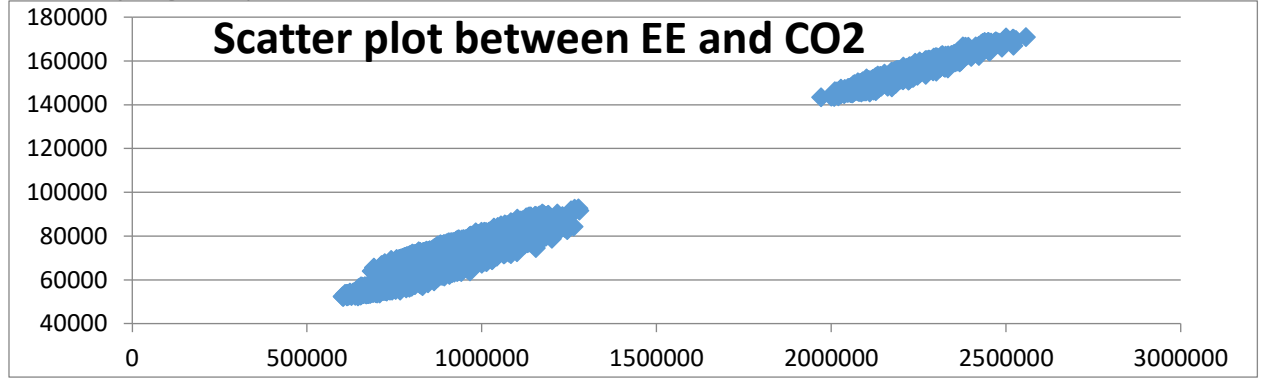
Analysis of Embodied Energy and Carbon Emission of a Single Story Rural Area Structure

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Embodied energy and emitted carbon of rural house construction is analyzed
- ❖ A framework system is developed
- ❖ Related construction items are detected
- ❖ Embodied energy and Carbon Emission of each construction item is computed

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Monte Carlo Simulasyonu tek katlı kırsal bölge yapısında salınan karbon ve gömülü enerji arasındaki korelasyonu açığa çıkarmaktadır. Monte Carlo Simulation reveals the correlation between the embodied energy and the carbon emission of single story rural area structure.



Şekil.A Y eksenini CO₂ emisyonu x eksenini gömülü enerji/ Figure.A Y axis represents CO₂ emission and x axis represents embodied energy

Amaç (Aim)

Tek katlı kırsal bir ev inşaatı sırasında gerçekleşen karbon salınımı ve gömülü enerji miktarlarının hesaplanması amaçlanmıştır. / Computation of carbon emission and embodied energy realized during the construction of a single floor rural house construction.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kırsal ev inşaatı için gerekli iş kalemleri belirlenip analizleri gerçekleştirilmiştir. / Related construction items are detected and their job analysis are prepared.

Özgünlük (Originality)

Bir kırsal ev inşaatının bütün iş kalemlerinin çevresel etkisi incelendi. / Environmental effects of all construction items of construction of a rural house is analyzed.

Bulgular (Findings)

İnşaatla ortalama 1.015.757MJ gömülü enerji, 76.631,71 kgCO₂ salınımı gerçekleşmesi beklenmektedir. / During the construction 1,015,757MJ embodied energy and 76,631.71kgCO₂ emissions are expected in the average.

Sonuç (Conclusion)

Gömülü enerji ve karbon salınımı arasında yüksek korelasyon bulunmaktadır. / Carbon emission and embodied energy are highly correlated.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Tek Katlı Kırsal Bölge Yapısının Gömülü Enerji ve Karbon Salınımının Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Tuğba ERZURUM¹, Önder Halis BETTEMİR^{1*}

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Malatya İnönü Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 20.11.2022 ; Kabul/Accepted : 31.05.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 11.09.2023)

ÖZ

İnşaat işlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin belirlenmesi ve analizi önemli bir araştırma alanıdır. Bir binanın inşası için çok sayıda iş kaleminin uygulanması gerekliliği ve yapı malzemesi seçeneklerinin çok sayıda olması bina inşaatlarının gömülü enerji ve karbon salınımı analizlerinin yapılmasını zorlaştırmaktadır. Belirtilen zorluğun aşılması için bu çalışmada çerçeve bir sistem geliştirilmiştir. Kırsal alanda inşa edilebilecek tek katlı tipik bir yapının inşaat kalemleri belirlenerek farklı yapım seçenekleri hazırlanmıştır. Tüm yapım seçeneklerinin birim iş miktarı için gereken malzeme miktarları, iş makinesi kullanımı ve enerji gereksinimi belirlenmiştir. Seçilen iş kalemine göre değişebilecek metraj değerlerinin tam doğrulukta hesaplanabilmesi için yapı elemanları ve yapım alternatifleri arasında anlamsal ilişkiler kurulmuştur. Metraj değerleri ile birim iş tarifleri eşleştirilerek yapının inşasının neden olacağı maliyet, gömülü enerji ve karbon salınımı hesaplanmıştır. Ayrıca binanın ısı kaybı hesaplamaları TS 825'e göre gerçekleştirilmiş ve 50 yıllık kullanımı boyunca odun, kömür, elektrik sobası veya klima ile ısıtılması sonucu oluşacak enerji tüketimi, karbon salınımı ve maliyet hesaplanmıştır. İnşaat kalemlerinin gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyete etkisinin incelenmesi için Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiş ve tüm yapım seçeneklerinin eşit seçilme olasılığı olacak şekilde rastgele seçimlerle yapı oluşturulmuştur. Oluşturulan yapının inşası ve kullanımıyla ortaya çıkan gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyet hesaplanmıştır. Bu şekilde inşaat kalemlerinin her birinin yapı üzerindeki ortalama gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyet etkisi belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan ve sunulan inşaat işlerinin gömülü enerji ve karbon salınımı değerleri ile analiz sonuçları yeşil bina üzerinde çalışan araştırmacılara faydalı olma potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil bina, sürdürülebilirlik, Monte Carlo simülasyonu, gömülü enerji, karbon emisyonu, yaşam döngüsü analizi.

Analysis of Embodied Energy and Carbon Emission of a Single Story Rural Area Structure

ABSTRACT

Determining and analyzing the adverse consequences of construction works on the environment is an important research area. The necessity of execution of a large number of work items for the construction of a building and the large number of building material options make it difficult to conduct embodied energy and carbon emission analyzes of building constructions. In this study, a framework system is developed to overcome the mentioned difficulties. Construction items of a typical single-story building that can be built in the rural region are arranged and different construction options are generated for the construction items. The amounts of material and construction equipment requirements for the unit construction item of all construction options are computed. Semantic relationships between the building elements and the construction alternatives are established so that the quantity values that may vary according to the selected work item can be calculated exactly. Cost, embodied energy and carbon emissions caused by the construction of the building are calculated by matching the quantity values with the unit construction item definitions. Moreover, the heat loss calculations of the building are carried out according to TS 825 and the energy consumption, carbon emission and cost that will occur as a result of the utilization of wood, coal, electric stove and air conditioner options as heating source during its 50 years of life cycle are calculated. In order to examine the effects of construction items on the embodied energy, carbon emission and cost, Monte Carlo simulation is implemented by forming the building with random selections for each construction item among the defined construction options with equal probability of selection. At the end of the simulation the total embodied energy, carbon emission and cost of both the construction and the utilization phases of the structure are calculated. In this manner, the average embodied energy, carbon emission and cost effect of each of the construction items on the structure are determined. Prepared embodied energy and carbon emission quantities of the construction items and the analysis results presented within this study have the potential to be beneficial to the researchers studying on green buildings.

Keywords: Green building, sustainability, Monte Carlo simulation, embodied energy, carbon emission, Life Cycle Assessment.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnşaat sektörü yeryüzündeki kaynakları büyük oranda tükettiği için biyosfer üzerinde küresel ısınma, asit

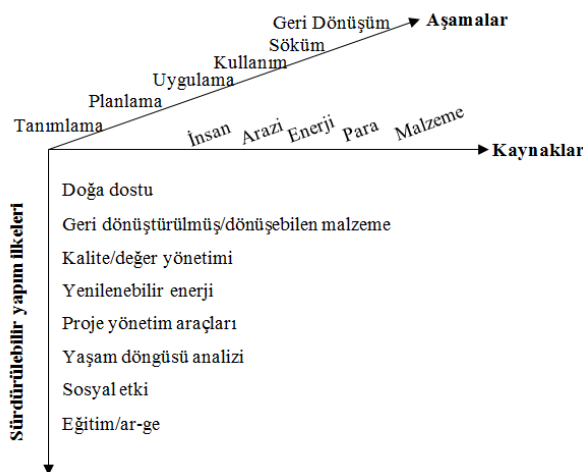
yağmurları, atık oluşumu, yapay çevre baskısı gibi birçok açıdan stres yaratmaktadır. İnşaat sektörü, dünya

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : onder.bettemir@inonu.edu.tr

iklimini tehdit eden sera gazı emisyonlarına en büyük katkıyı yapan üç sektörden biridir [1].

Çimento üretiminin sera gazı salınımındaki payı fosil yakıt tüketiminden hemen sonra gelmektedir. Çimento fabrikalarının yıllık nitrojen oksit salınımı 25 tonu geçmektedir. Çimentoya ek olarak agregaların taşınması ve çıkarılması ile çelik kullanımı betonarmenin gömülü enerji miktarını arttırmaktadır [2]. Çimento beton ağırlığının sadece %10-12'sini oluşturmasına rağmen betondan kaynaklı CO₂ salınımının %75-90'ını oluşturmaktadır. Çimentonun karbon salınımında baskın olmasının nedeni 1 ton çimento üretilirken yaklaşık 1 ton CO₂ gazının açığa çıkmasıdır [3]. Gürsel ve Meral (2012) Türkiye'de üretim süreçlerine göre bir ton CEM-I tipi çimento üretimi sırasında 1,165 kg CO₂'nin açığa çıktığını hesaplamıştır [4]. Binaların iklimlendirilmesi, aydınlatılması ve hijyen için gereken sıcak suyun temininde kullanılan enerjinin toplam enerji tüketiminin içindeki payının %30 civarında olduğu belirtilmektedir [5].

İnşaat sektörünün çevreye olumsuz etkileri nedeniyle sürdürülebilir inşaat ve yeşil bina kavramları önem kazanmıştır. Sürdürülebilirlik kelime kökeni Latince'den gelen "sustinere" yani korumak veya dayanmak anlamındadır [6]. Temelde bir kaynağın yok edilmeden gelecekte de kullanılabilmesini ifade etmektedir. Kibert sürdürülebilir inşaatın altı kriterini kaynak tüketiminin azaltılması, yeniden kullanımın artırılması, yenilenebilir veya yeniden dönüştürülebilir kaynak kullanımı, doğal çevreyi koruma, sağlıklı, toksik olmayan bir ortam ve kaliteli bir yapı inşası olarak belirtmiştir [7]. Atfedilen sürdürülebilir yapı ilkelerinin kavramsal modeli geliştirilerek Şekil 1'de sunulmuştur. Model günümüz proje yapım süreçleri, gereksinimleri ve terimleri temel alınarak revize edilmiştir.



Şekil 1. Sürdürülebilir Yapım Uygulamalarının Üç Boyutlu Kavramsal Modeli (Three-Dimensional Conceptual Model of Sustainable Construction Practices)

Yapıların çevresel etkilerinin nicel olarak belirlenmesinde yapı değerlendirme sistemleri ve sertifika programları kullanılır. Bir ürünün üretim ve kullanım sürecindeki girdilerinin ve çevresel etkilerinin analiz edilmesini içeren Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) yöntemleri ve kriterlere dayalı sertifika programları bu amaçla geliştirilmiştir [8]. YDD yöntemlerine Bees, EcoQuantum, Envest 2 sertifika programlarına ise BREEAM, LEED, Green Star, CASBEE örnek verilebilir [9]. BRE (Building Research Establishment), yapının ya da ürünlerin çevresel etkisini değerlendirmek için performans göstergeleri belirlemiştir. Küresel ısınma potansiyeli (iklim değişikliği), stratosferik ozon inceltme, asidifikasyon, ötrofikasyon ve fosil yakıt tüketimi bunlardan birkaçıdır. YDD'nin beşikten kapıya, beşikten siteye, beşikten mezara, beşikten beşiğe olmak üzere tanımlanmış sınır değişkenleri ürünün ifade edilen süreç boyunca çevreye olan etkisini belirtir [10].

Yapı malzemesinin üretimi için gereken enerji "gömülü enerji", kullanım aşaması için gereken enerji "operasyonel/işletme enerjisi" ve bertaraf aşaması için gereken enerji ise "yaşam sonu enerjisi" olarak tanımlanır. Üç enerji türünün toplamı ise ürünün beşikten beşiğe yaşam döngüsü enerjisini verir. Yapı malzemesinin belirtilen üç süreç boyunca yaydığı karbondioksit miktarı toplam karbon ayak izi olarak adlandırılır. İlk aşamadaki karbon emisyonu "gömülü karbon", ikincisi "operasyonel karbon" ve son aşama ise "yaşam sonu karbonu" olarak tanımlanır ve kgCO₂ ile ifade edilir.

Literatürde yapı inşaatı sürecinde kullanılan gömülü enerjinin hesaplanması üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. İşletme sürecinin analizleri genellikle bir yapı malzemesinin, yapının dış kabuğunun, yapının taşıyıcı sisteminin ya da yalıtımının ayrı ayrı gömülü enerji ve karbon analizi olmak üzere kısıtlı birimlerin değerlendirilmesini içermektedir. Bir bina inşaatını tüm yapı malzemelerini inceleyerek değerlendiren analizler literatürde çok enderdir. Siegenthaler vd. YDD yazılımları ile ilgili çalışmalarında 27 adet YDD uygulayan yazılım olduğunu belirtmişlerdir. En yaygın yazılım %17 kullanım oranına sahip SimaPro yazılımıdır. Doğrudan inşaat sektörü için geliştirilen iki yazılımın tercih oranları %3'tür [11]. GaBi, openLCA, SimaPro ve Umberto gibi dünyanın önde gelen yazılım araçları karşılaştırıldığında uygulama araçlarının kullanıcı dostu olmadığı ve dâhil edilen veritabanlarına göre sonuçların değiştiği belirlenmiştir [12]. Bu durum inşaat sektörünün sürdürülebilir yapı üzerine özellikle tasarım aşamasında etkin araçlara ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Belirtilen literatür boşluğunun giderilmesi için bu çalışmada yapıların çevre etki değerlendirmesinin gömülü enerji ve karbon emisyonu değerleri üzerinden gerçekleştirilmesinin sağlanması için çerçeve bir analiz süreci geliştirilmiştir. Çok farklı yapı malzemeleri ve yapım yöntemleri dikkate alınarak yapının inşaat ve kullanım sürecinin çevre etki değerlendirmesinin

yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda inşaat kalemlerinin yapının inşası ve kullanım süresi boyunca karbon salınımı ve gömülü enerji değerlerine ne kadar etkisinin olacağını belirlemek ve varsa istatistiksel bağıntıların ortaya çıkarılması bu çalışmanın araştırma sorularıdır.

Makalenin ikinci bölümünde konu ile ilgili kapsamlı literatür taraması sunulmuştur. Üçüncü bölümde metraj, gömülü enerji, karbon salınımı, ısı kaybı hesaplamaları ve Monte Carlo simülasyonunun nasıl gerçekleştirildiği açıklanmaktadır. Geliştirilen çerçeve sistemin uygulandığı vaka çalışması dördüncü bölümde sunulmuştur. Beşinci bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Son bölümde çalışmanın katkısı sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Sürdürülebilir inşaatın baskın araştırma konuları sürdürülebilir inşaat için alternatif malzemeler, sürdürülebilir inşaat yönetimi, geri dönüşüm ve atık azaltma, inşaat yönetiminde sosyal sürdürülebilirlik olmak üzere dört ana çerçeveden oluşmaktadır. Belirtilen dört başlığın zayıf boyutunu "sosyal sürdürülebilirlik", baskın boyutunu "alternatif malzemeler" oluşturmaktadır [13]. Geçmişte maliyet azaltma, operasyonel verimlilik, kalite ve kârlılık inşaat yönetiminde anahtar etkenler iken, günümüzde işverenler ve yükleniciler inşaat projelerinin çevresel ve sosyal etkileriyle daha fazla ilgilenmektedir [14]. Özeler-Kanan vd. enerji verimli giydirme cephe sistemlerinin ve yapı kabuğu konularının baskın araştırma konularını belirlemiştir. Ayrıca, literatürde yapıların daha çok enerji açısından yaşam döngüsünün incelendiğini ve bundan dolayı bu çalışmalarını ifade ederken, YDD yerine YDEDA (yaşam döngüsü enerji değerlendirme analizi) şeklinde ifade edilmesi gerektiğini belirtmiştir [15]. Dixit vd. gömülü karbon çalışmalarında tutarlı ve karşılaştırılabilir bir veri tabanının geliştirilmesi için literatür analizi yaparak çalışmaların doğruluğunu iyileştirmek için tek tip bir yöntemin tanıtılması gerektiğini belirlemiştir [16]. Marzouk ve Elshaboury gömülü enerjinin başlıca araştırma alanlarının; sürdürülebilir yapı malzemeleri, bilgi teknolojisi, çevresel etki duyarlılık analizi, bina türü ve bileşimi, binaların yaşam döngüsü enerji kullanımı tahmin yöntemleri ve yaşam döngüsü analizi olduğunu belirtmişlerdir [17].

Stephan vd. pasif evlerin her zaman net enerji tasarrufu sağlamadığını ve yeni standart bir binayla benzer bir toplam enerji tüketimine sahip olabileceğini belirtmiştir. Pasif evlerin gömülü enerjisinin, 100 yıllık işletim süresindeki toplam enerjinin %77'sini oluşturduğu ve yenilenmiş bir dairenin en iyi pasif ev senaryosundan %15,2 daha düşük enerji tüketimine sahip olduğu belirlenmiştir. Enerji tasarrufu için yapılan üç camlı pencereler ve kalınlığı artırılmış ısı yalıtımı, yapının gömülü karbon değerini artırmaktadır. Bundan dolayı

tek başına operasyonel karbonu azaltmanın net emisyonu azaltmayacağı belirtilmiştir [18]. Sartori ve Hestnes geleneksel ve düşük enerjili binalar arasındaki enerji kullanımını 60 vaka çalışmasını inceleyerek araştırmıştır. Düşük enerjili bina tasarımının toplam yaşam döngüsü enerji talebinde azalışa, gömülü enerjide artışa neden olduğu belirtilmiştir. Bir güneş enerjisi evi "yeşil" malzemeler kullanma kararlılığıyla inşa edilmiş eşdeğer bir evden daha enerji verimlidir. Yaşam döngüsü analizinde sadece operasyonel karbon salınımının değil aynı zamanda gömülü karbon değerinin de azaltılması tavsiye edilmiştir [19].

Leblebici (2020) ısıyı soğuran bina kabuğunun, binanın ısısal durumu üzerindeki etkisini incelemiş ve dış ortam hava sıcaklığının artmasının, toplam elektrik talebini artırdığını belirlemiştir. Bina kabuğunun yansıtıcılığının artırılması, soğutma yükleri açısından avantajken, bina kabuğu tarafından soğutulmayıp, şehir yüzeyine yansıtılan ışınlar, yayaların ısısal konforunu düşürmektedir [20]. Akgül vd. (2020) Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin tanımladığı iki farklı veri setini kullanarak tipik bir bina üzerinde iklim değişikliği etki analizini yapmıştır. Veri setleri yüksek karbondioksit ve düşük/orta karbondioksit salınımını temsil eden, üç farklı soğutma ihtimalinin olduğu senaryolardır. Yapıların enerji tüketimi, kullanıcı ısısal konforu ve CO₂ salınımları incelenmiş ve soğutma enerjisi tüketimi ile ısısal konforun iklim değişikliğinden en çok etkilenecek parametreler olduğu belirtilmiştir [21].

Perera vd. Avustralya okul binalarındaki yapı elemanlarını gömülü karbon ve maliyet açısından değerlendirmiştir. İncelenen yapı elemanlarından çatı, dış duvarlar, şantiye işleri, altyapı ve üst katlar en yüksek gömülü karbon değerine sahiptir. Çatı, şantiye işleri, üst katlar, alt yapı ve pencereler en yüksek maliyetli kalemlerdir. Duvar, altyapı ve taşıyıcı elemanlarda maliyet ile gömülü karbon arasında bir ilişki varken diğer yapı elemanlarında bu bağın olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sürdürülebilir binaları tasarlayan uygulayıcıların daha çok işletme aşamasındaki karbon değerini azaltmaya çalışarak, üretim aşamasındaki karbonu artırdıkları belirtilmiştir [22]. RICS gömülü karbon hesabı için veri ve araç eksikliği olduğunu belirterek yapılarda gömülü karbon emisyonlarının beşikten kapıya sınır değerlerinde nasıl hesaplanacağı konusunda detaylı bir araştırma ve örnek sunmuştur. [23]. Birleşik Krallık inovasyon ve gelişme ekibi raporlarında, inşaat sektörünün CO₂ emisyon oranını yaşam döngüsü içinde 6 aşamada incelemiştir. İncelenen aşamaların payları tasarım %0,5, imalat %15, dağıtım %1, inşaat %1, işletme %83, yenileme/yıkım %0,4 olarak belirlenmiştir. İşletme aşamasında en büyük emisyonu sırası ile market, ofis konut ve depo yapı türleri açığa çıkartmaktadır [24]. Endüstriyel atıkların agrega ve çimento katkısı olarak kullanılması gömülü enerji, karbon salınımı ve inşaat maliyetini azaltmaktadır [25].

Adalberth vd. küresel ısınma potansiyeli, asitlenme, ötrofikasyon, fotokimyasal ozon oluşturma potansiyelleri ve insan toksisitesi çevresel etkilerini dört bina için 50 yıllık yaşam döngü süresini temel alarak analiz etmiştir. En yüksek çevresel etkiye yaşam döngüsü toplamının yaklaşık %70-90'ı olan işletme aşaması sahiptir. Tüm binalar için toplam küresel ısınma potansiyeli yaklaşık 1,5 tonCO₂E/m²/50 yıldır. Toplam asitlenme yaklaşık 8–10 kgSO₂ E/m²/50 yıl, ötrofikasyon her bina için yaklaşık 4–5 kg NO₃E/m²/50 yıl olarak hesaplanmıştır. İşletme aşamasındaki enerji kullanımının %70'i yapının ısıtılmasında harcanır ve bu durum toplam fotokimyasal ozon oluşumunun yaklaşık %75-80'ini oluşturur [26]. Langston vd. Hong Kong ve Melbourne'de yeni inşa edilmiş ve yenilenmiş binaların gömülü karbon ve maliyet ilişkisini araştırmıştır. Hong Kong'da, yenilenmiş binalar için gömülü karbon yeni inşa edilen projelerden %33-39 daha düşüktür ve yenilenmiş bina maliyeti yeni inşa edilen projelerden %22-50 daha düşüktür. Melbourne'de yenilenmiş binalarda gömülü karbon yeni inşa edilen projelerden %4 daha düşüktür ve yenilenmiş binaların maliyeti yeni inşa edilen projelerden %24 daha yüksektir [27]. Gömülü karbon ve maliyet arasındaki ilişkiyi araştıran çalışmalar literatürde mevcuttur [28-30]. Altun vd. binaların ısı yalıtımı yatırımlarını enerji, yaşam döngüsü maliyeti ve sera gazı açısından incelemişlerdir [31].

Ekundayo vd. gömülü karbon tahmini için bazı açık kaynaklı araçları karşılaştırarak sınır tanımları, ölçüm birimleri ve metodolojik hesaplamalarda farklılıklar bulunduğunu belirlemiştir. Gömülü karbon tahmini için inşaat endüstrisi tarafından kabul edilen bir veri yapısı ve ortak yöntemin gerekli olduğunu, ICE (The Inventory of Carbon and Energy) veritabanı değerleriyle metraj listesini eşleştirip sürdürülebilirlik analizi yapan bir uygulamayla sorunun çözülebileceğini belirtmiştir [32]. Marosky vd. CAD ve çevresel değerlendirme araçları arasında veri aktarım arayüzlerinin geliştirilmesini başlatmak için, "CAD-SolidEdge" ve "LCA-SimaPro" arasında karşılıklı veri aktarımını açıklayan bir algoritma geliştirmiştir [33]. Bettemir geçici afet yapılarının inşası ve kullanım süresi boyunca karbon salınımını ve maliyet karşılaştırmasını yapmıştır [34]. Erzurum ve Bettemir tek katlı tek tip bir yapının inşası sonucu atmosfere salınan karbonu ve yapının gömülü enerjisini analiz etmişlerdir [35-36].

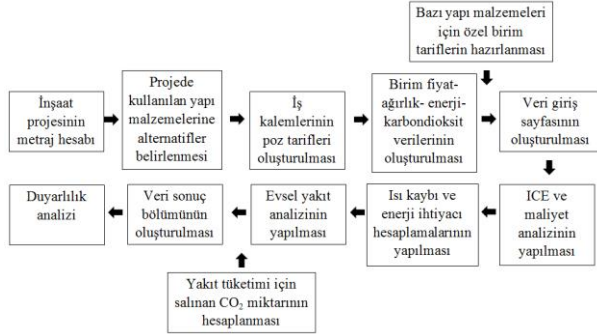
Literatür taraması binalar için enerji tüketimi ve karbon salınımının yapının kullanım aşamasına odaklandığını ve yapım aşamasının yüzeysel incelendiğini göstermektedir. Bu çalışmada, tipik bir kırsal yapının inşaat kalemlerinin farklı yapım alternatifleri ile inşa edilmesi durumları için YDD analizi yapılarak seçilen imalat türünün gömülü enerjiye, karbon salınımına ve maliyete etkisi incelenmiştir. Yapının inşasında çok fazla seçenek ve kombinasyon bulunduğu için uygulanacak inşaat yöntemi ve kullanılacak yapı malzemelerinin çevresel etkileri Monte Carlo Simülasyonu ile belirlenmiştir. Monte Carlo Simülasyonu için elektronik hesap cetveli uygulaması

geliştirilmiştir. Uygulamada oluşturulan veri setleri ve bağlantılı formüller sayesinde, tercih edilen yapı malzemesine göre iş kalemlerinin çevresel etkisi ve maliyeti otomatik olarak hesaplanmaktadır. Monte Carlo Simülasyonu ile çok çeşitli yapım alternatifleri rastgele kombinasyonlar halinde eşleştirilerek yapının üretim aşamasındaki gömülü karbon ve enerji değerlerinin sıcak noktaları, maliyet ile ilişkili olarak belirlenebilmektedir. Literatürde yapım alternatiflerinin çevresel etkisini insan müdahalesiz biçimde hesaplayan, bina inşaatında kullanılan yapı malzemelerini, tamamıyla değerlendiren bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Bu durum çalışmanın bir diğer özgün noktasıdır. Beton, demir, kalıp çeşitleri gibi ana malzemelerin yanı sıra köşebent, zımpara kâğıdı, dübel gibi detay malzemelerin tamamı çalışmada ele alınmıştır. Çalışmanın bir diğer katkısı ise gömülü enerji ve karbon salınımı hesabı için gerekli olan malzemelerin birim ağırlıklarının derlenmesidir. Yaşam döngüsü analizi için ICE veri tabanı kullanılmıştır [37-38]. Veri tabanında olmayan ve literatürde bulunmayan yapı malzemelerinin gömülü karbon ve enerji değerlerinin belirlenmesi ise bir diğer katkıdır. TSE 825'e göre örnek yapının yıllık ısıtma ihtiyacı belirlenmiştir. Bu sayede, farklı ısıtma türlerine göre yapının gömülü karbon ve maliyet değişimi hesaplanmış ve kırsal bir yapının karbon, enerji ve maliyet değerlerini bütünüyle analiz eden bir araç geliştirmiştir.

3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Çalışmanın amaç ve kapsamı tek katlı bir yapının inşaat süreci ile 50 yıllık işletme periyodunun nakliye hariç gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyet analizini gerçekleştirmektir. İlk aşamada yapının metraji ve inşasında kullanılacak malzeme miktarları belirlenmiştir. Projenin iş tanımları, iş paketleri, metraj değerleri ve kullanılan malzeme türleri eşleştirilir ve maliyet, gömülü enerji ve karbon salınımı birim değerleri ile çarpılır. Makine ve elektrik tesisatları kapsam dışında tutularak sadece inşaat yapı malzemelerinin analizleri yapılmıştır. Maliyet analizi için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının birim fiyat listelerinden yararlanılmıştır. Birim fiyat listelerinde bulunmayan ancak sektörde kullanılan yapım tarifleri çalışma kapsamında oluşturulmuştur. Sektör uygulamaları değerlendirilerek üretilen bu alternatifler sayesinde farklı çevresel etkilere ve maliyetlere sahip yapı üretim seçenekleri belirlenmiştir. Farklı iş tariflerine yer döşemesi için karo, laminat parke, seramik veya granit kullanılması örnek gösterilebilir. Çalışmada iş kalemlerinin enerji kullanımı MJ, atmosfere salınan karbon dioksit miktarı kgCO₂ biriminde hesaplanmıştır. Analizlerde hangi iş kaleminin çevreye daha fazla zarar verdiği ya da hangi iş kaleminin yüksek maliyetlere yol açtığı araştırılmıştır. Yapının 50 yıllık kullanım dönemi boyunca ısıtılması sonucu oluşan karbon salınımı, gömülü enerji ve maliyet de analizlere dâhil edilmiştir. Hesaplama sürecinin akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

İş kalemlerinin metrajı Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı birim fiyat sözleşmelerin ödeme esasına göre detayları literatürde sunulduğu gibi hesaplanmaktadır [39–41].



Şekil 2. Çevresel etki değerlendirme akış şeması (flow chart of the environmental impact assessment)

Çalışma kapsamında Çizelge 1’de sunulan iş tanımları ve alternatifleri incelenmiştir. Metrajı hesaplanan iş kalemlerinin inşası için gereken malzeme miktarının hesaplanması uygulamaya tanımlanan birim iş miktarının yapımı için gereken malzeme kullanımlarını tanımlayan poz tarifleri ile gerçekleştirilmektedir. Tarifler hazırlanırken ilgili bakanlığın verilerinden yararlanılmıştır [42].

Yapı malzemelerinin birim ağırlıkları, birim gömülü enerji değerleri, birim gömülü karbondioksit değerleri ve birim fiyat değerleri ayrı bir cetvelde ilgili malzeme gereksinimleri ile eşleştirilmek üzere kaydedilmiştir. Malzeme gereksinimi değerlerinin birimleri farklı olabilmektedir. Örneğin drenaj borusu döşenmesi, süpürgelik gibi imalatlar metre, su yalıtımı, yer döşemesi gibi imalatlar m², taş duvar örülmesi, asmolen döşeme dolgu malzemesi yerleştirilmesi, geri dolgu yapılması gibi imalatların birimi ise m³tür. Karbon ve gömülü enerji analizlerinde incelenen malzemenin miktarı “kg” biriminde temel alındığı için inşaat sırasında kullanılan malzemeler kg birimine çevrilmiştir. Birim ağırlık değerleri belirlenirken ürün katalogları, makaleler ve sektör analizlerinden yararlanılmıştır. Yapı elemanlarının üretim ve kaliteden kaynaklı farklı birim ağırlıklara ve satış fiyatına sahip olması durumunda ortalama değerler alınmıştır. Birim gömülü enerji ve karbon verileri için ICE veri tabanı kullanılmıştır [37-38]. Veri tabanında olmayan malzemelerin enerji-karbon değerleri hesaplanmıştır. Örneğin, “polyester keçe taşıyıcılı bitümlü örtü” değerleri veri tabanında bulunmadığı için ürün katalogları, araştırmacılar, üretici firmalar ve araştırmaya katkı sağlayabilecek tüm veriler incelenip birim malzemenin kaç katmandan oluştuğu ve katmanlarda hangi malzemelerin kullanıldığı tespit edilip bu malzemelerin karbon ve enerji verileri

hesaplanmıştır. Özel iş tarifi oluşturulması ile ilgili örnek Çizelge 2’de sunulmuştur. Uygulamaya tanımlanan malzeme türlerinin ilgili ölçüm birimine göre birim ağırlık değerleri Çizelge 3’te, gömülü enerji değeri (embodied energy-EE), ve gömülü karbon dioksit değerleri (embodied CO₂- ECO₂) Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 1. İş kalemleri için oluşturulan yapım alternatifleri (Construction alternatives prepared for work items)

İş Kalemi	Seçenekler
Taşıyıcı duvar türü	Tuğla; gaz beton.
İç cephe duvar yüzey uygulaması	Boya; duvar kağıdı; fayans/seramik.
İç cephe yer döşemesi	Laminant; fayans/seramik; beton (terrazo) karo- mermer.
Dış cephe yer döşemesi	Beton (terrazo) karo; mermer; granit parke taşı.
Dış cephe ısı yalıtımı uygulaması	xps 5 cm; xps 8 cm; eps 5 cm; eps 8 cm; siva+boya (yalıtımsız).
Kalıp türü	ağaç kalıp; plywood kalıp; sac kalıp.
Temel su yalıtım malzemesi	cam tülü ve polyester keçe taşıyıcılı bitümlü örtü; polyester keçe taşıyıcılı bitümlü örtü; cam tülü taşıyıcılı bitümlü örtü; pvc esaslı jeomembran; hdpe esaslı jeomembran; ldpe esaslı jeomembran; epdm esaslı jeomembran; epdm esaslı jeomembran; geosentetik kil örtüler/bentonit membran.
Islak hacim yalıtım	poliüretan köpük; bitüm; sprey poliüre formaldehit (reçine).
Çatı (ağaç) su yalıtım örtüsü	polyester keçe taşıyıcılı bitümlü örtü; cam tülü taşıyıcılı bitümlü örtü; ağaç çatılarda bitüm emdirilmiş kiremit altı su yalıtım levhaları.
Isı yalıtımı	taş yünü levha 6 cm; taş yünü levha 8 cm; taş yünü levha 10 cm; taş yünü levha 12 cm; taş yünü levha 14 cm; cam yünü levha 6 cm; cam yünü levha 8 cm; cam yünü levha 10 cm; cam yünü levha 12 cm; cam yünü levha 14 cm; poliüretan köpük 3 cm; poliüretan köpük 4 cm; poliüretan köpük 5 cm.
Temel duvar türü	taş duvar; tuğla duvar; betonarme duvar.
Drenaj boru türü	pvc boru; pe boru.
Tesisat boru türü/temiz su	pp (pprc) boru 32 mm; pe boru 32 mm; pvc boru 32 mm.
Tesisat boru türü/pis su	pp (pprc) boru 70 mm; pe boru 63 mm; pvc boru 63 mm.
Yağmur oluğu boru türü	galvaniz; pvc; çinko; bakır.
Pencere	ağaç; pvc; alüminyum.
İç kapılar	ağaç; pvc.

Çizelge 2. Birim polyester keçe taşıyıcılı bitümlü örtü imalatının EE-ECO₂ analizi (EE-ECO₂ Analysis of unit construction of bitumen cover with polyester bearing felt)

Membran katmanları	Malzeme Türü	Katman Kalınlık (mm)	EE (MJ/kg)	ECO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Katman Envanteri	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Katmanın Yoğunluğu (kg)	Katman Birim EE	Katman Birim ECO ₂
1.katman	Polietilen film-PE	0,25	89,3	2,13	plastics/LDPE	920	0,23	20,539	0,4899
2.katman	katkılı modifiye	0,25	51	0,405	Bitumen	1035	0,25875	13,19625	0,10479375
3.katman	polyester keçe	1	19	0,97	carpet/felt	50	0,05	0,95	0,0485
4.katman	katkılı modifiye	0,25	51	0,405	Bitumen	1035	0,25875	13,19625	0,10479375
5.katman	Polietilen film-PE	0,25	89,3	2,13	plastics/LDPE	920	0,23	20,539	0,4899
							Toplam	68,4205	1,1278875

Çizelge 3. Yapı malzemelerinin birim ağırlıkları (Unit weights of the building materials)

Malzeme ismi	Birim ağırlık	Birim-Kaynak	Malzeme ismi	Birim ağırlık	Birim-Kaynak
PE Ø20 boru	0,849	kg/m - [43]	Denizlik uzatma profili	0,3167	kg/m - [56]
PVC Ø20 boru	1,8	kg/m - [44]	İç cephe kaba sıva harcı-2 cm-kireçli harç	1800	kg/m ³ - [45]
Kırmataş	1800	kg/m ³ - [45]	İç cephe ince sıva harcı-0,8 cm-kireçli harç	1800	kg/m ³ - [45]
Grobeton	2400	kg/m ³ - [45]	Saten alçı harcı	750	kg/m ³ - [42]
Polyester keçe taşıyıcılı bitümlü örtü	0,25	kg/m ² - [46]	Duvar kağıdı	0,21	kg/m ² - [57]
Cam tülü taşıyıcılı bitümlü örtü	0,05	kg/m ² - [46]	Duvar- fayans/seramik karo	15,52	kg/m ² - [58]
PVC esaslı jeomembran	2,05	kg/m ² - [46][47]	Yer döşemesi- fayans/seramik karo	8	kg/m ² - [58]
HDPE esaslı jeomembran	1,88	kg/m ² - [48]	Beton (terrazo) ve mermer karo harcı	2200	kg/m ³ - [42]
LDPE esaslı jeomembran	1,84	kg/m ² - [48]	Şilte-kapron-PE levha- 2 mm	30	kg/m ³ - [42]
EPDM esaslı jeomembran	2	kg/m ² - [49]	Ahşap parke elemanı	11	kg/m ² - [59]
Geosentetik kil örtüler/bentonit membran	6,5	kg/m ² - [42]	Beton (terrazo) karo	50	kg/m ² - [60]
Bentonit kumu	2600	kg/m ³ - [45]	Mermer karo	56	kg/m ² - [45]
Taş	2200	kg/m ³ - [50]	Kum	1800	kg/m ³ - [45]
Tuğla duvar harcı	1800	kg/m ³ - [45]	Ahşap çerçevesi kapı	50	kg/adet-
Taş duvar harcı	1800	kg/m ³ - [45]	Alüminyum çerçevesi kapı	17	kg/m ² - [35]
Tuğla	650	kg/m ³ - [42]	PVC kapı	16	kg/m ² - [36]
Beton	2400	kg/m ³ - [45]	Bitüm emdirilmiş kiremit altı su yalıtım levhaları	3,6	kg/m ² - [36]
Ahşap kalıp	600	kg/m ³ - [45]	Kil kiremit	45	kg/m ² - [35]
Plywood kalıp	13	kg/m ² - [51]	Taş yünü levha	50	kg/m ³ - [42]
Ahşap kiriş ve kalıp (4x8 cm kereste)	2,133	kg/mt - [52]	Cam yünü levha	18	kg/m ³ - [42]
Sac kalıp-5 mm	39,25	kg/m ² - [45]	Poliüretan köpük-püskürtme-3 cm	1,95	kg/m ² - [35]
Gaz beton harcı	600	kg/m ³ - [45]	Poliüretan köpük-püskürtme-4 cm	2,5	kg/m ² - [35]
Toprak	2000	kg/m ³ - [45]	Poliüretan köpük-püskürtme-5 cm	3	kg/m ² - [35]
Blokaj	1800	kg/m ³ - [45]	PP (pprc) boru-25 dn-32mm	0,293	kg/m - [61]
XPS ısı yalıtım levhası	25	kg/m ³ - [42]	PP (pprc) boru-50 dn-70mm	1,105	kg/m - [61]
EPS ısı yalıtım levhası	16	kg/m ³ - [42]	PE boru-25 dn-32mm	0,21	kg/m - [62]
Yalıtım dübeli	0,0315	kg/adet - [53]	PE boru-50 dn-63mm	0,78	kg/m - [62]
File (yalıtım)	0,1525	kg/m ² - [42]	PVC boru-63 mm	0,879	kg/m - [62]
Dış cephe kaba sıva harcı-2 cm	2000	kg/m ³ - [45]	Boya ve astar	1,33	kg/litre-
Dış cephe ince sıva harcı-0,8 cm	2000	kg/m ³ - [45]	Boya ve astar	0,752	litre/kg-
Zımpara kağıdı	0,015	kg/adet- ortalama	MDF	750	kg/m ³ - [63]
Köşe profilleri-fileli	0,1067	kg/m - [54]	PVC	1400	kg/m ³ - [64]
Su basman profili	0,242	kg/m - [55]	Çelik kapı	95	kg/adet - [36]

Anlamsal model oluşturularak veri tabloları aracılığıyla tanımlanan veriler birbirleri ile ilişkilendirilip metraj verisinden gömülü enerji, karbon emisyonu ve maliyet verileri elde edilmiştir. Yapının maliyet, karbon salınımı ve gömülü enerji analizi; metraj, birim değerler ve poz tariflerinin eşleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Birim iş imalatı için gerekli malzeme ve enerji miktarları toplam metraj ile çarpılarak iş kalemleri için gereken malzeme ile enerji miktarları hesaplanır.

Malzeme miktarları Çizelge 3'te sunulan veriler kullanılarak kg'ye dönüştürülür, ardından Çizelge 4 ve 5'te sunulan değerler ile çarpılarak her bir malzemenin fiyat, gömülü karbon ve gömülü enerji miktarları hesaplanır. İnşaat kalemlerine farklı yapım alternatifleri tanımlandığı için bir inşaat kalemine sadece 1 yapım alternatifinin uygulanmasına izin verilmekte seçilenin dışındaki alternatifler pasif duruma gelmektedir. Seçilmeyen yapım alternatifi ile ilgili malzemelerin değerleri sıfır olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 4. Yapı malzemelerinin birim gömülü enerji (EE) ve birim karbon dioksit (ECO₂) değerleri (Unit embedded energy (EE) and unit carbon dioxide (ECO₂) quantities of building materials)

Malzeme ismi	EE- (MJ/Kg)	ECO ₂ - (kgCO ₂ /kg)	Envanter ismi
Bitüm emülsiyon astarı	51	0,405	bitumen/general bitumen
PE boru	84,4	2,02	plastics/hdpe pipe
PVC boru	67,5	2,56	plastics/pvc pipe
Kırmataş	0,083	0,005	aggregates/ general aggregates
Grobeton	0,63	0,084	concrete/general concrete (1:3:6)
Polyester keçe taşıyıcılı bitümlü örtü	68,421	1,238	hazırlanan tarif
Cam tülü taşıyıcılı bitümlü örtü	68,591	1,244	hazırlanan tarif
PVC esaslı jeomembran	68,6	2,61	plastics/calendered sheet pvc
HDPE esaslı jeomembran	76,7	1,57	plastics/high density polyethylene -hdpe
LDPE esaslı jeomembran	78,1	1,69	plastics/low density polyethylene -ldpe
EPDM esaslı jeomembran	120	4,02	rubber/synthetic rubber
Geosentetik kil örtüler/bentonit membran	132,269	7,123	hazırlanan tarif
Bentonit kumu	3	0,23	Clay //general simple baked clay products
Taş	1,26	0,073	stone/general stone
Tuğla duvar harcı	1,34	0,2	cement/mortar (1:0,5:4,5 cement:lime:sand)
Taş duvar harcı	1,11	0,171	cement/mortar (1:4- cement:sand)
Tuğla	3	0,23	Bricks/general
Beton	0,99	0,145	concrete/general conc.(1:1,5:3)
Donatı	17,4	1,31	steel/bar&rod steel
Ahşap kalıp	10,4	0,86	timber/ sawn hardwood
Plywood kalıp	15	1,07	timber/plywood
Saç kalıp	25,1	1,55	steel/plate
Ahşap kiriş ve kalıp	10,4	0,86	timber/ sawn hardwood
Çivi-bulon bağlantı malzemesi	20,1	1,37	steel/general steel
Yağ bazlı kalıp ayırıcı	70	2,42	paint/ general paint
Gaz beton harcı	1,57	0,149	hazırlanan tarif
Gaz beton	3,5	0,328	concrete/Autoclaved aerated block
Toprak	0,45	0,023	Soil
Blokaj-kabataş	0,083	0,005	aggregates/ general aggregates
Çelik boru-iskele için	24,9	1,94	steel/pipe-world typical-%39 recycle
Düz ya da desenli saç	20,1	1,37	steel/general steel
XPS ısı yalıtım levhası	75	5,45	Su vd. (2016)- bkz [90]
EPS ısı yalıtım levhası	88,6	2,55	plastics/expanded polystyrene
Yalıtım dübeli	80,5	2,73	plastics/ general plastic
File-yalıtım	80,5	2,73	plastics/ general plastic
Dış cephe kaba sıva harcı-2 cm	0,85	0,127	cement/mortar(1:6- cement:sand)
Dış cephe ince sıva harcı-0,8 cm	0,97	0,146	cement/mortar(1:5- cement:sand)
Boya	70	2,42	paint/ general paint
Dekortif kaplama- çimento esaslı	1,34	0,2	cement/mortar (1:0,5:4,5- cement:lime:sand)
Astar-dönüşüm astarı	70	2,42	paint/ general paint
Mantolama yapııştırıcısı	2,323	1,444	hazırlanan tarif
Zımpara kağıdı	41,909	1,233	hazırlanan tarif
Su basman profili	154	8,16	aluminium/ extruded
Köşe profilleri-fileli köşe profili	77,2	2,61	plastics/ pvc general
Denizlik uzatma profili	77,2	2,61	plastics/ pvc general
Alt-üst manto file sıvası	2,323	1,444	hazırlanan tarif
İç cephe kaba sıva harcı-2 cm	1,11	0,163	cement/mortar (1:1:6- cement:lime:sand)
İç cephe ince sıva harcı-0,8 cm	1,34	0,2	cement/mortar (1:0,5:4,5- cement:lime:sand)
Duvar kağıdı	36,4	1,93	paper/ wallpaper
Duvar kağıdı tutkalı	88	2,98	sealants&adhesives/ phenol formaldehyde
Fayans/seramik karo	9	0,59	ceramics/tile
Karo yapııştırıcısı/ harç/fayans-seramik	1,33	0,208	cement/ mortar (1:3-cement:sand)
Derz dolgusu-çimento esaslı	1,33	0,208	cement/ mortar (1:3-cement:sand)
Saten alçı harcı	1,8	0,12	plaster/ general plaster
Beton (terrazo) ve mermer karo harcı	0,97	0,146	cement/ mortar (1:5-cement:sand)
Ahşap parke elemanı	9,5	0,63	timber/laminated veneer lumber
Şilte-kapron-PE levha- 2 mm	83,1	2,04	plastics/general polyethylene
Mermer karo	3,33	0,192	stone/marble tile
Beton (terrazo) karo	1,4	0,12	miscellaneous/ terrazzo tiles
Tretuvar beton	0,7	0,093	concrete/c16-20
Kum	0,081	0,005	Sand
Granit parke taşı	11	0,64	Granite
Ahşap kapı	11	0,72	timber/MDF
Alüminyum çerçevesiz kapı	154	8,16	aluminium/extruded
PVC çerçevesiz kapı	77,2	2,61	plastics/general pvc
Bitüm emülsiyon astarı	51	0,405	bitumen/general bitumen
Poliüretan köpük-püskürtme	101,5	3,48	plastics/polyurethane rigid foam
Sprey Polyürea-üre formaldehit=reçine	70	2,76	sealants and adhesives/urea formaldehyde
Bitüm emdirilmiş kiremit altı su yalıtım levhaları	31,7	1,65	carpets/ saturated felt underlayment
Kil kiremit	6,5	0,45	clay/ tile
Lama kenet demirleri	25,1	1,55	steel/plate
Taş yünü levha	16,8	1,05	insulation/ rockwool
Cam yünü levha	28	1,35	insulation/ fibreglass
Galvaniz	39	2,82	steel/ galvanised
Metal boru	24,9	1,94	steel/pipe-world typical-%39 recycle
PVC boru	67,5	2,56	plastics/ pvc pipe
PE boru	84,4	2,02	plastics/ hdpe pipe
Alüminyum	154	8,16	aluminium/ extruded typical
PP	115,1	4,49	plastics/polypropylene, injection moulding
Çinko	53,1	2,88	zinc/general
Bakır	42	2,6	copper/EU sheet and tube
Kapı ahşabı	9,5	0,63	timber/laminated veneer lumber
Kapı çeliği	25,1	1,55	steel/plate

Çizelge 5'te malzemelerin birim fiyat değerleri verilmiştir. Rayiçler Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının birim fiyat listesinden temin edilmiş ve temin tarihinin 15,89 TL/\$ güncel döviz kurundan ABD dolarına çevrilmiştir. Nitelikli, özel ve değişken fiyatlı malzemeler için örneğin boru, duvar kağıdı, köpük, doğrama gibi fiyat

analizinde sektör ortalaması alınmıştır.

Çizelge 6'da sunulan metraj değeri, oluşturulan özet metraj listesinden alınmaktadır. Dış cephe yer döşemesi imalatı kalemi için Çizelge 1'de tanımlanan seçenekler arasından beton (terrazo) karo alternatifinin tercih edildiği durum için değerler oluşmuştur. Seçilen imalat türüne göre kullanılan malzemeler otomatik olarak

Çizelge 5. Yapı malzemelerinin birim fiyat analizi (Unit price analysis of building materials)

Malzeme ismi	Birimi	Birim F. (\$)	Birimi	Malzeme ismi	Birimi	Birim F. (\$)	Birimi
PVC drenaj borusu	m	4.40529	\$/m	Derz dolgusu	kg	0.17621	\$/kg
PE drenaj borusu	m	1.32159	\$/m	İç cephe kaba sıva harcı-	m ³	20.18565	\$/m ³
Kırmatas	m ³	1.22719	\$/m ³	İç cephe ince sıva harcı-	m ³	19.47829	\$/m ³
Bitüm emülsiyon astarı	kg	0.49717	\$/kg	Saten alçı harcı	m ³	9.21775	\$/m ³
Cam tülü tasıvcılı örtü	m ²	1.38452	\$/m ²	Ahsap parke elemanı	m ²	13.84519	\$/m ²
Polvester keçe tasıvcılı örtü	m ²	1.63625	\$/m ²	Silte-kapron	m ²	0.06293	\$/m ²
Pvc esaslı jeomembran	m ²	3.04594	\$/m ²	Yer döşemesi-	m ²	2.45437	\$/m ²
Hdpe esaslı jeomembran	m ²	2.76904	\$/m ²	Beton (terrazo) karo	m ²	2.42291	\$/m ²
Ldpe esaslı jeomembran	m ²	2.45437	\$/m ²	Beton (terrazo) ve	m ³	20.78099	\$/m ³
Epdm esaslı jeomembran	m ²	6.54500	\$/m ²	Mermer	m ²	5.34928	\$/m ²
Geosentetik kil örtüler	m ²	1.19572	\$/m ²	Kum	m ³	1.22719	\$/m ³
Bentonit kumu	m ³	33.98364	\$/m ³	Granit parke taşı	kg	0.01322	\$/kg
Tas	m ³	3.60919	\$/m ³	Poliüretan köpük	kg	3.33543	\$/kg
Tas duvar harcı	m ³	14.09943	\$/m ³	Sprev Polvurea	kg	8.81057	\$/kg
Tuğla duvar harcı	m ³	18.67590	\$/m ³	Cam tülü tasıvcılı örtü-	m ²	1.38452	\$/m ²
Tuğla	m ²	0.10384	\$/adet	Polvester keçe tasıvcılı	m ²	1.63625	\$/m ²
Beton	m ³	29.71492	\$/m ³	Civi	kg	0.93770	\$/kg
Grobeton	m ³	22.65576	\$/m ³	Bitüm emdirilmiş valıtım	m ²	2.06419	\$/m ²
Donatı	kg	0.57269	\$/kg	Kil kiremit	m ²	2.26558	\$/m ²
Cam kerestesi 2.sınıf	m ³	160.47829	\$/m ³	Çatı plywood-lif levha-	m ²	2.95784	\$/m ²
Civi-bulon bağlantı malzemesi	kg	0.38389	\$/kg	Lama kenet demirleri	kg	2.23663	\$/kg
Yağ bazlı kalıp avırıcı	kg	0.49717	\$/kg	Tas vünü levha-6 cm	m ²	0.84959	\$/m ²
Plywood kalıp	m ²	10.38389	\$/m ²	Tas vünü levha-8 cm	m ²	1.10132	\$/m ²
Ahsap kiris (4x8 cm kereste)	m ³	4.75142	\$/m ³	Tas vünü levha-10 cm	m ²	1.32159	\$/m ²
Rulo sac- 5-8 mm kalınlıkta	kg	0.77281	\$/kg	Tas vünü levha-12 cm	m ²	1.54185	\$/m ²
Gaz beton	m ²	4.80806	\$/m ²	Tas vünü levha-14 cm	m ²	1.76211	\$/m ²
Gaz beton harcı	m ³	28.94902	\$/m ³	Cam vünü levha-6 cm	m ²	0.44053	\$/m ²
Celik boru (iskele)	kg	0.55381	\$/kg	Cam vünü levha-8 cm	m ²	0.67967	\$/m ²
Düz va da desenli sac	kg	0.74764	\$/kg	Cam vünü levha-10 cm	m ²	0.84959	\$/m ²
XPS levha - 5 cm	m ³	51.10132	\$/m ³	Cam vünü levha-12 cm	m ²	1.01951	\$/m ²
XPS levha - 8 cm	m ³	51.10132	\$/m ³	Cam vünü levha-14 cm	m ²	1.19572	\$/m ²
EPS levha - 5 cm	m ³	28.31970	\$/m ³	Galvaniz - yağmur oluğu	kg	0.87476	\$/kg
EPS levha - 8 cm	m ³	28.31970	\$/m ³	Pvc - yağmur oluğu	m	2.81561	\$/m
Mantolama levha yapıştırıcısı	kg	0.05790	\$/kg	Cinko - yağmur oluğu	kg	2.59912	\$/kg
Dübel	adet	0.02391	\$/adet	Bakır - yağmur oluğu	kg	8.18125	\$/kg
Alt-üst mantolama file sıvası	kg	0.07237	\$/kg	PP--pprc boru-32 mm	m	1.20327	\$/m
File-valıtım	m ²	0.24229	\$/m ²	PP--pprc boru-70 mm	m	1.32914	\$/m
Astar	litre	1.88798	\$/litre	PE boru-32 mm	m	0.24355	\$/m
Bova	litre	2.48584	\$/litre	PE boru-63 mm	m	0.88609	\$/m
Dış cephe kaba sıva harcı-2 cm	m ³	15.53870	\$/m ³	PVC boru-32 mm	m	0.38515	\$/m
Dış cephe ince sıva harcı-0.8	m ³	19.21901	\$/m ³	PVC boru-63 mm	m	1.32159	\$/m
Zımpara kâğıdı	adet	0.08181	\$/adet	Ahsap pencere	m ²	120.83071	\$/m ²
Su basman profili	m	0.74261	\$/m	PVC pencere	m ²	51.60478	\$/m ²
Köse profilleri	m	0.16048	\$/m	Alüminyum pencere	m ²	138.45186	\$/m ²
Denizlik uzatma profili	m	0.31152	\$/m	PVC kapı	adet	113.27879	\$/adet
Duvar kağıdı	m ²	1.57332	\$/m ²	Ahsap kapı	adet	88.10573	\$/adet
Duvar kağıdı tutkalı	kg	2.83197	\$/kg	Celik kapı	adet	226.55758	\$/adet
Duvar- favans/seramik	m ²	3.30396	\$/m ²	Karo yapıştırıcısı	kg	0.15733	\$/kg

Çizelge 6. Dış cephe yer döşemesinin örnek gömülü enerji, gömülü karbon ve maliyet hesaplamaları (Sample embedded energy, embedded carbon and cost computations of exterior floor covering item)

Mahal	Metraj (m ²)	İmalat türü	Derz dolgusu (kg)	Terrazo karo (m ²)	Karo harcı (m ³)	Mermer (m ²)	Kum (m ³)	Granit parke taşı (kg)		
tretuvar	50,9	Beton (terrazo) karo	25,498	53,546	2,039	0	0	0	Toplam	
		kg toplam malzeme	25,498	2677,332	4487,718	0	0	0		
		EE-MJ	33,912	3748,264	4353,086	0	0	0	8135,264	MJ
		ECO ₂ -kgCO ₂	5,303	321,279	655,206	0	0	0	981,790	kgCO ₂
		Toplam maliyet - \$	4,493	129,738	42,390	0	0	0	176,622	\$

getirilmektedir. İlk satırda beton karo için poz tariflerinden alınan katsayılar ile metraj değeri çarpılarak gerekli malzeme miktarları verilmiştir. Bu satırda bulunan mermer, kum, parke taşı başlıklarının sıfır olması, tercih edilen imalat türünde bu malzemelere ihtiyaç duyulmamasından kaynaklanmaktadır. 2. satırda gereken her bir malzemenin toplam ağırlığı, 3. satırda gömülü enerji miktarı, 4. satırda karbon emisyon miktarı hesaplanmıştır. Son satırda gerekli malzemelerin maliyet analizi yapılmıştır. Tüm iş kalemlerine belirtilen hesaplama süreci uygulandığında inşaat sürecinin çevresel etki hesaplamaları ve malzemelerin maliyet hesabı tamamlanır.

Yapının kullanımı boyunca gerçekleşecek ısıtma enerjisi harcamalarını belirlemek için ısı kaybı hesaplamaları TSE 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları ve TS 2164 Kalorifer Tesiatı Projelendirme Detayları yönetmeliklerine göre yapılmıştır [65, 66]. Makalenin uzunluğunu arttırmamak için analizde kullanılan formüllere ve tablolara yer verilmemiştir. Isı kaybı hesaplamalarında; giriş kapısı: kuzey yönünde olduğu, iklim sertliğinin 3. derece-gün bölgesi olduğu ve yapının tek hacimli hesap metoduna uygun olduğu kabulleri yapılmıştır.

Yapı elemanının alanı ve yapı elemanını oluşturan cephe imalatındaki katmanlar ve katmanların kalınlıkları metraj ve iş tarifleri verilerinden elde edilmiştir. Örneğin dış duvar imalatı R_i , iç sıva, taşıyıcı duvar türü, yalıtım levhası, dış sıva ve $R_d = R_e$ olmak üzere 6 katmandan oluşmaktadır. Taban döşemesinin tamamına etki eden R değerleri, blokaj ve tesviye betonudur. Taban döşemesi dışındaki yüzeyler tek süreçte incelenirken, mekânlara farklı taban döşeme kaplaması uygulanabilmesi nedeniyle bölgelere ayrı ayrı incelenmiştir. R_i ve R_e iç ve dış yüzey ısı iletim direncini temsil etmektedir. Dış yüzeyi oluşturan katmanların R değerleri toplanıp tersi alınarak katmanlı yüzey için tek bir U değeri hesaplanır. Elde edilen U değeri ilgili alan ile çarpılarak incelenen elemanın ısı kaybı bulunur [67]. İki yüzey arasındaki birim sıcaklık farkında, birim yüzeyden geçen ısı akışı Q malzemenin ısı iletilenlik katsayısı (W/mK) olarak ifade edilir ve λ ile gösterilir. Tercih edilen malzemelerin λ değerleri TSE 825 EK E'den alınmıştır. Isı kaybı ve ısıtma enerjisi hesabında kullanılan TSE 825 ve TS 2164 çizelge ve ekleri ayrı veri sayfasında tanımlanmıştır. Bununla birlikte yapının bulunduğu konumdaki yüzey şekilleri de ısıtma enerjisi üzerinde önemli etkiye sahiptir [68].

Mahallere tanımlanan yer döşemesi türüne göre taban döşemesi ısı iletilenlik değeri hesaplanmaktadır. Her bir mahal için ayrı ısı kaybı hesaplanıp toplanarak ısı kaybı hesabı taban için sonlandırılır. Hesaplanan ısı kayıpları toplanarak "iletim yoluyla ısı kaybı" değeri bulunur. Doğal havalandırma yolu ile ısı kaybı ise TSE'de belirtilen yöntemle göre yapılmıştır.

Yıllık ısıtma enerjisini hesaplayabilmek için her ayın ısı kaybı ve ısı kazançları tespit edilmiştir [69]. Isı kaybı

özgül ısı kaybı ve sıcaklık farklarının çarpımı ile hesaplanır. Yapının ısı kazançları ise TSE 825'te tanımlanan formül ve katsayılar ile hesaplanır. Kazanç kullanım oranı ve faktörü hesaplanıp ısı kaybından ısı kazançları çıkarılarak ısıtma enerjisi ihtiyacı bulunur. Sadece ısıtmanın gerekli olduğu aylar için yakıt hesabı yapılmıştır. İncelenen binanın konfor düzeyinin sınırlı olduğu kabul edilerek soğutma analizi yapılmamıştır. Çalışmada saydam yüzeylerin ısı geçirgenliği ve güneş ışığı etkenleri bina cephesini ve incelenen ayda oluşan ısıtım miktarına göre hesaplanarak eklenmiştir. Belirtilen detaylar analizlerin yüksek doğrulukta yapılmasına katkı sağlamıştır. Elde edilen ısıtma enerjisi gereksinimi, yapı için tanımlanan ısıtma sisteminin verimi ve yakıt cinsi göz önüne alınarak ısıtma sonucu oluşan CO_2 salınımı, enerji sarfiyatı ve yakıt maliyeti hesaplanmıştır.

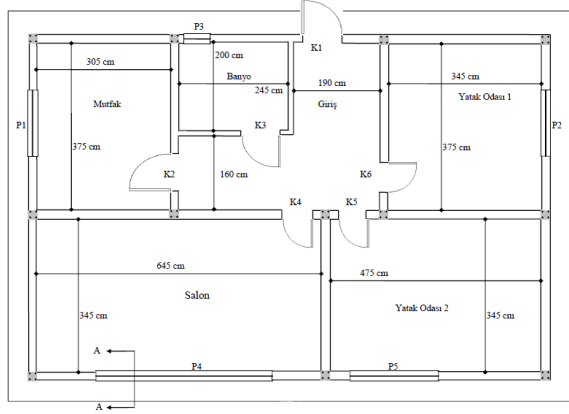
Çalışma kapsamında incelenen ve Çizelge 1'de sunulan yapı alternatifleri yaklaşık $3 \cdot 10^{15}$ adet kombinasyon oluşturmaktadır. Belirtilen sayıda yapı alternatifinin oluşturulup çözülmesi olanaksız olduğu için Monte Carlo Simülasyonu ile 10.000 adet rastgele seçimle yapı kombinasyonu oluşturularak yapı elemanlarının karbon salınımı ve gömülü enerji değerleri hesaplanmıştır. Monte Carlo analizinde girdi parametrelerine atanan olasılık dağılımına göre rastgele seçim yaparak girdi parametrelerinin değerlerini belirleyip sonucu hesaplar ve bu işlem birçok kez tekrarlanarak sonucun girdi parametrelerine göre belirsizliğini ve girdi değerlerinin belirtilen değişkenlik üzerindeki etkisi tahmin edilir [70, 71].

Monte Carlo analizinin girdi parametreleri Çizelge 1'de sunulan yapı için uygulanabilecek alternatif yapı tarifleridir ve rastgele örnekleme ile seçilmektedir. Her iş kalemi için 1 ile ilgili iş kalemi için oluşturulan alternatif sayısı arasında kalacak şekilde rastgele tamsayı üretilerek rastgele bir yapı oluşturulur. Yapının imalat malzemeleri dikkate alınarak karbon salınımı, gömülü enerji hesabı ve maliyet analizi yapılır. Rastgele seçilen yapı alternatifleri ile yapının oluşturulması ve analizi 10.000 kere tekrarlanır. Elde edilen değerler karbon salınımı, gömülü enerji ve maliyet değerlerinin değişkenliğini belirlemek ve uygulanan imalatlarla duyarlılık analizini gerçekleştirmek için kullanılır.

4. VAKA ANALİZİ (CASE STUDY)

Bu çalışmada önerilen yöntemin uygulaması kat planı Şekil 3'te sunulan örnek yığma yapının inşası ve 50 yıl boyunca kullanımı sonucu gereken ısıtma enerjisinin elde edilmesi için harcanacak yakıt da göz önüne alınarak ortaya çıkan gömülü enerji ve karbon salınımı etki kategorileri incelenerek gerçekleştirilmiştir.

İncelenen yapıda bir adet giriş holü, mutfak, banyo, salon ile 2 adet oda bulunmaktadır. Yapının dış duvarlarının oturduğu bölge 11,8 m eninde ve 7,8 metre boyundadır. Belirtilen boyutlarla yapı 92,04 m² alan üzerine oturmaktadır.



Şekil 3. Örnek yapının kat planı (Floor plan of the sample building)

Şekil 4'te sunulan ekran görüntüsündeki menülerle Çizelge 1'de belirtilen yapım alternatifleri arasında hangi imalatın seçildiği tanımlanmaktadır. Örnek yapının boyutlarının ve seçilen imalatların tanımlanması ile hesap tablosu uygulaması Çizelge 7'de sunulan metraj özetini sunmaktadır. Yapının temeli yer kotunun 1,5 metre altındadır ve 1,25 metre yüksekliğinde temel duvarı bulunmaktadır.

İş kalemi	Mahali	İmalat türü seçimi
Drenaj borusu türü		PVC boru
Temel su yalıtımı		cam tülü taşıyıcı bitümlü örtü
Temel duvar türü		cam tülü ve polyster keçe taşıyıcı bitümlü örtü
Temel duvar kalıp türü		polyster keçe taşıyıcı bitümlü örtü
Yapı duvar türü		cam tülü taşıyıcı bitümlü örtü
Kalıp		Yapı duvar türü
Dış cephe duvar yüzey uygulaması		Yapı duvar türü
İç cephe duvar yüzey uygulaması	YO1 YO2	Yapı duvar türü

Şekil 4. Yapıda uygulanacak imalatların tanıtılması (Data entrance of the construction items to be applied in the building)

Metraj değerleri seçilen imalata göre değişebilmektedir. Örneğin dış duvarlara uygulanacak ısı yalıtım malzemesinin kalınlığı artarsa binanın dış yüzeyi genişleyecek ve dış sıva alanı ve dış cephe boya alanları artacaktır. Metrajın tam doğru biçimde hesaplanabilmesi için yapı elemanları ile seçilen imalat yöntemi arasında anlamsal ilişki kurularak metrajı değerinin tam doğru hesaplanabilmesi sağlanmıştır. Çizelge 8'de dış cephe duvar yüzey uygulaması için oluşturulan tarifte yapının geometrisi dikkate alınarak seçilen imalata göre yüzey alanının ne kadar artacağı "imalat değişim miktarı" sütununda belirtilmiştir. Seçilen imalata göre yüzey alanının değişimi ilgili iş kalemlerinin analizlerinde dikkate alınmıştır.

Tüm iş kalemlerinin yürütülmesi sırasında inşaat kaynaklı gömülü enerji ve karbon salınımı hesaplamaları iş tariflerine ve metraj verilerine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. İmalatlar için gereken tüm malzemeler ile malzemelerin ısı iletkenlik hesap değerleri, gömülü enerjileri ve karbon salınımları analize dâhil edilmiştir. TS 825'te belirtilen hesap yöntemleri uygulanarak yapının boyutları ve kullanılan malzemeler dikkate alınarak gerçekleştirilen özgül ısı kaybı hesap sonuçları Çizelge 9'da sunulmuştur.

Çizelge 9'da yapının yan duvarları ve hatıllarından kaynaklanan ısı kaybı hesaplamaları sunulmuştur. Uygulanan imalatların ısı iletkenlik hesap değeri ve imalatlarda tanımlı kalınlıklarına göre ısı iletkenlik direnci R hesaplanmaktadır. Hesaplanan ısı iletkenlik direncinin tersi alınarak ısı geçirgenlik katsayısı, U, hesaplanmıştır. Elde edilen U değeri ilgili yüzey alanı ile çarpılarak W/K biriminde ısı kaybı miktarı bulunur. Benzer şekilde pencere, dış kapı, çatı ve tabandan kaynaklanan ısı kayıpları TS 825'e göre hesaplanmıştır. Isı analizi hesabı Çizelge 1'de verilen alternatif malzeme tercihi ile bağlantılı formüleleştirilmiştir. Örneğin dış cephede XPS tercih edilirse, ısı analizi XPS malzemesinin ısı özellikleri ve kalınlığı dikkate alınarak yapılır. Hesap tablosu oluşturulurken bütün malzemelerin ısı iletkenlik değerleri tanımlanarak ilgili hücrelere referans verildiği için analiz sonuçları kendiliğinden güncellenmektedir.

Çizelge 7. Metraj özeti (Bid of Quantities)

İş Kalemi	Bir		Bir	
	Metraj	im	Metraj	im
Drenaj			Yer Döşemesi-	
Borusu	41,60	m	Laminant	51,58 m ²
Kırmataş	14,50	m ³	Süpürgelik (Fayans)	22,12 m
Grobeton	13,11	m ³	Süpürgelik-	
Su yalıtımı	216,72	m ²	Laminant	47,18 m
Kalıp	217,74	m ²	Kapı Kör Kasa	7,12 m ²
Donatı	3701,39	kg	Kapı Pervazı	13,45 m ²
Beton	32,80	m ³	Pencere	
Taş Duvar	36,00	m ³	Kasaları	11,25 m ²
Duvar	286,08	m ²	İş İskelesi	119,56 m ²
Gerı Dolgu (toprak)	77,50	m ³	Denizlik	2,85 m ²
Blokaj Kaba			Yağmur Oluğu	44,40 m
Taş	16,68	m ³	Yağmur İnişi	6,30 m
Kalıp İskelesi	309,31	m ³	Çatı Isı	Ad
Sıva	416,16	m ²	Yalıtım	117,00 m ²
Fayans	55,32	m ²	Çatı-plywood	126,01 m ²
Dış Beton			Çatı-su yalıtımı	126,01 m ²
Karo	47,96	m ²	Çatı-Kiremit	126,01 m ²
Dış Karo				
Süpürgelik	37,96	m	Mahya	30,45 m
Boya	400,24	m ²	Su tesisatı	45,75 m

Yapının bulunduğu coğrafi bölgeye göre TS 825'te tanımlanan sıcaklık farkları ve özgül ısı kaybı değeri kullanılarak ısı kayıpları hesaplanmıştır. Ayrıca yapının güneşlenme süresi dikkate alınarak güneş enerjisi kazancı hesaplanarak ısıtma enerjisi ihtiyacı belirlenmiştir. Örnek yapı için sadece ısıtma enerjisi ihtiyacı hesaplanmıştır. Yaz ayları için soğutma enerjisi ihtiyacı dikkate alınmamıştır. Yıllık ısıtma ihtiyacı hesaplamaları tercih edilecek yakıt cinsinin verimi dikkate alınmadan hesaplanmış ve değerler Çizelge 10'da sunulmuştur.

Çizelge 8. Dış cephe mantolama için oluşturulan poz tarifi (Construction item definition created for exterior sheathing)

m ²	Birim	m ³ /m ²	kg/m ²	adet/ m ²	kg/ m ²	m ² / m ²	litre/ m ²	litre/ m ²	m ³ / m ²	m ³ / m ²	adet/ m ²	m	m	m
İmalat değişim miktarı	Malzeme türü	levha	mantolama levha yapıştırıcısı	dübel	file sıvası (alt-üst)	Yalıtım filesi	astar	Boya	kaba sıva harcı	ince sıva harcı	zımpara kapıdı	sıva basman profilı	köşe profilleri	denizlik uzatma profilı
1,18	XPS-5 cm	0,0525	4	6	5	1,1	0,111	0,222	0,023	0,01	1	39,2	57,6	9,5
1,888	XPS-8 cm	0,084	4	6	5	1,1	0,111	0,222	0,023	0,01	1	39,2	57,6	9,5
1,18	EPS-5 cm	0,0525	4	6	5	1,1	0,111	0,222	0,023	0,01	1	39,2	57,6	9,5
1,888	EPS-8 cm	0,084	4	6	5	1,1	0,111	0,222	0,023	0,01	1	39,2	57,6	9,5
0	sıva+boya	0	0	0	0	0	0,111	0,222	0,023	0,01	1	39,2	57,6	0

Çizelge 9. Özgül ısı kaybı hesap detayları (Calculation details of specific heat loss)

Binaya tanımlı yapı elemanları	Eleman kalınlığı d (m)	Isıl iletkenlik hesap değeri λ _h (W/mK)	Isıl iletkenlik direnç R (m ² K/W)	Isı geçirgenlik katsayısı U (W/m ² K)
Duvar yüzeyleri	R _i			0,130
	iç sıva	0,02	1	0,020
	gaz beton	0,2	0,25	0,800
	sıva+boya	0	0,04	0,000
	dış sıva	0,025	1,6	0,016
	R _e			0,040
Toplam				1,006
	R _i			0,130
	iç sıva	0,02	1,2	0,017
Betonarme yüzeyler	Hatıllar	0,2	2,5	0,080
	sıva+boya	0	0,04	0,000
Hatıllar için	dış sıva	0,025	1,4	0,018
	R _e			0,040
Toplam				0,285
				0,994
				3,515

Çizelge 10. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı hesaplama detayları (Calculation details of annual heating energy requirement)

Aylar	Isı kaybı			Isı kazançları			KKO	Kazanç kullanım faktörü	Isıtma enerjisi ihtiyacı
	Özgül ısı kaybı	Sıcaklık farkı	Isı kayıpları	İç ısı kazancı	Güneş enerjisi kazancı	Toplam			
	H=H _i +H _v (W/K)	θ _i -θ _e (K,°C)	H(θ _i -θ _e) (W)	φ _i (W)	φ _s (W)	φ _T =φ _i +φ _s (W)	γ (-)	η _{ay} (-)	Q _{ay} (kJ)
Ocak		19,3	6256,540277		279,312	728,4672	0,116432911	0,312562	15626777,6
Şubat		18,9	6126,871049		336,504	785,6592	0,128231718	0,33818	15192169,9
Mart		14,9	4830,178763		376,032	825,1872	0,170839888	0,423	11615075,7
Nisan		8,9	2885,140335		405,36	854,5152	0,296178037	0,614556	6117100,76
Mayıs		4,6	1491,196128		447,432	896,5872	0,601253707	0,855628	1876740,55
Haziran	324,1730714	0,5	162,0865357	449,1552	468,36	917,5152	5,66065032	1	0
Temmuz		0	0		456,408	905,5632	0	0	0
Ağustos		0	0		438,168	887,3232	0	0	0
Eylül		1,8	583,5115284		388,344	837,4992	1,43527447	0,990147	0
Ekim		7,4	2398,880728		333,792	782,9472	0,326380212	0,650264	4898253,16
Kasım		13,4	4343,919156		261,672	710,8272	0,1636373	0,409466	10505012
Aralık		17,7	5737,863363		246,384	695,5392	0,121219199	0,323071	14290096,5
Q _{ay} = [H (θ _i - θ _e) - η (φ _{i,ay} + φ _{s,ay})] . t (Joule) /1000000 (1kJ = 0,278 x 10 ⁻³ kWh)							Q _{ay} = Σ Q _{ay} =		80.121.226
Toplam ısı kaybı Q _{yt} = 0,278x10 ⁻³ x (kJ) = 22273,70085 kWh									
Konutlar için iç ısı kazancı φ _{i,ay} ≤ 5 . A _n (W)									
Güneş enerjisi kazancı φ _{g,ay} = Σ i _{i,ay} x G _{i,ay} x k _{i,ay} x A _i									
891910,2584									
Kazanç kullanım faktörü η _{ay} = 1 - e ^(-1/KKO_{ay})									
Örnek binadaki kullanım alanı A _n başına düşen yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı:									
Q = Q _{yt} /A _n = 891910,2584 kWh/m ²					An = 0,32*Vbrüt = 89,83104 m ²				
Örnek binadaki ısıtılan yapı hacmi (V _{brüt}) başına düşen yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı					Q = Q _{yt} /Vbrüt = 285411,2827 kWh/m ³				

Çizelge 11. Isınma enerjisi kaynaklarının analizi (Analysis of heating energy sources)

	Enerji birim dönüşüm katsayısı	Birim	Isınma için Gereklî Miktar	Birim	Maliyet- (\$) [72]	CO ₂ Emisyon (kg)
Kömür	25104	kJ	4255	kg	2142,444	12468,41
Elektrikli Soba	0,00028	kWh	22256	kWh	2801,235	9570,00
Odun	10460	kJ	10213,031	kg	1928,200	61,28
Klima	0,00028	kWh	8902	kWh	1120,494	3828,00

Yıllık ısıtma enerjisi hesabı sonucuna göre bir yılda kullanılması gereken yakıt miktarı hesaplaması Çizelge 11'de verilmiştir. Isıtma türü tercihine göre yıllık

emisyon miktarı 9570,00 kgCO₂ ve ısıtma türü tercihine göre maliyet 2801,24\$ olarak hesaplanmıştır. Klima için COP değeri 2,5 olarak alınmıştır.

Çizelge 12. Yapının inşaatı ve kullanım dönemi boyunca çevreye etkisi (Environmental impact of the building during its construction and usage period)

İnşaat Süreci			
Birim	MJ	kgCO ₂	Maliyet (\$)
Ortalama	1.015.757	76.631,71	16.754,46
Standart Sapma	433.473,90	28.256,51	1.956,59
İnşaat ve 50 yıllık ısıtma Süreci			
Birim	MJ	kgCO ₂	Maliyet (\$)
Ortalama	3.816.586	305.969,1	95539,13
Standart Sapma	737.504,6	241.773,8	34469,86

Çizelge 13. Monte Carlo simülasyonu sonucu elde edilen çevre etki değerleri (Environmental impact values obtained by the Monte Carlo simulation)

İmalat Kalemi	Gömülü Enerji		CO ₂ Salınımı		Maliyet	
	ortalama değer	yüzde etki- %	ortalama değer	yüzde etki- %	ortalama değer	yüzde etki- %
Drenaj boru	4230,10	0,42	138,72	0,18	125,71	0,75
Kırmataş	2166,76	0,21	125,31	0,16	17,80	0,11
Temel su yalıtımı	47760,29	4,70	2003,08	2,61	753,31	4,50
Temel duvarı	269598,77	26,54	20321,38	26,52	1378,27	8,23
Taşıyıcı duvar	54725,84	5,39	4638,04	6,05	618,63	3,69
Koruyucu duvar	26343,25	2,59	2224,77	2,90	591,21	3,53
Bölme duvarı	3293,87	0,32	278,18	0,36	49,30	0,29
Kalıp	51442,47	5,06	3328,55	4,34	2734,83	16,32
Grobeton	19819,30	1,95	2642,57	3,45	296,97	1,77
Beton	76026,74	7,48	11135,23	14,53	950,81	5,67
Geri dolgu	69750,00	6,87	3565,00	4,65	77,50	0,46
Donatı	64404,16	6,34	4848,82	6,33	2119,74	12,65
Blokaj	2741,19	0,27	165,13	0,22	22,52	0,13
Kalıp iskelesi	3578,07	0,35	273,92	0,36	87,02	0,52
Dış cephe iş iskelesi	1479,20	0,15	112,43	0,15	37,21	0,22
Dış cephe duvar yüzeyi	22401,89	2,21	2328,79	3,04	481,45	2,87
İç cephe duvar yüzeyi	25190,91	2,48	2833,29	3,70	563,81	3,37
Tavan (sıva+boya)	2309,79	0,23	89,65	0,12	57,76	0,34
İç cephe yer döşemesi	63169,61	6,22	2461,85	3,21	553,83	3,31
Dış cephe yer döşemesi	49121,13	4,84	3160,60	4,12	222,73	1,33
Pencere	13568,48	1,34	692,59	0,90	981,56	5,86
Denizlik	531,47	0,05	30,64	0,04	15,25	0,09
İç kapılar	14649,71	1,44	566,45	0,74	502,74	3,00
Dış kapı	1783,90	0,18	111,83	0,15	226,56	1,35
Islak hacim yalıtım	1600,66	0,16	51,73	0,07	70,15	0,42
çatı imalatı + çatı su yalıtımı	106074,22	10,44	7668,20	10,01	1880,80	11,23
Çatı ısı yalıtımı	13107,92	1,29	596,81	0,78	231,07	1,38
Yağmur oluğu	3568,71	0,35	192,27	0,25	476,61	2,84
Sihhi tesisat	1318,49	0,13	45,87	0,06	629,31	3,76

Monte Carlo simülasyonu 10.000 tekrar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sırasında 17 adet imalat sınıfı için her biri eşit seçilme olasılığına sahip farklı yapım alternatifleri tanımlanarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. İnşa edilen yapının inşaat sürecinde harcanan gömülü enerji, atmosfere salınan CO₂ ve inşaat maliyeti hesaplanmıştır. Ayrıca yapının seçilen alternatife göre ısı kaybı hesaplanmış ve 50 yıl kullanımı boyunca gereken ısı enerjisinin odun, kömür ve elektrikli sobaları ile veya klima ile karşılandığı varsayılarak toplam gömülü enerji, CO₂ salınımı ve toplam inşaat ve ısıtma maliyeti hesaplanarak sonuçları Çizelge 12'de sunulmuştur. Monte Carlo Simülasyonunda her imalat kalemi için farklı imalat türleri rastgele biçimde atanmış ve gerçekleştirilen 10000 tekrar sonrası elde edilen çevre etki değerlerinin ortalamaları ve yüzdelerik değerleri Çizelge 13'te sunulmuştur.

Monte Carlo simülasyonu sonucunda inşaat süreci temel alınarak elde edilen gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyet değerlerinin çapraz korelasyonu hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 14'te sunulmuştur. Gerçekleştirilen analizler sonucunda örnek yapı üzerinde tanımlanan yapım tarifleri ile sınırlı kalmak koşulu ile gömülü enerji ve karbon salınımı arasında çok güçlü pozitif korelasyon olduğu görülmektedir. Ayrıca gömülü enerji ve maliyet arasında da önemli sayılabilecek düzeyde pozitif bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Yüksek maliyetli yapıların daha fazla gömülü enerji ve karbon salınımı değerlerine sahip olması beklenmektedir.

Çizelge 14. Gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyet arasındaki korelasyon sonuçları (Correlation results between embedded energy, carbon emissions and cost)

Parametre	EE	ECO ₂	Maliyet
EE	1		
ECO ₂	0,992839	1	
Maliyet	0,456326	0,51492	1

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada inşaat işlerinin yapım tarifleri, birim işin yapımı için kullanılan malzeme ve enerji dikkate alınarak harcanan gömülü enerji ile atmosfere salınan CO₂ hesaplanmıştır. Ayrıca farklı imalat türlerinin uygulanması sonucu inşaat ve kullanım sürecinde ortaya çıkan CO₂ salınımı ve gömülü enerji değerlerinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Oluşturulan birim çevresel etki değerleri ile vaka çalışması yapılan yapının metraj değerleri çarpılarak inşaatın çevresel etkisi hesaplanmıştır. Yapının metraj değeri seçilen imalat biçimine bağlı olabilmektedir. Dış siva ve boya metrajlarının dış cephe mantolama kalınlığına bağlı olarak değişmesi bu duruma örnek olarak verilebilir. Tüm metraj kalemleri arasında anlamsal ilişkiler kurularak imalat seçimine bağlı olarak tam doğrulukta metraj hesaplanmış ve metraj özeti iş tariflerinde yer

alan birim değerlerle çarpılarak maliyet, gömülü enerji ve karbon salınım hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada ortalama büyüklüğe sahip kırsal alanda inşa edilebilecek tek katlı müstakil bir konutun gömülü enerji, CO₂ salınımı ve maliyet analizleri yapılmıştır. Yapıyı oluşturan 17 inşaat kalemi için farklı yapım alternatifleri oluşturulmuştur. Farklı imalat seçenekleri yaklaşık 3*10¹⁵ farklı yapım alternatifi oluşturmaktadır. Belirtilen sayıda bina analiz edilemeyeceği için inşaat kalemlerinin her birinin yapının toplam gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyetine etkisi Monte Carlo Simülasyonu ile tahmin edilmiştir. Simülasyon sürecinde yapım alternatifleri rastgele seçilerek yapı oluşturulmuş ve tüm inşaat kalemleri ile oluşturulan yapının gömülü enerjisi, karbon salınımı ve maliyeti hesaplanmıştır. Bu şekilde aykırı değerlerin etkisi azaltılarak tercih edilecek inşaat tekniğinin yapının çevresel etkisine ve maliyetine ne ölçüde etki edeceği hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda temel inşasının yapının gömülü enerjisinde en büyük paya sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çatı ve betonarme işleri de gömülü enerjiyi önemli ölçüde arttırmaktadır. Karbon salınımında en büyük pay temel, beton ve çatı işlerine aittir. Örnek yapının taşıyıcı sistemini tuğla oluşturmaya rağmen temel, hatıl, tesviye ve harç işlerinde kullanılan beton karbon salınımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Tercih edilen malzeme ve imalat türüne göre yapının ısı kaybı hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve odun, kömür, elektrikli ısıtıcı ve klima ısıtma seçeneklerinden birisi ile ısıtılması sonucu 50 yıllık kullanım dönemi boyunca oluşacak gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyeti ısıtma sisteminin verimi ve enerji kaynağının özellikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Yapının farklı malzeme ve inşaat tekniği ile inşa edilmesi seçenekleri arasında istatistiksel incelemeler yapılmış ve korelasyonları hesaplanmıştır. Gömülü enerji ve CO₂ salınımı arasındaki korelasyon 0,99 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değer yorumlanması yapıda kullanılan malzeme veya uygulanan inşaat tekniğinin alternatif yöntemlere kıyasla daha yüksek gömülü enerji içeriyorsa atmosfere salınan karbon miktarının da aynı oranda artması beklenmektedir. Bunun dışında inşaat maliyeti ile gömülü enerji veya karbon salınımı arasında daha zayıf olmasına karşın pozitif bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. İnşaat sırasında gömülü enerjisi veya karbon salınımı daha fazla olan bir inşaat yönteminin tercih edilmesi sonucunda inşaat maliyetinin de artması beklenmektedir.

Gömülü enerji ve karbon salınımı hesaplamaları literatürde ağırlıklı olarak bir malzeme veya imalat için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kırsal bir alanda inşa edilen tipik bir yapının tüm iş kalemleri için gömülü enerji ve karbon salınım hesaplamaları yapılmıştır. Oluşturulan iş tariflerinin gömülü enerji ve karbon salınım değerleri literatüre kazandırılmış ve bu alanda

çalışan araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Belirtilen yapım tarifleri bu çalışmanın literatüre katkısından biridir.

Üretim aşamasındaki gömülü enerji ve karbon birçok parametreden etkilenir. Hammaddenin ürüne dönüştürülmesi sırasında izlenen üretim yöntemi, ürün elde edilmesine kadar olan süreç, kullanılan enerji miktarı, enerji türü ve geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyeti etkilemektedir. Örneğin bir tuğlanın üretiminde kullanılan odun, linyit, kömür, elektrik, doğal gaz vb. enerji kaynağı işletmeye göre değişebilir ve gömülü enerji ve karbon değerini önemli ölçüde etkiler. Ayrıca elektrik enerjisi kullanıldığında üretilen birim elektrik enerjisinin gömülü enerjisi ile atmosfere salınan CO₂ miktarı ülkeden ülkeye değişmektedir. Buna ek olarak inşaat malzemelerinin şantiye alanına getirilmesi sırasında harcanan enerji de analiz sonuçlarını etkilemektedir.

Yapının işletme enerjisi ve karbon salınım değerinin düşük olması için dış cephe yalıtımı, pencere ve çatı inşaat işlerinin yüksek verimlilikte olması gerekir. Pencerelerin tek yerine çift camlı tercih edilmesi ya da yalıtım levhalarının kalınlıklarının artırılması üretim aşamasındaki gömülü enerji ve karbon salınım değerlerini artırmasına rağmen yüksek verimliliğe örnek verilebilir. Bu bağlamda; üretim aşamasındaki enerji ve karbon değeri ile işletim aşaması değerleri ters orantıya sahiptir. Binanın işletim süresi genel kabule göre ortalama 50 yıl olduğu için üretim aşamasındaki gömülü değerlerdeki artışın işletme aşamasında telafi edilmesi mümkündür.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada kırsal alanda inşa edilecek bir yapının toplam gömülü enerji, karbon emisyonu ve inşaat maliyeti farklı imalat ve yapı malzemelerinin kullanım dikkate alınarak hesaplanmıştır. Kırsal alanda inşa edilen ortalama bir yapıyı oluşturan 17 adet iş kalemi tanımlanmış ve tanımlanan iş kalemlerinin her biri için farklı yapım alternatifleri oluşturulmuştur. Belirtilen hesaplama için yapının iş kalemleri arasında anlamsal ilişkiler kurularak metraj hesaplamaları yapılmıştır. Metraj değerleri ile ilgili iş tarifi eşleştirilerek iş kaleminin gerçekleştirilmesi sonucu ortaya çıkacak gömülü enerji, karbon salınımı ve maliyet değerleri hesaplanmıştır. Oluşturulan yapım alternatifleri yaklaşık $3 \cdot 10^{15}$ farklı yapım seçeneği sunduğu için tüm seçenekler incelenememiş ve Monte Carlo simülasyonu ile yapım seçeneklerinin rastgele seçimle uygulanması ile yapı oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Analizler sonucunda yapının gömülü enerji miktarında en çok temel işlerinin payı olduğu, karbon salınımında ise en çok paya beton, çatı işleri ve donatının sahip olduğu belirlenmiştir. Karbon salınımı ve gömülü enerji düzeyi düşük inşaat malzemesi ve yöntemlerinin tercih edilmesinin inşaat maliyetinde düşüş sağlayabileceği belirlenmiştir.

Yapının toplam gömülü enerjisi, karbon salınımı ve maliyetine incelenen inşaat işlerinin hangi oranda pay sahibi olduğu da hesaplanmıştır. Ayrıca karbon salınımı, gömülü enerji ve maliyet değerlerinin çapraz korelasyonu hesaplanarak belirtilen değerlerin kendi aralarındaki ilişkinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda çevreye en yüksek etkiye sahip inşaat iş kalemleri üzerine yoğunlaşıp yapının çevreye olumsuz etkisi en aza indirilebilecektir. Ayrıca analizler sırasında oluşturulan inşaat kalemlerinin birim gömülü enerji ve karbon salınım değerleri araştırmacıların kullanımına sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamındaki araştırma soruları önemli ölçüde cevaplanmakla birlikte kullanım sırasında aydınlatma enerjisi tüketimi, inşa sürecinde ise nakliyenin analize dâhil edilerek maliyet, karbon emisyonu ve gömülü enerjiye inşaat türelerinin ne kadar etki ettiği ileri çalışma olarak hesaplanmalıdır. Ayrıca çok katlı ve daha kaliteli inşaat malzemeleri kullanılarak inşa edilen konut ve işyeri tipi yapıların çevresel etki analizlerinin gerçekleştirilmesi araştırma sorularının daha doğru cevaplanmasını sağlayacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Tuğba ERZURUM: Hesaplamaları yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Önder Halis BETTEMİR: Hesaplama algoritmasını önermiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur..

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] IPCC. 2019 "Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories", *Intergovernmental Panel on Climate Change*, (2019).
- [2] Du Plessis, C., "Agenda 21 for sustainable construction in developing countries: a discussion document", *CSIR Building and Construction Technology*, (2002).
- [3] TÇMB, "2017 İstatistik Raporu", Yayın No:1, Ankara (2017).
- [4] Gürsel, A. P., Meral, Ç., "Türkiye'de Çimento Üretimine Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi", 2. *Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, 1-13, (2012).
- [5] Sert, S., "Bina Yaşam Döngüsünde Enerji Analizi ve Yeşil Binalar", Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).
- [6] Jacques, P., "Sustainability: the basics", *Routledge*, (2020).

- [7] Kibert, C. J., "Establishing principles and a model for sustainable construction" *In Proceedings of the first international conference on sustainable construction*, 6-9, Tampa Florida, (1994).
- [8] Walsh, C. J., "Construction related sustainability performance indicators". *In CIB Proceedings of the Fourth International Symposium on Building Economics*, (1987).
- [9] Sev, A., "Sürdürülebilir Mimarlık", 1. Baskı, *YEM Yayınları*, İstanbul, (2009).
- [10] BRE, Environmental Profile Methodology, https://bregroup.com/hrf_faq/what-are-the-13-categories-and-what-do-they-mean/, Erişim Tarihi: 28/06/2022.
- [11] Siegenthaler, C.P., Braunschweig, A., Oeterli, G., Furter, S., "LCA software guide 2005 market overview-software portraits", Zurich, İsviçre, (2005).
- [12] Silva, D., Nunes, A. O., da Silva Moris, A., Moro, C., Piekarski, T. O. R., "How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto", *In Proceedings of the VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica, Medellín, Colombia*, 10-15, (2017).
- [13] Udomsap, A. D., Hallinger, P., "A bibliometric review of research on sustainable construction, 1994–2018", *Journal of Cleaner Production*, 254, 120073, (2020).
- [14] Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G., "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA", *Construction and building materials*, 23(1), 28-39, (2009).
- [15] 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).
- [16] Dixit, M. K., Fernández-Solis, 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).
- [17] Marzouk, M., Elshaboury, N., "Science mapping analysis of embodied energy in the construction industry", *Energy Reports*, 8, 1362-1376, (2022).
- [18] Stephan, A., Crawford, R. H., De Myttenaere, K., "A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses", *Applied energy*, 112, 23-34, (2013).
- [19] 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).
- [20] Leblebici, M., "Şehir Isı Adası Etkisinin Binalarda Enerji Tüketimine Etkisi: Isıl Yük Hesaplama Programı Kullanılarak Yapılan Örnek Bir Çalışma", *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, (2020).
- [21] Akgül, C. M., Dino, İ. G., "RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre konutlarda iklim değişikliği etki değerlendirmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1665-1684, (2020).
- [22] Perera, S., Senaratne, S., Rodrigo, M. N. N., Brady, L., "Analysis of embodied carbon and cost profiles of school buildings in Australia", *Built Environment Project and Asset Management*, (2021).
- [23] RICS. (2014). Methodology to calculate embodied carbon.
- [24] HM Government, The Innovation and Growth Team (IGT), *The Building and Approved Inspectors (Amendment) Regulations 2006*, TSO, 2006.
- [25] Bostancı, L., "Atık Cam Tozu İçeren Alkali-Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal Yalıtkanlık ve Mikro Yapı Özellikleri", *Politeknik Dergisi*, 25(1), 75 - 87.
- [26] 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).
- [27] Langston, C., Chan, E. H., Yung, E. H., "Embodied carbon and construction cost differences between Hong Kong and Melbourne buildings", *Construction Economics and Building*, 18(4), 84-102, (2018).
- [28] Victoria, M. F., Perera, S., Davies, A., Fernando, N., "Carbon and cost critical elements: a comparative analysis of two office buildings", *Built Environment Project and Asset Management*, (2017).
- [29] Jiao, Y., Lloyd, C. R., Wakes, S. J. "The relationship between total embodied energy and cost of commercial buildings", *Energy and Buildings*, 52, 20-27, (2012).
- [30] Copiello, S., "Economic implications of the energy issue: Evidence for a positive non-linear relation between embodied energy and construction cost", *Energy and buildings*, 123, 59-70, (2016).
- [31] Altun, M., Akgül, Ç. M., Akçamete, A. "Kabuk yalıtımının bina ısıtma enerjisi ihtiyacına, maliyetine ve karbon ayak izine etkisinin yaşam döngüsü bakış açısıyla değerlendirilmesi", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 35(1), (2020).
- [32] Ekundayo, D., Perera, S., Udeaja, C., Zhou, L., "Carbon review and qualitative comparison of selected carbon counting tools", *In RICS COBRA Research Conference*, (2012).
- [33] 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).
- [34] 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).
- [35] Erzurum, T., Bettemir, Ö. H. (2021), Sustainability Analysis for the Construction of Temporary Houses, 14th International Congress on Advances in Civil Engineering- ACE 2020-21 (pp. 354-360).
- [36] Erzurum, T., Bettemir, Ö. H. (2022), Sustainability Analysis for the Construction of Rural Houses, 7th International Project and Construction Management Conference - IPCMC2022, (pp. 1292-1303).
- [37] 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).
- [38] Hammond, G., Jones, C., Lowrie, E. F., Tse, P., "Embodied carbon. The inventory of carbon and energy (ICE) Version (2.0)", (2011).
- [39] Bettemir, Ö.H., Gündüz, E., Akkurt, O., Hilal, E., Arslan, M.A., İnşaat işlerinin iş programına bağlı nakit akışı değişkenliğinin saptanması ve düzenlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(1), 211-223, (2019).
- [40] Bettemir, Ö.H, Yücel, T., "Zaman maliyet ödünleşim probleminin en az insan müdahalesi ile oluşturulup

- çözülmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 461-480, (2021).
- [41] Bettemir, Ö.H, Bulak, Ö, “İnşaat Sürecinin İş Çizelgelemesi, Yönetimi ve Optimizasyonu”, *Teknik Dergi*, 33(6), 12945-12986, (2022).
- [42] CSB. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2022 Birim Fiyat Analizi.(Birim ağırlıkta poz numaraları: 15.270.1203/15.220.1201 / 15.335.1003/15.335.1203/ 19.100.2424/ 19.100.2410/ 10.330.3501/ 15.340.1406-1410/ 15.340.1401-1405)
- [43] Web referansı 1: <https://www.kuzeyboru.com.tr/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [44] Web referansı 2: <https://www.firat.com/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [45] İMO, Teknik Bilgiler, Yapı Malzemeleri ve Yapı Kısımlarının Birim Hacim Ağırlıkları, *İnşaat Mühendisleri Odası*.
- [46] Yıldırım, M., “Yapılarda su geçirimsizliği ve yalıtım teknolojisi”, *Sakarya Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, (2012).
- [47] Web referansı 3: <https://www.standartizolasyon.com/urun/simplan-pvc-membran/basecap/sim-plan-basecap/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [48] Web referansı 4: <https://plastek-geo.com/tr/hdpe-hdpe-ve-ldpe-ldpe-den-yapilms-puruzsuz-g9572217>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [49] Web referansı 5: <http://ersayapi.com.tr/uploads/Pdf/L%C4%B0NEFLEX/EPDM%20Membran%20CE.pdf>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [50] Web referansı 6: <https://www.hakedis.org/wp-content/uploads/2016/11/Nakliye-Yo%C4%9Funluk-De%C4%9Ferleri.pdf>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [51] Web referansı 7: <http://www.plywood.web.tr/wisa-form-birch-18-mm-plywood.htm>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [52] Web referansı 8: <https://www.madenkereste.com/kereste-hesapla/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [53] Web referansı 9: https://mdbapi.knauf.com/v1/pdf_download.php?p=g&action=download&a=451100&c=f50d59ab3edf7df01f86a5602abd6bd6, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [54] Web referansı 10: <https://www.alfor.com.tr/Kategori/urunler/damlalikedamlalik-profil-siva-payli/18/832/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [55] Web referansı 11: <https://www.alfor.com.tr/Kategori/urunler/pvcaluminyum-denizlik-uzatma--arkalikli/18/887/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [56] Web referansı 12: <https://www.alfor.com.tr/Kategori/urunler/pvcaluminyum-denizlik-uzatma--arkalikli/18/887/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [57] Ergenç, S. (2007). İç duvar kaplamalarında ürün seçimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi.
- [58] Web referansı 13: <http://www.yapkat.com/Urun.asp?UrunID=65&FirmaID=3438>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [59] Web referansı 14: <http://onurparke.com/laminat-Sunfloor-11-11.html>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [60] Web referansı 15: <https://askaro.com.tr/teknik2.php>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [61] Web referansı 16: <https://www.firat.com/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [62] Web referansı 17: <https://www.kuzeyboru.com.tr/>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [63] Web referansı 18: <http://www.camsan.com.tr/mdf-teknik-ozellikler>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [64] Web referansı 19: <http://www.aryametal.com/endustriyel-plastikler.html>, Erişim Tarihi: 30/01/2022.
- [65] BIYK, “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları TS 825” *Türk Standartları Enstitüsü*.
- [66] KİTPD, “Kalorifer Tesisatı Projelendirme Detayları TS 2164” *Türk Standartları Enstitüsü*.
- [67] Kaplan, G., Aruntaş, H. Y., “XPS yalıtımlı dış duvarların ısı performanslarının deneysel incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 24(2), 645-653, (2021).
- [68] Manav, A. Değişen mikro iklim koşullarında geleneksel konutların enerji etkin davranışları: geleneksel Mut evlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 1137-1149.
- [69] Sözen, A., Menlik, T, Anvari-Moghaddam, A. “Mapping of Turkey’s district heating/cooling requirements”, *Politeknik Dergisi*, 23(3), 867-878, (2020).
- [70] Bettemir, Ö. H., “Kazı ve hafriyat sürelerindeki belirsizliğin Monte Carlo Analizi ile tahmini”, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 165-173, (2009).
- [71] Sağlam, B., Bettemir, Ö. H., “Estimation of duration of earthwork with backhoe excavator by Monte Carlo Simulation”, *Journal of Construction Engineering*, 1(2), 85-94, (2018).
- [72] Kon O, İlhan, U., “Merkezi Isıtma Sistemlerinde Yerüstü ve Yeraltı Ön Yalıtımlı Boruların Optimum Yalıtım Kalınlığı, Enerji Tasarrufu ve Yakıt Emisyon Hesabı” *Politeknik Dergisi*, 25(1): 189-203, (2022).