

YAPI MALZEMELERİNİN GÖMÜLÜ KARBON MİKTARINA ETKİSİ: ÖRNEK BİR YAPI ÜZERİNDEN İNCELEME

Betül KÖKSAL^(ORCID:0009-0008-4096-3107)1

1.Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Enformatik Bölümü
e-posta: betul.koksal@outlook.com.tr

ÖZET

Bu makale gömülü karbon miktarının örnek bir yapı modeli üzerinden tespitine dair bir çalışmadır, bu çalışmada bir BIM yazılımı ile oluşturulan bir yapı biriminin malzeme seçiminin değişmesiyle gömülü karbon miktarının nasıl değiştiği analiz edilmiştir.

Literatür taraması sonucunda mevcut konuyla alakalı kısıtlı sayıda kaynak bulunmaktadır. Bu çalışma aracılığı ile ilgili konuya dair literatüre katkı sağlamak ve gömülü karbon hesaplamasının yöntemi konusunda bir örnek model oluşturmak amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Net Sıfır Karbon; Enerji Analizi; Sürdürülebilirlik; Gömülü Karbon; Bina Bilgi Modelleme.

ABSTRACT

This article is a study on the determination of the amount of embodied carbon through a sample structure model, in this study, how the amount of embodied carbon changes with the change of material selection of a structural unit created with a BIM software has been analyzed.

As a result of the literature review, a limited number of resources related to the current subject have been reached. Through this study, it is aimed to contribute to the literature on the subject and to create an exemplary model for the method of embodied carbon calculation.

Key Words: Net Zero Carbon; Embodied Carbon; Sustainability; Building Information Modelling; Energy Tools; Revit; Analysis.

1.GİRİŞ

İklim değişikliği, sıcaklıklarda ve hava modellerinde uzun vadeli değişimleri ifade eder. Bu değişimler güneş döngüsündeki değişiklikler gibi doğal ve kozmolojik sebeplerle olabileceği gibi insan faaliyetlerinden de kaynaklanabilir. Özellikle 1800'lerden bu yana, Sanayi Devrimi sonrasında, kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların tüketiminin yaygınlaşması ve çeşitlenmesi nedeniyle insan faaliyetleri iklim değişikliğinin itici gücü olmuştur. Fosil yakıtların tüketimi güneş ısınımı hapseden ve sıcaklıkları yükselten sera gazı emisyonu üretir. Küresel ısınmayı artıran ve iklim değişikliğine yol açan sera gazı emisyonları sonucunda dünya, kayıtlı tarihin en hızlı ısındığı dönemi yaşamaktadır. Bu, insanlar ve dünyadaki diğer tüm yaşam biçimleri için birçok risk oluşturmaktadır. Sera gazı emisyonunun ana kaynakları arasında enerji, sanayi, ulaşım, binalar, tarım ve arazi kullanımı yer almaktadır (BM İklim Eylemi, 2022).

BM İklim Eylemi 2022 raporuna göre, iklim değişikliği üzerine çok taraflı yürütülen bilimsel çalışmalar sonucunda iklim değişikliğinin en kötü etkilerinden kaçınmak ve yaşanabilir bir gezegeni korumak için küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi seviyelerinin 1,5°C üzerinde sınırlandırılması gerektiği ortaya konmaktadır. Ancak, yine BM İklim raporu (2022)'na göre bilimsel çalışmalar göstermektedir ki dünya 1800'lerin sonlarında olduğundan yaklaşık 1,1°C daha sıcaktır. Bununla beraber, emisyonlar artmaya devam etmektedir. Küresel ısınmayı önlemek amacıyla 2015 yılında Paris İklim Anlaşması imzalanmış ve 193 ülkenin taraf olduğu bu anlaşmada küresel ısınmayı 2°nin altında ve hatta mümkünse 1,5° ile sınırlı tutmak için emisyonların 2030'a kadar %45 oranında azaltılması ve 2050'ye kadar Net Sıfır'a ulaşması gerektiği taraf ülkeler tarafından teyit edilmiştir. Birleşmiş Milletler'ce yürütülen İklim Eylem Planı kapsamında hükümetler iklim değişikliği ile mücadele kapsamında bazı taahhütlerini yerine getirmeleri beklenmektedir. Taraf ülkelerden Net Sıfır'a ulaşmak için Ulusal Belirlenmiş Katkı(INDC) belgelerini sunması beklenmektedir.

Süreç, henüz hedeflenen ölçüde ilerleme kaydetmemiş olsa da bu eylemlerin ortak amacı sera gazı emisyonlarını azaltarak Net Sıfır emisyon düzeyine ulaşmak ve bu sayede küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlı tutmayı başararak iklim değişikliğinin dünyadaki yaşamsal risklerinin en aza indirmektir (BM İklim Eylemi, 2022). Bilimsel araştırmalar küresel ısınmayla mücadelenin ivediligini göstermektedir. Hesaplamalara göre sera gazı emisyonları son 2 milyon yılın en yüksek seviyelerine ulaşmış durumdadır. Öyle ki 2010'lu yıllar kaydedilen en sıcak yıllardır (UNEP, 2022).

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 75'inden fazlasını ve tüm karbondioksit emisyonlarının yaklaşık yüzde 90'ını oluşturarak, küresel iklim değişikliğine açık ara en büyük sebebi olarak yer almaktadır. İklim değişikliğine neden olan unsurlara bakıldığında; enerji üretimi, imalat sanayi, ormansızlaşma, ulaşım kullanımları, gıda üretimi, yüksek tüketim ve binalar öne çıkmaktadır (IPCC, 2021).

UNEP'in Karbon Emisyon Açığı Raporu(2022)'na göre yapı sektörünün dönüşümünü hızlandıracak eylemler şunlardır: verimli bina kabuğu oluşturma amacıyla aktif ısıtma ve soğutma ihtiyacını en aza indirmek için bina kabuğunun optimize edilmesi, sıfır emisyonlu ısıtma soğutma teknolojisinin güçlendirilmesi adına hidroflorokarbon içermeyen yüksek verimli klimalar ve ısı pompaları, tesis içinde veya tesis dışında elektrikle sağlanarak yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalıştırılabilir olanların tercih edilmesi, yeni binaların, sıfır karbon kaynaklarıyla karşılanan minimum enerji talebiyle, çalışır durumda sıfır karbon olacak şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi, inşaat malzemelerinden kaynaklanan emisyonların çelik ve çimento üretiminin emisyon yoğunluğunu azaltarak ve mümkün olduğunda geri dönüştürülmüş malzemeler de dahil olmak üzere daha düşük karbonlu malzemeleri ikame ederek en aza indirilmesi. Bina operasyonlarından kaynaklanan doğrudan emisyonlar, diğer sektörlerle kıyasla nispeten küçük kalmaktadır ve küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 5'i olarak tahmin edilmektedir, ancak bu sayı, elektrik ve ısı tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlar hesaba katıldığında yüzde 17'ye çıkmaktadır (IPCC 2022). Doğrudan emisyonlar yılda 3 gigaton CO₂ ile nispeten sabit kalırken, dolaylı emisyonlar 1990'dan bu yana neredeyse iki katına çıktı (IEA 2020).

Bu makalede bina sektöründeki karbon emisyonları dönüşümünün bir parçası olarak yapı malzemelerinin gömülü karbon emisyonlarına odaklanan bir yapı incelemesi yapılmıştır. Bir yapının tasarım aşamasında karar verilirken yapı malzemesinin ikame malzemelerle değişimiyle ortaya çıkan gömülü karbon farkının ortaya konması

ve yapıdaki formun değişimiyle gömülü karbon miktarının gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

1. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAPSAMINDA KARBON SALINIMI

Sürdürülebilirlik, ekonomi, çevre ve toplum konularını baz alan, yıllardır üzerinde çalışılan ve çalışılmaya devam eden bir araştırma ve uygulama alanıdır. İnsan tüketimine dayalı türlü eylemlerin iklim değişikliği ve sera gazı emisyonlarına büyük ölçüde etki eden inşa etme pratiği sürdürülebilirliğin inceleme alanları arasındadır. Sürdürülebilirlik kavramı uzun yıllardır inşaat endüstrisinde gündemde olmasına rağmen, resmi istatistikler inşaat sektörünün büyük bir enerji tüketicisi olmaya devam ettiğini göstermektedir. (Rode, 2011).

Ürün ve hizmetlere erişim için harcanan enerji miktarını azaltma hedefi için enerji verimliliği kavramı ortaya çıkmıştır (Enerji Verimliliği, 2023). Bu çerçevede sürdürülebilirlik çevre kirliliği ve sera gazlarının azaltılmasını, ekolojik dengenin korunmasını ve enerji ve kaynak verimliliğini zaruri tutmuştur (US Member States, 2012).

1.1) Karbon Emisyonu

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 75'inden fazlasını ve tüm karbondioksit emisyonlarının yaklaşık yüzde 90'ını oluşturarak, küresel iklim değişikliğine açık ara en büyük sebebi olarak ortaya çıkmaktadır. İklim değişikliğine neden olan unsurlara bakıldığında; enerji üretimi, imalat sanayi, ormansızlaşma, ulaşım kullanımları, gıda üretimi, yüksek tüketim ve binalar öne çıkmaktadır.

İklim değişikliğinin, küresel ısınmanın ve dünya sıcaklığının artışının en büyük nedenlerinden biri karbon salınımindaki artıştır (Lu, 2019). Bu artışla alakalı olarak dünya çapındaki toplumlara bakıldığında bu sera gazı salınımları konusunda belirgin bir rahatsızlık doğmuştur (Wu, H.J. ve ark., 2012). Sınırlı olan kaynakların giderek azalması ve bunun yanında bu sonlu kaynakların kullanımı sonucu ortaya çıkan karbon emisyonu çevreye geri döndürülemez etkilere sebep olmaktadır (GlobalComissionOnAdaptNow, 2019).

1.2) Karbon Emisyonunda Binaların Etkisi

Küresel ölçekte, konut ve ticari kullanım amaçlı binalar tüm elektriğin önemli bir kısmını tüketmektedir. Isıtma, soğutma, aydınlanma, ev aletleri ve bağlı cihazların kullanımı gibi sebeplerden ötürü binaların elektrik tüketimi yüksek seviyede ve artış eğilimindedir. Ayrıca binaların inşaat süreçleri de ciddi bir sera gazı emisyonuna neden olmaktadır. Dolayısıyla binalar doğrudan ve

dolaylı olarak yüksek düzeyde sera gazı emisyonuna sebep olmaktadır. Bununla beraber, binaların sebep olduğu sera gazı emisyonu temel yaşamsal faaliyetlerin bir sonucudur. İklim değişikliği ile mücadelede Net Sıfır hedeflerine ulaşmak için binalardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının minimuma indirilmesi önem taşır (BM İklim Eylemi, 2022).

Binaların emisyonları iki şekilde ölçülmektedir. Bunlardan ilki aydınlatma, ısıtma ve soğutma gibi günlük enerji kullanımı, ikincisi yapının inşası sırasında kullanılan malzemenin üretilmesi, nakliyesi ve şantiye süreci olarak belirtilmiştir (Global Status Report, 2018).

Mevcut yapıların karbon salınımları kontrol altına alınmadığı sürece 2040 yılında mevcut yapılardan salınan bu gazla Paris anlaşmasında hedeflenen 1.5 derecelik ısı artışı olağan şekilde gerçekleşmiş olacağı bildirilmiştir ve bu durumda ilk hedef mevcut binalardan sıfır emisyon elde etmek için girişimde bulunmak ikinci hedef ise inşa edilecek olan yapılar için (enerji verimliliğini artırmak, fosil yakıt kullanımını ortadan kaldırmak, tam yenilenebilir enerji kaynakları üretilip kullanma vd.) müdahalelerde bulunmaktır (Architecture 2030, 2023).

1.3) Karbon Salınımının Bina Süreçlerindeki Durumu

Binalarda yapı yaşam döngüsü, yapıyı oluşturacak her bir bileşenin hammadde aşamasından başlayarak, yapının üretim, kullanım ve yıkım evrelerini de içerecek şekilde tükettiği toplam enerjiyi analiz eder. Bu enerji için tüketilen doğal kaynakların bir sonucu olan çevresel etkileri somut bir şekilde ortaya koyar. Bu analiz sonucunda tasarım yenilenip ilgili analiz tekrarlanabilir, farklı alternatifler üretilip karşılaştırılabilir ve doğal çevreye en uygun seçenek belirlenebilir (Azkur,

2019). Yaşam döngüsü boyunca tüketilen enerji sonucunda çeşitli sera gazı salınımları olur.

Kyoto Protokolüne göre sera gazları, karbondioksit (CO₂), perflorokarbon (PFC'ler), nitroz oksit (N₂O), metan (CH₄), kükürt heksaflorür (SF₆) ve hidroflorokarbonlar (HFCS) olarak tanımlanmaktadır. Bu gazlardan hacimce küresel ısınma gazı emisyonlarının neredeyse %80'i karbondioksittir (CO₂)'dir (Sun, 2020). Binalarda karbon salınımı 3 grupta incelenir: Yaşam döngüsü karbonu, Operasyonel Karbon ve Gömülü Karbondur (Rodrigo, 2019).

1.4) Karbon Salınımına İlişkin Uluslararası Çalışmalar ve İş Birliği

İklim değişikliğinin kritik bir endişe kaynağı olduğunu kabul eden UNFCCC antlaşması, Brezilya'nın Rio de Janeiro kentindeki Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda (1992) kabul edildi. Haziran 1993'e kadar 166 ülke antlaşmayı imzaladı, ancak 21 Mart 1994'e kadar yürürlüğe girmedi. UNFCCC, ana hedefi "atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının iklim sistemine tehlikeli antropojenik müdahaleyi önleyecek düzeyde dengelenmesini başarmak" (UNFCCC Anlaşması, Madde 2) olan uluslararası bir çevre anlaşmasıdır. Temmuz 2022 itibarıyla, UNFCCC'nin BM üye devletleri dahil, Filistin ve Vatikan ile toplam 198 taraftarı vardır.

Kyoto protokolü, UNFCCC uluslararası anlaşmasının bir ekidir. Protokol, Aralık 1997'de Japonya'nın Kyoto kentinde kabul edildi ve 16 Şubat 2005'te yürürlüğe girdi. Protokol, 2008'den 2012'ye kadar olan ilk döneminde 36 ülke ve Avrupa Birliği için sera gazı emisyonlarının 1990 seviyelerinin yüzde 5,2 altına düşürülmesi çağrısında bulundu (URL-1). İklim değişikliğini ele almak için belirli hedefler de dahil olmak üzere somut bir eylem planı oluşturduğu için Kyoto Protokolü önemli bir başarıdır (Rowan, 2022). Protokol, raporlanan

Tablo 1. A. Moazzen ve ark.(2019) tarafından yapılan gömülü karbon ve gömülü enerjileri gösteren yapı malzemesi tablosu.

Bileşen	Malzeme katmanları (dışarıdan içeriye)	Isı iletkenlik (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Kalınlık (m)	Yoğunluk (kg.m ⁻³)	Alan (m ²)	GE (kWh.kg ⁻¹)	GK (kgCO ₂ .kg ⁻¹)	U-değeri (W.m ⁻² .K ⁻¹)
Dış duvar	Çimento	1.6	0.03	2000	3516.6	0.16	0.09	1.85
	Tuğla	0.72	0.19	1920		2.5	0.22	
	Alçı Siva	0.51	0.025	1200		0.56	0.12	
Bodrum kat Dış duvar	Çimento	1.6	0.03	2000	1025.8	0.16	0.09	1.43
	Su yalıtımı	0.19	0.002	1100		21.6	1.92	
	Tuğla	0.72	0.3	1920		2.5	0.22	
	Alçı Siva	0.51	0.025	1200		0.56	0.12	
Çati	Çimento şapı	1.4	0.04	2000	1573.1	0.44	0.18	3.43
	Betonarme	2.5	0.15	2400		0.55	0.2	
	Alçı Siva	0.51	0.025	1200		0.56	0.12	
Zemin kat	Beton	1.65	0.15	2200	1587.9	0.36	0.19	1.9
	Çimento şapı	1.4	0.04	2000		0.44	0.18	
	Seramik karolar	0.8	0.01	1700		0.79	0.46	
	Harç	0.88	0.03	2000		0.37	0.19	
Cam	Granit	2.8	0.02	2600	596.8	0.99	0.39	5.77
	6mm tek cam	0.9	0.006	2500		4.42	0.96	
	PVC çerçeve	0.17	0.06	1390	148	39.8	7.23	

hedeflerin raporlanması, titiz bir şekilde izlenmesi ve doğrulanması yoluyla UNFCCC'nin faaliyete geçmesinde fayda sağlamıştır.

Paris Anlaşması 12 Aralık 2015 tarihinde Cop21'de 196 tarafça kabul edilmiş ve 4 Kasım 2016'da yürürlüğe girmiştir (URL-2)(Paris Anlaşması Tam Metni, 2015). Anlaşma şu şekildedir:

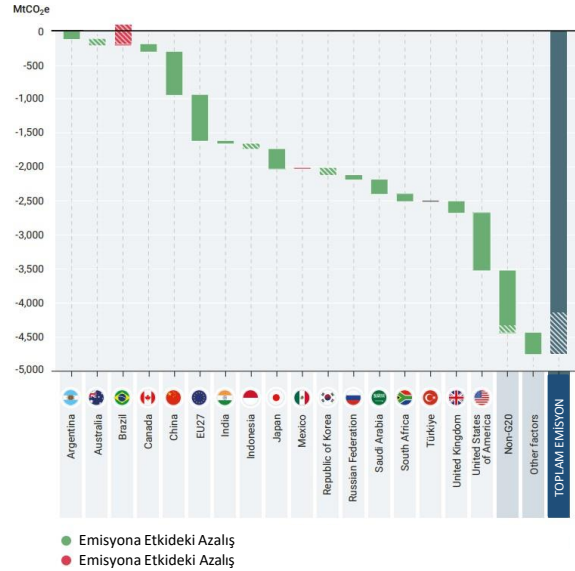
iklim değişikliğini ele alan önemli bir uluslararası anlaşma olarak görülmektedir, iklim değişikliğiyle yüzleşmek ve hafifletmek ve etkilerine uyum sağlamak için tüm ulusları tek bir şemsiye altına almaktadır. Dünya çapındaki tüm ülkelerin belirli bir konuda fikir birliğine varması açısından Paris'te dünya, insan davranışının iklim değişikliğini yönlendirdiği, çevre ve tüm insanlık için varoluşsal bir tehdit olduğu ve sorunu çözmek için küresel eyleme ihtiyaç duyulduğu konusunda topluca hemfikir olmuştur (Rowan, 2022). Paris Anlaşması ayrıca tüm ülkelerin doğrulanabilir emisyon azaltma hedefleri belirlemeleri ve bu eylemleri zaman içinde güçlendirmeleri için bir çerçeve oluşturmuştur. Paris Anlaşması uyarınca, her ülkenin emisyonların azaltılması ve olası sera gazı azaltımı için hedefler belirleyen bir INDC iklim eylem planı hazırlaması bekleniyor. Belli amaçlarla belli aralıklarla toplanan Paris İklim Anlaşmasına taraf ülkelerin INDC'leri açıkladığı ve ortak kararlar aldığı COP'lar (Conference of Parties)'dan COP21 Paris'te, COP24 Katovice'de COP26 Glasgow'da, COP27 ise SharmEl Sheik'te düzenledi.

Karbon emisyonuna ilişkin çalışmalar 1800'lerden bu yana, Sanayi Devrimi sonrasında, kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların tüketiminin yaygınlaşması ve çeşitlenmesi nedeniyle tartışılmaya başlanmıştır (BM İklim Eylemi, 2022), bu kapsamda yine Birleşmiş Milletler Çevre Programı, 2015 yılında düzenlenen 21. Taraflar Konferansı'nda (COP21) Binalar ve İnşaat için Küresel İttifak (Global Alliance for Buildings and Construction – Global ABC) isimli bir meta-platform kurmuştur.

GlobalABC, Paris Anlaşması'nda belirlenen iklim hedeflerine uyumlu olarak sıfır emisyonlu, verimli ve dirençli bir bina ve inşaat sektörü oluşturmayı hedefleyen uluslararası gönüllü ortaklık olarak birtakım çalışmalar yürütmektedir. 2016 yılından itibaren GlobalABC, yıllık Binalar ve İnşaat için Küresel Durum Raporu yayınlamaktadır. Yayımlanan son raporda küresel ölçekte inşaat ve binalar ve inşaat sektörünün 2050 yılına kadar karbonsuzlaştırmayı başarma yolunda olmadığı ifade edilmiş ve zorunlu bina enerji mevzuatlarının bir an evvel uygulamaya konulmasının aciliyeti vurgulanmıştır (BM İklim Eylemi, 2022).

3.1) INDC Raporları

Paris iklim anlaşması, küresel ısınmayı 2 santigrat derecenin oldukça altında tutmayı ve onu 1,5 santigrat derece ile sınırlamak için çabaların sürdürülmesini amaçlamaktadır. Bunu başarmak için ülkeler, 2020 sonrası iklim eylemlerini özetleyen gönüllü olarak hazırladıkları, amaçlanan Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkıları (INDC'leri) paylaşmaktadır. Mevcut INDC'lerin toplam sera gazı emisyonlarının azaltılması üzerindeki etkisini, bunun Paris iklim anlaşmasının sıcaklık hedefine ulaşma üzerindeki etkilerini ve başarıyı aşmak için potansiyel seçenekleri değerlendiren Rogelj (2016) INDC'lerin 2030 hedefinin emisyondaki azaltmayı sağlamak için çok önemli olduğu vurgulamaktadır ve mevcut politikaların bulunduğu yere kıyasla toplu olarak sera gazı emisyonlarını düşüreceğini, ancak yine de 2100 yılına kadar ortalama 2,6–3,1 santigrat derecelik bir ısınma kaydedileceğini belirtir.



Şekil 1. İlk INDC'lere göre yeni ve güncellenmiş INDC'lerin 2030'daki küresel sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi, (UNEP, 2022).

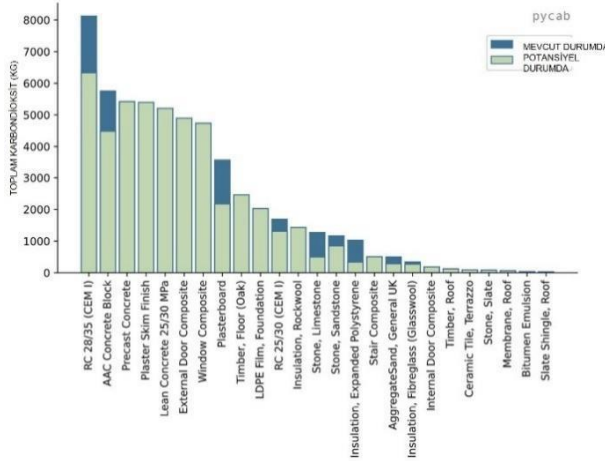
1.5) Operasyonel Karbon

Yaşam döngüsü evreleri(YDE) gömülü, yapım, kullanım ve yıkım enerjilerini içerir. Binada ve bileşenlerinde kullanılan tüm malzemelerin gömülü enerjisi hesaplandıktan sonra, yapım aşamasında harcanan enerji ve daha sonra kullanım aşamasında ihtiyaç duyulan enerji ile yıkım enerjisi de hesaba katılır. Mozazzen ve ark.'a (Moazzen, 2019) göre genel olarak kullanım süresinde tüketilen enerjinin, binaların YDE'sinin yaklaşık %80 – 90'ı kadar önemli bir paya sahip olduğu ve ardından gömülü enerjinin %10-20 oranında bir paya sahip olduğu, yıkım ve diğer işlemlerin enerjisinin ise az miktarda olduğu için ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

2. GÖMÜLÜ KARBONUN BİNA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNE ETKİSİ

Üretim, ulaşım ve imalat sürecinde kullanılan enerji gömülü enerji olarak adlandırılmaktadır. Moazzen ve ark. yapı bileşenlerinin ve gömülü enerji(GE) ve gömülü karbon(GK) dahil olmak üzere malzemelerinin birincil özelliklerini incelemiştir (Şekil 2). Geri dönüştürülmüş malzemeleri, karbonu tutan malzemeleri veya düşük karbonlu enerji kullanılarak üretilen ve işlenen malzemeleri seçmek ve nakliye emisyonlarını önlemek için yerel malzemeleri tedarik etmek, gömülü karbonu azaltmanın etkili yollarıdır (Ebrahimi, 2020).

Sektör uzmanlarının kullanabileceği bir model sunan Jones (2022) yaptığı vaka çalışmasına göre, yapı formunu sabit tutup yapı malzemelerini standart malzeme yerine daha düşük gömülü karbon değerli malzemelerle değiştirildiğinde kayda değer bir karbon tasarrufuna ulaşmıştır. En yüksek gömülü karbon etkisini beton muhtevası sebebiyle yapının altyapısı sonra üst yapısı oluşturur, üst yapıda ise en çok etki dış duvarlardadır (Jones, 2022).



Şekil 2. Jones'in vaka analizine göre yapı malzemelerinin mevcut ve potansiyel gömülü karbon miktarları (Jones, 2022).

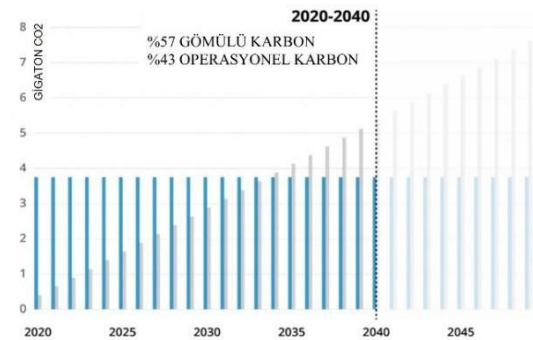
Bir binanın yaşam döngüsünün inşaat aşaması toplam karbondioksitinin %12,6'sını, işletme aşaması %84'ünü ve yıkım aşaması %2'sini üretir (Peng, 2016). BS EN 15978 (European Standards, 2023)'e göre, tüm yaşam düşüncesi, bir binanın ürün aşamasından (A1-A3, beşikten kapıya), inşaat süreci aşamasına (A4-A5, teslim) ve kullanım aşamasına (B1-B7) kadar tüm yaşam döngüsü aşamalarını dikkate almayı gerektirir. Gömülü enerji ve gömülü karbondioksit katsayılarının belirlenmesi için süreç analizi yöntemi dikkate alınır. Hammadde çıkarma seviyesinden başlayarak, üretim sürecinde "Beşikten kapıya" yaklaşımı temel alınır:

2.4.a) Beşikten Kapıya, hammadde çıkarma (beşik) aşamasından nihai işleme operasyonunun fabrika kapısına kadar olan karbon emisyonlarını ifade eder (SrinathP.veark, 2015). Basitçe madencilik, hammadde çıkarma, işleme ve üretimi içerir. Beşikten sahaya, üreticinin kapısı ile inşaat sahası arasındaki malzeme dağıtım sürecinde salınan karbon, beşikten kapıya aşamada ortaya çıkan karbon emisyonlarına eklenmelidir (Ibid.).

2.4.b) Beşikten Uca inşaat, şantiyede inşaatın sonuna kadar yayılan karbonu dikkate alır. Beşikten mezara, üretim, nakliye, inşaat, kullanım ve yıkım yoluyla malzeme çıkarma aşamasından yayılan karbonu ifade eder (SrinathP.veark, 2015).

2.4.c) Beşikten Beşiğe, yıkılan yapı malzemelerinin yeni bir inşaat faaliyeti için geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanılmasıyla ilgili karbon emisyonlarını ifade eder (SrinathP.veark, 2015).

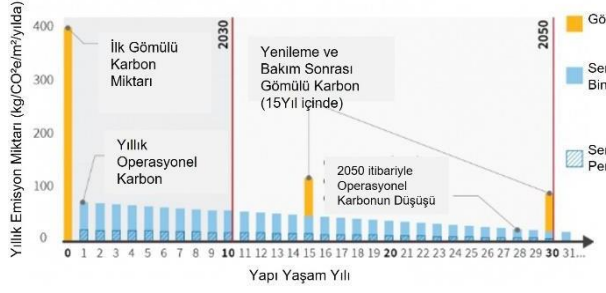
Karbon emisyonlarına ilişkin olarak 2002 yılında kurulmuş, kâr amacı gütmeyen bağımsız bir kuruluş (Architecture 2030, 2023) olan Architecture 2030'a göre 2040 yılında, küresel ısınmanın ulaşacağı boyutta en büyük pay karbona ait olacaktır. Bina üretiminde kullanılan tüketim enerjisi azaltılıp negatife indirilecek olsa bile gömülü enerji hakkında bir müdahale yapılmadığı takdirde bu enerji yapı inşası bittiği an bırakıldığı haliyle sabitlenmektedir. Sıfır emisyonla ulaşma noktasında gömülü karbon emisyonu göz ardı edilmemelidir. Mevcut binaların yenilenmesi, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması yapılması gerekenler arasındadır ve hammadde çıkarma seviyesinden başlayarak "beşikten beşik"e süreç analizi yapmak önem taşımaktadır.



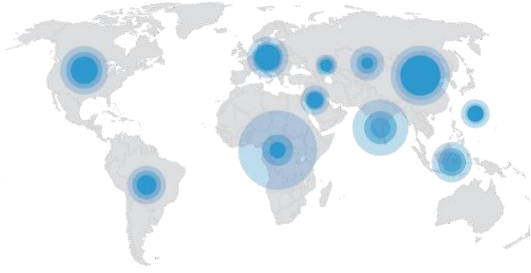
Şekil 3. Architecture 2030'a göre herhangi bir sektör müdahalesi olmaksızın yıllara göre gerçekleşecek olan toplam karbon emisyonları (Architecture 2030, 2023).

Architecture 2030 tarafından 2060 yılına kadar küresel bina taban alanının ikiye katlanması beklenmektedir. İnsanlık tarihindeki en büyük kentsel büyüme dalgasını karşılamak için, küresel bina stokuna 230 milyar m² yeni zemin alanı eklenmesi öngörülmektedir. Yeni inşaatlardan sıfır emisyon elde etmek, tesis içi fosil yakıt kullanmayan ve %100 tesis içi ve/veya tesis dışı yenilenebilir

enerji ile çalışan, enerji açısından verimli binalar gerektirecektir (Carbon Leadership Forum, 2023).



Şekil 4. 2050 yılına kadar şebekesel karbonizasyonun sıfıra indiğini varsayan, 2020-2050 yılları arasında yeni bir binanın gömülü ve operasyonel karbonunun görelî etkisi, (Carbon Leadership Forum, 2023).



Şekil 5. 2060 yılı beklenen zemin yerleşim alanlarının iki katına çıkışı, (Architecture 2030, 2023).

3. PROGRAMLAR, VERİ TABANLARI, YAZILIMLAR

Yapı malzemelerinin tüm yaşam döngüsü aşamalarını değerlendirmek için kapsamlı gömülü karbon verileri mevcuttur. Bazıları kullanıcılar tarafından erişilebilirken diğerleri tescillidir ve bu nedenle daha az şeffaftır. Farklı araçların neden farklı sonuçlar ürettiğini teşhis etmek zordur çünkü bazı temel veri tabanlarının bakımı düzenli olarak yapılmaz ve bunların veri kaynaklarının ve metodolojilerinin dokümantasyonu kolaylıkla elde edilemez. Tedarik zincirine özgü ve tesise özgü veriler ile şu anda pek çok veri tabanında eksik olan nakliye ve inşaat verileri için veri toplama ve raporlama yönergelerine de ihtiyaç vardır. Sağlam bir veri tabanı, güvenilir LCA analizlerinin bel kemiğidir. Veri standardizasyonu ve şeffaflık için yönergelere ihtiyaç vardır.

Sürdürülebilirliğin incelenmesi, bazı analiz yöntemleriyle yapılır. Yapı yaşam döngüsünün hammadde, üretim, tüketim, yıkımı, yeniden dönüşümü, nakliyesi aşamalarını barındıran LCA(Life Cycle Assessment) yöntemi, literatürdeki en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntem, bina ömrünün tamamını dikkate alır. Spesifik etki kategorileri, LCA sonuçlarını gösterir ve LCA'yı uygulamak için GaBi, ATHENA, Tally veya OneClickLCA gibi kullanılan bazı yaygın programlar vardır. Genel olarak bu analizlerin iki

uygulanması vardır, mevcut inşa edilmiş veya edilmeye hazır yapının sürdürülebilirliğinin tespiti ve/veya henüz ana kararları verilmeden ön tasarım aşamasında tasarımı yönlendirmek için yapılan analizler.

a) GaBi Veri tabanlı Tally Yazılımı

Tally, mimarların ve mühendislerin tüm bina analizi ve tasarım seçeneklerinin karşılaştırmalı analizleri için yapı malzemelerinin çevresel etkisini ölçmelerine olanak tanıyan bir eklentidir. EN 15978'e göre beşikten mezara aşamalarını kapsayan GaBi-6 da geliştirilen ISO14040-14044 standartlarına göre hazırlanmıştır (Tally, 2023).

Tally'nin çalışma şekli, bir BIM yazılımı olan Revit ile çalıştırılabilen bütünleşmiş bir LCA sürecini yürütmeye dayanır. Tally, kullanıcının çevresel ürün veri tabanındaki malzemeleri BIM yazılımına atamasına olanak tanır; böylece kullanıcı, malzeme seçimine karar verme sürecinde ürünlerin çevresel etki sonuçlarını görüntüleyebilir ve erken evrede değiştirme kararını verebilir. Tally (KTInnovations, 2014) ile Cradle-to gate sistem sınırı içinde tam bir bina LCA süreci yürütmek mümkündür.

b) OneClick LCA

BIM(Yapı Bilgi Modelleme) ve BEM(Bina Enerji Modeli) entegrasyonları ile LCA'yı otomatikleştirerek Revit eklentisi sayesinde anlık olarak güvenilir sonuçlar verir (One Click LCA, 2023). Veri tabanı olarak Kuzey Amerika EPD veri tabanı ile entegredir. Veri tabanı ISO 14025, 14040, 14044 ve EN 15804 veya ISO 21930'a uygundur ve en azından beşikten kapıya kadar tam bir kapsama sahipken, diğer aşamalar için de veriler içerir (North American construction materials LCA database, 2023). Köseci'nin belirttiği gibi (2018) OneClick LCA ile Tally'nin sonuç farklılıkları araçlarda benimsenen standartlara göre farklı metodolojik yaklaşımlardan kaynaklanmaktadır.

c) ICE Veri Tabanı:

Circular Ecology'den Craig Jones tarafından geliştirilen ICE veri tabanı, beşikten kapıya (cradle to gate) kapsamında yapı malzemelerinin gömülü karbon miktarları dahil birçok veriyi içerir. Bu, inşaat işlerinin/malzemelerinin sürdürülebilirlik değerlendirmesiyle ilgili EN 15978 ve EN 15804 standartlarında A1-A3 modülü olarak sınıflanmıştır (BS EN 15804, 2023).

ICE veri tabanı bir meta veri tabanıdır, veri noktaları hakkında meta verileri (veri üretkenlerle veriyi kullananlar arasında bir köprü) depolayan bir veri tabanıdır. Çeşitli yöntem ve aralıklardaki verileri içerir. Toplanan verilerin aralıkları ve metodolojik

tutarlılığı, karbon ayak izi standartlarıyla beraber son sürümü olan ICE DB V3.0 (2019) kullanıma açıktır, ücretsiz erişim imkânı sağlanmaktadır (Circular Ecology, 2023).

Yalnızca malzemelerin gömülü karbonunu tespit etmekle kalmayıp, malzemelere benzersiz kimlikler verir, malzemelerin alt malzemelerini de içerir. Mevcut istatistiksel analiz, ortalama gömülü karbon, tarih güncellemesi, tasarım kalite göstergesi, yaşam döngüsü notları, malzeme, beyan edilen birim miktarları, malzeme yoğunluğu (kg/m³), yoğunluk aralıkları, ötrofikasyon potansiyeli (suya karışan) azot fosfat miktarı) içerdiği verilerden bir kısmıdır. Agregat, asfalt, bitüm, çimento, seramik, toprak, kompozitler, beton, bakır, cam, boya, yalıtım, demir, kireç, kâğıt, sıva, plastikler, yapııştırıcılar, lastik, kil, çelik, kereste, taş malzemelerinin bilgileri ICE veri tabanına işlenmiştir. Bir inşaat projesindeki gömülü karbon miktarları oluşturulurken madenciler, imalatçılar, tedarikçiler, taşeronlar ve müteahhitler kilit rol oynarlar (Lu, K., 2019).

Tablo 2. ICE veri tabanından BIM yazılımına aktarılacak bazı veriler, (Circular Ecology, 2023).

Unique ID	Material	Sub-material	Weight per declared unit - kg	Density of material - kg per m ³	Embodied Carbon (kg CO ₂ e per declared unit)	Embodied Carbon per kg (kg CO ₂ e per kg) /KM
e489e44-79e7-42bd-a517-f603097ef5e4-6a4d70f8-b506-4e75-818f-7b88ded5e0ba	Concrete	Concrete, General	2380	2380	246	0,103361345
1ee25bd1-c5d3-44de-8980-2587ac5c0383-1a33ac10-a2af-40aa-b297-191a07522a92-43a98680-edf8-4fd2-8246-58aef5a0cdba	Concrete	Concrete, GEN 0	2370	2370	166,9362286	0,070437227
375da000-6022-4dc1-95ba-e16d8a9a824b-acfc738b-2342-4a26-9072-26c731b9ee5e	Concrete	Concrete, GEN 1	2370	2370	230,347152	0,097192891
	Concrete	Concrete, GEN 2	2370	2370	248,7541353	0,104959551
	Concrete	Concrete, GEN 3	2370	2370	267,0134028	0,112663883
	Concrete	Concrete, 20/25	2400	2400	290,2277023	0,120928209
	Concrete	Concrete, 25/30	2400	2400	308,5726393	0,128571933

Mevcut durumda bu veri tabanı kullanıcıları, aynı zamanda tasarım yapan projeci veya projedeki gömülü karbonu görmek isteyen kişinin izleyeceği adımlar şunlardır: Proje oluşturulur, malzemelerin metrajı çıkarılır, her bir malzeme için ICE veri tabanındaki birim miktara göre bildirilen gömülü karbondioksit verisi kontrol edilerek metrajla işlenir. Sonrasında metrajla işlenen karbondioksitle birim cinsi m³ olanlar için m³'le, kg olanlar için kg'la çarpılarak her bir malzemenin gömülü karbonu bulunur. Bunların tamamının toplamı alınarak 1-3 aşamalarındaki beşikten kapıya diye adlandırılan süreçteki toplam gömülü karbon miktarına ulaşılır.

Azkur (2019) da ICE veri tabanını kullanarak taşıyıcı sistem seçiminin gömülü enerjinin en yüksek olduğu betonarme yerine çelik ve ahşap malzeme tercih ederek, mevcut müstakil bir konut yapısının yalnızca taşıyıcı sistemini değiştirildiği varsayılarak gömülü enerji miktarında kayda değer bir azalma tespit etmiştir.

Veld (2023), ICE veri tabanını kullanarak bu geleneksel yolla yapılan metraj alma işlemini BIM'e uyarlamış, geleneksel yöntemle göre çok daha hızlı ve doğru biçimde sonuçlar almak için bir Revit programı eklentisi oluşturmuştur. Bu eklenti Revit içinde çalışır ve kullanılan malzemelere göre anlık olarak gömülü karbon miktarını, toplam karbon miktarını farklı bir işlem yapmaya gerek kalmaksızın gösterir. Burada hesaplanan karbon miktarı için doğruluk payı tartışmalıdır çünkü gömülü karbon miktarı belirlenirken hesaba katılan salınan karbon, malzemenin üretim yerinden sahaya getirilmesine kadarki nakliyesinde tüketilen enerjiye göre ortalama bir değer verir. Bunun için en doğru bilgiye ulaşmak adına verilerin projeye göre güncellenmesi gerekir. David Veld'in Carbon Life Calculator eklentisi Autodesk AppStore'undan (Autodesk, 2023) indirilip Revit'le anlık olarak çalıştırılabilir.

Geleneksel yöntemle yapılan bir gömülü karbon hesabında sonuca ulaşmak hem zahmetli ve vakit alıcıdır. Bunun yanında ICE veri tabanı kullanılarak yapılan, yapının yalnızca bir ögesi değiştirilerek yapılan gömülü karbon değişim miktarları sonuç ürüne bakıldığı zaman yeterli olmadığından hem ICE veri tabanı kullanılarak hem de BIM sistematığı kullanılarak yapılacak olan bir çalışmanın sonuçları doğruluk payını daha yukarıya çekecek, üstelik yeni bir model oluşturacaktır.

4. UYGULAMA ÖRNEĞİ

Yöntem : Bu çalışma, yapı sektöründe karbon ayak izini azaltmaya yönelik bir vaka çalışması üzerine odaklanmaktadır. Çalışmanın metodolojisi, dört ana adımdan oluşmaktadır. İlk adım, bir bina bilgi modelleme (BIM) yazılımını kullanılarak üç boyutlu (3B) bir veri modelinin oluşturulması sürecini içermektedir. Bu aşamada, bina veya yapı için gerekli olan mimari, yapısal ve sistemsel verilerin entegrasyonu yapılarak kapsamlı bir 3B model elde edilir.

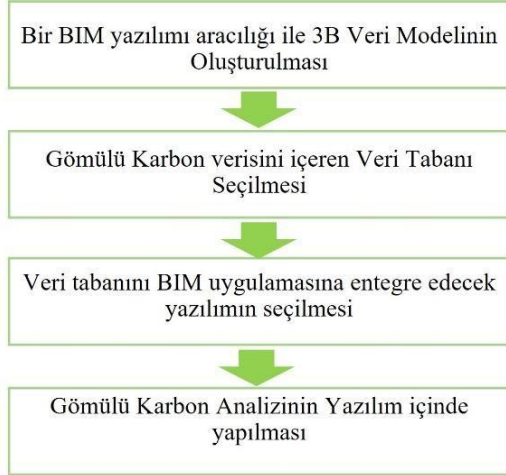
İkinci adım, gömülü karbon verilerini içeren uygun bir veri tabanının seçilmesini kapsar. Bu veri tabanı, yapı malzemelerinin ve süreçlerinin karbon emisyonlarıyla ilgili detaylı bilgileri içerir. Seçilen veri tabanı, çevresel etkileri değerlendirmek ve gömülü karbon izleme analizlerini gerçekleştirmek için gerekli verilere erişim sağlar.

Üçüncü adımda, BIM uygulamasına entegre edilecek yazılımın seçilmesi yer alır. Bu yazılım, seçilen veri tabanındaki gömülü karbon verilerini BIM modeline aktarabilmeyi ve entegrasyonu sağlayarak veri akışını kolaylaştırır.

Son adım olarak, gömülü karbon analizi bu entegre yazılım içinde gerçekleştirilir. BIM modeli ile veri tabanı arasındaki entegrasyon sayesinde, yapı

malzemelerinin karbon izlerinin analiz edilmesi, çeşitli senaryoların simülasyonu ve çevresel performansın değerlendirilmesi mümkün olur. Bu adım, yapı sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik karar alma süreçlerini desteklemeyi amaçlar.

Bu yöntemle, yapı sektöründe sürdürülebilirlik ve gömülü karbon azaltımı konularında karar vericilere, tasarımcılara ve uygulayıcılara örnek bir vaka analizi çalışmasının analiz süreci sunulmaktadır.

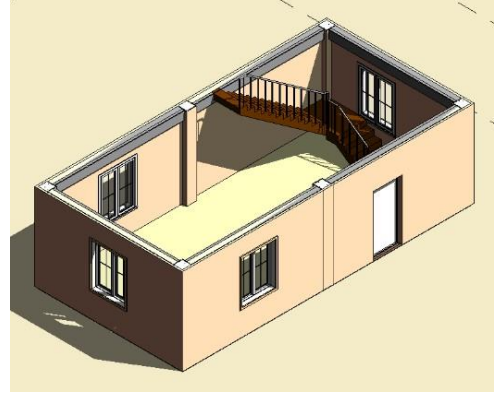


Şekil 6. BIM Yazılımında gömülü karbon miktarı hesabında kullanılan çalışma modelinin akış diyagramı.

4.1) Modelin Oluşturulması

Bir BIM yazılımı olarak Autodesk Revit 2021 seçildi. Sürüm seçilirken karbon analizi yapılacak yazılım olan Tally'nin uyumluluk taşıması göz önünde tutuldu. Revit yazılımında (5x10)m büyüklüğünde iki katlı bir geleneksel konut yapısının ilk katı hesaplamaya dahil edilmek üzere model üretildi. İkinci opsiyon olarak aynı alanı kaplayacak şekilde büyüklüğü aynı olan fakat formu farklı olan 7.07m²lik kare formu oluşturuldu. BIM yazılımında model oluşturulurken her iki modelde malzeme katmanları, yükseklikler, malzeme türleri, yapının oturma alanı sabit tutularak yalnızca formu değiştirilmek amaçlandı.

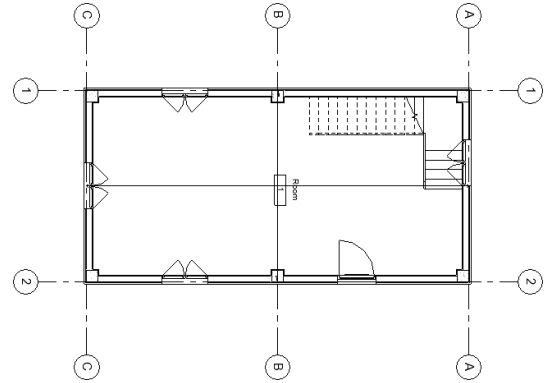
Projede duvarlar, temel, döşeme, merdiven, pencereler ve kapı modele dahil edildi. Çalışmanın konusu olan gömülü karbon analizinde duvarlar hesaba katılmıştır çünkü araştırmacılara göre karbon etkisi en çok betondadır ve üst yapı için ise en çok karbon etkisi dış duvarlardadır (Azkur, 2019), (Jones, 2022).



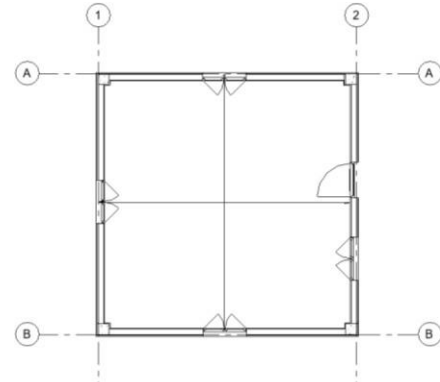
Şekil 7. BIM yazılımında üretilen 3B modelin görünümü.



Şekil 8. BIM yazılımında üretilen ikinci modelin 3B modelin görünümü.



Şekil 9. BIM yazılımında üretilen dikdörtgen formlu modelin planı (10m x 5m).



Şekil 10. BIM yazılımında üretilen kare formlu modelin planı (7.07m x 7.07m).

4.2) Veri Tabanı Seçilmesi

Sphera Ürün Sürdürülebilirliği (GaBi) veri tabanları, yüksek doğruluğa sahip endüstri verilerine dayanan, kapsamlı Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) veri tabanlarıdır, her yıl güncellenen 15.000'den fazla veri seti ve yaklaşık 20 güncel veri tabanını içinde barındırır, Çevresel Ürün Beyanlarından (EPD) karbon nötrlük yol haritalarına kadar değişen yaşam döngüsü tabanlı karar desteği için bir temel sağlamaktadır, GaBi ayrıca ihtiyaç duyulan verinin talebi haline veri tabanına eklemeler yapabilmektedir (Sphera, 2023). Karbon çalışması yapacak olan tasarımcı, proje danışmanı gibi uzmanlar için ön tasarımda ve ileriki aşamalarda esnek kullanılması imkanından ötürü ve kullanıcı talebi doğrultusunda veri genişletme imkânı sunmasıyla Gabi veri tabanı bu çalışma için uygun görülmüştür.

4.3) Veri Tabanını BIM Uygulamasına Aktaran Yazılımın Seçilmesi

Yapı malzemelerinin çevresel etkisini ölçmek için geliştirilen Tally gibi karbon ölçümüne odaklanan yazılım araçları, açık kaynak dosyaları yerine BIM yazılımlarında eklenti olarak çalıştırılır. Maksimum karbon tasarrufu için IFC açık kaynak dosyalarının kullanımı faydalıdır. Bir BIM aracına güvenmek, başlangıçtaki maddi karbon etkilerini minimum maliyetle azaltmak isteyen kullanıcılar için bir sınırlama getirirse de (Jones, 2022) BIM ile entegrasyon konusunda etkinliğinden ötürü bu çalışmada Tally programı tercih edilmiştir.

4.4) Gömülü Karbon Tespiti

Revit yazılımında Tally uygulaması çalıştırılarak, projede üretilen yapı elemanlarından duvarlar için karbon salınımını içeren bir tablo oluşturuldu. Uygulama içinde karbon miktarı gömülü karbon olarak ayrı bir başlık yerine A1-A3 aşaması olan ‘‘beşikten kapıya’’ olarak belirtilmiştir. Yazılım, oluşturulan 3B model üzerinde malzemelerin kütlelerini, boyutlarını, gömülü karbon katsayılarını tanıyarak işlem yaptığı için analizi yapılacak olan modelde kullanılan yapı malzemelerinin yazılımın kendi veri tabanından tanıyabileceği biçimde tanıtılması önemli bir adımdır. Nakliye aşamasında tüketilen enerjinin belirlenmesi için yazılım için her bir yapı malzemesinin üretim yerinden yapı sahasına olan mesafeyi bir girdi olarak alır, nakliye aşamasındaki karbon salınımı bu yolla tespit edilmektedir. Yapı malzemelerinin ortalama ömrü belirtilerek, bakım ve onarım için gerekli karbon harcamaları da hesaba katılmıştır. Mümkünse geri dönüşümü yapılacak malzemelerin geri dönüşüm enerjileri toplam gömülü karbon hesabına dahil edilmiştir.

Tablo 3. Dikdörtgen Formla oluşturulan modelin yaşam döngüsü aşamalarına göre karbon emisyonları.

Yaşam Döngüsü Aşaması	Küresel Isınma Potansiyeli Toplamı (kgCO ₂ eq)
[A1-A3] Üretim	8292,93415
[A4] Nakliye	50,43739
[B2-B5] Bakım-Onarım	402,95553
[C2-C4] Yaşam Sonu	614,68374
[D] Geri Dönüşüm	17,48047
Genel Toplam	9378,49129

Tablo 4. Kare Formla oluşturulan modelin yaşam döngüsü aşamalarına göre karbon emisyonları.

Yaşam Döngüsü Aşaması	Küresel Isınma Potansiyeli Toplamı (kgCO ₂ eq)
[A1-A3] Üretim	7310,14243
[A4] Nakliye	60,65772
[B2-B5] Bakım-Onarım	376,0116
[C2-C4] Yaşam Sonu	546,39461
[D] Geri Dönüşüm	15,19262
Genel Toplam	8308,39898

Yukarıdaki tablolarda gösterilen yaşam döngüsü aşamalarının her bir aşamasında salınan karbondioksit miktarına bakıldığında, duvar yapı malzemesi toplam yaşam gömülü karbonunun %88’ini üretim ve nakliye aşamasında tüketmektedir. Gömülü karbonun en yüksek olduğu aşama üretim aşamasıdır.

Modellenen aynı hacme sahip yapı birimlerinden kare formu ve dikdörtgen formu yapıların gömülü karbon salınımlarına bakıldığında plan düzleminde alan sabit kalsa da yüzey alanı artışı sebebiyle dikdörtgen formu yapının karbon salınımının daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5. Dikdörtgen Formla oluşturulan modelin duvar yapısı malzemelerinin gömülü karbon miktarları.

	Küresel Isınma Potansiyeli Toplamı (kgCO₂eq)	Toplam Kütle (kg)
Duvarlar	9378,49129	25235,73289
Tuğla	5748,05204	18545,57316
Isı Yalıtımı	142,92444	95,64815
Sıva	477,20345	1570,04774
Boya	483,54664	242,46762
Çimento	2526,76472	4781,99622
Genel Toplam	9378,49129	25235,73289

Tablo 6. Kare Formla oluşturulan modelin duvar yapısı malzemelerinin gömülü karbon miktarları.

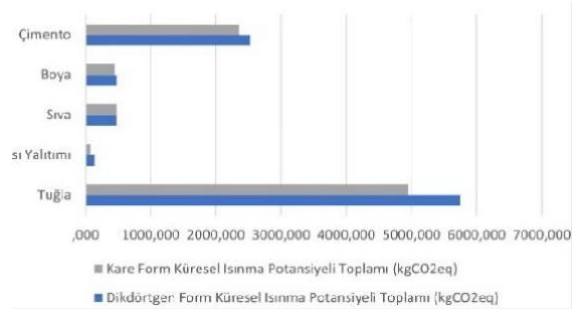
	Küresel Isınma Potansiyeli Toplamı (kgCO₂eq)	Kütle Toplamı (kg)
Duvarlar	8308,39898	22222,1894
Tuğla	4944,33013	15952,43668
Isı Yalıtımı	75,92315	50,80942
Sıva	479,12115	1530,44413
Boya	451,21392	226,25484
Çimento	2357,81064	4462,24434
Genel Toplam	8308,39898	22222,1894

Yukarıda gösterilen tablolarda BIM yazılımıyla üretilen 3B modeldeki duvar yapı elemanını oluşturan malzemeler listelenmiştir. Duvar yapı malzemesinin alt elemanlarına bakıldığında kare ve dikdörtgen form fark etmeksizin en yüksek karbon emisyonu değerini sırasıyla tuğla ve çimento taşımaktadır. Gömülü karbonun en yüksek olduğu elemanlar sırasıyla tuğla, çimento, sıva, boya ve ısı yalıtımıdır. Tercih edilen tuğla malzemesi kullanımı yaygın bir inşaat malzemesi olduğu için seçilmiştir.

Modellenen aynı hacme sahip yapı birimlerinden kare formu ve dikdörtgen formu yapıların gömülü karbon salınımlarına bakıldığında plan düzleminde alan sabit kalsa da yüzey alanı artışı sebebiyle dikdörtgen formu yapının karbon salınımlarının daha fazla olduğu gözlenmiştir. Karbon salınımlarındaki artış ile kütlelerdeki artışların arasındaki pozitif ilişki görülmektedir.

6. SONUÇ

Beşikten-kapıya yaklaşımı ile ürünlerin hammadde çıkarılıp sahaya getirilmesine kadar olan süreci temsil eden gömülü karbon miktarının doğruluğunu tartışılabilir çünkü söz konusu modellerde ürünlerin gömülü karbon miktarları muadil bir örnekle temsil edilmektedir. Örneğin form değişkenli BIM modeli üzerinde yapılan vaka çalışmasında, nakliye aşamasında tüketilen enerji 5 km'lik bir saha mesafesi seçilerek uygulama modelleri oluşturulmuştur. Duvar elemanının yapı malzemelerinden tuğla için kullanılan ürünün üreticiden ilgili veri bulunmadığından ilgili en doğru veriye erişim sağlanamamıştır ve malzemeye karşılık gelen ürün Tally kütüphanesinden seçilerek kullanılmıştır. Zabalza Bribián ve ark. (2011), kesin malzeme verilerini uygulamak yerine aynı malzemeye karşılık gelebilecek malzemenin veri tabanını uygulamak sonuçların doğruluğunu azaltacağını belirtse de nakliye mesafesi arttıkça karbon emisyonunun aynı oranda artacağı bilinmelidir.



Şekil 11. Forma Göre Değişen Gömülü Karbon Miktarları.

Gömülü karbonun Gömülü karbon miktarında maksimum karbon tasarrufu yapılmadığı takdirde, karbon miktarı duvar elemanı inşa edildikten sonra değiştirilemez ve sistem içine gömülüp yapının toplam karbon emisyonundaki payına müdahale edilemez bir ögesi konumunda kalır. Formun gömülü karbon emisyonundaki payını görmek amacıyla yapılan vaka çalışmasında formun gömülü karbona etkisi doğrudan gözlenmiştir. Malzeme çeşitleri, hacim ve yapının kapladığı alan sabit tutularak yalnızca yapılan form değişikliği ile %12,2'lik bir gömülü karbon tasarrufu sağlanmıştır. Jones(2022)'e göre binalar kategorisinde üstyapıda en çok karbon emisyonu yapan elemanı duvarlardır. İlk tasarım aşamasından itibaren çalışılan yapı formu konusunda belirleyici bir etken olarak gömülü karbon analizi yapılması karbondan tasarruf etmek için önemlidir.

7.KAYNAKLAR

Architecture 2030. (2023). URL:

<https://architecture2030.org/our-mission/#top>
(Erişim Tarihi: 03.02.2023) .

Architecture 2030, 2023 URL:

https://architecture2030.org/2030_challenges/embo_died/
(Erişim Tarihi: 03.02.2023).

Autodesk. (2023). *Tally Eklentisi.*

<https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=5134144936403749174&appLang=en&os=Win64>
(Erişim Tarihi: 03.02.2023)

Azkur, H. V. (2019). *Farklı Taşıyıcı Sistemlerin Gömülü Enerji ve Gömülü Karbon Değerlerinin Müstakil Konutlar Bağlamında Karşılaştırılması.*

BM İklim Eylemi. (2022). *Causes and Effects of Climate Change (İklim Değişikliğinin Sebepleri ve Etkileri).*

BM İklim Eylemi. (2022). *Net Zero (Net Sıfır).*

BM İklim Eylemi. (2022). *What Is Climate Change.*

BS EN 15804. (2023, 01 20). European Standards: https://www.en-standard.eu/bs-en-15804-2012-a1-2013-sustainability-of-construction-works-environmental-product-declarations-core-rules-for-the-product-category-of-construction-products/?gclid=Cj0KCQiA-JacBhC0ARIsAIxybyOmUBfjNXmw54Mh24i71YguS3c_9YRkiMrf_ (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

Carbon Leadership Forum. (2023). *Embodied Carbon 101.* Carbon Leadership Forum: <https://carbonleadershipforum.org/fr/carbone-incorpore-101/> (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

Circular Ecology. (2023). *ICE Veri Tabanı.* <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html> .

Ebrahimi, G. (2020). *Embodied carbon and deep retrofits.*

Enerji Verimliliği. (2023, 01 20). Wikipedia: https://tr.wikipedia.org/wiki/Enerji_verimliliği (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

Global Status Report. (2018). <https://globalabc.org/resources/publications/2018-global-status-report-launch-communications-toolkit> (Erişim Tarihi: 03.02.2023)

GlobalComissionOnAdaptNow. (2019). *Global Commission on Adapt Now: A Global Call For Leadership on Climate Resilience.*

IPCC. (2021). Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jones, B. I. (2022). *IFC-based embodied carbon benchmarking for early design analysis.*

Köseci, F.C. (2018). *Integrated Life Cycle Assessment (Lca) To Building Information Modelling (Bim) Interoperability In The Bim- Based Lca Processes And Analysis Of Bim-Based Lca Results And Tools (Bim Tabanlı Lca Süreçlerinde Bina Bilgisi Modellemesi).*

Lu, K. (2019). *Development of a carbon emissions analysis framework using building information modeling and life cycle assessment for the construction of hospital projects.*

Moazzen, N. K. (2019). *Assessment of the Life Cycle Energy Efficiency of a Primary School Building in Turkey.*

North American construction materials LCA database, One Click LCA: <https://www.oneclicklca.com/leed-users-north-american-construction-materials-lca-database-traci/> (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

Onat, N. (2018.). *Türkiye inşaat sektörünün global karbon ayak izi analizi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2, 529-545.*

Onat, N.C. and Kucukvar, M. 2020. *Carbon Footprint Of Construction Industry: A Global Review And Supply Chain Analysis. Renew. Sust.Energ. Rev.* (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

One Click LCA. Autodesk App Store :<https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=3065869958781255107&appLang=en&os=Win64> (Erişim Tarihi: 03.02.2023)

Peng, C. (2016). *Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling.*

Rode, B. G. (2011). *“Buildings: Investing in Energy and Resource Efficiency”.*

Rodrigo, M. P. (2019). *Conceptual Model on Estimating Embodied Carbon in Construction Supply Chains using Value Chain and Blockchain.*

Rogelj, J. (2016). *Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °.*

Rowan, A. (2022). *COP27, Can We Move Forward.*

SrinathP.veark. (2015). *Cost Studies of Buildings.*

Sun, H. V. (2020). *CO2 Emission Calculation Method during Construction Process for Developing BIM-Based Performance Evaluation System.*

Tally. Autodesk App Store:
<https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=3841858388457011756> (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

UNEP. (2022). *Emissions Gap Report.*

URL-1.:
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

URL-2:
https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10_9r01.pdf (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

US Member States. (2012). *Report of the United Nations Conference on Sustainable Development. n.d.*

Wu, H.J. ve ark. (2012). *Life Cycle Energy Consumption And CO2 Emission Of An Office Building In China. Int. J. Life Cycle Assess.*

Zabalza, I. Ve ark. (2011). *Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines.*

European Standards, URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-15978-2011-sustainability-of-construction-works-assessment-of-environmental-performance-of-buildings-calculation-method/> (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

David Veld, Carbon Life Calculator Programı,
URL: <https://www.davidveld.nl/carbocalc.php> (Erişim Tarihi: 03.02.2023).

Sphera, URL: <https://sphera.com/product-sustainability-data/> (Erişim Tarihi: 03.02.2023).