



**Makale / Research Paper**

**Hafif Çelik ve Ahşap Duvar Konstrüksiyonlarının Gömülü Karbon Değerinin Belirlenmesi**

Merve TUNA KAYILI<sup>1\*</sup>, Sema Tuba ÖZMEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Karabük/TÜRKİYE

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Karabük/TÜRKİYE

\*mervetunakayili@karabuk.edu.tr

Received/Geliş: 07.02.2020

Accepted/Kabul: 02.04.2020

**Öz:** Yapı üretim sürecinde kaynak verimliliği sağlanabilmesi ve çevre kirliliğinin önüne geçilebilmesi için ekonomik, doğal, sağlıklı, doğru, düşük oluşum enerjisi ve düşük gömülü karbon değerine sahip malzeme seçimi sürdürülebilir mimarlık kapsamında oldukça önemlidir. Üretim sürecinde çelik ve alüminyum gibi yüksek oluşum enerjisine sahip ürünler, buna bağlı olarak yüksek gömülü karbon değerine sahip olmaktadır. Yapıyı oluşturan yapı elemanlarının tasarımı zaman içinde değişmiş, depreme dayanıklı, hafif ve hızlı üretim imkânı sağlayan hafif iskelet sistemli duvar konstrüksiyonlarını öne çıkarmıştır. Hafif ahşap ve çelik iskelet sistemler birbirine taşıyıcı kurgusu ve düzenleme olarak benzeseler de, çevresel performans açısından büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Bu bağlamda, Ankara’da üretimi varsayılan aynı ısı geçirgenlik katsayısı, alan ve hacme sahip hafif ahşap ve çelik duvar konstrüksiyonlarının gömülü karbon değerleri belirlenmiştir. Ayrıca bu konstrüksiyonlarda kullanılacak farklı doğrama çeşitlerine sahip pencerenin, oluşturulan konstrüksiyonların gömülü karbon değerlerine etkisini belirlemek amacıyla ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı pencere konstrüksiyonlara entegre edilmiş ve ayrı ayrı gömülü karbon değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre, çelik malzemenin tasarlanan duvar konstrüksiyonu içerisinde düşük alan ve hacme sahip olmasına rağmen en fazla gömülü karbon yüküne sahip olduğu tespit edilmiş, yapıda hafif çelik duvar konstrüksiyonlarının yaşam ömrünü doldurması sonrasında mutlaka yeniden kullanımı veya geri dönüşüm yöntemleri ile karbon salımlarının azaltılabileceği önerilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Gömülü karbon değeri; ahşap konstrüksiyon; çelik konstrüksiyon, PVC, alüminyum

**Determining of the Embodied Carbon of Light Gauge Steel and Wood Wall Construction**

**Abstract:** In order to provide resources efficiency and prevent environmental pollution during the building production process, the selection of materials with economical, natural, healthy, proper, low embodied energy and low embodied carbon value is very important within the scope of sustainable architecture. Materials which have high embodied energy during their production such as steel and aluminum also have high embodied carbon. The design of the building elements that make up the building has changed over time, it emphasized light gauge skeleton system wall constructions that provide earthquake-resistant, lightweight and fast production. Although they resemble each other as light wooden and light gauge steel systems, they can differ greatly in terms of environmental performance. In this context; embodied carbon values of light wood and steel wall construction with the same heat transfer coefficient, area and volume assumed to be produced in Ankara were determined. Also, in order to determine the effect of the window having different frame types to be used in these constructions, wood, PVC and aluminum frame windows were integrated into the constructions and the embodied carbon values were calculated separately. According to the obtained data, it was found that steel material has a high embodied carbon even it has low area and volume in the wall construction and it has been suggested that after the lifetime of light gauge steel wall systems in the constructions, the carbon emissions can be reduced by reuse or recycling methods.

**Keywords:** Embodied CO<sub>2</sub>e; light wood construction; light gauge steel construction; PVC, aluminium

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Kayılı, M. T., Özmen, S. T., "Hafif Çelik ve Ahşap Duvar Konstrüksiyonlarının Gömülü Karbon Değerinin Belirlenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (2); 603-618.

*How to cite this article*

Kayılı, M. T., Özmen, S. T., "Determining of the Embodied Carbon of Light Gauge Steel and Wood Wall Construction" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (2); 603-618.

## 1. Giriş

Yeryüzünden çıkarılan kaynakların yaklaşık %50'si yapı sektörü tarafından kullanılmaktadır [1]. Sürdürülebilirlik düzeyinin üzerinde gerçekleşen bu tüketim nedeniyle yapı çevreden kaynaklanan çevresel sorunlara etki eden etkenler arasında, yapıda kullanılan ürünlerinin rolü büyüktür. Yaşamları boyunca çevre ile etkileşimleri olan yapı ürünleri çevreye büyük hasarlar verebilmekte, büyük çevre sorunlarının kaynağını oluşturabilmektedir [2,3].

Yapı ürünlerinin üretilmesi için gereken enerji olarak tanımlanabilen ‐oluşum enerjisi‐ çelik, plastik, kurşun ve çinko için çok yüksektir [4,5]. Enerji üretimi için seçilen kaynakların yenilenemeyen fosil yakıtlar olması doğrudan karbondioksit ve sera gazı salımına neden olacağından üretimde kullanılan enerjinin türü, ürünün çevresel niteliğini belirlemektedir. Bu bağlamda oluşum enerjisi doğaya salınan karbon miktarıyla doğru orantılıdır. Oluşum enerjisiyle direkt olarak bağlantılı olan gömülü karbon değeri, oluşum enerjisinin yüksek ve düşük olmasına paralel olarak [6], yapı ürünlerinin üretimi sırasında açığa çıkan karbon değeri olarak tanımlanabilmektedir. Oluşum enerjisinin ve buna bağlı olarak gömülü karbon değerinin yüksek olması sera gazı oluşumuyla küresel ısınmaya neden olmaktadır [7]. Sera gazların uzun ömürlü olması, salınan gazların azaltılmamasının çevreye yönelik etkilerinin ne kadar uzun sürebileceğini göstermektedir. Örneğin karbondioksit gazının yüz yıllık süreçte atmosferik yaşam ömrü 50-200 yıl arasında değişirken [8] bu gaz küresel ısınmaya %50 oranında etki etmektedir. IPCC (2007)' ye göre 2005'te Birleşik Devletler'de fosil yakıtların kullanılmasıyla %94 oranında CO<sub>2</sub> salımı yapıldığı ve bunun özellikle demir ve çelik üretiminden kaynaklandığı belirtilmiştir.

UKMO/DETR (United Kingdom Meteorological Office and Department of the Environment, Transport and the Regions)'in 1999 yılında Türkiye için yapmış olduğu araştırma raporuna göre, salımlar kontrol altına alınmazsa, 2080'li yıllara kadar Türkiye üzerindeki yıllık ortalama sıcaklıklarda (1961-1990 normaliyle karşılaştırıldığında) yaklaşık olarak 3-4 C° artış olacağı öngörülmektedir [9]. Bu bağlamda, büyük karbon salımlarından sorumlu tutulan inşaat sektöründe, yapı tasarım sürecinde kullanılacak malzemelerin düşük oluşum enerjisi ve gömülü karbon değerine sahip olması, üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı ve birincil hammadde kullanımının yerine ikincil geri dönüştürülmüş ürünlerden oluşması önem arz etmektedir [2,10]. Bu şekilde yapı çevrenin malzeme seçiminden kaynaklanan olumsuz etkisi en aza indirilebilecektir.

Yapıyı oluşturan malzemeler günümüzde büyük oranda çelik, plastik ve alüminyum gibi malzemelerden seçilmektedir. Oysaki bu malzemeler, uzun oluşum süreçleri nedeniyle yüksek oluşum enerjisine ve gömülü karbon değerlerine sahiptir [11,12]. Öyle ki; 1 ton çelik üretimi için 2 ton CO<sub>2</sub> salınırken, alüminyum doğramaların oluşum enerjisi, ahşap doğramaların oluşum enerjisinin yaklaşık 50 katıdır. Çelik kirişin üretiminde harcanan enerji, aynı ebatları ahşap bir kirişe göre 10 kat daha fazladır. Beton üretiminde kullanılan 1 ton çimento üretiminde atmosfere yaklaşık 240 gr kükürt dioksit ve 6 kilogramdan fazla azot oksit gazı salınmaktadır [13]. Ayrıca Nielsen (2008), 1 kilogram portland klinkerinin atmosfere neredeyse 1 kg CO<sub>2</sub> saldığını belirtmiştir [14]. Yapılan çalışmalar; beton, alüminyum ve çeliğin üretiminde harcanan enerji ve atmosfere salınan karbondioksit oranının ahşap malzemeye kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir [15]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde [16-21,12] ahşap, çelik ve betonun oluşum enerjisine yönelik üretim sürecinden kaynaklanan farklı değerlere rastlanmakla birlikte, çelik malzemenin ahşap malzemeye göre daha fazla oluşum enerjisine sahip olduğu görülmektedir (Tablo 1). Son on yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde; malzemelerin oluşum enerjisinin ve gömülü karbon değerlerinin binaların yaşam döngüsü değerlendirmesi sonucunda belirlenen çevresel etkisinin önemli bir bölümünü oluşturduğunu göstermiştir [22-24].

Türkiye'de yapı elemanlarını oluşturan malzemeler incelendiğinde, çeliğin diğer yapı malzemelerine göre güçlü mekanik ve strüktürel özelliklere sahip olmasına ve esnek tasarımlara

imkân vermesine rağmen, hafif çelik yapı sistemi olarak konutlarda kullanımını %0.5 olarak belirtilmektedir.

Tablo 1. Farklı kaynaklarda sunulan çelik ve ahşap malzemeye ait oluşum enerjisi değerleri

Kaynak	Oluşum Enerjisi (MJ/kg)	
	Çelik	Ahşap
Franklin Associates [16]	44.6	14.9
West vd. [17]	32	5.7-10
Berge [18]	25	3-16
Alcorn vd. [19,20]	35.9	0.3-24.2
Eaton and Amato [21]	31	13-36
Bütün veritabanı kaynakları [12]	6-81.8	0.3-61.3

Konut dışındaki endüstriyel yapılarda bu durum biraz daha yükseğe çıkabilmektedir. Türkiye’de bu denli az kullanıma karşın, başta ABD olmak üzere Kanada, Avustralya, Almanya, Finlandiya, Japonya gibi ülkelerde hafif çelik (light gauge steel) yapı sistemleri gelişmiştir. 1999 yılında İzmit depremi ile mevcut yapı sistemlerinin yerine yenilerinin aranmasıyla, hafif çelik sistemi ülkemizde de gelişmeye başlamıştır [25]. Hafif çelik sistemlerin sınırlı açıklık geçebilme yetenekleri nedeniyle konut yapıları için uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca üretim, nakliye, montaj kolaylıkları ve kısa sürede imal edilebilme özelliği nedeniyle küçük yapılarda tercih nedeni olabilmektedir. Ayrıca yapı yükünün az olması da deprem yükleri karşısında hafif çelik sistemini avantajlı hale dönüştürmektedir [26].

Geleneksel konut yapı sistemini incelendiğinde büyük oranda ahşap iskelet sistemler karşımıza çıkmaktadır. Estetik, kolay elde edilebilme, iç mekân konforu ve taşıyıcılık açısından tarih boyunca tercih nedeni olan ahşap malzeme, yapılaşma ve nüfusun artması nedeniyle azalmış ve pahalı bir malzemeye dönüşmüştür. Bu durum ahşaba ikame olabilecek başka malzemelerin kullanılmasına yol açmıştır. Son yüzyılda ülkemizde yapı malzemesi olarak büyük oranda betonarmenin kullanılması ve ağır bir yapı malzemesi olması nedeniyle betonarme yapılarda ölüm oranlarının artması hafif ahşap iskelet sistemlerin tekrar gündeme gelmesini sağlamıştır.

Hafif çelik iskelet sistemler ile ahşap iskelet sistemler taşıyıcı eleman düzeni ve bağlantı noktaları olarak birbirine benzerdir. Buradaki fark taşıyıcı malzemenin ahşap ya da çelik elemanlardan seçilmiş olması şeklinde açıklanabilmektedir. Hafif taşıyıcı sistemlerde bir mekân oluşturan duvar veya döşeme, çok sayıda küçük taşıyıcı profillerden oluşturulmaktadır. Duvar veya döşeme rijitliği diyagonaller kullanılmak ile beraber kaplama ve mantolama ile güçlendirilmektedir. Çelik elemanların birbirine bağlanması ve yük aktarımı sırasında yardımcı elemanlar kullanılarak güçlendirilebilmektedir. ABD’de hortum gibi doğal afetlerde, binanın yukarıdan çekilmesinde, çelik-çelik bulonlu birleşimin, ahşap-ahşap birleşimine göre çok daha yüksek performans vermesi üzerine ahşap iskeletli yapı yerine hafif çelik iskeletli yapı tercih edildiği görülmektedir [27].

Taşıyıcı kurgusu açısından benzerlikler gösteren hafif ahşap ve çelik iskelet sistemlerin çevresel performansı büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Çeliğin yüksek oluşum enerjisine sahip olması nedeniyle yüksek gömülü karbon değeri, ahşabın ise ek olarak karbon depolama özelliğinin bulunması çevresel performans farkını daha da yukarıya çekmektedir. Çalışma kapsamında aynı birim hacim ve yüzey alanına sahip ahşap ve çelik duvar konstrüksiyonlarının gömülü karbon değerleri belirlenmiştir. Bilindiği üzere hafif iskelet sistemlerde taşıyıcı elemanların hacimsel değerleri çok küçüktür. Fakat bu denli küçük hacimde dahi, bu sistemlerin arasında gömülü karbon değeri açısından büyük oranda farklar tespit edilmiştir. Tablo 1’de görülebileceği gibi, ahşap ve çelik malzemenin oluşum enerjileri arasında 3 kata yakın fark gözlenmektedir. Bu farkın, sözü edilen malzemeler konstrüksiyon içine dahil olduklarında, çeliğin boş kesitli olmasına rağmen çok daha fazla olabildiği saptanmıştır.

Literatürde benzer olarak karbon ayak izi hesaplanmasına yönelik çalışmalar incelendiğinde yerleşimsel [28,29], yapısal [30,31] ve malzemeye [32,33] yönelik çalışmalar bulunmakla birlikte konstrüksiyon bazında yapılan bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Bu çalışmada, hafif iskelet sistemle üretilecek konstrüksiyonun gömülü karbon değerlerinin hesaplanmasında mimara ya da ürün seçiciye birim hacim ve alan üzerinden blok bir veri sağlanması hedeflenmiştir. Bu nedenle aynı hacme ve yüzey alanına sahip, TS825 standardında belirtilen duvar ısı geçirgenlik katsayılarına uygun olarak Ankara’da inşa edilecek hafif ahşap ve çelik duvar konstrüksiyonlarının bir yapı elemanı olarak gömülü karbon değerleri belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulan hafif duvar konstrüksiyonlarında seçilen pencerelerin de birim hacimdeki duvarın gömülü karbon değerini etkilemesi nedeniyle, ahşap, polivinil klorür (PVC) ve alüminyum doğramaya sahip 1 m<sup>2</sup> alanındaki pencerelerle oluşturulan duvar konstrüksiyonlarının birim hacimdeki gömülü karbon değerleri hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları literatürde malzeme bazında verilen nitel farklılıkları doğrulamakla birlikte, çalışma ile Ankara’da inşa edilecek yapıların mimarlarına, yapı ve yapı ürünü üreticilerine ekolojik malzeme seçiminde yol göstermesi ve hafif duvar konstrüksiyonu gömülü karbon değeri hesaplamalarında bütünsel bir veri sunması hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyal

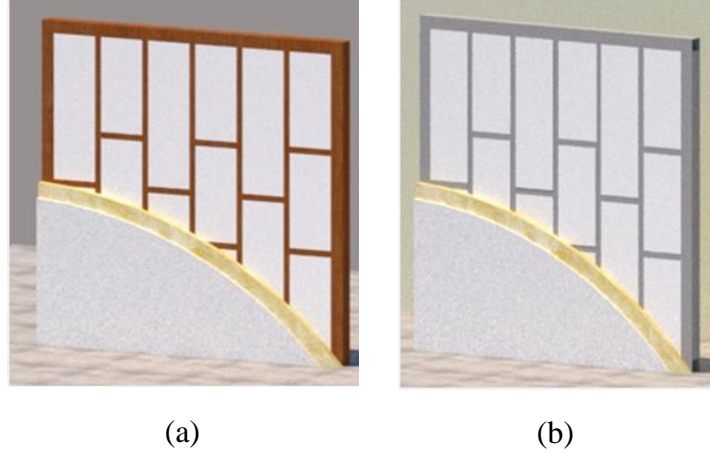
Çalışmada hafif ahşap ve çelik iskelet sistemle oluşturulan duvar konstrüksiyonları ile, bu yapı elemanına farklı doğramalara sahip pencereler eklenerek oluşturulan pencere duvar konstrüksiyonlarının gömülü karbon değerleri belirlenmiştir. Bu bağlamda, oluşturulan hafif duvar konstrüksiyonlarının Ankara’da üretileceği varsayılmış ve TS825 standardında 3. derece gün bölgesi için önerilen duvar ısı geçirgenlik katsayısına uygun olarak duvar katmanları ve malzeme kalınlıkları belirlenmiştir (Tablo 2). Duvar ısı geçirgenlik katsayısının 0.30 W/m<sup>2</sup>K olarak belirlendiği duvar konstrüksiyonunda ahşap ve çelik konstrüksiyon tasarımı Şekil 1’de, pencere duvar konstrüksiyon tasarımı ise Şekil 2’de verilmiştir. Pencere duvar konstrüksiyonlarının oluşumunda ise ahşap ve çelik konstrüksiyon duvara ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı pencereler eklenmiş olup bu pencerelere ait özellikler Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 2. Ahşap ve çelik konstrüksiyon duvarları oluşturan malzemeler ve özellikleri

Kons. Tipi	Malzeme	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Kalınlık (m)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Isı İletkenlik Direnci (m <sup>2</sup> K/W)	Duvar Isı Geçirgenlik Direnci (m <sup>2</sup> K/W)	Duvar Isı Geçirgenlik Katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
<b>Ahşap Kons. Duvar</b>	Ahşap	800	0.14	0.20	0.700	3.328	0.300
	İç Sıva	1200	0.02	0.51	0.039		
	Gazbeton	600	0.14	0.19	0.737		
	Yalıtım	40	0.07	0.03	2.333		
	Dış Sıva	1200	0.03	0.51	0.059		
	Ri				0.130		
	Re				0.040		
<b>Çelik Kons. Duvar</b>	Çelik	8000	0.14	16.2	0.009	3.306	0.302
	İç Sıva	1200	0.02	0.51	0.039		
	Gazbeton	600	0.14	0.19	0.737		
	Yalıtım	40	0.071	0.03	2.367		
	Dış Sıva	1200	0.03	0.51	0.059		
	Ri				0.130		
	Re				0.040		

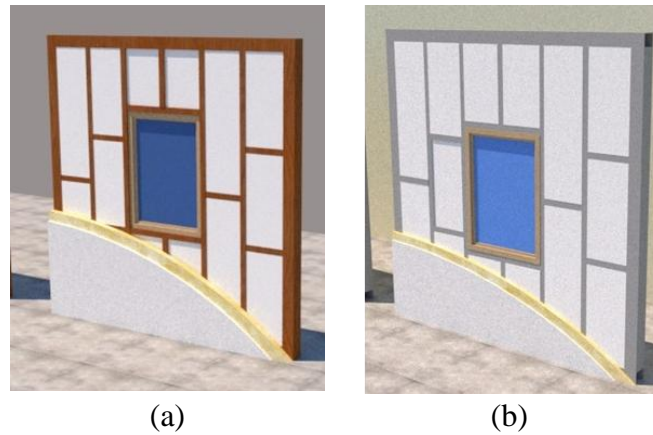
Tablo 3. Pencereless duvar konstrüksiyonlarında kullanılan farklı doğramalarla oluşturulan pencerelerin özellikleri

Pencere Türü	Ölçüler (m)	Alan/Hacim (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Isı Katsayısı (W/ m <sup>2</sup> K)	Geçirgenlik (W/ m <sup>2</sup> K)
Ahşap Doğrama Pencere	0.9*1.11	1.0/0.022	2.7	
Alüminyum Doğrama Pencere	0.9*1.11	1.0/0.022	3.35	
PVC Doğrama Pencere	0.9*1.11	1.0/0.022	2.58	



Şekil 1. Hafif ahşap (a) ve çelik (b) konstrüksiyon duvarlar

Oluşturulan ahşap ve çelik konstrüksiyon duvarda ahşap ve çelik ana dikmeler 0.12\*0.14\*3 m iken ara dikmeler 0.06\*0.14\*3 m boyutlarında kurgulanmıştır. Seçilen çelik dikmeler kutu profil olup, çelik malzemenin gömülü karbon değeri hesaplamalarında elemanın iç boşluğu çıkartılarak, sadece et kalınlığı dikkate alınmıştır. Bu nedenle iki konstrüksiyon da kutu profil iç boşluğu dahil edildiğinde aynı hacimdedir. Ayrıca ahşap ve çelik taşıyıcı profil ile arada kalan gazbeton dolgunun bir katman olarak ısı iletkenlik katsayısı, ahşap ve çeliğin hacimsel yüzdeleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Pencereless ahşap ve çelik konstrüksiyon duvarlar

Çalışma kapsamında Ankara iline uygun olarak üretilen duvar konstrüksiyonlarını oluşturan malzemelerin gömülü karbon değerleri ICE (Inventory of Carbon and Energy) veri tabanından alınmış olup, malzemelerin özellikleri ve veri niteliği Tablo 4'te verilmiştir. ICE İngiltere'de en eksiksiz olarak görülen ve mevcut en iyi oluşum enerjisi ve gömülü karbon verileri seçilerek oluşturulan açık kaynak veri tabanlarından biridir. Ayrıca çalışmada ahşap konstrüksiyon duvar için

yapılan hesaplamalarda ahşabın karbon depolama özelliği dahil (KD-D) ve hariç (KD-H) olmak üzere iki tür değer üzerinden gidilmiştir.

Tablo 4. Ahşap ve çelik konstrüksiyon duvarları oluşturan malzemeler ve özellikleri (ICE DB V.3.0, Kasım 2019)

Malzemeler	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Gömülü Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/ kg	Veri Niteliği
Ahşap (KD-H)	800	0.493	Karbon depolama özelliği hariç olarak ele alınan ahşap için veridir.211 veri noktasından alınan verilerin ortalama değeridir.
Ahşap (KD-D)	800	-1.030	Karbon depolama özelliği dahil olarak ele alınan ahşap için veridir. 211 veri noktasından alınan verilerin ortalama değeridir.
Çelik	8000	3.020	Dünya ortalamasında kutu profil çelik için veridir.
Gazbeton (Harç Dahil)	850	0.256	440 *215 mm ölçülerinde 1:4 oranında çimento ve kum ile oluşturulan harç veriye dahildir.
Sıva	1200	0.20	1/3 oranında çimento ve kum karışımına ait veridir.
Taş Yünü	40	1.280	
Cam	2500	1.630	Her 1 mm kalınlıkta 2.5 kg cam için veridir. 10 veri noktasından alınan verilerin ortalama değeridir.
PVC	1500	3.100	Avrupa yapı endüstrisinde satışı olan PVC ürünlerine ait ortalama veridir.
Alüminyum	2700	6.670	Genel alüminyum için sunulan veridir.

## 2.2. Yöntem

Çalışmada farklı malzemelerle oluşturulan duvar konstrüksiyonlarının Ankara ilinde üretileceği varsayıldığından, duvarın ısı geçirgenlik katsayısı TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardına [34] uygun olarak 3. Derece gün bölgesi için verilen azami duvar ısı geçirgenlik katsayısını aşmayacak şekilde 0.30 W/m<sup>2</sup>K olarak seçilmiştir. Duvarın ısı geçirgenlik katsayısı ve buna bağlı olarak yapı bileşenini oluşturan malzemelerin kalınlıkları Eşitlik 1 ve 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R = (d_1 / \lambda_{h1}) + (d_2 / \lambda_{h2}) + \dots + (d_n / \lambda_{hn}) \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

R=

Çok tabakalı yapı bileşenlerinde ısı geçirgenlik direnci

d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>,...,d<sub>n</sub>=

Yapı malzemesi kalınlıkları

(λ<sub>h1</sub>, λ<sub>h2</sub>,..., λ<sub>hn</sub>)=

Yapı malzemelerinin ısı iletkenlik hesap değerleri

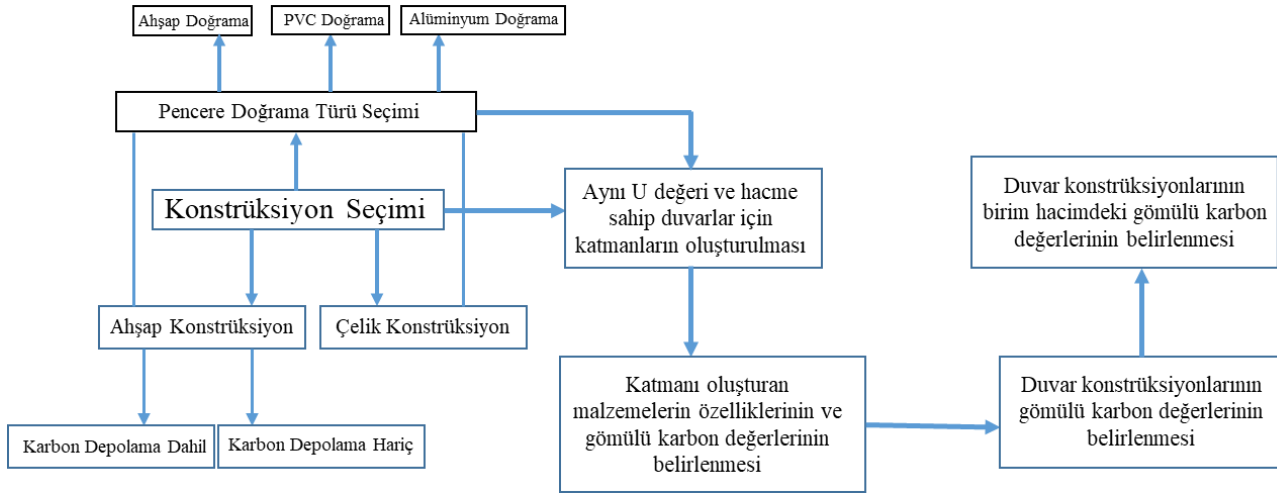
$$U = 1/R \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

U=Yapı bileşeninin toplam ısı geçirgenlik katsayısı

R= Çok tabakalı yapı bileşenlerinde ısı geçirgenlik direnci

Aynı alan ( $3*3=9\text{ m}^2$ ), aynı hacim ( $2.34\text{ m}^3$ ) ve aynı duvar ısı geçirgenlik katsayısına ( $0.30\text{ W/m}^2\text{K}$ ) sahip duvar konstrüksiyonlarını oluşturan malzeme kalınlıkları belirlendikten sonra, duvar konstrüksiyonunun içinde kapladığı hacim belirlenerek, malzemelerin ayrı ayrı bu hacimdeki gömülü karbon değerleri hesaplanmıştır. Farklı malzemelerle oluşturulan duvar konstrüksiyonunun ayrı ayrı gömülü karbon değerlerinin belirlenmesinin ardından bu konstrüksiyonların birim hacimdeki gömülü karbon değerlerine ulaşılmıştır. Çalışma öz akışı Şekil 3'te ayrıca verilmiştir.



Şekil 3. Çalışma akışı

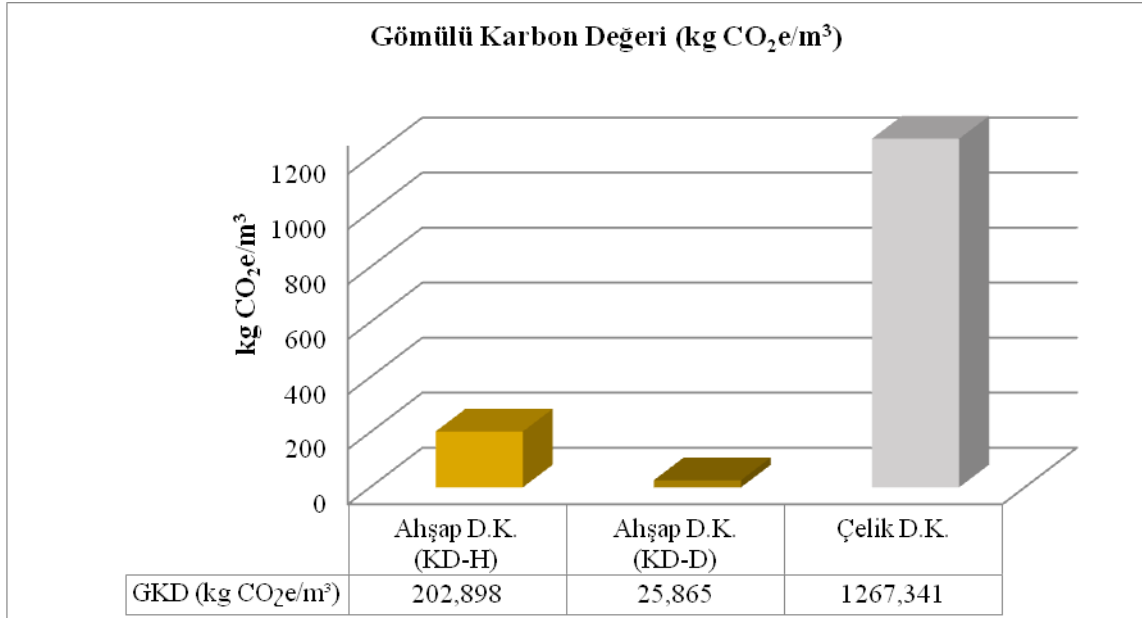
### 3. Bulgular ve Tartışma

Hafif ahşap ve çelik duvar konstrüksiyonlarının gömülü karbon değerleri hesaplandığında, Tablo 5, 6 ve 7'de görülebileceği gibi ahşap konstrüksiyon duvarın birim hacimdeki gömülü karbon değeri  $202.897\text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$  iken, ahşabın karbon depolama özelliği dahil edildiğinde bu rakam  $23.168\text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ 'e düşmektedir. Buna karşın çelik konstrüksiyon duvarın birim hacimdeki gömülü karbon değeri  $1267.341\text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$  olarak belirlenmiştir (Şekil 4). Bu rakam ahşap konstrüksiyonda elde edilen değerın 6 katından daha fazladır. Ahşap malzemenin karbon depolama özelliği dahil edildiğinde ulaşılan değer düşünüldüğünde ise, çelik konstrüksiyonun gömülü karbon değerinin 55 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum ekolojik bir malzeme olan ahşap malzemenin yapıda kullanımı ile yapının gömülü karbon değerinde büyük oranda azalma olacağını göstermektedir.

Çalışmada tasarlanan  $2.34\text{ m}^3$  hacme ve  $9\text{ m}^2$  alana sahip ahşap konstrüksiyon duvar için belirlenen  $474.781\text{ kgCO}_2\text{e}$  gömülü karbon değerinin  $134.096\text{ kgCO}_2\text{e}$ 'i (% 28.24) ahşap malzemenin,  $200.429\text{ kgCO}_2\text{e}$ 'i (% 42.21) gazbetondan,  $108\text{ kgCO}_2\text{e}$ 'i iç ve dış sıvadan (% 22.74),  $32.256\text{ kgCO}_2\text{e}$ 'i (% 6.79) ise taş yününden kaynaklanmaktadır (Şekil 5). Bu değerler incelendiğinde yüksek hacim ( $0.92\text{ m}^3$ ) ve alana ( $6.56\text{ m}^2$ ) sahip olması nedeniyle konstrüksiyonun gömülü karbon değerine gazbetonun daha fazla etki ettiği söylenebilmektedir. Bu değerler ahşap malzemenin karbon depolama özelliği göz önünde bulundurulduğunda ahşap malzemenin duvarın konstrüksiyonunun gömülü karbon değeri üzerinde %78.35 oranında azaltıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

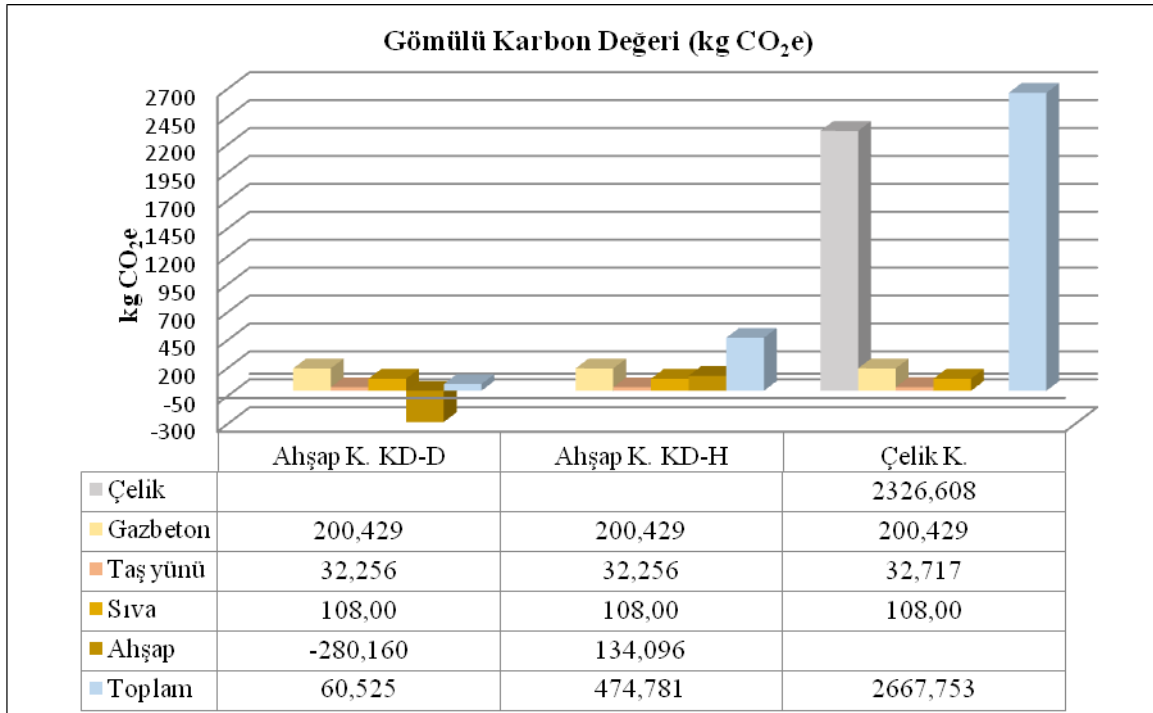
Şekil 5'te görülebileceği gibi  $2.34\text{ m}^3$  hacme ve  $9\text{ m}^2$  alana sahip çelik konstrüksiyon duvar için belirlenen  $2667.753\text{ kgCO}_2\text{e}$  gömülü karbon değerinin  $2326.608\text{ kgCO}_2\text{e}$ 'i (% 87.21) çelik

malzemeden, 200.429 kgCO<sub>2</sub>e'i (% 7.51) gazbetondan, 108 kgCO<sub>2</sub>e'i iç ve dış sıvadan (% 4.04), 32.256 kgCO<sub>2</sub>e'i (% 1.22) ise taş yünüden kaynaklanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Oluşturulan duvar konstrüksiyonlarının birim hacimde gömülü karbon değerleri (kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>)

Bu değerler incelendiğinde düşük hacim (0.09 m<sup>3</sup>) ve alana (2.43 m<sup>2</sup>) sahip olmasına rağmen diğer malzemelere göre birim ağırlıkta oldukça yüksek gömülü karbon değerine (3.02 kgCO<sub>2</sub>e/kg) sahip olması nedeniyle konstrüksiyonun gömülü karbon değerini en fazla çelik malzemenin etkilediği söylenebilmektedir.

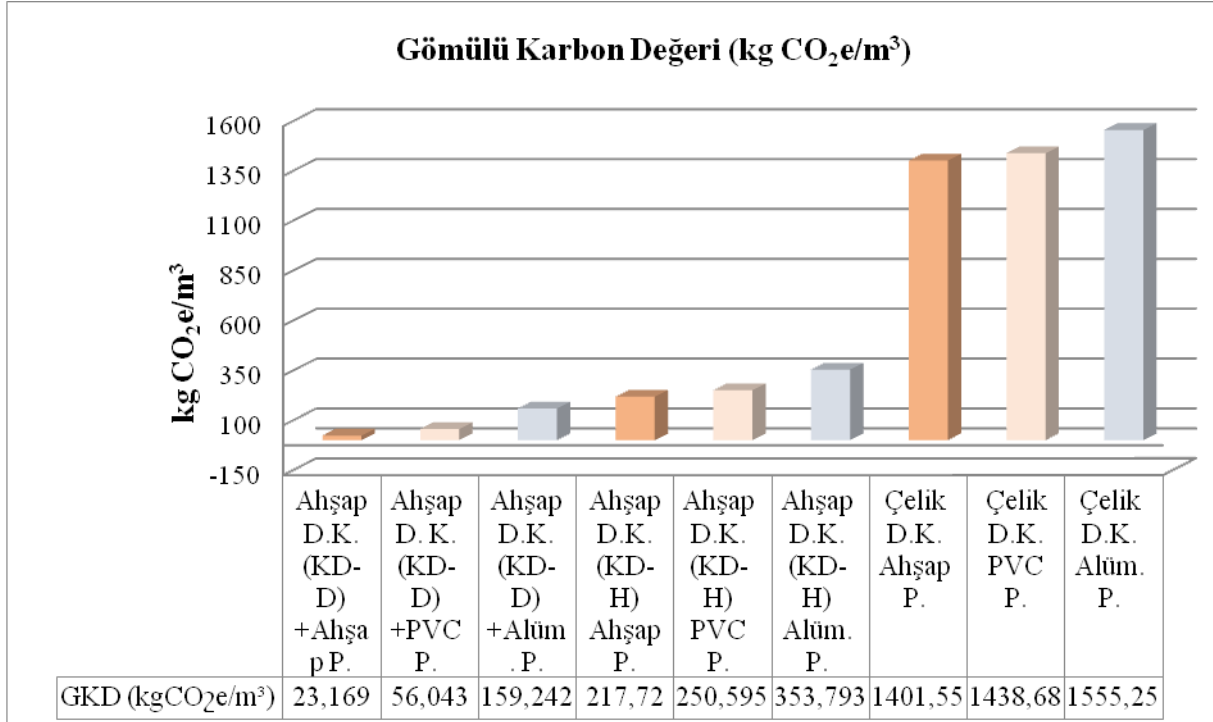


Şekil 5. Oluşturulan duvar konstrüksiyonlarının gömülü karbon değerleri

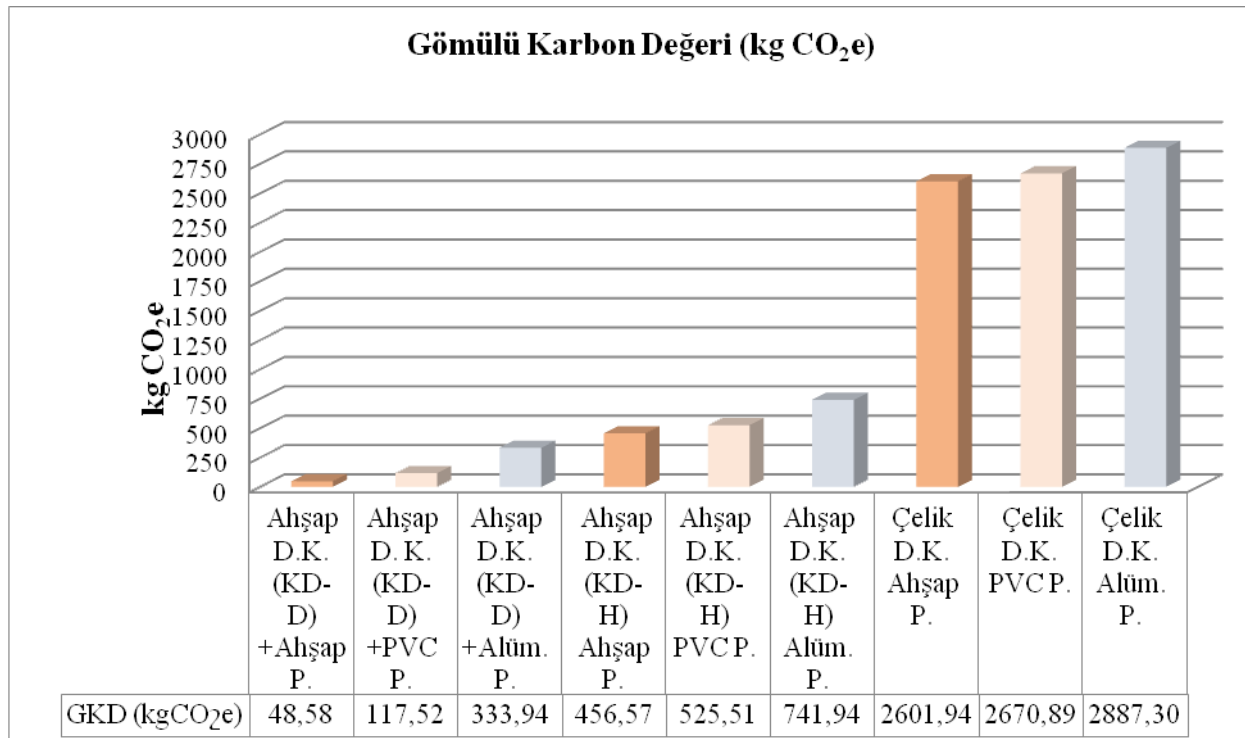
Ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı ahşap ve çelik konstrüksiyonların birim hacimdeki gömülü karbon değerleri incelendiğinde ise, ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı ahşap konstrüksiyonun birim hacimdeki gömülü karbon değerleri sırasıyla 217.719 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>, 250.594 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> ve



353.793 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>'tür. Konstrüksiyonda ahşap doğrama yerine alüminyum doğrama kullanmak birim hacimde 136.074 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> kadar yük getirmiştir. Konstrüksiyonu oluşturan ahşap malzemenin karbon depolama özelliği dahil edildiğinde ulaşılan değerler ise, ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı pencere içeren ahşap konstrüksiyon için sırasıyla 23.169 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>, 56.043 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> ve 159.242 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> olarak gözlenmektedir. Ahşap malzeme karbon depolama özelliği ile konstrüksiyonun birim hacimdeki karbon salımını büyük miktarda düşürmüştür. Ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı çelik konstrüksiyonun birim hacimdeki gömülü karbon değerleri ise sırasıyla 1401.546 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>, 1438.681 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> ve 1555.254 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>'tür. Konstrüksiyonda ahşap doğrama yerine alüminyum doğrama kullanmak birim hacimde 153.708 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> kadar yük getirmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Farklı doğramalarla oluşturulan pencere duvar konstrüksiyonlarının birim hacimde gömülü karbon değerleri (kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>)



Şekil 7. Farklı doğramalarla oluşturulan pencere duvar konstrüksiyonlarının gömülü karbon değerleri (kg CO<sub>2</sub>e)

Çalışmada tasarlanan ahşap ve çelik duvar konstrüksiyonlarına ahşap, PVC ve alüminyum doğramalarla oluşturulan pencereler eklendiğinde, ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı pencere içeren ahşap konstrüksiyonun gömülü karbon değerleri sırasıyla 456.575 kgCO<sub>2</sub>e, 525.516 kgCO<sub>2</sub>e ve 741.932 kgCO<sub>2</sub>e olarak belirlenmiştir (Şekil 7). Konstrüksiyonu oluşturan ahşap malzemenin karbon depolama özelliği dahil edildiğinde ulaşılan değerler ise, ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı pencere içeren ahşap konstrüksiyon için sırasıyla 48.587 kgCO<sub>2</sub>e, 117.527 kgCO<sub>2</sub>e ve 333.943 kgCO<sub>2</sub>e olarak gözlenmektedir. Pencere duvarı ahşap konstrüksiyon duvarında yine ahşap doğramalı pencereye sahip konstrüksiyonun gömülü karbon değeri en düşük olarak belirlenirken, alüminyum doğramayla üretilen pencereye sahip konstrüksiyonun gömülü karbon değeri ise en yüksek olup %62 oranında daha fazla karbon değerinin oluşmasına neden olmuştur.

Tablo 5. Ahşap duvar konstrüksiyonu (KD-H) gömülü karbon değerleri

Konstrüksiyon Türü	Malzeme	Hacim m <sup>3</sup>	Yoğunluk kg/ m <sup>3</sup>	Malzemenin G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/ kg	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H)	Ahşap	0.34	800	0.493	134.096		
	Gazbeton+ Harç	0.92	850	0.256	200.429		
	Taş Yünü	0.63	40	1.28	32.256		
	Sıva	0.45	1200	0.20	108		
	<b>Toplam</b>	<b>2.34</b>				<b>474.781</b>	<b>52.753</b>
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H)+Ahşap Doğrama Pencere	Ahşap	0.33	800	0.493	132.067		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		

	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	800	0.493	6.389		
	<b>Toplam</b>	<b>2.10</b>			<b>456.575</b>	<b>50.730</b>	<b>217.720</b>
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H)+PVC Doğrama Pencere	Ahşap	0.33	800	0.493	132.067		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	1500	3.1	75.330		
	<b>Toplam</b>	<b>2.10</b>			<b>525.516</b>	<b>58.390</b>	<b>250.595</b>
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H) +Alüminyum Doğrama Pencere	Ahşap	0.33	800	0.493	132.067		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	2700	6.67	291.746		
	<b>Toplam</b>	<b>2.10</b>			<b>741.932</b>	<b>82.436</b>	<b>353.793</b>

Ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı pencere içeren çelik konstrüksiyonda ise bu değerler sırasıyla 2601.949 kgCO<sub>2</sub>e, 2670.890 kgCO<sub>2</sub>e ve 2887.306 kgCO<sub>2</sub>e olarak belirlenmiştir. Bu değerler incelendiğinde, ahşap konstrüksiyonda ahşap doğrama yerine alüminyum doğrama kullanımının konstrüksiyona etkisi %62 iken, çelik konstrüksiyonda bu etki %11 civarındadır. Bu durum, esas karbon yükünün çelik malzemeden kaynaklandığını göstermektedir.

Tablo 6. Ahşap duvar konstrüksiyonu (KD-D) gömülü karbon değerleri

Konstrüksiyon Türü	Malzeme	Hacim m <sup>3</sup>	Yoğunluk kg/ m <sup>3</sup>	Malzemenin G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/ kg	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-D)	Ahşap	0.34	800	-1.03	-280.160		
	Gazbeton+ Harç	0.92	850	0.256	200.429		
	Taş Yünü	0.63	40	1.28	32.256		
	Sıva	0.45	1200	0.20	108.000		
	<b>Toplam</b>	<b>2.34</b>			<b>60.525</b>	<b>6.724</b>	<b>25.865</b>
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-D)+Ahşap Doğrama Pencere	Ahşap	0.33	800	-1.03	-275.921		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	800	0.493	6.389		
<b>Toplam</b>	<b>2.10</b>			<b>48.587</b>	<b>5.398</b>	<b>23.169</b>	
Ahşap Duvar	Ahşap	0.33	800	-1.03	-275.921		

Konstrüksiyonu (KD-D)+PVC Doğrama Pencere	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	1500	3.1	75.330		
	<b>Toplam</b>	<b>2.10</b>				<b>117.527</b>	<b>13.058</b>
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-D) +Alüminyum Doğrama Pencere	Ahşap	0.33	800	-1.03	-275.921		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.96		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	2700	6.67	291.7458		
	<b>Toplam</b>	<b>2.10</b>				<b>333.943</b>	<b>37.104</b>

Tablo 7. Çelik duvar konstrüksiyonu gömülü karbon değerleri

Konstrüksiyon Türü	Malzeme	Hacim m <sup>3</sup>	Yoğunluk kg/ m <sup>3</sup>	Malzemenin G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/ kg	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	Duvar Kons. G. Karbon Değeri kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
Çelik Duvar Konstrüksiyonu	Çelik	0.0963	8000	3.02	2326.61		
	Gazbeton+ Harç	0.92	850	0.256	200.429		
	Taş Yünü	0.639	40	1.28	32.717		
	Sıva	0.45	1200	0.20	108		
	<b>Toplam</b>	<b>2.1053</b>				<b>2667.753</b>	<b>296.417</b>
Çelik Duvar Konstrüksiyonu+ Ahşap Doğrama Pencere	Çelik	0.094	8000	3.02	2277.44		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	800	0.493	6.389		
<b>Toplam</b>	<b>1.856</b>				<b>2601.949</b>	<b>289.105</b>	<b>1401.546</b>
Çelik Duvar Konstrüksiyonu+ PVC Doğrama Pencere	Çelik	0.094	8000	3.02	2277.44		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		
	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	1500	3.1	75.330		
<b>Toplam</b>	<b>1.856</b>				<b>2670.890</b>	<b>296.765</b>	<b>1438.681</b>
Çelik Duvar Konstrüksiyonu+ Alüminyum Doğrama	Çelik	0.094	8000	3.02	2277.44		
	Gazbeton+ Harç	0.78	850	0.256	169.959		
	Taş Yünü	0.56	40	1.28	28.676		

Pencere	Sıva	0.40	1200	0.20	96.012		
	Cam	0.0058	2500	1.63	23.472		
	Kasa	0.0162	2700	6.67	291.745		
	<b>Toplam</b>	<b>1.856</b>			<b>2887.306</b>	<b>320.811</b>	<b>1555.254</b>

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında aynı alan ve hacme sahip hafif ahşap ve çelik konstrüksiyon duvarların gömülü karbon değerleri ile, ahşap, PVC ve alüminyum doğrama ile oluşturulmuş pencere ahşap ve çelik konstrüksiyon duvarların gömülü karbon değerleri belirlenmiştir. Elde edilen gömülü karbon değerleri özet olarak Tablo 8’de sunulmuştur. Bu bağlamda hafif ahşap ve çelik konstrüksiyon duvarlar karşılaştırıldığında, birim hacimdeki çelik konstrüksiyon duvarın ahşap konstrüksiyon duvara göre 6 kat, ahşabın karbon depolama özelliği ele alındığında ise 55 kat daha fazla gömülü karbon değerine sahip olacağı tespit edilmiştir.

Ahşap ve çelik taşıyıcı elemanların üretilen konstrüksiyon içindeki değerleri incelendiğinde ise ahşap malzemenin karbon depolama özelliği göz ardı edildiğinde bile gömülü karbon değerinin 134.096 kgCO<sub>2</sub>e, çelik malzemenin ise 2326 kgCO<sub>2</sub>e olduğu hesaplanmıştır.

Tablo 8. Çalışma kapsamında oluşturulan farklı duvar konstrüksiyonlara yönelik birim alanda ve birim hacimde hesaplanan gömülü karbon değerleri

<b>Konstrüksiyon Tipi</b>	<b>Gömülü Karbon Değeri kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup></b>	<b>Gömülü Karbon Değeri kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup></b>
<b>Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H)</b>	52.753	202.898
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H)+Ahşap Doğrama Pencere	50.730	217.720
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H)+PVC Doğrama Pencere	58.390	250.595
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-H) +Alüminyum Doğrama Pencere	82.436	353.793
<b>Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-D)</b>	6.724	25.865
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-D)+Ahşap Doğrama Pencere	5.398	23.168
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-D)+PVC Doğrama Pencere	13.058	56.043
Ahşap Duvar Konstrüksiyonu (KD-D) +Alüminyum Doğrama Pencere	37.104	159.242
<b>Çelik Duvar Konstrüksiyonu</b>	296.417	1267.341
Çelik Duvar Konstrüksiyonu+ Ahşap Doğrama Pencere	289.105	1401.546
Çelik Duvar Konstrüksiyonu+ PVC Doğrama Pencere	296.765	1438.681
Çelik Duvar Konstrüksiyonu+ Alüminyum Doğrama Pencere	320.811	1555.254

Bu veriler çelik malzemenin duvar konstrüksiyonu içinde hacminin az olmasına rağmen, gömülü karbon değerinin çok yüksek miktarda seyrettiğini göstermektedir. Karbon depolama özelliği olan ahşap malzemenin yapıda kullanımı ile konstrüksiyonun gömülü karbon değerinde büyük oranda azalma olacağı söylenebilmektedir. Yapıda hafif çelik konstrüksiyon kullanımına birinci bölümde belirtilen avantajlarından dolayı karar verilmesi durumunda, çelik malzemenin kesinlikle yaşam ömrünü tamamlaması sonucunda yeniden kullanılması ya da geri dönüşüme gönderilmesi ve çelik malzemeye yönelik atık yönetimi senaryolarının oluşturulması gerekmektedir.

Ahşap, PVC ve alüminyum doğramalı pencere ile oluşturulan hafif ahşap ve çelik konstrüksiyonların birim hacimdeki gömülü karbon değerleri, doğrama türü olarak incelendiğinde, en düşük gömülü karbon değerine sahip malzemenin ahşap malzeme olduğu, en yüksek gömülü karbon değerine sahip malzemenin ise alüminyum malzeme olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun oluşumunda, alüminyumun üretim sürecinde gerekli olan enerjinin yüksek olması önemli bir faktördür. Ahşap konstrüksiyona alüminyum doğramalı pencere entegre edildiğinde, birim hacimde ahşap doğramaya göre %62 oranında bir artış gözlenmiştir. Bu durum çelik konstrüksiyon için değerlendirildiğinde ise pencereli çelik konstrüksiyonda asıl karbon yüküne neden olan yapı malzemesinin çelik olması nedeniyle artış oranı %11'de kalmıştır.

Yapı üretim sürecinde, ekonomik, doğal, sağlıklı, doğru, düşük oluşum enerjisi ve gömülü karbon değerine sahip malzeme seçimi sürdürülebilir mimarlık kapsamında oldukça önemlidir. Seçilen malzemelerin geri dönüşümlü malzemelerden oluşması ve yapıda kullanımı sonucunda geri dönüşümü bütün malzemeler için önemli olmakla birlikte, yüksek oluşum enerjisi gerektiren ve gömülü karbon içeren malzemeler için ayrıca önem arz etmektedir. Bu şekilde kaynak verimliliği sağlanabilecek ve çevre kirliliğinin önüne geçilebilecektir.

## Kaynaklar

- [1]. WGSC, Working group for sustainable construction, Working Group Sustainable Construction Methods And Techniques Final Report, 2004. [http://ec.europa.eu/environment/urban/\(2004\)](http://ec.europa.eu/environment/urban/(2004)).
- [2]. Tuna, M. Bina Derecelendirme Sistemlerinde Çevresel Etki Sınıflarının Önemi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15, (2010).
- [3]. Tuna-Kayılı, M., Çelebi, G., The effect of waste material usage on embodied energy: An experimental study on construction material, Smart Metropoles (SBE 2016), 13-15 Ekim, İstanbul, Türkiye, (2016).
- [4]. Ramachandran, A., Energy for building : improving energy efficiency in construction and in the production of building materials in developing countries / ed. United Nations Centre for Human Settlements (Habitat) 1991.
- [5]. Terzi, S., Sürdürülebilir Çevre Açısından Uygun Yapı Ürünlerinin Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 31, (2009).
- [6]. Erdoğan, İ., Yapıda Kullanılan Malzemenin Sürdürülebilirlik Kapsamında Oluşum Enerjisi Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2005).
- [7]. De Wolf, C., Yang, F., Cox, D., Charlson, A., Hattan, A. S., & Ochsendorf, J., Material quantities and embodied carbon dioxide in structures, In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability, August, Thomas Telford Ltd., (2015).
- [8]. Calkins, M., Materials for Sustainable Sites, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 14-24, (2009).
- [9]. Türkeş, M., Sümer, U. M., Çetiner, G., Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri, Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (13 Nisan 2000, İstanbul Sanayi Odası), 7-24 [http://www.meteor.gov.tr/iklim/iklim-degisikligi.aspx\(2000\)](http://www.meteor.gov.tr/iklim/iklim-degisikligi.aspx(2000)).

- [10]. Tuna-Kayılı, M., Yüksek Fırın Baca Tozu ve Polietilen Atıklarından Elde Edilen Kompozit Malzemenin Yapıda Kullanılabilirliğinin Saptanması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15, (2016).
- [11]. <http://www.umanitoba.ca/academic/faculties/architecture/la/sustainable/design/arch/arch005.htm>, (2005).
- [12]. Hammond, G. P., Jones, C. I., Embodied energy and carbon in construction materials, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 2008, 161(2), 87-98.
- [13]. Koç, Z. G., Ekşi Akbulut, D., Ekolojik Tasarım Kapsamında Dünyada ve Türkiye'de Toprak Yapı Standart ve Yönetmeliklerinin Değerlendirilmesi, *Megaron*, 2017, 12(4), 649.
- [14]. Nielsen, C. V., Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective, *Proceeding of NRMCA Concrete Technology Forum*, Silver Spring, 2008, MD, 1-14.
- [15]. Ergin, N., Ağaç Malzeme Kullanımı ve Çevreye Etkisi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 2003, 427, 96-100.
- [16]. Franklin Associates, *Comparative Energy Evaluation of Plastic Products and Their Alternatives for the Building and Construction and Transportation Industries*, Franklin Associates, Kansas, (1991).
- [17]. West, J., Atkinson, C., Howard, N., Embodied energy and carbon dioxide emissions for building materials, *Proceedings of the First International Conference on Buildings and the Environment*, CIB Task Group 8, BRE, Watford, UK, (1994).
- [18]. Berge, B., *The Ecology of Building Materials*, Architectural Press, Oxford, (2003).
- [19]. Alcorn, A., *Embodied Energy Coefficients of Building Materials*, Centre for Building Performance Research, Victoria University, Wellington, (1996).
- [20]. Alcorn, A., Wood, P., *New Zealand Building Materials Embodied Energy Coefficients Database, Vol II—Coefficients*, Centre for Building Performance Research, Victoria University, Wellington, (1998).
- [21]. Eaton, K. J., Amatoa, A., *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Modern Office Buildings*, Steel Construction Institute, Ascot, Publication, 182, (1998).
- [22]. Crawford, R. H., Bartak, E. L., Stephan, A., & Jensen, C. A., Evaluating the life cycle energy benefits of energy efficiency regulations for buildings, *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 63, 435-451.
- [23]. Kylili, A., Ilic, M., Fokaides, P. A., Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone, *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 116, 169-177.
- [24]. Iyer-Raniga, U., Wong, J. P. C., Evaluation of whole life cycle assessment for heritage buildings in Australia, *Building and Environment*, 2012, 47, 138-149.
- [25]. <http://tuksa.org.tr/tuc/dernek.htm>
- [26]. Ekinci, S., Eşsiz, Ö. 2005. Deprem bölgelerinde hafif çelik yapı sistemleriyle üretilen konutların uygulanabilirliği, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, (2005).
- [27]. Işık, B., Hafif çelik yapıların geleneksel ahşap yapılar ile benzerlikleri, *Türk Yapısal Çelik Derneği*, 2001.
- [28]. Binboğa G., Ünal A., Sürdürülebilirlik Ekseninde Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nin Karbon Ayak İzinin Hesaplanmasına Yönelik Bir Araştırma, *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 2018, 21:187-202.
- [29]. Letete T.C.M., Mungwe N.W., Guma M., Marquard A., Carbon footprint of the University of Cape Town. *Journal of Energy in Southern Africa*, 2011, 22(2): 2-12.
- [30]. Kumaş, K., Akyüz, A. Ö., Zaman, M., & Güngör, A. Sürdürülebilir Bir Çevre İçin Karbon Ayak izi Tespiti: MAKÜ Bucak Sağlık Yüksekokulu Örneği. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2019, 6(1), 108-117.
- [31]. Dilara, S., Oral, G. K. Bir Konut Binasının Enerji Performansının Yaşam Döngüsü Enerji Tüketimi ve CO<sub>2</sub> Salımı Açısından Değerlendirilmesi, *TESKON 2015 / Binalarda Enerji Performansı Sempozyumu*, 1453-1468, (2015).

- [32]. Orhon, A. V., & Altın, M. Beton Yapıların Karbon Ayak İzi. Sürdürülebilir Yapı Tasarımı Ulusal Konferansı, Bornova, 12-13, (2012).
- [33]. Akgün, M. Yapı Malzemelerinde Karbon Ayak İzi Analizi ile Yaşam Döngüsü Analizinin Karşılaştırılması, Termodinamik, 2017. Http: <https://www.termodinamik.info/yapi-malzemelerinde-karbon-ayak-izi-analizi-ile-yasam-dongusu-analizininkarsilastirilmesi>
- [34]. TS 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, TSE, Ankara (2008).