T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEVCUT KONUTLARIN ENERJİ İYİLEŞTİRMESİNDE DÜŞEY KABUKLAR İÇİN DÜŞÜK KARBONLU ÇÖZÜM ALTERNATİFLERİNİN ANALİZİ

Mehmet Oğuz DURU

DOKTORA TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Şubat-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Oğuz DURU tarafından hazırlanan "MEVCUT KONUTLARIN ENERJİ İYİLEŞTİRMESİNDE DÜŞEY KABUKLAR İÇİN DÜŞÜK KARBONLU ÇÖZÜM ALTERNATİFLERİNİN ANALİZİ" adlı tez çalışması 29/02/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. İdil AYÇAM Gazi Üniversitesi	……..
Danışman Dr. Öğr. Üyesi İlhan KOÇ Konya Teknik Üniversitesi	……..
Üye Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ Konya Teknik Üniversitesi	……..
Üye Doç. Dr. Selçuk SAYIN Konya Teknik Üniversitesi	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ Necmettin Erbakan Üniversitesi	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması ÖYP tarafından 2018-ÖYP-004 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet Oğuz DURU

Tarih:29.02.2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MEVCUT KONUTLARIN ENERJİ İYİLEŞTİRMESİNDE DÜŞEY KABUKLAR İÇİN DÜŞÜK KARBONLU ÇÖZÜM ALTERNATİFLERİNİN ANALİZİ

Mehmet Oğuz DURU

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlhan KOÇ

2024, 246 Sayfa

Jüri
Danışman Dr. Öğr. Üyesi İlhan KOÇ
Başkan Prof. Dr. İdil AYÇAM
Üye Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ
Üye Doç. Dr. Selçuk SAYIN
Üye Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ

Küresel iklim değişikliği, günümüzde insanlığın karşılaştığı en büyük zorlukların başında yer almaktadır. İnsan kaynaklı (antropojenik) faaliyetlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan sera etkisi oluşturacak gazlara sahip emisyonlar, küresel sıcaklık değerinin artışını hızlandıran en önemli faktör olarak ifade edilmektedir. İklim değişikliği konusunda çalışma yapan bilim insanları, sanayi devriminden günümüze devamlı olarak yükselen küresel sıcaklık değerinin zirveye ulaşmadan sınırlandırılabilmesi ve dünyanın soğumasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi durumunda iklim değişikliği kaynaklı olumsuz etkilerin önüne geçilebileceğine inanmaktadır. Bununla birlikte, gündelik yaşamın devamının sağlanabilmesi için hayati öneme sahip olan enerji, ülkeler için birincil derecede önem arz etmektedir.

Özellikle son on yılda küresel olarak yaşanan enerji arz güvenliği endişesi, birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeleri enerji tüketiminde sınırlandırarak önemli tedbirler almaya yöneltmektedir. İfade edilmiş olan bu kavramlar doğrultusunda doktora tez çalışmasının birincil amacı ülkemiz mevcut konut stokunun enerji verimliliğinin artırılmasını sağlayacak, biyolojik esaslı bir yapı kabuğu model önerisi getirmek olmuştur. Öneri kabuk modelleri, çevresel etkisi düşük, üretiminde atmosfere salınan en az karbondioksit eşdeğer gaz (CO_2eq.) miktarına sahip ve bünyesinde karbon depolayabilen yapı malzemeleri kullanılarak geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, tasarlanmış olan öneri kabuk modelleri yüksek ısıl geçirgenlik katsayısına (U değeri) sahip, alan çalışmasında irdelenen mevcut konut yapısı düşey kabuğu yerine uygulanmış ve sadece kullanım enerjisi kaynaklı karbon emisyonunun azaltılması sağlanmamış aynı zamanda, mevcut konut yapısı bünyesinde atmosferik karbon depolanmıştır.

Çalışmada, yapı malzemeleri kaynaklı karbon emisyonu olan gömülü karbon değeri, yapı hizmet ömrü boyunca konfor şartlarının sağlanabilmesi amacıyla kullanılan enerji kaynaklı kullanım karbonu değeri ve öneri kabuk modellerin tasarlanmasına ilişkin olmak üzere uluslararası literatürün sentezlenmesi sonucu elde edilen üç farklı yöntem uygulanmıştır. Enerji iyileştirmesi yapılmamış mevcut konut yapısı; betonarme strüktür bileşeni gömülü karbon değeri 97,96 tCO_2eq., düşey kabuk bileşeni gömülü karbon değeri 26,46 tCO_2eq. ve yıllık ısıtma amacıyla kullanılan doğalgaz enerjisi kaynaklı kullanım karbon değeri 8,695 tCO_2eq. olarak hesaplanmıştır. Araştırma kapsamında geliştirilen; -27,67 tCO_2eq. gömülü karbon değerine sahip EnP-1 öneri kabuk modeli ile kullanım kaynaklı enerji ve emisyon %22,08 oranında, -23,67 tCO_2eq. gömülü karbon değerine sahip EnP-2 öneri kabuk modeli ile kullanım kaynaklı enerji ve emisyon %23,92 oranında, -16,84 tCO_2eq. gömülü karbon değerine sahip EnP-3 öneri kabuk modeli ile kullanım kaynaklı enerji ve emisyon %23,80 oranında, -19,05 tCO_2eq. gömülü karbon değerine sahip EnP-4 öneri

kabuk modeli ile kullanım kaynaklı enerji ve emisyon %24,82 oranında, -20,66 tCO_2eq. gömülü karbon değerine sahip EnP-5 öneri kabuk modeli ile kullanım kaynaklı enerji ve emisyon %22,08 oranında azaltılmış ve enerji verimliliği sağlanmıştır.

Enerji iyileştirmesi yaklaşımıyla gerçekleştirilmiş olan doktora analiz yaklaşımı, milyonlarca metrekare büyüklüğü sahip olan ülkemiz mevcut konut stoku dikkate alındığında, iklim değişikliğinin olumsuz etkisinin azaltılmasında büyük bir potansiyel barındırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyolojik esaslı malzemeler, Düşey yapı kabuğu, Enerji iyileştirmesi, Enerji verimliliği, Gömülü karbon emisyonu, Kullanım karbonu emisyonu, Yapı malzemesi

ABSTRACT

PhD THESIS

ANALYSIS OF LOW CARBON SOLUTION ALTERNATIVES FOR VERTICAL ENVELOPES IN THE ENERGY RETROFITTING OF EXISTING HOUSING BLOCKS

Mehmet Oğuz DURU

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Architecture and Design

Advisor: Asst. Prof. Dr. İlhan KOÇ

2024, 246 Pages

Jury
Advisor Asst. Prof. Dr. İlhan KOÇ
Head Prof. Dr. İdil AYÇAM
Member Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ
Member Assoc. Prof. Dr. Selçuk SAYIN
Member Asst. Prof. Dr. Mustafa DERELİ

Global climate change is one of the greatest challenges facing humanity today. Emissions containing gases that contribute to the greenhouse effect, arising as a result of human activities (anthropogenic), are identified as the most significant factor accelerating the increase in global temperature. Scientists studying on climate change believe that if efforts are made to limit the continuously rising global temperature since the Industrial Revolution and work towards cooling the Earth before it reaches its peak, the adverse effects of climate change can be mitigated. However, energy, which is crucial for the continuity of daily life, holds primary importance for countries.

Especially in the last decade, the global concern about energy supply security has prompted many developed and developing countries to take significant measures by restricting energy consumption. In line with these concepts, the primary aim of the doctoral thesis is to propose a model for a bio-based building envelope that will enhance the energy efficiency of our country's existing housing stock. Proposed envelope models have been developed using building materials with low environmental impact, minimal CO2eq. emissions during production, and the ability to store carbon within their structure. Within the scope of the study, the proposed envelope models have a high thermal transmittance coefficient (U value) and have been applied to the vertical envelope of the existing residential structure examined in the field study. This not only ensured the reduction of carbon emissions solely from operational energy but also resulted in the atmospheric carbon storage within the structure of the existing residential building.

In the study, three different methods were applied, including the synthesis of international literature to obtain the embodied carbon value from building materials, the carbon value from energy sources used to provide comfort conditions throughout the service life of the building, and the design of proposed envelope models. The existing residential building without energy retrofit has a calculated embodied carbon value of 97.96 $tCO_2eq.$ for the reinforced concrete structural component, 26.46 $tCO_2eq.$ for the vertical envelope component, and 8.695 $tCO_2eq.$ for the annual usage carbon value from natural gas energy used for heating purposes. As part of the research, the developed EnP-1 proposal embodied carbon value of -27.67 $tCO_2eq.$ achieved a 22.08% reduction in energy usage and emissions, the EnP-2 proposal embodied carbon value of -23.67 $tCO_2eq.$ achieved a 23.92% reduction, the EnP-3 proposal embodied carbon value of -16.84 $tCO_2eq.$ achieved a 23.80% reduction, the EnP-4 proposal embodied carbon value

of -19.05 tCO_2eq. achieved a 24.82% reduction, and the EnP-5 proposal embodied carbon value of -20.66 tCO_2eq. achieved a 22.08% reduction in energy usage and emissions, providing energy efficiency.

The doctoral analysis approach, conducted with an energy retrofitting perspective, has concluded that considering our country's existing housing stock, which amounts to millions of square meters, there is significant potential in mitigating the adverse effects of climate change.

Keywords: Bio-based materials, Vertical building envelope, Energy retrofitting, Energy efficiency, Embodied carbon emission, Building material, Operational carbon emission

ÖNSÖZ

“İlim, ilim bilmektir…İlim kendin bilmektir…Sen kendini bilmezsen…Ya nice okumaktır…” fehvasınca çıkılan bu yolculuğun önemli bir dönüm noktasını oluşturan doktora tez çalışmamda katkı ve desteklerini sağlayan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İlhan KOÇ’a teşekkürlerimi sunarım. Hocam, akademik hayatıma başladığım ilk günden beri varlığınızı yanımda hissetmek benim için tarifi mümkün olmayan bir güzellikti. Her şeyin sonsuz minnettarım.

Doktora tez çalışmanın şekillenmesinde ve geliştirilmesinde sağladığı desteklerle ufkumu açan değerli hocam Doç.Dr. Selçuk SAYIN’a teşekkürü borç bilirim. Tez çalışmam boyunca birçok kez değerli vaktinizi bana ayırdığınız için sağ olun hocam. Sizinle gerçekleştirmiş olduğum istişareler neticesinde bu çalışma tamamlanabilmiştir.

Bir lisans üstü ders kapsamında kendisiyle tanışma imkânı bulduğum, bana inanarak doktora tez sürecimin her aşamasında yer alarak destekleyen çok değerli hocam Prof. Dr. İdil AYÇAM’a sonsuz teşekkürler ederim. Sizinle tanışmak, bilgi birikiminizden istifade etmek benim için büyük bahtiyarlıktı. “Kardeşim” deyişinizdeki samimiyeti ve o bitmek tükenmek bilmeyen enerjiyle çalışma azminizi her zaman kendime rehber edineceğim hocam.

2014 yılından itibaren birlikte çalıştığım, anlayışıyla her zaman yanımda olan ve her konuda destek veren Anabilim dalı başkanım Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ hocam başta olmak üzere Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü Yapı Anabilim dalı hocalarıma teşekkür ederim.

Usta-çırak yaklaşımıyla beni yapı derslerinde eğiten ve her fırsatta doktora tezimin durumuna sorarak daha çok çalışmamı teşvik eden çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DERELİ’ye çok teşekkür ederim.

Uzun ve zahmetli bir süreç olan doktora çalışmam boyunca, biricik kızım Tülin Serra ve sevgili oğlum Ahmet Erdem’le tek başına ilgilenmek zorunda kalan aziz refikam Ayşe DURU’ya özellikle teşekkür ederim. Sonu görünmeyen bu yolculukta hemrâh olarak yanımda bulunduğundan dolayı sonsuz bahtiyarım. Bu süreçte birçok kez evlatlarımıza hem annelik hem de babalık yaptığın için sonsuz minnettarım.

Çocukluğumdan beri okumamı yazmamı isteyen, eline geçen her imkanla bana yardımcı olan, ismi gibi hayatımı aydınlatan Mahinur babaanneme medyun-u şükranım. Ne yapsam aziz hatırana layık olamam, hakkını ödeyemem.

Her zaman yanımda olduklarını bildiğim, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen hayat sebebim olan aziz annem Tülin DURU ve aziz babam Ahmet DURU’ya sonsuz teşekkürü borç bilirim.

“İlm bir lücce-i bî-sâhildir…Anda âlim geçinen câhildir…” beytiyle de buyrulduğu üzere, son nefese kadar talip olmaya devam etmek dileğiyle…

Mehmet Oğuz DURU
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **vi**

ÖNSÖZ ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **iv**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi 5
1.2. Çalışma Probleminin Tanımı ve Hipotezler 13
1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımları 17
1.4. Çalışmanın Genel Yapısı 26

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **27**

2.1. Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonları 27
2.1.1. Kullanım karbonu 30
2.1.2. Gömülü karbon 32
2.2. Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonu Hesaplamada Yapı Bilgi Modellemesi 39
2.3. Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonları Literatür Taraması 46

3. MATERYAL VE YÖNTEM **60**

3.1. Çalışma Materyali 60
3.1.1. Niteliksel veriler 61
3.1.2. Niceliksel veriler 64
3.2. Çalışma Yöntemi 70
3.2.1. Gömülü karbon değeri hesaplama yöntemi 71
3.2.2. Kullanım karbonu değeri hesaplama yöntemi 76
3.2.3. Öneri kabuk modeli oluşum yaklaşımı 81

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA **86**

4.1. Mevcut Yapının Sayısallaştırılması 86
4.1.1. Mevcut yapı gömülü karbon analizi 86
4.1.2. Mevcut yapı kullanım karbonu analizi 121
4.2. Öneri Kabuk Modelleri 136
4.2.1. EnP-1 Saman esaslı öneri kabuk modeli 143
4.2.2. EnP-2 Kenevir esaslı öneri kabuk modeli 156
4.2.3. EnP-3 Koyun yünü esaslı öneri kabuk modeli 169
4.2.4. EnP-4 Ahşap esaslı öneri kabuk modeli 182
4.2.5. EnP-5 Mantar esaslı öneri kabuk modeli 195
4.3. Bulguların Değerlendirilmesi 208
4.3.1. H1 hipotez sınaması 208

4.3.2. H2 hipotez sınaması 212
4.3.3. H3 hipotez sınaması 213
4.3.4. H4 hipotez sınaması 214

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 217

5.1 Sonuçlar 218
5.2 Öneriler 221

KAYNAKLAR 226

EKLER 237

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ	:	Havanın yoğunluğu (kg/m³)
μ	:	Su buharı difüzyon direnç katsayısı
ψ	:	Bağıl nem
η	:	Kazanç kullanım faktörü
λ	:	Isıl iletkenlik hesap değeri (katsayısı) (W/m.K)
$\phi_{s,ay}$	:	Aylık ortalama güneş enerjisi kazancı (W)
$\phi_{i,ay}$	:	Aylık ortalama iç ısı kazancı (W)
R	:	Isıl geçirgenlik direnci (m².K/W)
$R_{dış}$	:	Dış yüzey ısıl iletim direnci (dış yüzeyde ısı taşınım katsayısı (m².K/W)
$R_{iç}$	:	İç yüzey ısıl iletim direnci (iç yüzeyde ısı taşınım katsayısı (m².K/W)
A	:	Yapı elemanlarının toplam alanı (m²)
A_{top}	:	Binanın ısı kaybeden yüzeylerinin toplam alanı (m²)
c	:	Havanın özgül ısısı (J/kgK)
d	:	Yapı bileşenin kalınlığı (m)
H	:	Binanın özgül ısı kaybı (W/K)
H_v	:	Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı (W/K)
H_T	:	İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı (W/K)
n_h	:	Hava değişim oranı
P_d	:	Yapı bileşeninin dış yüzeyiyle temas halinde olan havanın su buharı kısmi basıncı (Pa)
P_i	:	Yapı bileşeninin oda içindeki yüzeyiyle temas halinde olan havanın su buharı kısmi basıncı (Pa)
P_s	:	T sıcaklığındaki doymuş su buharı basıncı (Pa)
q	:	Isı akış yoğunluğu (W/m²)
Q_{ay}	:	Aylık ısıtma enerjisi ihtiyacı (Joule)
$Q_{yıl}$	:	Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (Joule)
t	:	Zaman (saniye olarak bir ay = 86400x30) (s)
$T_{dış}$	:	Aylık ortalama dış ortam sıcaklığı (°C)
$T_{iç}$	:	Aylık ortalama iç ortam sıcaklığı (°C)
U	:	Yapı bileşenin ısıl geçirgenlik katsayısı (W/m².K)
U_P	:	Pencerenin ısıl geçirgenlik katsayısı (W/m².K)
$V_{brüt}$	:	Binanın ısıtılan brüt hacmi (m³)
V_h	:	Havalandırılan hacim (m³)
V^1	:	Hacimce toplam hava değişim debisi (m³/h)
S_d	:	Su buharı difüzyon-eşdeğer hava tabakası kalınlığı
δ_p	:	Kısmi buhar basıncına bağlı malzemenin su buharı geçirgenliği (kg/msPA)

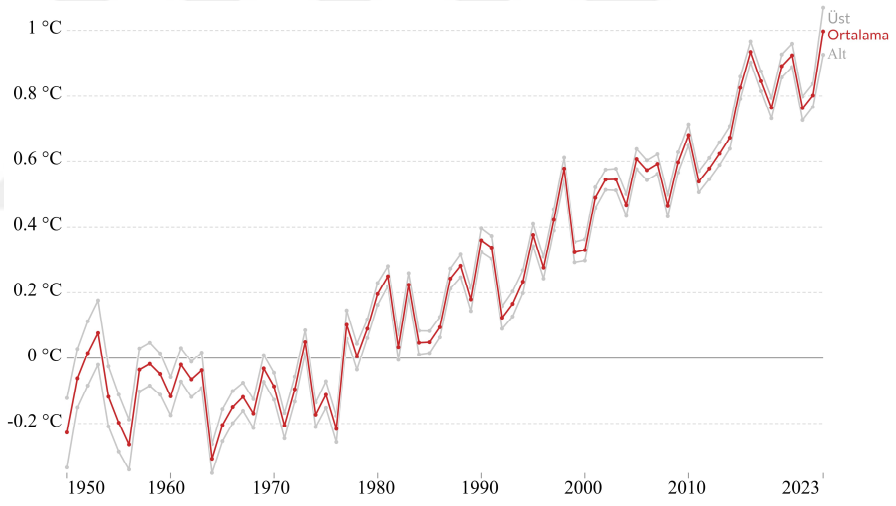
Kısaltmalar

AEC	:	Mimarlık mühendislik yapım (Architecture engineering construction)
CH_4	:	Metan
CO_2	:	Karbondioksit
CO_2eq.	:	Karbondioksit eşdeğeri
DEFRA	:	Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Kırsal İlişkiler Bakanlığı (Department for environment, food and rural affairs)
DfD	:	Söküm için tasarım (Design for disassembly)

EnP	:	Öneri kabuk modeli (Envelope proposal)
EPD	:	Çevresel ürün beyanı (Environmental Product Declaration)
GHG	:	Sera gazı (Greenhouse gase)
GJ	:	Gigajoule
GKA	:	Gömülü karbon analizi
Glulam	:	Tutkallı lamine ahşap (Glued laminated timber)
$GtCO_2$	:	Gigaton karbondioksit
GWP	:	Küresel ısınma potansiyeli (Global warming potential)
IFC	:	Endüstri temel sınıfı (Industry foundation classes)
IPCC	:	İklim değişikliği hükümetlerarası paneli (Intergovernmental panel on climate change)
ISO	:	Uluslararası standartlar teşkilatı (International organization for standardization)
$kgCO_2eq.$	:	Kilogram karbondioksit eşdeğeri
kJ	:	Kilojoule
KKA	:	Kullanım karbonu analizi
KKO	:	Kayıp/kazanç oranı
LCV	:	Alt ısısal değer (Lower calorific value)
MY	:	Mevcut yapı
N_2O	:	Azotprotoksit
NCV	:	Net ısısal değer (Net calorific value)
$tCO_2eq.$	:	Ton karbondioksit eşdeğeri
TJ	:	Terajoule
UCV	:	Üst ısısal değer (Upper calorific value)
VPL	:	Görsel programlama dili (Visual programming language)
YBM	:	Yapı bilgi modellemesi (Building information modeling)
YDD	:	Yaşam döngü değerlendirmesi (Life cycle assessment)

1. GİRİŞ

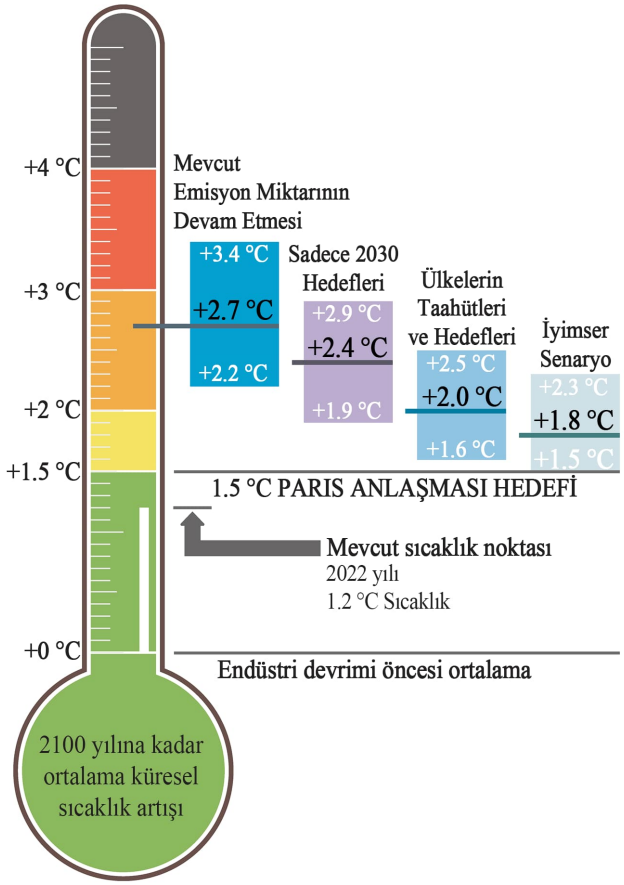
Küresel iklim değişikliği, günümüzde insanlığın karşılaştığı en büyük zorlukların başında yer almaktadır. Gerçekleştirilen birçok çalışmada, küresel iklim değişikliği etkisinin dünya yüzey sıcaklık değerinin 1951 yılından günümüze her on yıllık zaman dilimleri içerisinde 0,12°C artmasına yol açan sebeplerden biri olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.1.). Kuraklık, orman yangınları, deniz ekosisteminin bozulması gibi olumsuz etkiler başta olmak üzere söz konusu değişim; bitkisel üretkenliğin düşmesi, buzulların eriyerek deniz seviyelerinin yükselmesi ve birçok canlı yaşam alanlarının yok olması gibi geniş ölçekte çevresel tehlikelerin meydana gelme sıklığını ve büyüklüğü artırmıştır. İnsan kaynaklı (antropojenik) faaliyetlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan sera etkisi oluşturacak gazlara sahip emisyonlar, küresel sıcaklık değerinin artışını hızlandıran en önemli faktör olarak tanımlanmaktadır (Zinzi ve ark., 2020).



Şekil 1.1. 1950'den günümüze küresel sıcaklık artışı (OurWorldinData, 2023a)

İklim değişikliği konusunda çalışma yapan bilim insanları, sanayi devriminden günümüze devamlı biçimde yükselen küresel sıcaklık değerinin zirveye ulaşmadan sınırlandırılabilmesi ve dünyanın soğumasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi durumunda iklim değişikliği kaynaklı olumsuz etkilerin önüne geçilebileceğine inanmaktadır (King, 2017). Bu inancın bir yansıması olarak, karbon eşdeğeri gazlar olarak tanımlanan sera gazları için, değinilen olumsuz etkisinin azaltılabilmesine yönelik, uluslararası platformlarda bazı anlaşma ve hedefler belirlenmiştir. Küresel sıcaklık artışını en çok 1,5°C ile sınırlandırarak, birçok olumsuz etkiyi de beraberinde ortaya

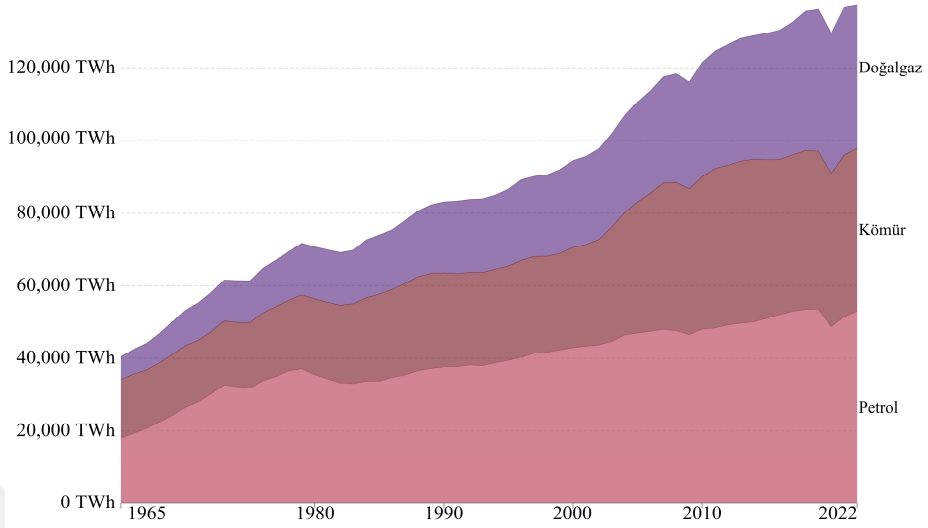
çıkaran sıcaklık yükselişinin 2°C'nin altında kalması hedefiyle Aralık 2015 yılında Paris İklim Anlaşması, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar Konferansı (COP21) kapsamında imzalanmıştır. Söz konusu sıcaklık artış sınır değeri, uluslararası bilim çevreleri tarafından yaygın biçimde kabul gören 2°C'lik eşik noktasına yönelik belirlenmiştir (Şekil 1.2). Paris İklim Anlaşması'na ek olarak, Birleşmiş Milletler (BM) tarafından, 2016 yılı başlarında "Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 Gündemi (The 2030 Agenga for Sustainable Development)" üst başlığıyla 17 adet "Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi" ilan edilmiştir (BM, 2016).



Şekil 1.2. Bazı senaryolara göre 2100 yılına kadar küresel sıcaklık artış tahmini (CAT, 2022)

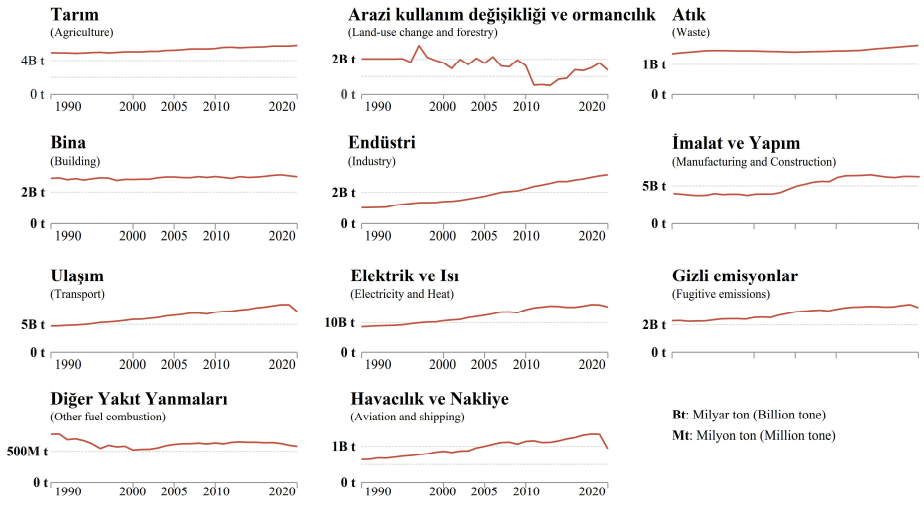
İnsanlığın mal ve hizmet üretiminde gerekli olan enerji, küresel iklim değişikliğine yol açan sera etkisine sahip gazların emisyonunun ana sorumlusudur. Günümüzde insanlığın gerek duyduğu enerji için kullanılan kaynaklar, artan çevresel kaygılara rağmen, halen bünyesinde yüksek miktarda karbon bulunduran fosil temelli yakıtlardan elde edilmektedir. Küresel ölçekte en fazla enerjinin elde edildiği, sürdürülebilir ve yenilenebilir olmayan söz konusu fosil yakıtlar yaklaşık olarak; %32,8

petrol, %27,2 kömür ve %20,9 doğalgazdan oluşmaktadır (Pacheco-Torgal, 2017). Son 50 yıldır fosil yakıt kullanımı devamlı olarak artmıştır (Şekil 1.3)



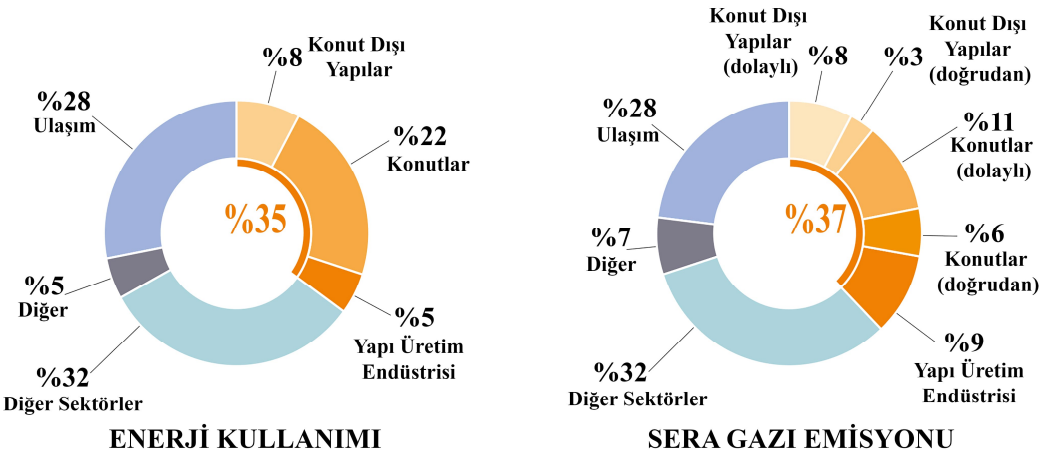
Şekil 1.3. 1965'ten günümüze yakıt türüne göre fosil yakıt kullanımı (OurWorldinData, 2023b)

Dünya genelinde yapılan çevresel istatistikler ve ölçümler, günümüzde çözülmeyi bekleyen en önemli iklimsel sorun olarak insan kaynaklı faaliyetler sonucu sera etkisi oluşturan emisyonları işaret etmektedir. İnsanoğlunun kullanımı için mal ve hizmet üretimi gerçekleştirilen bütün sektörlerde, iklim değişikliğinin telafisi mümkün olmayan sonuçlarıyla mücadele edilebilmesi ve kontrol altına alınabilmesi amacıyla sera gazı etkisi oluşturan emisyon değerlerinin azaltılması artık bir gereklilik olmaktan çıkmış ve zorunluluk haline gelmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. 1990'dan günümüze sektörlere göre sera gazı emisyonu (OurWorldinData, 2023c)

Genel olarak, Karbondioksit (CO_2), Metan (CH_4) ve Azotprotoksit (N_2O) gazlarının birleşiminin oluşturduğu, karbondioksit eşdeğer gaz (CO_2eq) olarak da bilinen sera gazı salınımının yaklaşık üçte birinin sorumlusu yapı sektörüdür. Dolayısıyla yapı sektörü, iklim değişikliği etkisinin azaltılmasında önemli bir potansiyele sahiptir. BM aracılığıyla gerçekleştirilen çevre raporları, küresel üretilen toplam enerji miktarının yaklaşık %35'nin yapı sektörü paydaşları tarafından tüketildiğini belirtmektedir. Başta yapı malzemesi üretimi olmak üzere, yapım faaliyetleri, inşa edilen yapının işletme ve bakımı ve ömrünü tamamlamış yapının yıkımı gibi farklı yaşam döngüsü aşamaları, değinilen enerji tüketiminin başlıca sebepleri olmaktadır. Yapının farklı yaşam döngüleri için girdi olarak kullanılan enerji, işlem sonucunda çıktı olarak büyük miktarda karbondioksit eşdeğer gaz üretmekte ve yeryüzündeki sera etkisinin hızlanmasına neden olmaktadır. Yapı sektörü, ifade edilen büyüklükte bir enerji tüketime bağlı olarak küresel sera gazı salınımının yaklaşık %37'inden sorumlu tutulmaktadır (Şekil 1.5) (UNEP, 2023a).



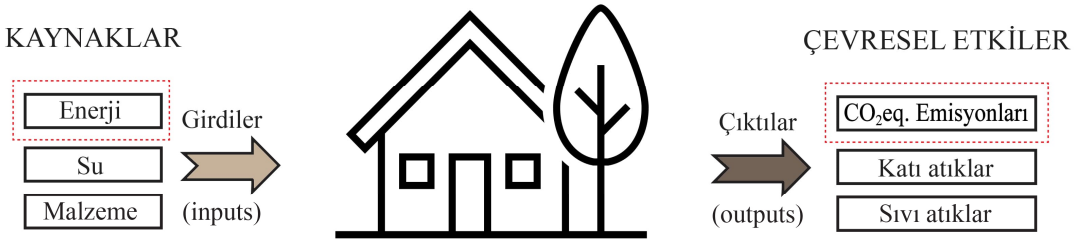
Şekil 1.5. Yapı sektörü enerji kullanımı ve sera gazı emisyonu (UNEP, 2023a)

Nüfus artışıyla birlikte, paralel bir artış gösteren yeni yapı üretim çalışmaları ve hali hazırdaki yapıların işletilmesi için ihtiyaç duyulan enerjinin oldukça verimsiz kullanılması, enerji tüketiminin doğrudan artmasına neden olmakta ve atmosfere bırakılan sera gazı seviyesinin yükselmesiyle sonuçlanmaktadır. Birçok bilimsel çalışmada, yeni ve mevcut yapıları yönelik uygulama ve yönetim politikalarında, enerji tüketimini azaltarak sera gazı emisyonunu düşüren bir yaklaşımın benimsenmemesi durumunda, önümüzdeki 20 yıl içinde yapı sektörü kaynaklı sera gazı emisyon miktarlarının yaklaşık iki katına çıkacağı ön görülmektedir (Rezaei ve ark., 2019). İşaret

edilen bu durum, Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından hazırlanan bir raporda da ele alınmaktadır. Bütün dünya genelinde günlük yaklaşık olarak 200 bin yeni yapı üretilmekte ve buna bağlı biçimde enerji talebi yükselmektedir. Bu durum, 2010-2020 yılları arası enerji tüketim artışı referans alınarak, 2035 yılına dair enerji tüketim tahmininin gerçekleştirilmesini imkanlı hale getirmiştir. Küresel ölçekte enerji kullanımını 2010 yılında 20.1 trilyon kilowatt saat (kWh) iken, 2020 yılında 25.5 trilyon kWh olmuş ve 2035 yılında 35.2 trilyon kWh olması beklenmektedir (IEA, 2018).

1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Gündelik yaşamın devamının sağlanabilmesi için hayati öneme sahip olan enerji, ülkeler için birincil derecede önem arz etmektedir. Özellikle son on yılda küresel olarak yaşanan enerji arz güvenliği endişesi, birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeleri enerji tüketiminde sınırlandırarak önemli tedbirler almaya yöneltmektedir. En temel ihtiyaç olan barınma gereksinimini sağlayan konut üretiminden kapsamlı endüstriyel tesislerin üretimine kadar gerçekleştirilen bütün inşa faaliyetlerini içine alan yapı sektörü, yüksek enerji tüketerek, atmosfere büyük miktarda sera gazının bırakılmasına neden olmaktadır. Şekil 1.6'daki grafikte ifade edildiği üzere yapı üretim sürecinde, girdiler (inputs) olarak enerji, su ve malzeme yer alırken, proses sonucunda çıktılar (outputs) olarak CO_2eq. gaz emisyonları, katı ve sıvı atıklar meydana gelmektedir.



Şekil 1.6. Bir yapı üretim faaliyetinde yer alan girdi ve çıktılar

Şekil 1.6'da şematize edilen yapım prosesinde meydana gelen CO_2eq. emisyonu gömülü karbon (embodied carbon) olarak tanımlanırken, inşa aşamaları tamamlanarak devreye alınan (commissioning) yapının hizmet ömrü boyunca termal konfor şartları başta olmak üzere, aydınlatma konforu, cihaz kullanımı, sıcak kullanım suyu ihtiyacı gibi birçok faaliyet için gerekli enerji tüketiminin neden olduğu CO_2eq. emisyonuna da

kullanım karbonu (operational carbon) denilmektedir. Yapı sektöründe ihtiyaç duyulan enerjinin verimli kullanılması, sadece kullanım aşamasındaki enerji tüketimini azaltmaya yönelik değil aynı zamanda yapım öncesi süreçlere de dikkat edilmesi anlamına gelmektedir. Böylelikle hem gömülü karbon miktarı azaltılacak hem de servis süresi boyunca yapı kaynaklı kullanım karbonu düzeyi düşürülebilecektir.

Avrupa Birliği (AB) ülkeleri başta olmak üzere birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülke, enerji verimliliği ve sera gazı emisyonu azaltımı politikalarını benimseyerek çalışmalar yürütmektedir. Örneğin, AB ülkelerinde enerji performansına yönelik çıkarılan "Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD-Energy Performance of Building Directive)" ve direktifin 2018 yılına kadar olan bütün güncellemelerinde yeni yapılara yönelik yüksek enerji performansına vurgu yapılmıştır (Moran ve ark., 2020). Ancak, 2018 yılıyla birlikte güncellenen EPBD, 2050 yılına kadar AB üye ülkelerinde mevcut yapı stokunun CO_2eq. gaz salınımını azaltan ve yüksek enerji verimliliği sağlayan enerji iyileştirme (energy retrofitting) faaliyetlerinin desteklenmesini uzun dönem stratejisi olarak zorunlu hale getirmiştir.

Yeni yapı üretmek yerine mevcut yapı stokunun enerji verimliliğinin iyileştirilerek kullanılması, hali hazırdaki yapının üretim süreçleri bütününde atmosfere zaten salınmış olan, iklim değişikliği etkisini artıran sera gazlarının yeni bir yapı üretimiyle tekrar salınmasını engellemektedir. Yeryüzü yüzey sıcaklığını artıran sera gazı salınımının azaltılması sayesinde sadece çevresel kazanımlar elde edilmemekte aynı zamanda ekonomik ve sosyal birçok fayda sağlanmaktadır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. Mevcut yapı stokunu kullanmanın sağlayacağı faydalar

Çevresel Faydalar	Ekonomik Faydalar	Sosyal Faydalar
-Enerji kazanımları ve sera gazı salınımlarının azaltılması -Daha az yapı malzemesi kullanımı	-İş imkânı sağlama -Gayri safi yurt içi hasıla (GSYH) ve kamu bütçesine olan faydaları -Sektörel yenilenme -Enerji güvenliği -Üretkenliğe olan katkılar	-Sağlıklı iç ortam şartları -Enerji yoksulluğunun azaltması -Müreffeh konfor şartlarının oluşması -Enerji faturalarının azalması -Gayrimenkul değerinin yükselmesi ve kiracı-kullanıcı memnuniyeti

Enerji verimliliği sağlanarak korunan mevcut yapı stokunun, çok yakın bir gelecekte ülkelerin hem sera gazı emisyonu miktarını düşüreceği hem de enerji arz güvenliğine oldukça önemli katkılar sağlayacağı ifade edilmektedir.

Yapı sektörü kaynaklı sera gazı etkisi meydana getiren CO_2eq. emisyonlarının dikkate alınmaya başladığı 1980'li yıllarda bir yapıyı ısıtma, soğutma, iklimlendirme ve aydınlatma için gerekli olan enerji girdisinden kaynaklı kullanım karbon miktarının, yapı malzemeleri gibi yapının inşası için gerekli olan birçok faaliyetin yapılabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan enerji girdisinden kaynaklı gömülü karbon değerine kıyasla 10 kat daha büyük olduğu kabul edilmekteydi (Koezjakov ve ark., 2018). Birçok gelişmiş ülke söz konusu bu kabulden dolayı, birbiri ardına gelen standart ve yönetmelik düzenlemeleriyle daha düşük ısıl geçirgenlik katsayısına (U değeri-W/m².K) sahip yapı kabuğu kullanımını zorunlu kılarak, kullanım karbonu değerini azaltmaya yönelik çalışmalar yapmıştır (Resalati ve ark., 2020). Özellikle AB üyesi ülkelerin "Yaklaşık Sıfır Enerjili Bina (nZEB-nearly zero energy building)" hedefleri ve birçok gönüllü girişimin (The Passive House Institute, Zero Energy Ready Home, Factor 4 Buildings vb.) gerçekleştirmiş olduğu çalışmalar verimli sonuçlar üretmiştir. Böylelikle, yapılara ilişkin çıkarılan enerji standart ve yönetmeliklerinde, yapıyı oluşturan kabuk bileşenlerin U değeri düşürülmüş ve dolayısıyla hizmet ömrü boyunca gerekli olan enerji miktarı azaltılan yapı, daha düşük kullanım karbon emisyonu değerine sahip olmuştur (Çizelge 1.2) (Attia, 2018).

Çizelge 1.2. Farklı ülkelerde yapılara ilişkin U değeri değişimi (Resalati ve ark., 2020)

		1985	**2003**	**2007**	**2010**	**2002**	**2018**
Finlandiya	**Duvar** U Değeri (W/m².K)	0,28	0,25	0,24	0,17	0,17	0,17
	Tavan U Değeri (W/m².K)	0,22	0,16	0,15	0,09	0,09	0,09
		2006		**2010**		**2013**	
Birleşik Krallık	**Duvar** U Değeri (W/m².K)	0,35		0,20		0,18	
	Tavan U Değeri (W/m².K)	0,25		0,13		0,13	
		2002	**2004**	**2007**	**2009**	**2014**	**2016**
Almanya	**Duvar** U Değeri (W/m².K)	0,45	0,45	0,45	0,35	0,35	0,28
	Tavan U Değeri (W/m².K)	0,45	0,45	0,45	0,35	0,35	0,28
		2007		**2011**		**2015**	
Avustralya	**Duvar** U Değeri (W/m².K)	0,52-0,30		0,35-0,26		0,35-0,26	
	Tavan U Değeri (W/m².K)	0,37-0,21		0,20-0,16		0,20-0,16	

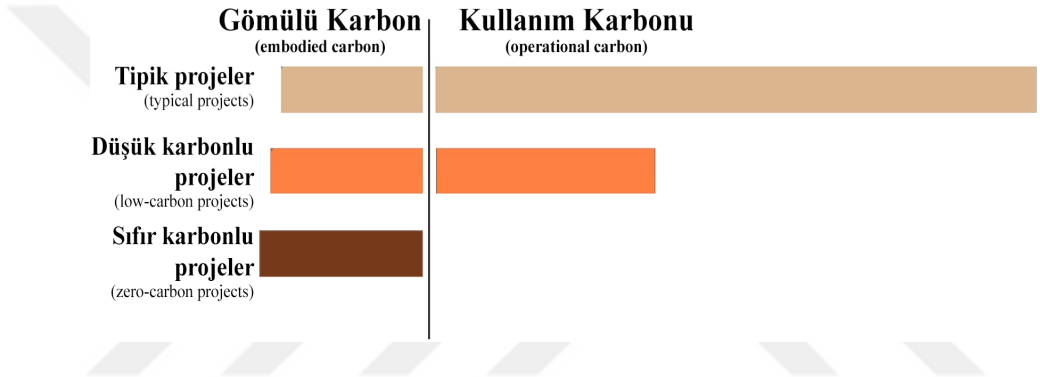
Türkiye, yurt dışındaki pek çok ülkede yapıyı oluşturan kabukların ısıl geçirgenlik katsayındaki iyileştirmeleri benzer şekilde takip etmiştir. Enerji Kimlik Belgesi (EKB) olarak bilenen yapıya ilişkin enerji kullanım miktarını sınırlandırarak sınıflandıran yaklaşım, 5627 sayılı "Enerji Verimliliği Kanunu" kapsamında çıkarılan "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği" uygun olarak yürürlüktedir. Yapı üretiminin yapılacağı mahalli idareye başvurarak yapı ruhsatı alınmak istenen her bir yapı için EKB belgesi beyan edilmek zorundadır. Kullanım enerjisi ve buna bağlı olarak kullanım karbonu değerlerini hesaplamaya yönelik Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği bakanlığı tarafından geliştirilen EKB metodolojisi, yapı kabukları için TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardını esas almaktadır. İlk olarak 1970 yılında yürürlüğe giren TS 825 standardı günümüze yakın olarak 1998, 2008, 2013 tarihlerinde güncellenmiştir. Güncellemelere rağmen hem eski tarihli standartlar (1998-2008) hem de hali hazırda yürürlükte olan (2013) standartta yapı kabukları için izin verilebilir ısıl geçirgenlik katsayıları (U değeri), yurt dışı eşdeğerlerine göre, oldukça yüksektir (Çizelge 1.3) Bu durumun bir sonucu olarak, mevcut konut stoku için sadece yapı kabuklarından izin verilebilir en fazla enerji kayıpları yüksek olmamakta aynı zamanda atmosfere salınarak sera gazı etkisi yapan CO_2eq. gaz emisyonu artmaktadır. Sadece kullanım aşamasına yönelik bir yaklaşımın olduğu EKB, gömülü karbon değerine ilişkin bir tanımlama getirmemektedir.

Çizelge 1.3. Yapı kabuklarının farklı yıllardaki TS 825 standardına göre U değerleri

İklim Bölgesi	**TS 825 (1998)** U değerleri (W/m².K)		**TS 825 (2008)** U değerleri (W/m².K)		**TS 825 (2013)** U değerleri (W/m².K)	
	Duvar	**Tavan**	**Duvar**	**Tavan**	**Duvar**	**Tavan**
1. Bölge	0,80	0,50	0,70	0,45	0,66	0,43
2. Bölge	0,60	0,40	0,60	0,40	0,57	0,38
3. Bölge	0,50	0,30	0,50	0,30	0,48	0,28
4. Bölge	0,40	0,25	0,40	0,25	0,38	0,23
5. Bölge	-	-	-	-	0,36	0,21

Yapı kabuklarının U değerine yönelik yıllar içerisinde yapılmış olan bu iyileştirmeler, kullanım karbon miktarını düşürmüş ancak inşa faaliyetleri sırasında daha fazla yapı malzemesi kullanılmasına sebebiyet vererek gömülü karbon değerini yükseltmiş ve sonuç olarak gömülü karbon/kullanım karbonu oranında önemli biçimde değişikliğe neden olmuştur. Devamlı artan yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ve yapılara ilişkin sürekli iyileştirilen standart-yönetmelikler, kullanım süreçleri boyunca

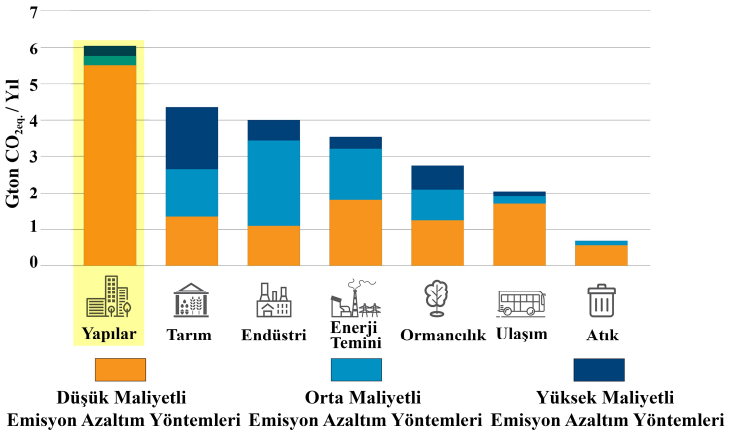
yapı kaynaklı karbon emisyonunu azaltırken enerji verimliliği çalışmaları doğrultusunda artan yalıtım katman kalınlıkları başta olmak üzere pek çok yaklaşım, kullanım öncesi evredeki faaliyetler için gerekli olan enerji kullanımının artmasına yol açarak gömülü karbon emisyon değerini yükseltmiştir. Enerji verimliliği çalışmalarını hızla sürdüren birçok AB üyesi ülkede yapılar için, 2030 ve 2050 yılı projeksiyonlarında sıfır kullanım enerjine sahip olacağı dolayısıyla kullanım kaynaklı karbon emisyonunun gerçekleşmeyeceği belirtilmektedir. Bahsedilen durumun gerçekleşmesi halinde, bir yapının devreye alınmadan önceki aşamalarında ihtiyaç duyulan (yapı malzemesi, üretim süreci, teknik araçların kullanımı vb.) enerji kaynaklı bir karbon salınımı (gömülü karbon) olacağı anlamına gelmektedir (Şekil 1.7) (RICS, 2012).



Şekil 1.7. Enerji verimliliği sayesinde değişen gömülü/kullanım karbon oranı (RICS, 2012)

Türkiye, yapı endüstrisinde kullanılan birçok yapı malzemesini kendi üretmesine rağmen, üretim sürecinde gerekli olan enerjiyi öz kaynaklarından karşılayamamaktadır. Yıllık cari açığın en önemli bileşenlerinden birini enerji harcamaları oluşturmaktadır. Bu yüksek giderin ekonomi üzerinde oluşturduğu baskıdan başka ayrıca sürekli farklılaşan jeopolitik riskler, enerji arz güvenliğini de tehdit eden bir başka bileşen olmaktadır. Son yıllarda artan yenilenebilir enerji arzındaki fazlalaşmaya rağmen, bir yapının hem inşa aşamalarında hem de kullanım-işletilme devrelerinde hâkim enerji kaynakları fosil yakıt türlerinden oluşmaktadır. Kendi sınırları içerisinde fosil enerji kaynakları bulunmakla birlikte gerekli ihtiyacı karşılamak için yeterli olmayan Türkiye, yüksek maliyetler ile ithal ettiği enerjisini verimli kullanması gerekmektedir. Bu yaklaşımın gerçekleştirilebilmesi yalnızca yapı sektöründe değil bütün sektörlerde verimlilik çalışmalarını gerektirmektedir. Ancak diğer sektörlere göre yapı sektörü, enerji verimliliği yöntemlerinin en az maliyet ile hayata geçirilebilmesine olanak sağlama niteliğine sahiptir. Böylelikle yapı sektöründe enerji verimliliğine yönelik atılacak

adımlar, hem en az maliyete sahip olacak hem de en fazla sera gazı etkisi oluşturan CO_2eq. emisyonun azaltılmasını sağlayacaktır (Şekil 1.8) (WRI, 2016).



Şekil 1.8. Farklı sektörlerde enerji verimliliği maliyet kıyası (WRI, 2016)

Enerji başta olmak üzere devamlı yükselen girdi maliyetleri, yapı sektörü içerisinde %85'in üzerinde bir paya sahip olan konut üretimini ve fiyat istikrarını etkilemektedir. Çevresel kaygılarla birlikte, inşaat birim fiyatlarının da yükselmesi mevcut konut stoku kullanımının gerekliliğine işaret etmektedir. Yeni konut üretimi Türkiye ekonomi bütçesine önemli bir katkı sağlamakla birlikte, yukarıda bahsedilen açıklamalar doğrultusunda, mevcut konutların enerji verimli duruma getirilerek kullanımı yeni konut üretiminden çok daha fazla ve kapsamı geniş bir kazanım sağlayabilecek potansiyeli barındırmaktadır. Özellikle ülkemiz konut stokunun enerji kullanım miktarı yüksek ve karbon emisyon yoğunluğu fazla olan beton(arme) malzemeden üretildiği göz önünde bulundurulursa, başta çevresel ve ekonomik yarar olmak üzere elde edilebilecek kazanımların büyüklüğü kolaylıkla anlaşılmaktadır.

Buraya kadar ifade edilen açıklamaların yol göstericiliğinde doktora tez çalışmasının birinci amacı; "ülkemiz mevcut konut stokunun enerji verimliliğinin artırılmasını sağlayacak, prefabrik olarak üretilebilen biyolojik esaslı bir yapı kabuğu model önerisi" getirmektedir. Doktora tezi kapsamında önerilen yapı kabuğu modeliyle;

- Günümüz yapı üretiminde oldukça yaygın kullanıma sahip olan yapı malzemeleri (çimento ve alçı sıvalar, tuğla, gaz beton, doğal taş vb.) yerine sürdürülebilirlik anlayışı üzerine temellenmiş olan biyolojik esaslı yapı malzemesi kullanımı teşvik etmek,
- Çevresel etkisi düşük, üretiminde atmosfere salınan en az CO_2eq. gaz miktarına sahip ve bünyesinde karbon depolayabilen ekolojik bir malzeme tercih etmek,

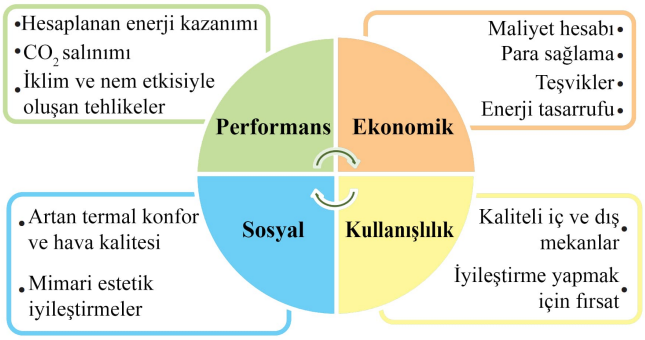
- Mevcut konut yapılarına ait kabukların yüksek olan ısıl geçirgenlik katsayısının (U değeri), birçok uluslararası standart ve yönetmelikte tanımlanmış olan düşük U değerine yakın, biyolojik esaslı bir kabukla değiştirilerek, servis ömürleri boyunca ihtiyaç duyacağı enerji miktarını düşürerek, kullanım karbonu emisyonunun azaltılmasına katkıda bulunmak,
- Mevcut konutların strüktürü oluşturan, üretimlerinde yoğun enerji kullanılarak büyük miktarda sera gazının atmosfere salınmasına neden olan betonarme taşıyıcı elemanların korunarak, küresel çapta hissedilen iklim değişikliği etkisiyle mücadeleye katkıda bulunmak,
- Gelişmiş geleneksel yapım sistemiyle şantiye sahasında (on-site) imalat yerine, fabrika ortamında yapılan (off-site) prefabrik panel tekniğiyle yalnız enerji girdileri ve çevresel atıkların (katı-sıvı-gaz) azaltılması değil aynı zamanda hızlı ve hassas bir şantiye imalatı gerçekleştirmek,
- Kabuğu değiştirilmiş mevcut konutun yaşam ömrü sonunda (end of life) yapıya eklemiş olan prefabrik kabuğun tekrar sökülerek bir başka yapıda veya enerji elde etmek amacıyla kullanımı gerçekleştirilerek döngüsel ekonomiye (circular economy) katkıda bulunmak,
- Enerjide dışarıya bağımlı olan ülkemizin yapı sektörü kaynaklı enerji giderlerinin azaltılarak, ithal edilen enerji miktarının düşürülmesine ve cari açığın azaltılmasına katkıda bulunmak,
- Bitkisel kökenli ürünlerin fabrika ortamında işlenmesiyle yapı sektöründe bileşen olarak kullanımına imkân sağlanarak aynı anda birden fazla sektörde ekonomik hareketlilik oluşturmak ve yerel üretim tesislerinin açılmasıyla istihdama katkıda bulunmak,
- Sadece mevcut yapılar değil aynı zamanda yeni yapı üretiminde de kullanımının sağlanmasıyla, günümüz yapı üretiminde oldukça yaygın kullanıma sahip olan yapı malzemelerinin aksine niteliksel olarak daha ölçümlenebilir, çevresel kaygılara sahip, ekonomik ve uzmanlaşmış-nitelikli iş gücüyle üretilen konutların meydana getirilmesine katkı sağlamak,
- Yıllar içerisinde doğal dış ortamın fiziksel etkilerine maruz kalarak yıpranmış olan mevcut yapı kabuğunun değiştirilmesiyle, gayrimenkul değerinin yükselmesi, kiracı-ev sahibi memnuniyetine katkı sağlamak,

gibi önemli kazanımlar alt amaçlar olarak belirlenmiştir.

2050 yılına kadar enerji talebinde yıllık olarak %0,3 ve sera etkisi oluşturan CO_2eq. gaz emisyonunda yıllık olarak %0,1-0,3 oranında artış beklenmektedir. Bütün bu etkenler yapı sektöründe yeni yapı üretmek yerine, enerji iyileştirmesi yapılarak mevcut yapıların kullanılmasını gerektirmektedir. Mevcut yapıların enerji verimliliğinin artırılarak kullanımı, her yıl yaklaşık olarak 616 milyon metrik ton ($616x10^6$ tCO_2eq.) sera gazı salınımının azaltılmasına katkı sağlayacağı tahmin edilmektedir (Chang ve ark., 2020). Küresel sıcaklık artışının tersine çevrilebilmesi için en çok 1,5°C sıcaklık artış sınırı yaklaşımını benimseyerek, mevcut konut yapılarını yıkmadan kabuk değişimi için model önerisi getiren doktora tez çalışmasının önemini iki başlık altında belirtmek mümkündür.

- **Sürdürülebilir bütüncül yaklaşımla enerji iyileştirmesi gerçekleştirme**

Doktora tezi öneri modeli, sürdürülebilirliğin üç ana ayağı (3 pillars) olan sosyal, ekonomik ve çevresel yaklaşımı içermektedir. Yeni bir yapı üretmek yerine var olan yapının korunarak enerji verimli hale getirilmesi, söz konusu yapının başta fiziksel ve termal performans göstergesi olmak üzere pek çok niteliğinin artmasına neden olacaktır. Böylelikle bu yaklaşım, sosyal, ekonomik ve çevresel değerler üretilmesini sağlayarak verimli bir döngü (virtuous cycle) üretecektir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Sürdürülebilir bütüncül yaklaşımla sağlanacak faydalar

- **Yerli imkanlar ile prefabrik kabuk üretiminin yapılabilmesi**

Türkiye İnşaat Malzemeleri Sanayicileri Derneği (İMSAD)'nin 2023 yılında hazırlamış olduğu sektör raporuna göre, 2022 yılı içerisinde 10,48 milyar dolarlık yapı malzemesi ithalatı gerçekleştirilmiştir. Bu değer, bir önceki yıla göre %21,8 artmıştır. 2021 yılında ithalat birim fiyatları 2,84 dolar/kg. olurken 2022 yılında 2,94 dolar/kg. değerine yükselmiştir (İMSAD, 2023). Türk lirası karşısında sürekli yukarı yönlü tırmanış gösteren döviz üzerinden gerçekleşen söz konusu ithalat, ülke ekonomisini

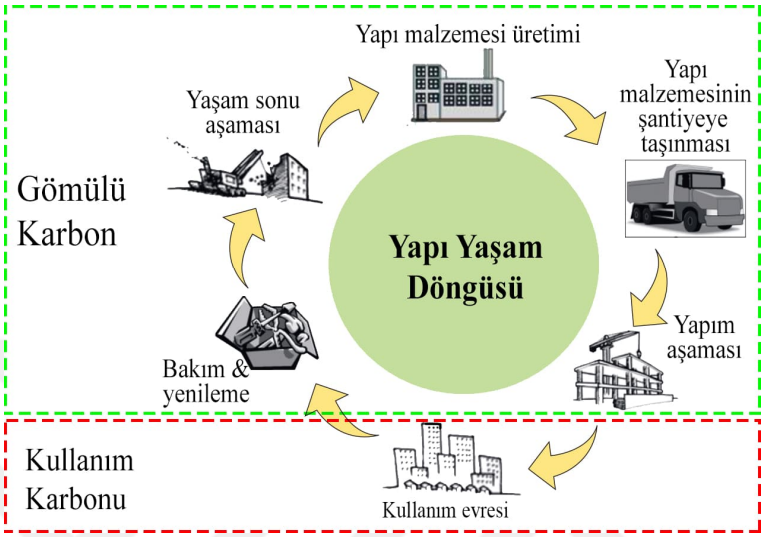
olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte, yurt içinde üretimi gerçekleştirilen yapı malzemeleri için en önemli girdi olan enerji de çok büyük oranda yurt dışından ithal edilmektedir. Doktora teziyle önerilen prefabrik esaslı yapı kabuğu modeli ise tamamen biyolojik esaslı olarak tarım yan ürünü olarak elde edilebilmektedir. Bünyelerinde karbon depolayabilen bu ürünlerin kullanımı gelişmiş makine ekipmanları, yoğun otomasyon bileşenleri gibi kapsamlı sermaye yatırımlarına ihtiyaç duymadan gerçekleştirilebilmektedir. Önerilen kabuk bileşenlerinde yer alan bütün yapı malzemeleri ülkemizde yerli imkanlarla temin edilebilmektedir. Böylelikle öneri kabuğu oluşturan katmanlar prefabrik olarak kolaylıkla üretilebilecektir.

1.2. Çalışma Probleminin Tanımı ve Hipotezler

Birçok farklı işleve sahip yapılar, strüktür olarak bilinen taşıyıcı sistemden bitirme katmanı olan kaplamaya kadar geniş bir çerçevede yapı malzemesi kullanılarak üretilmektedir. Hammadde temininden sonuç ürüne kadar geçen aşamalarda önemli düzeyde enerji girdisine ihtiyaç duyan yapı malzemeleri üretim prosesi, girdi olarak kullanılan enerjinin bir sonucu olarak sera etkisi oluşturan yüksek miktarda CO_2eq. gazın atmosfere salınmasına yol açmaktadır. Özellikle ülkemiz yapı sektöründe hâkim malzeme olan beton(arme) bileşenlerinde yer alan hazır beton (çimento-su-agrega) ve donatı demiri, üretim aşamalarında 1200°C-1400°C arasına ulaşan sıcaklık değerleriyle oldukça fazla enerji tüketimi ve CO_2eq. gaz emisyonu gerçekleştirmektedir (Duru ve Koç, 2018). Ayrıca, beton(arme) malzemenin dışında yapı inşa sürecinde için gerekli olan, kaplama malzemeleri başta olmak üzere, diğer bütün bileşenlerin üretiminde de yukarıda değinilen aşamalar gerçekleşerek sera etkisine sahip CO_2eq. gaz emisyonu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, devreye alınarak kullanım evresine hazır hale getirilen bir yapı, gömülü karbon olarak ifade edilen, büyük miktarda CO_2eq. gazın atmosfere salınmasına neden olmaktadır (Şekil 1.10).

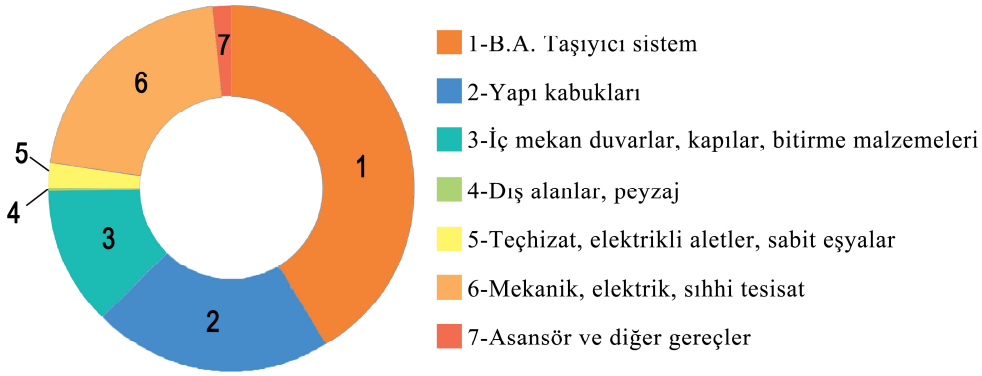
İnşa edilmiş her bir yapı ürünü, atmosfere sera etkisi oluşturan gazların salınmasına, katı ve sıvı atıkların oluşumuna neden olmuştur. Söz konusu çevresel etkiler meydana getirilmiş ve yapı üretilerek son kullanıcının hizmetine verilmiştir. Yukarıda değinildiği üzere, özellikle betonarme strüktürü oluşturan yapı malzemeleri yüksek miktarda çevresel etki oluşturmuştur. Çalışmanın giriş ve amaç bölümlerinde ifade edilmeye çalışılmış olan sürdürülebilir bir gelecek, enerjinin verimli kullanılması ve çevresel etkilerin azaltılmasına bağlıdır. Bu durumda, enerji verimliliğine sahip yeni

yapılar üretmekle birlikte mevcut yapılarında enerji verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik faaliyetlerin yapılması gerekmektedir. Enerji verimliliği çalışmalarında, hali hazırda birçok çevresel etkiye yol açılarak üretilmiş mevcut yapıların, iyileştirilmesi yeni yapı üretmekten çok daha fazla avantaj barındırmaktadır.



Şekil 1.10. Yapının yaşam süreçleri ve karbon emisyonları (Shadram, 2018)

Hali hazırdaki bir konut yapısını oluşturan her bir yapı elemanı girdi olarak enerji kullanılarak imal edilmiştir. Dolayısıyla bu yapı elemanları çıktı olarak çevresel etki meydana getirmiştir. Gerçekleştirilen birçok araştırma, bir yapıyı oluşturan bütün bileşenlerin çevresel etkisinin değişebildiğini belirtirken, yapıyı oluşturan elemanlar içerisinde en fazla çevresel etkiye sahip bileşenin betonarme strüktürel sistem olduğuna işaret etmektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Yapının bileşenlerinin gömülü karbon emisyonuna etkileri (Simonen, 2017)

Doktora tez çalışmasında, oldukça yüksek çevresel etkiye yol açarak üretilmiş olan ve fakat enerji verimliliğine sahip olmayan mevcut konutların enerji performansının iyileştirilmesi ana araştırma problemi olarak tespit edilmiştir.

Doktora tez çalışmasının ana problemi çözümüne yönelik günümüzde en temel yaklaşım biçimi olarak yapı dış kabuklarında ısı yalıtım uygulaması yapılmaktadır. Ancak, enerji verimliliğini artıran bu uygulama ekolojik ve sürdürülebilir değildir. Isı yalıtım uygulamalarında tercih edilen yapı malzemeleri bir başka çevresel etki meydana getirmektedir. Üretimlerinde yüksek miktarda enerji ihtiyacı duyan söz konusu ısı yalıtım malzemeleri benzer şekilde yine yüksek oranda CO_2eq. gazların atmosfere salınmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla çevresel etkileri oldukça fazla ve sürdürülebilir olmaktan çok uzakta olan bu yaklaşım, doktora tez çalışmasının ana problemine bir çözüm değildir. Ülkemiz mevcut konut stokunda saptanarak, ana araştırma problemi kabul edilen sorun, doktora tezi kapsamında önerilen model aracılığıyla çözülmeye çalışılmıştır.

Doktora çalışmasının yönünü belirleyerek sınırlarının çizilmesine yardımcı olan ana araştırma problemi, araştırma kapsamında ele alınmış olan temel sorunsalın çözümü tez araştırma sorularıyla desteklenmiştir.

Tez Araştırma Soruları;

- Betonarme taşıyıcı sistem yüksek miktarda gömülü karbon içerir mi?
- Betonarme taşıyıcı sistem ve düşey kabuk bileşenlerin çevresel etki değerleri birbirine yakın mıdır?
- Mevcut yapılarda düşey kabuk değişimi gömülü karbon miktarını artırır mı?
- Mevcut yapılarda düşey kabuk değişimi enerji verimliliği sağlar mı?
- Biyolojik esaslı yapı malzemeleri bünyelerinde karbon tutarak atmosfere salınan CO_2eq. gaz miktarını azaltabilir mi?
- Biyolojik esaslı yapı malzemeleri bünyelerinde yaklaşık olarak birbirlerine benzer değerde mi karbon depolamaktadır?
- Mevcut bir yapının düşey kabuğunun biyolojik esaslı kabuklarla değiştirilmesiyle ne kadar miktarda CO_2eq. gazın atmosfere salınması engellenmiş olur?
- Enerji verimliliğine sahip yeni bir yapı üretmek yerine, mevcut bir yapının biyolojik malzemelerle üretilmiş bir düşey kabukla enerji verimli hale getirilmesi çevresel etki bağlamında benzer midir?

Ana çalışma problemi, probleminin önemine vurgu yaparak niçin bu araştırmanın yapılacağını ifade eden ve soru haline getirilen tez araştırma soruları, çalışmanın ana hipotezini ortaya çıkarmıştır. Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilmiş bütün çalışmalar ana hipotezin ışığında yürütülmüştür. Doktora tezi ana hipotezi (H1) aşağıdaki gibidir;

H1: Yapılarda taşıyıcı sistem yüksek miktarda gömülü karbon içermektedir. Enerji verimliliğini önceleyen yeni yapılar üretmek yerine mevcut yapıların strüktürü korunarak, biyolojik esaslı malzemelerle düşey kabuk değişiminin yapılması, hem atmosfere salınan karbon miktarını azaltır hem de kullanım enerjisi verimliliği sağlar.

Metinsel olarak ifade edilen H1 hipotezi, doğruluk-yanlışlık kontrolü amacıyla matematiksel bir formülasyon biçimine dönüştürülmüştür (Şekil 1.12). Böylelikle elde edilen sonuçları kıyaslamada matematiksel değerler kullanılabilmiştir.



Şekil 1.12. Çalışma ana hipotezinin (H1) matematiksel formüle edilmiş ifadesi

H1 hipotezine ek olarak, tez çalışmasının bütünlüğü içerisinde başka alt hipotezlerde belirlenmiş ve doğrulukları araştırılmıştır. Diğer alt hipotezler şöyledir;

H2: Yaklaşık ±%1 farkla U (W/m².K) değerine sahip farklı biyolojik esaslı yapı malzemelerinden üretilmiş öneri kabuk modelleri değişken gömülü karbon değerine sahiptir.

H3: Mevcut yapıların düşey kabuk U (W/m².K) değerinde gerçekleştirilen iyileştirme kullanım karbonu değerini azaltarak enerji verimliliği sağlar.

H4: Biyolojik esaslı yapı malzemeleri, günümüzde yapı sektöründe sıklıkla kullanılan yapı malzemelerine (tuğla, gaz beton, çimento veya alçı esaslı sıvalar, yalıtım malzemeleri, kompozit kaplamalar vb.) göre düşey yapı kabuğu inşasında çok daha düşük karbon emisyonuna neden olur.

Ana araştırma problemine çözüm önerisi getirmek için gerçekleştirilen doktora çalışması, yukarıda ifade edilen dört adet hipotez doğrultusunda test edilmiştir.

1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımları

Yapı sektörünün bir sonuç ürünü olan yapılar, yapı malzemesinden oluşmaktadır. Her bir yapı malzemesinin üretimi için enerji gerekmektedir. Üretim prosesine girdi olarak eklenen enerji ise çıktı olarak CO_2eq. gazlar, katı ve sıvı atıklar oluşturmaktadır. Dolayısıyla mevcut bir yapı, kullanılan malzemelerine bağlı olarak atmosfere büyük miktarda sera etkisi oluşturan ve gömülü karbon olarak da bilinen CO_2eq gazlar salınımına neden olarak inşa edilmiş demektir. Benzer şekilde mevcut yapıların işletilmesi için de ihtiyaç duyulan enerjiden kaynaklı bir kullanım karbonu salınımı söz konusudur. Mevcut yapılarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik öneri kabuk modelleri getiren bu çalışmada; mevcut yapı seçimi, gömülü ve kullanım karbonu hesabı başta olmak üzere birçok sınırlılık ve varsayım bulunmaktadır. Söz konusu bu sınırlılıklar aşağıdaki başlıklar altında ifade edilmiştir.

- **Mevcut yapının yapım tarihine ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Öneri kabul modellerin uygulanacağı mevcut yapı, 2000-2010 yılları arasında inşa edilmiş yapılarla sınırlandırılmıştır. Belirtilen yıllar arasında, 1998 yılında Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı olan TS 825 kendinden önceki versiyonuna göre yenilenmiş ve yine 2008 yılında ise 1998 versiyonu güncellenmiştir. Bütün versiyon güncellemelerinde, yapı kabuklarında izin verilen ısıl geçirgenlik katsayısı (U değeri) oldukça değişiklik göstermiştir. 2013 yılında güncellenen ve halen yürürlükte olan TS 825 standardı ise hem opak hem de saydam yapı kabuklarında, 1998 ve 2008 güncellemelerine göre daha düşük bir U değeri ile sınırlandırılmıştır. 2000 yılında Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından Binalarda Isı Yalıtım yönetmeliği yürürlüğe alınmıştır. 2007 yılında ilan edilen Enerji Verimliliği Kanunu uyarınca yapılarda enerji kullanımının sınırlandırılması ve enerji verimliliği sağlamaya dönük politika geliştirilmesinin önemi artmıştır. Ancak ülkemiz yapı üretimine ilişkin kanun, yönetmelik benzeri değişliklerle devreye alınan politikaların, yapı sektöründe uygulamaya konulması belirli bir zaman almaktadır. Dolayısıyla sınırlandırılan zaman diliminde inşa edilmiş olan mevcut yapılara ait kabukların, enerji verimliliğini artırmaya yönelik bir kalite iyileştirmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Söz konusu durumun geçerliliği, sınırlandırılan tarihler arasında üretilmiş pek çok yapının daha sonradan ısıl performansını artırmaya

yönelik yalıtım uygulamalarının gerçekleştirilmesiyle görülebilmektedir. Sınırlandırılan tarih aralığındaki yapılar şu an 13 ile 23 yaş aralığında bulunmaktadır. Dolayısıyla bu yapılar, fiziksel çevre koşullarının yıllar içerisindeki yıpratıcı etkisine oldukça fazla maruz kalarak kapsamlı bir bakım ve onarıma da ihtiyaç duymaktadır. Benzer şekilde, sınırlandırılan tarih aralığının öncesindeki yapıların da hem kabuk ısıl performans kalite eksikliği hem de fiziksel yıpranmışlığı olmasına rağmen kapsam dışı bırakılmıştır. Bu yaklaşımın nedeni, 1999 Gölcük depremi öncesi yapı üretiminde mühendislik hizmetleri yeterliliğinin tartışılmasıdır. Sadece mühendislik hizmetleri değil aynı zamanda strüktürel elemanları oluşturan temel bileşenler olan demir ve beton malzemelerin üretim ve şantiye sahasındaki imalat teknolojilerindeki yetersizlikler, 2000 yılı öncesinde üretilmiş olan yapıları kapsam dışı bırakılmasının bir başka sebebi olmuştur.

- **Mevcut yapı strüktürel bileşenlerine ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Doktora tez araştırması kapsamında 2000-2010 yılları arasında inşa edilmiş yapıların strüktürel bileşen kalitesinin yeterli olduğu kabul edilmiştir. “Mühendislik hizmeti alarak, denetimli bir uygulamanın yapıldığı binalarda yeterli taşıma kapasitesi vardır” ön kabulüyle, enerji verimliliğini artırmaya yönelik geliştirilen öneri kabul model uygulaması gerçekleştirilmiştir. Biyolojik esaslı yapı malzemelerinin kullanıldığı öneri kabuk modelleri, günümüz yapı sektöründe çoğunlukla yer alan (tuğla, gaz beton, çimento veya alçı esaslı sıvalar, yalıtım malzemeleri, kompozit kaplamalar vb.) malzemelere oranla oldukça hafiftir. Alan çalışmasında irdelenen yapının hali hazırdaki düşey kabuk ve öneri kabuk modellerine ait birim hacim kütleleri arasındaki fark, mevcut yapının ağırlığını azaltarak, yatay yükler kaynaklı olumsuz sonuçların en az düzeyde oluşmasına katkıda bulunması beklenmektedir.

- **Mevcut yapı kat adedine ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Öneri kabuk modellerinin uygulanacağı yapı kat adetleri en az 3 ve en çok 5 kat olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Genel itibariyle uluslararası literatürde biyolojik esaslı yapı kabuğu yaklaşımları düşük veya orta katlı yapılar (low or mid-rise buildings) üzerinden gerçekleştirilmektedir. Özellikle ahşap çerçeve veya panel malzemeler kullanılarak 11 kat ve üzeri yapılar inşa edilmiş olmasına rağmen çalışma kapsamında aero-dinamik hesaplamalar yapılmayacağı için akademik literatürde sıklıkla tercih edilen az katlı konut yapıları tercih edilmiştir. Mevcut konut yapıları için sera etkisi oluşturan CO_2eq. gazların yeniden salınımına yol açmadan enerji verimliliğini artırmaya yönelik çözüm önerilerine odaklanarak ekolojik ve sürdürülebilir fayda sağlamayı hedefleyen

çalışma, rüzgâr ve deprem yükleri gibi başka çalışmaların konusu olabilecek ve ileri mühendislik hesapları gerektiren faktörleri ihmal etmiştir.

- **Mevcut yapının sayısallaştırılmasına ilişkin sınırlıklar ve varsayımlar**

Doktora tezi kapsamında tespit edilen ana problemin çözüm arayışı için geliştirilen ana hipotezin (H1) test edilmesine yönelik sorgulama amacıyla üretilen formülasyon ve diğer alt hipotezler (H2-H3-H4) için mevcut yapının, sadece gömülü ve kullanım karbonu miktarları olarak değil aynı zamanda diğer fiziksel özellikleri açısından da matematiksel hale getirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım bağlamında mevcut yapı, düşey dış kabuğunu oluşturan opak ve saydam bileşenleri haricinde tamamen korunmuştur. Öneri kabuk modelleri sadece düşey dış kabuk bileşenleri olan opak ve saydam elemanlar için oluşturulmuştur. Mevcutta olan tavan ve taban kaplamaları aynı şekilde bırakıldığı varsayılarak sayısallaştırma yapılmıştır. Mevcut yapının gömülü karbon hesabı için dikkate alınan bileşenler, betonarme strüktür ve düşey dış kabuktur. Betonarme strüktüre ait gömülü karbon hesabı, hazır beton ve donatı demiri bağlamında yapılmıştır. Benzer şekilde düşey kabuk için ise opak ve saydam yüzeyler ayrı ayrı ele alınmıştır. Mevcut yapının mimari ve statik projeleri ilgili belediyeden temin edilmiş ve yapı bilgi modellemesi yazılımı olan Autodesk Revit içerisine aktarılmıştır. Statik proje üzerinden kalıp planına bağlı olarak farklı çaplarda kullanılmış toplam donatılar miktarı, Microsoft Office 365-Excel yazılımında üretilen bir çalışma sayfası aracılığıyla hesaplanmıştır. Yine kalıp planına bağlı olarak kullanılmış olan toplam beton miktarı da Autodesk Revit içerisindeki üretilmiş modelden elde edilmiştir. Sökülecek olan mevcut düşey kabuk gömülü karbon hesabında ise mimari projede yer alan yalıtım (izolasyon) detayları esas alınmıştır.

Mimari projedeki yalıtım detayları, söz konusu tarihte yürürlükte olan TS 825 standardına göre verilmiştir. Ancak, detayların bazı katmanları kopyala-yapıştır yaklaşımıyla yazıldığı için hatalı olduğu tespit edilmiş, yerinde görsel inceleme neticesinde, yine TS 825'e uygun, malzeme tercih edilmiştir. Bu değişiklik durumu sadece dış cephe kaplamasında yer alan iki katman için gerçekleştirilmiştir. İki katmanı değiştirilmiş düşey kabuk, tavan ve taban kaplamalarında kullanılan katmanlar, TS 825 standardında belirtilen fiziksel nitelikler (ısıl iletkenlik hesap değeri-λ, birim hacim kütlesi) dikkate alınarak kullanım karbonu hesabı gerçekleştirilmiştir. Öneri kabuk modellerinin mevcut yapıya uygulanması esnasında hali hazırdaki iç duvarlar ve balkon parapetlerinde oluşacak değişiklikler çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Prefabrik olarak hazırlanmış öneri kabuk modeller, şantiye sahasında gerçekleştirilecek

uygulamalar ile mevcut yapının iç ve balkon parapet duvarları ile sorunsuz birleştiği varsayılmıştır.

- **Öneri kabuk modeli oluşumlarına ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Bir yapı kabuğunda U değeri (W/m².K) olarak tanımlanan ısıl geçirgenlik katsayısının yükseltilebilmesi için birçok yöntem vardır. Bunların en başında ısıl dirençleri (R-m².K/W) fazla olan, yani ısıyı az ileten malzemelerin kullanılması gelmektedir. Biyolojik esaslı malzemeler ile prefabrik olarak tasarlanan öneri kabuk modelleri, salt bir yalıtım kalınlığı artırmaya bağlı olarak U değerini azaltma yaklaşımı üzerine kurgulanmamıştır. Eğer sadece yalıtım kalınlığına bağlı olarak bir yöntem seçilmiş olsaydı, malzemenin üretiminde izin verilen sınırlar içerisinde en fazla kalınlık kullanılarak en üst düzey performans sağlanabilirdi. Ancak, öneri kabuk modelleri tek başına yalıtım katmanı olarak düşünülmemiştir. Bir bütün olarak, hem düşük U değerine sahip olacak hem de bünyesinde en fazla karbon depolayabilecek özellikleri içeren bir yaklaşımla üretilmiştir. Dolayısıyla U değeri ve gömülü karbon miktarı birbirine bağlı değişken olarak ele alınmıştır. Öneri kabuk modelleri U değerleri yaklaşık aynı değere sahip olursa, öneri kabuk modellerin katmanlarını oluşturan biyolojik esaslı yapı malzemelerinin gömülü karbon değerlerini içeren çevresel etkileri kıyaslamak imkanlı hale gelmektedir. Yaklaşık aynı U değerine sahip olan öneri kabuk modelleri benzer miktarda kullanım karbonu salınımına neden olmaktadır. Böylelikle öneri kabuk modelleri arasında sadece gömülü karbon değerlerine göre bir sıralama potansiyeli elde edilmekle kalınmaz aynı zamanda H2 hipotezi de test edilmiş olur. İfade edilen bu yaklaşım gerçekleştirilebilmesi için ilk başta düşük U değeri için bir sınırlandırma konulmuştur. 2000-2010 yılları arasında yapılan mevcut konut yapılarının enerji verimliliğini artırmak amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada öneri kabuk modelleri için kabul edilen üst sınır U değeri 0,150 W/m^2.K'dir. Söz konusu bu sınır, Passive House Institute tarafından en soğuk iklim bölgesi opak yapı kabuğuna yönelik en çok izin verilen değerdir. Dolayısıyla 0,150 W/m^2.K ısıl geçirgenlik katsayısına sahip düşey kabuk, uluslararası düzeyde kabul görmüş bir enerji verimliliği gösterebilecektir. Sınırlandırılan U değerine ilaveten bütün öneri kabuk modeller, iç yüzeylerinde görsel olarak günümüzdeki konut yapılarında sıklıkla tercih edilen yapı malzemelerinden farklılaşmamak adına toprak esaslı sıva katmanları ve dış yüzeylerinde ise atmosferin fiziksel şartlarına dayanaklı ve yine görsel olarak günümüzdeki konut yapılarının dış cephe etkisinden uzaklaşmamak amacıyla mantar esaslı bir sıva katmanı olacak biçimde bir yaklaşımla tasarlanmıştır. Bu sınırlılık ve varsayımlar sayesinde öneri kabuk

modelleri, bir yalıtım katmanı artırma işlemi olmaktan çıkmış, bünyesinde karbon depolayarak sera gazı emisyonunu azaltan ve uluslararası standart da geçerliliği olan bir U değerine sahip, prefabrik düşey cephe bileşenlerine dönüşmüştür. Değinilen açıklamalara ek olarak, doktora tezinin ilgili bölümlerinde öneri kabuk modellerinin diğer katmanlarının oluşumu açıklanmıştır.

- **Öneri kabuk modelleri üretim ve uygulama teknik detayına ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Biyolojik esaslı yapı malzemelerinin kullanıldığı öneri kabuk modellerinde yapı fiziği temel ilkeleri göz önüne alınarak katmanlaşma yapılmıştır. Öneri kabuk modellerinde ana taşıyıcı çerçeve endüstriyel ahşap ürünü GLULAM olarak bilinen malzeme kullanılmıştır. Geliştirilen öneri kabuk modellerinde yer alarak katmanları oluşturan bütün yapı malzemeleri, üreticilerinin tanımladığı kalınlık ve nitelikte kullanılmıştır. Bu tanımlara uygun oluşturulan öneri kabuk modellerin mevcut yapı üzerine aktarımı, yapı bilgi modellemesi yazılımı olan Autodesk Revit ortamında gerçekleştirilmiştir. Öneri kabuk modellerinin çatkısını oluşturan ahşap taşıyıcı çerçevenin, mevcut betonarme döşeme üzerinde yer alarak taşıtılması yaklaşımı benimsenmiştir. Çalışmanın ilgili bölümlerinde öneri kabuk modellerine ilişkin detaylar aktarılmıştır. Bununla birlikte, hem öneri kabuk modellerin kendi katmanları arasında hem de mevcut yapıyla birleşiminde gerekli olan taşıyıcı-tutucu kenetler, bağlantı metal bileşenleri gibi yardımcı elemanlar kapsam dışı bırakılmıştır. Öneri kabuk modellerinin mevcut yapıyla ilişkisi temel prensip detaylarıyla sınırlandırılmıştır. Yine öneri kabuk modelleri uygulamasında mevcut yapıda yer alan kapı-pencere boşluk ölçüleri hiçbir değişikliğe uğramamıştır. Ancak, kapı ve pencerelere ilişkin net ölçülere sahip boşluklar düşey ve yatay elemanlarla ahşap çatkı içerisinde oluşturulmuş ve fakat birleşimlerine (kasa, kanat, cam, denizlik) ilişkin detayları kapsam dışı bırakılmıştır. Dolayısıyla çalışmanın temel yaklaşımı, bilinen teknik detayların yeniden tekrarlanmasından daha çok yapı fiziğine şartlarını yerine getirerek enerji verimliliği sağlayan ve bünyesinde karbon depolayabilen öneri kabuk modelleri üretilmesi olmuştur.

- **Gömülü karbon hesabına ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Doktora tezi araştırma problemi çözümü kapsamında mevcut yapıyı meydana getiren malzemelere ilişkin gömülü karbon hesabı, çevresel ürün beyanı (EPD-environmental product declaration) verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir yapı ürününün geniş kapsamlı çevresel etkilerini içeren EPD verileri, ISO 14000 ve EN 15804 grubu uluslararası standartları çerçevesinde yaşam döngüsü metodolojisi (YDD)

kullanılarak üretilmektedir. Günümüzde artan çevresel kaygılar, birçok yapı malzemesi üreticisini üretmiş oldukları ürünlerine yönelik çevresel ürün beyanı verisini beyan etmeyi zorunlu kılmıştır. Özellikle uluslararası düzeyde kullanımı fazla olan yapı malzemeleri için birçok farklı üreticinin EPD verisine erişmek mümkündür. Bir yapı malzemesi için beyan edilmiş EPD verileri, YDD metodolojisi kullanılarak yapının bütün yaşam evrelerine (A-B-C-D modülleri) yönelik gerçekleşmiş olan katı, sıvı ve gaz biçimdeki çevresel etki değerlerini içermektedir. Ancak, doktora tezi kapsamında yapı malzemesine ilişkin çevresel etki değerleri sadece A1-A2-A3 modülü ve küresel ısınma potansiyeli (GWP-global warming potential) ile sınırlandırılmıştır. Bu sebepten dolayı EPD verilerinden sadece A1-A2-A3 modüllerinde gerçekleşmiş küresel ısınma potansiyeli (GWP) barındıran toplam CO_2eq. gazların emisyon miktarı alınmıştır. EPD verileri, endüstriyel proses sonucu ortaya çıkan yaklaşık 24 farklı çevresel etki başlığını barındırır. Havaya, toprağa, suya yönelik olumsuz etkiler olarak tanımlanabilecek bu başlıklar içerisinde havaya yani atmosfere yönelik etki olan "Küresel Isınma Potansiyeli" (GWP-global warming potential) değerleri doktora tezi çalışmasında kullanılmıştır. GWP değeri, bildirilen birim kadar yapı malzemesi üretiminde atmosfere salınmış olan sera gazı etkisine sahip emisyon miktarıdır.

A1-A2-A3 modülü beşikten kapıya (cradle to gate) olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, yapı malzemesine ilişkin hammaddenin temini, fabrika sahasına taşınması ve paketleme dahil üretimini ifade etmektedir. Dolayısıyla üretimi yapılmak istenilen yapı malzemesi için gerekli olan hammaddenin olduğu, dünyanın herhangi bir yerinde aynı endüstriyel proses gerçekleştirildiğinde aynı miktarda karbondioksit eşdeğer gazı (CO_2eq.) ortaya çıkmaktadır. Doğruluğu ve kıyaslanabilirliği en yüksek olan yaşam döngüsü değerlendirmesi modülleri A1-A2-A3 olmaktadır. Yapının yaşam döngülerini içeren diğer modüller (A4-A5-B-C-D) ise mutlaka bir kullanım senaryosuna göre temellendirilerek sera gazı emisyon değeri bulunmaktadır. Söz konusu bu yaklaşım uluslararası literatürde de sıklıkla kullanılan "UpFront Carbon" (ön-karbon) hesaplama yaklaşımımıdır. Çalışma içeriğinde hipoteze ilişkin önermenin sayısallaştırılmasında gömülü karbon hesabı, EPD verileri ışığında UpFront Carbon yaklaşımıyla sınırlandırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Sadece mevcut yapıda değil öneri kabuk modellerinde de birçok farklı yapı malzemesi bulunmaktadır. Bu malzemelerin gömülü karbon değerleri EPD verilerinde farklı bildirilen birimlerde (declared unit) kullanılabilmektedir. Örneğin, harçlar kilogram türünden hesaplanırken, yalıtım malzemeleri m^2 esaslı olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla birim karışıklığının önüne

geçmek amacıyla mevcut yapı kabuğunun ve öneri kabuk modellerinin opak kısımları m^3 birim üzerinden değerlendirilmiştir. Gömülü karbon hesabı, her bir yapı malzemesinin m^3 birim başına $kgCO_2eq.$ olarak hesaplanmıştır. Saydam bileşenleri oluşturan yüzeyler, cam ve doğrama olarak ayrılmamış, tek başına toplam (overall) bir değer alınmış ve m^2 birim başına $kgCO_2eq.$ olarak hesaplamıştır. EPD verileri küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerini $kgCO_2eq.$ biriminde vermiş olduğu için doktora çalışmasında da aynı birim kullanılmış daha sonra elde edilen değerlerin sadeleştirilmesi amacıyla $tCO_2eq.$ ($kgCO_2eq./1000$) birimine çevrilmiştir. Hem mevcut yapı hem de öneri kabuk modeller için gömülü karbon değeri hesaplamasında EPD verileri kullanılmıştır. Ancak, mevcut yapıyı oluşturan yapı malzemeleri sadece ülkemizde değil uluslararası düzeyde sıklıkla kullanıldığı için daha fazla EPD verilerine sahipken biyolojik esaslı yapı malzemeleri için aynı durum geçerli değildir. Geniş kullanıma sahip yapı malzemelerine oranla biyolojik esaslı yapı malzemeleri yapı sektöründe oldukça yenidir. Ayrıca her biyolojik esaslı malzeme üreten endüstriyel kuruluş EPD verisine de sahip değildir. Söz konusu bu durumdan dolayı, mevcut yapıyı oluşturan malzemelere yönelik en az beş farklı EPD verisinin ortalaması GWP değeri olarak varsayılmıştır. Biyolojik esaslı yapı kabuğunda kullanılan malzemeler ise endüstriyel üreticisi tarafından beyan edilmiş ve uluslararası standartlara uygun tek bir EPD verisinden elde edilen GWP değeri ile sınırlandırılmıştır. Yapı sektörü için üretilmiş ve hali hazırda kullanılan biyolojik esaslı yapı malzemelerinin tercih edilmesine yönelik bu sınırlandırma, çalışma sonuçlarının doğruluğuna katkı sağlayacaktır.

- **Kullanım karbonu hesabına ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen kullanım karbonu hesabı sadece yapı kabuklarında gerçekleşen ısı kaybının karşılanması için gerekli olan enerji kaynağının neden olduğu emisyon ile sınırlandırılmıştır. Devreye alınan yapılarda kullanıcı kaynaklı birçok eylem için enerji tüketilmektedir. Söz konusu enerjisinin çıktısı olan $CO_2eq.$ gazlar kullanım karbonu olarak tanımlanır. Bu araştırmada kullanım karbonu hesabı, TS 825 metodolojisiyle elde edilen ısı kaybının karşılanmasında kullanılan doğalgaz emisyonu ile sınırlı tutulmuştur. Bu nedenle kullanım karbonu hesabında sadece ısıtma enerji hesaplanmıştır. Kabuklardan gerçekleşen ısı kaybı için gerekli olan doğalgaz miktarı ve doğalgaz kaynaklı $CO_2eq.$ gaz emisyonları, Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) ve Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Kırsal İlişkiler Bakanlığı (Department for Environment, Food and Rural Affairs-DEFRA) veri tabanlarından elde edilmiş ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yaklaşım

iki sebepten dolayı gerçekleştirilmiştir. Birincisi, mevcut yapıda soğutma amacıyla kullanılabilen herhangi bir iklimlendirme aracı bulunmamaktadır. İkincisi ise, ülkemiz konutlarında soğutma amacıyla kullanılan araçların elektrik enerjisiyle çalışmasıdır. Elektrik enerjisi ikincil bir enerji kaynağı olmasından dolayı birçok farklı birincil enerji kaynaklarından elde edilebilmektedir. Son yıllarda ülkemizde güneş enerjisi başta olmak üzere birçok sürdürülebilir enerji çalışmaları devreye alınmıştır. Sürdürülebilir enerji kaynakları da merkezi elektrik ağına verilerek, hane halkı kullanımına sunulmaktadır. Dolayısıyla, kullanım kaynaklı karbon emisyonu sadece ısı enerjisi için gerekli olan doğalgaz temelli hesaplanmıştır. Ayrıca, mevcut yapının bünyesinde bulunan diğer elektrikli araç-gereçler sabit kaldığı varsayılmış, bunlar için TS 825'in tariflediği konut kullanımındaki iç kazanç olan An x 5 W/m² standart sabiti hesaplamaya dahil edilmiştir. Termodinamik ilkeler bağlamında, bir iç mekânın ısıtılmasında gerekli olan enerji kullanımı azaltılıyorsa benzer şekilde soğutulması içinde kullanılan enerji miktarı da azalmaktadır. Mevcut yapılara uygulanacak öneri kabuk modellerinin sahip olduğu iç ve dış mekân arasındaki yüksek ısıl direnci sayesinde yalnız ısıtma için değil aynı zamanda soğutma içinde gerekli olan enerji kullanımı azalacak buna bağlı olarak kullanım karbon emisyon miktarının da daha az olacağı tahmin edilmektedir.

- **Yapı malzemeleri fiziksel özelliklerine ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Yapı malzemeleri, doktora tez araştırmasında gömülü ve kullanım karbonu değerleri hesaplarını oluşturan temel öğelerdir. Dolayısıyla yapı malzemelerine ilişkin başta karbondioksit eşdeğer gaz salınım miktarı (CO_2eq.) olmak üzere ısıl iletkenlik hesap değeri-katsayısı (λ-W/m.K), su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) ve birim hacim kütlesi (kg/m³) gibi birçok fiziksel verilerin bilinmesi gerekmektedir. Mevcut yapıda kullanılan yapı malzemelerine ait fiziksel özellikler, mimari projede yer alan ısı yalıtım detaylarına göre, TS 825 içerisinde yer alan Ek-E'den elde edilmiştir. Gömülü karbon değerinin elde edilmesindeki temel yaklaşım olan birim m³ başına kgCO_2eq. değeri hesaplamasında, yapı malzemelerine ilişkin birim hacim kütleleri oldukça önemlidir. Mevcut yapının gömülü karbon değeri hesabında birim hacim kütleleri (kg/m³) TS 825 Ek-E içerisinden elde edilirken, öneri kabuk modellerinin birim hacim kütleleri (kg/m³) ilgili EPD verisinden alınmıştır. Benzer şekilde kullanım karbonu hesabından mevcut yapının ısıl iletkenlik hesap değerleri (λ-W/m.K) ve su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) değerleri için TS 825 verileri, öneri kabuk modelleri içinse EPD verilerinde yer alan bilgiler kabul edilmiştir.

- **Saydam bileşenlere ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Saydam yüzeyler, düşey kabuk bileşenleri olup hem mevcut yapı kabuğunda hem de öneri model kabuklarında yer almıştır. Mevcut yapı kabuğunda yer alan saydam bileşen boyutları ve yönlere bağlı olarak adetleri öneri kabuk modellerinde de aynı şekilde korunmuş ve uygulanmıştır. Saydam bileşenlerin esasını oluşturan cam yapı malzemesi için tespit edilmiş olan ortalama GWP, hem mevcut yapı hem de öneri kabuk modelleri için tek bir değer olarak kullanılmıştır. Mevcut konut yapısı düşey kabuk saydam bileşenleri, yalıtım (izolasyon) detaylarına göre ısıcam niteliğinde düz mimari cam malzemedir. Öneri kabuk modellerindeki cam malzemenin de aynı nitelikte olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla saydam yüzeyler için gömülü karbon değeri, hem mevcut yapı hali hazır kabuğunda hem de öneri kabuk modellerinde aynı sonuçlara sahip olmuştur. Ancak, mevcut yapı saydam yüzeyleri için yalıtım (izolasyon) detaylarında belirtilmiş 2,2 W/m².K olan U değeri, konut yapısının üretilmiş olduğu tarihte geçerli olan TS 825 (1998) standardına göre belirtilmiştir. Öneri kabuk modelleri pencere yüzeyleri için söz konusu bu değer, günümüzde geçerli olan TS 825 (2013-U_P=1,80 W/m².K) standardına göre olduğu varsayılmıştır.

- **Maliyet ve ekonomikliğe ilişkin sınırlılıklar ve varsayımlar**

Doktora tezi kapsamında geliştirilerek mevcut konut yapılarında enerji verimliliğini amaçlayan öneri kabuk modellerinde, ekonomik kazanç yerine ekolojik fayda önceliği varsayılmıştır. Bünyelerinde yüksek miktarda karbon depolayabilen orman ve tarım yan ürünü söz konusu malzemelerin büyük çoğunluğu ülkemiz yapı sektörü için endüstriyel olarak üretilmemektedir. Bu durum malzemelerin maliyetini artıran bir faktördür. Ancak, oluşturulacak farkındalıklarla yatırımcıların biyolojik esaslı yapı malzemesi üretimi alanına yönelebileceği varsayılmıştır. Bununla birlikte, ülkemizde artan inşaat maliyetleri nedeniyle mevcut bir yapının yıkılıp yeniden enerji verimliliğine sahip olarak inşa edilmesi, sadece kabuk değişimi yapılarak kullanılmasına maliyet ve ekonomi bağlamında kıyaslandığında ilk durum ikinci durumuma kıyasla sadece maliyet açısından fazla olmamakta aynı zamanda ekolojik bağlamda da olumsuzluk oluşturmaktadır. Dolayısıyla öneri kabuk modellerinde maliyet ve ekonomiklik kapsam dışı bırakılmıştır. Ancak, öneri kabuk modellerinin uygulanacağı yapıların benzer plan şeması ve niteliğe sahip olması, tekrarlı prefabrik panel üretimi sağlayacağı için tek bir yapının yer aldığı parseller yerine yine tekrar eden benzer nitelikte konut yapılarının yer aldığı parseller için varsayılmış ve alan çalışması bu ilke doğrultusunda sınırlandırılmıştır.

1.4. Çalışmanın Genel Yapısı

Mevcut konutların enerji güçlendirmesine yönelik prefabrik esaslı yapı kabuğu için bir model önerisi getirmeyi amaçlayan ve beş ana bölümden oluşan çalışma genel yapısı Şekil 1.13'te yer alan infografik içerisinde belirtilmiştir.

Şekil 1.13. Doktora tez çalışması genel yapısı



2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

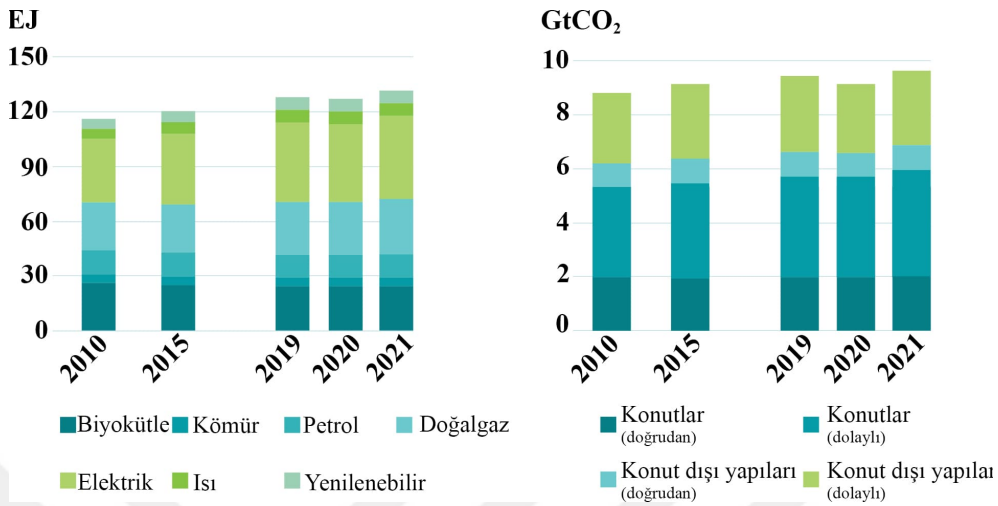
Bu bölümde, doktora tezi araştırma problemi ve problemin çözümüne yönelik geliştirilmiş önerilerde yer alan kavramlar irdelenmiştir. Bununla birlikte kavramların içeriklerinin yanı sıra, söz konusu kavramlar doğrultusunda gerçekleştirilmiş akademik çalışmalar da bu bölümde incelenmiştir. Doktora tezi içeriğine göre kaynak araştırmasının yapıldığı kavramsal çerçeve bölümü; "Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonları", "Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonu Hesaplamada Yapı Bilgi Modellemesi" ve "Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonları Literatür Taraması" başlıklarını içermektedir.

2.1. Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonları

Küresel boyutta gerçekleşen iklimsel değişikliğin potansiyel sonuçları ve şimdiden görülmeye başlanan etkileri, antropojenik sera gazı emisyonlarının azaltılması gerekliliği ve olanakları üzerine yoğun bir araştırmanın başlamasına neden olmuştur. Bu konunun önemi, iklim değişikliği etkisi önleme yöntemlerinin küresel olarak tanımlandığı Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG-Sustainable Development Goals), İklim Değişikliği Hükümetlerarası Paneli (IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change) raporları ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Taraflar Konferansı (COP-Conference of the Parties) çerçevesinde ulusal sera gazı emisyon azaltma önlemlerine yönelik taahhütlerde vurgulanmaktadır. Bu bağlamda yapı sektörü ve yapıların sahip olduğu önem, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP-United Nations Environment Programme), Uluslararası Enerji Ajansı (IEA-International Energy Agency), sürdürülebilir, enerji verimli, çevre dostu yapılar ve yapı sektörü için küresel işbirliğini teşvik eden girişim olan Bina ve Yapı Sektörü için Küresel Birlik (GABC-Global Alliance for Building and Construction) tarafından yayınlanan yıllık durum raporlarında ifade edilmektedir (UNEP, 2023a).

Yapıların kullanımı için gerekli olan enerji kaynaklı CO_2 salınımları, 2021 yılında bir önceki yıl olan 2020'ye kıyasla %5 artarak yaklaşık 10 $GtCO_2$ olarak gerçekleşmiş ve 2019 yılı zirvesi olan 9,6 $GtCO_2$ değerini %2 oranında geçmiştir. Yapı sektörü kaynaklı sera etkisi oluşturan CO_2 gazının emisyonundaki artış, mevcut yapıların genel enerji verimliliğine yönelik yetersiz yapısal değişiklikler olduğuna işaret etmektedir. Yapı sektörü, yapı malzemelerinin üretimi için gerekli enerji kaynaklı emisyon değerleri

dışarıda bırakıldığı halde, küresel CO_2 emisyon miktarının yaklaşık %28'sinden sorumlu tutulmaktadır (Şekil 2.1) (UNEP, 2023b).



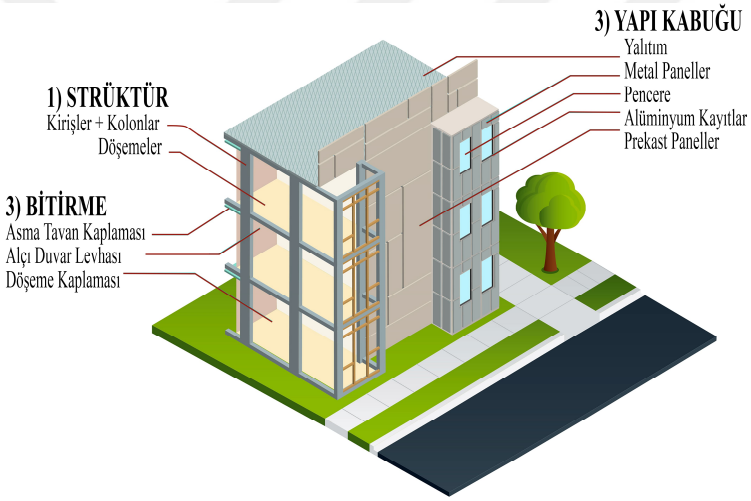
Şekil 2.1. Yapı sektörü yakıt türüne göre enerji tüketimi ve CO_2 salınımı (UNEP, 2023a)

Çevresel sürdürülebilirlik açısından giderek daha fazla önem kazanan kritik bir konu olan yapı sektörü kaynaklı sera gazı (GHG-greenhouse gas) emisyonları iki farklı biçimde sınıflandırılmaktadır. Kullanım karbonu (operational carbon); bir binanın işletme sürecinde, enerji tüketimi yoluyla atmosfere salınan karbon miktarını temsil etmektedir. Isıtma, soğutma, aydınlatma ve diğer enerji talepleri kullanım karbonunun ana kaynaklarıdır. Gömülü karbon (embodied carbon) ise; bir binanın inşası sırasında kullanılan yapı malzemelerinin üretimi, taşınması ve montaj süreçlerinde ortaya çıkan karbon emisyonlarını ifade etmektedir. Yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan enerji, hammaddelerin çıkarılması, taşınması ve işlenmesi süreçleri, gömülü karbonun ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Bir yapı ürününün inşası amacıyla atmosfere salınmış olan gömülü karbon miktarı ile işletim süreci boyunca enerji girdisi kaynaklı oluşan kullanım karbonu miktarı yapının bütün yaşam boyunca karbon ayak izini oluşturmaktadır (Şekil 2.2) (Lewis ve ark., 2021b).



Şekil 2.2. Yapı yaşam döngüsü içerisinde karbon kavramı (Lewis ve ark., 2021b)

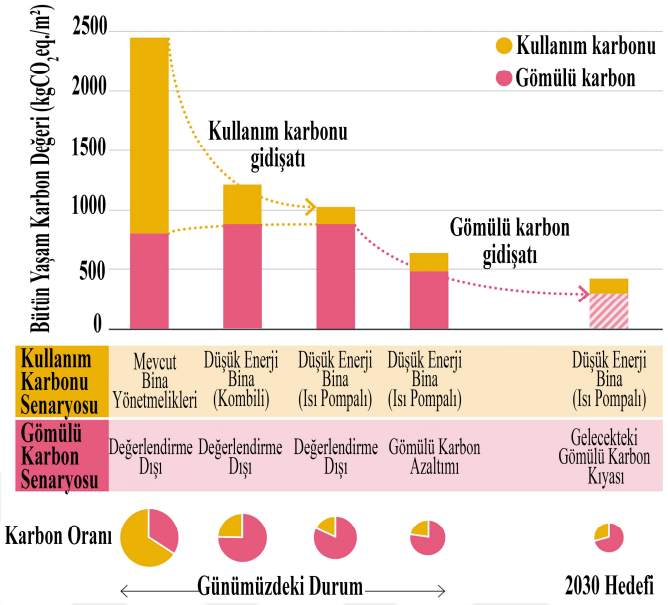
Günümüzde uluslararası düzeyde gömülü karbon araştırmaları hızlı bir şekilde devam etmektedir. Gömülü karbon, herhangi bir belirgin ek maliyet gerektirmeden önemli ölçüde azaltılabilme potansiyeli barındırmaktadır. Gerçekleştirilen bilimsel çalışmalarda, yapı üretimine %1'den daha az maliyet yükleyerek getirilen ilave tedbirler sayesinde %19-%46 arasında değişen bir gömülü karbon azalımı elde edilmiştir. Böylece, gömülü karbon değerini önceleyen mimari tasarım yaklaşımı sayesinde, farklı alternatif yapı malzemeleri ve yapım sistemlerinin değerlendirilmesiyle küresel iklim değişikliğiyle mücadele imkânı elde edilebilmektedir. Mimari tasarımın erken aşamalarında alınacak kararlar, bir yapıyı oluşturan strüktür, yapı kabuğu ve bitirme bileşenlerinde gömülü karbon değerini azaltmaya yönelik önemli fırsatlara dönüşebilmektedir (Şekil 2.3) (Jungclaus ve ark., 2021).



Şekil 2.3. Yüksek gömülü karbon değerine sahip yapı bileşenleri (Lewis ve ark., 2021b)

Özellikle son on yılda, binalarda düşük enerji kullanımına yönelik geliştirilen teknolojiler sayesinde kullanım enerjisi kaynaklı karbon salınımı devamlı olarak azalırken, yapının bütün yaşam dönemlerindeki karbon seviyesi (whole life carbon) içerisindeki gömülü karbon düzeyi yükselmiştir (Şekil 2.4) (LETI, 2020). Küresel sıcaklık eşik değeri olarak Paris İklim Anlaşması'nda belirlenen 1.5°C'nin aşılmasını engellemek için antropojenik CO_2 emisyonlarının 2030 yılına kadar 2010 yılı seviyesinin %45'i oranında azaltılması ve 2050 yılına kadar net sıfır karbon salınımına ulaşılması gerekmektedir (Lewis ve ark., 2021b). Dünya üzerindeki canlılar için hayati öneme sahip olan atmosferdeki karbon miktarının azaltılmasında, yapı sektöründe yer alan bütün paydaşlara önemli görevler düşmektedir. Gömülü karbonun yapıların bütün yaşam

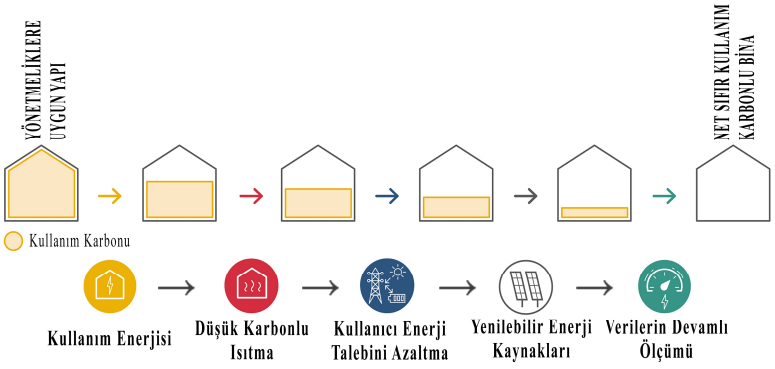
döngüsünde büyük bir orana sahip olduğu bilinmesine rağmen, söz konusu bu miktarın hem hesaplanmasında hem de azaltılma stratejilerinde eksiklikler bulunmaktadır.



Şekil 2.4. Kullanım ve gömülü karbon ilişkisi (LETI, 2020)

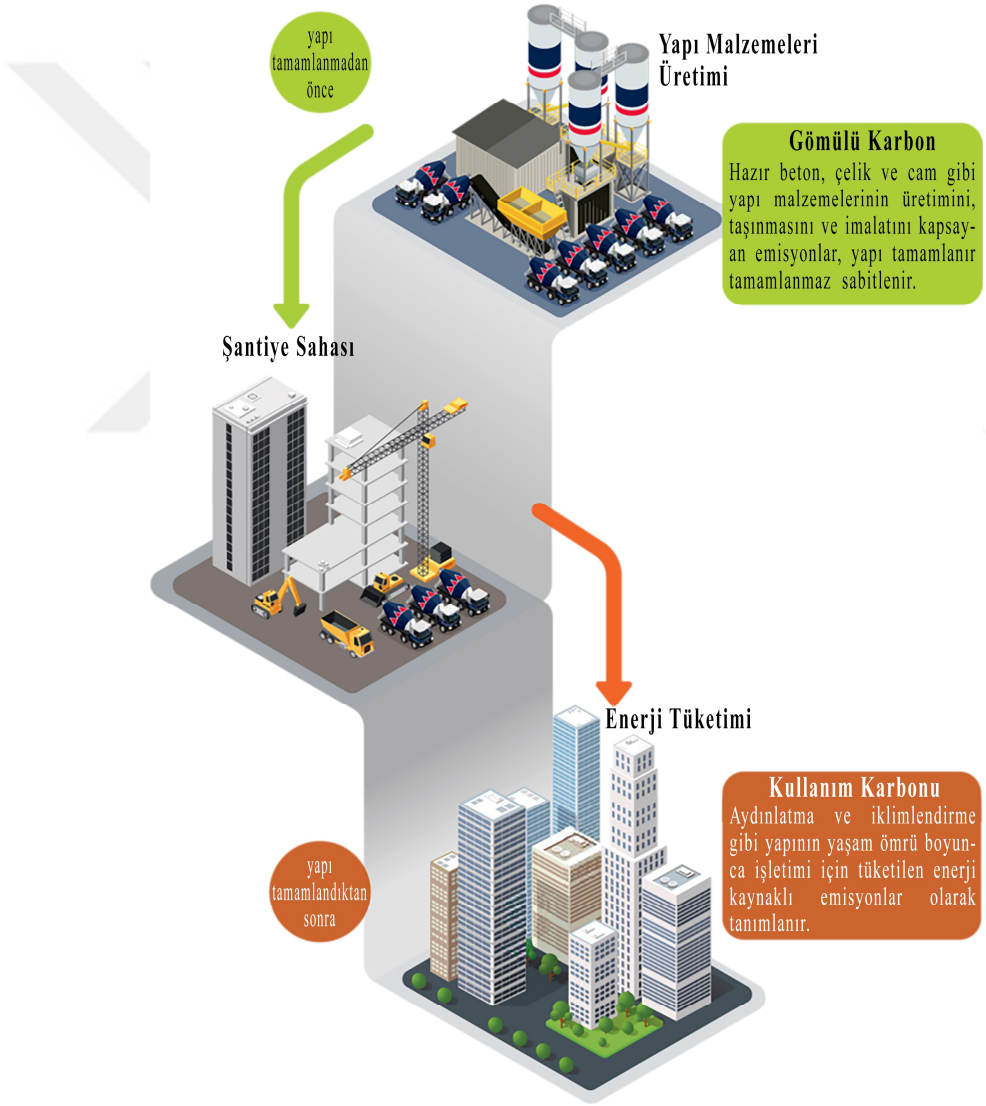
2.1.1. Kullanım karbonu

Kullanım karbonu, ısıtma, soğutma, aydınlatma, sıcak su temini, havalandırma (HVAC-heating, ventilation, and air conditioning) ve elektrikli ev araçları gibi bir yapının kullanım süreci boyunca işletim amacıyla tüketilen enerjiden kaynaklanan salınımdır. Kullanım enerjisinin karbonsuzlaştırılmasına yönelik atılan adımlar, söz konusu enerjiden karbon salınımının azalmasını sağlamıştır. Özellikle yenilebilir enerji kaynaklarının devreye alınması ile kullanım enerjisi kaynaklı karbon emisyonları oldukça azaltılabilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Kullanım karbonu değerinin değişimi (LETI, 2020)

Yapılar, bu sayede hem ulusal enerji şebekesinden (off-site) hem de yapı bünyesinde (on-site) gerçekleştirilen yenilebilir enerji çözümleri sayesinde merkezi enerji ağına en az ihtiyaç duyacak biçimde işletilebilmektedir. “Net Sıfır Kullanım Karbonu (net zero operational carbon)” olarak tanımlanan bu tür yapıların, 2030 yılına kadar birçok gelişmiş ülke yapı stokunda yer alması hedeflenmektedir (LETI, 2020). Kullanım karbonun azaltılmasına yönelik birçok alternatif çözüm bulunmaktadır. Ancak, kullanım karbonunu azaltmaya yönelik her bir adım, gömülü karbon değerini yükseltmektedir. Dolayısıyla karbon salınımını önceleyen bir mimari tasarımın her iki karbon değerini de dikkate alması bir gerekliliktir (Şekil 2.6) (PanUnited, 2023).



Şekil 2.6. Yapı yaşam döngüsünde karbon ayak izi farklılıkları (PanUnited, 2023)

2.1.2. Gömülü karbon

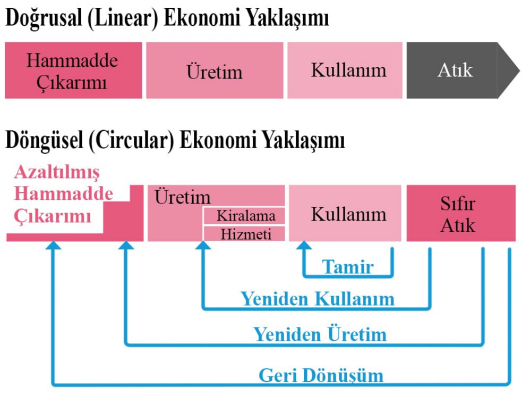
Gömülü karbon; bir yapının inşası, bakımı ve yenilenmesi için gerekli malzemelerin, ürün ve bileşenlerin üretilmesi, işlenmesi ve taşınmasında kullanılan enerji ve endüstriyel süreçlerden kaynaklanan toplam sera gazı (GHG) emisyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçlerden ayrı olarak, yapının kullanım ömrü sonunda yok edilmesi veya rehabilite edilerek yeniden kullanım için enerji tüketimi nedeniyle karbon salınımına yol açan faaliyetlerde gömülü karbon kavramı içerisine dahil edilmektedir. Gömülü karbon, yapının bütün yaşam döngüsü içerisinde yer almaktadır. Bununla birlikte, binaların devreye alınıp (commissioning) işletilmeye başlamadan önce kullanılan yapı malzemesi üretimi ve inşa aşamalarından kaynaklı karbon emisyonları "ön karbon" (upfront carbon) ifadesiyle özel olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.7) (Anderson ve Adams, 2020).



Şekil 2.7. Yapı yaşamında toplam karbon döngüsü (Anderson ve Adams, 2020)

A1-A3 modüllerini içeren "Ön karbon (upfront carbon)" yaklaşımı, mimari tasarımın erken aşamalarında gömülü karbon analizinin gerçekleştirilmesini

kolaylaştırmaktadır. Yapı yaşam döngüsü içerisindeki sadece belirli aşamaların dahil edilerek hesaplamanın yapıldığı bu yaklaşım, mimari tasarımda yapı malzemesi bazlı kararların daha hızlı ve etkili verilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca hem taşıma hem de inşa süreçlerinde ortaya çıkabilecek muhtemel emisyonların da tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte, erken tasarım aşamalarında kolaylıkla hesaplanabilen ön karbon miktarı, yapının diğer yaşam dönemlerinin de doğrudan etkilenmesine neden olmaktadır. Özellikle yapı yaşam döngüsü ötesi olarak tanımlanan D modülü, tasarım aşamalarında getirilen kararlardan oldukça fazla etkilenmektedir. Artan çevresel baskıların azaltılmasına yönelik birçok sektörde kullanımı olan döngüsel ekonomi (circular economy) kavramı, yapı sektörü kapsamında da uygulanabilmektedir (Şekil 2.8) (ARUP, 2016).

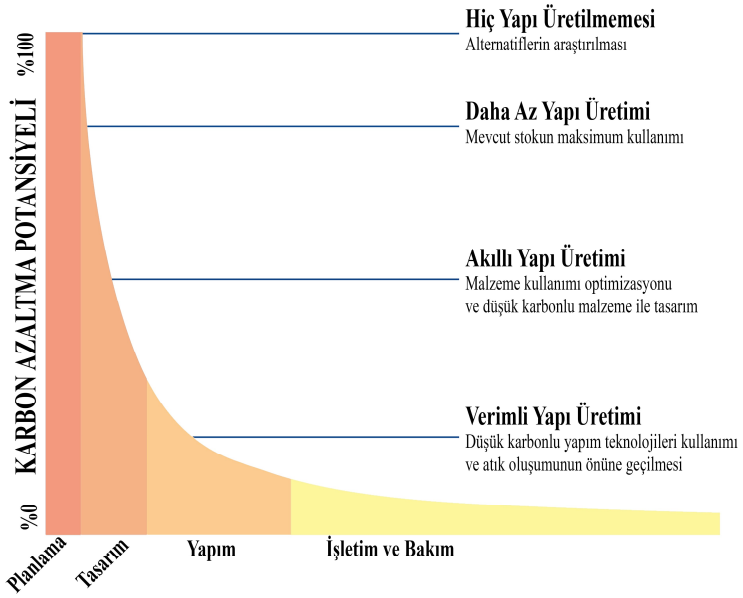


Şekil 2.8. Ekonomik yaklaşımların kıyaslanması (ARUP, 2016)

Ön karbon hesaplaması gerçekleştirilirken tercih edilmiş olan yapı malzemelerinin döngüsel ekonomi yaklaşımıyla belirlenmiş olması, yapının toplam karbon döngüsüne olumlu katkıda bulunmaktadır. Söküm için tasarım (DfD-design for disassembly) yaklaşımının geliştirilmesini sağlayan döngüsel ekonomi anlayışı sayesinde yapı malzemesi üretiminin azaltılabilmesi mümkün olmaktadır. Yapıların erken tasarım aşamalarında döngüsel ekonomi gözetilerek alınacak kararlar ile bir başka yapıda kullanılmış olan yapı malzemesinin tercih edilmesiyle gömülü karbon değeri, binanın toplam karbon değerini de olumlu biçimde etkileyerek önemli düzeyde azalabilmektedir (UKGBC, 2019).

Yapı yaşam döngüsü içerisinde karbon salınımının azaltım potansiyeli her aşamada mümkün olmakla birlikte, bilinçli yapı malzemesi tercihi ve planlı kullanım ömrü sonu senaryoları bu potansiyeli daha da arttırmaktadır. Ön karbon hesaplaması,

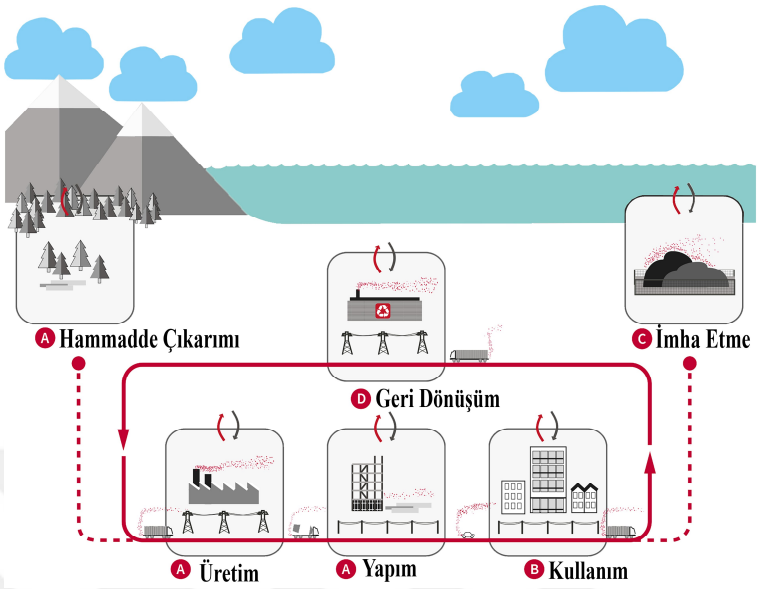
söküm için tasarım ve döngüsel ekonomi olguları içerisinde, mimari tasarımın erken aşamalarında alınmış kararlar, yapı sektörü kaynaklı sera gazı salınımının azaltımını sağlayarak, küresel iklim değişikliği etkisinin tersine çevrilebilmesine katkıda bulunmaktadır (Şekil 2.9) (WGBC, 2019).



Şekil 2.9. Karbon azaltımında temel ilkeler ve tasarım süreci boyunca azaltma potansiyeli (WGBC, 2019)

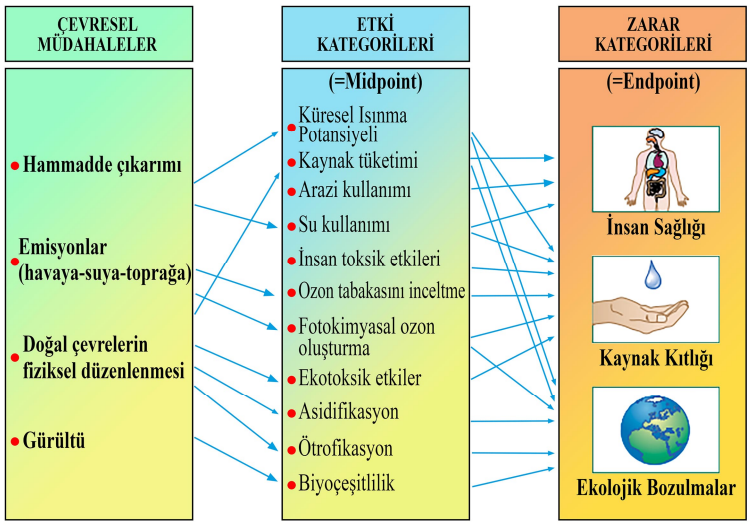
Bir yapının inşa edilmesi ve kullanımı hem doğal çevre üzerinde hem de insan sağlığı üzerinde uzun süren etkilere neden olmaktadır. Yapı malzemelerinin hammaddeleri doğal çevreden elde edilmektedir. Doğal çevreden elde edilerek işlenen ve bir fonksiyona uygun kullanım imkânı bulan bu malzemeler, aynı zamanda birçok kimyasal süreçten de geçmektedir. Doğal olarak bu süreçlerin tamamında gömülü karbon salınımı gerçekleşmektedir. Gömülü karbon değerinin en verimli ve etkili biçimde azaltılabilmesi öncelikle gömülü karbon miktarının hesaplanabilmesi ile mümkün olmaktadır. “Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) (LCA-life cycle assessment)” metodolojisi, yapıların yaşam döngüleri boyunca hem gömülü karbon hem de kullanım karbonu emisyonlarının hesaplanabilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Birçok uluslararası standart tarafından uygulama çerçevesi çizilen söz konusu değerlendirme (YDD) yöntemi yardımıyla mimari tasarımın erken aşamalarında kararlar alınarak, düşük çevresel etki değerine sahip, insan sağlığına zarar vermeyen yapılar inşa etmek mümkün olmaktadır (Şekil 2.10) (Lewis ve ark., 2021a). “Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” yöntemi; yapıların, ürünlerin veya bir sürecin çevresel etkisini ölçmek için kullanılmaktadır.

"Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)", hammaddenin doğal çevreden elde edilmesinden kullanım ömrü sonundaki imhasına kadarki bütün süreçleri içermektedir.



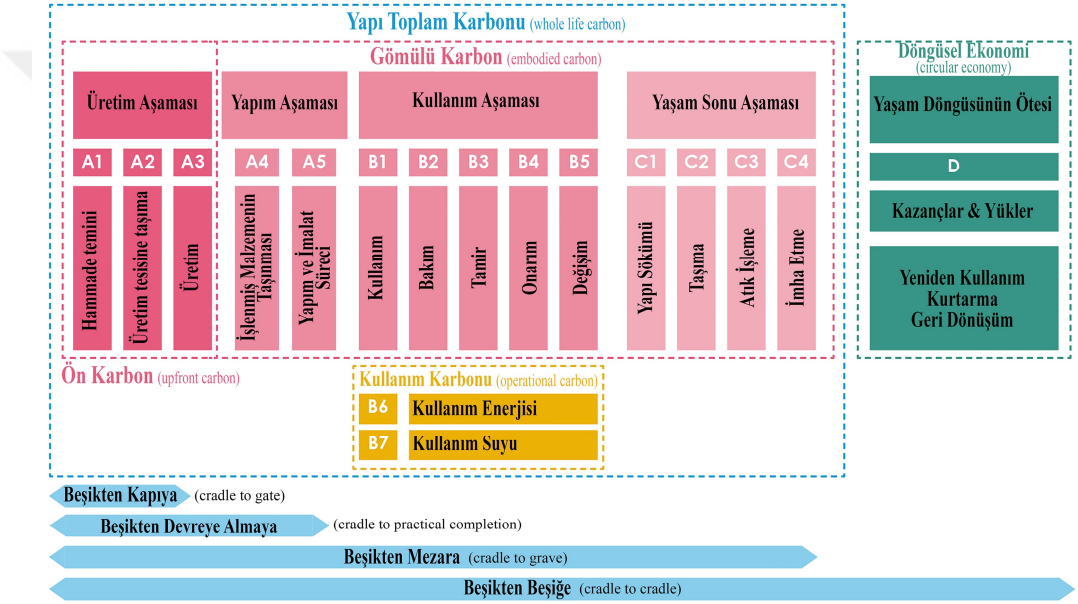
Şekil 2.10. Yapı üretim sürecinin doğal çevreyle ilişkisi (Simonen ve ark., 2019)

Bütün bu süreçlerdeki YDD hesaplamalarında etkiler; Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-global warming potential), Asidifikasyon Potansiyeli (acidification potential), Ötrofikasyon Potansiyeli (eutrophication potential), Duman Oluşumu Potansiyeli (smog formation potential) ve Ozon Tabakasını İnceltme Potansiyeli (ozone depletion potential) başta olmak üzere birçok çeşitli ölçü birimlerinde incelenmektedir (Şekil 2.11) (UNEP, 2020).



Şekil 2.11. Çevresel etki noktalarının ilişkisi (UNEP, 2020)

YDD yönteminde, sera gazı etkisini oluşturan başta CO_2 olmak üzere diğer bütün zararlı gazların ölçüm ve takibi, Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) başlığı altında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla GWP değeri aynı zamanda gömülü karbon miktarını belirtmektedir. Gömülü karbon miktarı olarak kabul edilen GWP değeri, kilogram eşdeğer karbon gazı ($kgCO_2eq.$) birimini kullanmaktadır. YDD metodolojisi, bir yapının bütün yaşam döngüsünü hesaplayabilmek amacıyla farklı modüllere bölünmektedir. İlkesel olarak dört farklı temel modülden oluşmakla birlikte, her bir temel modül yine kendi içerisinde alt modüllere ayrılarak, hesaplamanın kolaylaştırılması sağlanmaktadır (Şekil 2.12) (IStructE, 2020).



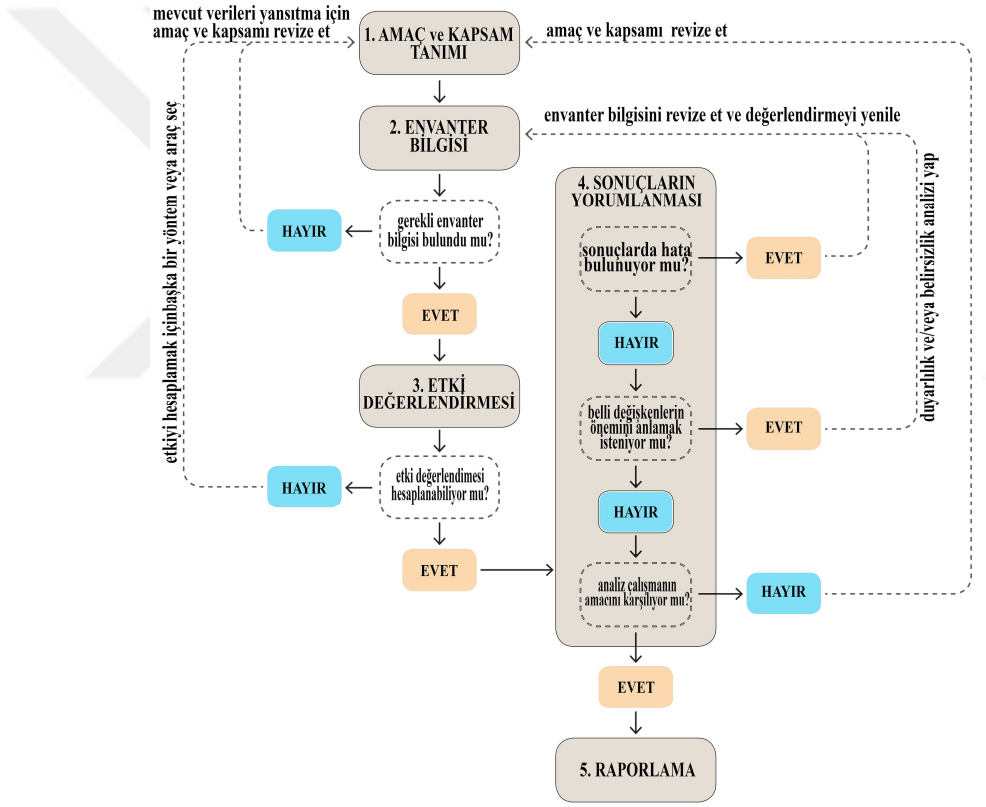
Şekil 2.12. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) modülleri (IStructE, 2020)

Farklı modülleri içeren YDD metodolojisi, yapı malzemeleri ve yapım süreci kaynaklı karbon miktarının değerlendirmesi, hammaddenin çıkarılmasından geri kazanım veya yok edilmesine kadar dört farklı kavramsal yaklaşım ile ayrılmıştır;

- Beşikten Kapıya (cradle to gate) (A1-A3): Yapı malzemesinin hammadde olarak temin edilmesi, üretim tesisine getirilme ve üretim tesisinde işlenme süreçlerini ifade etmektedir.
- Beşikten Devreye Alma (cradle to practical completion) (A1-A5): Yapının inşaat süreçleri tamamlanmış ve kullanım için hazır duruma getirilmesini tanımlamaktadır.

- Beşikten Mezara (cradle to grave) (A1-A5, B1-B7, C1-C4): Yapının kullanım dönemini ve kullanım sonrası aşamalarını içine alan süreci belirtmektedir.
- Beşikten Beşiğe (cradle to cradle) (A1-A5, B1-B7, C1-C4, D): Yapı tasarımının kullanım sonrası planlanarak, söküm için tasarım (DfD) ve döngüsel ekonomi ilkleri kapsamında değerlendirildiği sürece işaret etmektedir.

Farklı modül ve yaklaşımlardan oluşan ve devamlı tekrar eden bir süreç olan YDD yöntemi; 1. Amaç ve Kapsam Tanımı (define goal and scope), 2. Envanter Bilgisi (collect inventory), 3. Etki Değerlendirmesi (impact assessment), 4. Sonuçların Yorumlanması (interpret results) ve Raporlama (report) aşamalarını içermektedir (Şekil 2.13) (Simonen ve ark., 2019).



Şekil 2.13. Tekrarlı bir süreç olan YDD aşamaları (Simonen ve ark., 2019)

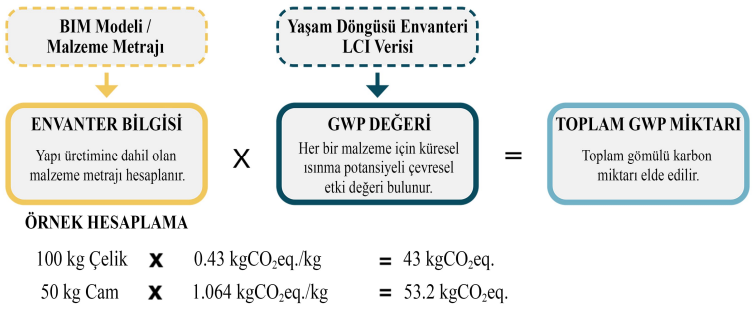
Yapı sektöründe YDD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen gömülü karbon hesaplaması genellikle iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmektedir;

- Bütün yapı düzeyinde (whole building life cycle assessment-WBLCA) (A-B-C-D modülleri)
- Ürün-malzeme düzeyinde (environmental product declaration-EPD) (A1-A3 modülleri)

Bu iki yaklaşım arasındaki temel fark, hesaplamaya dahil edilen YDD modüllerinden kaynaklanmaktadır. Bütün yapı düzeyinde gerçekleşen WBLCA yaşam döngüsü değerlendirmesinin tüm modüllerini içerirken, ürün-malzeme düzeyinde gerçekleşen değerlendirme ise sadece A1-A3 (beşikten kapıya-cradle to gate) modüllerini dikkate almaktadır. Ürün-malzeme düzeyinde gerçekleşen YDD genellikle yapı malzemesi üreticileri tarafından hesaplanmakta ve çevresel ürün beyanı (EPD-environmental product declaration) biçiminde kullanıcılara bildirilmektedir. Özellikle mimari tasarımın erken evrelerinde yapı malzemesi bazlı değişikliklerle gömülü karbon değerinin azaltılması mümkün olmaktadır. Birebir malzeme değişimi (one-for-one material subtitution) olarak da bilinen bu yaklaşım, bütün yapı düzeyinde (WBLCA) gerçekleşene göre erken tasarım aşamalarında hızlı ve verimli sonuçlar üretilmesini kolaylaştırmaktadır (Jungclaus ve ark., 2021).

Gömülü karbon değerinin belirlenmesi için yapılacak YDD hesaplamasında ilk adım olarak Amaç ve Kapsam Tanımı (define goal and scope) gerçekleştirilmektedir. Elde edilen YDD sonucunun bir başka yapıyla veya yapı malzemesi değişimi sonucu kendisiyle kıyaslanabilir olması için YDD modüllerinin, fonksiyonel birimlerin aynı olması doğruluk açısından önem arz etmektedir. Gömülü karbon karşılaştırmasının yapılabilmesi için, GWP etki değerlendirmesi birimi olan $kgCO_2eq.$ bütün YDD tekrarlarında aynı olması, hesaba katılan yapı malzemelerinin m^2 veya m^3 cinsinden benzer özellikler göstermesi gereklidir. Amaç ve kapsam tanımlaması yapıldıktan sonra ise “Envanter Bilgisi” aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada öncelikle yapı tasarımında yer alan elemanlar ve bunlara ait metraj bilgisi tespit edilir. Daha sonra tespit edilen yapı elemanlarının malzemelerine göre, uluslararası çalışmalarla belirlenmiş olan “Yaşam Döngüsü Envanter (LCI-life cycle inventory)” bilgisi veri tabanlarından elde edilir. Bu veri tabanları, uluslararası düzeyde birçok kurum ve kuruluş tarafından, yaşam döngüsü modüllerine göre belirlenmektedir. Athena (Kuzey Amerika), GaBi (Almanya), KBOB Database (İsviçre), Korean Database (Güney Kore), Chinese Database (Çin), Ecoinvent (İsviçre), ICE (Inventory of Carbon & Energy-Birleşik Krallık), Oekobaudat (Almanya), U.S. LCI (Kuzey Amerika) gibi veri tabanları ücretli veya ücretsiz olarak erişime açık bulunmaktadır. Envanter bilgisinin elde edilmesiyle bir sonraki aşama olan “Etki Değerlendirmesine” geçilmektedir. Bu aşamada, LCI veri tabanından alınan yapı malzemesine ilişkin GWP verisi ile aynı birime sahip yapı elemanının metrajı çarpılmaktadır. Böylelikle sera etkisi oluşturan birçok gazın tek değer altında toplandığı GWP, diğer bir değişle gömülü karbon düzeyi $kgCO_2eq.$ cinsinden elde edilmektedir

(Şekil 2.14). Gömülü karbon değerinin elde edildiği “Etki Değerlendirmesi” aşamasından sonra “Sonuçların Yorumlanması” adımına geçilmektedir. Sonuçlar yeterli ve arzu edilen düzeydeyse bir sonraki aşama olan “Raporlama” aşamasına geçilmektedir. Böylelikle bir yapıya ait çevresel etki düzeyinin belirlenmesinde en önemli göstergelerden biri olan gömülü karbon (GWP- $kgCO_2eq.$) miktarı tespit edilmiş olmaktadır (Lewis ve ark., 2021a).



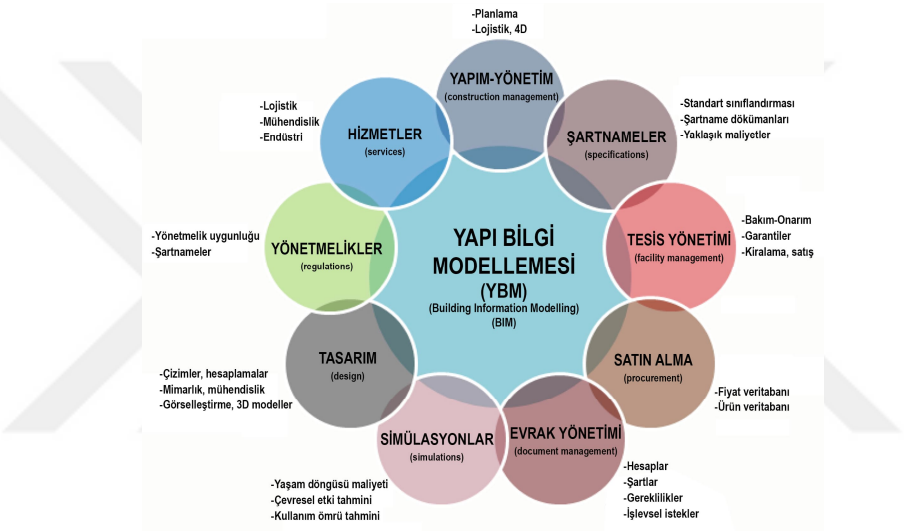
Şekil 2.14. Gömülü karbon değeri hesaplama örneği (Lewis ve ark., 2021a)

2.2. Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonu Hesaplamada Yapı Bilgi Modellemesi

Günümüzde aralıksız yapılan çalışmalar ile geliştirilmeye devam edilen Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) (BIM-Building Information Modelling) teknolojileri, dünya çapında geniş kullanım alanlarıyla büyük ilgi görmektedir (Cavalliere ve ark., 2019). AEC (Architecture Engineering Construction) olarak tanımlanan “Mimarlık Mühendislik Yapım” sektöründe YBM kullanımı küresel boyutta artmaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde, İngiltere gibi bazı ülkeler 2016 yılından itibaren kabul etmesine rağmen, 2014/24/EU direktifine göre Ekim 2018’den itibaren kamu yapılarının projelendirilmesinde YBM kullanımını zorunlu hale getirilmiştir (Soust-Verdaguer ve ark., 2017). YBM araçları, geleneksel mimari yapı planlamasının aksine, yapıların üretiminden önce teknolojik, ekonomik ve çevresel yönlerinin değerlendirilmesine olanak sağlayarak, avantaj ve dezavantajların belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir yapılar ve çevreler elde edilebilmesi amacıyla yapı sektöründe YBM kullanımının yaygınlaştırılması gerektiği düşünülmektedir (Şekil 2.15) (Reizgevicius ve ark., 2018).

Sürdürülebilirlik yaklaşımını önceleyen YBM teknolojisi, yapıların tasarlanması, üretimi, bakımı ve yok edilmesinde çevresel etkin bir metodoloji sunmaktadır. Genel anlamda YBM kullanımının yapı sektörünün sürdürülebilirliği üzerindeki pozitif etkisi,

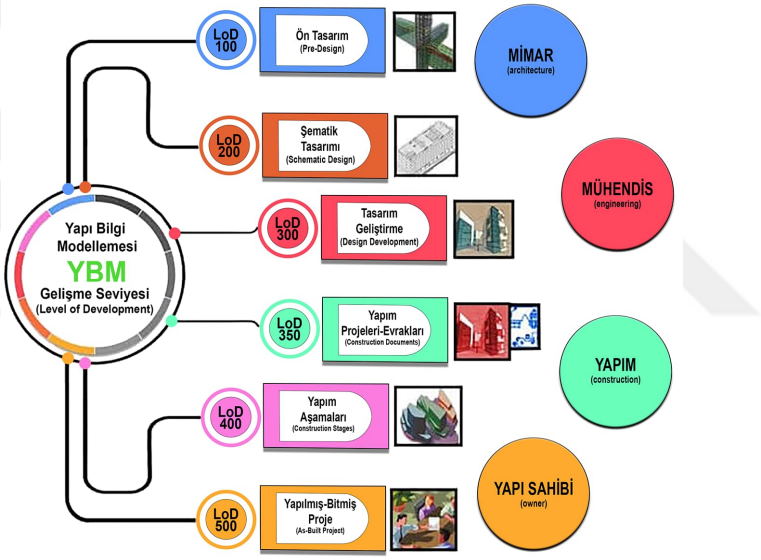
kaynak verimliliği ve ekolojik tasarıma dayalı sağlıklı bir fiziki çevre oluşturan yeşil tasarım (green design) kavramı ile öne çıkmaktadır. Ancak YBM teknolojilerinin daha geniş çevreler tarafından kullanımıyla, sürdürülebilirliğin sadece çevresel yönüne değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutlarına da olumlu bir etki yapması beklenmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik bağlamında YBM, yapı ile ilgili her türlü veriyi depolayabilme, işleyebilme ve paylaşma kapasitesi sayesinde, yapının; enerji, su tüketimi, kullanılan malzemeler, atık yönetimi ve karbon ayak izi gibi çevresel etkilerinin en aza indirilmesini sağlayarak daha çevresel bilince sahip kararlar alınmasına yardım etmektedir (Duru ve Koç, 2021).



Şekil 2.15. Yapı bilgi modellemesinin yaşam döngüsü (Reizgevicius ve ark., 2018)

Ekonomik sürdürülebilirlik bağlamında YBM kullanımı; projelendirme aşamasında potansiyel olumsuzlukların erken tespiti, daha doğru mimarlık-mühendislik kararları, verimli lojistik politikaları ve yapının bütün yaşam döngüsü maliyetlerinin tahmin edilmesi gibi birçok kazanım sağlayarak, ekonomik varlığın korunması, üretkenliğin arttırılması ve israfın azaltılmasına yönelik kazanımlar sağlamaktadır. Sosyal sürdürülebilirlik bağlamında YBM; atık yönetimi, iç hava kalitesi, gürültü kirliliği, şantiye sahasında güvenlik, kamusal altyapıya daha hassas ve kolay bağlantı, yapı bakım faaliyetlerinin tasarım aşamasında planlanması gibi iyileştirici araçlar sağlayarak, sağlıklı ve yaşanabilir yapılar-mekanlar üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, YBM sayesinde sürdürülebilirlik ile ilgili veriler sürekli toplanabilmektedir. Analiz edilen bu veriler, geleceğe dönük fiziki çevre gelişim projeksiyonlarının planlanmasında yol gösterici bir nitelik taşımaktadır (Buildipedia, 2021).

Dijital ortamda üretilecek olan yapının sanal bir modelini tanımlayan YBM araçları, yapıya ait malzemeler ve bileşenler hakkında detaylı veriler içerebilmektedir. Ancak, doğası gereği karışık ve zahmetli bir süreç olduğu daha önce ifade edilen mimari tasarım boyunca YBM modeli, uluslararası literatürde ayrıntı veya gelişme düzeyi (level of detail/development) kavramları ile ifade edilen, farklı bilgi zenginliği göstermektedir (Volk ve ark., 2014). Nesne Tanım Düzeyi, Nesne Detay Seviyesi, Nesne Olgunluk Seviyesi, Nesne Gelişim Seviyesi (level of definiton/detail/development-LoD) tanımlarıyla da ifade edilebilen LoD kavramı, YBM modelinin, projenin ön tasarımından yapım aşamasında kadar, hangi düzeyde içerikle ifade edileceğini belirtmektedir. Amerika Mimarlık Enstitüsü (AIA-American Institute of Architecture) bir YBM modeli için altı farklı gelişme seviyesi belirlemiştir (Şekil 2.16) (AIA, 2013).

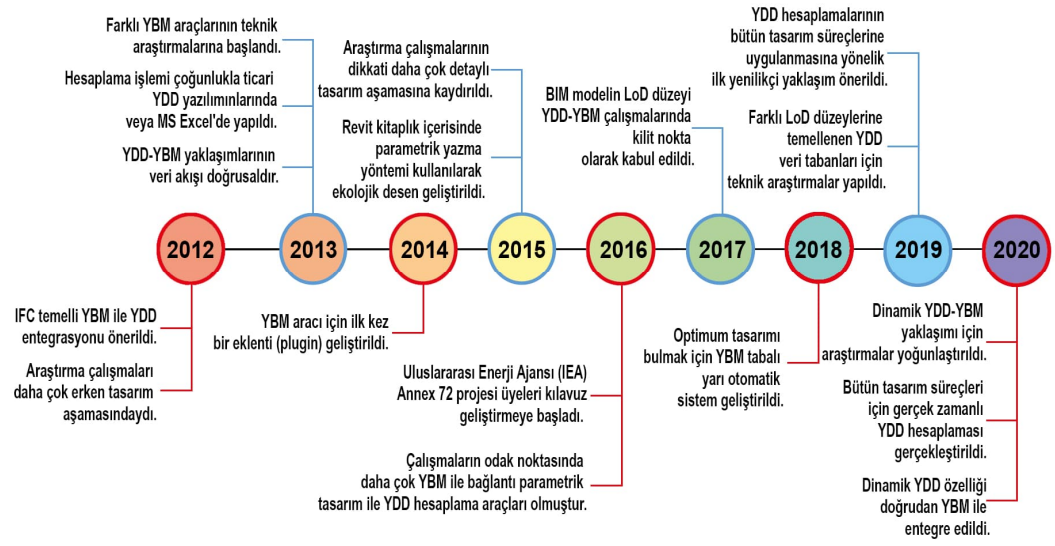


Şekil 2.16. YBM modelinin tasarım süreçlerine göre gelişme seviyeleri (AIA, 2013)

Mimari tasarım başlangıcında alınan kararlar sıklıkla değişebilmektedir. Özellikle ön tasarım aşamasında daha çok mimari planlama kararları belirlenmektedir. Bu aşamalarda, YDD hesaplamalarının gerçekleştirileceği YBM modelleri, çoğunlukla varsayılan (default-generic) olarak gelen malzeme bilgisini kullanarak oluşturulmaktadır. Dolayısıyla gelişme seviyesi (LoD) yetersiz olan YBM modeli, yapının yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) hesaplamalarını gerçeklikten uzak tahmin edilmesine neden olabilmektedir. Tasarım kararları netleştikçe detay seviyesi (LoD) artan YBM modeli, daha gerçekçi çevresel etki tahminleri yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak bu durum oldukça büyük bir ikilemi de birlikte getirmektedir. Şöyle ki, yapıya ilişkin

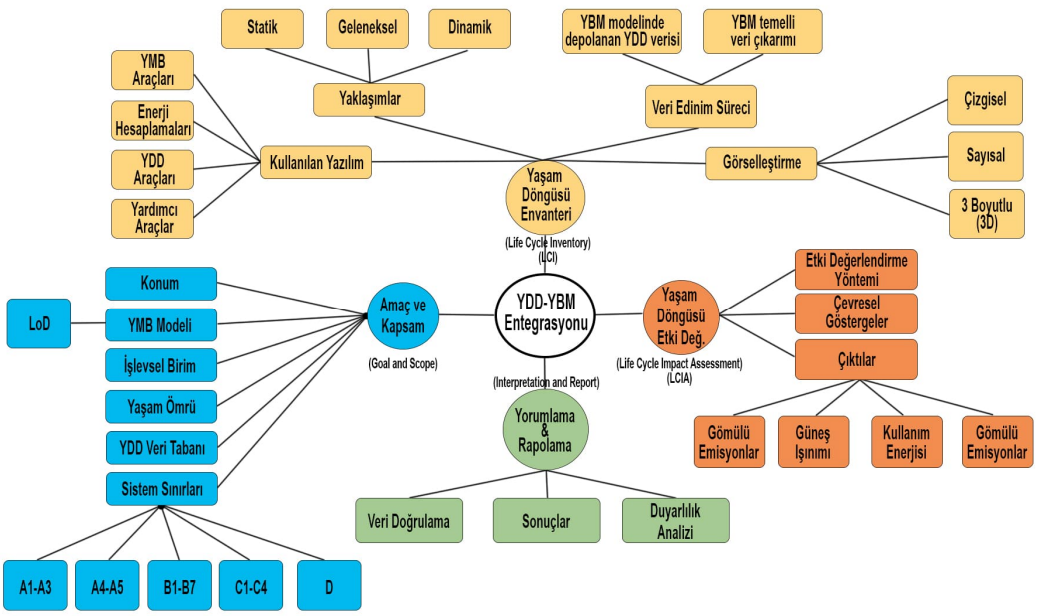
verilerin yetersiz ve belirsiz olduğu ilk tasarım adımlarında (LoD-100/200) alınan kararlar, malzeme bilgisinin belirlendiği, metraj listelerinin oluşturulduğu, yapıya ilişkin bütün sistemlerin belirlendiği aşamaları (LoD-300/350) doğrudan etkilemektedir. Gelişme (detay) seviyesinin (LoD-300/350) ileri olduğu bir aşamadan, ilk kararların alındığı aşamalara (LoD-100/200) geri dönüş oldukça maliyetli olmaktadır. Birkaç yapı malzemesi bağlamında değişiklik yapılabilmesi mümkün olmasına rağmen, özellikle yapının geometrisinde çevresel etkinin önemli ölçüde azaltılabilmesine katkı sağlayacak değişikliklerin yapılması imkansızdır. Bu sebeplerden ötürü, YDD hesaplamalarının, tasarım ilk aşamasından itibaren eksiksiz ve gerçeğe yakın yapılabilmesi için YBM modelinin gelişme seviyesi (LoD) kavramı, tasarımcı mimar ve mühendisler tarafından dikkate alınmak zorundadır (Hollberg ve Ruth, 2016).

Yapı sektöründe, YDD ve YBM entegrasyonu birçok bilimsel çalışmanın konusu olmaktadır. Farklı detay seviyelerine göre yapının dijital bir modelinin oluşturulabildiği YBM ortamı, YDD hesaplamalarının kolayca yapılabilmesine yönelik birçok avantaj sağlamaktadır. YDD-YBM entegrasyonu, yapı tasarımının ilk aşamasından itibaren çevresel performansı iyileştirici kazanımlar elde edilmesine ve çevresel etki hesaplama süreçlerini kısaltılarak mimari tasarıma daha çok zaman ayırılabilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca kullanıcı dostu bir ara yüze sahip olan YBM araçları, dijital modele veri girişini oldukça kolaylaştırmaktadır. YDD-YBM entegrasyonu, özellikle son on yıl içerisinde çok önemli gelişmeler kaydetmiştir (Şekil 2.17) (Safari ve AzariJafari, 2021).



Şekil 2.17. 2012 yılından günümüze YDD-YBM entegrasyonun gelişim durumu (Safari ve AzariJafari, 2021)

Uluslararası literatürde, YDD-YBM entegrasyonuna yönelik çeşitli yaklaşımlar önerilmektedir (Potrč Obrecht ve ark., 2020). Bu yaklaşımlar, el ile yapılan girdi sayısını azaltmak, YDD sürecini basitleştirmek ve çoğunlukla YDD konusunda sınırlı bilgi düzeyine sahip olan tasarımcıların çıkan sonuçları yorumlayabilmesini kolaylaştırmak gibi birçok açıdan çevresel etki için önemli kazanımlar sağlamaktadır. Böylelikle, mimari tasarımın her aşaması için belirsizlik oldukça azalabilmekte ve elde edilen sonuçlar gerçeğe daha yakın özellikler göstermektedir. Ancak, yerel yaşam döngüsü envanterinin (LCI) kullanımı, girdi verilerinin belirsizlik analizi ve çıktıların girdi verilerine duyarlılığı gibi faktörler, sonuçların gerçekliğini arttırmak için dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte, son on yıl içinde bilimsel çalışmalarla şekillenen, YDD-YBM entegrasyonunun ilkesel teknik bilgisini, yaşam döngüsü aşamalarına göre, etkileyen birçok faktör bulunmaktadır (Şekil 2.18) (Safari ve AzariJafari, 2021).



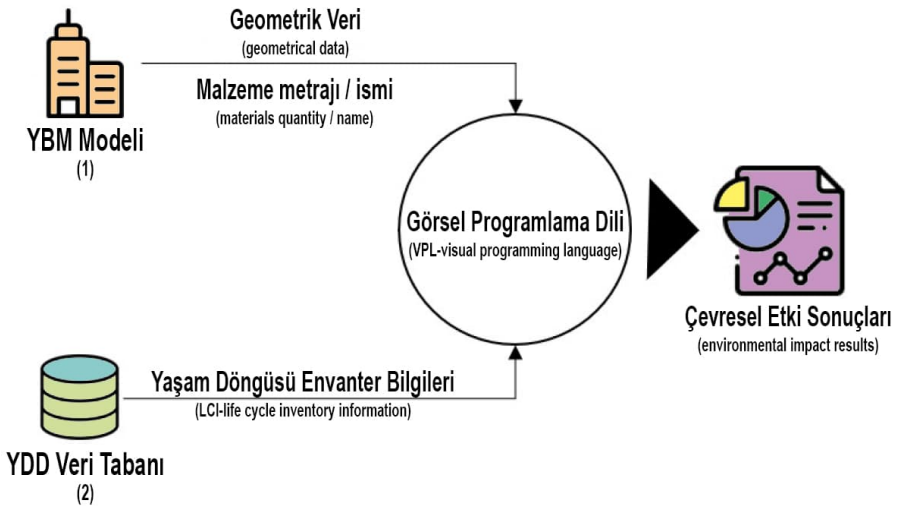
Şekil 2.18. YDD-YBM entegrasyonunda yer alan bileşenler (Safari ve AzariJafari, 2021)

ISO 14040/14044 ve PAS (Publicly Available Specification) 2050 gibi standartlarda belirtilen YDD metodolojileriyle tasarlanan, yapı sektörüne uygun, çoğu yazılım, süreç tabanlı (process based YDD) hesaplama yöntemini esas alınarak üretilmiştir. Bu yaklaşımın benimsendiği, Brightway2, CcaLc, Eco-Profiles, Ecobat, GEMIS, YDDiT, ProBas, Quantis ve Umberto gibi yazılımlar, şeffaflığı ve güvenilirliği arttırmak amacıyla yüksek nitelikli raporları, yorumları literatür referanslarıyla birlikte sağlamaktadır. Özellikle, YDD hesaplamaları Python üzerinde gerçekleştirilen ve

kullanımı için uzmanlık gerektiren Brightway2 yazılımı, Monte Carlo duyarlılık analizi hesaplamalarında oldukça hızlı bir araç olarak diğerlerinden ayrılmaktadır. Fakat, Athena IE, BEES, OpenLCA gibi uzman bilgisi gerektirmeyen, sadece yapı malzemesi değişimine yönelik sınırlı sayıda seçenek sunabilen yazılımlar da kullanılabilmektedir. Ayrıca, uzman olmayan tasarımcı kullanımına yönelik olan eBalance ve EQUER yazılımları, sınırlı uygulamaya izin vererek, sadece belirli bir bölge ve dil seçenekleri sunmaktadır. Açık kaynak kodlu programların dışında, yapı projeleri için oldukça uygun olan, gömülü envanter bilgisi içeren, üst düzey raporlama ve akış şemaları sağlayan GaBi, SimaPro, Umberto, OneClick LCA gibi yazılımlar sektörün lideri durumda bulunmaktadır. Söz konusu yazılımlar ile YBM modelinin entegrasyonuna yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Gerekli verilerin nasıl elde edilip kullanıldığı, YDD programları ile YBM modeli arasında veri alışverişi ve hesaplama türlerine göre temellenen entegrasyon süreci, kapsamlı bir sınıflandırma sağlayabilmek amacıyla, el ile girilen verilerin sayısı ve YDD sürecinin karmaşıklığı esas alınarak geleneksel, statik ve dinamik olacak şekilde üç farklı kategoride sınıflandırılmaktadır (Safari ve AzariJafari, 2021). Geleneksel yaklaşımda, YBM modelinden gelen veriler bir MS Excel elektronik tablosuna çıkartılır. Daha sonra, çoğunluğu yapı elemanlarının metrajı (bill of quantities-BoQ) olan bu veriler, SimaPro, OneClick LCA gibi ticari veya OpenLCA gibi açık kaynak yazılımlarda çevresel etkilerin hesaplanabilmesi için girdi veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Çevresel etki sonuçlarının görüleceği çıktı verisi olan raporlar, girdi verisine benzer şekilde, MS Excel dosyası olarak üretilmektedir. Verilerin YDD programlarına el ile girildiği geleneksel yaklaşım, uygulayıcının iş yükünü arttırmakta ve bunun sonucu olarak insan kaynaklı hataların çoğalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, veri kaybı olasılığı yüksek olan bu yaklaşım, yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) hesapları konusunda çok az bilgiye sahip tasarımcılar için uygun olmamaktadır. Statik yaklaşım, YBM modeli ve YDD aracı arasında gerçekleşen veri alışveriş süreci bakımından, geleneksel yaklaşımdan farklılık arz etmektedir. Bu farklılık, YBM sürecine hizmet eden, farklı YBM araçları arasında veri alışverişinde ortak bir dosya formatı olan IFC (Industry Foundation Classes) üzerine temellenmektedir. Geleneksel olarak MS Excel tabanlı verilerin aksine, harici YDD yazılımlarına girdi olan bu IFC verileri, YBM modeline ait birçok özelliği içermekte ve kullanım amacına göre özelleştirilebilmektedir. Fakat, YBM modelinde yapılacak herhangi bir değişiklik, bütün YDD hesaplamalarının yeniden yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapı modelinin oluşturulduğu YBM yazılımları ile çevresel etki değerlendirmesinin yapıldığı YDD yazılımları arasında çift yönlü bir ilişki

yoktur (Jalaei ve ark., 2020). Bu iki yaklaşımdan farklı olarak, çevresel verilerin YBM ortamına girilmesine izin veren dinamik yaklaşım, model ile yaşam döngüsü veri tabanları (LCI) arasında, görsel programlama dili (VPL-visual programming language) vasıtasıyla, otomatik ve en uygun olacak biçimde çift yönlü bir bağlantı oluşturarak, mimari tasarımın her aşamasında sürekli geri bildirim alınabilmesi amacıyla geliştirilmiştir (Safari ve AzariJafari, 2021).

Son yıllarda, özellikle yapıların çevresel etkilerinin hesaplanmasına yönelik dinamik yaklaşım yöntemi, diğer iki yaklaşıma kıyasla, bilimsel çalışmalarda çok daha fazla benimsenmektedir. Bueno ve ark. (2018) yapmış oldukları çalışmada, YBM ortamındaki modele çevresel verileri dahil edebilmek için Dynamo görsel programlama dilini (VPL) kullanan bir yöntem uygulanmışlardır. Yapı tasarımında kullanılan malzemelere yönelik olarak, yaşam döngüsü envanter (LCI) bilgisi içeren bir MS Excel elektronik tablo, Dynamo görsel programlama dili (VPL) kullanılarak, Autodesk Revit içerisindeki model ile eşleştirilmiştir. Geliştirilen bu parametrik bağlantı aracılığıyla çevresel etki değerlendirmesi yapılmıştır. Çıktılar, yaşam döngüsü envanter (LCI) içeriğine göre, yine MS Excel elektronik tablosu olarak sütun grafikleri biçiminde elde edilmiştir (Bueno ve ark., 2018). Autodesk Revit-Dynamo dışında, yine, bir başka YBM tabanlı program olan Archicad, Rhinoceros 3D içerisinde yer alan Grasshopper görsel programlama dili (VPL) ile etkileşim yapılarak da birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.19) (Hollberg ve Ruth, 2016) (Lobaccaro ve ark., 2018) (Kiamili ve ark., 2020).



Şekil 2.19. YDD ve YBM araçlarının görsel programlama dili aracılığıyla entegrasyonu şematik gösterimi (Kiamili ve ark., 2020)

Autodesk Revit YBM yazılımı, görsel programa dili (VLP) olan Dynamo ile stabil bağlantısı, başka bir yazılıma gereksinim göstermemesi, sadece basit geometrilerin değil, karmaşık modellerin de kolaylıkla hesaplanabilmesi gibi birçok önemli faktörden ötürü, bilimsel çalışmalarda daha sıklıkla tercih edilmektedir (Monteiro, 2016). Mimari tasarımcıya, sürece bağlı sonuçlar verebilen dinamik yaklaşım, diğer iki yaklaşıma kıyasla, daha doğru sonuçlar sağlamaktadır. Fakat, dinamik yaklaşımda veri toplama ve eşleştirme işlemleri çoğunlukla elektronik tablolar ile yapılmaktadır. Kapsamlı metraj bilgileri sağlayan YBM modeli ile yaşam döngüsü envanter (LCI) değerlerinin görsel programlama dili (VPL) kullanılarak eşleştirilmesi sonucu çevresel etkilerin, tasarımın her aşamasında hesaplanabildiği dinamik yaklaşım, bilimsel çalışmalarda belirtilen bazı belirsizliklerin yok edilebilmesi amacıyla, belirli alanlarda geliştirilme gereksinimi bulunmaktadır. Bununla birlikte, YBM-YDD entegrasyonuna yönelik, mantıksal düşünmeyi teşvik eden VPL araçlarının etkin kullanımı sayesinde tasarımcılar, YBM modellerini çok daha verimli kullanabilmektedir. Yapı tasarımcılarını profesyonel programcılara dönüştürmeyi amaçlamayan görsel programla dili (VPL), YBM araçlarının YDD ile çift yönlü entegre olunmasına, mevcut teknolojilerden daha çok yararlanılmasına ve tasarımcıların bilgi-becerilerinin artırılmasına yardımcı olmaktadır (Su ve ark., 2020).

2.3. Yapı Kaynaklı Karbon Emisyonları Literatür Taraması

Yapı kaynaklı karbon emisyonlar üst başlığında yer alan kuramsal arka plan irdelenmiştir. Ulusal ve uluslararası düzeyde, söz konusu kavramların kullanıldığı birçok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Doktora çalışmasının ortaya çıkmasında yol gösterici nitelikte olan araştırmalar yapı kaynaklı karbon emisyonu literatür taraması başlığı altında irdelenmiştir. Araştırma boşluğunun belirlenmesi yardımcı olan bu tarama, akademik çalışmayı yapan yazar/yazarlar, çalışmanın yayınlandığı yıl, araştırma başlığı ve araştırmanın kısa açıklaması şeklinde bir metodoloji ile irdelenmiştir. Doktora tezinde, kitap/kitap bölümü, araştırma/derleme makale, konferans bildirisi gibi başlıklarda gerçekleştirilmiş olan çalışmalar, türleri fark etmeksizin Çizelge 2.2’de birlikte incelenmiştir.

Çizelge 2.2. Yapı kaynaklı karbon emisyonları literatür taraması

Yazar(lar)	Yıl	Yayın Adı	Açıklama
Bozkurt (2007)	2007	Life cycle assessment (LCA) based home rating model for İzmir (HRM-İzmir)	Doktora tezinde, Yaşam Döngü Değerlendirme yöntemiyle, İzmir Kenti için hazırlanan Konut Değerlendirme Modelini geliştirme süreci, teorideki aşamaları ile aktarılmakta ve daha sonra İzmir'den seçilen konutlar üzerinde denemesi yapılmaktadır. Geliştirilen Konut Değerlendirme Modelinde, ATHENA yazılım programı kullanarak, binalardaki enerji tüketimini, katı atık oluşturma durumu, su kirlilik endeksi, hava kirliliği endeksi, küresel ısınma potansiyeli ve doğal kaynak kullanımı konularında karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar neticesinde konutların değerlendirilmesi için puanlama sistemi oluşturularak çalışmanın sağlayacağı kazanımlar vurgulanmıştır.
Çakmaklı (2007)	2007	Life cycle assessment of building materials in hotel refurbishment projects: A case study in Ankara	Doktora tezi, Türkiye'deki otellerde uygulanan yenileme projelerinin yüzdelerini belirlemek amacı ile yenileme projelerinin istatiksel verileri analiz edilmiştir. Ankara'daki üç tane beş yıldızlı otelin yenileme projelerinin hakediş malzeme listeleri elde edilmiş, yenileme projelerinin kapsamı ve kullanılan malzemeler dikkate alınarak, hayat döngüsü değerlendirme programlarından ATHENA programı ile altı çevresel etki göstergelerine göre değerlendirilmiştir. Her bir çevresel etki göstergesine göre ayrı ayrı değerlendirilen malzemeler için bir sistem oluşturulmuş ve her malzemenin "ekolojik puanı" hesaplanmıştır. Malzemeler çevreye uyumlulukları ve çevre dostlukları bakımından birbirleri ile, hesaplanan toplam eko-puanlarına göre karşılaştırılmıştır. Yenileme projelerinde kullanılan malzemelerin seçimi için bir öneri oluşturularak çevreye verilen zararın önüne geçilebilmenin önemi vurgulanmıştır.
Haapio ve Viitaniemi (2008)	2008	A critical review of building environmental assessment tools	Makalede, oldukça fazla sayıda olan bina çevresel değerlendirme araçlarının analiz ve sınıflandırması yapılarak belirtilmiştir. Araçların birbirinden göre farklılıkları ve benzerlikleri tartışılmıştır. Yaşam döngüsünün farklı fazlarına vurgu yapan ve farklı binaların değerlendirmesi için tasarlanmış olan araçların kategorize edilmesinin güçlüğüne değinilmiştir. Çevresel değerlendirme araçların kullanılması durumunda elde edilecek faydaların analiz edilmesinin, bu araçların ve elde edilen analiz sonuçlarının tasarım kararlarını nasıl etkilemesi gerektiğinin önemi vurgulanmıştır.
Anastaselos ve ark. (2009)	2009	An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions	Araştırma makalesi olan çalışma, ısısal yalıtım çözümlerinin enerji, ekonomi ve çevre bağlamında inceleyen bir değerlendirme aracı önermişlerdir. Bu araç ile farkı kriterleri benimseyen (ekonomi, enerji, çevresel) kullanıcıların kolaylıkla tercih yapabilmesi amaçlanmıştır. Değerlendirme aracı, bütün Avrupa'da sıklıkla kullanılan, boşluklu duvar ve dışarıdan yalıtımlı kompozit duvar sistemleri üzerine uygulanarak kullanıcıların tercihleri ölçümlenmiştir. Kullanıcılara kapsamlı bir sonuç ve belirli iyileştirme alternatifleri sunmayı amaçlayan çalışmada sürdürülebilir yaklaşımın önemi vurgulanmıştır.
Tıkır (2009)	2009	İstanbul'da mevcut bir konutun dış kabuğunun enerji etkin yenilenmesi ve ekonomik etkinliğinin değerlendirilmesine yönelik bir çalışma	Yüksek lisans tezinde, bina kabuğunu enerji etkin yenileme seçenekleri, opak elemanların iyileştirilmesi, saydam elemanların iyileştirilmesi ve güneş kontrolünün yapılması olarak üç ana başlıkta işlenmiştir. Bu iyileştirmelerin, konut enerji tüketimine ve çevreye olan etkileri incelenmiştir. Belirlenen yenilemeler yapıldıktan sonra, Türkiye'de de başlanan emisyon düşürme çalışmaları göz önünde bulundurularak, konuta güneş enerjisini kullanabilmeyi sağlayan panellerin entegre edilebilirliği önemi vurgulanmıştır.
Blengini ve Di Carlo (2010)	2010	The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings	Çalışmada, İtalya'nın Kuzey bölgesinde yakın zamanda inşa edilen düşük enerjili bir aile evine yönelik detaylı bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yapılmıştır. Bina, yıllık net kış ısı ihtiyacı açısından 10 kWh/m^2 gibi düşük bir değere sahiptir; aynı izolasyona sahip standart bir birim ise 110 kWh/m^2 ısı ihtiyacına sahip olduğu ifade edilmiştir. Bina, olağanüstü enerji tasarruf performanslarına dayanarak sürdürülebilir olduğu iddia edilerek, yapım sonrası YDD, olumlu değerlendirmenin yaşam döngüsü perspektifinde doğrulanıp doğrulanamayacağını anlamak amacıyla yapılmıştır. Çalışma, malzemelerle ilgili etkilerin önemli katkısını ortaya koymuştur. Kabuk içine gömülü malzemeler en yüksek katkıyı sağlamış, ancak bakım operasyonları da önemli bir rol oynamıştır. Bitkiler, bina süreci ve taşıma gibi diğer faktörlerin katkıları daha az önemli olmuştur. Geri dönüş potansiyelinin önemi vurgulanmıştır. Isıyla ilgili etkilerin baskın olduğu standart binaların aksine, tek bir belirleyici madde veya yönlendiren unsur bulunmamaktadır. Standart bir binaya göre çevresel açıdan çok daha olumlu bir performans sergilediği tespit edilmiştir.
Galvin (2010)	2010	Thermal upgrades of existing homes in Germany: The building code, subsidies, and economic efficiency	Bu çalışmada, enerji tasarruflu pasif evlerde içsel enerji kullanımının daha fazla dikkate alınması gerektiğini vurgulanmıştır. Almanya'da yapılan bir araştırma, binaların yaşam döngüsü maliyetleri ve enerji tüketimini ele alarak, enerji tasarruflu renovasyon standartlarının artmasıyla içsel enerjinin payının arttığını göstermektedir. En düşük ve en yüksek renovasyon standartlarına sahip binaların enerji etkinliğini karşılaştırarak, maliyet etkinliği ve yatırımın ömrü boyunca sağlanan tasarrufları incelemiştir. Bulgular, enerji tasarrufu açısından en düşük

			standartın en etkili olduğunu ve Almanya'nın giderek daha yüksek renovasyon standartlarına geçiş politikasının sorgulanabilirliğini ortaya koyulmuştur.
Güçyeter (2010)	2010	A method on energy-efficient retrofitting for existing building envelopes	Doktora tezinde, mevcut yapı kabuklarının enerji etkin iyileştirilmesi için bir yöntem önerisi geliştirmeyi hedeflemektedir. Yöntemin geliştirilebilmesi için, binanın mevcut durumdaki enerji performansının belirlenmesi, iyileştirme önerilerinin sunulması ve değerlendirilmesi gibi farklı aşamalar alan çalışması üzerinden örneklenerek uygulanmıştır. Diğer yandan, önerilen yönteme bağlı olarak yürütülen iyileştirme çalışmalarının sonucunda elde edilecek enerji tasarrufu, CO_2 emisyonlarının indirgenmesi ve iç mekân ısıl konfordaki iyileşmelerin saptanabilmesine olanak sağladığı vurgulanmıştır.
Asadi ve ark. (2012)	2012	A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB	Araştırma makalesi olan çalışma, bir konut binasının enerji iyileştirmesi için maliyetlerin, enerji kazanımlarının ve termal konforun optimum hale gelebilmesi amacıyla simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon şeması (a simulation-based multi-objective optimization scheme) kullanmışlardır. Farklı simülasyon ve yapay zekâ yazılımlarının kullanıldığı çalışmada, enerji iyileştirmesini çoğu yapı elemanı düzeyinde incelenmiştir. Optimizasyonun bir örneklem üzerinde uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve çalışmanın önemi vurgulanmıştır.
Ceylan (2012)	2012	Türkiye'de konut dış duvar sistemlerinde sıklıkla gerçekleştirilen ısı yalıtımı uygulamalarının üretim ve yapım süreçlerinin çevresel değerlendirmesi	Yüksek lisans tezi, kullanım süreçleri boyunca enerji tasarrufu sağlayarak binalarda oluşan çevresel etkilerin azalmasına ve yenilenemeyen kaynakların korunmasına yardımcı olan ısı yalıtım uygulamalarının üretim ve yapım süreçlerinin çevresel açıdan ele alınarak, bu süreçlerde ortaya çıkan çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Çevresel etki değerlendirmesi aşamasında Türkiye'ye dair yerel veriler yeterli olmadığı için başlıca Avrupa envanter verilerinden oluşan bir veri tabanından yararlanılmıştır. İleride Türkiye için eksik verilerin belirlenmesi durumunda, yeni verilerle benzer çalışmaların yapılması gerekliliği vurgulanmıştır.
Erkmen (2012)	2012	Opak düşey yapı kabuğunun enerji-emerji performansının değerlendirilmesine yönelik bir yaklaşım	Doktora tezi, yapı kabuğunun çevresel performansının belirlenmesinde yararlanılan yöntemler, yapı üretim ve kullanım çerçevesinde yer almıştır. Yapı kabuğunun çevresel etki analizinde; üretim aşaması çevresel etkileri ve kullanım aşamalarında enerji gereksinimi ve enerji harcamaları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Yapı kabuğunu oluşturan malzemelerin elde edilmesi, üretimi, taşınması ve uygulama aşamalarını kapsayan süreçteki toplam enerji olan oluşum enerjisi ve bunun yanı sıra yapılan işi güneş enerjisi cinsinden ölçen özgül enerji değerlerinin yapı üretim ve kullanım aşamalarındaki yerine değinilmiştir. Yapı kabuğu kesitlerinin iki iklim bölgesi için karşılaştırılması yapılmış ve tez kapsamında önerilen yaklaşımın sonuçları verilmiştir. Örnek çalışma ile, yapı kabuğunun, yapıldığı bölgenin iklimsel koşullarına ve üretim teknolojilerine bağlı olarak, farklı performanslar gösterdiği vurgulanmıştır.
Fazlı (2013)	2013	Comparing environmental impacts of four building envelope configurations using e-tool LCA	Yüksek lisans tezinde, çevresel etkiler temelinde Türkiye'den geleneksel yapım tekniğine ile dört farklı bina kabuğu değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Erdoğan Akdağ Araştırma ve Eğitim Merkezi (Türkiye, Yozgat) bir çalışma alanı olarak seçilmiştir. e-Tool LCA yazılımı, dört bina kabuğu çevresel etkinin altı göstergesine göre (Küresel ısınma potansiyeli, fosil yakıtların tüketimi, su tüketimi, ozon tabakasının incelmesi, asit yağmurlarının ve insan toksisite) hesaplamak için kullanılmıştır. Çıkan sonuçlar doğrultusunda değerlendirme yapılmış, gaz beton malzeme beton ve tuğlaya göre daha çevre dostu olduğu vurgulanmıştır.
Risholt ve ark. (2013)	2013	Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy, and home quality indicators	Çalışmada, Norveç'te bir müstakil evin durum analizi, iki farklı neredeyse sıfır enerji renovasyon stratejisinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Enerji talebi, yaşam döngüsü maliyeti ve ev kalitesi, sürdürülebilirlik göstergeleri olarak ele alınmıştır. "Cephe renovasyon stratejisi" enerji verimliliğini artırmak için cephede yapılacak bir güncelleme ve yerinde yüksek yenilenebilir enerji üretimi içermektedir. "Hırslı renovasyon stratejisi" ise pasif ev bileşenleri kullanılarak bina cephesinin tamamen yenilenmesini ve daha düşük yerinde yenilenebilir enerji üretimini içermektedir. Her iki strateji de yenilenebilir enerji üretimine bağlı olarak ısıtma ihtiyacında %50 ila %85 arasında azalmaya neden olmuştur. Sürdürülebilirlik değerlendirmesi, nitel ve nicel parametreleri içeren bir tekrarlı süreç olarak gerçekleştirilmiştir.
Süt (2013)	2013	Türkiye derece gün bölgelerinde mevcut çok katlı konut binalarının dış kabuğunda yapılacak enerji etkin yenileme stratejileri	Yüksek lisans tezinde, Türkiye derece gün bölgelerinde TS 825 Standardına ve iklim özelliklerine uygun yenileme stratejilerinin geliştirilerek, mevcut konut stokunun enerji etkin yenilenmesinin öneminin vurgulanmıştır. Farklı derece gün bölgelerinde uygulanan TOKİ plan şemasına sahip, ısı korunumu bakımından yetersiz, mevcutta var olduğu öngörülen bir toplu konut projesinin, TS 825 Standardına ve iklim özelliklerine uygun olarak enerji etkin yenilenmesini, getirilen önerilerin bina enerji performansına etkisinin analizini yapılmıştır. İklim bölgelerine göre konut binalarında yapılacak iyileştirmelerde opak bileşenlerin ısı kaybına bağlı olarak yalıtım kalınlığının uygun oranda arttırılması, şeffaf bileşenlerin ısıl performansı yükseltilmesi, gerekli durumlarda güneş kontrolü yapılması binanın enerji etkinliği açısından önemi vurgulanmıştır.
De Wolf ve ark. (2014)	2014	Comparing material quantities and embodied carbon in stadia	Makalede, binalardaki yaşam döngüsü enerjisinin hem operasyonel enerjiyi (ısıtma, soğutma, sıcak su, havalandırma, aydınlatma) hem de gömülü enerjiyi (malzeme çıkarma, işleme, taşıma, montaj ve sökme) içerdiği belirtilmiştir. Son dönem tasarım yeniliklerinin operasyonel

			enerjiyi azaltmaya odaklandığı, ancak gömülü enerji ve karbona yeni bir ilginin olduğu ifade edilmiştir. Özellikle spor stadyumlarının gömülü karbonuna odaklanılan makale, yeşil bina derecelendirme sistemlerinin (LEED, BREEAM gibi) temel yapıya göre daha düşük yaşam döngüsü etkilerine sahip olanları onaylamaya başladığı ifade edilmiştir. Ancak, bu temel yapı için gömülü enerjinin henüz tanımlanmadığı ve birleşik bir hesaplama yönteminin eksik olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, çeşitli faktörlerin (deprem ve iklim bölgeleri, bina kodları, geri dönüştürülmüş malzeme içeriği, yaşam döngüsü sınırları gibi) gömülü karbonu karmaşıklaştırdığını ifade edilmiştir. Birçok tasarım firmasının projelerinin gömülü karbonunu tahmin etmek için iç araçlar geliştirmiş olabileceği, ancak uygulayıcıların hala kıyaslama yapmak için tipik değerlere ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. Bu nedenle makalede, uzun açıklıklı yapıların gömülü karbonunu tahmin etme yöntemlerini değerlendirmeyi ve on spor stadyumunun gömülü karbonunu karşılaştırılması önerilmiştir. İki ana değişken olan malzeme miktarları ve gömülü karbon katsayıları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, spor stadyumlarında geniş bir gömülü karbon değerleri aralığını gösterilmiş ve etkili yapısal tasarım ile sera gazı emisyonlarında dramatik azalmaların mümkün olduğu vurgulanmıştır.
Gram-Hanssen (2014)	2014	Existing buildings – Users, renovations and energy policy	Bu makalede, Danimarka'daki sahipli müstakil evlerin enerji tüketimi ve bu evlerin enerji ile nasıl güncellenebileceği konusunu ele alınmıştır. Danimarka'nın konut stokunun yaşına ve enerji tüketimine dair veriler sunularak, konut sektöründeki enerji azaltma potansiyeli üzerine yapılan araştırma tartışılmış ve büyük bir azaltma potansiyeli olduğu gösterilmiştir. Çalışma, teknik araçların uygun olmasına ve ekonomik olarak uygun olmasına rağmen, ev sahiplerinin çoğunluğunun enerji güncellemesi yapmaması sorununa çözüm odaklı olmuştur. İnsanların enerji güncellemesi yapmama nedenleri, zamanlaması ve nasıl yapmadıkları konusundaki farklı kaynaklardan elde edilen bilgileri kullanılarak bu soruna çözüm önerileri sunulması amaçlanmıştır. Danimarka'nın ev sahiplerini enerji güncellemeleri konusunda teşvik etmeye yönelik politika önlemleri, bina düzenlemeleri, enerji vergisi, teşvikler ve bilgi yayma gibi unsurlarla birlikte sunularak tartışılmıştır.
Atmaca ve Atmaca (2015)	2015	Life Cycle Energy (LCEA) and Carbon Dioxide Emissions ($LCCO_2A$) Assessment of Two Residential Buildings in Gaziantep, Turkey	Çalışma, Gaziantep-Türkiye'de kentsel ve kırsal bölgede bulunan iki farklı konut türünün gömülü ve kullanım karbon değerlerini tespit ederek, karşılaştırmıştır. Gömülü karbon değerinin LCA yöntemi kullanılarak gerçekleştirildiği çalışma, kullanım karbon değeri aylık enerji kullanım bedellerini gösteren faturalar üzerinden gerçekleştirmiştir. 50 yıllık kullanım ömrü varsayımıyla hesaplaması yapılmış olan LCA analizinde, BIM tabanlı yazılımlar kullanılmamış ve doğrudan metrajlar CAD destekli yazılımlar üzerinden elde edilmiştir. Elde edilen metrajlar ise ICE yaşam döngüsü veri tabanı değerleriyle çarpılarak gömülü karbon enerji ve karbon hesabı bulunmuştur. Kullanım enerjisi sonucu ortaya çıkan karbon miktarı ise birim dönüşümleri sonucu bulunmuştur. LCA modüllerinin hepsini içeren çalışmada, iki farklı konut tipi arasında ortaya çıkan gömülü karbon ve kullanım karbonu farkını bulundukları bölge ve kullanılan yakıt türünden kaynaklı olduğuna vurgu yapmıştır.
Gaspar ve Santos (2015)	2015	Embodied energy on refurbishment vs. demolition: A southern Europe case study	Çalışmada, 40 yıllık bir tek aile evine yönelik tam yıkım ve yeniden inşa ile onarım olmak üzere iki farklı müdahale stratejisini değerlendirilmiştir. Her iki stratejinin de benzer inşaat maliyetine sahip olduğu düşünülerek, çevresel etki karar verme sürecinde önemli bir kriter olarak ele alınmıştır. İki müdahale senaryosu için başlangıçta gömülü enerji, yeni malzemeler ve hafriyat malzemeleri analizleri yapılmıştır. Orijinal ev, her iki müdahale stratejisinin karşılaştırılması için bir referans sağlamak üzere karakterize edilmiştir. Sonuç olarak, enerji ve emisyon ile ilgili veriler, tavsiye edilen müdahale türüne dair bir kararı desteklemek için kullanılmıştır.
Jensen ve Maslesa (2015)	2015	Value based building renovation – A tool for decision-making and evaluation	Makalede, Danimarka'da bina renovasyonu ile ilgili engeller incelenmiştir. Yapılan araştırmada, renovasyon projelerinin erken aşamalarında paydaşlara yardımcı olacak basit ve kapsamlı araçların eksikliği vurgulanmıştır. Bu kapsamda, RENO-EVALUE adlı bir aracın tanıtımı yapılmıştır. Bu araç, sürdürülebilir renovasyon projelerinde karar verme sürecini desteklemek ve renovasyonun faydalarını değerlendirmek için kullanılmıştır. RENO-EVALUE, Danimarka'da dört renovasyon projesi üzerinden geliştirilmiş ve test edilmiştir. Araç, paydaşların çeşitli çıkarlarını ve değerlerini göz önünde bulundurarak değer odaklı bir yaklaşım benimsemektedir. Renovasyon projeleri için hedef belirleme, alternatif projeleri karşılaştırma ve projelerin sonuçlarını değerlendirme süreçlerine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. RENO-EVALUE, paydaşlar, çevre, organizasyon ve ekonomi olmak üzere dört ana parametreyi kapsayan bir değerlendirme yapısına sahip olarak tasarlanmış ve uygulanmıştır.
Wolf ve ark. (2015)	2015	Material Quantities and Embodied Carbon Dioxide in Structures	Çalışmada, 200 farklı binadan elde edilen veriler ile strüktür sistemlerine ilişkin gömülü karbon değeri hesaplanmıştır. Kullanım enerjisinin azaltılmasına yönelik sürekli geliştirilen inovasyonlara rağmen gömülü karbon değerinin, özellikle strüktürel sistemde, göz ardı edilmesinin sorunlarına işaret edilmiştir. Strüktürel yapı elemanlarını; çimento, betonarme çeliği ve strüktürel çelik olarak üç başlık altında irdeleyerek gömülü karbon değerinin hesaplanmış olduğu çalışmada, 200 farklı yapıda ortalama 200 kg/m² ile 1800 kg/m² arasında değişen değerde gömülü karbon miktarı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, gerçekleştirilen LCA analizi, A1-A3 modülleri (beşikten kapıya) ile ön karbon değerlendirmesi (up-front Carbon) sınırları içerisinde yapılmıştır. Çalışma, gömülü karbon düzeyi bağlamında strüktürel sistemin yapı bütünü içindeki önemine işaret ederek, enerji yoğun yapı malzemelerinin gereksiz kullanımından uzak durulmasına vurgu yapmıştır.

Bonab (2016)	2016	A new approach to define economically applicable energy efficient retrofit solutions for residential buildings in Turkey	Doktora tezi, konut binalarında daire ve bina sahiplerini enerji verimli iyileştirmelerde finansörler olarak projeye katılmalarını teşvik etmektir. Daire sahiplerinin iyileştirme projeleri için ödemeleri gereken tutar ödeyebilecekleri makul tutarın altında olması gerekmektedir. Yüksek ilk yatırım maliyeti gerektiren derin iyileştirme önlemlerini daha düşük ve makul bir yıllık ödeme gerektiren adım adım iyileştirme ile yapılabilirse o zaman bu derin iyileştirme önlemi uygulanabilir bir önlem olabileceğini vurgulamıştır.
Catherine ve ark. (2016)	2016	Material quantities and embodied carbon dioxide in structures	Bu makalede, 200 farklı binanın verilerini analiz ederek, bina yapılarının çevresel etkileri belirlenmiştir. Son yıllarda, binaların tüm yaşam döngüsü boyunca gömülü CO_2 oranının arttığı, ancak yeniliklerin kullanım aşamasındaki CO_2emisyonlarını azalttığı tespit edilmiştir. Kullanım aşamasındaki emisyonlar, ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatmaya bağlıyken, gömülü CO_2, malzeme çıkarma, üretme, taşıma, inşa, bakım ve yıkımla ilişkilidir. Ancak, bu konuda sınırlı araştırma yapıldığı için binaların toplam yaşam döngüsü etkisinin doğru bir şekilde değerlendirilmesinde zorluklarla karşılaşılmaktadır. Bu nedenle, önde gelen bilim insanları, gömülü CO_2 küresel ve standart bir değerlendirme yöntemine acil bir ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır. Bu makalede, mevcut çalışmaları tanımlayarak, malzeme ağırlıklarını sayısal duruma getirilerek ve nihayetinde gömülü CO_2 aralıklarını hesaplayarak birleşik bir yöntem sunulmuştur. Çalışma gerçekleştirilen anket ile endüstriden elde edilen 200 yeni tamamlanmış binanın verilerini elde edilmiştir. Sonuçlar, yapı malzeme miktarlarının 200 kg/m^2 ile 1800 kg/m^2 arasında değiştiğini ve gömülü CO_2 miktarının 150–600 kgCO_2e/m^2 arasında değiştiğini göstermiştir. Bu veriler, program türü, yapı sistem, boyut, kat sayısı ve Leadership in Energy and Environmental Design (Leed) sertifikasyonu tarafından analiz edilmiştir. Yapı mühendislerinin sürdürülebilirlikte oynadığı önemli role dikkat çekilerek önemi vurgulanmıştır.
Loga ve ark. (2016)	2016	TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable	TABULA ve EPISCOPE projeleri kapsamında, 20 Avrupa ülkesinde konut bina tipolojileri oluşturulmuştur. Her ulusal tipoloji, binaları boyutlarına, yaşlarına ve diğer parametrelere göre gruplayan bir sınıflandırma şeması ve bu bina tiplerini temsil eden bir dizi örnek binadan oluşmaktadır. Bu çalışmada, farklı yaş gruplarındaki binaların U-değerleri ve ısı üreticilerinin enerji harcama faktörleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, belirli yaş ve boyut grupları için istatistiksel olarak temsil edici olan sentetik ortalama binalar tanımlanmış ve enerji performansının toplam konut stoklarına yönelik projeksiyonları mümkün kılan basitleştirilmiş konut stoku modelleri oluşturulmuştur. Ortak veri yapısı kullanılarak ortalama binaların enerji performansı standart bir şekilde hesaplanmış ve Avrupa ülkelerinin heterojen bina stokları bağlamında U-değerleri, enerji sistem performansları ve final enerji gibi parametrelerin ortalama ve varyasyonunu anlamak için kullanılmıştır.
Abanda ve ark. (2017)	2017	Integrating BIM and new rules of measurement for embodied energy and CO_2 assessment	Çalışma, gömülü enerji ve CO_2 hesaplamalarını otomatize edebilen bir sistem önermiştir. Bu sistem, çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlayan teknoloji, yapı malzemesi, sistem ve süreç seçiminde karar vericilere yardımcı olabilmektedir. Çalışmada, mevcut modellerin zayıflıkları, genellikle izole olarak çalışmaları ve hesaplama sonuçlarının pratikte kullanılan standart ölçüm yöntemlerine uyumlu olmamaları olduğu ifade edilmiştir. Geliştirilen sistem, bilinen boyutlara sahip evler üzerinde test edilmiş ve gömülü enerji/CO_2, maliyet gibi faktörleri aynı anda değerlendirmeyi gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Böylelikle yapı bileşenlerinin çevresel etki ve maliyetlerinin eş zamanlı olarak belirlenmesi sağlanmıştır.
Ballarini ve ark. (2017)	2017	Energy refurbishment of the Italian residential building stock: energy and cost analysis through the application of the building typology	Makalede, Avrupa'daki konut binalarının genellikle düşük enerji performansına sahip olduğunu ve temel retrofit önlemlerinin önemli enerji tasarruflarına yol açabileceği belirtilmiştir. Ancak enerji yenileme önlemlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Söz konusu durumun gerçekleşmesi ise teknik uygulanabilirlik ve maliyetleri göz önünde bulundurmayı zorunlu kıldığı bildirilmiştir. İtalya'daki konut bina stokuna uygulanan çeşitli önlemlerin etkilerini incelenen makalede, enerji tasarrufu ve genel maliyet azaltılması açısından en etkili önlemleri belirtilmiştir. Sonuçlar, enerji politikası açısından önemli yönergeler sağlamak üzere kullanılabileceği ifade edilmiştir. Politika otoritelerine finansal teşviklerin dağıtılması ve konut bina stoklarının gelecekteki enerji taleplerinin tahmin edilmesi için bir temel oluşturulması gibi politikalar örnek olarak verilmiştir.
Dixit (2017)	2017	Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters	Bu makalede, binaların yaşam döngüsü boyunca gömülü enerji ve işletme enerjisinin dengesini inceleyerek, binaların karbon ayak izini azaltmak için gerekli olan kapsamlı bir azalmanın önemini vurgulanmıştır. Çalışmada, bina inşaatında kullanılan malzemelerden, bina ürünlerine ve inşaat süreçlerine kadar olan gömülü enerjiyi, işletme enerjisinin mekân sıcaklığı, ısıtma, aydınlatma ve cihazların güç ihtiyacı gibi faktörler ele alınmıştır. Önceki çalışmaların genellikle gömülü enerji veya işletme enerjisinin izole bir şekilde azaltılmaya odaklandığı, ancak bu ikisinin arasındaki dengeyi dikkate almadığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, bina enerjisi araştırmalarının genellikle işletme enerjisine, gömülü enerjiye odaklanmaktan daha fazla ağırlık verdiği ve bu nedenle binaların işletme enerjisinin giderek azaldığı ifade edilmiştir. Gömülü enerjiyi ölçmenin, işletme enerjisini ölçmekten daha zorlu, karmaşık ve kaynak yoğun bir süreç olduğu ve rapor edilen gömülü enerji değerlerinin belirli parametreler nedeniyle coğrafi bölgeler içinde ve arasında önemli ölçüde değişebildiği belirtilmiştir. Bu nedenle, gömülü enerji hesaplamalarına tutarlılık getirmek için bu parametrelerin standartlaştırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Kalaycıoğlu (2017)	2017	A new approach to evaluate the nearly zero energy concept of EPBD recast at district scale	Doktora tezinde EPBD methodolojisinin bir yerleşimde yer alabilecek birçok farklı bina türüne uygulanması ve böylece yerleşim ölçeğinde enerji verimliliği potansiyelinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Tezde belirtilen hipoteze göre, binaların enerji performansı, içinde yer aldıkları yerleşimlerden bağımsız düşünülemez. Daha yüksek enerji verimliliği seviyelerine ulaşmak için, bina aralıkları, yönlenme, yapı yükseklikleri gibi parametrelerin yanı sıra, bölgesel enerji sistemleri de analiz edilmesinin gerekli olduğu belirtilmiştir. Yaklaşık sıfır enerji seviyesi, çok yüksek enerji performansı ve yenilenebilir enerji katkısı gerekliliği ortaya konmuştur. Yaklaşık sıfır enerji seviyelere ulaşmak için gerekli olan yenilenebilir enerji sistemleri ve bölgesel enerji sistemleri ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksek ve özel olarak yönetilmesi gereken sistemler olduğu ifade edilerek, çalışma kapsamında enerji ve ekonomideki verimliliğine katkılarının neler olabileceği vurgulanmıştır.
Kamari ve ark. (2017)	2017	Sustainability focused decision-making in building renovation	Bu araştırmada, yapılan bina renovasyonlarıyla ilgili mevcut çabaların sürdürülebilirlik konularını yeterince ele alınmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca araştırmada, bina renovasyonu sürecinde bütünlükçü sürdürülebilirlik hedeflerini ele almak için çok boyutlu bir yaklaşım benimsenmiştir. Literatür taraması, mevcut değerlendirme yöntemleri ve metodolojilerinin incelenmesi, bireysel ve odak grup görüşmeleri, Yumuşak Sistem Metodolojileri (SSM) ve Değer Odaklı Düşünce (VFT) kullanılarak elde edilen uygun verilerle bir sürdürülebilirlik çerçevesi geliştirilmiştir. Bu çerçeve, bina renovasyon performansını denetlemek, geliştirmek ve değerlendirmek amacıyla projenin yaşam döngüsü boyunca karar verme sürecini desteklemek için kullanılmıştır. Bununla birlikte araştırma, sürdürülebilirlik hedeflerini daha etkili bir şekilde ele almak ve karar verme sürecini desteklemek amacıyla bir adım olarak görülen bir çerçeve geliştirme sürecinin sonuçlarını temsil etmiştir.
Najjar ve ark. (2017)	2017	Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building	Bu çalışmada, Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) ile Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi'ni (YDD) entegre edilerek inşaat sektöründeki yapı malzemelerinin çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Bir ofis binasının vaka çalışması, YBM ve YDD araçları kullanılarak tasarım kavramlarını doğrulamak amacıyla uygulanmıştır. Çalışmada, YBM-YDD entegrasyonunun sürdürülebilir kalkınma ve çevresel koruma hedeflerine ulaşmak için etkili bir yöntem olduğunu gösterilmiş ve inşaat sektöründeki karar verme sürecini destekliği ifade edilmiştir. Ancak entegrasyon sürecinin karşılaştığı kısıtlamalara da dikkat çekilmiştir. Ayrıca, olumsuz çevresel etkilerin çoğunun yapı inşa süreci ve kullanım aşamalarında ortaya çıktığını ve yapı malzemeleri uygulanmasının çevresel etkiyi azaltmaya yönelik önemi vurgulanmıştır.
RICS (2017)	2017	Whole life carbon assessment for the built environment	Raporda, yapının bütün yaşam boyunca meydana getirdiği karbon değerlendirmesi yapılmıştır. LCA modüllerinin tamamı irdelenmiştir. EN 15978, EN 15804, PAS 2050, PAS 2080, ISO 21930, ISO 14025, ISO 14040, ISO 14044, EN 16449, EN 16485, EN 16757 gibi uluslararası standartlara atıfta bulunulan çalışmada, yaşam döngüsü modüllerine göre varsayımlar (assumptions) ve yaklaşık değerler için referans veriler içermektedir. LCA modüllerinin tamamının hesaplanmasının oldukça karmaşık ve zahmetli bir süreç olduğuna işaret eden rapor, söz konusu bu süreci kolaylaştırmak için yöntem ve teknikler önermiştir. Bununla birlikte, bir yapıyı yaşam döngüsü içerisinde bütüncül olarak ele alan rapor, 2050 yılı içinde İngiltere yapı stokunun sıfır karbon hedeflerinin önemine işaret etmiştir.
Sağlam (2017)	2017	A new approach to identify achievable nearly-zero energy building targets for existing building retrofits	Doktora tezinde, EPBD recast (2010/31/EU) tarafından tanımlanan nZEB kavramı doğrultusunda, mevcut bina iyileştirmelerinde yaklaşık sıfır enerji seviyesine yönelik ulaşılabilir hedeflerin belirlenebilmesi için bir yaklaşım önerilmektedir. Yaklaşım, binalarda yaklaşık sıfır enerji seviyesi ile optimum maliyet seviyesi arasındaki ilişki üzerine kurulmuştur ve potansiyel yaklaşık sıfır enerji seviyelerinin belirlenmesinde, gelecekte optimum maliyet seviyesine erişebilecek en yüksek enerji performansı düzeyleri dikkate alınmaktadır. Yaklaşımın örnek uygulamasına ait sonuçlar ayrıca bina enerji performansında optimum maliyet düzeyinin belirlenebilmesi için yapılan çalışmalarda, bina kabuğuna, bina servis sistemlerine ve yenilenebilir enerji kullanımına yönelik enerji verimliliği iyileştirmelerinin birlikte değerlendirildiği kapsamlı yöntemlerin izlenmesi gerektiğini vurgulamıştır.
Almeida ve Ferreira (2018)	2018	Ten questions concerning cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation	Çalışma kapsamında, IEA EBC Programı tarafından başlatılan Annex56 projesi, Avrupa'daki konut binalarının enerji performansını iyileştirmek amacıyla çeşitli çözümleri ve yönergeleri araştırılmıştır. Proje, enerji talebinin minimize edilmesi ile yenilenebilir enerjinin kullanımı arasındaki dengeyi belirlemeyi ve renovasyon sürecinde elde edilen ek faydaları dikkate alarak yürütülmüştür. Bu bağlamda, bina renovasyon sürecinin maliyet etkin azaltılması ve çeşitli avantajları nasıl optimize edebileceğinin keşfedilmesi hedeflenmiştir.
Attia (2018)	2018	Net Zero Energy Buildings (NZEB) Concepts, Frameworks and Roadmap for Project Analysis and Implementation	Kitap, AB enerji direktiflerinde belirtilen net sıfır enerjili bina kavramını açıklamaktadır. 12 bölümden oluşan çalışma temel kavramların açıklanmasıyla başlayıp örneklem çalışmalar neticesinde yol haritası oluşturulması kadar geniş bir yelpazede net sıfır enerjili bina kavramını tanıtmıştır. NZEB kavramının, dünyanın sürdürülebilir bir geleceğe sahip olabilmesi için zorunlu bir yaklaşım olduğu vurgulanmıştır.
Azari ve Abbasabadi (2018)	2018	Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends	Makalede, enerji açısından belirsiz bir gelecekle karşı karşıya olan dünyada, binaların daha az fosil yakıt tabanlı enerji kullanacak şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi gerekliliğine odaklanılmıştır. Geçmiş on yıllarda, araştırma ve uygulama, işletme enerjisi kullanımını azaltmaya odaklanmış ve bu çabalar başarılı olmuştur. Ancak bu süreçte, binaların yaşam döngüsündeki gömülü enerjinin payı artmıştır.

			Çalışmada, gömülü enerjinin tahmin edilmesi için kullanılan ana yöntemleri ve araçları ele alınmıştır. Mevcut literatürde incelenen farklı bina tipleri için gömülü enerji değerleri sunulmuştur. Ayrıca, gömülü enerjiyi işletme enerjisiyle ilişkilendirilmiş ve bu iki enerji türünün binaların yaşam döngüsündeki payındaki değişikliklere odaklanılmıştır. Yüksek binaların gömülü enerjisi üzerine bir inceleme sunularak ve gömülü enerji ile bina yüksekliği arasındaki ilişki araştırılmıştır. Son olarak, gömülü enerjiyi azaltma stratejileri, alanındaki araştırma boşlukları ve eğilimler hakkında bilgiler verilmiştir.
Deniz (2018)	2018	Yapı kabuğunun düşük maliyetli enerji etkin iyileştirilmesine yönelik bir yaklaşım: Kamu yapısı örneği	Yüksek lisans tezi, kullanıcıların konfor koşullarından ödün vermeden yıllık enerji tüketiminin azaltılması, yapı kabuğu tasarım parametreleri kapsamında değerlendirilmiştir. Tasarlanan farklı yapı kabuğu önerilerinin ısıl performansları belirlenerek ilk yatırım maliyetleri ve yıllık enerji tüketim maliyetleri arasındaki ilişki irdelenmiştir. Sıcak iklim bölgesinde seçilen referans adliye yapısının uygulama çalışması yapılmıştır. Referans yapının aylık ve yıllık enerji tüketimleri hesaplanmış ardından enerji etkin yapı tasarımı kapsamında yapı kabuğu alternatifleri oluşturulmuştur. Çıkan sonuçlar doğrultusunda değerlendirme yapılarak çalışmanın önemi vurgulanmıştır.
Emekci (2018)	2018	A life cycle costing based decision support tool for cost-optimal energy efficient design and/or refurbishments	Doktora tezinde, inşaat sektöründe bina yatırım / yenileme faaliyetleri birden fazla kriteri ve genellikle çakışan hedefleri içerdiğinden karmaşık bir süreç olabildiği ifade edilmiştir. Bu nedenle, erken aşamada, alınan kararların öngörülebilirliğini artıracak, çelişen kararların optimum noktalarını belirleyecek ve aynı zamanda sosyal, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği artıracak bir analizi gerektiğini ifade etmiştir. Bu analizde, yalnızca yatırım maliyeti değil, binanın yaşam döngüsü boyunca oluşacak enerji ihtiyaçlarını da içeren toplam maliyet dikkate alınmalıdır. Sınırsız sayıda olan çözüm önerilerinden en optimum seçeneğin seçilebilmesi için bilgisayar destekli bir Karar Destek Sistemine (KDS) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu KDS'nin de şeffaf, Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM) ile bütünleşmiş ve sistematik olması gerektiğini vurgulamıştır.
Haugsbakk (2018)	2018	Evaluations of how carbon dioxide calculations can be integrated into 3D models at an early design stage for more efficient Life Cycle Assessments on buildings	Çalışmada, erken tasarım aşamalarında daha verimli bir LCA yapılabilmesine yönelik malzemelerin karbon eşdeğerlerinin nasıl ortak bir birimde birleştirildiğini araştırılmıştır. Çalışmada, yapı sektöründe LCA hesaplamaları yapan uzman kişilerle toplantılar yapılmış ve karbon eşdeğer miktarının bulunabilmesine yönelik hangi metodolojilerin kullanıldığı irdelenmiştir. Sürdürülebilir çözümler üreten Tyréns firmasının gelişimine katkı sağladığı Bidcon başta olmak üzere BIM yazılımı olan Revit Architecture ve görsel programlama eklentisi Dynamo yazılımları karbon eşdeğer miktarının hesaplanmasında kullanılan metodolojileri oluşturduğu tespit edilmiştir. Mimari tasarımın erken aşamasında, Bidcon içinde yer alan iklim verileri, Revit Architecture ve Dynamo ile tespit edilen yapı malzemeleri metrajıyla (materials takeoffs) birleştirilerek karbon eşdeğer miktarı elde edilmiştir. Kapsamı veri tabanı içeren Bidcon yazılımının son kullanıcıya görsel olarak yetersiz kalan ara yüz eksikliğinin BIM yazılımı olan Revit Architecture ile kolaylıkla önüne geçilebileceğine vurgu yapılmıştır.
Jensen ve ark. (2018)	2018	10 questions concerning sustainable building renovation	Makalede, bütün Avrupa ülkelerinde yaşlanan bina stoku için sürdürülebilir bina yenileme kavramını ortaya koyulmuştur. Kavramın içeriğini 10 farklı soruda cevaplama çalışan makale, geleneksel enerji yenileme yaklaşımı olan daha verimli ısıtma-soğutma, aydınlatma sistemleri ve daha iyi yalıtım kavramlarının yanında sürdürülebilir bina yenileme kavramının sosyal amaçlarının olması gerektiğini belirtmiştir. Yeni binaların sürdürülebilir sertifikasyonu hakkında çok sayıda tasarım karar destek ve sistemlerinin olduğunu, ancak sürdürülebilir bina yenileme kavramına özgün sertifikasyon desteğinin/sisteminin yetersiz olduğu vurgulanmıştır.
Kneifel ve ark. (2018)	2018	An exploration of the relationship between improvements in energy efficiency and life-cycle energy and carbon emissions using the BIRDS low-energy residential database	Bu çalışmada, düşük enerji tüketimli ve net sıfır enerjili binaların işletme ve gömülü enerji/emisyonlarını değerlendirmek için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemlerini kullanan bir analizi incelenmiştir. BIRDS Low-Energy Residential Database'den elde edilen verilerle yapılan analiz, net sıfır performansın, gömülü enerji akışlarında önemli bir artışa yol açtığını (%40'tan fazla), ancak bu artışın operasyonel akışlardaki azalmaların bir kısmını dengelediğini göstermiştir. Net sıfır performansın ötesindeki bina tasarımlarının, geleneksel elektrik üretimini güneş enerjisi üretimiyle değiştirerek gömülü enerji akışlarını kısmen dengeleyebileceği, ancak net sıfır toplam yaşam döngüsü akışlarına ulaşmak için ek güneş enerjisi gerektiği sonucuna varılmıştır.
Koezjakov ve ark. (2018)	2018	The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings	Bu çalışmada, AB'deki yasal ve teknolojik gelişmelerin etkisiyle binaların işletme enerjisi yerine gömülü enerji kullanımının arttığı bir dönem incelenmiştir. Hollanda'daki konut binaları üzerinden yapılan bir vaka çalışması, Revit modellemesi ve oluşturulan bir Gömülü Enerji Veri tabanı Yönetim Sistemi (EEDMS) kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, enerji verimli evlerde gömülü enerji kullanımının toplam enerji tüketimindeki payının arttığını ve bu durumun gelecekteki politika hedeflerinde gömülü enerji kullanımının dikkate alınması gerekliliğini vurgulanmıştır.

Kovacic ve ark. (2018)	2018	Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria	Bu makalede, enerji tüketimini azaltmak amacıyla malzeme ve teknoloji eklemenin çevresel etkilerini sorgulayan bir çalışma değerlendirilmiştir. Analiz, gerçek verilere ve bina malzemeleri ile ilgili orijinal belgelere dayandırılmıştır. İki farklı "inşa edildiği gibi" modeli karşılaştırılarak yapılan analiz, çevresel etkiye %10 katkıda bulunduğunu ve ahşabın betona tercih edilmesinin GWP ve AP'yi minimize etme açısından avantajlı olduğunu göstermiştir. Son olarak, pasif evin çevresel etkiler açısından daha iyi performans gösterdiği, ancak bu farkın belirgin olmadığı belirlenmiştir. Son olarak çalışmada, enerji tasarrufunu ve çevresel sürdürülebilirliği dengelemenin karmaşıklığını vurgulanmıştır.
Mata ve ark. (2018)	2018	Contributions of building retrofitting in five member states to EU targets for energy savings	Bu makale, Avrupa Birliği (AB) üye ülkelerinin ulusal enerji verimliliği eylem planlarına bina yenilemelerinin enerji tasarrufu potansiyelini belirleme ve AB yönteminde iyileştirmeler önerme amacı taşımaktadır. Beş seçilmiş ülkenin (Fransa, Almanya, İspanya, İsveç ve Birleşik Krallık) bina stokları için enerji tasarrufu potansiyelini homojen bir şekilde haritalandırmak için bir metodoloji kullanılmıştır. Bu haritalama, on enerji tasarrufu önlemi ve altı enerji tasarrufu önlem paketi için teknik ve teknik-ekonomik iyileştirmeleri içermiştir. Ayrıca bu çalışma, AB'nin enerji verimliliği hedeflerine ulaşma konusundaki mevcut stratejileri değerlendirmiş ve daha etkili politika geliştirmeye yönelik öneriler sunmuştur.
Nizam ve ark. (2018)	2018	A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings	Bu çalışma, binaların malzeme üretimi, taşıması ve inşasıyla ilişkilendirilen enerjinin değerlendirilmesi için bir çerçeve sunulmuştur. Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) kullanılarak, yerleşik YBM ortamında gömülü enerji içeriğini tahmin etmek için bir araç geliştirilmiştir. Bu araç, malzeme gömülü enerjisi, taşıma enerjisi ve inşaat enerjisi tahminlerini yapmak için tasarlanmıştır. Geliştirilen prototip araç, çerçevenin etkileşimli ve işlevsel olduğunu göstermek için bir örnek proje üzerinde uygulanmıştır.
Özkan (2018)	2018	A new approach to guide early stages of building design to improve passive performance through the time-based thermal resilience metrics	Doktora tezinde, zamana dayalı termal direnç ölçevleri olan “thermal autonomy (TA)” ve “passive survivability (PS)” kullanılarak binaların pasif performanslarını artırmaya yönelik yeni bir yaklaşım sunulmuştur. TA herhangi bir ek aktif sistem olmaksızın, bir binanın pasif bir şekilde belirli konfor koşullarını sağlayabileceği sürenin yüzdelik ölçüsüdür. PS ise, bir binanın sıra dışı hava koşulları nedeniyle uzun süreli bir elektrik kesintisi gerçekleşmesi durumunda, yaşanabilir ortam koşullarının sağlanabildiği sürenin ölçüsüdür. Tasarımın erken aşamalarında TA ve PS metriklerinin kullanımı, aktif sistem ilavesi olmaksızın binaların serbest çalışma modunda basitleştirilmiş enerji simülasyonlarının yürütülmesini içerir. Böylece pasif tasarım stratejileri gerek tekli gerekse kombinasyonları, etkinlik açısından hızlı bir şekilde değerlendirilebileceğini vurgulamıştır.
Pittau ve ark. (2018)	2018	Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls	Bu makalede, karbonun inşaat ürünleri ve bina bileşenlerinde depolanmasının, üretim ve inşaat aşamalarındaki başlangıç sera gazı (GHG) emisyonlarını telafi etmek için çekici bir strateji olduğunu belirtilmiştir. Tipik olarak, sürdürülebilir ormancılık yönetimi varsayıldığında biyojenik karbon, orman ürünlerinin bir rotasyon dönemi sonunda biyokütlenin tamamen yeniden oluşturulması nedeniyle karbon nötr olarak kabul edildiği için LCA yöntemlerinde hesaplamaya dahil edilmez. Çalışmada, karbonun biyojenik malzemeler ve kireç bazlı ürünlerde depolanmasının inşaat malzemeleri olarak kullanıldığında ve uzun süre bina içinde bırakıldığında nasıl etkili olduğunu incelemeyi amaçlanmıştır. Beş farklı dış duvar alternatifi, farklı inşaat teknolojileri ile karşılaştırılmıştır. Hızla büyüyen biyojenik malzemenin önemli miktarda kullanıldığı ilk iki alternatifte (STR ve HEM), ısı yalıtımı olarak kullanılırken, üçüncüsü (TIM) tipik bir ahşap iskelet yapısını temsil etmiştir. Son iki alternatif, tuğla (BRI) ve dökme beton (CON) temelli geleneksel duvar alternatifleridir ve EPS içeren dış termal izolasyon kompozit sistemine (ETICS) sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Zamanın hesaplamaya dahil edilmesi için dinamik bir LCA tabanlı model kullanılmıştır. Sonuçlar, atmosferdeki ışınım zorlama terimlerinde ifade edildiğinde, hızla büyüyen biyojenik malzemelerde karbon depolamanın ahşap elemanlarda olduğundan çok daha verimli olduğunu göstermiştir. Hızla büyüyen biyojenik malzemelerde depolanan karbon, inşaatın sadece bir yıl sonra tamamen ürün yeniden büyüme tarafından yakalanırken, orman ürünleri için ormanın tekrar büyümesi için gereken uzun rotasyon dönemi nedeniyle daha uzun bir süre beklendiği ifade edilmiştir.
Rodrigues ve ark. (2018)	2018	Building life cycle applied to refurbishment of a traditional building from Oporto, Portugal	Bu makalede, bina yönetimi ve yaşam döngüsü optimizasyonunu ele almakta ve bir yeniden düzenleme sürecinde Bina Yaşam Döngüsü Yönetimi'nin (BYYD) nasıl uygulanabileceğini incelenmektedir. Bir vaka çalışması üzerinden, farklı çözümleri değerlendirmek ve ISO 15686 standartlarına göre hizmet ömrünü değerlendirmek için faktör yöntemini kullanılmıştır. Ayrıca, Bina Bilgi Modellemesi'nin (YBM) BYYD ile nasıl ilişkilendirilebileceğini ve bakım planlarını nasıl iyileştirebileceğini vurgulamak için YBM’nin nasıl kullanılabileceğini ele alınmıştır. Çalışmada, bakımın türleri, YBM'nin BYYD'ye katkıları ve bakım planlarını iyileştirme konularında bilgiler sunulmuştur. Bu sayede, önleyici bakımın önemi vurgulanmış, uygulanması teşvik edilmiş ve malzeme hizmet ömrünü artırmak ve yaşam döngüsü maliyetini azaltmak için bakım planlarının kullanılması önerilmiştir.

Röck ve ark. (2018)	2018	LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages	Bilim insanlarının ve politika yapıcılarının büyük çoğunluğu, binaların çevresel etkilerinin önemli ölçüde azaltılması gerektiğini ve bunu desteklemek için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) metodolojisinin uygun olduğu ifade edilen çalışmada, erken tasarım aşamasında karar vermeyi desteklemek amacıyla, yapı bilgi modellemsi (BIM) kullanarak çeşitli yapı seçeneklerini ve bunların çevresel etkilerini değerlendirmek için bir yaklaşım önerilmektedir. YBM entegrasyonu, tasarımın özel noktalarını belirlemeye ve YDD sonuçlarını iletmeye yardımcı olmuştur. Böylelikle, çevresel performansın erken aşamalarda değerlendirilmesi ve tasarım sürecinde görsel rehberlik sağlanması amaçlanmıştır.
Shadram (2018)	2018	Assessment and Optimization of Life Cycle Energy Use in Buildings	Doktora tezinde, yapı sektöründe enerji kullanıma dikkat çekerek, kullanım enerji-karbon değeri az olan yapıların bütün yaşam döngüsü içerisinde yüksek gömülü enerji değerine sahip olduğunu belirtmiştir. Yapının bütün yaşam döngüsü içerisinde enerji kullanımının azaltılması gerekliliğinin belirtildiği çalışma, enerji verimliliği tedbirlerinin (EEMs-energy efficiency measures) yapı bilgi modellemesi (BIM) yazılımları aracılığıyla en az hata ve veri kaybıyla yapılabileceğini belirtmiştir. Böylelikle AEC (architecture-engineering-construction) sektörü içerisinde yer alan bütün paydaşların en optimal çözümü üreterek, gömülü ve kullanım enerji-karbon düzeylerinin dengelenebileceği ifade edilmiştir.
Sierra-Pérez ve ark. (2018)	2018	Integrated life cycle assessment and thermodynamic simulation of a public building's envelope renovation: Conventional vs. Passivhaus proposal	Makalede, İspanya'da bir üniversite kampüsü içerisinde yer alan yalıtımsız bir binanın enerji güçlendirmesinde geleneksel (İspanya'da yürürlükte olan standart-yönetmelik doğrultusunda) ve Passivehaus kriterlerine göre yapılması durumunda ortaya çıkan sonuçlar kıyaslanmıştır. Her iki yaklaşımda, mevcut duruma kıyasla, enerji kazanımları olmuştur. (Geleneksel-%60, Passivehaus-%80). Ayrıca binanın toplam yaşam ömrü dikkate alındığında Passivehaus kriterlerinin %30 daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmada yöreye özgü yetişen mantar meşesi (cork oak) ağacının dış kabuğundan elde edilen bir yalıtım malzemesi kabuk yenileme amacıyla kullanılmıştır. Mantar meşesinden elde edilen malzemenin, yenilenemeyen yalıtım malzemeleri ile performans bağlamında rekabet için yeterli olmadığı sonucu vurgulanmıştır.
Sierra-Pérez ve ark. (2018)	2018	Integrated life cycle assessment and thermodynamic simulation of a public building's envelope renovation: Conventional vs. Passivhaus proposal	Bu makalede, Avrupa'nın enerji politikalarına neredeyse sıfır enerji tüketen binaların entegrasyonu ve yüksek enerji performansına ulaşmak için bina stokunun yıllık olarak yenilenmesi gerekliliği bağlamında gerçekleştirilen bir bina renovasyonu karşılaştırmasını değerlendirilmiştir. Geleneksel enerji renovasyonu ve düşük enerjili bina (Passivhaus standardını takip eden) önerileri incelenmiş ve entegre bir yaşam döngüsü ve termal dinamik simülasyon değerlendirmesi ile her iki alternatifin de bina sonrası enerji performansı açısından uygunluğu belirlenmiştir. Enerji tasarrufu sağlama oranları karşılaştırılmıştır: enerji renovasyonunda %60, Passivhaus renovasyonunda (ENERPHIT) ise %80 olarak tespit edilmiştir. İlk öneri daha az gömülü enerji ve çevresel etki doğururken, aynı zamanda daha az enerji tasarrufu sağlamıştır. İkinci öneri, özellikle büyük miktarda yalıtım malzemesi kullanımı nedeniyle binadaki gömülü etkileri artırmıştır. Yalıtım katmanları için mantarın dahil edilmesi, genel olarak yaygın olmayan yenilenebilir olmayan yalıtım malzemeleri ile rekabet edebilecek bir çözüm sağladığı ifade edilmiştir.
Ajayi ve ark. (2019)	2019	Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources	Çalışmada, binaların sadece işletme aşamasındaki etkilerine değil, aynı zamanda gömülü etkilerine odaklanmanın önemini incelenmiştir. Bir ofis binası üzerine yapılan bir vaka çalışması, Revit ile modellenmiş ve model binanın malzeme spesifikasyonunu ve enerji kullanım modelini yedi farklı tipoloji için değiştirerek duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Revit, BIMWASTE aracı, ATHENA Impact Estimator ve Green Building Studio kullanılarak sekiz bina tipolojisi için karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizleri yapılmıştır. Çalışmada, inşaat malzemeleri ve enerji kullanım modelleri değişimi gömülü enerjinin değişen önemini doğruladığından, genellikle binaların sadece operasyonel etkilerine tek başına önem vermek yerine bütünsel bir yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisi üzerine temellene politika tedbirlerine olan ihtiyaca işaret edilmiştir.
Hasik ve ark. (2019)	2019	Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction	Çalışmada, enerji verimliliği artırmak amacıyla yapılan bina renovasyonlarının genel ömrü döngüsü etkilerini değerlendirmek için bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşım, renovasyonun çevresel etkilerini, eklenen yeni bileşenlerin etkileri ve mevcut/birincil kullanılan bileşenlerin bakım ve değiştirme ihtiyaçlarının toplamıyla karşılaştırmıştır. Örnek bir çalışma, adaptif yeniden kullanımın yeni inşa senaryosuna göre çeşitli çevresel etki kategorilerinde %53-75 oranında azalma sağladığını göstermiştir. Bu çalışma aracılığıyla, benzer renovasyon projeleri için bir model oluşturarak tasarımcılara, politika yapıcılara ve bina sahiplerine adaptif yeniden kullanımın çevresel faydalarının gösterilmesi amaçlanmıştır.
Mourão ve ark. (2019)	2019	Combining embodied and operational energy in buildings refurbishment assessment	Makalede, Avrupa'da artan bir eğilim haline gelen bina yenileme konusunu ele alınmıştır. Ancak enerji verimliliği ve kültürel miras koruması gibi politika hedefleri arasında bazen çatışmalar yaşanabilmektedir. Çalışmada, bina bileşenlerinin ömrü boyunca hem gömülü enerjiyi hem de işletme enerjisini hesaplayan bir metodoloji sunarak, onarım ve değiştirme senaryolarını değerlendirmek için uygulanabilir bir yöntem önerilmiştir. Bir duvarın onarımı veya değiştirilmesi üzerinden yapılan bir vaka çalışması, farklı termal konfor gereksinim

			senaryolarını içermiş ve bina bileşenlerini, malzemelerini korumanın, bütün yaşam döngüsü enerji talebi açısından avantajlı olduğunu gösterilmiştir.
Pittau ve ark. (2019)	2019	A Life-Cycle Approach to Building Energy Retrofitting: Bio-Based Technologies for Sustainable Urban Regeneration	Bu çalışmada, AB'nin enerji tüketimi ve CO_2 emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşmada inşaat sektörünün ve özellikle bina renovasyon sektörünün kilit bir rol oynadığını vurgulanmıştır. AB'nin ana stratejileri, renovasyon ihtiyacı olan bina sayısını artırmaya ve mevcut stoğun derin renovasyonunu teşvik etmeye odaklanmak olarak ifade edilmiştir. Temel amaç, 2050'ye kadar karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktır, bu da binaların işletme süresince enerji tüketimine bağlı CO_2 emisyonlarını düşünerek karbonizasyon hedeflerini bağlı olduğu bildirilmiştir. Çalışmalar, AB bina stoğunun yaklaşık %75'inin enerji güçlendirmeye (energy retrofitting) ihtiyaç duyduğunu ve enerji kayıplarını azaltmak için bina dış yüzeylerine önemli miktarda termal izolasyonun uygulanması gerektiğini göstermiştir. Ancak, malzeme üretimi ve inşaat için karbon emisyonları, düşük karbonlu bir topluma geçişi yavaşlatma ve 2050'ye kadar kullanılabilir karbon bütçesini azaltma potansiyeli bulunduğu ifade edilmiştir. Bu bağlamda, makale, bina dış cephe renovasyonunda biyogenik malzemelerin kullanımını içeren alternatif yaklaşımları ve bu yaklaşımların çevresel faydalarını zaman içinde bütünsel olarak ölçen dinamik bir YDD yöntemine dayanan özel bir hesaplama aracını tanıtmıştır.
Rezaei ve ark. (2019)	2019	Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages	Çalışmada, bina tasarımının erken aşamalarında malzeme ve süreçlere dair bilgi eksikliği nedeniyle ortaya çıkan belirsizlikler ele alınmıştır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) ve Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) kullanılarak, Quebec, Kanada'da bir konut binasının çevresel etkileri hem erken aşamada hem de detaylı tasarım aşamalarında değerlendirilmiştir. Revit ile gerçekleştirilen YBM ve openLCA ile gerçekleştirilen YDD'nin entegrasyonuyla, çeşitli malzeme kombinasyonları ve montaj seçenekleri incelenmiştir. Erken tasarım aşamasında bilgi belirsizliğini yönetmek için her malzeme için olasılık fonksiyonları atanmıştır. Detaylı tasarım aşamasında ise malzeme türleri ve miktarları belirlenmiş ve bu bilgiler LCA çalışmasında kullanılmıştır. Böylece, bina aşamaları ve imalatlarının çevresel etkileri hesaplanarak, çevresel açıdan en iyi seçenekler belirlenmiştir. Bu süreç, bina tasarımcılarına çevresel değerlendirmelerinde rehberlik ederek, her montaj için daha sürdürülebilir malzemeler seçmelerine ve bina çevresel etkilerini azaltmalarına yardımcı olabileceğine işaret etmiştir.
Yılmaz ve Özgünler (2019)	2019	A Performance Based Method for Selection of Thermal Insulation Material: Social Housing Case	Çalışma, yüksek performanslı sosyal konut tasarımında termal yalıtım malzemesi seçimi için çok kriterli bir karar verme yöntemine dayanan bir yaklaşım önermiştir. Önerilen yaklaşım, Türkiye'deki ortak bir sosyal konut prototipi üzerinde incelenmiştir. Bağımsız değişkenler, termal yalıtım malzemesi türü ve kalınlığı, cam tipi ve pencere-duvar oranı (WWR) olarak belirlenmiş ve prototipin performansı alternatif senaryolarla araştırmak için parametrik analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise, çeşitli çevresel ve ekonomik özelliklere sahip binalar için termal yalıtım malzemesi seçiminde doğru kararların, binaların daha yüksek performans göstermesini sağladığına işaret etmiştir..
Amini Toosi ve ark. (2020)	2020	Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review	Bu makalede, bina enerji rehabilitasyonunun Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (YDSD) alanındaki yayınların incelenmesi amaçlanmıştır. Temel odak, mevcut literatürde benimsenen yöntemler ve araştırma boşlukları hakkında eleştirel bir inceleme yaparak, gelecekteki araştırma çalışmalarına bir alt yapı sağlamak olmuştur. Mevcut binaların düşük enerji performansı ve gelişmiş ülkelerde düşük yeni inşaat oranları nedeniyle, mevcut binaların enerji ile ilgili rehabilite edilmesi, inşa edilmiş çevrenin çevresel etkilerini azaltmak için umut vadeden bir eylem planı olarak tespit edilmiştir. YDSD yaklaşımını benimsemek, bina yaşam döngüsü boyunca Enerji Rehabilitasyon Projelerinin (ERP'ler) maliyet ve faydalarının kapsamlı analizini sağlamaya yardımcı olmuştur. Yayınlar, LCA, LCC, S-LCA ve çok boyutlu yaşam döngüsü çalışmaları olmak üzere dört kategoride analiz edilmiştir.
Carvalho ve ark. (2020)	2020	Integrating BIM-Based LCA and Building Sustainability Assessment	Makale, yapı bilgi modellemesi yazılımı üzerinden çevresel etki hesaplaması amacıyla bir metodoloji önerisinde bulunmuştur. Çalışmada, yapı sürdürülebilirlik değerlendirmesi (BSA-building sustainability assessment) ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA-life cycle assessment) yaklaşımları BIM yazılımı olan Revit Architecture vasıtasıyla bir örnek yapı üzerinden irdelenmiştir. Yaşam döngüsü modüllerinin her birinde gerçekleştirilen değerlendirme dokuz farklı çevresel etki ölçeğinde ele alınmıştır. Farklı LCI veri kaynakları kullanımının zorlukları olduğu belirtilen çalışmada, yapıların çevresel etkisinin farklı değişkenlere göre değerlendirilmesin BIM yazılımlarının önemine vurgu yapılmıştır.
Chen ve ark. (2020)	2020	Multi-criteria assessment approach for a residential building retrofit in Norway	Bu çalışmada, Norveç'teki bir konut binasının enerji verimliliğini artırmak için uygulanan çeşitli enerji tasarrufu önlemlerini ve bu önlemlerin kombinasyonlarını değerlendirmek için çok kriterli bir değerlendirme yaklaşımını sunulmuştur. Farklı enerji tasarrufu önlemlerinin kombinasyonları olan retrofit paketlerini içeren bir dizi öneri sunulmuş ve bu önerileri enerji, ekonomi, çevre ve sosyal faktörlerin birleşimini göz önüne alarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çeşitli paydaşların bakış açılarına dayalı olarak en uygun retrofit çözümlerini belirleyen bir değerlendirme faktörü kullanılarak sunulmuştur. Ayrıca, bu önerilen önlemlerin maliyet, karbon azaltımı ve

			enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin, yenilenebilir enerji fiyatları ve fotovoltaik üretim tazminat tarifeleri gibi faktörlere duyarlılık analizleri yapılmıştır.
Cui (2020)	2020	Integration of Life Cycle Assessment within Building Information Modeling Environment	Yüksek lisans tezinde, İskandinav ülkelerinde yapı sektöründe artan LCA hesaplamalarına yönelik yapı bilgi modellemesi ve görsel programla aracılığıyla bir yöntem önerilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi metodolojisinin BIM yazılımı olan Revit Architecture ve Dynamo eklentisi ile bütünleştirilmesi amaçlanan çalışmada, yapıların çevresel etki analizleri gerçekleştirilmiştir. LCA değerlerinin elde edilebildiği hazır araçlar yerine BIM tabanlı yaklaşımın, mimari tasarım sürecinde sürekli bir geri dönüş sağlaması ve son kullanıcı tarafından kolaylıkla algılana bir ara yüze sahip olmasının önemine değinilmiştir. Yerel EPD verilerinin kullanıldığı çalışmada, LCI verileri XML dosyası alınmış ve Revit Architecture üzerinden elde edilen metrajlar ile Dynamo görsel programlama eklentisi vasıtasıyla birleştirilmiştir. Ayrıca çalışma, yapı sektöründe bilgi teknolojilerinin kullanımın çevresel etki hesaplamasındaki öneme vurgu yapmıştır.
Hamburg ve ark. (2020)	2020	Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB	Çalışmada, 2050 yılına kadar yüksek enerji verimli ve karbonsuzlaştırılmış bina hedeflerine ulaşmayı amaçlayan bir pilot neredeyse sıfır enerji bina (nZEB) renovasyonunu ele alınmıştır. Yapılan renovasyon, yeni apartman binaları için belirlenen nZEB kriterlerini karşılamış, ancak nZEB hedefine ulaşılamamıştır. Ölçülen enerji tüketimi, ısıtma ve sıcak su ihtiyaçlarının tasarım beklentilerinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, renovasyon ve yeni projelerde enerji performansını tasarlarken bina sakinlerinin davranışları ve gerçek kullanımın daha gerçekçi parametreler olarak dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, hizmet sistemlerinin enerji kayıplarının ulusal hesaplama metodolojilerinde dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.
Hollberg ve ark. (2020)	2020	Evaluation of BIM-based LCA results for building design	Çalışmada, Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) kullanarak gerçek bir binanın tasarım sürecinde gömülü küresel ısınma potansiyelini (GWP) değerlendiren bir YBM-YDD aracının ilk kez uygulandığını belirtilmiştir. Analizler, tasarım aşamasındaki gömülü GWP'nin nihai binadan iki kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durum, tasarımcıların yer tutucu malzemeler kullanma yaklaşımına ve diğer faktörlere bağlanmaktadır. Bununla birlikte çalışma, YBM tabanlı çevresel değerlendirmenin tasarım sürecinde yanıltıcı ve aksak olabileceği sonucuna varılmış ve gelecekteki gelişmeler için üç alternatif önerilmiştir.
IStructE (2020)	2020	How to Calculate Embodied Carbon	Raporda, EN 15978 ve EN 15804 standartlarına göre gömülü karbon hesaplamasına ilişkin metodoloji önerilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) içerisinde yer alan A-B-C ve D modüllerinin ayrı ayrı ele alındığı rapor çalışmasında, LCI veri tabanı olarak Bath Üniversitesi katkılarıyla oluşturulan ICE Database esas alınmıştır. Gömülü karbon değerinin azaltılmasına yönelik stratejilerinde önerildiği çalışma, temel ve ileri seviye gömülü karbon hesaplama metodolojisi kapsamlı olarak açıklamaktadır. Ayrıca strüktürel elemanların gömülü karbon değerinin yüksekliğine dikkat çekilerek, malzeme temelli gömülü karbon hesaplamaları yapılmıştır. LCA hesaplamalarında kullanılabilen birçok farklı LCI veri tabanını ve hesaplama araçlarını aktaran rapor, gömülü karbon için küresel anlamda erişilebilir bir kıyaslama havuzu (benchmarking pool) oluşturulmasının gerekliliğine vurgu yapmıştır.
LETI (2020)	2020	Embodied Carbon Primer: Supplementary guidance to the Climate Emergency Design Guide	Raporda, gömülü karbon azaltım hedefleri ve stratejiler detaylı olarak incelenmiştir. İngiltere'nin başkenti olan Londro'nın sıfır karbon politikalarının belirlenmesi ve 2030 yılında bütün yeni yapıların sıfır karbon salınımına sahip olmasına yönelik politikaların ve önerilerin getirildiği rapor, hem gömülü karbon hem de kullanım karbonu bağlamında azaltım yaklaşımları önermiştir. Özellikle yapı malzemelerinin gömülü enerji-karbon değerine dikkat edilerek seçilmesi, tasarımın erken aşamalarında karbon emisyon değerlerine göre alternatif malzeme tercihi ve döngüsel ekonomik yaklaşım bağlamında yapı üretimi gibi karbonsuzlaşma hedeflerine götürecek birçok oldukça önemli stratejik faaliyet tespit edilerek önemine vurgu yapılmıştır. Mevcut yapıları içerdiği büyük miktarda gömülü karbon nedeniyle, kullanım enerjisi verimliliğinin artırılarak devamlılığının sağlanmasının iklim ve karbon azaltım hedeflerine ulaşmada önemli olduğu belirtilmiştir. Özellikle strüktürel -taşıyıcı- yapı elemanlarının gömülü karbon değerinin yüksekliği belirtilerek, gömülü karbon değerini içeren malzeme rehberi oluşturulmuştur. Ayrıca, gömülü karbon hesaplama işlemi en temel yaklaşımıyla ele alınarak, LCA analizlerinin yaygınlaştırılması gerektiği ifade edilmiştir.
Magrini ve ark. (2020)	2020	From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example	Makalede, Avrupa enerji politikalarının 2010/31/EU ve 2018/844/EU direktifleri ile tanıtmış olduğu yaklaşık sıfır enerjili bina (nZEB) kavramının yapı sektöründe kullanılması, "Horizon 2020" Avrupa Birliği programı ile nZEB binaların teşvik edilerek, enerji kazanımını daha üst seviyeye çıkaran Pozitif Enerjili Bina (Positive Energy Building-PEB) kavramının önem kazanmasının gerekliliği ortaya koyulmuştur. Enerji verimliliğini arttıran gelişmiş malzeme ve teknolojilerin kullanımı ile pozitif enerjili bina örneklemi müstakil konut (single-family residential) üzerinde incelenmiş, çıkan sonuçlar ve kazanımlar vurgulanmıştır. Ülkemiz de 20 ayrı AB ülkesi ile pozitif enerjili bina programına katılmaktadır.

Moran ve ark. (2020)	2020	Sustainable energy efficiency retrofits as residenial buildings move towards nearly zero energy building (NZEB) standards	Makalede, İrlanda'da mevcut konutların enerji verimliliğini artırmak için yapılması gereken retrofit ihtiyacını değerlendirilmiştir. Bu amaçla, doğalgazla ısıtılan yarı müstakil ve sıra evlerdeki optimum retrofit paketlerini belirlemek için maliyet-optimal bir metodoloji kullanılmıştır. Araştırmada, yaşam döngüsü maliyet ve çevresel göstergeleri dikkate alan bir çerçeve ile maliyet-optimal sonuçları karşılaştırılmıştır. Bulgular, çoklu göstergelerin değerlendirilmesinin, sadece enerji ve maliyet göstergelerine dayanan değerlendirmelerle elde edilen sonuçlardan farklı optimal retrofit tasarımları ortaya koyduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, maliyet-optimal yaklaşımın tek başına yeterli olmadığı, ancak çoklu göstergelerin kullanılmasıyla daha kapsamlı bir çözüm sağlanabileceği vurgulanmıştır.
Qu ve ark. (2020)	2020	A novel holistic EPC related retrofit approach for residential apartment building renovation in Norway	Makalede, Norveç'te 1980 yılında yapılmış bir apartman yapısı için Enerji Performans Sertifikası (Energy Performance Certification-EPC) ile ilişkili bütüncül bir bina yenileme yaklaşımı ortaya koymuşlardır. Çalışmada 18 farklı güçlendirme kombinasyonu 11 farklı enerji iyileştirme önlemlerini içerecek biçimde oluşturulmuştur. Kabuk öncelikli iyileştirmeler (fabric priority), yenilenebilir enerjiyi dahil eden iyileştirmeler (renewable in supplement) ve karmaşık yapı faaliyetlerinden kaçınan iyileştirmeler (avoid complicated installation) ana başlıklarında farkı senaryolar oluşturulmuştur. Geliştirilen yaklaşımla geleneksel (conventional retrofits) iyileştirmelere kıyasla %78 oranında bir kazanım olduğu vurgulanmıştır.
Resalati ve ark. (2020)	2020	Embodied energy data implications for optimal specification of building envelopes	Makalede, yüksek derecede yalıtılmış bina dış yüzeylerinin çevresel etkilerini azaltma ihtiyacıyla birlikte, artan yalıtımın operasyonel enerji talebini azaltırken, gömülü enerji yatırımının binaların genel çevresel etkisini artırabileceğini ele alınmıştır. Gömülü enerji verilerindeki belirsizliklerin, kümülatif operasyonel ve gömülü enerji analizlerine etkilerini inceleyerek, yapı sektöründeki farklı paydaşlar için bu etkileri bütünsel olarak değerlendirilmiştir. Mevcut yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) hesap yöntemlerindeki kısıtlamalar ve yüksek veri belirsizliği, çeşitli yalıtım malzemelerinin çevresel ürün beyanları üzerinden incelenmiş ve Birleşik Krallık'ta tipik bir yarı müstakil konut binasının modellemesiyle analizlere yansıtılmıştır. Bu yaklaşım sonucunda, gömülü enerji yatırımının operasyonel enerji tasarruflarını aşabileceği optimum yalıtım kalınlıkları elde edilmiştir. Bu bulgular, gelecekteki düşük enerji/karbonlu bina standartlarının belirlenmesine rehberlik edebileceğini ve binaların optimal yalıtım gereksinimlerini değerlendirmek için YDD'nin bir karar verme aracı olarak kullanılmasını destekleyebileceğini ortaya çıkarmıştır.
Shirazi ve Ashuri (2020)	2020	Embodied Life Cycle Assessment (LCA) comparison of residential building retrofit measures in Atlanta	Araştırmalar, binaların yaşam döngüsü enerjisinin ve emisyonlarının %30'unun gömülü enerji ile ilişkilendirildiğini ve bu rakamın enerji verimli pasif evler için %50'ye kadar artabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada, ABD'nin büyüyen metropol alanlarından biri olan Atlanta'da, farklı bina kategorilerinin orijinal inşa yılına göre düşünülen tek aileli konut retrofit önlemlerinin gömülü Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) ile karşılaştırılmasını gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, binaların işletme enerji tüketimini iyileştirmek için potansiyel retrofit önlemlerini araştırılmış, bu önlemlerin gömülü enerji etkileri hesaplanmış ve en çevre dostu seçenekleri belirlemek için bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar, çatı izolasyonu ve HVAC ünitesinin değiştirilmesinin en yüksek çevresel etkilere neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca bulgular, 1970'lerden önce inşa edilen konutlarda temel duvar izolasyonu ve pencere yükseltmenin de retrofit işlemleriyle önemli çevresel etkilere sahip olduğuna işaret etmiştir.
Soust-Verdaguer ve ark. (2020)	2020	Comparative BIM-based Life Cycle Assessment of Uruguayan timber and concrete-masonry single-family houses in design stage	Bu makalede, Uruguay'da inşa edilmiş bir ahşap çerçeveli tek ailelik evin, tasarım aşamalarında bir beton-duvar evle karşılaştırıldığı bir Yaşam Döngü Değerlendirmesi (YDD) tabanlı nicel bir yöntem sunulmuştur. Karar odaklı bir araç olarak tasarlanan yöntem, Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) ve YDD'yi entegre ederek, Uruguay'da yaygın olarak kullanılan konut tipolojilerinden birinin çevresel etkilerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sonuçlar, ahşap çerçeveli binanın Global Warming Potential (GWP), Human Toxicity, Acidification Potential, Ozone Depletion Potential ve Freshwater Ecotoxicity alanlarında en düşük etkileri ürettiğini, ancak Eutrophication Potential alanında en yüksek etkileri ürettiğini göstermiştir. Bulgular ayrıca, bu yöntemin tasarım aşamalarında her iki tasarım seçeneğinin avantajlarını ve dezavantajlarını karşılaştırma ve karşılaştırma sürecini kolaylaştırdığını göstermiştir.
Ziapour ve ark. (2020)	2020	Thermoeconomic analysis for determining optimal insulation thickness for new composite prefabricated wall block as an external wall member in buildings	Bu çalışmada, enerji tasarrufu ve enerji maliyetlerinin önemini vurgulayarak, binaların termal performansına odaklanan bir tasarım olan kompozit prefabrik duvar bloğunu (CPWB) tanıtılması amaçlanmıştır. CPWB'nin dış duvar elemanı olarak kullanılacak optimum yalıtım kalınlığını belirlemek için İran'ın farklı iklim bölgelerinde (soğuk, yarı kurak, sıcak) yaşam döngü maliyeti (YDM) analizi ve derece-gün (DD) yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar, optimum kalınlığın atmosfer koşullarının ısınmasıyla arttığını göstermektedir, bu da maliyet tasarrufu ve geri ödeme süresinin azalması anlamına gelmiştir.
Cabeza ve ark. (2021)	2021	Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis	İklim değişikliği önleme, toplum ve politika yapıcıları arasında önemli bir konudur. Bu çalışmada, özellikle inşaat sektöründe etkili olan bu zorluğa karşı alınan önlemleri ele alınmıştır. İnşaat malzemelerinin yüksek karbon ayak izine sahip olması ve enerji yoğun bir faaliyet olması nedeniyle, çevresel zarar ve etkileri ölçmek için yaygın olarak kullanılan yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) metodolojisi vurgulanmıştır. Ancak, YDD metodolojisi ve uygulanan varsayımlar, farklı vaka çalışmalarının sonuçlarını karşılaştırmayı zorlaştırmıştır.

			Bu çalışmada, özellikle gömülü enerji ve gömülü karbon değerlendirmelerinde ortaya çıkan uyumsuzlukları ele almak ve araştırmalardaki belirsizlikleri açıklığa kavuşturmak amacıyla detaylı bir inceleme yapmayı hedeflenmiştir. Malzeme düzeyinde, gömülü enerji ve gömülü karbonun kronolojik bir analizi sunulmuştur. Ayrıca, literatür verilerinin düzenlenmiş bir özeti, bugüne kadar elde edilen gömülü enerji ve gömülü karbon değerlerinin geniş bir aralığını rapor edilmiştir. Bu sistematik analiz, metodoloji değerlendirmesinde kullanılan katsayılar, veri tabanı kaynakları ve sınırlama sistemleri konusundaki standart eksikliğini ve anlaşmazlığı işaret edilmiştir.
Carvalho ve ark. (2021)	2021	Assessing Life Cycle Environmental and Economic Impacts of Building Construction Solutions with BIM	Makalede, yapı bilgi modellemesi yazılımı olan Revit Architecture ve görsel programlama dili Dynamo aracılığıyla, Portekiz'de yaygın olarak kullanılan kabuk bileşenlerinin 18 farklı kombinasyonu irdelenerek, çevresel ve ekonomik etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Revit ve Dynamo üzerinden alınan veriler Microsoft Excel ortamında işlenerek sonuçlar üretilmiştir. Geliştirilen farklı varyasyonlar, belirli varsayımlar (assumptions) ve ön kabuller ile irdelenmiştir. Enerji korunumunda yapı kabuğunun önemine dikkat çekilerek, çevresel etkilerin hesaplamasında görsel programlama eklentisiyle birlikte yapı bilgi modellemesi (BIM) yazılımı kullanımının sürdürülebilir yapı sektörü için önemine işaret edilmiştir.
Esau ve ark. (2021)	2021	Reducing Embodied Carbon in Buildings: Low-Cost, High-Value Opportunities	Raporda, gömülü karbon tanımı yaparak neden önemli olduğunu açıklamıştır. Gömülü karbon değerinin yapı malzemesi bazlı olacak şekilde azaltılmasına yönelik stratejik yaklaşımlar önerilmiştir. Gömülü karbon hesaplama araçlarının kullanımının teşvik edilmesini öneren araştırma raporunda hem tasarım hem de yapım süreçlerinin bir bütün olarak ele alınması sayesinde bir kazanç sağlanabileceğine işaret edilmiştir. Önerilen stratejiler orta katlı (mid-rise) yapı inşalarında uygulanarak kazanç miktarı tespit edilmiştir. Bununla birlikte söz konusu alan çalışmaları, gelecekteki yapı üretim faaliyetlerine yönelik başka alternatif azaltım fırsatlarının da tespit edilmesini sağlamıştır. Rapor, gömülü karbonu gizli bir iklim mücadelesi (a hidden climate challenge) tanımlamış ve önemine vurgu yapmıştır.
Pan ve Teng (2021)	2021	A systematic investigation into the methodological variables of embodied carbon assessment of buildings	Çalışmada, yeni binaların yaşam döngüsü emisyonlarında önemli bir rol oynayan gömülü karbonun farklı değişkenlerden nasıl etkilendiğini ve etkilerin sayısal olarak ne olduğunun araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma, temporal farklar, mekansal farklılıklar, prosedürsel tutarsızlıklar ve fiziksel çeşitlilik gibi dört metodolojik boyutta değişkenleri inceleyen bir çerçeve oluşturarak başlamaktadır. Bu çerçeve kullanılarak, 2000 ile 2020 yılları arasında yayımlanan 244 örnek üzerinde farklı değişkenlerdeki tutarsızlıkları en aza indirmek için üç aşamalı bir normalleştirme gerçekleştirilmiştir. On bir değişken belirlenmiştir ve normalleştirmenin ardından imalat, taşıma ve inşaat aşamalarındaki ortalama gömülü karbon, başlangıç örneklerine göre önemli ölçüde azaltılmıştır. Çalışma, farklı binaların rapor edilen karbonundaki varyasyonları açıklamak için on bir değişken kullanarak teorik bir temel sunmuştur. .
Safari ve AzariJafari (2021)	2021	Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development	Bu inceleme, YBM-YDD (Yapı Bilgi Modelleme - Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi) yaklaşımlarının entegrasyonunda ileri stratejileri belirlemeyi, araştırma boşluklarını tanımayı ve YBM tabanlı YDD'nin ilerlemesini teşvik etmek amacıyla yapılmıştır. ISO standardı çerçevesini kullanarak yapılan sistemli bir literatür taraması sonucunda, YBM-YDD araştırmalarının genellikle başlangıç tasarım aşamalarında manuel ve yarı otomatik çözümlere odaklandığını, ancak veri değişiminin otomatikleşmeye doğru bir eğilim gösterdiğini ortaya koyulmuştur. Ayrıca, yerel YDD veri tabanlarının geliştirilmesi, tasarım sürecine duyarlılık analizi entegrasyonu ve farklı geliştirme seviyelerinin (LOD) karşılaştırılması gibi konularda araştırma fırsatları önerilmiştir. Buna ek olarak, YBM-YDD modellerinin farklı belirsizlik ve değişkenlik kaynaklarını değerlendirmek için kapsamlı bir çerçeve geliştirmenin önemi ifade edilmiştir.
Tushar ve ark. (2021)	2021	An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development	Çalışmada, konut binalarında enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltmaya yönelik pasif tasarım stratejilerinin önemini vurgulanmıştır. Bu stratejiler arasında yönlendirme, gölgelendirme, sızdırmazlık ve yalıtım bulunmaktadır. Önceki çalışmaların birçoğunda farklı olarak bu araştırma, bu pasif tasarım unsurları için enerji azaltımını ve çevresel etkileri aynı anda sayısal hale getirmeyi hedeflemiştir. Yapı Bilgi Modellemsi (YBM-Autodesk Revit), enerji derecelendirme aracı (FirstRate5), ve YBM destekli yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD-Tally) gibi araçlar kullanılarak, bina tasarım seçeneklerinin karbon ayak izini ve enerji tüketimini azaltmak için nicelendirilmesi ve iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca çalışmada, yalıtımın binanın toplam kütlesinin sadece %1'ini oluşturduğunu ancak enerji tasarrufunda ve karbon ayak izinde önemli bir rol oynadığını ifade etmiştir. Çevre dostu ve enerji verimli konut tasarımının etkilerini doğrulamak için YBM tabanlı bir iyileştirme platformu elde edilmiştir.
Yadav ve Agarwal (2021)	2021	Biobased building materials for sustainable future: An overview	Biyolojik temelli yapı malzemelerinin sürdürülebilir ve toplumsal refahı olumlu bir şekilde etkilediği ifade edilen çalışmada, söz konusu malzemelerin sadece karbon emisyonlarını azaltılması değil aynı zamanda yapıların işleyişi için daha az enerji tüketimi ve termal konfor sağlanması nedeniyle geleneksel malzemelerin yerine geçen eşsiz bir alternatif olduğu bildirilmiştir. Bitki bazlı yapı malzemelerinin kullanımı, çevre dostu, sürdürülebilir ve etkili çok amaçlı malzemelere doğru bir gelişme olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte çalışmada, bio-bazlı malzemelerin yapı uygulanmasını, geleneksel malzemelere göre avantajlarını ve kullanımlarıyla ilgili fırsatları ve zorlukları keşfetmeyi de amaçlanmıştır.

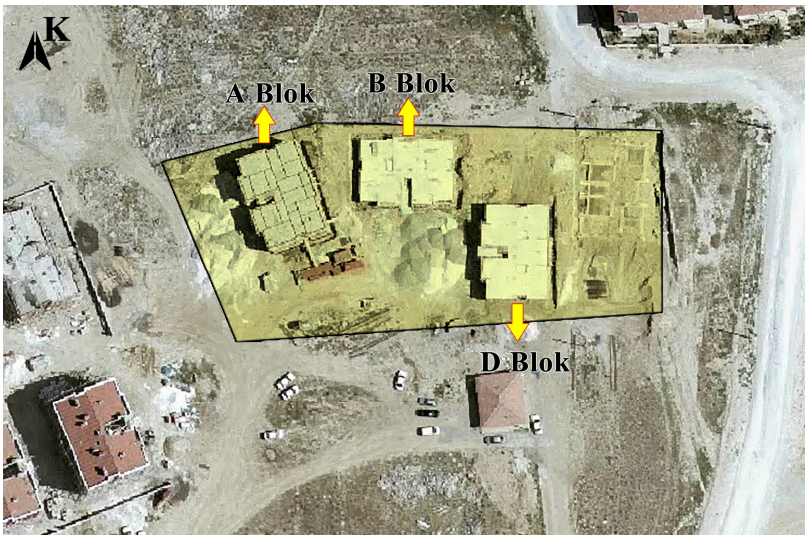
Atmaca ve Atmaca (2022)	2022	Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey	Çalışma, Gaziantep-Türkiye'de çok katlı bir konut yapısının malzeme bazlı gömülü karbon değerini ve kullanım enerjisini araştırmıştır. Strüktürel elemanlar başta olmak üzere yapıyı oluşturan birçok bileşenin gömülü karbon değeri, ton bazında metrajları bulunarak ICE database yaşam döngüsü envanterine göre tespit edilmiştir. Yapıya ilişkin projeler üzerinden gerçekleştirilen metraj hesaplamaları, yaşam döngüsü değerlendirmesinin bütün modüllerinde kullanılmıştır. Kullanım enerjisi sonucu meydana gelen karbon değeri, yapının aylık tüketim miktarının yer aldığı faturalar üzerinden yapılmıştır. Hesaplamalara ilişkin birçok varsayımın açık olarak belirtilerek gömülü-kullanım karbon değerlerinin bulunduğu çalışma, ayrıca yapının toplam karbon ayak izini düşürmeye yönelik erken tasarım evresi kapsamında yapılabilecek birçok öneri getirmiştir. Getirilen öneriler, benzer metodolojiyle hesaplanarak, karbon bağlamında kayıp kazan oranlarını bulunmuş ve tasarımın başlangıcındaki kararların önemine vurgu yapılmıştır.
Attia ve ark. (2022)	2022	Overview and future challenges of nearly zero-energy building (nZEB) design in Eastern Europe	Çalışmada, Doğu Avrupa'da neredeyse sıfır enerji binalarının (nZEB) uygulanmasına yönelik engelleri belirlemeyi amaçlanmaktadır. Bulgaristan, Hırvatistan, Çekya, Estonya, Macaristan, Letonya, Litvanya, Polonya, Romanya ve Slovakya gibi on ülkede yürütülen çalışma, bu ülkelerin nZEB planlarının karşılaştığı zorlukları incelemekte ve öneriler sunulmuştur. Sonuçlar, çoğu Doğu Avrupa ülkesinin AB direktiflerine ve maliyet-etkinlik yaklaşımına uyum sağlamakta hazır olmadığını göstermektedir. Ayrıca çalışma, her ülke için sıralama yapmakta ve nZEB tanımlarını iyileştirmek için önerilerde bulunmaktadır. Bu kapsamda çalışma, Doğu Avrupa'daki nZEB uygulamalarının gelecekteki gelişimine yönelik fırsatları belirlemeye yardımcı olmuştur.
Galimshina ve ark. (2022)	2022	Bio-based materials as a robust solution for building renovation: A case study	Bina yenilemesini hızlandırmak ve 2050'ye kadar karbon nötraliteyi sağlamak acil bir gereklilik olduğu ifade edilen çalışmada, yapıların enerji güçlendirmesinin, enerji verimli önlemlerle, örneğin termal izolasyon veya fosil yakıtla çalışan ısıtma sistemlerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Ancak, mevcut geleneksel malzemeler, özellikle cephe izolasyonu için kullanılanlar, iklim değişikliğini hafifletmeye yönelik önlemlerin aslında buna katkıda bulunduğu bir "kilitlenme" durumu riski taşıdığı ifade edilmiştir. Biyo-bazlı malzemeler, sadece bir binanın enerji tüketimini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda karbonu geçici olarak depolayabilen umut verici bir alternatif olarak görülmüştür. Bu malzemelerin potansiyel faydalarını değerlendirmek için genellikle yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve yaşam döngüsü maliyet analizi (LCCA) kullanılmaktadır. Ancak, binaların uzun ömürlü sistemler olduğu düşünüldüğünde, birçok belirsizlik LCA ve LCCA sonuçlarını etkileyebileceği düşünülmüştür. Bu makalede, belirsizlik altında güçlü optimizasyon kullanılarak en maliyet-etkili ve iklim dostu çözümü tanımlanmaya çalışılmıştır. Biyo-bazlı malzemeleri uygulayarak, karbon depolama hesaplamasını entegre LCA ve LCCA içine dahil edilmiştir. Sağlam optimizasyon için, hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla iyi bilinen bir NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II) algoritması ile dijital ikiz modelleme yöntemini birleştiren yeni bir metodoloji kullanılmıştır. Bu metodoloji, İsviçre'de bulunan bir vaka çalışması için uygulanmıştır. Sonuçlar, biyo-bazlı malzemelerin bina renovasyonu için güçlü bir çözüm sunduğunu, ancak en yüksek azaltma potansiyelini elde etmek için biyo-bazlı cephe izolasyonunun mevcut fosil yakıtla çalışan ısıtma sistemini değiştirmekle birleştirilmesi gerektiğini göstermiştir.
Bourbia ve ark. (2023)	2023	A review on recent research on bio-based building materials and their applications	Çalışmada, Biyo-bazlı malzemeler, bina dış cephe uygulamalarında enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen umut vadeden bir alternatif olarak öne çıkmış olduğu ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri, düşük gömülü enerji ve CO_2 emisyonlarına sahip olmaları, hatta karbon nötr veya negatif olmaları gibi avantajlara sahip olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, mükemmel termal düzenleme özellikler gösterdikleri bildirilmiştir. Bu makalede, bina inşaatında kullanılan biyo-bazlı malzemelerin mevcut durumu ve uygulamaları hakkında genel bir bakış sunulmuştur. Kenevir, ahşap, hurma palmiye ahşabı, mantar, alfa ve saman gibi malzemeler üzerinde yapılan teorik ve deneysel çalışmaların mevcut durumunu özetlemeyi amaçlayan bu literatür çalışması, bir yapı malzemesinin geliştirilmesine katkıda bulunma amacı ortaya konulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapımları oldukça yüksek çevresel etkiye yol açmış ve fakat enerji verimliliğine sahip olmayan mevcut konutların enerji performansının artırılmasının ana araştırma problemi olarak belirlendiği doktora tez çalışmasında, söz konusu problemin çözümüne yönelik hipotezleri test edebilmek amacıyla gerekli nitelikleri sağlayan bir materyal (konut yapısı) belirli bir yöntem aracılığıyla irdelenmiştir. Bu bölümde hipotez testlerinin gerçekleştiği materyal olan konut yapısı ve testlerin uygulanmasında izlenilen süreç olan yöntem açıklanmıştır.

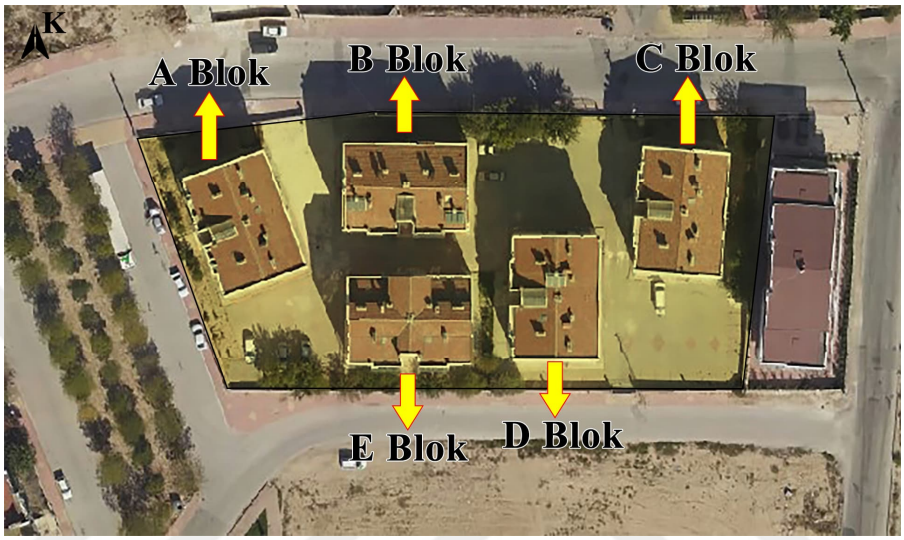
3.1. Çalışma Materyali

Doktora tez çalışması örneklem uygulaması, Konya ili Selçuklu ilçesi Dikilitaş mahallesi 16785 ada 3 parselde inşa edilmiş ve beş bloktan oluşan bir sitenin B bloğudur. Diğer bloklarla aynı plan şemasına sahip B blok bodrum, zemin, birinci ve ikinci kat olmak üzere üç kat ve altı bağımsız bölümden oluşmaktadır. 0,30 taban alanı kat sayısı (TAKS), 0,90 kat alanı kat sayısı (KAKS) olan ve 4102,00 m² alan sahip mevcut parselde yer alan konut yapılarında kapalı çıkma bulunmamaktadır. 10.12.2004 tarihli 11-34 ve 11-36 sayılı ruhsat numarasına sahip mimari proje doğrultusunda ilk inşa faaliyetleri 2005 yılı itibariyle başladığı Konya Büyükşehir Belediyesi Konya Kent Bilgi Sistemi'nde yer alan uydu görüntüleriyle tespit edilmiştir (Şekil 3.1) (KBB, 2023).



Şekil 3.1. Çalışma materyali mevcut yapının 2005 yılındaki durumu (KBB, 2023)

Söz konusu parselde herhangi bir kapalı otopark çözümü yer almamaktadır. Otopark ihtiyacı bloklar arasında tanımlanmış olan açık otopark alanlarında çözümlenmiştir. Beş blokta toplam 30 bağımsız bölümden oluşan yapılar 2010 yılından önce bütün imalatları tamamlanarak kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 3.2) (KBB, 2023). Dolayısıyla doktora tezi örneklem alanı seçilmiş olan mevcut yapı, 2000-2010 yılları arasında yapılmış olma şartını sağlamaktadır.

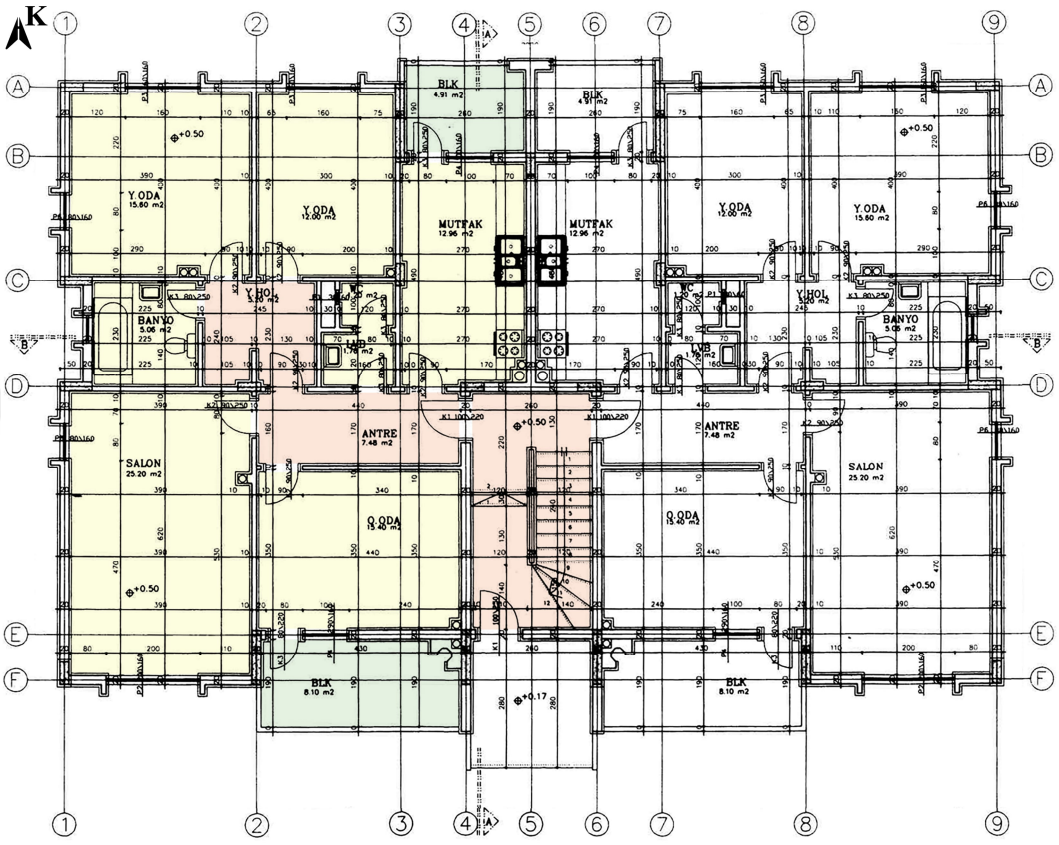


Şekil 3.2. Çalışma materyali mevcut yapının 2010 yılı öncesindeki durumu (KBB, 2023)

3.1.1. Niteliksel veriler

Çalışma materyali seçilmiş olan B blok, kuzey-güney yönlerine dik olacak biçimde betonarme karkas sistem kullanılarak inşa edilmiştir. Bodrum kat duvarları betonarme perde olarak inşa edilmiştir. Bir kat alanında iki bağımsız birimden oluşan binada her bağımsız birimde; bir salon, bir oturma odası, bir mutfak, iki yatak odası ve ıslak mekanlardan oluşmaktadır (Şekil 3.3). Biri kuzey cephede yer alan oturma odası ve diğeri güney cephede olan mutfak mahallerinde erişilebilen iki adet açık çıkma (balkon) bulunmaktadır. Herhangi bir kapalı çıkması olmayan çalışma materyalinin çatısı iki yöne eğimli (beşik) çatı olarak çözülmüştür. Eğimli yüzeyler kuzey-güney aksında yerleştirilmiştir. Eğimli yüzeylerin devamında her iki yön içinde betonarme saçak yapılmıştır. Yağmur sularını toplamak amacıyla betonarme saçaklar kullanılarak gizli dereler yapılmıştır. İki kollu bir merdiven ile düşey sirkülasyon sağlanmıştır. Bina girişi, merdiven altından gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla girişteki en az yüksekliğin sağlanabilmesi amacıyla zemin kotu kat holünde yapılmış olan basamaklar aracılığıyla

sağlanmıştır. Zemin-birinci kat arasındaki merdiven ara sahanlığının bir uzantısı olarak giriş saçağı bulunmaktadır. Doktora çalışmasının materyali olan B blok mimari ve statik proje görselleri ekler kısmında Ek-2'de yer almaktadır.

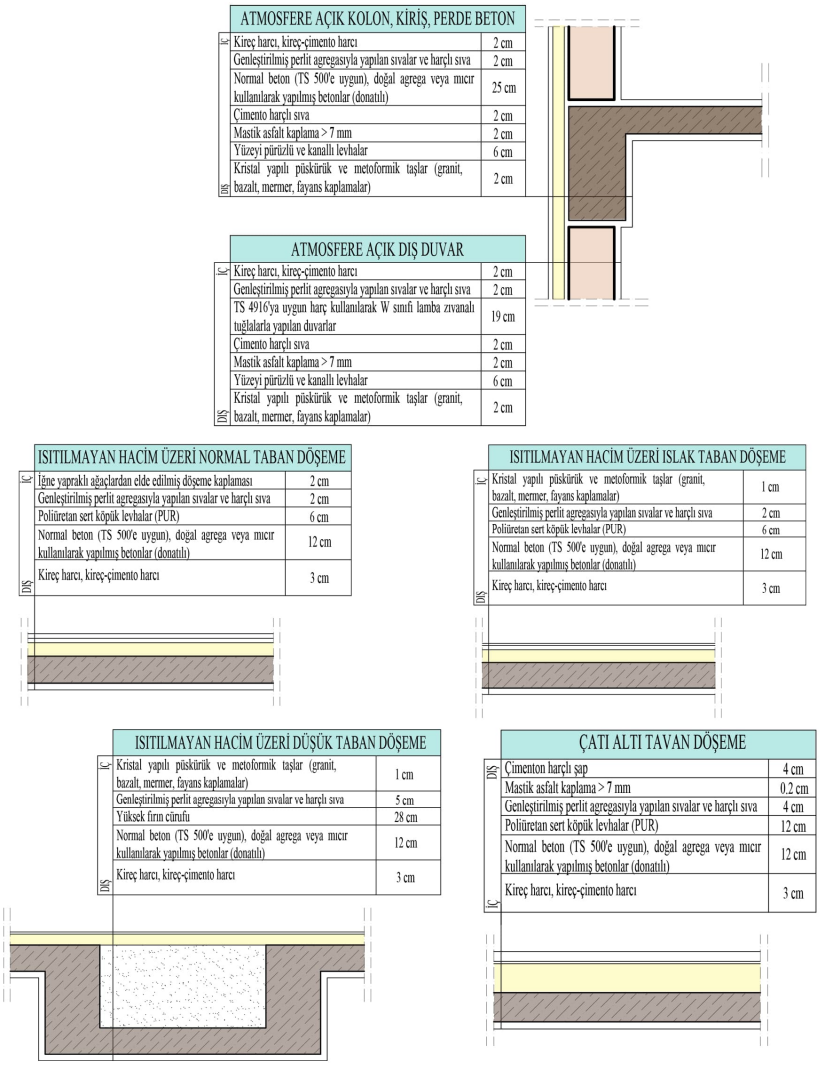


Şekil 3.3. Çalışma materyali (B blok) mevcut yapı zemin kat planı (Selçuklu Belediyesi Arşivi, 2023)

Çalışma materyali yapı kabuklarına ilişkin veriler, ilgili idare tarafından onaylanmış olan mimari proje ekinde yer alan yalıtım (izolasyon) detaylarından elde edilmiştir. Yalıtım (izolasyon) detaylarında; düşey kabuklar, atmosfere açık kolon, kiriş, perde beton ve atmosfere açık dış duvar olarak ele alınmıştır. Yatay kabuklar ise taban (zemin kat döşemesi) ve tavan (son kat döşemesi) olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, taban yalıtım detayları, iç mekanlarda kullanılan son kat bitirme malzemelerine göre üç farklı detay olarak belirtilmiştir (Şekil 3.4).

Çalışma materyali olan konut yapısı mimari proje ekinde yer alan söz konusu detaylar, doktora hipotezlerini test amacıyla hem gömülü karbon hem de kullanım karbonu hesabında kullanılmıştır. Ancak giriş bölümünde yer alan çalışmanın sınırlılıkları ve varsayımları başlığı altında ifade edildiği üzere, mevcut yapının sayısallaştırılmasında düşey kabuk detaylarında yer alan iki yapı malzemesi değiştirilmek

zorunda kalınmıştır. Bu durumun temel sebebi, mimari projeyi onaylayarak yapı ruhsatı veren yerel idarenin zorunlu tutmasıyla eklenen yalıtım (izolasyon) detaylarının genellikle kopyala yapıştır şeklinde üretilmiş olmasıdır. Bodrum kat dış yüzeyleri için kullanılan “Mastik Asfalt Kaplama> 7 mm” malzeme toprak üstü düşey kabuk katmanlaşmasında da yer verilmiştir. Benzer şekilde “Kristal Yapılı Püskürük ve Metaformik Taşlar (granit, bazalt, mermer, fayan kaplamalar)” katmanı da bütün düşey dış kabuk katman detaylarında yer almıştır. Opak yüzeylere ek olarak, yalıtım (izolasyon) detaylarında mevcut yapı pencerelerinin ısıcam özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışma materyali kabuk katmanları ve kalınlıkları

Çalışma materyali yapının düşey dış kabuklarına ait detaylarda kullanıldığı belirtilen bu iki katman hesaplamalarda göz ardı edilmiştir. Hesaplamalarda, “Mastik Asfalt Kaplama> 7mm” düşey kabukta kullanılmamış, “Kristal Yapılı Püskürük ve

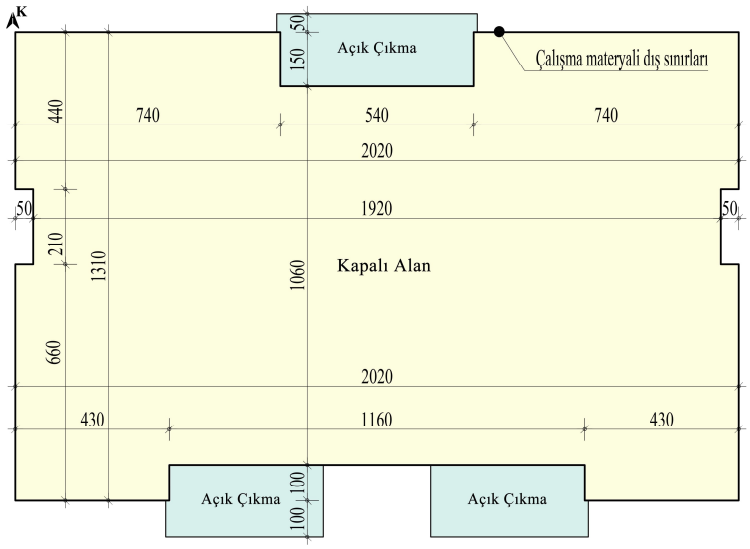
Metaformik Taşlar (granit, bazalt, mermer, fayans kaplamalar)” katmanı ise, yerinde görsel inceleme sonucu, ısı yalıtım levhası üzeri sıva olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çalışma materyali güney-batı cepheden bir görünüş

3.1.2. Niceliksel veriler

Çalışma materyali seçilmiş olan B blok, kuzey-güney doğrultusunda 13,10 m ve doğu-batı doğrultusunda ise 20,20 m’dir. Açık çıkmalar hariç kat holüyle birlikte bir kat kapalı alanı 242,82 m² ve toplam kapalı alan ise 728,46 m²’dir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Çalışma materyali kapalı alan ölçüleri

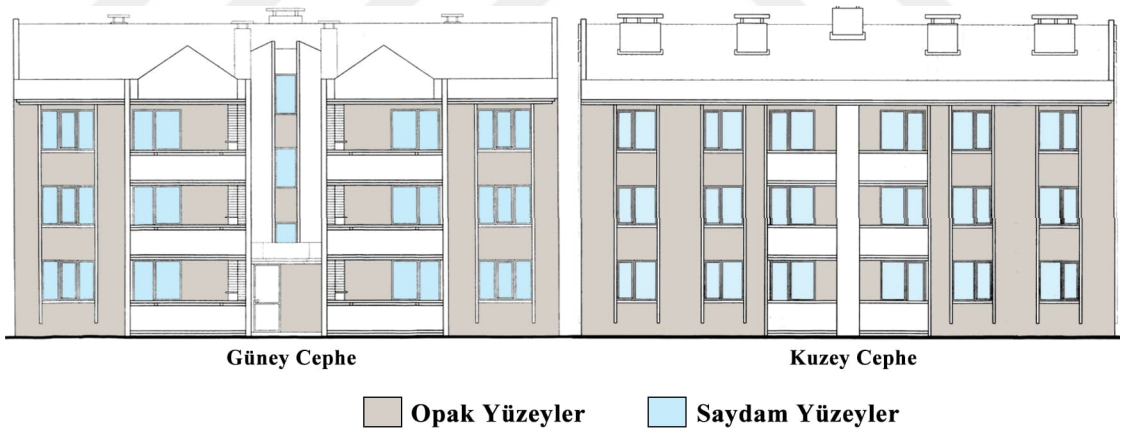
Onaylı mimari projede, kat yüksekliği döşeme üzerinden döşeme üzerine olacak şekilde 3,00 m olarak tanımlanmıştır. Zemin kotu ±0,00 olan yapının son kat döşeme üst

kotu +9.50'dir. Toplam yapı yüksekliği 9,50 m'dir. Buna bağlı olarak çalışma materyali olan yapının kuzey, güney, doğu ve batı yönlerine bakan opak ve saydam yüzey alan toplamı 599,20 m^2'dir. Söz konusu bu alanın 583,50 m^2'si opak yüzeylerden meydana gelirken, 115,70 m^2'si ise saydam yüzeylerden oluşmaktadır. Opak ve saydam toplam yüzey alanlarının yönlere göre dağılımı ise aşağıdaki Çizelge 3.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Düşey kabuk opak ve saydam yüzeylerin yönlere göre dağılımı

Düşey Kabuk Yönleri	**Opak Yüzey Alanı (m^2)**	**Saydam Yüzey Alanı (m^2)**
Kuzey	168,08	52,32
Güney	165,04	45,86
Doğu	125,19	8,76
Batı	125,19	8,76
Toplam yüzey alanı (m^2)	**583,50**	**115,70**

Doğu ve batı yönlerinde bakan yüzey alanları birbirine eşit olan çalışma materyali, kuzey ve güney yönlerinde farklılaşmaktadır (Şekil 3.7). Kuzey yönü güneye göre daha fazla hem opak hem de saydam yüzeye sahiptir. 45,86 m^2 saydam yüzey alanı olan güney cephesine göre kuzey cephesi %12,35 daha fazla saydam alana sahiptir.



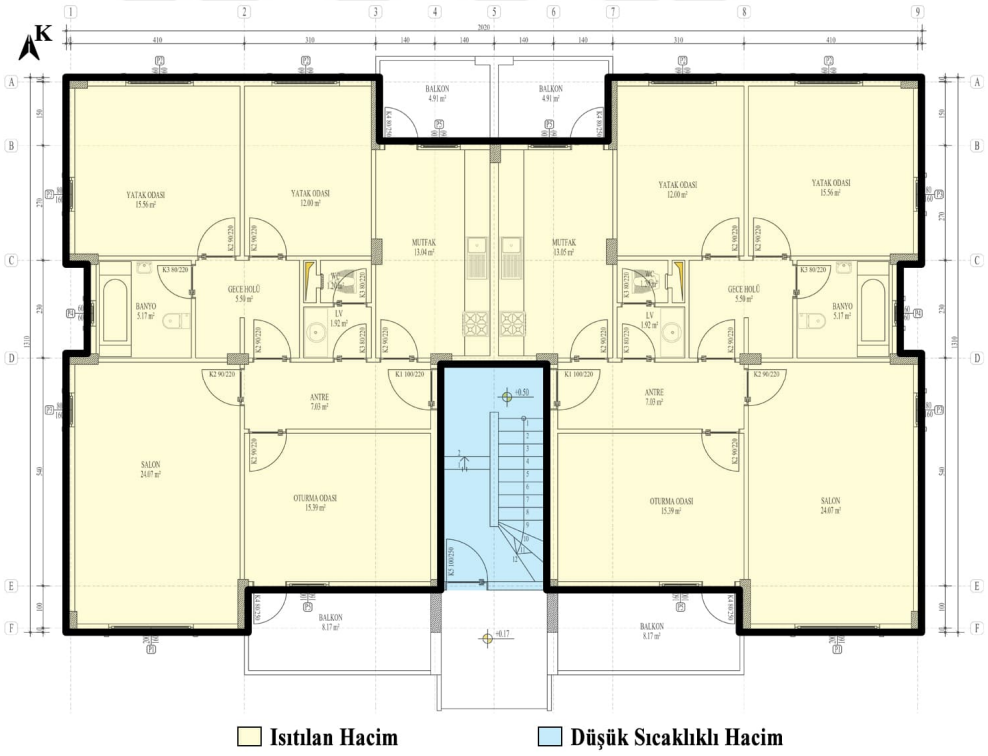
Şekil 3.7. Çalışma materyali kuzey-güney cephe opak-saydam yüzeyler

Çalışma materyali olan B blok, saydam kabuklarında beş farklı pencere tiplerine sahiptir. Bunlar; P1 200x160, P2 160x160, P3 80x160, P4 60x60 ve P5 100x160 ebatlarındaki pencerelerdir. P2 160x160 ve P5 100x160 kuzey cephede, P1 200x160, P5 100x160 ve P3 80x160 güney cephede, P3 80x160 ve P4 60x60 pencereler ise doğu ve batı cephesinde yer almaktadır. Pencerelerin yönlere göre adetleri değişmektedir. Çizelge 3.2'de yönlere göre pencere tipleri ve adetleri ifade edilmiştir.

Çizelge 3.2. Düşey kabuk pencere tipleri ve yönlere göre dağılımı

Düşey Kabuk Yönleri	Pencere Türleri	Pencere Adedi
Kuzey	P2 160x160	12
	P5 100x160	6
Güney	P1 200x160	6
	P3 80x160	2
	P5 100x160	2
Doğu	P3 80x160	6
	P4 60x60	3
Batı	P3 80x160	6
	P4 60x60	3
Toplam pencere adedi		**50**

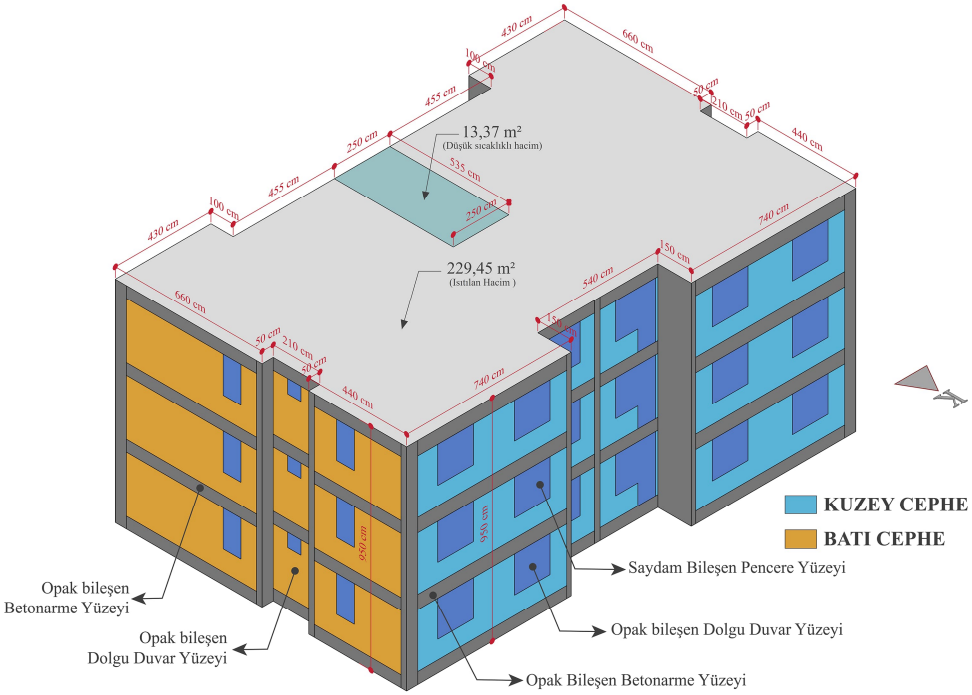
Çalışma materyali olan B blok, iki farklı ısısal zona sahiptir. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardına göre, yapı düşey kabuğunun çevrelediği hacimler, ısıtılan ve düşük sıcaklıklı iç ortam şeklinde tanımlanmıştır. Bağımsız bölüm alanını oluşturan mahaller ısıtılan hacim içinde yer alırken, ortak alan olarak kullanılan merdiven evi ve kat holü ise düşük sıcaklıklı iç hacimde bulunmaktadır (Şekil 3.8).



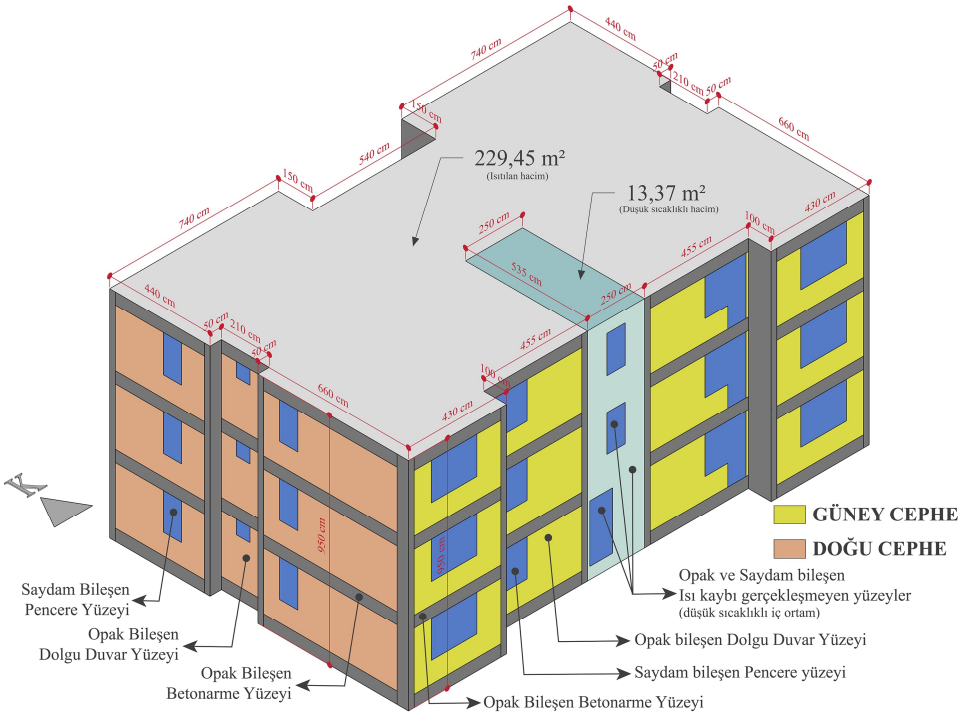
Şekil 3.8. Çalışma materyali mevcut yapı ısısal zonlama

Çalışma materyali mevcut yapıda, düşey yapı kabuğunu oluşturan farklı ısıl geçirgenlik katsayılarına sahip yüzeyler bulunmaktadır. Bu yüzeyler, düşey kabuğu oluşturan opak ve saydam bileşenlerdir. Saydam bileşenler tek bir ısıl geçirgenlik

katsayısına sahipken, opak bileşenler ise dolgu duvar ve betonarme yüzeyler olmak üzere farklılaşmaktadır. Çalışma materyali yönlere göre farklılaşan yüzeyleri ve yüzey alanları aşağıdaki şekillerde belirtilmiştir (Şekil 3.9-3.10)



Şekil 3.9. Düşey kabuk Kuzey-Batı yönleri farklı ısıl geçirgenlik katsayına sahip yüzeyler



Şekil 3.10. Düşey kabuk Güney-Doğu yönleri farklı ısıl geçirgenlik katsayına sahip yüzeyler

Çalışma materyali mevcut yapı düşey kabuğu, ısıtılan ve düşük sıcaklık hacimleri çevreleyen farklı ısıl geçirgenlik katsayılarına sahip opak ve saydam yüzeylere ilişkin alan değerleri aşağıdaki çizelgelerde ifade edilmiştir (Çizelge 3.3-3.4).

Çizelge 3.3. Düşey kabuk ısıtılan hacmi çevreleyen farklı ısıl geçirgenlik katsayısına sahip yüzey alanları

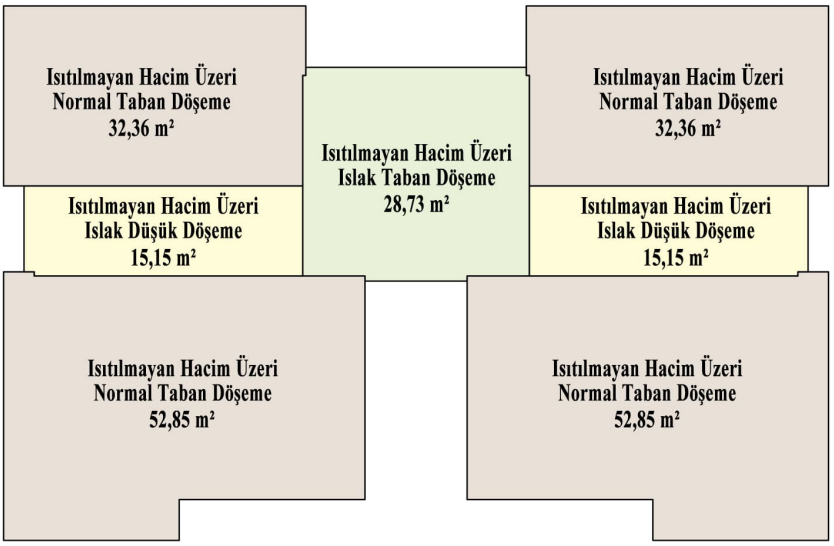
Düşey Kabuk Yönleri	Opak Kabuk Alanı (m^2)		Saydam Kabuk Alanı (m^2)
	Dolgu Duvar Yüzeyi	Betonarme Yüzeyi	
Kuzey	82,785	85,295	52,32
Güney	80,7	65,65	40,80
Doğu	80,115	45,075	8,76
Batı	80,115	45,075	8,76
TOPLAM	**323,715**	**241,095**	**110,64**

Çizelge 3.4. Düşey kabuk düşük sıcaklıklı hacmi çevreleyen farklı ısıl geçirgenlik katsayısına sahip yüzey alanları

Opak Kabuk Alanı (m^2)	Saydam Kabuk Alanı (m^2)
18,69	5,06

İç ortam sıcaklığı için ısıtılan hacim taban alanı 229,45 m²'dir. Düşük sıcaklıklı hacim olarak belirtilen merdiven evi ve kat holü ise 13,37 m² alana sahiptir. Dolayısıyla bu veriler aracılığıyla çalışma materyali olan B blok brüt hacmi ($V_{brüt}$) 2179,78 m³ olarak bulunmuştur. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı tarafından tariflenerek hesaplama metodolojisi içerisinde kullanılacak olan Bina Kullanım Alanı (A_n=0,32x$V_{brüt}$) 697,53 m² olarak elde edilmiştir.

Çalışma materyali, ısıtılmayan bodrum kat (düşük sıcaklıklı hacim) üzeri ısıtılan zemin kata sahiptir. Yatay yapı kabuğu olan taban döşemesi farklı zemin kaplamalarına sahiptir. Dolayısıyla ısıtılan zon olan zemin kat mahallerinden bir ısı kaybı gerçekleşmektedir. Söz konusu bu ısı kaybı ise zemin katta kullanılan kaplamaları ve kaplamaların alanlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Zemin katta kullanılan taban döşeme kaplamaları çalışma materyali niteliksel verilerinde ifade edilmiştir. Şekil 3.11'de ise farklılaşan taban kaplamalarının yüzey alanları belirtilmiştir. Bu durumun aksine, tavan (çatı) döşemesi için ise tek çeşit bir kaplama malzemesi kullanılmıştır. Bu nedenle 229,45 m²'lik tavan alanı her yüzeyinden aynı miktarda ısı kaybı gerçekleşmektedir

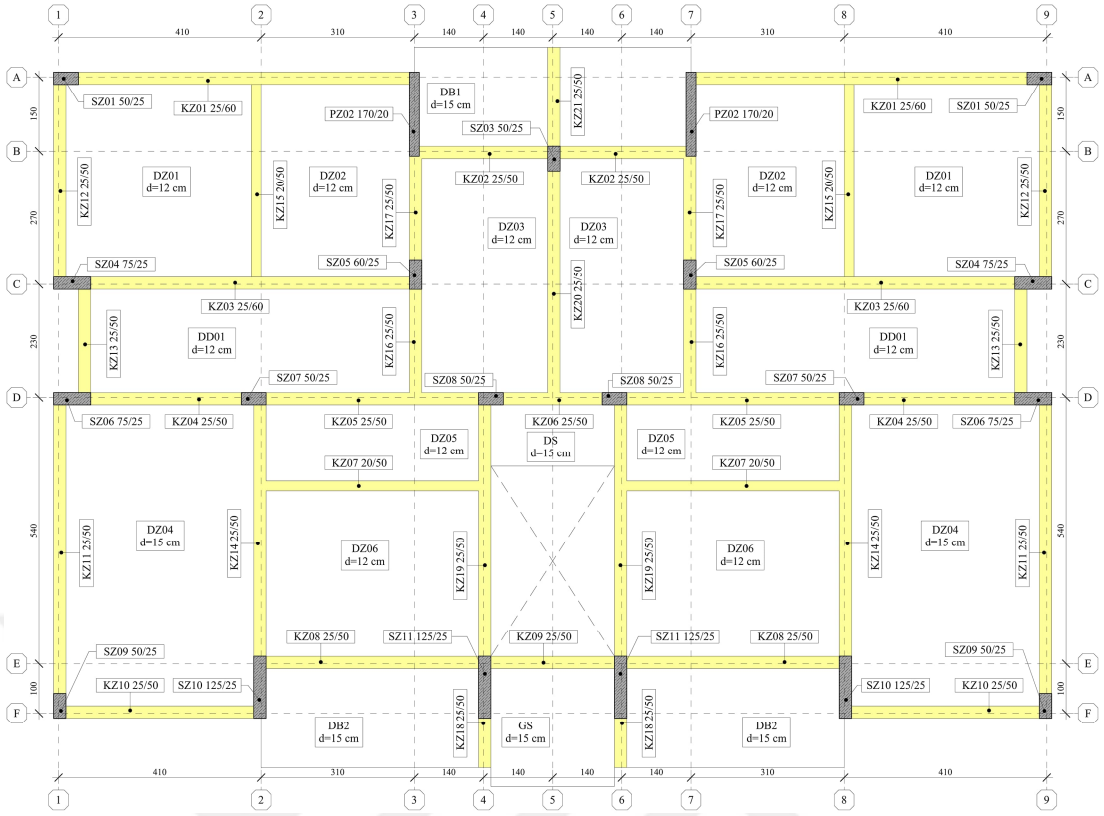


Şekil 3.11. Farklılaşan taban kaplamaları yüzey alanı

Betonarme perde bodrum duvarları olan çalışma materyali mevcut konut yapısının, farklı boyutta betonarme kolonları vardır. Kolonlar, onaylı statik proje içerisinde bulunduğu kat seviyesine göre adlandırılmıştır. Bodrum kat seviyesinde başlayan iki kolon üst katlarda küçülürken, diğer kolonlar aynı kalmıştır. Mevcut yapı kiriş ve döşemelerinde ise farklılaşma daha azdır. Betonarme perde olduğu için bodrum kat tavan planı dış yüzeylerinde kiriş yer almamaktadır. Bunun dışında benzer ebatlara sahip olan kirişler, genişlik olarak 20 ve 25 cm ve derinlik olarak 50 ve 60 cm boyutlarındadır. Yine statik projede, döşemeler içinde benzer durum vardır. Açık çıkma döşemeleri, kat holü döşemesi ve ısıtılan mahalde yer alan bir döşemede kalınlık 15 cm iken diğer döşemelerde 12 cm olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, C-D akslarıyla 1-3 ve 7-9 akslarının kesişimlerinde yer alan ıslak hacimlerde yine 12 cm kalınlığında düşük döşeme kullanılmıştır. Şekil 3.12'de zemin kat tavanı için kolon, kiriş ve döşemeler belirtilmiştir.

Çalışma materyali olan mevcut yapı, 40 cm yükseklikte sürekli temel ile toprağa oturtulmuştur. Temel pabuç genişlikleri, statik projede 70 cm ve 100 cm olarak değişmektedir. Benzer şekilde statik projede mevcut yapı beton sınıfı C16 (BS16) olarak tanımlanmıştır. Buna ilaveten statik proje, betonarme bileşenlerde kullanılacak donatı demirini ST420 olarak tariflemiştir.

Öneri kabuk modellerin uygulandığı yapı olan çalışma materyali detaylı olarak irdelenmiştir. Hipotez testlerinin gerçekleştirilmesine yönelik gerekli olan hesaplamalarda çalışma materyalinin niteliksel ve niceliksel verileri kullanılmıştır. Aynı parsel içerisinde yer alan tek bir blok için gerçekleştirilen bu irdeleme değerleri, birebir benzer plan şemasına sahip diğer bloklar için de geçerlidir.



Şekil 3.12. Çalışma materyali mevcut yapı zemin tavanı kolon-kiriş-döşeme planı

3.2. Çalışma Yöntemi

Mevcut konut yapılarının enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik öneri kabuk modelleri getirilen doktora tez çalışmasında, tespit edilen araştırma problemi doğrultusunda önerme ifadesi halindeki hipotezlerin test edilebilmesi amacıyla birden fazla çalışma yöntemi (metodolojisi) geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Literatürün yol göstermesinde geliştirilerek uygulanan söz konusu bu yöntemler, birkaç farklı yaklaşımın birlikte kullanılmasıyla elde edilmiştir. Birinci bölümde de ifade edildiği üzere, mevcut konutlar inşa süreçleri boyunca büyük miktarda çevresel etkiye neden olmuş ve servis ömrü boyunca da bu etkiye devam etmektedir. Yapı sektörü içerisinde yer alan birçok paydaş tarafından bilinen bu etki, doktora çalışması kapsamında çalışma yöntemi aracılığıyla sayısallaştırılmış ve somut bir değer haline getirilmiştir. Çevresel etkinin sayısallaştırılması iki kavramsal yaklaşım etrafında gerçekleştirilmiştir. Kavramsal yaklaşımlar, yapı malzemesi üretiminde kullanılan enerji sonucu ortaya çıkan CO_2eq. gaz emisyonları olan gömülü karbon ve bir yapının hizmet süresince gerekli konfor şartlarının gerçekleştirilebilmesi amacıyla tüketilen enerji kaynaklı oluşan CO_2eq. gaz salınımını ifade eden kullanım karbonudur. Dolayısıyla gömülü karbon ve kullanım karbonu

hesaplamaları için ayrı çalışma yöntemleri uygulanmıştır. Öneri kabuk modellerinin sağlayacağı enerji verimliliği ve ekolojik kazanımların tespiti, mevcut yapının inşa öncesi ve sonrası süreçlerindeki çevresel etkisinin belirlenmesiyle ortaya çıkmıştır.

Çevresel etkiyi hesaplamaya yönelik bu iki kavramsal yaklaşımdan başka doktora tez çalışmasında öneri kabuk modelleri içinde bir metodoloji geliştirilmiştir. Tarım yan ürünü olan biyolojik esaslı yapı malzemeleriyle geliştirilen öneri kabuk modelleri, sadece bir literatür bilgisi şeklinde ele alınmamıştır. Bu nedenle öneri kabuk modelleri içerisinde yer alan biyolojik esaslı yapı malzemelerinin yapı endüstrisi içerisinde aktif olarak kullanımı bir zorunluluk olarak belirlenmiştir. Ayrıca öneri kabuk modelleri katmanlarında yer alan yapı malzemesi nitelikleri de hem son kullanıcı için hem de yapı fiziği bağlamında en az şartlara sahip olması gerekmektedir. Benzer şekilde, öneri kabuk modeller çevresel etki değerleri bağlamında da birbirleriyle kıyaslanabilir durumda olması oldukça önemlidir. Öneri kabuk modellerine yönelik belirlenmiş olan bütün bu hedeflerin gerçekleştirilebilmesine yönelik bir metodoloji benimsenmiş ve bulgular elde edilmiştir. Aktarılan bu açıklamalar ışığında çalışma yöntemi; gömülü karbon değeri hesaplama yöntemi, kullanım karbonu değeri hesaplama yöntemi ve öneri kabuk modeli oluşum yaklaşımı olmak üzere üç alt başlıkta toplanmıştır.

3.2.1. Gömülü karbon değeri hesaplama yöntemi

Gömülü karbon değeri hesabı, sadece kullanılan yapı malzemesi nitelik ve nicelik bilgilerine sahip olmakla değil aynı zamanda söz konusu yapı malzemesinin üretim süreçlerinde atmosfere salınarak sera etkisi oluşturan CO_2eq. gaz miktarlarının da bilinmesiyle yapılabilmektedir. Bu nedenle, öncelikle gömülü karbon değeri hesaplanacak yapının proje verileri (mimari, statik, yalıtım vb.) elde edilerek inşa sürecinde kullanılmış olan yapı malzemeleri tespit edilir. Daha sonra ise kullanılmış olan yapı malzemelerine ilişkin uluslararası standartlara ve geçerliliğe sahip CO_2eq. gaz salınım verileri bulunur. Elde edilen bu iki veri kullanılarak gömülü karbon değerine ulaşılmış olur. Bu yaklaşım çerçevesinde doktora tez çalışması gömülü karbon değeri hesabı gerçekleştirilmiştir.

- **Küresel ısınma potansiyeli (GWP) değeri tespiti**

Yapı malzemesi üretiminde meydana gelen birçok çevresel etki bulunur. Farklı başlık altında toplanan bu çevresel etkiler, EN 15978 (2011) (sustainability of construction works-assessment of environmental performance of buildings calculation

method) ve EN 15804+A2 (2019) (sustainability of construction works environmental product declarations core rules for the product category of construction products) standartları kapsamında tanımlanmış olan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) (LCA-life cycle assessment) metodolojisi aracılığıyla tespit edilmektedir. Doktora tez çalışmasında yapı malzemelerine ilişkin çevresel etkilerin tespiti için karmaşık hesaplamalar ve geleceğe yönelik senaryolar gerektiren YDD yöntemi doğrudan kullanılmamıştır. Ancak, karmaşık hesaplamalar gerektiren YDD yöntemi kullanılarak üretilen çevresel ürün beyanları (EPD-environmental product declaration) kullanılmıştır. Yapı malzemeleri için çevresel ürün beyanları, yapı endüstrisinde yer alan malzeme üreticileri tarafından EN 15978 (2011) ve EN 15804+A2 (2019) standartlarına uygun olarak sağlanmaktadır. Günümüzde birçok uluslararası yapı malzemesi üreticisi tarafından sağlanan EPD belgeleri, doktora tez çalışması gömülü karbon hesap yöntemi için ana veri kaynağını oluşturmuştur. Bununla birlikte EPD verilerinin her biri kullanılmamış hem malzememin yaşam döngüsü evreleri hem de çevresel etki değerleri sınırlandırılarak kullanılmıştır. Detaylı açıklaması Bölüm 1.3'te yapılan söz konusu sınırlandırma yaşam döngüsü değerlendirmesi için beşikten kapıya (cradle to gate) olarak bilinen, A1 (hammadde temini), A2 (hammaddenin üretim tesisine taşınması) ve A3 (hammaddenin işlenerek malzeme üretimi) modülleridir. Yapı malzemesi kaynaklı çevresel etki için ise A1-A2-A3 modüllerinde gerçekleşmiş olan Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-global warming potential) düzeyini gösteren CO_2eq. gaz değerleri kullanılmıştır. Dolayısıyla gömülü karbon hesabı, bildirilen birimde (declared unit) üretilmiş olan her bir yapı malzemesinin A1-A2-A3 modüllerinde atmosfere salınmış olan sera etkisi oluşturan CO_2eq. gaz miktarlarından elde edilmiştir.

Yukarıda ifade edilen doktora tezi gömülü karbon hesabı yönteminde iki önemli nokta bulunmaktadır. Birincisi, kullanılmış olan EPD verilerinin çalışma materyalini oluşturan mevcut konut yapısında yer alan yapı malzemeleriyle örtüşmesidir. Bunun için çalışma materyali altından detaylı olarak incelenen mevcut konutun betonarme strüktürünü ve düşey kabuğunu oluşturan bütün yapı malzemeleri tek tek irdelenmiş ve benzer özellikler gösteren EPD verileri bulunmuştur. Ayrıca EPD verilerinde elde edilecek GWP değeri için tek bir EPD verisi esas alınmamış, aynı niteliğe sahip en çok beş olacak şekilde, farklı EPD verileri bulunmuş ve ortalama bir GWP değeri belirlenmiştir. Örneklem sayısını fazlalaştıran bu yaklaşım sayesinde, mevcut yapıya ait gömülü karbon değeri doğruluk düzeyinin artırılmasına katkı sağlanmıştır. Ancak, mevcut yapı düşey kabuğunda yer alan "Kireç harcı, kireç-çimento harcı" ve

“Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harçlı sıva” katmanlarına ilişkin özel bir EPD yoktur. Belirtilen bu katmanlar için “Çimento harçlı sıva” katmanı EPD verilerinde elde edilen GWP değeri, TS 825 Ek-E içerisinde alınan birim hacim kütlelerine (kg/m³) göre oranlanarak kullanılmıştır. Buna ek olarak, yapı sektöründe kullanımı olan biyolojik esaslı yapı malzemeleri içeren öneri kabuk modellerinde ise tek bir EPD verisi üzerinden elde edilen GWP değeri kullanılmıştır. Biyolojik yapı malzemeleri için uluslararası literatür içerisinde farklı değerlerin elde edilmesi mümkün ise de malzemeye ilişkin teknik ve uygulama detaylarının yer aldığı EPD verisi tercih edilmiştir. Öneri kabuk modellerinde kullanılmış olan biyolojik yapı malzemeleri için sadece GWP değeri değil aynı zamanda farklı uygulama kalınlıkları, ısıl iletkenlik hesap değeri (λ-W/m.K), su buharı difüzyonu direnç faktörü (μ) ve birim hacim ağırlığı (kg/m³) gibi birçok verinin de bilinmesi de gerekmektedir. Bütün bu bilgiler bir EPD verisi içerisinde yer almaktadır. Dolayısıyla öneri kabuk modelleri için spesifik EPD verileri kullanılmış ve öneri kabuk modellerin gömülü karbon hesaplama GWP değeri buradan sağlanmıştır. Hem çalışma materyali olan mevcut yapının malzemeleri hem de öneri kabuk modellerini oluşturan biyolojik yapı malzemeleri GWP değeri yapı bilgi modellemesi olan Autodesk Revit yazılımı içerisine parametre olarak tanımlanmıştır. Autodesk Revit malzeme kütüphanesi aracılığıyla tanımlanmış olan GWP parametresi mevcut konut yapısının dijital ikizini oluşturan geometrik veri ile birleştirilmiştir.

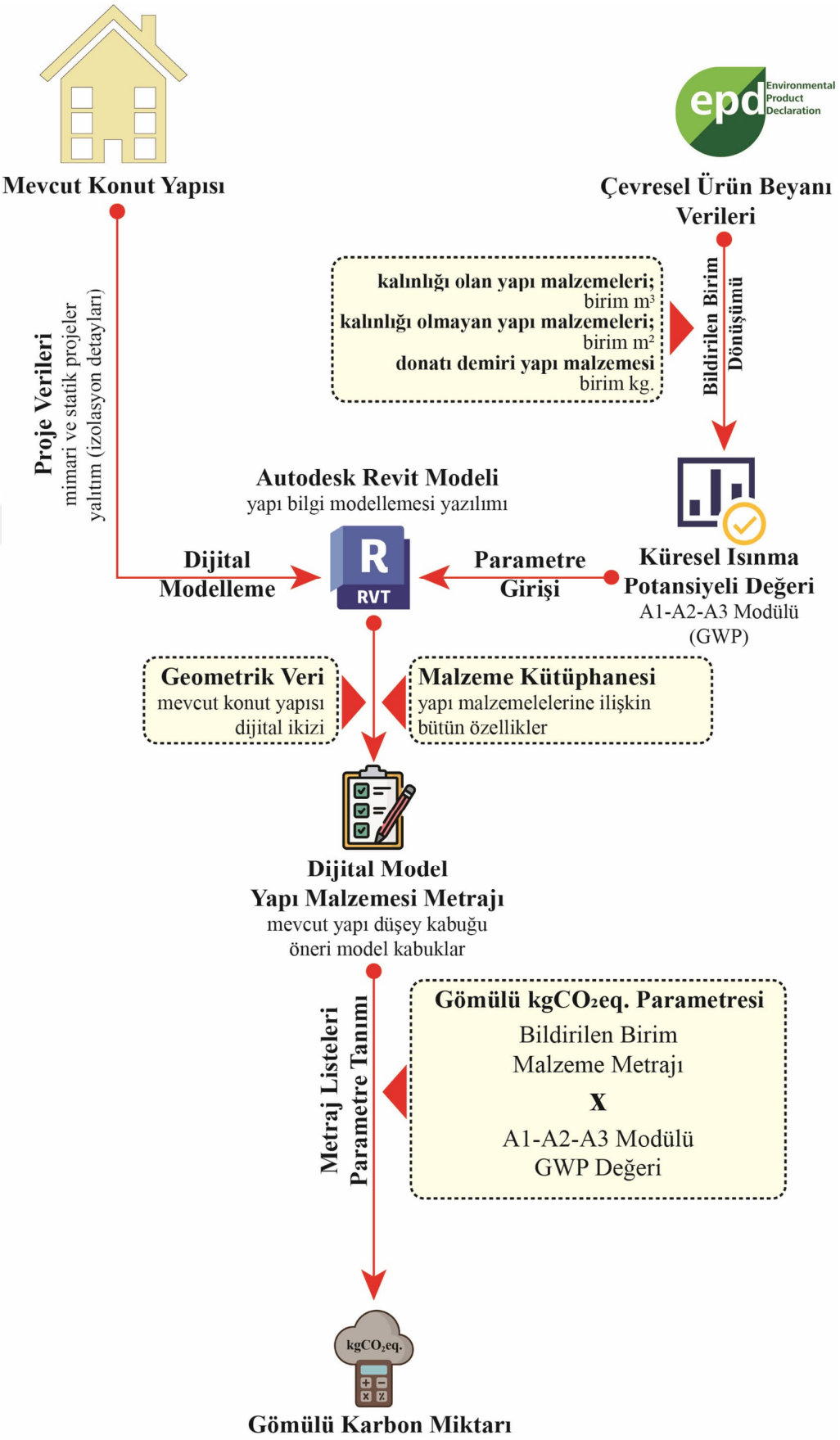
İkinci ise, EPD verilerinde GWP değeri için kullanılmış olan bildirilen birim (declared unit) dönüşümüdür. Bildirilen birim, yapı malzemesi çevresel etkilerinin hesaplanmasında referans ürün birimi olarak EPD verisi içerisinde yer alır. Bazı yapı malzemeleri GWP değeri için m² referans birim olarak tanımlanırken bazılarında ise m³ veya kilogram biçiminde tanımlama gerçekleştirilir. Dolayısıyla gömülü karbon hesabının gerçekleştirilebilmesi için GWP değeri için bildirilen referans birimlerin bütünlük sağlaması bir zorunluluktur. Tez çalışmasında hem mevcut yapıyı oluşturan malzemeler hem de öneri kabuk modellerindeki malzemeler içinde, belirli bir kalınlığa sahip olanlar kalınlıklarına bakılmaksızın 1 m³ bildirilen birimde atmosfere salınmış olan $kgCO_2eq.$ sera gazları hesaplanmıştır. Bu nedenle birim m³ yapı malzemesi GWP değeri bulunmuş ve bütün katmanlar ayrı ayrı hesap edilerek toplanmıştır. Bununla birlikte kalınlığı olmayan yapı malzemeleri için m² kullanılırken, donatı demiri için ise kilogram olarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Donatı demiri haricinde bazı yapı malzemeleri EPD verilerinde bildirilen birim olarak kilogram veya ton kullanılmıştır. Hesaplamanın kolaylaştırılması adına kilogram/ton değerleri birim m³ biçimine çevrilmiştir. Benzer

şekilde kalınlığı olan m² bildirilen birimde GWP değerine sahip malzemeler için de yapılmıştır. Belirli bir kalınlıktaki yüzey alanına sahip malzeme GWP değeri yerine 1 m³ (1x1x1 m) malzeme GWP değeri bulunmuştur. Bu işlemler, mevcut yapı düşey kabuğu için TS 825 Ek-E içerisindeki birim hacim ağırlıkları (kg/m³) ve öneri kabuk modelleri için çevresel ürün beyanında bulunan birim hacim ağırlıkları esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Çıkan bütün sonuçlar $kgCO_2eq$ biriminde olup gömülü karbon değerini ifade etmektedir.

- **Mevcut konut yapısı dijital ikizinin oluşturulması**

Gömülü karbon değeri hesabı için gerekli olan proje verileri, ilgili yerel idareden temin edilmiştir. Çalışma materyali başlığında da detaylı olarak ifade edildiği üzere, mevcut konut yapısı 2004 ruhsat tarihli olması nedeniyle projeleri dijital olarak bulunmamaktadır. Basılı kopya olan proje verilerinden hesaplamaya dahil olacak bütün plan şemaları dijital hale getirilmiştir. Dijital modelleme çalışmaları Autodesk Revit içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yapı bilgi modellemesi yazılımı (BIM-building information modeling) olan Autodesk Revit, bilgisayar destekli tasarım (CAD-computer aided design) yazılımlarında farklı olarak dijital ortamda yapıların inşa edilebilmesine izin vermekte, kullanılan yapı malzemelerine yönelik metraj verileri sağlamakta ve istenilen birçok farklı parametrenin tanımlanabilmesini olanaklı kılmaktadır. Yapı bilgi modellemesi yazılım aracılığıyla mevcut yapının geometrik verisi oluşturulmuştur. Yine yazılım içerisinde yer alan malzeme kütüphanesi kullanılarak gömülü karbon hesabında kullanılan yapı malzemelerine ilişkin GWP değeri parametre olarak girilmiştir. Daha sonra ise, dijital modelden yapı malzemesi metrajı elde edilmiştir. Yapı bilgi modellemesi yazılımı içerisinde üretilen toplam malzeme metraj listelerine de gömülü karbon bilgisini içeren GWP değeri ve malzeme metrajı ($m^3/m^2/kg$) çarpılarak gömülü karbon değeri $kgCO_2eq$. biriminde bulunmuştur.

Yukarıda yazılı olarak ifade edilmiş olan gömülü karbon değeri hesaplama yöntemi akış şeması Şekil 3.13'te belirtilmiştir.



Şekil 3.13. Gömülü karbon değeri hesaplama yöntemi akış şeması

3.2.2. Kullanım karbonu değeri hesaplama yöntemi

Yapılar, servis ömürleri boyunca kullanıcı konforu için gerekli şartların sağlanabilmesi amacıyla belirli miktarda enerji tüketmektedir. Kullanım karbonu, söz konusu enerjinin tüketilmesiyle meydana gelen CO_2eq. gazları ifade etmektedir. Yapılar, diğer endüstriyel ürünlere göre nispeten daha uzun ömürlüdür. Dolayısıyla uzun ömürleri boyunca enerji tüketerek, CO_2eq. gaz emisyonuna neden olurlar. Bir yapı için kullanım karbonu düzeyinin azaltılması, aynı zamanda kullanım enerjisinin de azaltılması anlamına gelmektedir. Böylelikle sadece yapı kaynaklı çevresel etkiler en aza indirilmekle kalınmaz aynı zamanda enerji verimliliği elde edilir. Doktora tez çalışması ana hipotez testinin gerçekleştirilebilmesi sadece gömülü karbon değeri değil aynı zamanda kullanım karbonu değerinin de hesaplanmasını bağlıdır. Bu nedenle, çalışma kapsamında kullanım karbonu değeri uluslararası bilimsel yaklaşımlara uygun biçimde geliştirilen bir yöntem aracılığıyla hesaplanmıştır.

Araştırma problemine düşey kabuk değişimi aracılığıyla çözüm önerisinin getirildiği doktora tez çalışmanda, yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybı esas alınarak kullanım karbonu hesabı gerçekleştirilmiştir. İster mevcut yapının hali hazırdaki durumu isterse öneri kabuk modelleri uygulanmış durumu fark etmeksizin yapı kabuklarından ısı kaybı olmaması mümkün değildir. Dolayısıyla yapı kabuklarından gerçekleşen yıllık ısı kaybı kadar en az yıllık ısıtma enerjine ihtiyaç vardır. Yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybı miktarı ve en az ısıtma enerji ihtiyacının tespiti için TS 825 (2013) Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı hesaplama metodolojisi kullanılmıştır. TS 825 (2013) metodolojisi hem ısı kayıplarının hem de ısı kazançlarının belirlenerek gerekli ısıtma enerji miktarının bulunmasını mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla bir yapının yıllık en az gerekli olan ısıtma enerjisi ihtiyacı bulunur. Isıtma enerjisi için kullanılacak olan enerji türünün kalorifik değeri ve o enerji türünün yanması sonucu oluşacak CO_2eq. gaz emisyon miktarı bilinmesi durumunda kullanım karbonu değeri kolaylıkla hesaplanabilir. Kullanım karbonu olarak hesaplanan bu değer, diğer bir ifadeyle karbon ayak izi olarak da bilinmektedir. Çalışma materyali olan mevcut konut yapısının sadece düşey kabukları öneri kabuk modelleriyle değişmiş, yatay kabukları sabit kalmıştır. Hali hazırdaki düşey kabuk ve öneri kabuk modelleri uygulanmış mevcut yapı için gerekli olan en az ısıtma enerjisi ihtiyacı, mevcut yatay kabuklar sabit bırakılarak aynı metodolojiyle hesaplanmıştır. Kullanım karbonu değeri hesaplama metodolojisi iki aşamada ele alınmıştır. Birinci aşama, çalışma materyali olan mevcut konut yapısının TS 825

Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı ile bütünleştirilmesi gelmektedir. İkinci aşamada ise yıllık en az ısıtma enerjisi miktarını karşılayacak enerji türü ve emisyon değerinin tespiti bulunmaktadır.

- **Yıllık ısıtma enerji miktarının bulunması**

Kullanım karbonu değeri hesabı için öncelikle çalışma materyali olan mevcut konut proje verileri elde edilmiştir. Mimari, statik ve yalıtım (izolasyon) projelerinden temin edilen veriler Autodesk Autocad 2B modeline aktarılmıştır. Çizgisel verilere ihtiyaç olduğu için Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımı olan Autodesk Autocad 2B yazılımı kullanılmıştır. Çalışma materyalinin mimari kat planları, statik kalıp planları ve yalıtım (izolasyon) detayları Autodesk Autocad içerisinde çizilerek sayısallaştırılmıştır. Kullanım karbonu değeri hesaplaması mevcut konut yapısı yıllık ısıtma enerji ihtiyacına bağlı olarak bulunacağı için, ısı kaybeden yüzeylerin alansal büyüklükleri bilinmek zorundadır. Çalışma materyali niceliksel verilerinde belirtilmiş olduğu gibi mevcut konut yapısı iki farklı ısısal zona sahiptir. Isıtılan hacim ve düşük sıcaklıklı hacim olarak ikiye ayrılan bu ısısal zonlar, düşey ve yatay yapı kabukları tarafından çevrelenmektedir. Bütün bu kabuklar, katman bileşenlerine göre, farklı değerlerde ısıl geçirgenlik katsayısına sahiptir. Bu nedenle her birinin bağımsız olarak ısı kaybeden yüzeyleri bulunmuştur. Bu amaçla bir önceki aşamada Autodesk Autocad yazılımı kullanılarak sayısallaştırılan veriler, Trimble Sketchup Pro 3B yazılımı içine aktarılmış ve mevcut konut yapısı düşey ve yatay kabukları modellenmiştir. Söz konusu yaklaşım sayesinde her bir yüzey alanı büyük bir hassasiyetle hesaplanabilmiştir. Düşey yapı kabuğunu oluşturan dolgu duvar ve betonarme yüzey alanları tespit edilmiş, yine benzer şekilde düşey yapı kabuğu içinde yer alan saydam kabukların alanları bulunmuştur. En son aşamada ise, düşey ve yatay kabuklarda kullanılan malzemeler ve uygulama kalınlıklarıyla birlikte düşey-yatay kabuk alanları, doktora tez araştırması kapsamında hazırlanmış olan Microsoft Office 365 Excel matematiksel tablolama yazılımı içerisine aktarılmıştır. Düşey ve yatay kabuklarda kullanılan yapı malzemelerinin termo-fiziksel özellikleri, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı Ek-E'den sağlanarak Microsoft Office 365 Excel tablosuna yerleştirilmiştir. TS 825 metodolojine uygun olarak ısı kayıp ve kazançları bulunmuş ve yıllık ısıtma enerji için gerekli en az miktar kilojoule (kJ) biriminde tespit edilmiştir.

- **Enerji kaynağı kalorifik ve emisyon tespiti**

Kullanım karbonu değeri hesaplamada ilk aşama olan yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybı kJ biriminde bulunduktan sonra ısı kaybını karşılayabilecek

düzeyde gerekli olan en az enerji miktarı ve bu enerjinin yanması sonucu atmosfere salınacak CO_2eq. gazlar tespit edilmiştir. Mevcut yapıda ısınma amaçlı kullanılan enerji kaynağı doğalgazdır. Yanması sonucu enerji elde edilen fosil kaynaklı bir enerji türü olan doğalgaz, bünyesinde farklı niteliklere sahip yanıcı gazlardan oluşmaktadır. Kullanım karbonu değerinin tam olarak bilinebilmesi, birim m^3 doğalgaz yanması sonucu ne kadarlık bir ısı enerjisi elde edilir, en az ısı kaybını karşılamak için kaç birim m^3 doğalgazın yanması gereklidir ve gerekli olan birim m^3 kadar doğalgaz yandığında atmosfere ne kadar CO_2eq. gaz salınımı gerçekleşir sorularının cevaplarıyla bulunmuştur. Söz konusu soruların cevapları, karbon ayak izi hesabı konusunda uluslararası düzeyde kabul görmüş iki farklı veri tabanı içerisinden elde edilmiştir. 1988 yılında antropojenik faaliyetlerin neden olduğu iklim değişikliği risklerini değerlendirmek için kurulan IPCC (intergovernmental panel on climate change) ve Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Kırsal İlişkiler Bakanlığı tarafından oluşturulan DEFRA (department for environment, food and rural affairs) veri tabanları kullanılarak doğalgazın kalorifik değeri ve CO_2eq. gaz emisyon miktarları tespit edilmiştir. IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre doğalgazın net kalorifik (ısısal) değeri (NCV-net calorific value) Çizelge 3.5'te belirtilmiştir (IPCC, 2023) (DEFRA, 2023).

Çizelge 3.5. IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre doğalgaz net ısısal değeri (IPCC, 2023) (DEFRA, 2023)

Veri Tabanı	**Net Isısal Değer (NCV)**	**Alt Isısal Değer (LCV)**	**Üst Isısal Değer (UCV)**
IPCC	48 TJ/Gg	46,5 TJ/Gg	50,4 TJ/Gg
	Net Isısal Değer (NCV)	**Brüt Isısal Değer (GCV)**	
DEFRA	45,52 GJ/ton	50,43 GJ/ton	

IPCC veri tabanı, 1 Gigagram (Gg) yani 1000 ton doğalgazın yanması sonucu elde edilen net ısısal değeri (NCV) 48 terajoule (TJ) olduğunu belirtmektedir. DEFRA veri tabanı ise 1 ton doğalgazın yanması sonucu elde edilen net ısısal değeri (NCV) 45,52 gigajoule (GJ) olarak belirtmektedir. Benzer şekilde iki veri tabanı, belirtilen birimlerde doğalgazın sabit yanması (stationary combustion) sonucu ortaya çıkacak CO_2eq. gaz miktarlarını da tanımlamaktadır (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre CO_2eq. gaz değerleri (IPCC, 2023) (DEFRA, 2023)

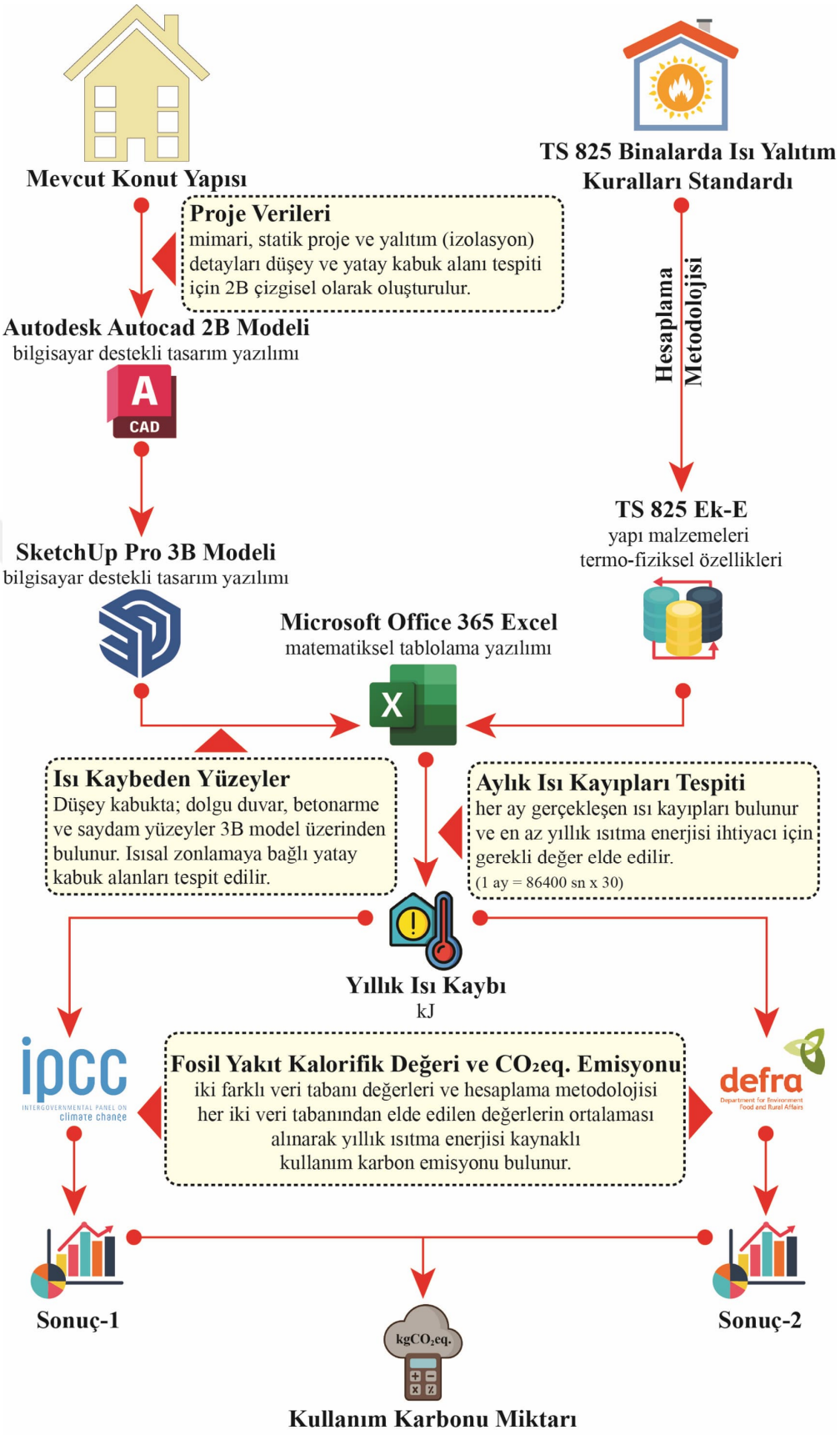
Veri Tabanı	CO_2	CH_4	N_2O
IPCC	56100 kg/TJ	5 kg/TJ	0,1 kg/TJ
DEFRA	2557,53 kg/ton	3,85 kg/ton	1,19 kg/ton

IPCC veri tabanına göre, 1 TJ enerjiye sahip doğalgazın sabit yanması sonucu 56100 kg. CO_2, 5 kg. CH_4 ve 0,1 kg. N_2O gazları atmosfere salınmaktadır. DEFRA veri tabanına göre ise 1 ton doğalgazın sabit yanması sonucu 2557,53 kg. CO_2, 3,85 kg. CH_4 ve 1,19 kg. N_2O gazları atmosfere salınmaktadır. İki veri tabanında yer alan emisyon değerleri farklı birimler üzerinden verilmiştir. IPCC veri tabanı, 1 TJ elde etmek için sabit yakılan doğalgaz miktarı sonucu oluşan ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) dönüşümü yapılmamış emisyon değerlerini içermektedir. DEFRA veri tabanı ise, 1 ton sabit yanan doğalgaz değeri üzerinden ve GWP dönüşümü de yapılarak hesaplanmış emisyon miktarlarını belirtmektedir. Dolayısıyla IPCC veri tabanı değerleri, GWP elde etmek amacıyla dönüşüm katsayıları ile çarpılırlar. IPCC veri tabanı değerleriyle çarpılacak katsayılar, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği değerlendirme raporlarında tanımlanmıştır (Çizelge 3.7) (UNCC, 2023).

Çizelge 3.7. IPCC veri tabanı için GWP dönüşüm katsayıları (UNCC, 2023)

	CO_2	CH_4	N_2O
GWP Dönüşü Katsayısı	1	21	310

Yukarıda yazılı olarak ifade edilmiş olan kullanım karbonu değeri hesaplama yöntemi işlem akış Şekil 3.14’te belirtilmiştir.



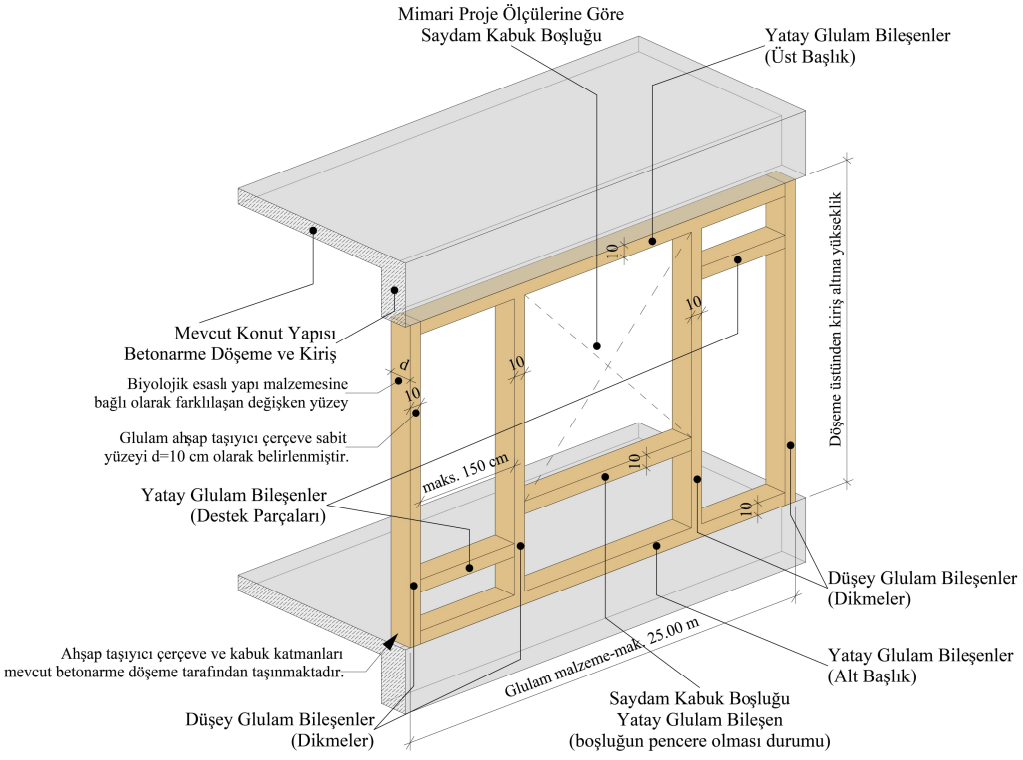
Şekil 3.14. Kullanım karbonu değeri hesaplama yöntemi akış şeması

3.2.3. Öneri kabuk modeli oluşum yaklaşımı

Doktora tezi ana problemini çözmeye yönelik geliştirilen öneri kabuk modelleri belirli bir yaklaşım doğrultusunda oluşturulmuştur. Öneri kabuk modellerin oluşumu; ana taşıyıcı strüktür oluşum yaklaşımı, mevcut yapıyla birleşim yaklaşımı ve kabuk katmanları tasarım yaklaşımı olmak üzere üç başlık altında toplanmıştır. Söz konusu bu başlıklar içinde ifade edilen yaklaşımlar beş farklı öneri kabuk modeli içinde aynı şekilde uygulanmıştır.

- **Ana taşıyıcı strüktür oluşum yaklaşımı**

Öneri kabuk modeller, ahşap çerçeveli bir ana strüktür sistemine sahiptir. Mühendislik ürünü bir malzeme olan Tutkallı Lamine Ahşap (Glulam-glued laminated timber) öneri kabuk modelleri ahşap taşıyıcı çerçeve ana malzemesidir. Glulam kullanılarak üretilen ahşap taşıyıcı çerçeve, mevcut konut yapısı düşey dış kabukları için yapı bilgi modellemesi yazılımı olan Autodesk Revit içerisinde ayrı ayrı modellenmiştir. Ahşap taşıyıcı çerçevenin modellenmesi belirli bir yaklaşıma göre ele alınmış ve uygulanmıştır. Gömülü karbon hesabını oldukça etkileyen ahşap taşıyıcı çerçeve için bütün öneri kabuk modellerinde uygulanmış ana ilkeler Şekil 3.15'te ifade edilmiştir.



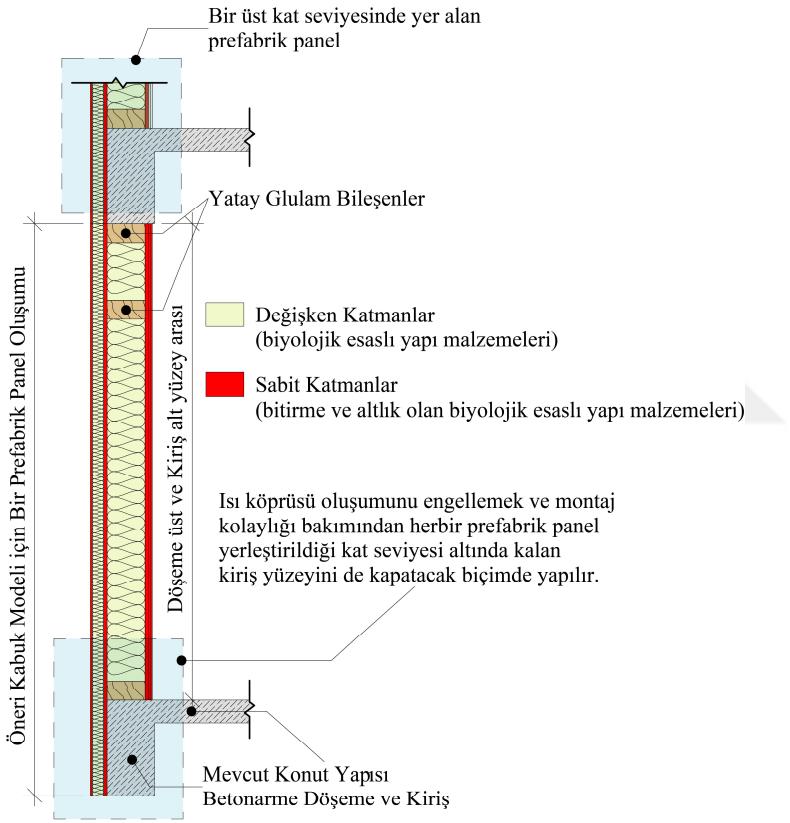
Şekil 3.15. Öneri kabuk modelleri ahşap taşıyıcı çerçeve oluşum yaklaşımı

Prefabrik üretilen öneri model kabukları, döşeme üstünden kiriş altına olan mesafeyi yükseklik olarak kabul eden düşey ve yatay glulam elemanlardan oluşmaktadır. Ahşap taşıyıcı çerçeve ve kabuk katmanları mevcut konut yapısı betonarme döşeme tarafından taşınmaktadır. Ahşap taşıyıcı çerçeve düşey bileşenleri, öncelikle kolon ve saydam kabuk kenarlarına koyulmuş daha sonra bu arada kalan boşluklar 150 cm geçmeyecek şekilde düşey bileşenler ile desteklenmiştir. Döşeme üst ve kiriş alt yüzeyleri boyunca yatay bileşenler yerleştirilmiştir. Ana yatay bileşenlere ek olarak, düşey bileşenler arasındaki bağlantı mukavemetini artırmak amacıyla destek parçaları olarak tekrar yatay bileşenler kullanılmıştır. Buna ek olarak, saydam kabuk bileşeni olan pencereler, üst kısımda yatay giden ahşap bileşen (üst başlık) sabitlenirken, alt kısımda yine bir yatay glulam kullanılarak montajı gerçekleştirilmiştir. Özel geçme detaylarına sahip mühendislik ahşabı olan glulam, yaklaşık 25 m ye kadar tek seferde açıklık geçmektedir. Dolayısıyla prefabrik öneri kabuk modeller, mevcut konut düşey kabuk ölçüsünce yekpare olarak uygulanmıştır. Öneri kabuk modellerine ilişkin gömülü karbon hesaplamaları ifade edilen yaklaşım doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. H2 hipotezi doğrultusunda en çok %1 farklı U değerine sahip olan öneri kabuk modellerinde yer alan biyolojik esaslı yapı malzemeleri farklı kalınlıklara sahip olmuştur. Dolayısıyla ahşap taşıyıcı kalınlıkları, biyolojik esaslı yapı malzemesine bağlı olarak farklılaşan ve sabit yüzey olmak üzere iki farklı kalınlığa sahiptir. Bununla birlikte, bütüncül bir yüzey oluşturmayan ahşap taşıyıcı çerçeve, kullanım karbonu değeri hesaplaması için gerekli olan ısıl geçirgenlik katsayı hesabında (U değeri) dahil edilmemiştir. Bölüm 1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımları başlığı altında da belirtildiği üzere, öneri kabuk modelleri ahşap taşıyıcı çerçeve genel ilkelerle belirlenmiş ve hem glulam parçaların kendi içlerindeki birleşimi hem de döşeme-kiriş yüzeyleriyle birleşimi için ihtiyaç duyulacak diğer yardımcı gereçler kapsam dışı bırakılmıştır.

- **Mevcut yapıyla birleşim yaklaşımı**

Ahşap taşıyıcı çerçeve üzerine gelen diğer katmanlarla birlikte oluşturulan öneri kabuk modelleri, ısı köprüsüne izin vermeyecek şekilde mevcut yapıyla birleştirilmiştir. Döşeme üzerine oturan ahşap taşıyıcı çerçeve ve çerçeve arasındaki boşlukta yer alan biyolojik esaslı yapı malzemesi sadece döşeme üst ve kiriş alt yüzeylerinde yer almaktadır. Dolayısıyla dış tarafa bakan döşeme ve kiriş alnı olarak ifade edilen yüzeyler açıkta kalır. Eğer bu şekilde uygulama yapılırsa, söz konusu yüzeyler oldukça büyük ısı kaybına neden olacak bir ısı köprüsü oluşmasına neden olur. Isı köprülerinin önünde geçilmeden yapılacak düşey kabuk değişimi, sadece ısı kaybına neden olarak enerji

verimliliğini olumsuz etkilemekle kalmaz aynı zamanda öneri kabuk modellerin fiziksel dış ortamdan kolaylıkla etkilenerek hızlıca deforme olmasına da neden olur. Birçok olumsuzluğu aynı anda içeren bu istenmeyen durum, prefabrik üretilen öneri kabuk modeli dış yüzeyine ahşap taşıyıcı çerçeve arasında yer alan biyolojik esaslı yapı malzemesinin tekrar kullanılmasıyla engellenmiştir. Şekil 3.16'da bir prefabrik öneri kabuk modelinin fabrika ortamında nasıl üretildiğini ve mevcut yapının taşıyıcı sistem elemanlarıyla nasıl birleştirildiği ifade etmektedir. Doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen öneri kabuk modelleri Şekil 3.16'da gösterilen birleşim yöntemiyle mevcut yapıya uygulanmış ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.



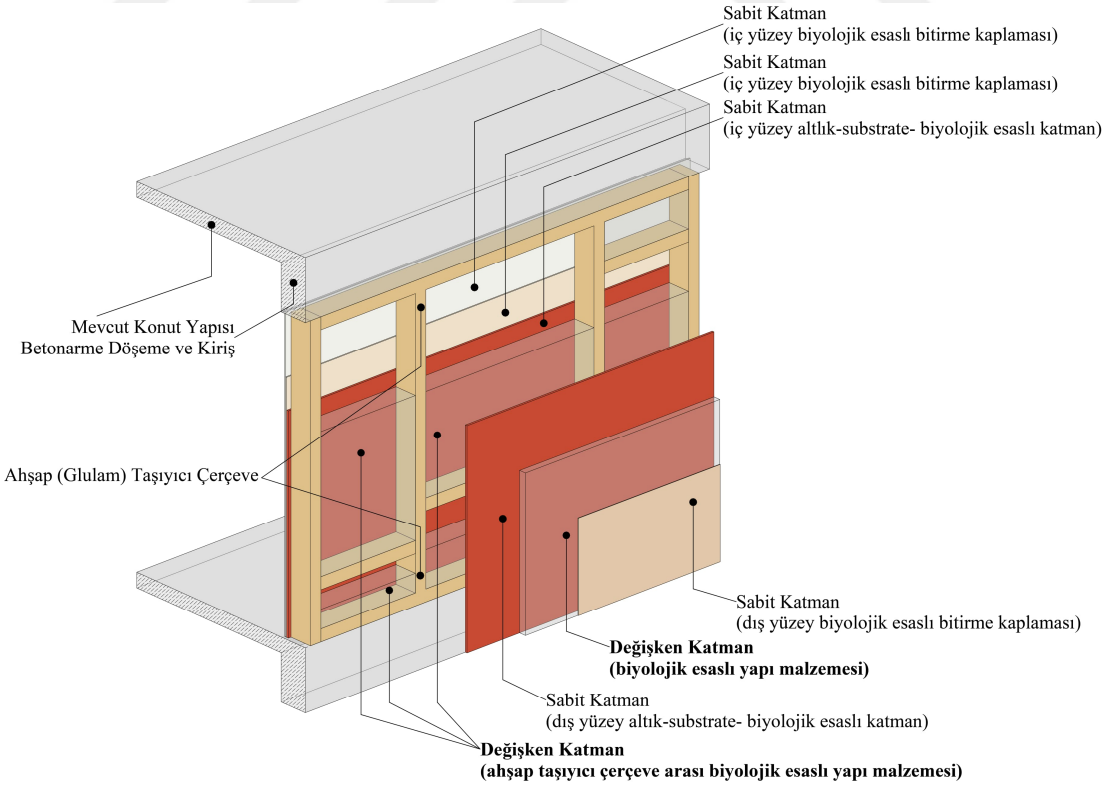
Şekil 3.16. Öneri kabuk modelleri mevcut yapıyla birleşim yöntemi

Öneri kabuk modeli için bir prefabrik panel yerleştirildiği kat düzleminden aşağıya doğru kiriş ve döşeme dış yüzeyleri ölçülerinde uzatılmıştır. Benzer şekilde bir üstteki kat düzlemine yerleştirilmiş olan panelle cephe hattı boyunca süreklilik sağlandığı için kiriş ve döşemelerden kaynaklı oluşabilecek ısı köprüleri engellenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, sadece ısı köprüleri engellenmekle kalınmamış aynı zamanda prefabrik panelin mevcut konut yapısına uygulanmasına yönelik kolaylıklar elde

edilmiştir. Bölüm 1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımları başlığı altında da belirtildiği üzere, öneri kabuk modelleri mevcut yapıyla birleşimi genel ilkelerle belirlenmiştir. Prefabrik panelin, döşeme-kiriş düşey ve yatay yüzeyleriyle birleşim için ihtiyaç duyulacak diğer yardımcı gereçler kapsam dışı bırakılmıştır.

- **Kabuk katmanları tasarım yaklaşımı**

Doktora tezi kapsamında ana probleme çözüm olarak getirilen öneri kabuk modellerini oluşturan bütün katmanlar biyolojik esaslı yapı malzemelerinden oluşturulmuştur. Bununla birlikte, bitirme ve altlık (subtrate) özelliklerine sahip katmanlar her bir öneride sabit bırakılmıştır. Değişkenler ise, ahşap taşıyıcı çerçeve arasında ve ısı köprüsü oluşmasını engellemek amacıyla dış yüzeyde bulunan katmanlardır. Öneri kabuk modelleri, değişken katmanlara göre kategorize edilmiştir. Değişken katmanlarda yer alan biyolojik esaslı yapı malzemeleri beş farklı alternatifte ele alınmıştır. U değerlerinde en çok %1 fark olan beş farklı öneri kabuk modelinin gömülü karbon kıyaslaması, kategorizasyon sağlayan değişken katmanlar tasarımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17'de öneri kabuk modellerinde kullanılan değişken ve sabit kabuk katmanları tasarım yaklaşımı belirtilmiştir.



Şekil 3.17. Öneri kabuk modelleri kabuk katmanları tasarım yaklaşımı

Öneri kabuk modelleri katmanları, yalnızca %1 farka sahip U değeri olacak şekilde ele alınmamış aynı zamanda malzemelerin fiziksel özellikleri de göz önünde bulundurulacak şekilde tasarlanmıştır. Öneri kabuk modelleri farklı gömülü karbon değerlerine sahiptir. Ancak, katmanlarının tasarımı birbirlerinin benzeridir. Bütün öneri kabuk modellerinde yer alan sabit kabuk katmanlarına ilişkin hem fiziksel hem de uygulamaya yönelik özellikler EPD verilerin temin edilmiştir. Aynı şekilde, ahşap taşıyıcı çerçeve arası ve dış yüzeyde yer alan değişken kabuk katmanlarını oluşturan beş farklı biyolojik esaslı yapı malzemesi nitelikleri de EPD verilerinden sağlanmıştır.

Sabit katmanlar, altlık (substrate) ve iç-dış yüzeylerde ise bitirme katmanı oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Altlık katmanlar hem iç yüzeyde hem de dış yüzeyde imalatı kolaylaştırmak ve öneri kabuk modellerin bütünlüğünün sağlanması amacıyla yapılmıştır. Ayrıca altlık katmanlar, mevcut betonarme döşeme ve kiriş yüzeyleriyle birleşimde montaj avantajına da neden olacağı düşünülmüştür. İç ve dış yüzeylerde kullanılan bitime katmanları ise biyolojik esaslı malzeme olan sıvalardan oluşturulmuştur. İç yüzey için kaba ve ince sıva niteliğine sahip iki farklı katman oluşturulmuştur. Dış yüzey için ise değişken katman olan biyolojik esaslı yapı malzemesinden yapılmış yalıtım katmanını korumak amacıyla dış ortam şartlarına dayanıklı bir sıva katmanı tercih edilmiştir. Öneri kabuk modellerinde bitirme yüzeyi olarak sıva katmanı, içeriden ve dışarıdan yapıyla ilişki içerisinde olan son kullanıcının farklı bir yüzey algısı yaşamamasının sağlanması amacıyla tercih edilmiştir. Böylelikle son kullanıcı hem dış yüzeyde hem de iç yüzeyde farklı bir dokusal-görsel etkileşim hissetmeyecektir.

Kalınlığı olmadığı için Şekil 3.17'de ifade edilmemiş olan buhar kesici ve su-nem kesici katmanlar da bütün öneri kabuk modellerinde sabit olarak kullanılmıştır. Buhar kesici iç yüzeyde ve su-nem kesici ise dış yüzeyde su buharı difüzyonuna karşı, değişken katman olan biyolojik esaslı yapı malzemesini koruyacak şekilde yerleştirilmiştir. Öneri kabuk modelleri U değeri hesabına dahil edilmeyen buhar ve su-nem kesici katmanlar kabuk modellerin gömülü karbon hesabında yer almıştır.

Bölüm 1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımları başlığı altında da belirtildiği üzere, en çok %1 farklı U değerine sahip öneri kabuk modelleri katmanlarının tasarım yöntemi, EPD verileri ve yapı fiziği gerekliliklerine göre genel ilkelerle belirlenmiştir. Prefabrik paneli oluşturan katmanların birleşimi için ihtiyaç duyulacak diğer yardımcı gereçler kapsam dışı bırakılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümü, doktora tezi ana problemi doğrultusunda çözüm önerisi olarak belirlenmiş hipotezlerin doğruluğunun irdelenmesine yönelik gerçekleştirilmiş araştırmalar yer almaktadır. Bir önceki bölümde hipotez testlerinin gerçekleştirileceği çalışma materyali ve çalışma yöntemi kapsamlı biçimde aktarılmıştır. Mevcut yapıda kullanılan yapı malzemeleri, malzeme kalınlıkları ve hesaplamalarda kullanılan alan-hacim gibi bütün gerekli bilgiler çalışma materyalinde aktarılmıştır. Söz konusu materyal, belirlenmiş olan yöntem aracılığıyla irdelenmiş ve elde edilen bütün bulgular bu bölümde belirtilmiştir.

Bu bölümde öncelikle mevcut konut yapısı sayısallaştırılmıştır. Mevcut konut yapısı hipotezler doğrultusunda, gömülü karbon değeri ve kullanım karbonu değeri olmak üzere sayısal hale getirilmiştir. Mevcut yapının sayısallaştırılmasından sonra ise öneri kabuk modelleri incelenmiştir. Öneri kabuk modelleri, öncelikle katmanlar ve U değerleri olarak belirtilmiş daha sonra ise öneri kabuk modelleri, çalışma yönteminde tariflenen hesaplama araçları yardımıyla, mevcut yapıya uygulanmıştır. Öneri kabuk modelleri uygulanmış mevcut yapının; gömülü karbon, kullanım karbonu ve yoğuşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise, araştırma sonuçlarının değerlendirilmesi başlığı altında çalışma hipotezlerinin sınanması gerçekleştirilmiştir. Bölümler içerisinde gömülü karbon değeri hesaplaması için “GKA” kısaltması kullanılmıştır. Benzer şekilde kullanım karbonu değeri hesaplaması için “KKA” kısaltması ve mevcut yapı için “MY” kısaltması kullanılmıştır. Öneri kabuk modelleri için ise “Envelope Proposal” ifadesinin kısaltması olarak “EnP” kullanılmıştır.

4.1. Mevcut Yapının Sayısallaştırılması

4.1.1. Mevcut yapı gömülü karbon analizi

- **MY betonarme strüktür GKA**

Betonarme strüktür, hazır beton ve donatı demirinden oluşmaktadır. Dolayısıyla söz konusu bu iki yapı malzemesinin küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerinin bilinmesi gerekmektedir. Tez çalışması içeriğinde hazır beton yapı malzemesi için Çizelge 4.1’de belirtilmiş olan çevresel ürün beyanları (EPD) kullanılarak GWP değeri elde edilmiştir. Hazır beton malzemeye benzer şekilde donatı demir malzemesi için de

EPD verileri kullanılmış ve gömülü karbon hesaplaması için gerekli olan GWP değeri elde edilmiştir (Çizelge 4.2).

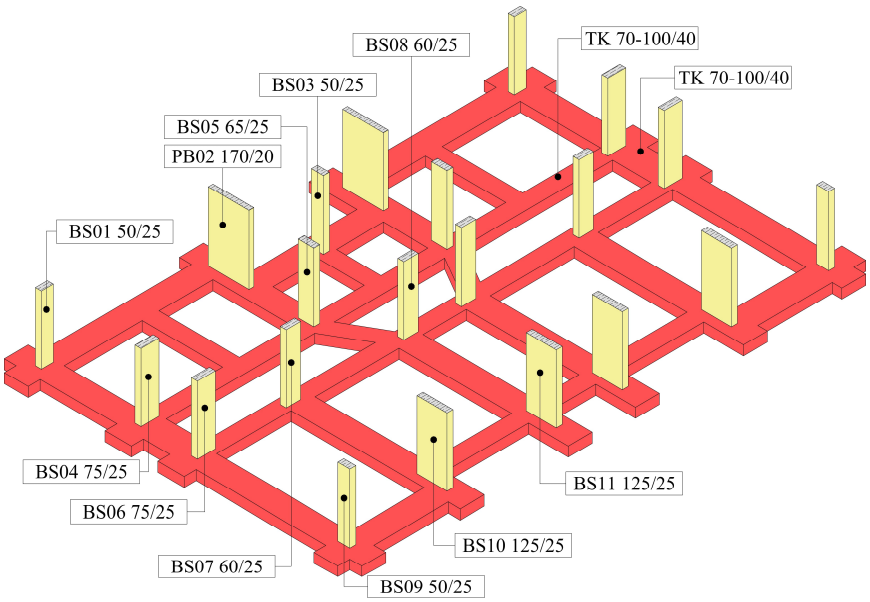
Çizelge 4.1. C16/20 (BS16/20) hazır beton yapı malzemesi için GWP değeri

EPD Kayıt Numarası	EPD Geçerlilik Tarihi	Tanımlanan Birim	A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)
S-P-04981	2027	1 m^3	194,000
S-P-07947	2027	1 m^3	215,000
S-P-05311	2026	1 m^3	173,000
S-P-06471	2027	1 m^3	166,000
S-P-08277	2028	1 m^3	286,000
	1 m^3 C16/20 Hazır Beton Ortalama GWP Değeri		**206,800**

Çizelge 4.2. ST420 donatı demiri yapı malzemesi için GWP değeri

EPD Kayıt Numarası	EPD Geçerlilik Tarihi	Tanımlanan Birim	A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)
S-P-04809	2027	1 ton	680,000
BREG EN 000080	2026	1 ton	893,000
BREG EN 000135	2026	1 ton	820,000
BREG EN 000136	2026	1 ton	825,000
BREG EN 000276	2026	1 ton	740,000
	1 ton ST420 Donatı Demiri Ortalama GWP Değeri		**791,600**
	1 kg ST420 Donatı Demiri Ortalama GWP Değeri		**0,7916**

- Mevcut yapı bodrum kat



Şekil 4.1. Mevcut yapı bodrum kat temel ve bodrum kat kolonları

Çizelge 4.3. MY temel ve bodrum kat kolonları hazır beton GKA

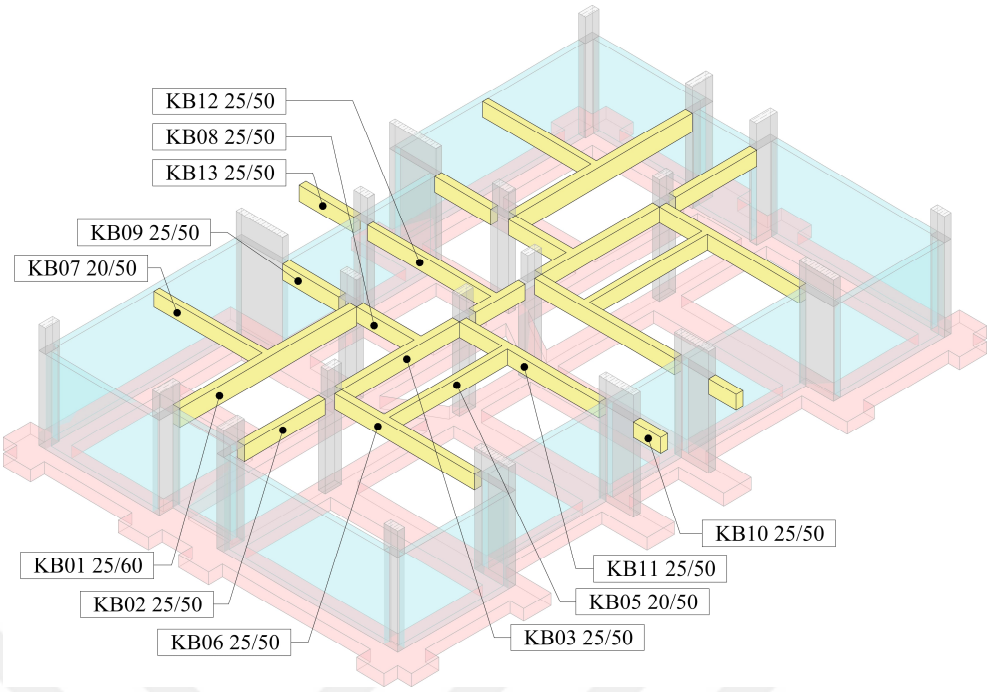
Temel-Kolon Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
TK 70-100/40	1	C16 (BS16) Beton	55,0726117	206,8	11389,0161
BS01 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
BS03 50/25	1	C16 (BS16) Beton	0,375	206,8	77,550
BS04 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
BS05 65/25	2	C16 (BS16) Beton	0,975	206,8	201,630
BS06 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
BS07 60/25	2	C16 (BS16) Beton	0,900	206,8	186,120
BS08 60/25	2	C16 (BS16) Beton	0,900	206,8	186,120
BS09 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
BS10 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
BS11 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
PB02 170/20	2	C16 (BS16) Beton	2,040	206,8	421,872
				MY-GKA-Bodrum Kat Temel ve Kolon-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**14013,3081**

Mevcut yapı bodrum kat temel ve kolonlarında kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 14013,3081 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~14,01 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.4. MY temel ve bodrum kat kolonları donatı demiri GKA

Temel-Kolon Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
TK 70-100/40	1	5505,747	0,7916	4358,349
BS01 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
BS03 50/25	1	72,927	0,7916	57,729
BS04 75/25	2	200,278	0,7916	158,540
BS05 65/25	2	174,646	0,7916	138,250
BS06 75/25	2	200,278	0,7916	158,540
BS07 60/25	2	152,174	0,7916	120,461
BS08 60/25	2	152,174	0,7916	120,461
BS09 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
BS10 125/25	2	309,124	0,7916	244,703
BS11 125/25	2	309,124	0,7916	244,703
PB02 170/20	2	459,382	0,7916	363,647
			MY-GKA-Bodrum Kat Temel ve Kolon-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**6196,298**

Mevcut yapı bodrum kat temel ve kolonlarında kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 6196,289 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~6,20 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.2. Mevcut yapı bodrum kat kirişleri

Çizelge 4.5. MY bodrum kat kirişleri hazır beton GKA

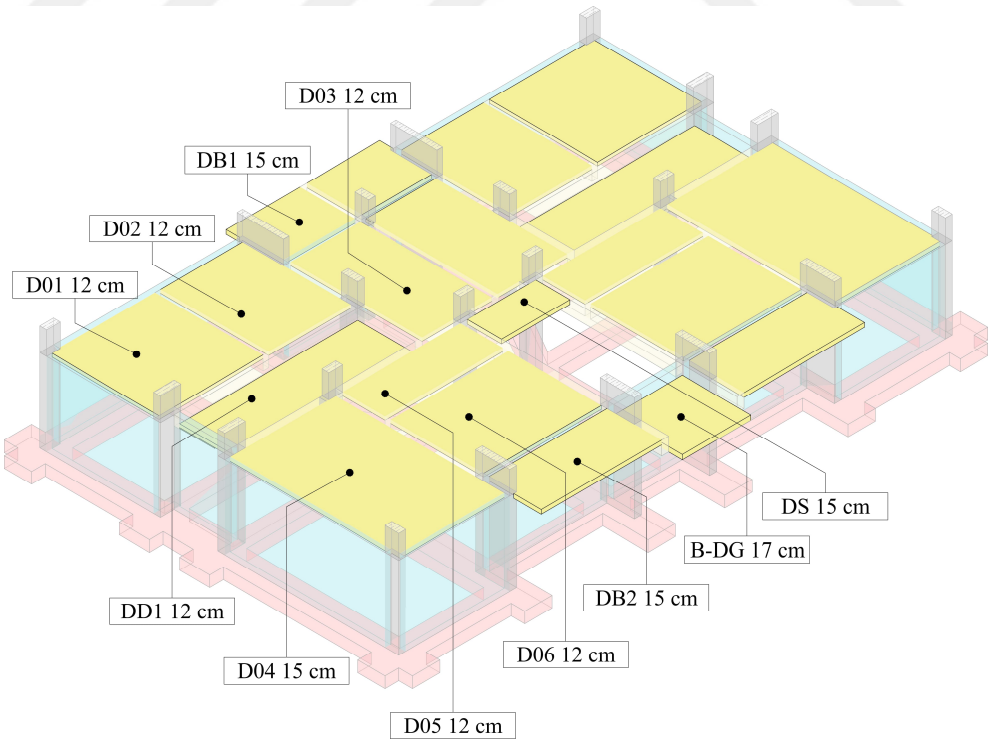
Kiriş Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
KB01 25/60	2	C16 (BS16) Beton	1,935	206,8	400,158
KB02 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,738	206,8	152,515
KB03 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,075	206,8	222,310
KB04 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,225	206,8	46,530
KB05 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,860	206,8	177,848
KB06 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
KB07 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,790	206,8	163,372
KB08 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,525	206,8	108,570
KB09 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,513	206,8	105,985
KB10 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
KB11 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
KB12 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,536	206,8	110,741
KB13 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
				MY-GKA-Bodrum Kat Kiriş-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**2118,769**

Mevcut yapı bodrum kat kirişlerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 2118,769 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~2,12 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.6. MY bodrum kat kirişleri donatı demiri GKA

Kiriş Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
KB01 25/60	2	276,912	0,7916	219,204
KB02 25/50	2	168,338	0,7916	133,256
KB03 25/50	2	168,338	0,7916	133,256
KB04 25/50	1	84,169	0,7916	66,628
KB05 20/50	2	77,556	0,7916	61,393
KB06 25/50	2	204,012	0,7916	161,496
KB07 20/50	2	98,516	0,7916	77,985
KB08 25/50	2	71,218	0,7916	56,376
KB09 25/50	2	71,218	0,7916	56,376
KB10 25/50	2	85,804	0,7916	67,922
KB11 25/50	2	85,804	0,7916	67,922
KB12 25/50	1	50,700	0,7916	40,134
KB13 25/50	1	50,700	0,7916	40,134
		MY-GKA-Bodrum Kat Kiriş-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri		1182,084

Mevcut yapı bodrum kirişlerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1182,084 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,18 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.3. Mevcut yapı bodrum kat döşemeleri

Çizelge 4.7. MY bodrum kat döşemeleri hazır beton GKA

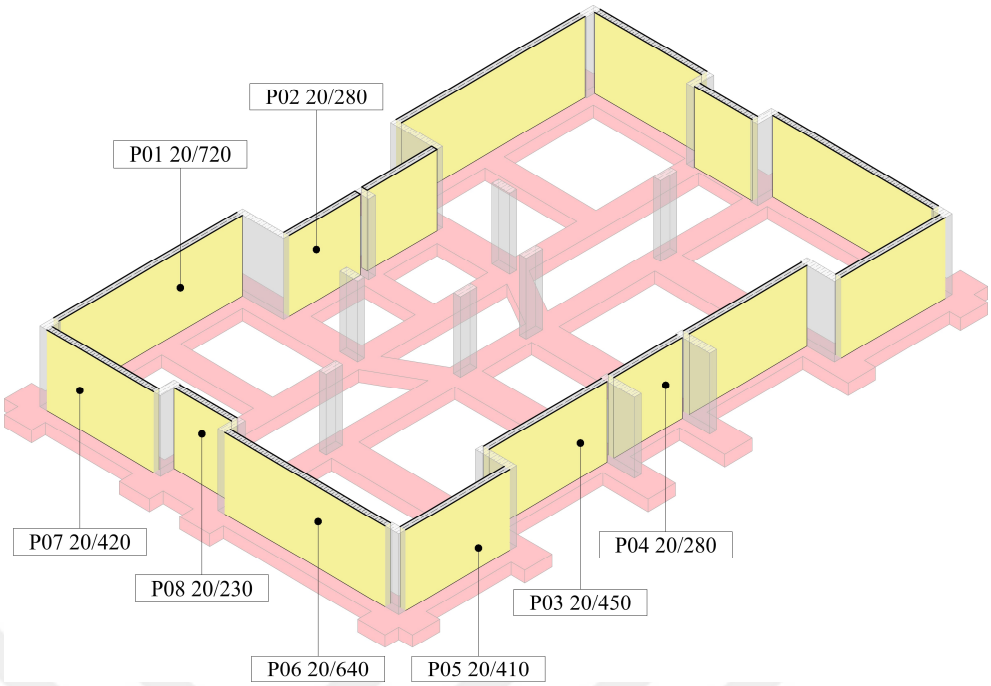
Döşeme Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
B-DG 17 cm	1	C16 (BS16) Beton	1,0625	206,8	219,725
D01 12 cm	3	C16 (BS16) Beton	5,237	206,8	1082,970
D02 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,844	206,8	588,139
D03 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,938	206,8	607,496
D04 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	7,099	206,8	1468,022
D05 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	1,600	206,8	330,797
D06 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,509	206,8	725,620
DB1 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	1,560	206,8	322,608
DB2 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,610	206,8	539,748
DD1 12 cm	1	C16 (BS16) Beton	1,638	206,8	338,738
DS 15 cm	1	C16 (BS16) Beton	0,469	206,8	96,938
				MY-GKA-Bodrum Kat Döşeme-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**6320,801**

Mevcut yapı bodrum kat döşemelerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 6320,801 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~6,32 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.8. MY bodrum kat döşemeleri donatı demiri GKA

Döşeme Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
B-DG 17 cm	1	157,514	0,7916	124,688
D01 12 cm	3	273,651	0,7916	216,622
D02 12 cm	2	128,296	0,7916	101,559
D03 12 cm	2	177,458	0,7916	140,476
D04 15 cm	2	344,922	0,7916	273,040
D05 12 cm	2	75,492	0,7916	59,759
D06 12 cm	2	159,960	0,7916	126,624
DB1 15 cm	2	220,744	0,7916	174,741
DB2 15 cm	2	324,702	0,7916	257,034
DD1 12 cm	1	73,166	0,7916	57,918
DS 15 cm	1	102,279	0,7916	80,964
			MY-GKA-Bodrum Kat Döşeme-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**1613,426**

Mevcut yapı bodrum kat döşemelerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1613,426 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,61 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.4. Mevcut yapı bodrum kat perdeleri

Çizelge 4.9. MY bodrum kat perdeleri hazır beton GKA

Perde Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P01 20/720	2	C16 (BS16) Beton	8,04	206,8	1662,672
P02 20/280	2	C16 (BS16) Beton	3,090	206,8	639,012
P03 20/450	2	C16 (BS16) Beton	5,160	206,8	1067,088
P04 20/280	1	C16 (BS16) Beton	1,500	206,8	310,200
P05 20/410	2	C16 (BS16) Beton	4,560	206,8	943,008
P06 20/640	2	C16 (BS16) Beton	7,020	206,8	1451,736
P07 20/420	2	C16 (BS16) Beton	4,680	206,8	967,824
P08 20/230	2	C16 (BS16) Beton	2,520	206,8	521,136
				MY-GKA-Bodrum Kat Perde-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**7562,676**

Mevcut yapı bodrum kat perdelerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 7562,676 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~7,56 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

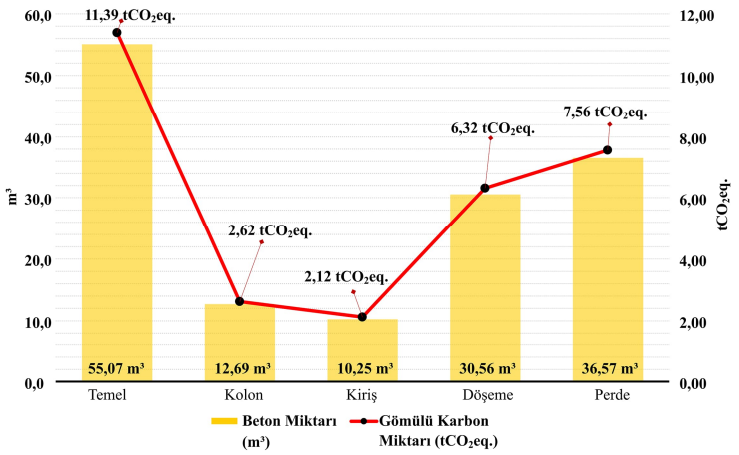
Çizelge 4.10. MY bodrum kat perdeleri donatı demiri GKA

Perde Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir EPD (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P01 20/720	2	1485,446	0,7916	1175,879
P02 20/280	2	628,490	0,7916	497,513
P03 20/450	2	943,482	0,7916	746,860

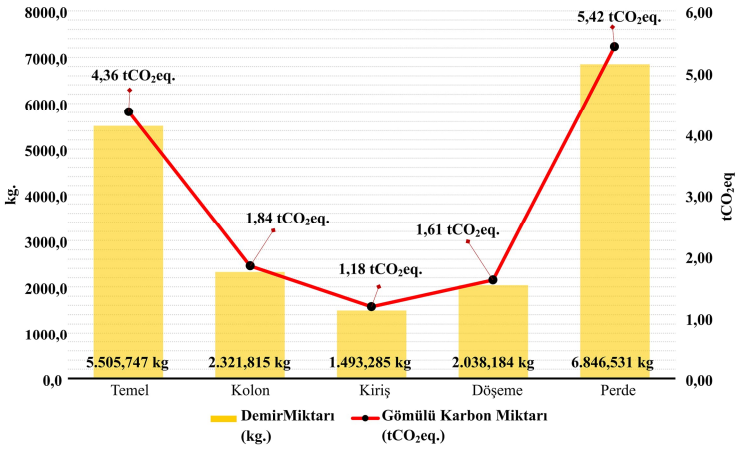
P04 20/280	1	157,123	0,7916	124,379
P05 20/410	2	881,038	0,7916	697,430
P06 20/640	2	1332,214	0,7916	1054,581
P07 20/420	2	889,562	0,7916	704,177
P08 20/230	2	529,176	0,7916	418,896
MY-GKA-Bodrum Kat Perde-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri				**5419,714**

Mevcut yapı bodrum kat perdelerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 5419,714 kgCO_2eq. sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~5,42 tCO_2eq. olarak kabul edilmiştir.

Mevcut yapı bodrum kat inşası için kullanılmış hazır beton ve donatı demiri yapı malzemeleri kaynaklı atmosfere salınmış sera gazı oluşturan emisyonların yapı elemanlarına göre dağılımı aşağıdaki grafiklerde ifade edilmiştir (Şekil 4.5-4.6).

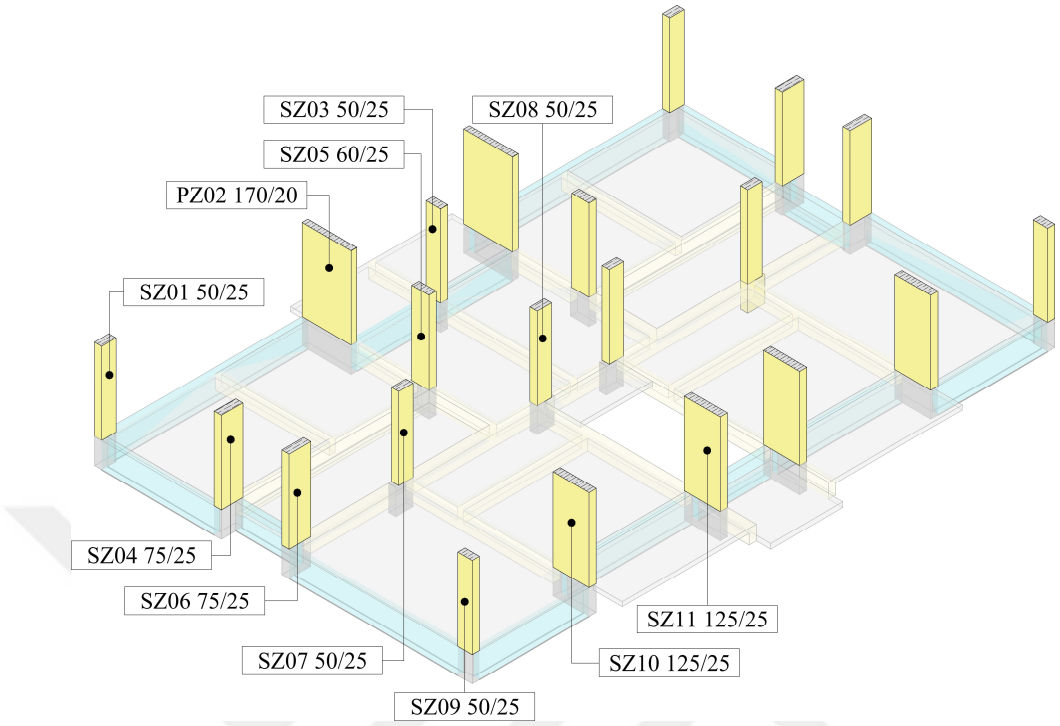


Şekil 4.5. MY bodrum kat hazır beton ve gömülü karbon dağılımı



Şekil 4.6. MY bodrum kat donatı demiri ve gömülü karbon dağılımı

➢ Mevcut yapı zemin kat



Şekil 4.7. Mevcut yapı zemin kat kolonları

Çizelge 4.11. MY zemin kat kolonları hazır beton GKA

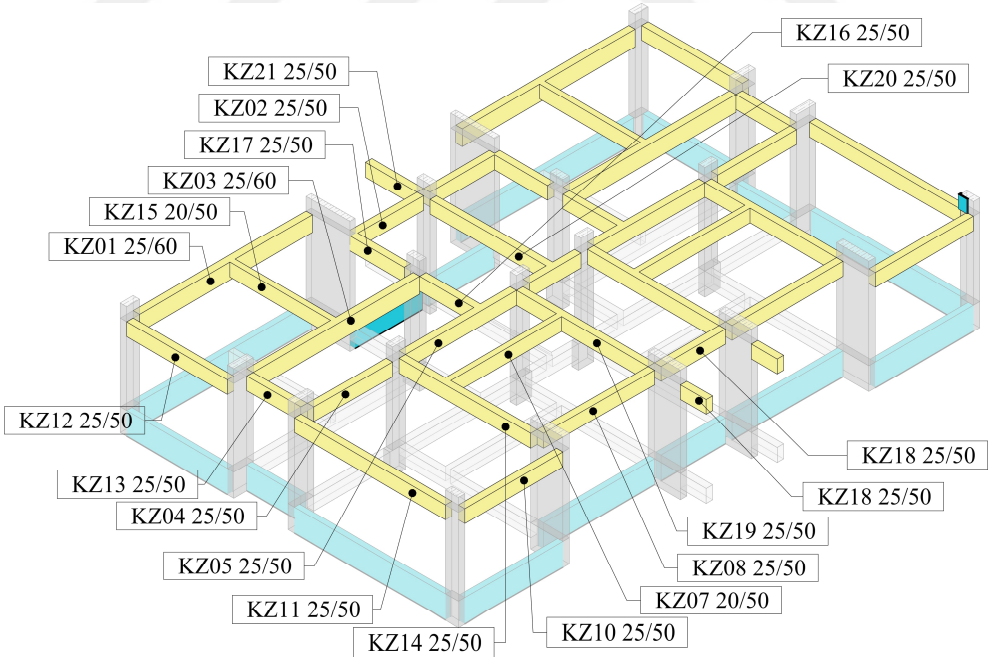
Kolon Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
PZ02 170/20	2	C16 (BS16) Beton	2,04	206,8	421,872
SZ01 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
SZ03 50/25	1	C16 (BS16) Beton	0,375	206,8	77,550
SZ04 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
SZ05 60/25	2	C16 (BS16) Beton	0,900	206,8	186,120
SZ06 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
SZ07 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
SZ08 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
SZ09 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
SZ10 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
SZ11 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
				MY-GKA-Zemin Kat Kolon-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**2546,742**

Mevcut yapı zemin kat kolonlarında kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 2546,742 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~2,55 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.12. MY zemin kat kolonları donatı demiri GKA

Kolon Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
PZ02 170/20	2	459,382	0,7916	363,647
SZ01 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
SZ03 50/25	1	72,927	0,7916	57,729
SZ04 75/25	2	200,278	0,7916	158,540
SZ05 60/25	2	171,486	0,7916	135,748
SZ06 75/25	2	200,278	0,7916	158,540
SZ07 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
SZ08 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
SZ09 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
SZ10 125/25	2	309,124	0,7916	244,703
SZ11 125/25	2	309,124	0,7916	244,703
			MY-GKA-Zemin Kat Kolon-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**1825,441**

Mevcut yapı zemin kat kolonlarında kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1825,411 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,83 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.8. Mevcut yapı zemin kat kirişleri

Çizelge 4.13. MY zemin kat kirişleri hazır beton GKA

Kiriş Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
KZ01 25/60	2	C16 (BS16) Beton	2,01	206,8	415,668

KZ02 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,644	206,8	133,267
KZ03 25/60	2	C16 (BS16) Beton	1,935	206,8	400,158
KZ04 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,763	206,8	157,685
KZ05 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,075	206,8	222,310
KZ06 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
KZ07 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,860	206,8	177,848
KZ08 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,075	206,8	222,310
KZ09 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,313	206,8	64,625
KZ10 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,950	206,8	196,460
KZ11 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,463	206,8	302,445
KZ12 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,975	206,8	201,630
KZ13 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,525	206,8	108,570
KZ14 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
KZ15 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,780	206,8	161,304
KZ16 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,525	206,8	108,570
KZ17 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,522	206,8	107,913
KZ18 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
KZ19 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
KZ20 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,563	206,8	116,325
KZ21 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
				MY-GKA-Zemin Kat Kiriş-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**3779,529**

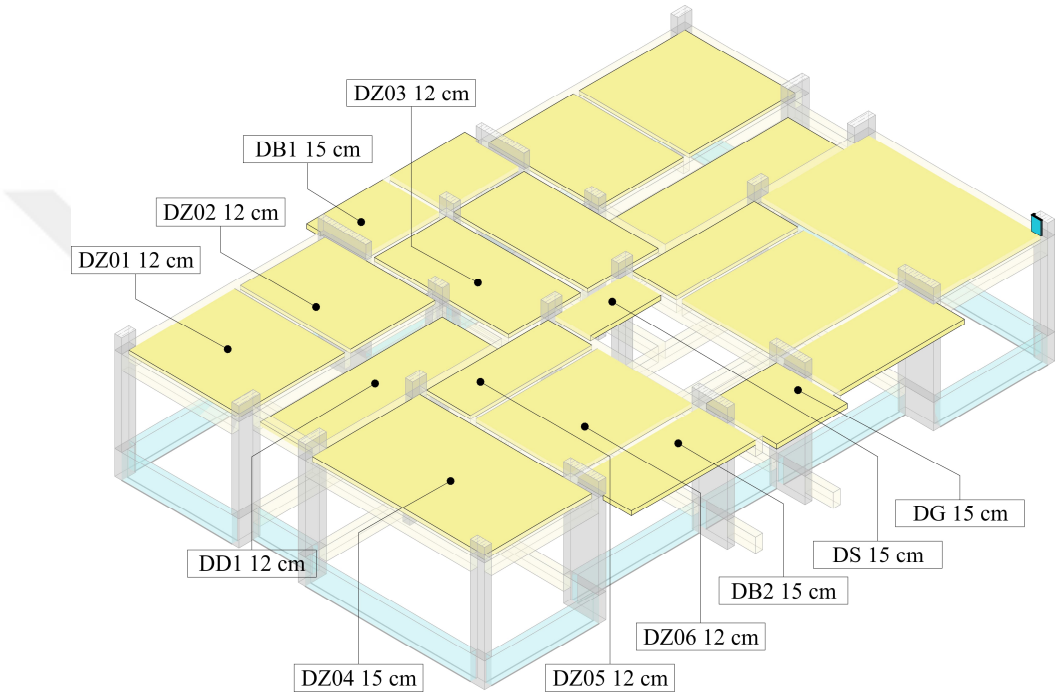
Mevcut yapı zemin kat kirişlerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 3779,529 kgCO_2eq. sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~3,78 tCO_2eq. olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.14. MY zemin kat kirişleri donatı demiri GKA

Kiriş Adı	**Adet**	**Demir Donatı Miktarı (kg)**	**Demir GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri (kgCO_2eq.)**
KZ01 25/60	2	240,522	0,7916	190,397
KZ02 25/50	2	84,030	0,7916	66,518
KZ03 25/60	2	292,322	0,7916	231,402
KZ04 25/50	2	170,202	0,7916	134,732
KZ05 25/50	2	170,202	0,7916	134,732
KZ06 25/50	1	85,101	0,7916	67,366
KZ07 20/50	2	77,556	0,7916	61,393
KZ08 25/50	2	150,204	0,7916	118,901
KZ09 25/50	1	75,102	0,7916	59,451
KZ10 25/50	2	100,782	0,7916	79,779
KZ11 25/50	2	140,096	0,7916	110,900
KZ12 25/50	2	96,636	0,7916	76,497
KZ13 25/50	2	61,480	0,7916	48,668
KZ14 25/50	2	189,378	0,7916	149,912
KZ15 20/50	2	71,762	0,7916	56,807
KZ16 25/50	2	69,428	0,7916	54,959
KZ17 25/50	2	69,428	0,7916	54,959
KZ18 25/50	2	93,816	0,7916	74,265
KZ19 25/50	2	93,816	0,7916	74,265
KZ20 25/50	1	49,278	0,7916	39,008

KZ21 25/50	1	49,278	0,7916	39,008
			MY-GKA-Zemin Kat Kiriş-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**1923,920**

Mevcut yapı zemin kat kirişlerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1923,920 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,92 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.9. Mevcut yapı zemin kat döşemeleri

Çizelge 4.15. MY zemin kat döşemeleri hazır beton GKA

Döşeme Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
DB1 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	1,56	206,8	322,608
DB2 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,610	206,8	539,748
DD1 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,251	206,8	672,265
DG 15 cm	1	C16 (BS16) Beton	0,938	206,8	193,875
DS 15 cm	1	C16 (BS16) Beton	0,469	206,8	96,938
DZ01 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,510	206,8	725,868
DZ02 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,808	206,8	580,694
DZ03 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,879	206,8	595,274
DZ04 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	6,954	206,8	1438,087
DZ05 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	1,600	206,8	330,797
DZ06 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,457	206,8	714,949
				MY-GKA-Zemin Kat Döşeme-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**6211,104**

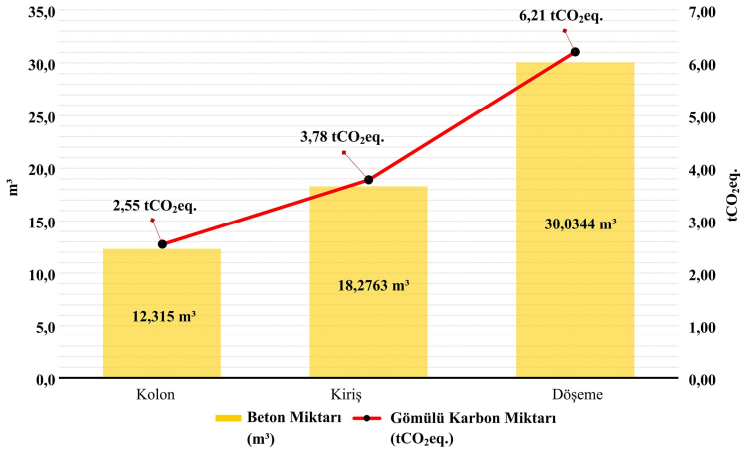
Mevcut yapı zemin kat döşemelerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 6211,104 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~6,21 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.16. MY zemin kat döşemeleri donatı demiri GKA

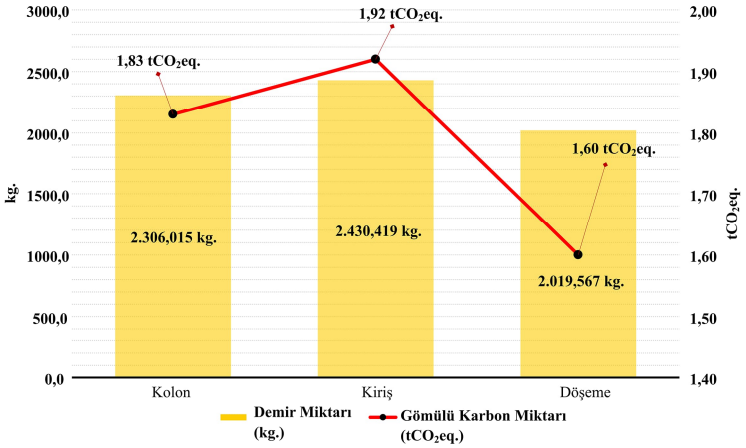
Döşeme Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
DB1 15 cm	2	220,744	0,7916	174,741
DB2 15 cm	2	324,702	0,7916	257,034
DD1 12 cm	2	146,332	0,7916	115,836
DG 15 cm	1	151,466	0,7916	119,900
DS 15 cm	1	102,279	0,7916	80,964
DZ01 12 cm	2	181,660	0,7916	143,802
DZ02 12 cm	2	128,218	0,7916	101,497
DZ03 12 cm	2	176,478	0,7916	139,700
DZ04 15 cm	2	348,428	0,7916	275,816
DZ05 12 cm	2	75,098	0,7916	59,448
DZ06 12 cm	2	164,162	0,7916	129,951
MY-GKA-Zemin Kat Döşeme-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri				**1598,689**

Mevcut yapı zemin kat döşemelerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1598,689 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,60 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Mevcut yapı zemin kat inşası için kullanılmış hazır beton ve donatı demiri yapı malzemeleri kaynaklı atmosfere salınmış sera gazı oluşturan emisyonların yapı elemanlarına göre dağılımı aşağıdaki grafiklerde ifade edilmiştir (Şekil 4.10-4.11).

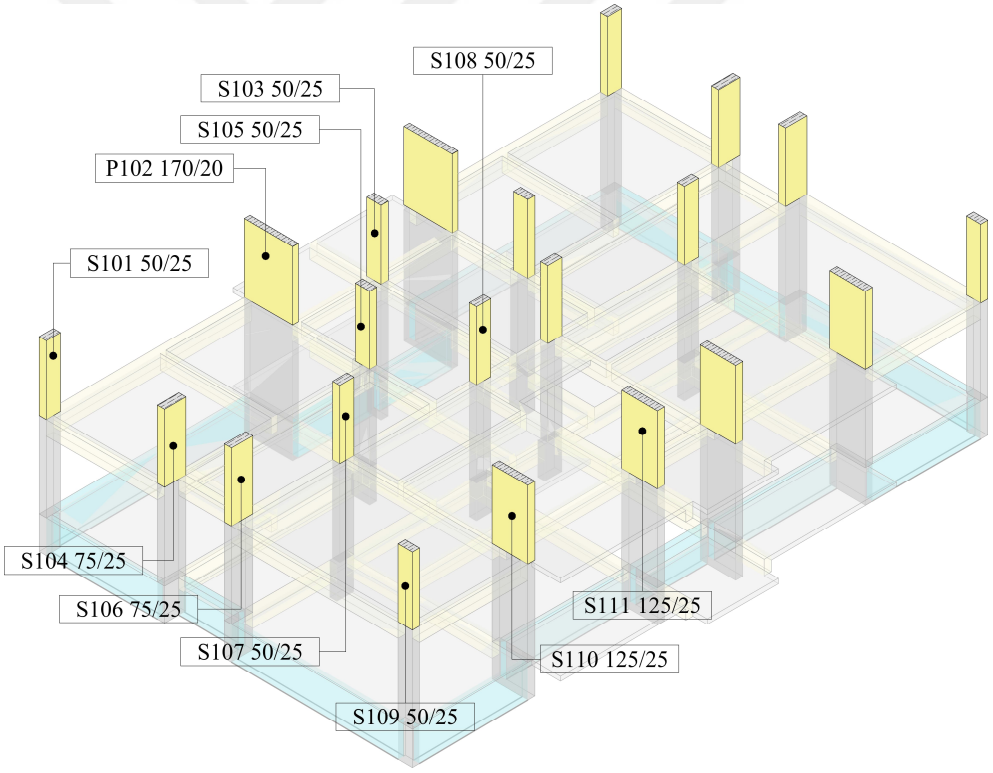


Şekil 4.10. MY zemin kat hazır beton ve gömülü karbon dağılımı



Şekil 4.11. MY zemin kat donatı demiri ve gömülü karbon dağılımı

➢ Mevcut yapı birinci kat



Şekil 4.12. Mevcut yapı birinci kat kolonları

Çizelge 4.17. MY birinci kat kolonları hazır beton GKA

Kolon Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P102 170/20	2	C16 (BS16) Beton	2,04	206,8	421,872
S101 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100

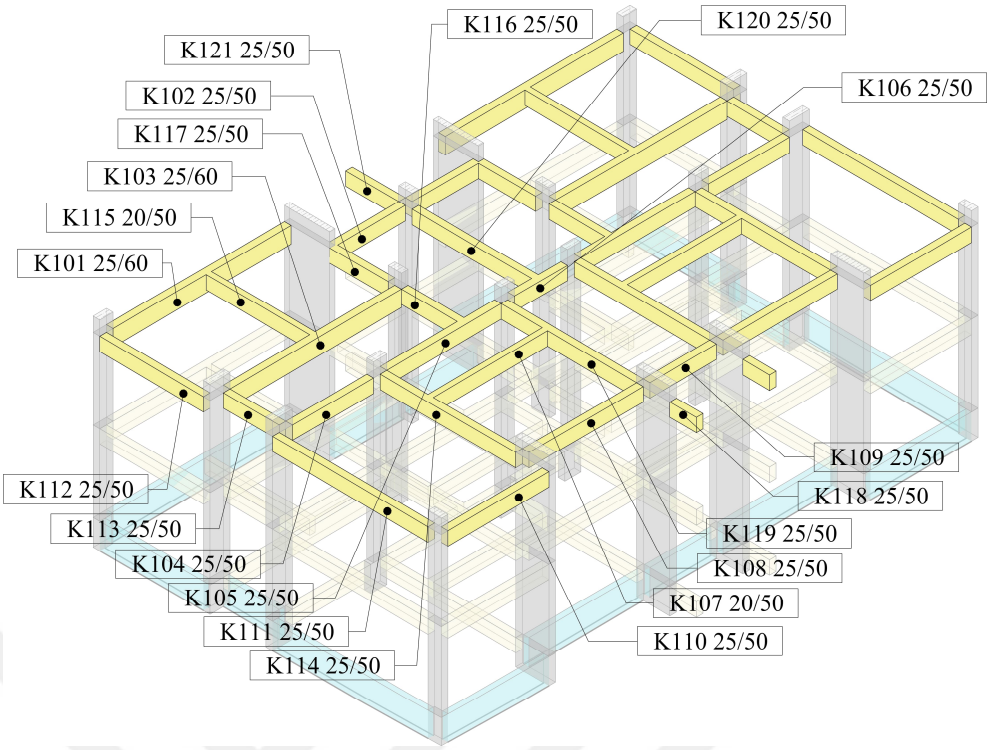
S103 50/25	1	C16 (BS16) Beton	0,375	206,8	77,550
S104 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
S105 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S106 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
S107 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S108 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S109 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S110 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
S111 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
				MY-GKA-Birinci Kat Kolon-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**2515,722**

Mevcut yapı birinci kat kolonlarında kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 2515,722 kgCO_2eq. sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~2,52 tCO_2eq. olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.18. MY birinci kat kolonları donatı demiri GKA

Kolon Adı	**Adet**	**Demir Donatı Miktarı (kg)**	**Demir GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri (kgCO_2eq.)**
P102 170/20	2	459,382	0,7916	363,647
S101 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
S103 50/25	1	72,927	0,7916	57,729
S104 75/25	2	200,278	0,7916	158,540
S105 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
S106 75/25	2	200,278	0,7916	158,540
S107 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
S108 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
S109 50/25	2	145,854	0,7916	115,458
S110 125/25	2	309,124	0,7916	244,703
S111 125/25	2	309,124	0,7916	244,703
			MY-GKA-Birinci Kat Kolon-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**1805,151**

Mevcut yapı birinci kat kolonlarında kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1805,151 kgCO_2eq. sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,81 tCO_2eq. olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.13. Mevcut yapı birinci kat kirişleri

Çizelge 4.19. MY birinci kat kirişleri hazır beton GKA

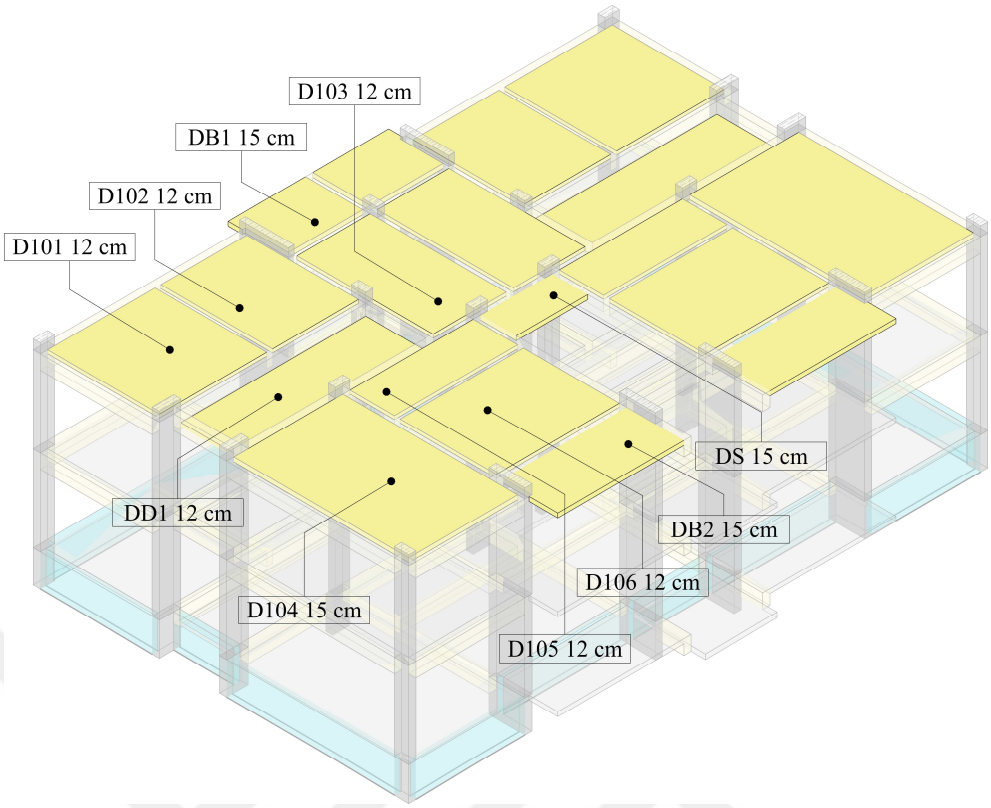
Kiriş Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
K101 25/60	2	C16 (BS16) Beton	2,01	206,8	415,668
K102 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,6444	206,8	133,267
K103 25/60	2	C16 (BS16) Beton	1,935	206,8	400,158
K104 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,763	206,8	157,685
K105 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,075	206,8	222,310
K106 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
K107 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,860	206,8	177,848
K108 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,075	206,8	222,310
K109 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,313	206,8	64,625
K110 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,950	206,8	196,460
K111 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,463	206,8	302,445
K112 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,975	206,8	201,630
K113 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,525	206,8	108,570
K114 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
K115 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,780	206,8	161,304
K116 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,525	206,8	108,570
K117 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,5468	206,8	113,083
K118 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
K119 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
K120 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,563	206,8	116,325
K121 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
				MY-GKA-Birinci Kat Kiriş-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**3784,699**

Mevcut yapı birinci kat kirişlerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 3784,699 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~3,78 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.20. MY birinci kat kirişleri donatı demiri GKA

Kiriş Adı	**Adet**	**Demir Donatı Miktarı (kg)**	**Demir GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)**
K101 25/60	2	240,522	0,7916	190,397
K102 25/50	2	84,030	0,7916	66,518
K103 25/60	2	279,926	0,7916	221,589
K104 25/50	2	171,520	0,7916	135,775
K105 25/50	2	171,520	0,7916	135,775
K106 25/50	1	85,760	0,7916	67,888
K107 20/50	2	77,556	0,7916	61,393
K108 25/50	2	150,204	0,7916	118,901
K109 25/50	1	75,102	0,7916	59,451
K110 25/50	2	98,708	0,7916	78,137
K111 25/50	2	151,374	0,7916	119,828
K112 25/50	2	96,636	0,7916	76,497
K113 25/50	2	61,480	0,7916	48,668
K114 25/50	2	180,968	0,7916	143,254
K115 20/50	2	71,762	0,7916	56,807
K116 25/50	2	63,730	0,7916	50,449
K117 25/50	2	63,730	0,7916	50,449
K118 25/50	2	93,816	0,7916	74,265
K119 25/50	2	93,816	0,7916	74,265
K120 25/50	1	47,783	0,7916	37,825
K121 25/50	1	47,783	0,7916	37,825
		MY-GKA-Birinci Kat Kiriş-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri:		**1905,956**

Mevcut yapı birinci kat kirişlerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1905,956 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,91 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.14. Mevcut yapı birinci kat döşemeleri

Çizelge 4.21. MY birinci kat döşemeleri hazır beton GKA

Döşeme Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
D101 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,51	206,8	725,868
D102 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,808	206,8	580,694
D103 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,879	206,8	595,274
D104 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	6,954	206,8	1438,087
D105 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	1,600	206,8	330,797
D106 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,457	206,8	714,949
DB1 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	1,560	206,8	322,608
DB2 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,610	206,8	539,748
DD1 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,251	206,8	672,265
DS 15 cm	1	C16 (BS16) Beton	0,469	206,8	96,938
			MY-GKA-Birinci Kat Döşeme-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri		**6017,229**

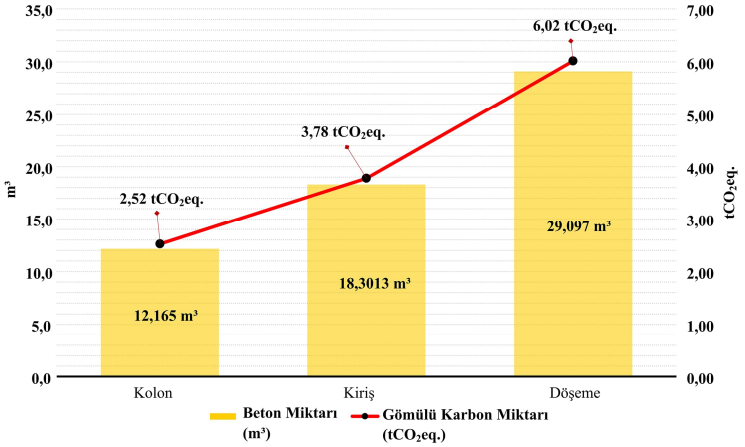
Mevcut yapı birinci kat döşemelerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 6017,229 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~6,02 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.22. MY birinci kat döşemeleri donatı demiri GKA

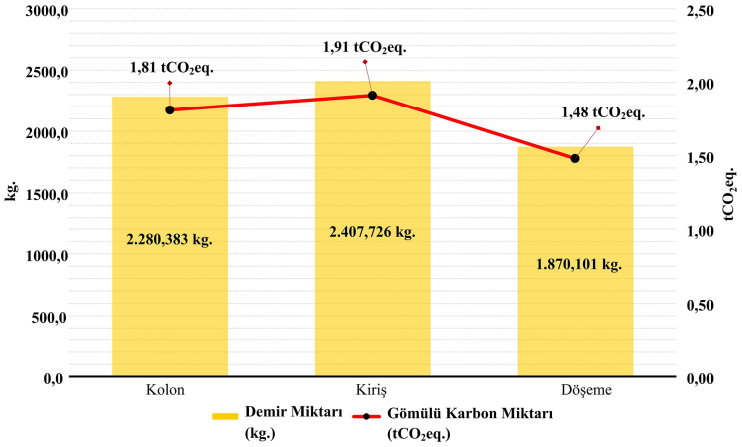
Döşeme Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
D101 12 cm	2	181,66	0,7916	143,802
D102 12 cm	2	128,218	0,7916	101,497
D103 12 cm	2	176,478	0,7916	139,700
D104 15 cm	2	350,428	0,7916	277,399
D105 12 cm	2	75,098	0,7916	59,448
D106 12 cm	2	164,162	0,7916	129,951
DB1 15 cm	2	220,744	0,7916	174,741
DB2 15 cm	2	324,702	0,7916	257,034
DD1 12 cm	2	146,332	0,7916	115,836
DS 15 cm	1	102,279	0,7916	80,964
MY-GKA-Birinci Kat Döşeme-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri				**1480,372**

Mevcut yapı birinci kat döşemelerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1480,372 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,48 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Mevcut yapı birinci kat inşası için kullanılmış hazır beton ve donatı demiri yapı malzemeleri kaynaklı atmosfere salınmış sera gazı oluşturan emisyonların yapı elemanlarına göre dağılımı aşağıdaki grafiklerde ifade edilmiştir (Şekil 4.15-4.16).

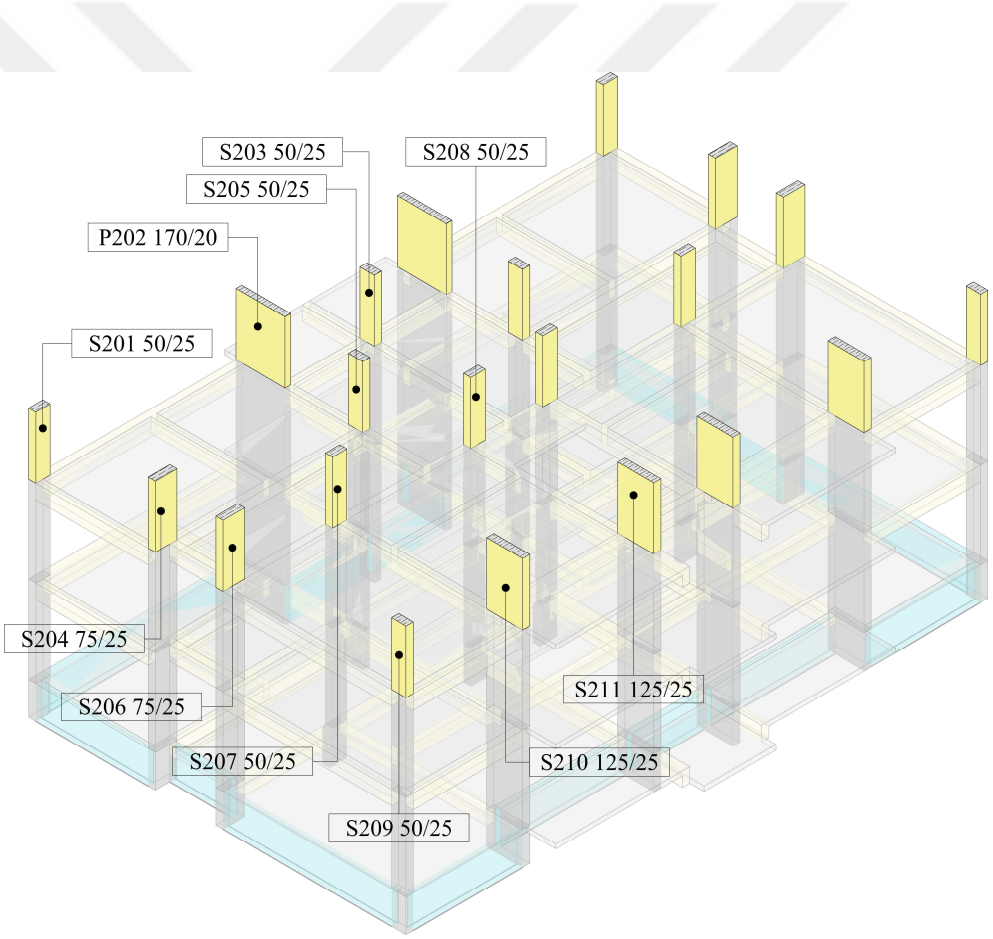


Şekil 4.15. MY birinci kat hazır beton ve gömülü karbon dağılımı



Şekil 4.16. MY birinci kat donatı demiri ve gömülü karbon dağılımı

➢ Mevcut yapı ikinci kat



Şekil 4.17. Mevcut yapı ikinci kat kolonları

Çizelge 4.23. MY ikinci kat kolonları hazır beton GKA

Kolon Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P202 170/20	2	C16 (BS16) Beton	2,04	206,8	421,872

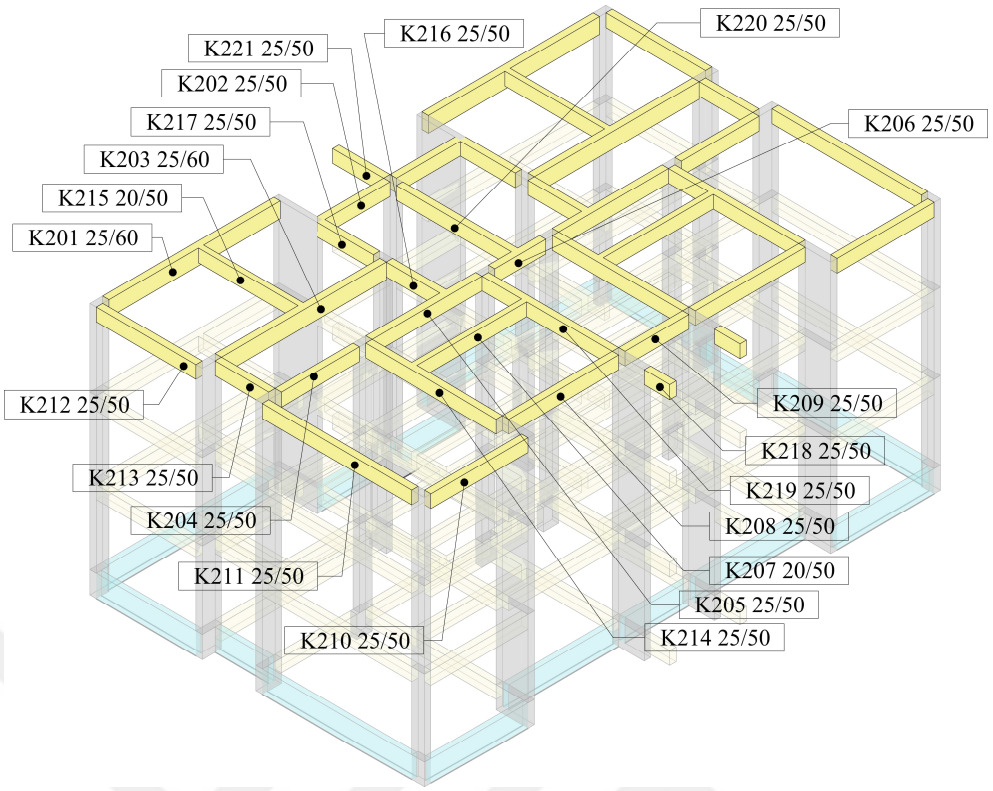
S201 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S203 50/25	1	C16 (BS16) Beton	0,375	206,8	77,550
S204 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
S205 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S206 75/25	2	C16 (BS16) Beton	1,125	206,8	232,650
S207 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S208 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S209 50/25	2	C16 (BS16) Beton	0,750	206,8	155,100
S210 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
S211 125/25	2	C16 (BS16) Beton	1,875	206,8	387,750
				MY-GKA-İkinci Kat Kolon-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**2515,722**

Mevcut yapı ikinci kat kolonlarında kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 2515,722 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~2,52 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.24. MY ikinci kat kolonları donatı demiri GKA

Kolon Adı	**Adet**	**Demir Donatı Miktarı (kg)**	**Demir GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)**
P202 170/20	2	432,762	0,7916	342,574
S201 50/25	2	133,754	0,7916	105,880
S203 50/25	1	66,877	0,7916	52,940
S204 75/25	2	183,338	0,7916	145,130
S205 50/25	2	133,754	0,7916	105,880
S206 75/25	2	183,338	0,7916	145,130
S207 50/25	2	133,754	0,7916	105,880
S208 50/25	2	133,754	0,7916	105,880
S209 50/25	2	133,754	0,7916	105,880
S210 125/25	2	282,504	0,7916	223,630
S211 125/25	2	282,504	0,7916	223,630
			MY-GKA-İkinci Kat Kolon-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**1662,434**

Mevcut yapı ikinci kat kolonlarında kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1662,434 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,66 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.18. Mevcut yapı ikinci kat kirişleri

Çizelge 4.25. MY ikinci kat kirişleri hazır beton GKA

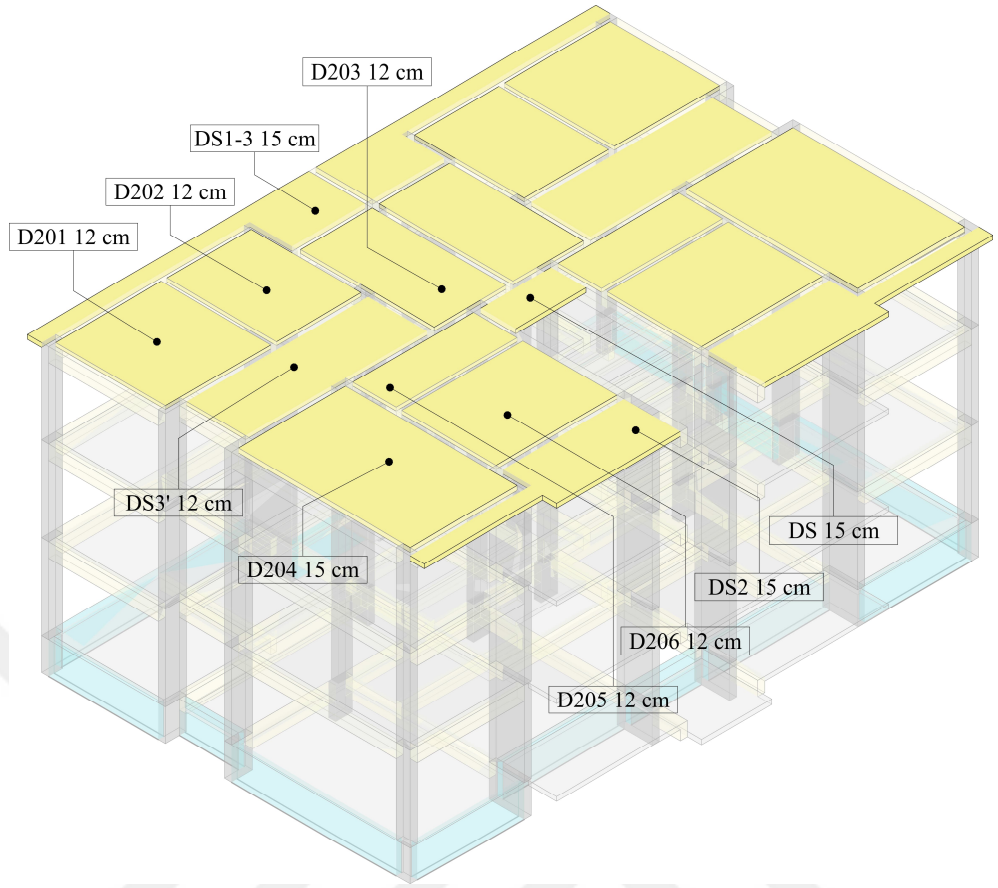
Kiriş Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
K201 25/60	2	C16 (BS16) Beton	2,01	206,8	415,668
K202 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,6444	206,8	133,267
K203 25/60	2	C16 (BS16) Beton	1,935	206,8	400,158
K204 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,763	206,8	157,685
K205 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,075	206,8	222,310
K206 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
K207 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,860	206,8	177,848
K208 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,075	206,8	222,310
K209 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,313	206,8	64,625
K210 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,950	206,8	196,460
K211 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,463	206,8	302,445
K212 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,975	206,8	201,630
K213 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,525	206,8	108,570
K214 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
K215 20/50	2	C16 (BS16) Beton	0,780	206,8	161,304
K216 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,525	206,8	108,570
K217 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,5468	206,8	113,083
K218 25/50	2	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
K219 25/50	2	C16 (BS16) Beton	1,275	206,8	263,670
K220 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,563	206,8	116,325
K221 25/50	1	C16 (BS16) Beton	0,250	206,8	51,700
				MY-GKA-İkinci Kat Kiriş-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**3784,699**

Mevcut yapı ikinci kat kirişlerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 3784,699 kgCO_2eq. sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~3,78 tCO_2eq. olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.26. MY ikinci kat kirişleri donatı demiri GKA

Kiriş Adı	**Adet**	**Demir Donatı Miktarı (kg)**	**Demir GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri (kgCO_2eq.)**
K201 25/60	2	240,522	0,7916	190,397
K202 25/50	2	84,030	0,7916	66,518
K203 25/60	2	279,926	0,7916	221,589
K204 25/50	2	171,520	0,7916	135,775
K205 25/50	2	171,520	0,7916	135,775
K206 25/50	1	85,760	0,7916	67,888
K207 20/50	2	77,556	0,7916	61,393
K208 25/50	2	150,204	0,7916	118,901
K209 25/50	1	75,102	0,7916	59,451
K210 25/50	2	98,708	0,7916	78,137
K211 25/50	2	151,374	0,7916	119,828
K212 25/50	2	96,636	0,7916	76,497
K213 25/50	2	61,480	0,7916	48,668
K214 25/50	2	180,968	0,7916	143,254
K215 20/50	2	71,762	0,7916	56,807
K216 25/50	2	63,730	0,7916	50,449
K217 25/50	2	63,730	0,7916	50,449
K218 25/50	2	93,816	0,7916	74,265
K219 25/50	2	93,816	0,7916	74,265
K220 25/50	1	47,783	0,7916	37,825
K221 25/50	1	47,783	0,7916	37,825
			MY-GKA-İkinci Kat Kiriş-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**1905,956**

Mevcut yapı ikinci kat kirişlerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1905,956 kgCO_2eq. sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,91 tCO_2eq. olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.19. Mevcut yapı ikinci kat döşemeleri

Çizelge 4.27. MY ikinci kat döşemeleri hazır beton GKA

Döşeme Adı	Adet	Malzeme Adı	Beton Miktarı (m^3)	Beton GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
D201 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,51	206,8	725,868
D202 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,808	206,8	580,694
D203 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,879	206,8	595,274
D204 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	6,954	206,8	1438,087
D205 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	1,600	206,8	330,797
D206 12 cm	2	C16 (BS16) Beton	3,457	206,8	714,949
DB2 15 cm	1	C16 (BS16) Beton	1,620	206,8	335,016
DD1 12 cm	1	C16 (BS16) Beton	1,625	206,8	336,133
DS1-3 15 cm	2	C16 (BS16) Beton	2,655	206,8	549,054
DS2 15 cm	1	C16 (BS16) Beton	1,620	206,8	335,016
DS3' 12 cm	1	C16 (BS16) Beton	1,625	206,8	336,133
DS 15 cm	1	C16 (BS16) Beton	0,469	206,8	96,938
				MY-GKA-İkinci Kat Döşeme-Hazır Beton Toplam Gömülü Karbon Değeri	**6373,959**

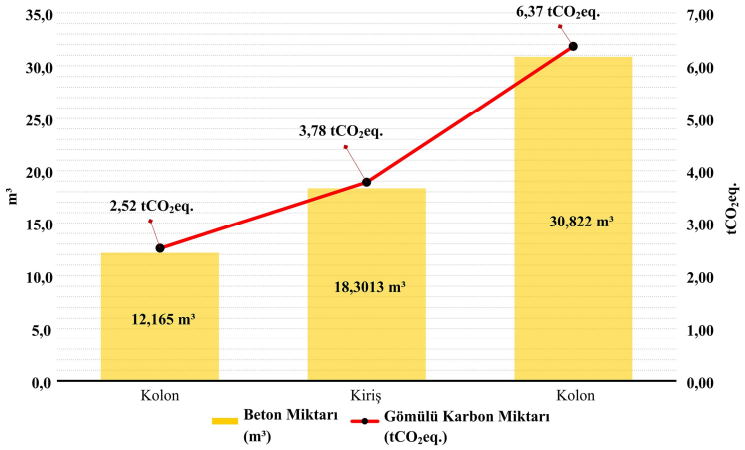
Mevcut yapı ikinci kat döşemelerinde kullanılmış olan hazır betondan kaynaklı atmosfere 6373,959 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~6,37 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.28. MY ikinci kat döşemeleri donatı demiri GKA

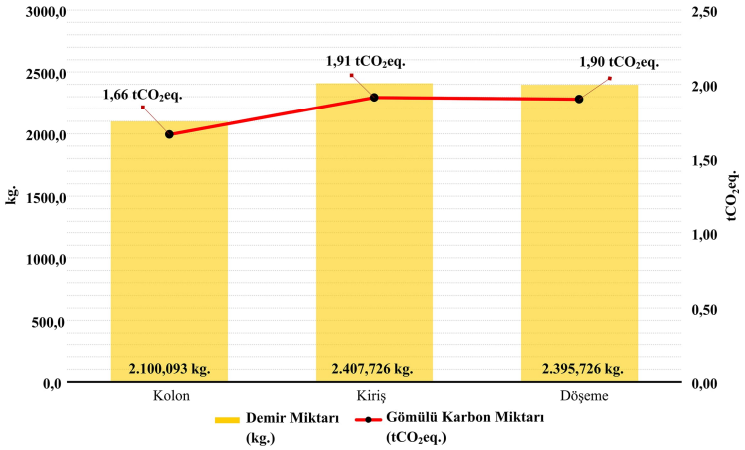
Döşeme Adı	Adet	Demir Donatı Miktarı (kg)	Demir GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
D201 12 cm	2	152,392	0,7916	120,634
D202 12 cm	2	128,218	0,7916	101,497
D203 12 cm	2	176,478	0,7916	139,700
D204 15 cm	2	342,110	0,7916	270,814
D205 12 cm	2	103,870	0,7916	82,223
D206 12 cm	2	164,162	0,7916	129,951
DB2 15 cm	1	162,351	0,7916	128,517
DD1 12 cm	1	73,166	0,7916	57,918
DS1-3 15 cm	2	439,678	0,7916	348,049
DS2 15 cm	1	439,632	0,7916	348,013
DS3' 12 cm	1	111,390	0,7916	88,176
DS 15 cm	1	102,279	0,7916	80,964
			MY-GKA-İkinci Kat Döşeme-Donatı Demiri Toplam Gömülü Karbon Değeri	**1896,457**

Mevcut yapı ikinci kat döşemelerinde kullanılmış olan donatı demiri kaynaklı atmosfere 1896,457 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,90 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

Mevcut yapı ikinci kat inşası için kullanılmış hazır beton ve donatı demiri yapı malzemeleri kaynaklı atmosfere salınmış sera gazı oluşturan emisyonların yapı elemanlarına göre dağılımı aşağıdaki grafiklerde ifade edilmiştir (Şekil 4.20-4.21).



Şekil 4.20. MY ikinci kat hazır beton ve gömülü karbon dağılımı

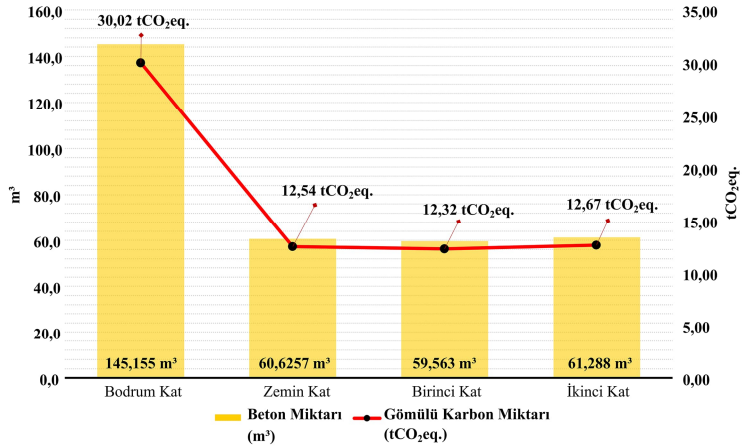


Şekil 4.21. MY ikinci kat donatı demiri ve gömülü karbon dağılımı

Mevcut yapı inşasında betonarme strüktür bileşenleri oluşturmak amacıyla kullanılmış olan hazır beton ve donatı demiri malzemeleri kaynaklı atmosfere salınan sera etkisi oluşturan CO_2eq. gazlar detaylı olarak analiz edilmiştir. Betonarme strüktürü oluşturan hazır beton yapı malzemesinin bütün katlar toplamı nicelikleri ve bu niceliklere bağlı olarak atmosfere salınmış olunan CO_2eq. gaz miktarları aşağıda ifade edilmiştir (Çizelge 4.29 ve Şekil 4.22).

Çizelge 4.29. MY Bütün katlar hazır beton malzeme niceliği ve gömülü karbon değeri

Mahal Adı	Beton Miktarı (m^3)	Gömülü Karbon Değeri ($tCO_2eq.$)
Bodrum Kat	145,143	30,02
Zemin Kat	60,626	12,54
Birinci Kat	59,563	12,32
İkinci Kat	61,288	12,67
TOPLAM	**326,620**	**67,55**

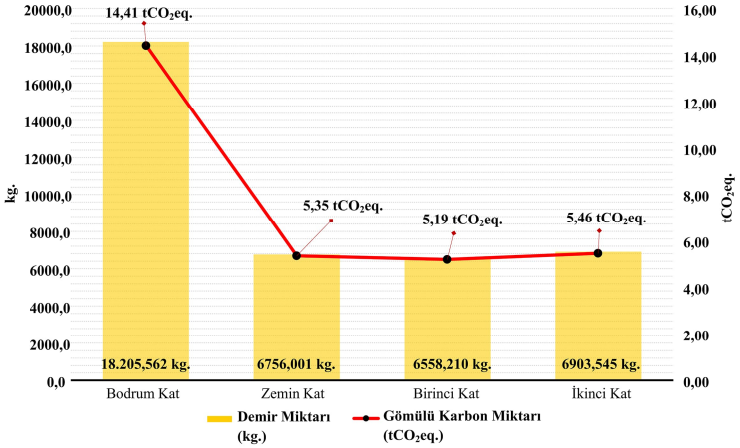


Şekil 4.22. MY bütün katlar hazır beton ve gömülü karbon dağılımı

Betonarme strüktürü oluşturan donatı demiri yapı malzemesinin bütün katlar toplamı nicelikleri ve bu niceliklere bağlı olarak atmosfere salınmış olunan CO_2eq. gaz miktarları aşağıda ifade edilmiştir (Çizelge 4.30 ve Şekil 4.23).

Çizelge 4.30. MY Bütün katlar donatı demiri malzeme niceliği ve gömülü karbon değeri

Mahal Adı	Donatı Demiri (kg)	Gömülü Karbon Değeri (tCO_2eq.)
Bodrum Kat	18205,562	14,41
Zemin Kat	6759,001	5,35
Birinci Kat	6558,210	5,19
İkinci Kat	6903,545	5,46
TOPLAM	**38423,318**	**30,41**

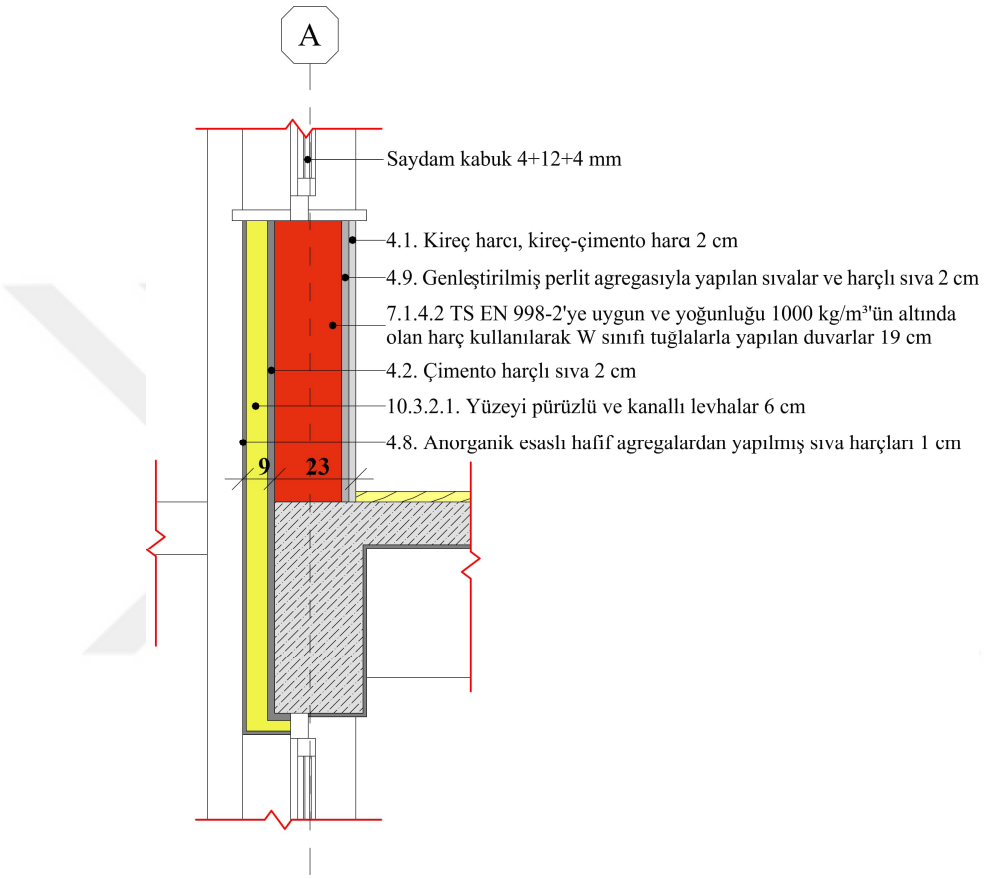


Şekil 4.23. MY bütün katlar donatı demiri ve gömülü karbon dağılımı

Doktora tezi ana hipotezi doğrultusunda gerçekleştirilen analiz aracılığıyla mevcut yapının betonarme strüktürünü oluşturan hazır beton ve donatı demiri miktarları detaylı olarak irdelenmiş ve söz konusu malzemelerin üretimi esnasında atmosfere salınmış olan sera gazı eşdeğerleri tCO_2eq. biriminde tespit edilmiştir. Hazır beton malzemeden kaynaklı sera gazı etkisi 67,55 tCO_2eq. olurken, donatı demirinden kaynaklı emisyon ise 30,41 tCO_2eq.'dir. Mevcut yapı da yalnızca betonarme strüktürü oluşturan iki yapı malzemesi 97,96 tCO_2eq. sera gazı etkisi oluşturan emisyonların atmosfere salınmasına neden olmuştur. Bir diğer ifadeyle 97,96 tCO_2eq. sera etkisi oluşturan gaz emisyonu karşılığında mevcut yapının betonarme strüktürü elde edilmiştir. Dolayısıyla mevcut konut yapısının enerji iyileştirmesi gerçekleştirilip kullanılmaması durumunda, tespit edilen miktardaki sera gazı emisyonunun hiçbir fiziksel karşılığı kalmamış varsayılmalıdır.

- **MY düşey kabuk GKA**

Betonarme strüktürden farklı olarak, mevcut yapı düşey kabuğunu oluşturan yapı malzemeleri adet olarak daha fazladır. Bölüm 3.1.1.'de belirtildiği üzere düşey yapı kabuğu Şekil 4.24'teki kesit esas alınarak gömülü karbon hesaplaması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.24. MY düşey yapı kabuğu gömülü karbon hesabı yapılan katmanlar

Düşey kabukta yer alan katmanlar için GWP değeri çevresel ürün beyanları ve TS 825 standardı birim hacim ağırlık verileri ışığında gerçekleştirilmiş ve düşey kabuk için gömülü karbon değeri hesaplaması gerçekleştirilmiştir.

➢ Çimento esaslı harç katmanları için EPD verileri ve GWP değer tespiti

Çizelge 4.31. Çimento esaslı harç yapı malzemesi için ortalama GWP değeri

EPD Kayıt Numarası	EPD Geçerlilik Tarihi	Tanımlanan Birim	A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)
S-P-05679	2027	1 kg.	0,121
S-P-04248	2026	1 kg.	0,322
S-P-03160	2026	1 kg.	0,296

20210128-DE	2026	1 kg.	0,208
20220217-EN	2027	1 kg.	0,488
	1 kg. Çimento Esaslı Harç Ortalama GWP Değeri		**0,287**

Çevresel ürün beyanlarında çimento esaslı harçlar için tanımlanmış hesaplama birimi olarak kilogram kullanılmıştır. Çimento esaslı harçlarla gerçekleştirilmiş sıva katmanları gömülü karbon değeri hesaplanabilmesi amacıyla, uygulama kalınlığına bakılmaksızın 1 m³ kullanımdaki GWP değeri tespit edilmiştir. Söz konusu hesabın gerçekleştirilmesinde TS 825 standardı Ek-E içerisindeki veriler esas alınmıştır. Ek-E içerisinde birden fazla değere sahip olan malzemeler için ortalama değer alınmıştır. Birim dönüşümünde kullanılan düşey yapı kabuğunda yer alan katmanlar ve birim hacim kütleleri Çizelge 4.32'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.32. Çimento esaslı harçlı katmanlar birim hacim kütleleri

Katman Yapı Malzemesi	**Birim Hacim Kütlesi (kg/m³)**
4.1. Kireç, kireç-çimento harcı	1800
4.2. Çimento harçlı sıva	2000
4.8. Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva haçları (ortalama değer)	900
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları (ortalama değer)	600

Birim hacim ağırlıklarından kg. değerleri TS 825 Ek-E içerisinden temin edilen çimento esaslı harç katmanları için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan GWP değerleri Çizelge 4.33'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.33. Çimento esaslı harçlı katmanlar için GWP

Katman Yapı Malzemesi	**A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)**	**Açıklama**
4.1. Kireç, kireç-çimento harcı	516,60	1 m³ malzeme 1800 kg. gelmektedir. 1 kg. malzeme için ortalama GWP değeri 0,287 $kgCO_2eq$'dir. 1800 kg. malzeme için 0,287x1800=516,60 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 516,60 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmiştir.
4.2. Çimento harcı	574,00	1 m³ malzeme 2000 kg. gelmektedir. 1 kg. malzeme için ortalama GWP değeri 0,287 $kgCO_2eq$'dir. 2000 kg. malzeme için 0,287x2000=574,00 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 516,60 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmiştir.
4.8. Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva haçları (ortalama değer)	258,30	1 m³ malzeme 900 kg. gelmektedir. 1 kg. malzeme için ortalama GWP değeri 0,287 $kgCO_2eq$'dir. 900 kg. malzeme için 0,287x900=574,00 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³

		malzeme kullanımında 258,30 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmiştir.
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	172,20	1 m^3 malzeme 600 kg. gelmektedir. 1 kg. malzeme için ortalama GWP değeri 0,287 $kgCO_2eq$'dir. 600 kg. malzeme için 0,287x600=574,00 $kgCO_2eq$. olur. 1 m^3 malzeme kullanımında 172,20 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmiştir.

- Tuğla katmanı için EPD verileri ve GWP değer tespiti

Çizelge 4.34. Tuğla yapı malzemesi için ortalama GWP değeri

EPD Kayıt Numarası	EPD Geçerlilik Tarihi	Tanımlanan Birim	A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)
S-P-08942	2028	1 ton	132,00
EPDIE-21-51	2026	1 ton	211,00
MD-21045-EN	2027	1 ton	129,00
BREG EN 000002	2024	1 ton	213,00
MD-21060-EN	2026	1 ton	206,00
	1 ton. Tuğla Yapı Malzemesi Ortalama GWP Değeri		**178,20**

Çevresel ürün beyanlarında tuğla yapı malzemesi için tanımlanmış hesaplama birimi olarak ton kullanılmıştır. Tuğla yapı malzemesiyle gerçekleştirilmiş katmanın gömülü karbon değeri hesaplanabilmesi amacıyla, uygulama kalınlığına bakılmaksızın 1 m^3 kullanımdaki GWP değeri tespit edilmiştir. Söz konusu hesabın gerçekleştirilmesinde TS 825 standardı Ek-E içerisindeki veriler esas alınmıştır. Ek-E içerisinde birden fazla değere sahip olan malzemeler için ortalama değer alınmıştır. Birim dönüşümünde kullanılan düşey yapı kabuğunda yer alan katman ve birim hacim kütleleri Çizelge 4.35'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.35. Tuğla katmanı birim hacim kütlesi

Katman Yapı Malzemesi	Birim Hacim Kütlesi (kg/m^3)
7.1.4.2. TS EN 998-2 (mülga TS 4916)'ya uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m^3'ün altında olan harç kullanılarak W sınıf tuğlalarla yapılan duvar (ortalama değer)	775

Birim hacim ağırlıklarından kg. değerleri TS 825 Ek-E içerisinden temin edilen tuğla katmanı için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan GWP değerleri Çizelge 4.36'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.36. Tuğla malzeme katmanı için GWP

Katman Yapı Malzemesi	A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)	Açıklama
7.1.4.2. TS EN 998-2 (mülga TS 4916)'ya uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m³'ün altında olan harç kullanılarak W sınıf tuğlalarla yapılan duvar	138,105	1 m³ malzeme 775 kg. gelmektedir. 1000 kg. malzeme için ortalama GWP değeri 178,20 $kgCO_2eq$'dir. 775 kg. malzeme için 178,20x775=138,105 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 138,105 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmiştir.

- Yalıtım levha katmanı için EPD verileri ve GWP değer tespiti

Çizelge 4.37. Yalıtım levha malzemesi için ortalama GWP değeri

EPD Kayıt Numarası	EPD Geçerlilik Tarihi	Tanımlanan Birim	A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)
S-P-00501	2024	1 m²	4,5232
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri Rsi=1 m².K/W değerindeki kalınlıkta 1 m² malzeme için verilmiştir. Dolayısıyla 1 m² malzeme 3,4 cm kalınlıktadır. 3,4 cm kalınlık için GWP değeri=2,57 $kgCO_2eq$. verilmiştir. 6 cm/3,4 cm=1,76 dönüşüm katsayısı uygulanmış ve 2,57x1,76=4,5232 $kgCO_2eq$. değeri elde edilmiştir.		
EPD-283	2026	1 m²	4,2848
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri Rsi=1 m².K/W değerindeki kalınlıkta 1 m² malzeme için verilmiştir. Dolayısıyla 1 m² malzeme 2,89 cm kalınlıktadır. 2,89 cm kalınlık için GWP değeri=2,06 $kgCO_2eq$. verilmiştir. 6 cm/2,89 cm=2,08 dönüşüm katsayısı uygulanmış ve 2,06x2,08=4,2848 $kgCO_2eq$. değeri elde edilmiştir.		
NEPD-3336-1961-EN	2027	1 m²	6,7340
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri Rsi=1 m².K/W değerindeki kalınlıkta 1 m² malzeme için verilmiştir. Dolayısıyla 1 m² malzeme 3,3 cm kalınlıktadır. 3,3 cm kalınlık için GWP değeri=3,70 $kgCO_2eq$. verilmiştir. 6 cm/3,3 cm=1,82 dönüşüm katsayısı uygulanmış ve 3,70x1,82=6,7340 $kgCO_2eq$. değeri elde edilmiştir.		
NEPD-4437-3697-EN	2028	1 m²	4,5760
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri Rsi=1 m².K/W değerindeki kalınlıkta 1 m² malzeme için verilmiştir. Dolayısıyla 1 m² malzeme 3,4 cm kalınlıktadır. 3,4 cm kalınlık için GWP değeri=2,60 $kgCO_2eq$. verilmiştir. 6 cm/3,4 cm=1,76 dönüşüm katsayısı uygulanmış ve 2,60x1,76=4,5760 $kgCO_2eq$. değeri elde edilmiştir.		
20190112-IBE1-EN	2024	1 m²	5,4840
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri 10 cm kalınlıkta 1 m² malzeme için 9,14 $kgCO_2eq$. verilmiştir. 6 cm/10 cm=0,6 dönüşüm katsayısı uygulanmış ve 9,14x0,6=5,4840 $kgCO_2eq$. değeri elde edilmiştir.		
1 m² Yalıtım Levhası Yapı Malzemesi (6 cm) Ortalama GWP Değeri			**5,1204**

Çevresel ürün beyanlarında yalıtım levha yapı malzemesi için tanımlanmış hesaplama birimi olarak m² kullanılmıştır. Yalıtım levha yapı malzemesiyle gerçekleştirilmiş katmanın gömülü karbon değeri hesaplanabilmesi amacıyla, uygulama kalınlığına bakılmaksızın 1 m³ kullanımdaki GWP değeri tespit edilmiştir. Ağırlık birimi

olarak verilmeyen yalıtım levha malzemesi değeri hesabı, ortalama GWP değerindeki ölçü birimlerinden gerçekleştirilmiştir. Söz konusu ortalama GWP değeri 6 cm kalınlıkta 1 m² alana sahip yalıtım levhası üretiminde atmosfere salınmış olan $kgCO_2eq$. gaz miktarıdır. Dolayısıyla yalıtım levhası için ortalama GWP değeri 0,06 m³ hacimsel değer için geçerlidir. Yalıtım levha katmanı için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan GWP değerleri Çizelge 4.38'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.38. Yalıtım levha malzeme katmanı için GWP

Katman Yapı Malzemesi	**A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)**	**Açıklama**
10.3.2.1 Yüzeyi pürüzlü ve kanallı levha yalıtım malzemesi	85,340	0,06 m³ malzeme için ortalama GWP değeri 5,1204 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme için 5,1204/0,06=85,340 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 85,340 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmiştir.

- Cam malzeme için EPD veriler ve GWP değer tespiti

Düşey kabuk içerisinde yer alan saydam yüzeyler, cam ve doğramalardan oluşmaktadır. Proje verilerinde, doğramalara ilişkin bir detay bulunmamaktadır. Bu nedenle saydam yüzey alanlarının büyük oranını oluşturan cam malzeme, saydam kabuk gömülü karbonu değeri hesaplamasında kullanılmıştır. Bölüm 3.1.1.'de de belirtildiği üzere yalıtım (izolasyon) detaylarında, mevcut konut yapısının ısıcam özelliği gösteren camlara sahip pencerelerden oluştuğu ifade edilmiştir (Çizelge 4.39).

Çizelge 4.39. Cam yapı malzemesi için ortalama GWP değeri

EPD Kayıt Numarası	**EPD Geçerlilik Tarihi**	**Tanımlanan Birim**	**A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)**
S-P-06326	2027	1 m²	10,40
S-P-04810	2027	1 m²	10,20
S-P-01743	2025	1 m²	12,70
GFEV-GB-19.2	2026	1 m²	10,863
S-P-08816	2028	1 m²	11,00
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri 1 mm kalınlık için GWP değeri=2,75 $kgCO_2eq$. verilmiştir. 4 mm kalınlıktaki cam malzeme için ise 2,75x4=11,00 $kgCO_2eq$. değeri elde edilmiştir.		
	1 m² 4 mm Cam Yapı Malzemesi Ortalama GWP Değeri		**11,0326**

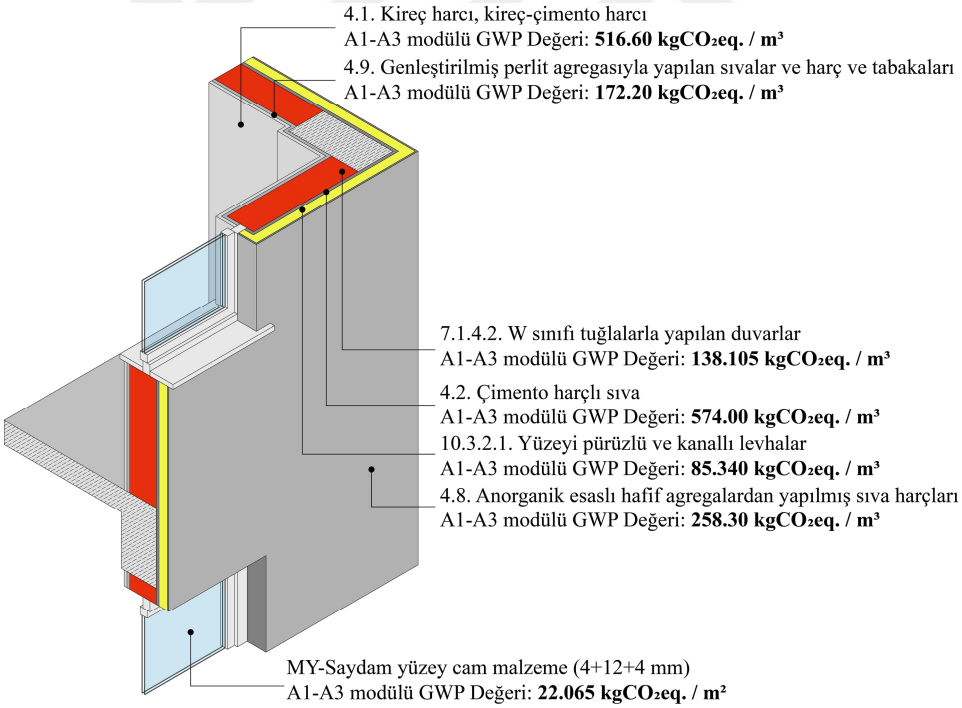
Ortalama GWP değer tespiti 4 mm kalınlıkta 1 m² yüzey alanına sahip cam üretimi için yapılmıştır. Temel ısıcam, 4 mm (cam)+ 12 mm (hava)+ 4 mm (cam) ölçülerine sahiptir. 4 mm kalınlıkta 1 m² yüzey alanını için bulunmuş olan ortalama GWP değeri,

ısıcam niteliğinde bir pencerede bulunan iki ayrı cam katmanına göre değerlendirilmiştir. Çizelge 4.40'ta saydam yüzeyler için kullanılmış olan GWP değeri belirtilmiştir.

Çizelge 4.40. Saydam yüzeyler için GWP

Katman Yapı Malzemesi	**A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)**	**Açıklama**
4+12+4 mm ısıcam	22,065	4 mm kalınlıkta 1 m² yüzey alanına sahip cam malzeme için GWP değeri=11,0326 $kgCO_2eq$. verilmiştir. Isıcam nitelikli pencerelerde iki adet cam bulunmaktadır. 4+12+4 mm kalınlıkta 1 m² cam malzeme için 2x11,0326=22,065 $kgCO_2eq$. değeri elde edilmiştir.

Mevcut yapı düşey kabuk gömülü karbon değeri hesaplaması amacıyla bütün katmanlar ayrı ayrı irdelenmiş ve GWP değerleri tespit edilmiştir. Gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan yapı malzemeleri, birim m³ ve m² niceliklerindeki GWP değerleri Şekil 4.25'teki mevcut yapı dijital modeli üzerinde belirtilmiştir.

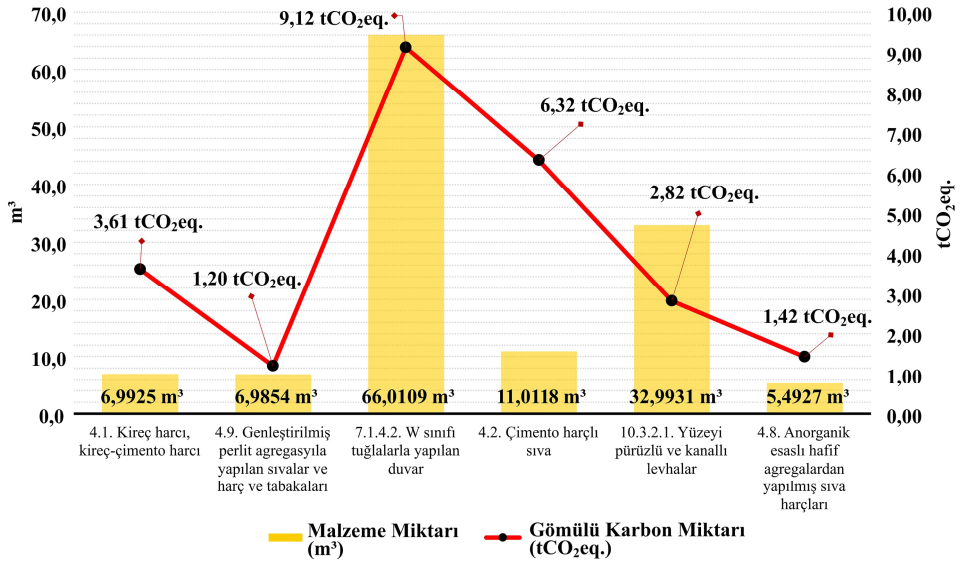


Şekil 4.25. MY düşey yapı kabuğu katmanları GWP değerleri

➢ Düşey kabuk opak yüzey katmanları gömülü karbon değeri

Çizelge 4.41. MY Düşey kabuk opak yüzey GKA

Katman Yapı Malzemeleri	Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzeme Miktarı (m^3)	Opak Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
4.1. Kireç harcı, kireç-çimento harcı	20	6,9924738	516,6	3612,312
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	20	6,9854404	172,2	1202,893
7.1.4.2. TS EN 998-2'ye uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m^3'ün altında olan harç kullanılarak W sınıfı tuğlalarla yapılan duvarlar	190	66,0108961	138,105	9116,435
4.2. Çimento harçlı sıva	20	11,0117527	574	6320,746
10.3.2.1. Yüzeyi pürüzlü ve kanallı levhalar	60	32,9930581	85,34	2815,628
4.8. Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları	10	5,4926888	258,3	1418,762
		MY-GKA-Düşey Kabuk Opak Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri		**24486,775**



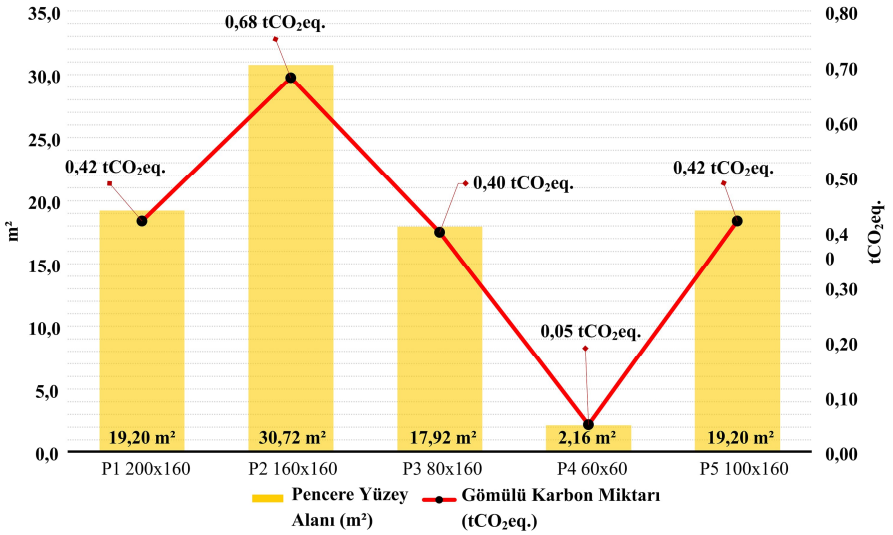
Şekil 4.26. MY Düşey kabuk opak yüzey gömülü karbon dağılımı

Mevcut yapı düşey kabuk opak yüzeylerinde kullanılmış olan yapı malzemelerinden kaynaklı atmosfere 24486,775 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~24,49 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

➢ Düşey kabuk saydam yüzey katmanları gömülü karbon değeri

Çizelge 4.42. MY Düşey kabuk saydam yüzey GKA

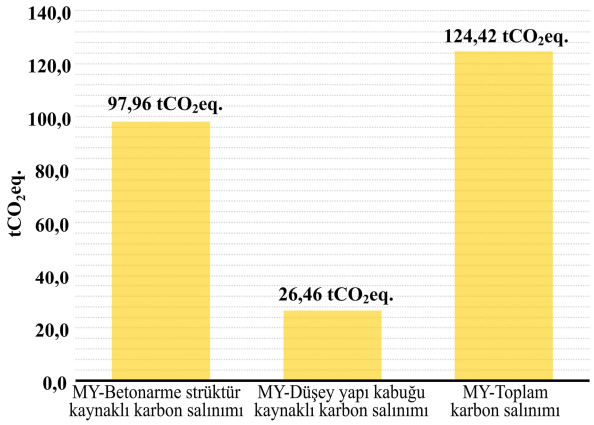
Pencere Adı	Adet	Genişlik (m.)	Yükseklik (m.)	Pencere Yüzey Alanı (m^2)	Saydam Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P1 200x160	6	2	1,6	19,20	22,065	423,648
P2 160x160	12	1,6	1,6	30,72	22,065	677,8368
P3 80x160	14	0,8	1,6	17,92	22,065	395,4048
P4 60x60	6	0,6	0,6	2,16	22,065	47,6604
P5 100x160	12	1	1,6	19,20	22,065	423,648
				MY-GKA-Düşey Kabuk Saydam Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri		**1968,198**



Şekil 4.27. MY Düşey kabuk saydam yüzey gömülü karbon dağılımı

Mevcut yapı düşey kabuk saydam yüzeylerinde kullanılmış olan yapı malzemelerinden kaynaklı atmosfere 1968,198 $kgCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~1,97 $tCO_2eq.$ olarak kabul edilmiştir.

- **MY toplam GKA**



Şekil 4.28. Mevcut yapı toplam gömülü karbon dağılımı

Birçok farklı yapı malzemesinden oluşan mevcut yapıda, sadece betonarme strüktür ve düşey kabukta kullanılmış olan yapı malzemelerinden kaynaklı atmosfere 124,42 $tCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu gerçekleşmiştir. Bir diğer ifadeyle 124,42 $tCO_2eq.$ sera etkisi oluşturan gaz emisyonu karşılığında mevcut yapının betonarme strüktürü ve düşey kabuğu elde edilmiştir. Hesaplamalar neticesinde elde edilen bu sonuç, yapı sektöründe çevresel etkilerin azaltılmasında betonarme strüktürü oluşturan yapı malzemelerinin ne denli önemli olduğunu göstermiştir. Betonarme strüktürün inşası amacıyla salınmış olan $CO_2eq.$ gaz miktarı, düşey kabuğu oluşturan yapı malzemeleri üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarından yaklaşık olarak %72,98 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu analizlere bağlı olarak, mevcut yapıların betonarme strüktürünün korunarak enerji güçlendirmesi aracılığıyla kullanılmaya devam edilmesi küresel ısınma tehdidinin önüne geçilmek istenilen bir gelecek için tercih değil zorunluluktur.

4.1.2. Mevcut yapı kullanım karbonu analizi

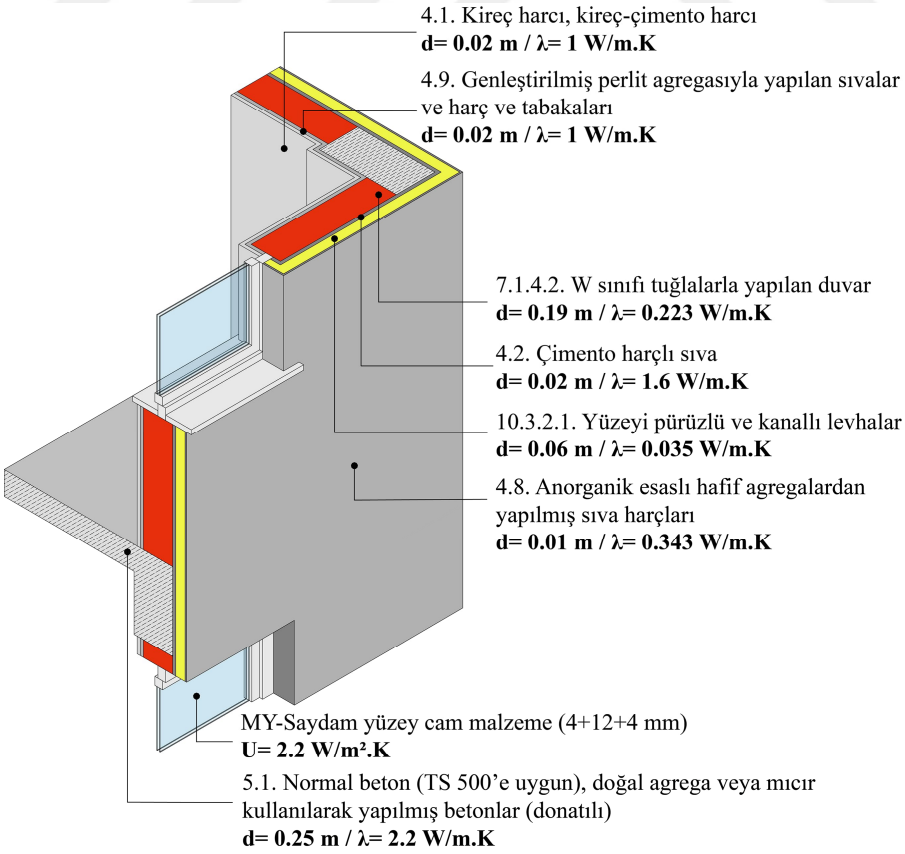
Kullanım karbonu analizi amacıyla öncelikle proje verilerinde yapı kabuklarının termofiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Yapı kabukları düşey ve yatay olarak sınıflandırılmıştır. Düşey yapı kabukları, opak ve saydam olarak ikiye ayrılmıştır. Opak kabuk bileşenleri de dolgu duvar ve betonarme yüzeyleri olarak hesaplanmıştır. Yatay yapı kabukları ise tavan ve taban şeklinde sınıflandırılmıştır. Bölüm 3.1.1'de belirtildiği üzere yatay yapı kabuklarında taban yüzeyleri farklılaşmaktadır. Kullanım karbonu

değeri hesaplaması için kullanılan bütün sayısal veriler, Bölüm 3.1.2.'deki tespit edilmiş verilere bağlı olarak elde edilmiştir.

- **MY düşey kabuk termofiziksel özellikleri**

Çizelge 4.43. MY düşey yapı kabuğu katmanları termofiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**Kalınlık (m.)**	**Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)**	**Isıl geçirgenlik direnci R (m².K/W)**
4.1. Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,02	1,00	0,02
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,02	0,206	0,097
7.1.4.2. TS EN 998-2'ye uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m³'ün altında olan harç kullanılarak W sınıfı tuğlalarla yapılan duvarlar Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,19	0,223	0,852
5.1. Normal beton (TS 500'e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,25	2,20	0,114
4.2. Çimento harçlı sıva	0,02	1,6	0,013
10.3.2.1. Yüzeyi pürüzlü ve kanallı levhalar Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,06	0,035	1,714
4.8. Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,01	0,343	0,029



Şekil 4.29. MY düşey yapı kabuğu katmanları termofiziksel özellikleri

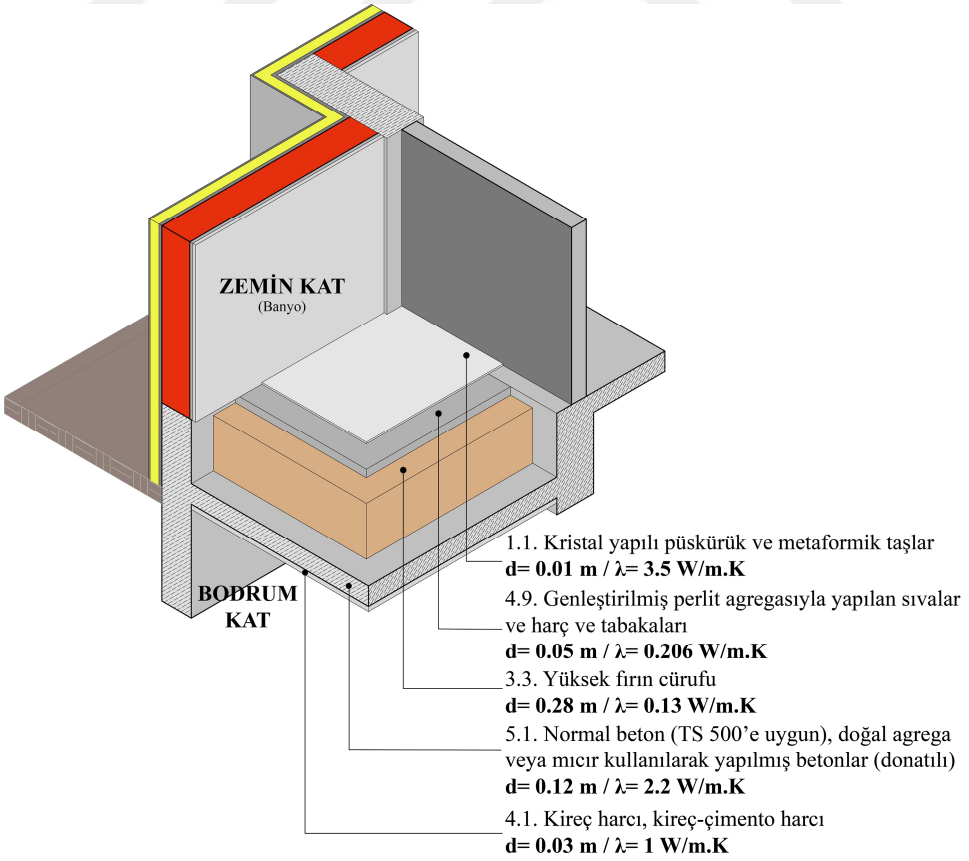
- **MY yatay kabuk termofiziksel özellikleri**

Mevcut yapı yatay kabukları; ısıtılmayan hacim üzere düşük taban döşemesi, ısıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşemesi, ısıtılmayan hacim üzeri normal taban döşemesi ve ısıtılan hacim üzeri tavan döşemesi olarak tanımlanmıştır. Farklılaşan kabuk katmanları ve termofiziksel özellikleri aşağıda ifade edilmiştir.

➢ Isıtılmayan hacim üzeri düşük taban döşemesi

Çizelge 4.44. MY ısıtılmayan hacim üzeri düşük taban döşemesi termofiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**Kalınlık (m.)**	**Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)**	**Isıl geçirgenlik direnci R (m^2.K/W)**
1.1. Kristal yapılı püskürük ve metamorfik taşlar (granit, bazalt, mermer, seramik kaplamalar)	0,01	3,50	0,003
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,05	0,206	0,243
3.3. Yüksek fırın cürufu	0,28	0,13	2,154
5.1. Normal beton (TS 500'e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,20	0,055
4.1. Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03

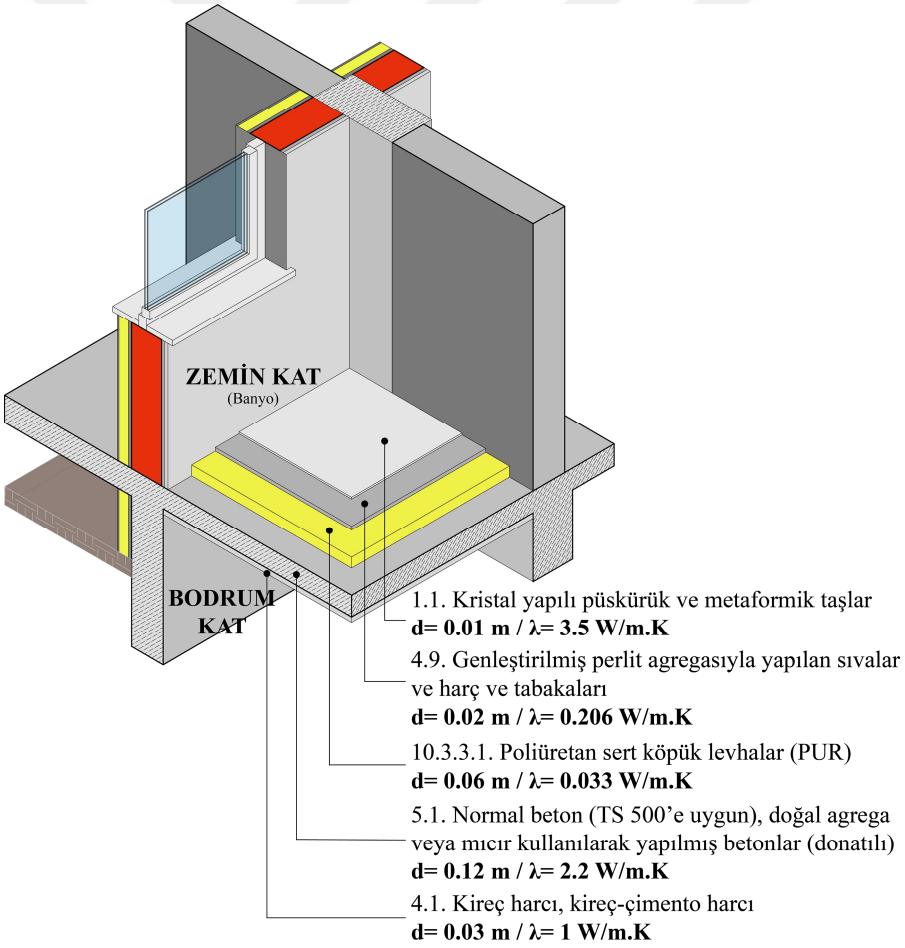


Şekil 4.30. MY ısıtılmayan hacim üzeri düşük taban döşeme termofiziksel özellikleri

➢ Isıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşemesi

Çizelge 4.45. MY ısıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşemesi termofiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**Kalınlık (m.)**	**Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)**	**Isıl geçirgenlik direnci R (m².K/W)**
1.1. Kristal yapılı püskürük ve metamorfik taşlar (granit, bazalt, mermer, seramik kaplamalar)	0,01	3,50	0,003
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,02	0,206	0,097
10.3.3.1. Poliüretan sert köpük levhalar (PUR) Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,06	0,033	1,818
5.1. Normal beton (TS 500'e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,20	0,055
4.1. Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03

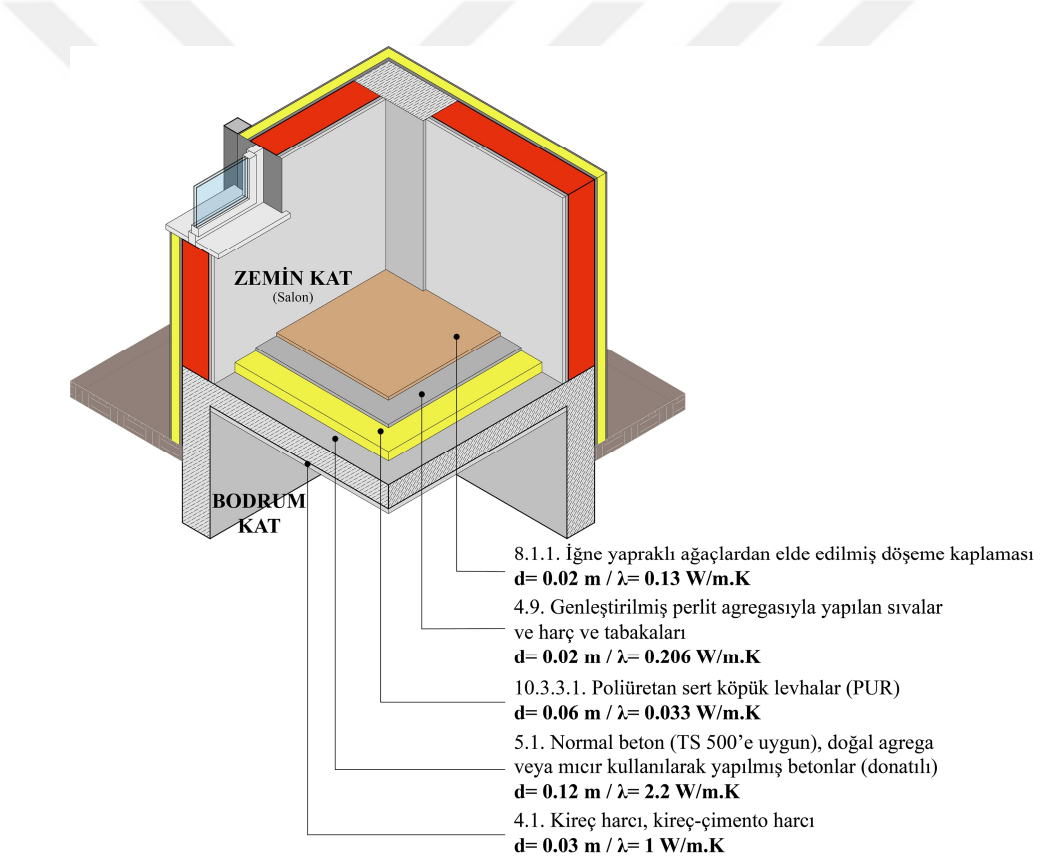


Şekil 4.31. MY ısıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşeme termofiziksel özellikleri

➢ Isıtılmayan hacim üzeri normal taban döşemesi

Çizelge 4.46. MY ısıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşemesi termofiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**Kalınlık (m.)**	**Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)**	**Isıl geçirgenlik direnci R (m².K/W)**
8.1.1. İğne yapraklı ağaçlardan elde edilmiş döşeme kaplaması	0,02	0,13	0,154
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,02	0,206	0,097
10.3.3.1. Poliüretan sert köpük levhalar (PUR) Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,06	0,033	1,818
5.1. Normal beton (TS 500'e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,20	0,055
4.1. Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03

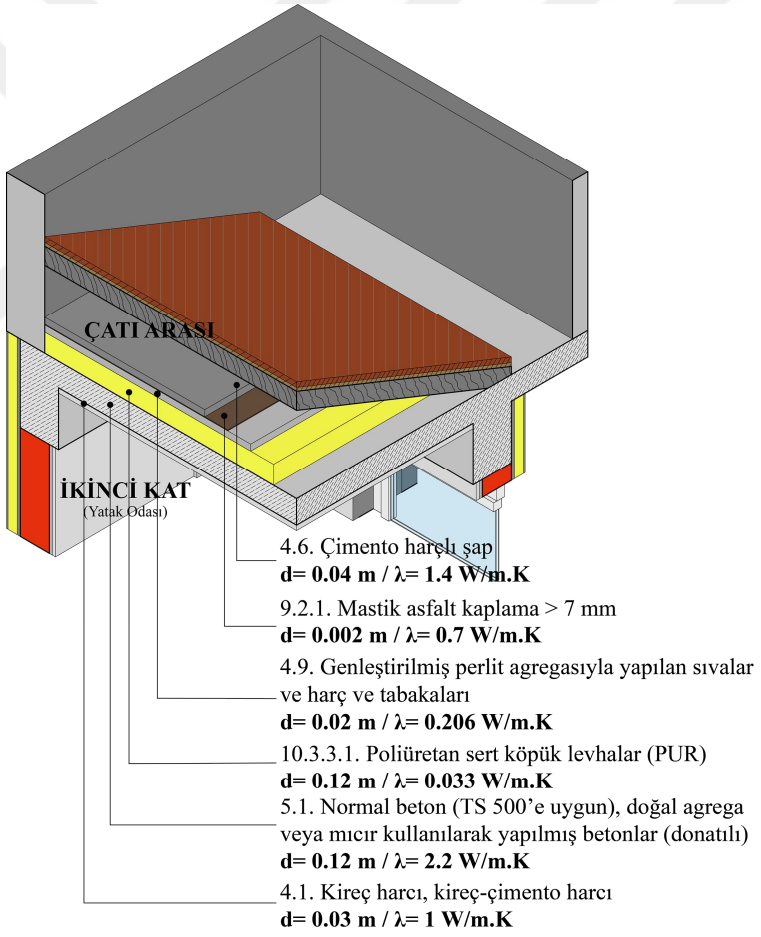


Şekil 4.32. MY ısıtılmayan hacim üzeri normal taban döşeme termofiziksel özellikleri

➢ Isıtılan hacim üzeri tavan döşemesi

Çizelge 4.47. MY ısıtılan hacim üzeri tavan döşemesi termofiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**Kalınlık (m.)**	**Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)**	**Isıl geçirgenlik direnci R (m^2.K/W)**
4.6. Çimento harçlı şap	0,04	1,40	0,029
9.2.1. Mastik asfalt kaplama > 7 mm	0,002	0,70	0,003
4.9. Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,02	0,206	0,097
10.3.3.1. Poliüretan sert köpük levhalar (PUR) Ek-E'de yer alan ortalama λ değeridir.	0,12	0,033	3,636
5.1. Normal beton (TS 500'e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,20	0,055
4.1. Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03



Şekil 4.33. MY ısıtılan hacim üzeri tavan döşemesi termofiziksel özellikleri

- **MY yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı tespiti**

Mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacının tespit edilebilmesi için öncelikle yapı kabuklarından gerçekleşen özgül ısı kayıpları bulunmuştur. Özgül ısı kaybı iletim-taşınım ve havalandırma yoluyla gerçekleşmektedir. Isı kayıplarının bulunmasıyla mevcut konut yapısı için yıllık gerekli olan en az ısıtma enerjisi ihtiyacı tespit edilmiştir.

➢ **İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen özgül ısı kaybı (H_T)**

➢ Dış ortama açık dolgu duvar yüzeyler

Çizelge 4.48. Dış ortama açık dolgu duvar yüzeyler özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,13			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,02	1,00	0,02			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,02	0,206	0,097			
7.1.4.2	TS EN 998-2'ye uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m³'ün altında olan harç kullanılarak W sınıfı tuğlalarla yapılan duvar	0,19	0,223	0,852			
4.2.	Çimento harçlı sıva	0,02	1,60	0,013			
10.3.2.1	Poliüretan sert köpük levhalar (PUR)	0,06	0,035	1,714			
4.8.	Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları	0,01	0,343	0,029			
	$R_{dış}$			0,04			
			TOPLAM	**2,895**	**0,345**	**323,715**	**111,68**

Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşen dış ortama açık dolgu duvar yüzeyleri U değeri 0,345 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 111,68 W/K'dir.

➢ Dış ortama açık betonarme yüzeyler

Çizelge 4.49. Dış ortama açık betonarme yüzeyler özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,13			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,02	1,00	0,02			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,02	0,206	0,097			
5.1.	Normal beton (TS 500'e uygun), doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,25	2,2	0,114			
4.2.	Çimento harçlı sıva	0,02	1,60	0,013			
10.3.2.1	Poliüretan sert köpük levhalar (PUR)	0,06	0,035	1,714			
4.8.	Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları	0,01	0,343	0,029			
	$R_{dış}$			0,04			
			TOPLAM	**2,157**	**0,464**	**241,095**	**111,87**

Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşen dış ortama betonarme yüzeylerin U değeri 0,464 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 111,87 W/K'dir.

➢ Düşük sıcaklıklı ortama açık dolgu duvar yüzeyler

Çizelge 4.50. Düşük sıcaklıklı iç ortama açık dolgu duvar yüzeyler özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,13			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,02	1,00	0,02			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,02	0,206	0,097			
7.1.4.2	TS EN 998-2'ye uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m³'ün altında olan harç kullanılarak W sınıfı tuğlalarla yapılan duvar	0,19	0,223	0,852			
4.2.	Çimento harçlı sıva	0,02	1,60	0,013			
10.3.2.1	Poliüretan sert köpük levhalar (PUR)	0,06	0,035	1,714			

4.8.	Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları	0,01	0,343	0,029			
	$R_{dış}$			0,13			
			TOPLAM	**2,985**	**0,168**	**87,10**	**14,63**

TS 825 standardı gereği doğrudan dış hava ile temas etmeyen yüzeyler için U değeri 0,5 katsayısı ile çarpılır. Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşen düşük sıcaklıklı iç ortama açık dolgu duvar yüzeyleri U değeri 0,168 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 14,63 W/K'dir.

- Düşük sıcaklıklı ortama açık betonarme yüzeyleri

Çizelge 4.51. Düşük sıcaklıklı iç ortama açık betonarme yüzeyler özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,13			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,02	1,00	0,02			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,02	0,206	0,097			
5.1.	Normal beton (TS 500'e uygun), doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,25	2,2	0,114			
4.2.	Çimento harçlı sıva	0,02	1,60	0,013			
10.3.2.1	Poliüretan sert köpük levhalar (PUR)	0,06	0,035	1,714			
4.8.	Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları	0,01	0,343	0,029			
	$R_{dış}$			0,13			
			TOPLAM	**2,247**	**0,223**	**4,5**	**1,00**

TS 825 standardı gereği doğrudan dış hava ile temas etmeyen yüzeyler için U değeri 0,5 katsayısı ile çarpılır. Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşen düşük sıcaklıklı iç ortama açık betonarme yüzeyleri U değeri 0,223 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 1,00 W/K'dir.

- Isıtılmayan hacim üzeri düşük taban döşeme yüzeyleri

Çizelge 4.52. Isıtılmayan hacim üzeri düşük taban yüzey özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,17			
1.1.	Kristal yapılı püskürük ve metamorfik taşlar (granit, bazalt, mermer, seramik kaplamalar)	0,01	0,13	0,077			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,02	0,206	0,097			
3.3.	Yüksek fırın cürufu	0,28	0,130	2,154			
5.1.	Normal beton (TS 500'e uygun), doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,2	0,055			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03			
	$R_{dış}$			0,17			
			TOPLAM	**2,753**	**0,182**	**30,30**	**5,51**

TS 825 standardı gereği doğrudan dış hava ile temas etmeyen yüzeyler için U değeri 0,5 katsayısı ile çarpılır. Mevcut yapı yatay kabuk ısıtılmayan hacim üzeri düşük taban döşemesi yüzeyleri U değeri 0,182 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 5,51 W/K'dir.

- Isıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşeme yüzeyleri

Çizelge 4.53. Isıtılmayan hacim üzeri ıslak taban yüzey özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,17			
1.1.	Kristal yapılı püskürük ve metamorfik taşlar (granit, bazalt, mermer, seramik kaplamalar)	0,01	0,13	0,077			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,02	0,206	0,097			
10.3.3.1.	Poliüretan sert köpük levhalar (PUR)	0,06	0,033	1,818			

5.1.	Normal beton (TS 500'e uygun), doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,2	0,055			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03			
	$R_{dış}$			0,17			
			TOPLAM	**2,417**	**0,207**	**28,73**	**5,95**

TS 825 standardı gereği doğrudan dış hava ile temas etmeyen yüzeyler için U değeri 0,5 katsayısı ile çarpılır. Mevcut yapı yatay kabuk ısıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşemesi yüzeyleri U değeri 0,207 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 5,95 W/K'dir.

- Isıtılmayan hacim üzeri normal taban döşeme yüzeyleri

Çizelge 4.54. Isıtılmayan hacim üzeri normal taban yüzey özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,17			
8.1.1.	İğne yapraklı ağaçlardan elde edilmiş döşeme kaplaması	0,02	0,13	0,154			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,02	0,206	0,097			
10.3.3.1.	Poliüretan sert köpük levhalar (PUR)	0,06	0,033	1,818			
5.1.	Normal beton (TS 500'e uygun), doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,2	0,055			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03			
	$R_{dış}$			0,17			
			TOPLAM	**2,494**	**0,201**	**170,42**	**34,25**

TS 825 standardı gereği doğrudan dış hava ile temas etmeyen yüzeyler için U değeri 0,5 katsayısı ile çarpılır. Mevcut yapı yatay kabuk ısıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşemesi yüzeyleri U değeri 0,201 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 34,25 W/K'dir.

➢ Isıtılan hacim üzeri tavan döşeme yüzeyleri

Çizelge 4.55. Isıtılan hacim üzeri tavan yüzeyi özgül ısı kaybı

TS 825 kodu	Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
	$R_{iç}$			0,13			
4.1.	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,03	1,00	0,03			
5.1.	Normal beton (TS 500'e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (donatılı)	0,12	2,2	0,055			
10.3.3.1.	Poliüretan sert köpük levhalar (PUR)	0,12	0,03	3,636			
4.9.	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç ve tabakaları	0,04	0,206	0,194			
9.2.1.	Mastik asfalt kaplama > 7 mm	0,002	0,70	0,003			
4.6.	Çimento harçlı şap	0,04	1,40	0,029			
	$R_{dış}$			0,08			
			TOPLAM	**4,157**	**0,193**	**229,45**	**44,28**

TS 825 standardı gereği doğrudan dış hava ile temas etmeyen yüzeyler için U değeri 0,8 katsayısı ile çarpılır. Mevcut yapı yatay kabuk ısıtılmayan hacim üzeri ıslak taban döşemesi yüzeyleri U değeri 0,193 W/m².K bulunmuştur. Yüzeylerden gerçekleşen özgül ısı kaybı toplamı 44,28 W/K'dir.

➢ Dış ortama ve düşük sıcaklıklı iç ortama açık saydam yüzeyler

Çizelge 4.56. Dış ortama ve düşük sıcaklıklı iç ortama açık saydam yüzeyler özgül ısı kaybı

Yüzey katmanları	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**	Isı kaybeden yüzey alanı **A (m²)**	Yüzey ısı kaybı **AxU (W/K)**
P1 200x160 (6 adet)						
P2 160x160 (12 adet)						
P3 80x160 (12 adet)						
P4 60x60 (6 adet)						
P5 100x160 (12 adet)						
K4 80x250 (12 adet) (Balkon kapıları da pencereler gibi kabul edilmiştir. U değeri proje verisidir.)						
			TOPLAM	**2,20**	**110,64**	**243,41**

K1 200x220 (2 adet) (Düşük sıcaklık iç ortama açılan daire giriş kapıları-U değeri 2,20x0,5=1,10 olur.)				
	TOPLAM	**1,10**	**8,8**	**4,84**

- **Havalandırma yoluyla gerçekleşen özgül ısı kaybı (H_V)**

Mevcut yapıda havalandırma yoluyla gerçekleşen özgül ısı kayıpları (H_v) tespiti için TS 825 standardında tanımlanmış olan metodoloji kullanılmıştır. Çizelge 4.57'de havalandırma yoluyla gerçekleşen özgül ısı kaybı hesabı ifade edilmiştir.

Çizelge 4.57. Havalandırma yoluyla gerçekleşen özgül ısı kaybı

H_v=	**352,47 W/K**
Hesaplama açılımı ve değerler	$\rho.c.V' = \rho.c.n_h.V_h$
	ρ (havanın yoğunluğu) = 1,184 kg/m³
	c (havanın özgül ısısı) = 1006 J/kg.K
	V^l (hacimce değişim oranı) = hava değişim oranı (n_h) ve havalandırılmış hacim (V_h) değerlerine bağlıdır. n_h= 0,7 (saat^{-1}) V_h= 0,7x$V_{brüt}$ (m³)
	0,33 x 0,7 x 1525,85

- **Özgül ısı kaybı toplamı ($H=H_T+H_V$)**

Çizelge 4.58. MY özgül ısı kaybı toplamı (H)

H_T=	**577,42 W/K**
H_V=	**352,47 W/K**
H=	**929,89 W/K**

- **Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı**

TS 825 metodolojisine uygun olarak her ay için ısıtma enerji ihtiyacı tespit edilerek yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı bulunmuştur. Gerçekleştirilmiş olan hesaplama Çizelge 4.59'da ifade edilmiştir.

Çizelge 4.59. Mevcut yapı yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

Aylar	Isı Kayıpları: Özgül Isı Kaybı **H (W/K)**	Isı Kayıpları: Sıcaklık Farkı **T_i-T_d (K, °C)** $T_{iç}$	$T_{dış}$	$T_{iç}$-$T_{dış}$	Isı Kayıpları **H . ($T_{iç}$-$T_{dış}$) (W)**	Isı Kazançları: İç Isı Kazançları **ϕ_i (W)**	Güneş Enerjisi Kazançları **ϕ_s (W)**	Toplam Isı Kazançları **$\phi_T = \phi_i+\phi_s$ (W)**	KKO (kazanç kayıp oranı) **($\phi_i+\phi_s$) / H.(T_i-T_d)** KKO ≥2,5 olduğunda ısı kaybı yoktur.	Kazanç Kullanım Faktörü **$\eta=1-e^{-1/KKO}$**	Isıtma Enerjisi Miktarı **Q_{ay}, (kJ)**
Ocak	929,89	19	-0,3	19,3	17947	3488	1860,1	5348,1	0,3	0,96	33210740
Şubat		19	0,1	18,9	17575		2356,6	5844,6	0,33	0,95	31162558
Mart		19	4,1	14,9	13855		2856,6	6344,6	0,46	0,89	21275883
Nisan		19	10,1	8,9	8276		3278,4	6766,4	0,82	0,7	9174508
Mayıs		19	14,4	4,6	4277		3759,4	7247,4	1,69	0,45	2632570
Haziran		19	18,5	0,5	465		3945,6	7433,6	15,99	-	-
Temmuz		19	21,7	-2,7	-		-	-	-	-	-
Ağustos		19	21,2	-2,2	-		-	-	-	-	-
Eylül		19	17,2	1,8	1674		3014,7	6502,7	3,88	-	-
Ekim		19	11,6	7,4	6881		2403,9	5891,9	0,86	0,69	7298060
Kasım		19	5,6	13,4	12461		1793,6	5281,6	0,42	0,91	19841191
Aralık		19	1,3	17,7	16459		1621,7	5109,7	0,31	0,96	29947209

Q_{ay}= [H. ($T_{iç}$-$T_{dış}$)-η. (ϕ_i+ϕ_s)] $_{ay}$. t (J) (1 kJ = 0,278 x 10^{-3} kWh) **$Q_{yıl}$ = ∑Q_{ay}=** 154542720 kJ

Mevcut yapının yıllık olarak ısıtma enerjisi amaçlı kullanması gereken en az enerji miktarı 154542720 kJ olarak bulunmuştur. Isıtma amaçlı gerekli olan söz konusu değer birim çevirmesi yapıldığında yaklaşık olarak 42963 kWh (~42962,87626) etmektedir. Birim hacim başına düşen yıllık ısıtma enerjisi miktarı ($Q_{yıl}/V_{brüt}$) 19,71 kWh/m^3.yıl olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sadece ısıtma enerji kullanımını kapsayan, ısıtılan brüt döşeme alanları başına düşen ($Q_{yıl}/A_{DöşemeBrüt}$) enerji kullanım yoğunluğu (EUI-energy use intensity) 62,42 kWh/m^2.yıl olarak bulunmuştur.

- **MY yıllık kullanım karbonu tespiti**

Mevcut yapıda en az konfor koşullarının sağlanabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan enerji miktarı 154542720 kJ eşittir. Kullanım karbonu değerinin hesaplanabilmesi için söz konusu değerin birim dönüşümü yapılmıştır (Çizelge 4.60)

Çizelge 4.60. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı birim dönüşümü

Isıtma enerjisi TJ (terajoule) karşılığı	0,155 TJ (1 kJ = 10^{-9} TJ) (0,154542 TJ ~ 0,155 TJ olarak alınmıştır.)
Isıtma enerjisi GJ (gigajoule) karşılığı	154,54 GJ (1 kJ = 10^{-6} GJ) (154,542 GJ ~ 154,54 GJ olarak alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre mevcut yapı için yıllık ısıtma amacıyla ihtiyaç duyulan doğalgaz miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.61).

Çizelge 4.61. Yıllık ısıtma enerjisi için gerekli doğalgaz miktarı

IPCC veri tabanı	3,22 ton (3,21875 ~ 3,22 ton alınmıştır.)
DEFRA veri tabanı	3,40 ton (3,39505 ~ 3,40 ton alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre mevcut yapıda yıllık ısıtma amacıyla kullanılan doğalgaz kaynaklı kullanım karbonu değerleri $tCO_2eq.$ olarak bulunmuştur. Söz konusu değerlerin ortalaması alınarak, mevcut yapı kullanım karbonu kaynaklı sera etkisi oluşturan $CO_2eq.$ gazlar miktarı bulunmuştur. (Çizelge 4.62).

Çizelge 4.62. Yıllık ısıtma enerjisi kullanım karbonu miktarları

	CO_2	**CH_4**	**N_2O**
IPCC veri tabanı	8667,45	16,22	4,79
Toplam	8,69 $tCO_2eq.$ (8688,46 $kgCO_2eq.$ ~ 8,69 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
DEFRA veri tabanı	8682,94	13,07	4,04
Toplam	8,70 $tCO_2eq.$ (8700,05 $kgCO_2eq.$ ~ 8,70 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
MY Kullanım Karbonu Ortalama Değeri	**8,695 $tCO_2eq.$**		

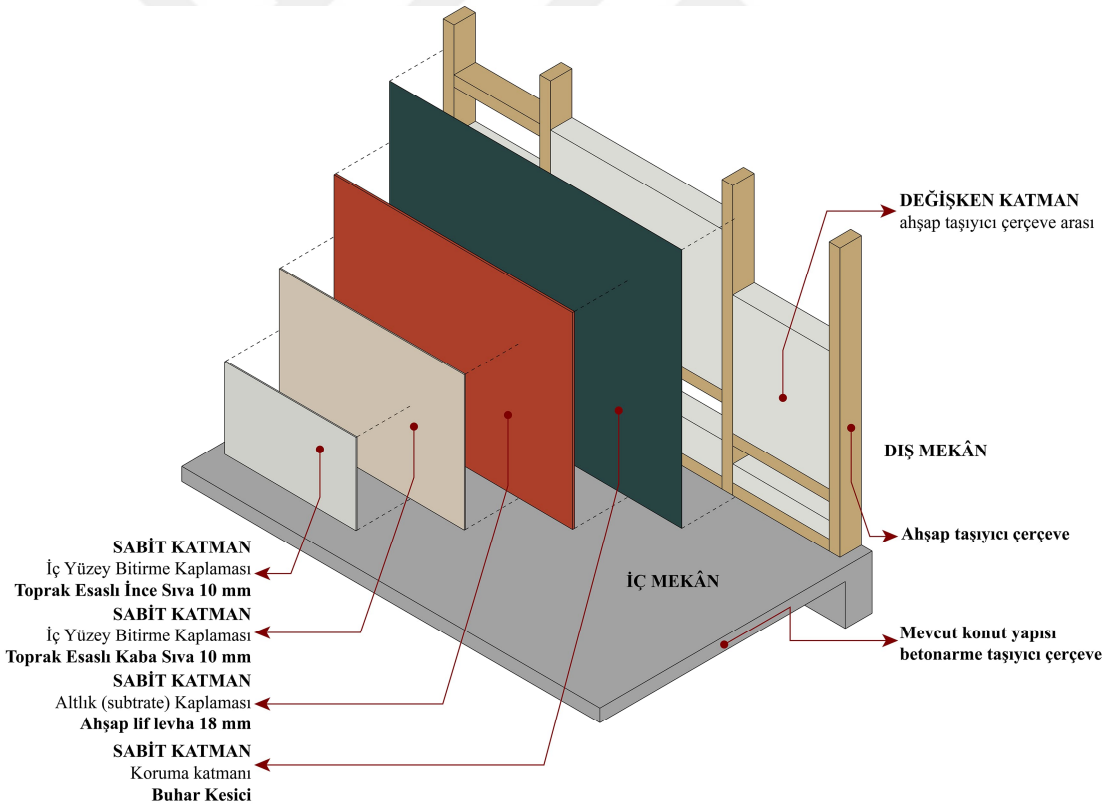
Isıtma amacıyla mevcut yapıda bir yıllık kullanılan doğalgaz miktarına bağlı olarak 8,695 $tCO_2eq.$ gaz sera etkisi oluşturan emisyon gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sadece yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybını telafi etmek için gerekli olan en az enerji kullanımıyla oluşan $CO_2eq.$ gaz emisyonları miktarı olan söz konusu değer, mevcut yapı kullanım karbonu değeri karşılığı olmuştur.

4.2. Öneri Kabuk Modelleri

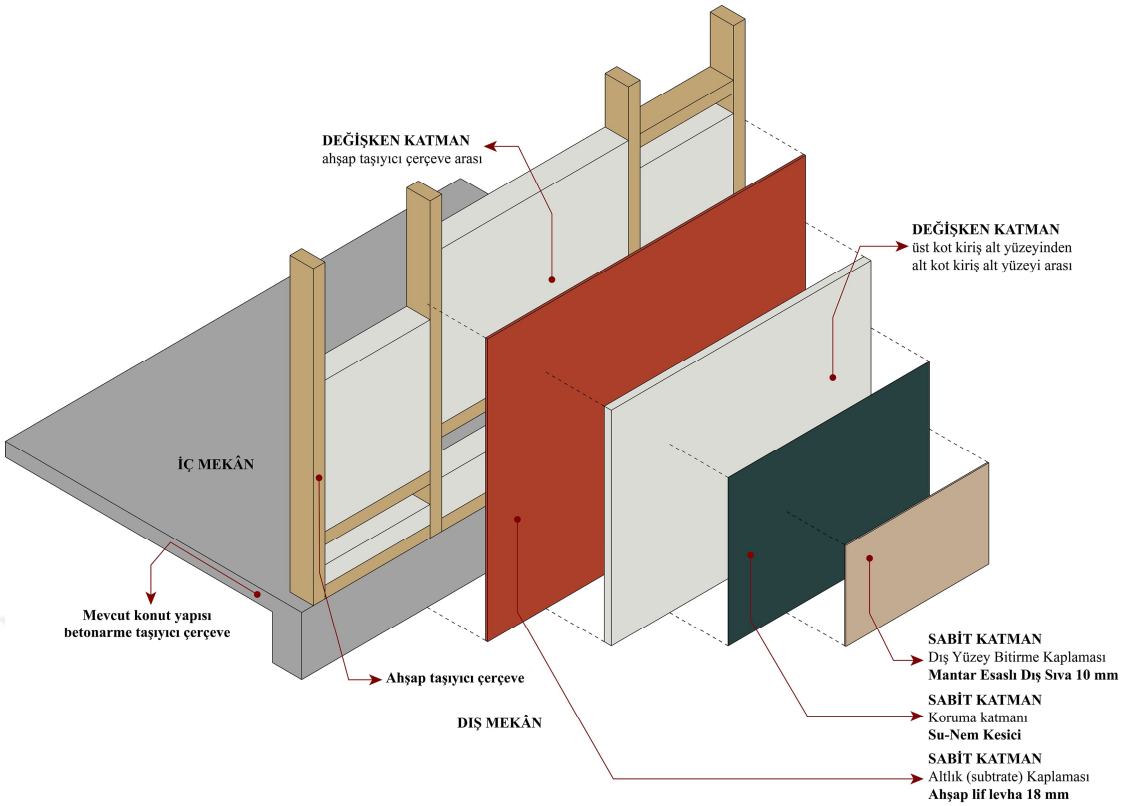
Doktora tezi ana araştırma problemine çözüm önerisi olarak getirilen öneri kabuk modelleri, Bölüm 3.2.3'te ifade edildiği üzere, ahşap taşıyıcı çerçeve üzerine biyolojik esaslı yapı malzemeleri kullanılarak elde edilmiştir. Prefabrik tasarlanmış olan öneri kabuk modelleri, sabit ve değişken olmak üzere iki farklı katmanlaşma yaklaşımıyla ele alınmıştır. Aşağıda, değişken olan katmanlarına göre adlandırılan öneri kabuk modelleri analizlerine geçilmeden önce her bir modelde yer alan sabit ve değişken katmanlar ve özellikleri ifade edilmiştir.

- Öneri kabuk modelleri sabit katmanlar

Öneri kabuk modelleri iç mekân yüzeylerinde yer alan sabit katmanlar ve nitelikleri Şekil 4.34'te belirtilmiştir. Benzer şekilde 4.35'te dış mekânda yer alan sabit katmanlar ve nitelikleri ifade edilmiştir.



Şekil 4.34. Öneri kabuk modelleri iç mekân yüzeyleri sabit katmanlar



Şekil 4.35. Öneri kabuk modelleri dış mekân yüzeyleri sabit katmanlar

Sabit katmanlar, öneri kabuk modellerinin hem gömülü hem de kullanım karbonu değerleri hesaplamalarında kullanılmıştır. Sabit katmanlar için tespit olan çevresel ürün beyanlarından (EPD) elde edilen küresel ısınma potansiyeli (GWP) değeri Çizelge 4.63'te belirtilmiştir. Gömülü karbon değeri hesabında, kalınlığı olmayan "Buhar Kesici" ve "Su-Nem Kesici" katmanları birim m² olarak hesaplanırken, diğer sabit katman malzemeleri ise kalınlıklarına bakılmaksızın birim m³ miktarından bulunmuştur. Sabit katman malzemeleri için hesaplamaya alınan GWP değeri, söz konusu malzemelerin tez eki Ek-1'de yer alan EPD beyanları ve üretici firma teknik detay föylerinden sağlanmıştır.

Çizelge 4.63. Öneri kabuk modelleri sabit katmanları için GWP değeri

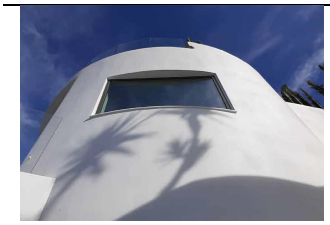
Katman Yapı Malzemesi	**EPD Kayıt Numarası**	**EPD Geçerlilik Tarihi**	**Tanımlanan Birim**	**A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)**
Toprak esaslı ince sıva	S-P-02278	2025	1 m³	86,106
EPD açıklaması	1 m³ malzeme 1270 kg. gelmektedir. 1 kg. malzeme için GWP değeri 0,0678 $kgCO_2eq$'dir. 1270 kg. malzeme için 0,0678x1270=86,106 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 86,100 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmektedir.			
Toprak esaslı kaba sıva	S-P-02278	2025	1 m³	74,342
EPD açıklaması	1 m³ malzeme 1536 kg. gelmektedir. 1 kg. malzeme için GWP değeri 0,0484 $kgCO_2eq$'dir. 1536 kg. malzeme için 0,0484x1536=74,342 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 74,342 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmektedir.			

Ahşap lif levha		S-P-01912	2025	1 m³	-751
	EPD açıklaması	1 m³ malzeme için GWP değeri -751 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme kullanımında -751 $kgCO_2eq$ gazlar yapı bünyesinde hapsedilmiş olmaktadır.			
Mantar esaslı dış sıva		S-P-03516	2026	1 kg.	223,75
	EPD açıklaması	1 m³ malzeme 250 kg. gelmektedir. 1 kg. malzeme için GWP değeri 0,895 $kgCO_2eq$'dir. 250 kg. malzeme için 0,895x250=86,106 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 223,75 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmektedir.			
Buhar kesici		20220295-CBA	2027	1 m²	0,609
	EPD açıklaması	1 m² malzeme için GWP değeri 0,609 $kgCO_2eq$'dir. 1 m² malzeme kullanımında 0,609 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmektedir.			
Su-nem kesici		3667-2612-EN	2026	1 m²	0,737
	EPD açıklaması	1 m² malzeme için GWP değeri 0,737 $kgCO_2eq$'dir. 1 m² malzeme kullanımında 0,737 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmektedir.			

GWP değerlerinin tespitine benzer şekilde, öneri kabuk modeli sabit katmanları termofiziksel özellikleri de EPD belgeleri ve üretici firma teknik detay föylerinden temin edilmiştir (Çizelge 4.64-4.65). İhtiyaç duyulan termofiziksel özelliklerin ifade edilen kaynaklarda sağlanamaması durumunda ise TS 825 standardı Ek-E'ye başvurulmuştur.

Çizelge 4.64. Kalınlığı olan sabit katmanları termofiziksel özellikler

Katman Yapı Malzemeleri	Kalınlık (m.)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	Su Buharı Difüzyon Direnç faktörü μ
 (URL-1, 2023) Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	1270	1,28
 (URL-2, 2023) Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	1536	1,40
 (URL-3, 2023) Ahşap lif levha	0,018	0,15	700	70

 (URL-4, 2023) Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	250	3

Çizelge 4.65. Kalınlığı olmayan sabit katmanları termofiziksel özellikler

Katman Yapı Malzemeleri	Kalınlık (m.)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)	Birim Yüzey Ağırlığı (kg/m²)	Buhar Difüzyonu Eşdeğer Hava Tabakası Kalınlığı S_d
 (URL-5, 2023) Buhar kesici	-	-	0,149	2000
 (URL-6, 2023) Su-nem kesici	-	-	0,195	0,035

➢ Öneri kabuk modelleri değişken katmanlar

Öneri kabuk modellerinde değişken katman yaklaşımı, farklı biyolojik esaslı yapı malzemelerinin kullanımı ve birbiriyle kıyaslanabilirliği üzerine inşa edilmiştir. Değişken katman kalınlıkları, öneri kabuk modellerinin ısıl geçirgenlik katsayılarına (U değeri) bağlı olarak farklılaşmıştır. En çok %1 farklı U değerine sahip olacak şekilde tasarlanmış olan öneri kabuk modellerinde değişken katmanlar beş farklı biyolojik esaslı yapı malzemesinden elde edilmiştir. Öneri kabuk modellerinin kategorizasyonu da sağlayan söz konusu bu beş farklı biyolojik esaslı yapı malzemeleri; saman, kenevir, koyun yünü, ahşap ve mantar hammaddelerinin endüstriyel prosesleri sonucunda elde edilmektedir. Öneri kabuk modellerinin oluşum ve şekillenmesinde en önemli bileşen olan bu malzemeler, endüstriyel bir ürün halinde aktif olarak yapı sektöründe kullanılmaktadır.

Biyolojik esaslı yapı malzemelerinden elde edilen bu beş farkı değişken katmana bağlı olarak ahşap taşıyıcı çerçevenin de kalınlığı değişmektedir. Bu nedenle, ahşap taşıyıcı çerçeveyi oluşturan endüstriyel ahşap ürünü olan Glulam malzeme de değişken katmanlarla birlikte irdelenmiştir. Bununla birlikte, değişken ve sabit katmanlar arasında kalan ahşap taşıyıcı çerçeve, ısıl geçirgenlik katsayısı tespitinde yer almamış, sadece gömülü karbon değeri olarak hesaplamasında dahil edilmiştir.

Değişken katmanlar, öneri kabuk modellerinin hem gömülü hem de kullanım karbonu değerleri hesaplamalarında kullanılmıştır. Değişken katmanlar için tespit olan çevresel ürün beyanlarından (EPD) elde edilen küresel ısınma potansiyeli (GWP) değeri Çizelge 4.66'da belirtilmiştir. Gömülü karbon değeri hesabında, değişken katman malzemeleri kalınlıklarına bakılmaksızın birim m³ miktarından bulunmuştur. Değişken katman malzemeleri için hesaplamaya alınan GWP değeri, söz konusu malzemelerin tez eki Ek-1'de yer alan EPD beyanları ve üretici firma teknik detay föylerinden sağlanmıştır.

Çizelge 4.66. Öneri kabuk modelleri değişken katmanları için GWP değeri

Katman Yapı Malzemesi	**EPD Kayıt Numarası**	**EPD Geçerlilik Tarihi**	**Tanımlanan Birim**	**A1-A3 Modülü GWP Değeri ($kgCO_2eq$)**
Saman yalıtım levhası	21-0123-002-00.00-EN	2026	1 m³	-89,965
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri 4,3 cm kalınlıkta 1 m² malzeme için -3,8685 kgCO2eq. verilmiştir. 0,043 m³ malzeme için GWP değeri -3,8685 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme için -3,8685/0,043=-89,965 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında -89,965 $kgCO_2eq$ gazlar yapı bünyesinde hapsedilmiş olmaktadır.			
Kenevir lif yalıtım levhası	S-P-10546	2028	1 m³	-68,100
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri 10 cm kalınlıkta 1 m² malzeme için -6,810 kgCO2eq. verilmiştir. 0,10 m³ malzeme için GWP değeri -6,810 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme için -6,810/0,10=-68,100 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında -68,100 $kgCO_2eq$ gazlar yapı bünyesinde hapsedilmiş olmaktadır.			
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası	S-P-04468	2026	1 m³	1,317
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri Rsi=1 m².K/W değerindeki kalınlıkta 1 m² malzeme için verilmiştir. Dolayısıyla 1 m² malzeme 0,035 m kalınlıktadır. 0,035 m³ malzeme için GWP değeri 0,0461 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme için 0,0461/0,035=-1,317 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında 1,317 $kgCO_2eq$ emisyonu gerçekleşmektedir.			
Ahşap lif yalıtım levhası	20200175-IBA1-EN	2025	1 m³	-28,270
EPD açıklaması	1 m³ malzeme için GWP değeri -28,270 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme kullanımında -28,270 $kgCO_2eq$ gazlar yapı bünyesinde hapsedilmiş olmaktadır.			
Mantar yalıtım levhası	S-P-02315	2025	1 m³	-6,100
EPD açıklaması	Malzemeye ait A1-A3 modülü arası GWP değeri 10 cm kalınlıkta 1 m² malzeme için -6,100 kgCO2eq. verilmiştir. 0,10 m³ malzeme için GWP değeri -0,610 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme için -0,610/0,10=-6,100 $kgCO_2eq$. olur. 1 m³ malzeme kullanımında -6,100 $kgCO_2eq$ gazlar yapı bünyesinde hapsedilmiş olmaktadır.			
Ahşap taşıyıcı çerçeve	20210171-IBD1	2026	1 m³	-608,00
EPD açıklaması	1 m³ malzeme için GWP değeri -608,00 $kgCO_2eq$'dir. 1 m³ malzeme kullanımında -608,00 $kgCO_2eq$ gazlar yapı bünyesinde hapsedilmiş olmaktadır.			

GWP değerlerinin tespitine benzer şekilde, öneri kabuk modeli değişken katmanları termofiziksel özellikleri de EPD belgeleri ve üretici firma teknik detay föylerinden temin edilmiştir (Çizelge 4.67). İhtiyaç duyulan termofiziksel özelliklerin ifade edilen kaynaklarda sağlanamaması durumunda ise TS 825 standardı Ek-E'ye başvurulmuştur.

Çizelge 4.67. Değişken katmanları termofiziksel özellikler

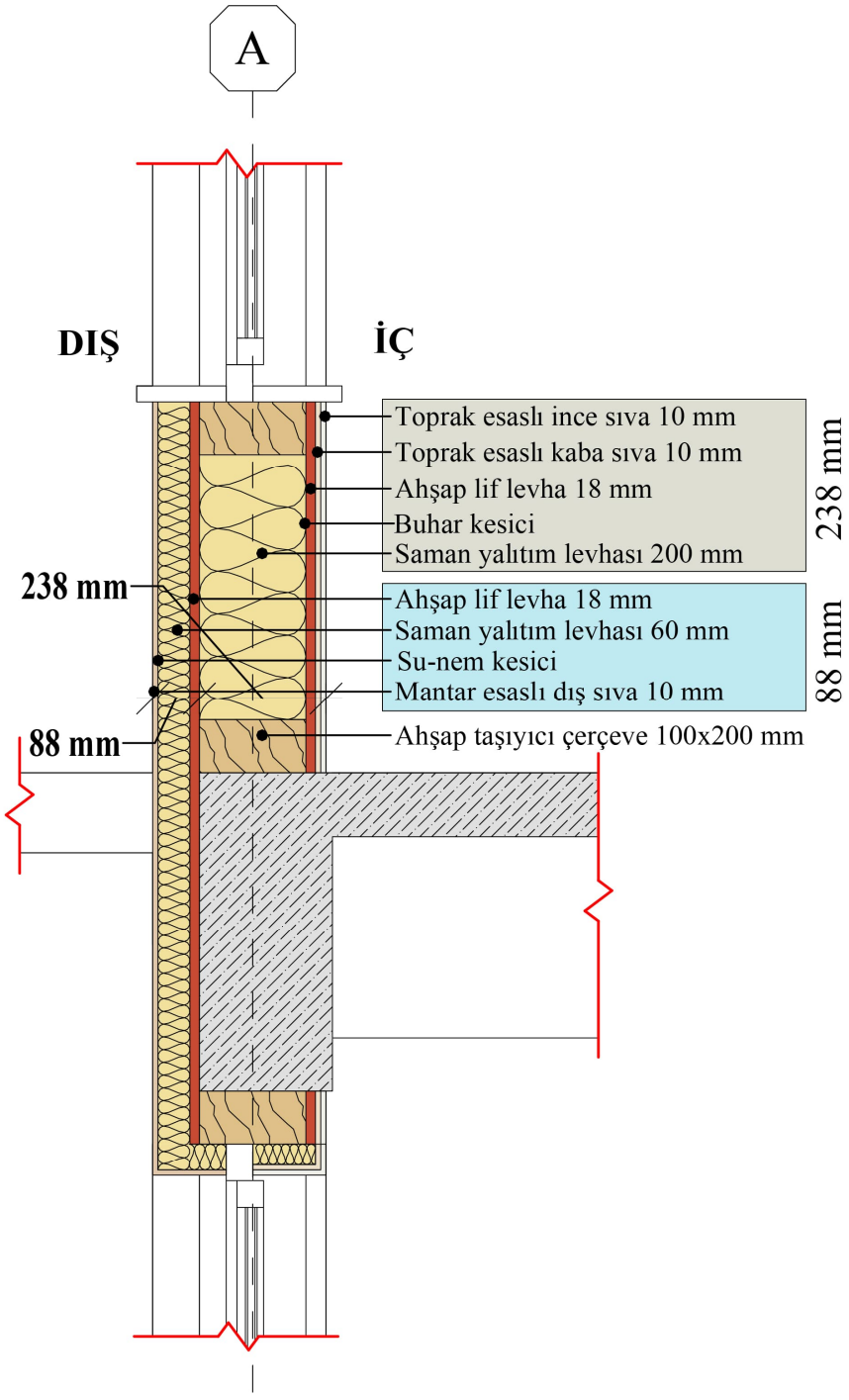
Katman Yapı Malzemeleri	Isıl İletkenlik Hesap Değeri λ (W/m.K)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	Su Buharı Difüzyon Direnç Faktörü μ
 (URL-7, 2023) Saman yalıtım levhası	0,043	140	5
 (URL-8, 2023) Kenevir lif yalıtım levhası	0,04	35	2,294
 (URL-9, 2023) Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası	0,035	31	9

 (URL-10, 2023) Ahşap lif yalıtım levhası	0,037	55	2
 (URL-11, 2023) Mantar yalıtım levhası	0,043	325	10
 (URL-12, 2023) Ahşap taşıyıcı çerçeve	0,12	470	50

Doktora tezi araştırma probleminin çözümüne yönelik geliştirilmiş olan öneri kabuk modeller, sabit ve değişken katmanlarda yer alan, yukarıda ifade edilmiş, yapı malzemeleri yardımıyla tasarlanmıştır. Bununla birlikte saydam bileşenleri Bölüm 1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımları başlığı altındaki kabullere göre öneri kabuk modellerin analizlerinde yer almıştır. Her bir öneri kabuk modeli için, yukarıda belirtilmiş olan yapı malzemeleri niteliklerine bağlı olarak, başta gömülü karbon analizi olmak üzere, kullanım karbonu analizi ve su buharının durumunu tespit edebilmek amacıyla yoğuşma analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. EnP-1 Saman esaslı öneri kabuk modeli

Saman yalıtım levhası kullanılan EnP-1 öneri kabuk modeli, değişken ve sabit katman kalınlıkları Şekil 4.36'da belirtilmiştir.



Şekil 4.36. EnP-1 öneri kabuk modeli kabuk katmanları

Toplam 326 mm kalınlık değerine sahip olan EnP-1 katmanı, mevcut yapı döşemesi üzerinde yer alan kısmı 238 mm iken dış yüzeydeki katmanlarının kalınlığı ise 88 mm olmuştur. Değişken olan saman yalıtım levha katmanlar, ahşap taşıyıcı sistem arası 200 mm ve dış yüzey yalıtım katmanı 60 mm olarak belirlenmiştir. Söz konusu bu kalınlıklar, saman yalıtım levha malzeme endüstriyel üreticisi tarafından bildirilen EPD verilerindeki ürün uygulama ölçüleri doğrultusunda kullanılmıştır.

Saman yalıtım levhası kullanılarak tasarlanmış olan EnP-1 öneri kabuk modeli için ısıl geçirgenlik katsayısı (U değeri) Çizelge 4.68'de ifade edilmiştir.

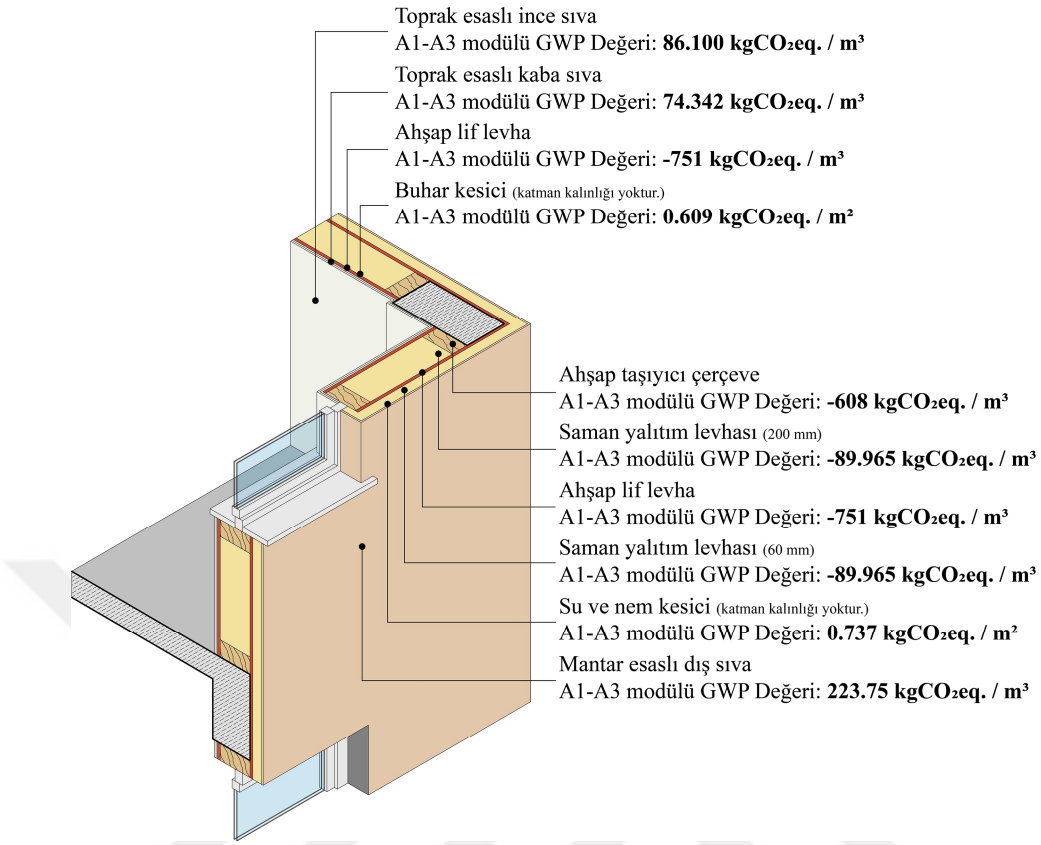
Çizelge 4.68. Saman esaslı öneri kabuk modeli EnP-1 U değeri

Katman Yapı Malzemeleri	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**
$R_{iç}$			0,13	
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Buhar kesici		-		
Ahşap taşıyıcı çerçeve sistem		-		
Saman yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,20	0,043	4,651	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Saman yalıtım levhası (dış yüzey)	0,06	0,043	1,395	
Su-nem kesici		-		
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,270	
$R_{dış}$			0,04	
		TOPLAM	**6,749**	**0,148**

0,148 W/m².K U değerine sahip EnP-1 modeli, doktora tez çalışması öneri kabuk modeli oluşumlarına ilişkin sınırlılık ve varsayımlar çerçevesinde belirlenmiş ilkelere uygunluğu tespit edilmiştir.

4.2.1.1. EnP-1 Gömülü karbon analizi

EnP-1 modeli için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan yapı malzemeleri, birim m³ ve m² niceliklerindeki GWP değerleri Şekil 4.37'de dijital model üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 4.37. EnP-1 öneri kabuk modeli katmanları GWP değerleri

Gömülü karbon değeri hesaplamak için EnP-1 öneri kabuk modeli, yapı bilgi modellemesi yazılımında dijital ikizi bulunan mevcut konut yapısına uygulanmıştır. EnP-1 gömülü karbon analiz sonuçları Çizelge 4.69 ve Çizelge 4.70 yer almaktadır.

Çizelge 4.69. EnP-1 öneri kabuk modeli opak bileşenler GKA

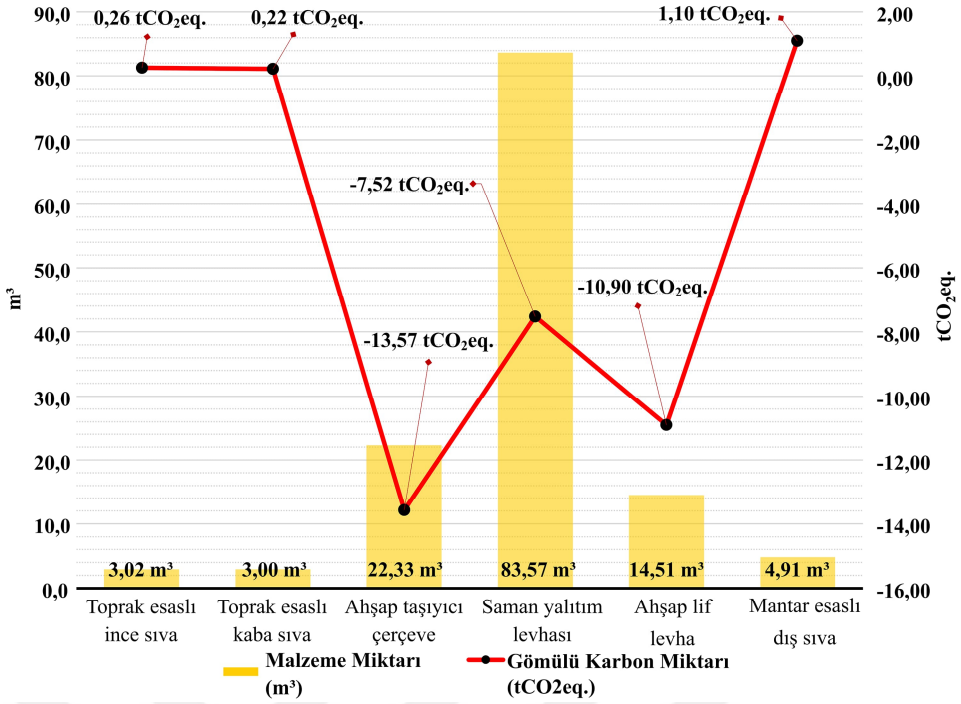
Katman Yapı Malzemeleri	**Malzeme Kalınlığı (mm)**	**Malzeme Miktarı (m³)**	**Malzeme Miktarı (m²)**	**Opak Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri (kgCO₂eq.)**
Toprak esaslı ince sıva	10	3,0243217	-	86,100	260,4122
Toprak esaslı kaba sıva	10	2,9983488	-	74,342	222,9032
Buhar kesici	-	-	569,7282	0,609	346,9645
Ahşap taşıyıcı çerçeve	200	22,3250	-	-608,00	-13573,60
Saman yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	200	53,5776564	-	-89,965	-4820,1139
Saman yalıtım levhası (dış yüzey)	60	29,9898200	-	-89,965	-2698,0342
Ahşap lif levha (toplam değer alınmıştır.)	18	14,5108517	-	-751,00	-10897,6496
Su-nem kesici	-	-	569,7282	0,737	419,8897
Mantar esaslı dış sıva	10	4,9073984	-	223,75	1098,0304
			EnP-1 GKA-Düşey Kabuk Opak Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri		**-29641,198**

Çizelge 4.70. EnP-1 öneri kabuk modeli saydam bileşenler GKA

Pencere Adı-Boyutları	Pencere Adet	Yüzey Alanı (m^2)	Saydam Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P1 200x160	6	19,20	22,065	423,648
P2 160x160	12	30,72	22,065	677,837
P3 80x160	14	17,92	22,065	395,405
P4 60x60	6	2,16	22,065	47,660
P5 100x160	12	19,20	22,065	423,648
EnP-1 GKA-Düşey Kabuk Saydam Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri				**1968,20**

Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşeni olarak uygulanmış EnP-1 öneri kabuk modeli opak bileşenleri, atmosfere herhangi bir emisyon yapmak yerine, 29641,198 kg. sera etkisine neden olan $CO_2eq.$ gazları bünyesinde sakladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte EnP-1 öneri kabuk modeli saydam bileşenleri için 1968,20 $kgCO_2eq.$ sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. EnP-1 öneri kabuk modeli söz konusu bileşenleriyle uygulandığında, mevcut yapının inşası sürecinde salınmış olan $CO_2eq.$ gazlardan 27673,00 kg. miktarının atmosferden geri toplanmasını sağlanmıştır. Bir başka ifadeyle, EnP-1 öneri kabuk modeli mevcut yapı toplam gömülü karbon değerini -27673,00 $kgCO_2eq.$ kadar azaltmıştır. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~-27,67 tCO2eq. olarak kabul edilmiştir.

Değişken katmanlarında saman yalıtım levhasının kullanıldığı EnP-1 öneri kabuk modeli mevcut yapı dış kabuğu olarak uygulandığında; 83,57 m^3 saman yalıtım levha malzemesi, 22,23 m^2 ahşap taşıyıcı çerçeve malzemesi olan glulam malzemesi, 14,51 m^3 ahşap lif levha, 4,91 m^3 mantar esaslı sıva malzemesi ve 6,02 m^3 toprak esaslı sıva malzemesi kullanmaktadır. Söz konusu bu değerlere bağlı olarak EnP-1 öneri kabuk modeli katmanlarının bünyelerinde depolanmış olan $CO_2eq.$ gazlar miktarı; ahşap taşıyıcı çerçeve malzeme için -13,57 $tCO_2eq.$, ahşap lif levha malzeme için -10,90 $tCO_2eq.$ ve saman yalıtım levha malzeme için -7,52 $tCO_2eq.$ olarak tespit edilmiştir. Ancak, toprak esaslı sıva malzemeler için 0,48 $tCO_2eq.$ ve mantar esaslı sıva malzemesi için 1,10 $tCO_2eq.$ olmak üzere toplam 1,58 $tCO_2eq.$ sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. Şekil 4.38'de EnP-1 katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin miktarları ile atmosferden toplanarak bünyelerinde saklanan ve atmosfere salınmış olan karbon değeri ifade edilmiştir.

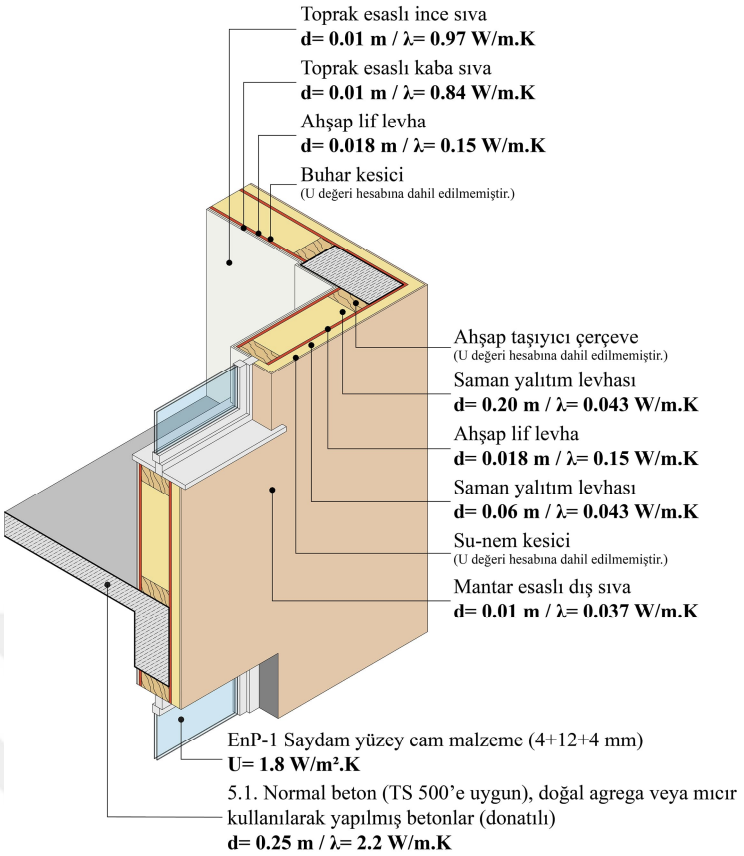


Şekil 4.38. EnP-1 öneri kabuk modeli opak yüzey gömülü karbon dağılımı

4.2.1.2. EnP-1 Kullanım karbon analizi

Saman esaslı öneri kabuk modeli olan EnP-1 uygulanmış mevcut yapı için kullanım karbon değeri, söz konusu kabuk modelin uygulandığı yapının dış ortama açık duvar ve betonarme yüzeylerinden gerçekleşen ısı kaybına bağlı olarak hesaplamıştır. Düşük sıcaklıklı iç ortama açık yüzeyler (kabuk modeli duvar ve betonarme) ve yatay kabuk bileşenleri hali hazır durumuyla korunmuştur. Dolayısıyla değinilen bu kabuk bileşenlerinin ısı kaybı mevcut yapı için gerçekleştirilmiş olan analizlerden temin edilmiştir. Ayrıca, EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı için ısı kaybeden yüzey alanları da değişmemiştir. Bu nedenle daha önce gerçekleştirilmiş analizlerden sağlanmıştır.

Bununla birlikte, EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış yapıda kullanılan saydam yüzeyler mevcut yapı hali hazırda var olan ölçü ve büyüklük değerlerine bağlı olarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Ancak saydam yüzeyler için, TS 825 (2013) standardı gereği, pencere ısıl geçirgenlik direnci olan U_P değeri 1,80 W/m².K kabul edilerek ısı kaybı tespit edilmiştir. EnP-1 öneri kabuk modeli termofiziksel özellikleri Şekil 4.39'da belirtilmiştir.



Şekil 4.39. EnP-1 düşey yapı kabuğu katmanları termofiziksel özellikleri

EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kayıp değerleri Çizelge 4.71'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.71. EnP-1 öneri kabuk modeli ısı kayıpları

Isı Kaybeden Yüzeyler	Isı Kayıp Miktarı (W/K)
Dış ortama açık EnP-1 kabuk modeli duvar yüzeyleri (U=0,148 W/m².K))	47,91
Dış ortama açık EnP-1 kabuk modeli betonarme yüzeyler (U=0,277 W/m².K)	66,78
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık dolgu duvar yüzeyleri (U=0,335x0,5 W/m².K)	14,63
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık betonarme yüzeyleri (U=0,445x0,5 W/m².K)	1,00
MY-Isıtılmayan taban üzeri düşük taban döşeme yüzeyleri (U=0,363x0,8 W/m².K)	8,79
MY-Isıtılmayan taban üzeri normal taban döşeme yüzeyleri (U=0,401x0,8 W/m².K)	34,25
MY-Isıtılmayan taban üzeri ıslak taban döşeme yüzeyleri (U=0,414x0,8 W/m².K)	5,95
MY- Isıtılan hacim üzeri tavan döşeme yüzeyleri (U=0,241x0,8 W/m².K)	44,28
EnP-1 kabuk modeli saydam yüzeyler (U=1,8 W/m².K)	207,07
TOPLAM	**430,66**

EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda, iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kayıpları toplamı 430,66 W/K olarak bulunmuştur. Söz konusu kayba ek olarak, mevcut yapı analizlerinde belirlenmiş olan 352,47 W/K havalandırma yoluyla gerçekleşen kayıpta eklenerek EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış yanının özgül ısı kaybı 783,13 W/K olarak bulunmuştur. Bu verilerle birlikte, EnP-1 modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık ısıtma enerji ihtiyacı Çizelge 4.72'de hesaplamıştır.

Çizelge 4.72. EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

	Isı Kayıpları					**Isı Kazançları**					
Aylar	Özgül Isı Kaybı **H (W/K)**	Sıcaklık Farkı **T_i-T_d (K, °C)**			Isı Kayıpları **H . ($T_{iç}$-$T_{dış}$) (W)**	İç Isı Kazançları **ϕ_i (W)**	Güneş Enerjisi Kazançları **ϕ_s (W)**	Toplam Isı Kazançları **$\phi_T = \phi_i+\phi_s$ (W)**	KKO (kazanç kayıp oranı) **(ϕ_i+ϕ_s)/ H.(T_i-T_d)** KKO ≥2,5 olduğunda ısı kaybı yoktur.	Kazanç Kullanım Faktörü **$\eta=1-e^{-1/KKO}$**	Isıtma Enerjisi Miktarı **Q_{ay}, (kJ)**
		$T_{iç}$	**$T_{dış}$**	**$T_{iç}$-$T_{dış}$**							
Ocak	783,13	19	-0,3	19,3	17947	3488	1860,1	5348,1	0,35	0,94	26144852
Şubat		19	0,1	18,9	17575		2356,6	5844,6	0,39	0,92	24426830
Mart		19	4,1	14,9	13855		2856,6	6344,6	0,54	0,84	16432034
Nisan		19	10,1	8,9	8276		3278,4	6766,4	0,97	0,64	6841661
Mayıs		19	14,4	4,6	4277		3759,4	7247,4	2,01	0,39	2010092
Haziran		19	18,5	0,5	465		3945,6	7433,6	18,96	-	-
Temmuz		19	21,7	-2,7	-		-	-	-	-	-
Ağustos		19	21,2	-2,2	-		-	-	-	-	-
Eylül		19	17,2	1,8	1674		3014,7	6502,7	4,61	-	-
Ekim		19	11,6	7,4	6881		2403,9	5891,9	1,02	0,62	5552169
Kasım		19	5,6	13,4	12461		1793,6	5281,6	0,5	0,86	15427217
Aralık		19	1,3	17,7	16459		1621,7	5109,7	0,37	0,93	23610522

Q_{ay}= [H. ($T_{iç}$-$T_{dış}$)-η. (ϕ_i+ϕ_s)] $_{ay}$. t (J) (1 kJ = 0,278 x 10^{-3} kWh) **$Q_{yıl} = \sum Q_{ay}$=** 120445376 kJ

EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık olarak ısıtma enerjisi amaçlı kullanması gereken en az enerji miktarı 120445376 kJ olarak bulunmuştur. Isıtma amaçlı gerekli olan söz konusu değer birim çevirmesi yapıldığında yaklaşık olarak 33484 kWh (~33483,81449) etmektedir. Birim hacim başına düşen yıllık ısıtma enerjisi miktarı ($Q_{yıl}/V_{brüt}$) 15,36 kWh/m^3.yıl olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sadece ısıtma enerji kullanımını kapsayan, ısıtılan brüt döşeme alanları başına düşen ($Q_{yıl}/A_{DöşemeBrüt}$)

enerji kullanım yoğunluğu (EUI-energy use intensity) 48,64 kWh/m^2.yıl olarak bulunmuştur.

EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda en az konfor koşullarının sağlanabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan enerji miktarı 120445376 kJ eşittir. Kullanım karbonu değerinin hesaplanabilmesi için söz konusu değerin birim dönüşümü yapılmıştır (Çizelge 4.73).

Çizelge 4.73. EnP-1 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı birim dönüşümü

Isıtma enerjisi TJ (terajoule) karşılığı	0,120 TJ (1 kJ = 10^{-9} TJ) (0,120445 TJ ~ 0,120 TJ olarak alınmıştır.)
Isıtma enerjisi GJ (gigajoule) karşılığı	120,45 GJ (1 kJ = 10^{-6} GJ) (120,445 GJ ~ 120,45 GJ olarak alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre mevcut yapı için yıllık ısıtma amacıyla ihtiyaç duyulan doğalgaz miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.74).

Çizelge 4.74. EnP-1 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi için gerekli doğalgaz miktarı

IPCC veri tabanı	2,51 ton (2,50833 ~ 2,51 ton alınmıştır.)
DEFRA veri tabanı	2,65 ton (2,64598 ~ 2,65 ton alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda yıllık ısıtma amacıyla kullanılan doğalgaz kaynaklı kullanım karbonu değerleri $tCO_2eq.$ olarak bulunmuştur. Söz konusu değerlerin ortalaması alınarak, EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu kaynaklı sera etkisi oluşturan $CO_2eq.$ gazlar miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.75).

Çizelge 4.75. EnP-1 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi kullanım karbonu miktarları

	CO_2	**CH_4**	**N_2O**
IPCC veri tabanı	6754,44	12,642	3,732
Toplam	6,77 $tCO_2eq.$ (6770,81 $kgCO_2eq.$ ~ 6,77 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
DEFRA veri tabanı	6767,20	10,19	3,15
Toplam	6,78 $tCO_2eq.$ (6780,53 $kgCO_2eq.$ ~ 6,78 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
EnP-1 Kullanım Karbonu Ortalama Değeri	**6,775 $tCO_2eq.$**		

Isıtma amacıyla EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda bir yıllık kullanılan doğalgaz miktarına bağlı olarak 6,775 tCO_2eq. gaz sera etkisi oluşturan emisyon gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sadece yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybını telafi etmek için gerekli olan en az enerji kullanımıyla oluşan CO_2eq. gazlar emisyon miktarı olan söz konusu değer, EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri karşılığı olmuştur.

4.2.1.3. EnP-1 Yoğuşma analizi

EnP-1 öneri kabuk modeli katmanlarında su buharı kaynaklı olumsuz bir etkinin gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit edilmesi amacıyla yoğuşma analizi gerçekleştirilmiştir. Buhar molekülleri de ısı akımı gibi davranmaktadır. Buna bağlı olarak iç ve dış sıcaklık farkının en fazla olduğu, en kötü durumda kabul edilen en soğuk ayda, yoğuşma olmaması halinde diğer aylarda da yoğuşma olmaz. Dolayısıyla her ay için yapılan yoğuşma analizi, çalışma kapsamında, en kötü durum olarak ifade edilen en soğuk ay için gerçekleştirilmiştir.

Yoğuşma analizi, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı içerisinde tariflendiği şekilde yapılmıştır. Çizelge 4.76'da yoğuşma analizi için gerekli olan iç (t_i) ve dış (t_d) sıcaklık dereceleri, iç (ψ_i) ve dış (ψ_d) bağıl nem değerleri ve iç (R_i) ve dış (R_d) yüzeysel ısıl iletim dirençleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.76. EnP-1 yoğuşma analizi hesaplama verileri

İç sıcaklık derecesi-t_i (°C) (konut yapılarında 19°'dir. Yoğuşma hesabında +1 fazlası alınır.)	20
Dış sıcaklık derecesi -t_d (°C) (TS 825 Ek-B.2 Ocak ayı ortalama dış sıcaklık derecesi)	-0,3
İç ortamın bağıl nemi-ψ_i (TS 825 doğal havalandırma yapılan binalar)	%65
Dış ortamın bağıl nemi-ψ_d (TS 825 Ek-G Konya ili Ocak ayı ortalama bağıl nemi)	%76
İç yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,25
Dış yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,04

Yoğuşma analizi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adım, EnP-1 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve her bir katmanının iki yüzü arasındaki sıcaklık değerleri

tespit edilmiştir. İkinci adımda, iç ve dış ortamında bağıl nem değerlerine bağlı olarak doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı hesaplanmıştır. İkinci adımda gerçekleştirilmiş hesaplamalar için veriler, 30,9°C ile -20,9°C arasındaki sıcaklıklardaki doymuş buhar basıncı (P_s) değerlerini gösteren TS 825 standardı Çizelge F.1'den temin edilmiştir. Yapı kabuklarında yoğuşma olup olmadığı, grafik haline getirilen kabuk kesiti üzerinde doymuş ve gerçek buhar basıncı eğrilerinin kesişip kesişmediğine göre karar verilmektedir. Dolayısıyla üçüncü adımda da elde edilen bütün veriler, grafik haline getirilmiş (Glaser grafik metodu) olan EnP-1 öneri kabuk modeli kesiti üzerine işlenmiş ve yoğuşma kontrolü yapılmıştır.

EnP-1 öneri kabuk modeli katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabası kalınlık değerleri (S_d) Çizelge 4.77'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.77. EnP-1 öneri kabuk modeli katmanları fiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**d** (m)	**λ** (W/m.K)	**d/λ** m².K/W	**μ**	**S_d** (μ.d)
R_i			0,25		-
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	1,28	0,0128
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	1,40	0,014
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Buhar kesici	-	-	-	-	2000
Saman yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,20	0,043	4,651	5	1
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Saman yalıtım levhası (dış yüzey)	0,06	0,043	1,395	5	0,30
Su-nem kesici	-	-	-	-	0,035
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,27	3	0,03
R_d			0,04		
		TOPLAM	**6,8690**		**2003,9118**

EnP-1 öneri kabuk modeli için ısı akış yoğunluğu ve katmanları arası sıcaklık farklı Çizelge 4.78'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.78. EnP-1 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve katmanlar arası sıcaklık farkı

$Q=U.(t_i-t_d)$	0,14558 x [20-(-0,3)] 2,95531 W/m²	
δt_{iy} =	2,95531 x 0,25 =	0,738827
δt_1 =	2,95531 x 0,012 =	0,035182
δt_2 =	2,95531 x 0,01 =	0,030467
δt_3 =	2,95531 x 0,12 =	0,354637
δt_4 =	2,95531 x 4,167 =	13,745620
δt_5 =	2,95531 x 0,12 =	0,354637

δt_6 =		2,95531 x 1,940 =	4,123686
δt_7 =		2,95531 x 0,27 =	0,798732
δt_{dy} =		2,95531 x 0,04 =	0,118212
t_{iy}=	t_i-δt_{iy}	20-0,738397=	**19,261173°C**
t_1=	t_{iy}-δt_1	19,261173-0,035182=	**19,225991°C**
t_2=	t_1-δt_2	19,225991-0,030467=	**19,195524°C**
t_3=	t_2-δt_3	19,195524-0,354637=	**18,840887°C**
t_4=	t_3-δt_4	18,840887-13,745620=	**5,095267°C**
t_5=	t_4-δt_5	5,095267-0,354637=	**4,740630°C**
t_6=	t_5-δt_6	4,740630-4,123686=	**0,616944°C**
t_{dy}=	t_6-δt_7	0,616944-0,798732=	**-0,181788°C**
t_d=	t_7-δt_{dy}	-0,181788-0,118212	**-0,300000°C**

Isı akış yoğunluğu tespit edilen EnP-1 öneri kabuk modeli katmanları için buhar basınç dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplamanın gerçekleşebilmesi amacıyla P_i (t_i sıcaklığına bağlı iç ortam buhar basıncı) ve P_d (t_d sıcaklığına bağlı dış ortam buhar basıncı) değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir (Çizelge 4.79).

Çizelge 4.79. EnP-1 öneri kabuk modeli iç ve dış yüzey gerçek buhar basınç değerleri

P_i	Ps_i x Ψ_i (Ps_i değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	2337x0,65=**1519,05** Pa
P_d	Ps_d x Ψ_d (Ps_d değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	401x0,76=**304,76** Pa

Bağıl nem ve sıcaklık farkından kaynaklanan buhar basıncı değişimleri, EnP-1 öneri kabuk modeli her bir katmanı hesaplanmış ve Çizelge 4.80'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.80. EnP-1 öneri kabuk modeli katmanlar arası gerçek buhar basıncı değişimi ve tespiti

δp_1	$[(P_i-P_d)x(\mu_1.d_1)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,0128)] / 2003,9118$	0,007756 Pa
δp_2	$[(P_i-P_d)x(\mu_2.d_2)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,014)] / 2003,9118$	0,008483 Pa
δp_3	$[(P_i-P_d)x(\mu_3.d_3)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(1,26)] / 2003,9118$	0,763509 Pa
δp_4	$[(P_i-P_d)x(\mu_4.d_4)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(2000)] / 2003,9118$	1211,919606 Pa
δp_5	$[(P_i-P_d)x(\mu_5.d_5)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(1)] / 2003,9118$	0,605960 Pa
δp_6	$[(P_i-P_d)x(\mu_6.d_6)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(1,26)] / 2003,9118$	0,763509 Pa
δp_7	$[(P_i-P_d)x(\mu_7.d_7)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,3)] / 2003,9118$	0,181788 Pa
δp_8	$[(P_i-P_d)x(\mu_8.d_8)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,035)] / 2003,9118$	0,021209 Pa
δp_9	$[(P_i-P_d)x(\mu_9.d_9)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,03)] / 2003,9118$	0,018179 Pa

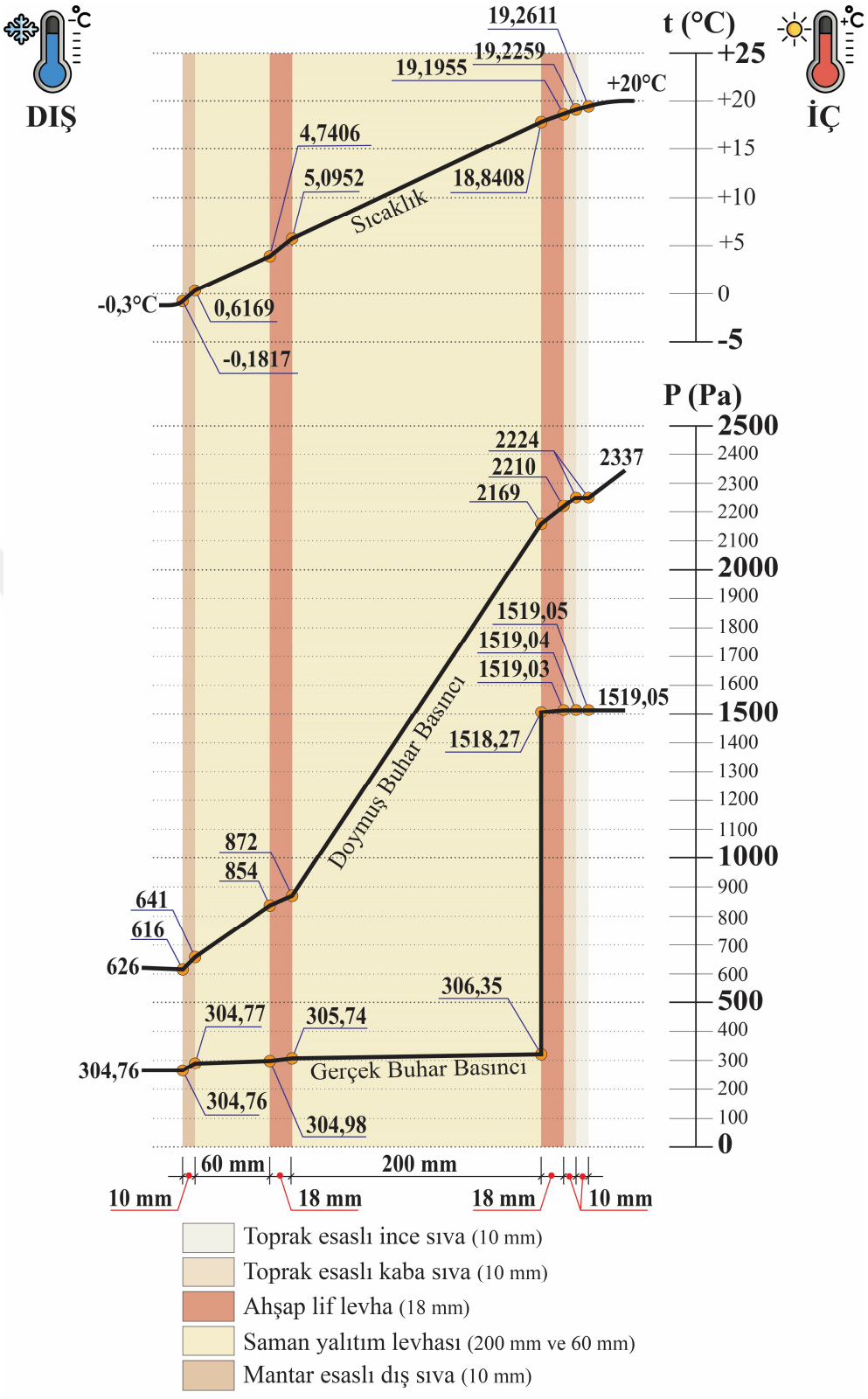
P_i	-	**1519,05 Pa**
P_{iy}	-	**1519,05 Pa**
P_1	P_{iy}- δp_1= 1519,05-0,007756=	**1519,042244 Pa**
P_2	P_1- δp_2=1519,042244-0,008483=	**1519,033760 Pa**
P_3	P_2- δp_3=1519,033760-0,763509=	**1518,270251 Pa**
P_4	P_3- δp_4=1518,270251-1211,919606=	**306,350644 Pa**
P_5	P_4- δp_5=306,350644-0,605960=	**305,744685 Pa**
P_6	P_5- δp_6=305,744685-0,763509=	**304,981175 Pa**
P_7	P_6- δp_7=304,981175-0,181788=	**304,799387 Pa**
P_8	P_7- δp_8=304,799387-0,021209=	**304,778179 Pa**
P_{dy}	P_8- δp_9=304,778179-0,018179=	**304,7600 Pa**
P_d	-	**304,7600 Pa**

Glaser grafik metoduyla yoğuşma kontrolü yapılabilmesi amacıyla EnP-1 öneri kabuk modelini oluşturan katmanların sıcaklık değerleri, bu sıcaklık değerlerine göre doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı miktarları aşağıdaki Çizelge 4.81'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.81. EnP-1 öneri kabuk modeli katmanları sıcaklık ve buhar basınç değerleri

Katman Yapı Malzemeleri	**t (°C)**	**Doymuş Buhar Basıncı (Pa)**	**Gerçek Buhar Basıncı (Pa)**
t_i	20	2337 (Ps_i)	1519,05 (P_i)
Toprak esaslı ince sıva iç yüzü (t_{iy})	19,261173	2224 (Ps_{iy})	1519,05 (P_{iy})
Toprak esaslı ince sıva dış yüzü (t_1)	19,225991	2224 (Ps_1)	1519,042244 (P_1)
Toprak esaslı kaba sıva dış yüzü (t_2)	19,195524	2210 (Ps_2)	1519,033760 (P_2)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_3)	18,840887	2169 (Ps_3)	1518,270251 (P_3)
Buhar kesici	-	2169 (Ps_4)	306,350644 ($P_{4)}$
Saman yalıtım levhası dış yüzü (t_4)	5,095267	872 (Ps_5)	305,744685 (P_5)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_5)	4,740630	854 (Ps_6)	304,981175 (P_6)
Saman yalıtım levhası dış yüzü (t_6)	0,616944	641 (Ps_7)	304,799387 (P_7)
Su-nem kesici	-	641 (Ps_8)	304,778179 (P_8)
Mantar esaslı sıva dış yüzü (t_{dy})	-0,181788	616 (Ps_{dy})	304,760 (P_{dy})
t_d	-0,3	626 (Ps_d)	304,760 (P_d)

EnP-1 öneri kabuk modeli katmanlarında, gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda sıcaklık ve bağıl nem farkından kaynaklanan buhar basınç değişimlerinin herhangi bir yoğuşmaya yol açmadığı belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı iç mekânındaki havada bulunan su buharı, kabuk katmanlarında herhangi bir olumsuz etki bırakmadan atmosfere dahil olmaktadır. Yoğuşma analiz sonuçlarının yer aldığı EnP-1 öneri kabuk model kesit grafiği Şekil 4.40'ta yer almaktadır.

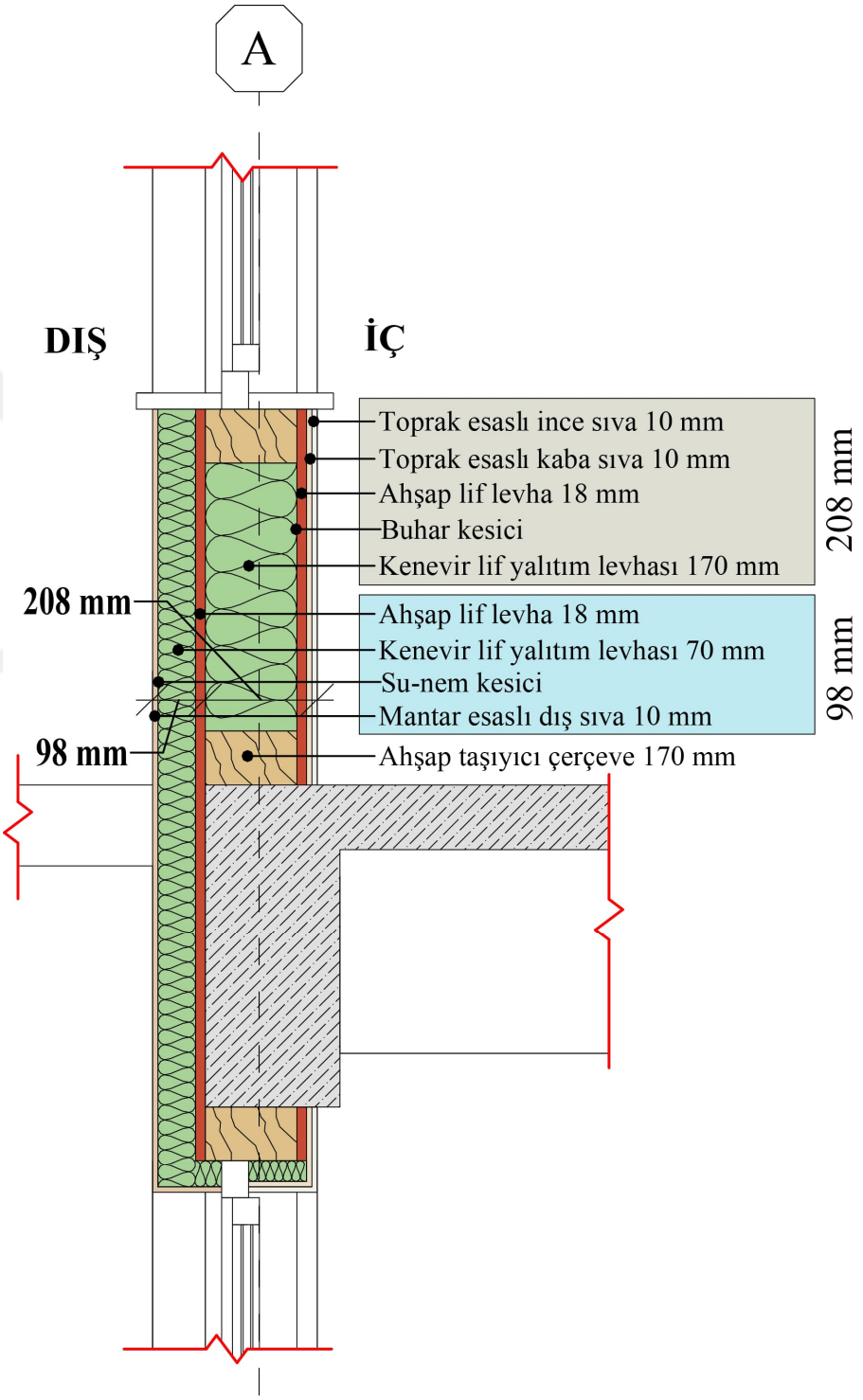


Not: Katman kalınlığı olmayan Buhar kesici, Su-nem kesici kesit içerisinde ifade edilmemiştir.

Şekil 4.40. EnP-1 öneri kabuk modeli yoğuşma analizi glaser grafiği

4.2.2. EnP-2 Kenevir esaslı öneri kabuk modeli

Kenevir lif yalıtım levhası kullanılan EnP-2 öneri kabuk modeli, değişken ve sabit katman kalınlıkları Şekil 4.41'de belirtilmiştir.



Şekil 4.41. EnP-2 öneri kabuk modeli kabuk katmanları

Toplam 306 mm kalınlık değerine sahip olan EnP-2 katmanı, mevcut yapı döşemesi üzerinde yer alan kısmı 208 mm iken dış yüzeydeki katmanlarının kalınlığı ise 98 mm olmuştur. Değişken olan kenevir lif yalıtım levha katmanlar, ahşap taşıyıcı sistem arası 170 mm ve dış yüzey yalıtım katmanı 70 mm olarak belirlenmiştir. Söz konusu bu kalınlıklar, kenevir lif yalıtım levha malzeme endüstriyel üreticisi tarafından bildirilen EPD verilerindeki ürün uygulama ölçüleri doğrultusunda kullanılmıştır.

Kenevir lif yalıtım levhası kullanılarak tasarlanmış olan EnP-2 öneri kabuk modeli için ısıl geçirgenlik katsayısı (U değeri) Çizelge 4.82'de ifade edilmiştir.

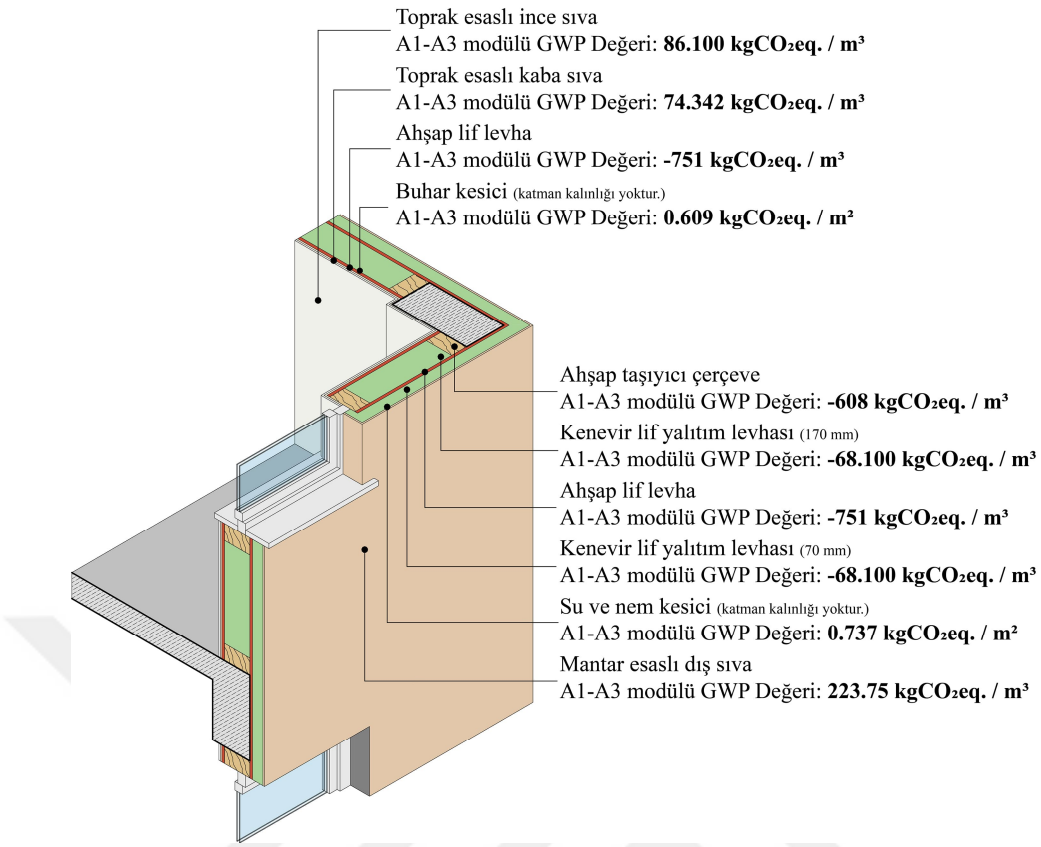
Çizelge 4.82. Kenevir esaslı öneri kabuk modeli EnP-2 U değeri

Katman Yapı Malzemeleri	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**
$R_{iç}$			0,13	
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Buhar kesici		-		
Ahşap taşıyıcı çerçeve sistem		-		
Kenevir lif yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,17	0,04	4,250	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Kenevir lif yalıtım levhası (dış yüzey)	0,07	0,04	1,750	
Su-nem kesici		-		
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,270	
$R_{dış}$			0,04	
		TOPLAM	**6,702**	**0,149**

0,149 W/m².K U değerine sahip EnP-2 modeli, doktora tez çalışması öneri kabuk modeli oluşumlarına ilişkin sınırlılık ve varsayımlar çerçevesinde belirlenmiş ilkelere uygunluğu tespit edilmiştir.

4.2.2.1. EnP-2 Gömülü karbon analizi

EnP-2 modeli için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan yapı malzemeleri, birim m³ ve m² niceliklerindeki GWP değerleri Şekil 4.42'de dijital model üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 4.42. EnP-2 öneri kabuk modeli katmanları GWP değerleri

Gömülü karbon değeri hesaplamak için EnP-2 öneri kabuk modeli, yapı bilgi modellemesi yazılımında dijital ikizi bulunan mevcut konut yapısına uygulanmıştır. EnP-2 gömülü karbon analiz sonuçları Çizelge 4.83 ve Çizelge 4.84 yer almaktadır.

Çizelge 4.83. EnP-2 öneri kabuk modeli opak bileşenler GKA

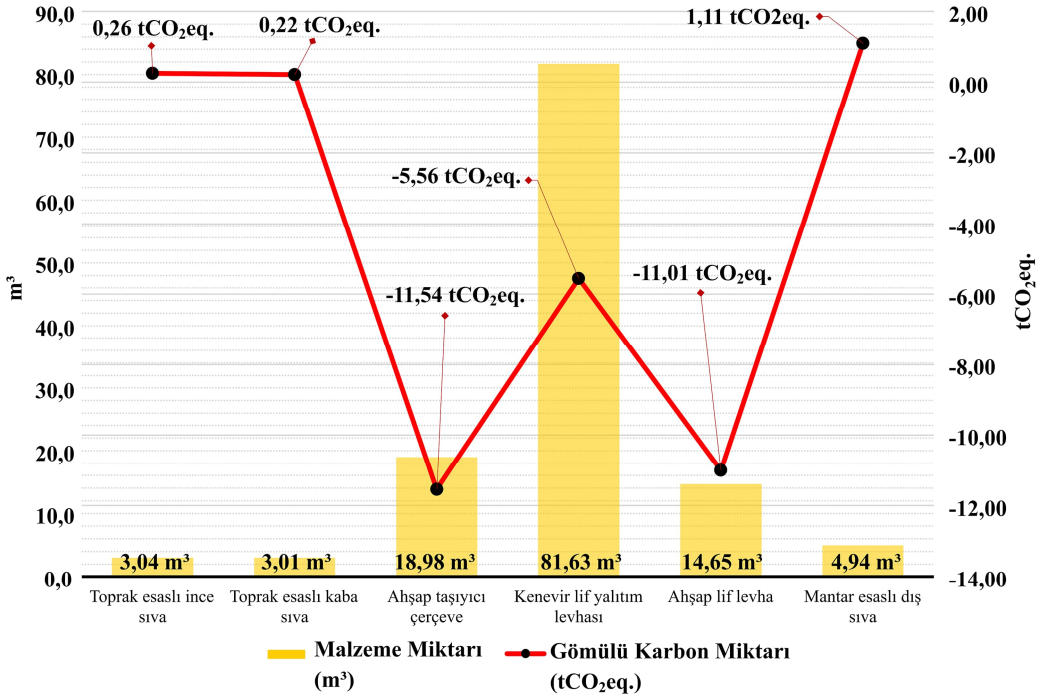
Katman Yapı Malzemeleri	**Malzeme Kalınlığı (mm)**	**Malzeme Miktarı (m³)**	**Malzeme Miktarı (m²)**	**Opak Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri (kgCO₂eq.)**
Toprak esaslı ince sıva	10	3,0408465	-	86,100	261,8351
Toprak esaslı kaba sıva	10	3,0140052	-	74,342	224,0672
Buhar kesici	-	-	570,6306	0,609	347,5140
Ahşap taşıyıcı çerçeve	170	18,976250	-	-608,00	-11537,560
Kenevir lif yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	170	46,3100391	-	-68,100	-3153,7137
Kenevir lif yalıtım levhası (dış yüzey)	70	35,3237261	-	-68,100	-2405,5457
Ahşap lif levha (toplam değer alınmıştır.)	18	14,6533959	-	-751,00	-11004,7003
Su-nem kesici	-	-	570,6306	0,737	420,5548
Mantar esaslı dış sıva	10	4,9388817	-	223,75	1105,0748
				EnP-2 GKA-Düşey Kabuk Opak Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri	**-25742,474**

Çizelge 4.84. EnP-2 öneri kabuk modeli saydam bileşenler GKA

Pencere Adı-Boyutları	Pencere Adet	Yüzey Alanı (m^2)	Saydam Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P1 200x160	6	19,20	22,065	423,648
P2 160x160	12	30,72	22,065	677,837
P3 80x160	14	17,92	22,065	395,405
P4 60x60	6	2,16	22,065	47,660
P5 100x160	12	19,20	22,065	423,648
EnP-2 GKA-Düşey Kabuk Saydam Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri				**1968,20**

Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşeni olarak uygulanmış EnP-2 öneri kabuk modeli opak bileşenleri, atmosfere herhangi bir emisyon yapmak yerine, 25742,474 kg. sera etkisine neden olan CO_2eq. gazları bünyesinde sakladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte EnP-2 öneri kabuk modeli saydam bileşenleri için 1968,20 $kgCO_2$eq. sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. EnP-2 öneri kabuk modeli söz konusu bileşenleriyle uygulandığında, mevcut yapının inşası sürecinde salınmış olan CO_2eq. gazlardan 23774,276 kg. miktarının atmosferden geri toplanmasını sağlanmıştır. Bir başka ifadeyle, EnP-2 öneri kabuk modeli mevcut yapı toplam gömülü karbon değerini -23774,276 $kgCO_2$eq. kadar azaltmıştır. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~-23,77 tCO2eq. olarak kabul edilmiştir.

Değişken katmanlarında kenevir lif yalıtım levhasının kullanıldığı EnP-2 öneri kabuk modeli mevcut yapı dış kabuğu olarak uygulandığında; 81,63 m^3 kenevir lif yalıtım levha malzemesi, 18,98 m^2 ahşap taşıyıcı çerçeve malzemesi olan glulam malzemesi, 14,65 m^3 ahşap lif levha, 4,94 m^3 mantar esaslı sıva malzemesi ve 6,05 m^3 toprak esaslı sıva malzemesi kullanmaktadır. Söz konusu bu değerlere bağlı olarak EnP-2 öneri kabuk modeli katmanlarının bünyelerinde depolanmış olan CO_2eq. gazlar miktarı; ahşap taşıyıcı çerçeve malzeme için -11,54 tCO_2eq., ahşap lif levha malzeme için -11,01 tCO_2eq. ve kenevir lif yalıtım levha malzeme için -5,56 tCO_2eq. olarak tespit edilmiştir. Ancak, toprak esaslı sıva malzemeler için 0,48 tCO_2eq. ve mantar esaslı sıva malzemesi için 1,11 tCO_2eq. olmak üzere toplam 1,59 tCO_2eq. sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. Şekil 4.43'de EnP-2 katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin miktarları ile atmosferden toplanarak bünyelerinde saklanan ve atmosfere salınmış olan karbon değeri ifade edilmiştir.

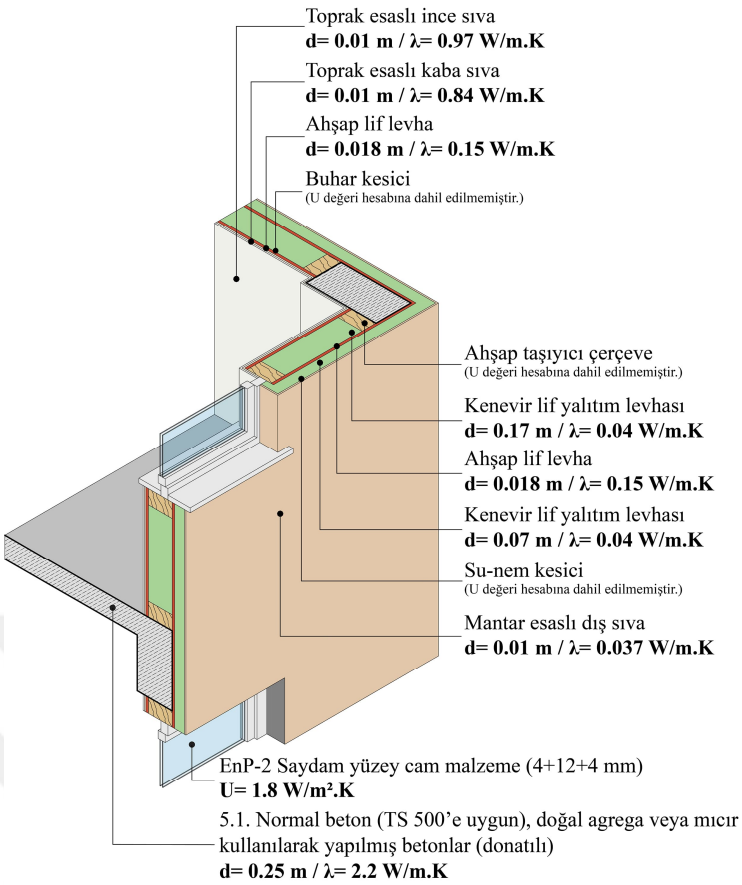


Şekil 4.43. EnP-2 öneri kabuk modeli opak yüzey gömülü karbon dağılımı

4.2.2.2. EnP-2 Kullanım karbon analizi

Kenevir esaslı öneri kabuk modeli olan EnP-2 uygulanmış mevcut yapı için kullanım karbon değeri, söz konusu kabuk modelin uygulandığı yapının dış ortama açık duvar ve betonarme yüzeylerinden gerçekleşen ısı kaybına bağlı olarak hesaplamıştır. Düşük sıcaklıklı iç ortama açık yüzeyler (kabuk modeli duvar ve betonarme) ve yatay kabuk bileşenleri hali hazır durumuyla korunmuştur. Dolayısıyla değinilen bu kabuk bileşenlerinin ısı kaybı mevcut yapı için gerçekleştirilmiş olan analizlerden temin edilmiştir. Ayrıca, EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı için ısı kaybeden yüzey alanları da değişmemiştir. Bu nedenle daha önce gerçekleştirilmiş analizlerden sağlanmıştır.

Bununla birlikte, EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış yapıda kullanılan saydam yüzeyler mevcut yapı hali hazırda var olan ölçü ve büyüklük değerlerine bağlı olarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Ancak saydam yüzeyler için, TS 825 (2013) standardı gereği, pencere ısıl geçirgenlik direnci olan U_P değeri 1,80 W/m².K kabul edilerek ısı kaybı tespit edilmiştir. EnP-2 öneri kabuk modeli termofiziksel özellikleri Şekil 4.44'te belirtilmiştir.



Şekil 4.44. EnP-2 düşey yapı kabuğu katmanları termofiziksel özellikleri

EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kayıp değerleri Çizelge 4.85'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.85. EnP-2 öneri kabuk modeli ısı kayıpları

Isı Kaybeden Yüzeyler	Isı Kayıp Miktarı (W/K)
Dış ortama açık EnP-2 kabuk modeli duvar yüzeyleri (U=0,149 W/m².K))	48,23
Dış ortama açık EnP-1 kabuk modeli betonarme yüzeyler (U=0,232 W/m².K)	55,93
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık dolgu duvar yüzeyleri (U=0,335x0,5 W/m².K)	14,63
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık betonarme yüzeyleri (U=0,445x0,5 W/m².K)	1,00
MY-Isıtılmayan taban üzeri düşük taban döşeme yüzeyleri (U=0,363x0,8 W/m².K)	8,79
MY-Isıtılmayan taban üzeri normal taban döşeme yüzeyleri (U=0,401x0,8 W/m².K)	34,25
MY-Isıtılmayan taban üzeri ıslak taban döşeme yüzeyleri (U=0,414x0,8 W/m².K)	5,95
MY- Isıtılan hacim üzeri tavan döşeme yüzeyleri (U=0,241x0,8 W/m².K)	44,28
EnP-2 kabuk modeli saydam yüzeyler (U=1,8 W/m².K)	207,07
TOPLAM	**420,13**

EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda, iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kayıpları toplamı 420,13 W/K olarak bulunmuştur. Söz konusu kayba ek olarak, mevcut yapı analizlerinde belirlenmiş olan 352,47 W/K havalandırma yoluyla gerçekleşen kayıpta eklenerek EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış yanının özgül ısı kaybı 772,60 W/K olarak bulunmuştur. Bu verilerle birlikte, EnP-2 modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık ısıtma enerji ihtiyacı Çizelge 4.86'da hesaplamıştır.

Çizelge 4.86. EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

	Isı Kayıpları					**Isı Kazançları**					
Aylar	Özgül Isı Kaybı **H (W/K)**	Sıcaklık Farkı **T_i-T_d (K, °C)**			Isı Kayıpları **H . ($T_{iç}$-$T_{dış}$) (W)**	İç Isı Kazançları **ϕ_i (W)**	Güneş Enerjisi Kazançları **ϕ_s (W)**	Toplam Isı Kazançları **$\phi_T = \phi_i+\phi_s$ (W)**	KKO (kazanç kayıp oranı) **($\phi_i+\phi_s$) / H.(T_i-T_d)** KKO ≥2,5 olduğunda ısı kaybı yoktur.	Kazanç Kullanım Faktörü **$\eta=1-e^{-1/KKO}$**	Isıtma Enerjisi Miktarı **Q_{ay}, (kJ)**
		$T_{iç}$	**$T_{dış}$**	**$T_{iç}$-$T_{dış}$**							
Ocak	772,60	19	-0,3	19,3	17947	3488	1860,1	5348,1	0,36	0,94	25618676
Şubat		19	0,1	18,9	17575		2356,6	5844,6	0,4	0,92	23911022
Mart		19	4,1	14,9	13855		2856,6	6344,6	0,55	0,84	16432034
Nisan		19	10,1	8,9	8276		3278,4	6766,4	0,98	0,64	6598013
Mayıs		19	14,4	4,6	4277		3759,4	7247,4	2,04	0,39	1885676
Haziran		19	18,5	0,5	465		3945,6	7433,6	19,26	-	-
Temmuz		19	21,7	-2,7	-		-	-	-	-	-
Ağustos		19	21,2	-2,2	-		-	-	-	-	-
Eylül		19	17,2	1,8	1674		3014,7	6502,7	4,67	-	-
Ekim		19	11,6	7,4	6881		2403,9	5891,9	1,03	0,62	5349993
Kasım		19	5,6	13,4	12461		1793,6	5281,6	0,51	0,86	15061745
Aralık		19	1,3	17,7	16459		1621,7	5109,7	0,37	0,93	23128410

Q_{ay}= [H. ($T_{iç}$-$T_{dış}$)-η. (ϕ_i+ϕ_s)] $_{ay}$. t (J) (1 kJ = 0,278 x 10^{-3} kWh) **$Q_{yıl} = \sum Q_{ay}$=** 117578624 kJ

EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık olarak ısıtma enerjisi amaçlı kullanması gereken en az enerji miktarı 117578624 kJ olarak bulunmuştur. Isıtma amaçlı gerekli olan söz konusu değer birim çevirmesi yapıldığında yaklaşık olarak 32687 kWh (~32868,85743) etmektedir. Birim hacim başına düşen yıllık ısıtma enerjisi miktarı ($Q_{yıl}/V_{brüt}$) 14,99 kWh/m^3.yıl olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sadece ısıtma enerji kullanımını kapsayan, ısıtılan brüt döşeme alanları başına düşen ($Q_{yıl}/A_{DöşemeBrüt}$)

enerji kullanım yoğunluğu (EUI-energy use intensity) 47,49 kWh/m^2.yıl olarak bulunmuştur.

EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda en az konfor koşullarının sağlanabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan enerji miktarı 117578624 kJ eşittir. Kullanım karbonu değerinin hesaplanabilmesi için söz konusu değerin birim dönüşümü yapılmıştır (Çizelge 4.87).

Çizelge 4.87. EnP-2 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı birim dönüşümü

Isıtma enerjisi TJ (terajoule) karşılığı	0,118 TJ (1 kJ = 10^{-9} TJ) (0,117578 TJ ~ 0,118 TJ olarak alınmıştır.)
Isıtma enerjisi GJ (gigajoule) karşılığı	117,58 GJ (1 kJ = 10^{-6} GJ) (117,578 GJ ~ 117,58 GJ olarak alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre mevcut yapı için yıllık ısıtma amacıyla ihtiyaç duyulan doğalgaz miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.88).

Çizelge 4.88. EnP-2 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi için gerekli doğalgaz miktarı

IPCC veri tabanı	2,45 ton (2,44955 ~ 2,45 ton alınmıştır.)
DEFRA veri tabanı	2,58 ton (2,58301 ~ 2,58 ton alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda yıllık ısıtma amacıyla kullanılan doğalgaz kaynaklı kullanım karbonu değerleri $tCO_2eq.$ olarak bulunmuştur. Söz konusu değerlerin ortalaması alınarak, EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu kaynaklı sera etkisi oluşturan $CO_2eq.$ gazlar miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.89).

Çizelge 4.89. EnP-2 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi kullanım karbonu miktarları

	CO_2	**CH_4**	**N_2O**
IPCC veri tabanı	6597,36	12,348	3,646
Toplam	6,61 $tCO_2eq.$ (6613,35 $kgCO_2eq.$ ~ 6,61 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
DEFRA veri tabanı	6606,13	9,94	3,07
Toplam	6,62 $tCO_2eq.$ (6619,14 $kgCO_2eq.$ ~ 6,62 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
EnP-2 Kullanım Karbonu Ortalama Değeri	**6,615 $tCO_2eq.$**		

Isıtma amacıyla EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda bir yıllık kullanılan doğalgaz miktarına bağlı olarak 6,615 tCO_2eq. gaz sera etkisi oluşturan emisyon gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sadece yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybını telafi etmek için gerekli olan en az enerji kullanımıyla oluşan CO_2eq. gazlar emisyon miktarı olan söz konusu değer, EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri karşılığı olmuştur.

4.2.2.3. EnP-2 Yoğuşma analizi

EnP-2 öneri kabuk modeli katmanlarında su buharı kaynaklı olumsuz bir etkinin gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit edilmesi amacıyla yoğuşma analizi gerçekleştirilmiştir. Buhar molekülleri de ısı akımı gibi davranmaktadır. Buna bağlı olarak iç ve dış sıcaklık farkının en fazla olduğu, en kötü durumda kabul edilen en soğuk ayda, yoğuşma olmaması halinde diğer aylarda da yoğuşma olmaz. Dolayısıyla her ay için yapılan yoğuşma analizi, çalışma kapsamında, en kötü durum olarak ifade edilen en soğuk ay için gerçekleştirilmiştir.

Yoğuşma analizi, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı içerisinde tariflendiği şekilde yapılmıştır. Çizelge 4.90'da yoğuşma analizi için gerekli olan iç (t_i) ve dış (t_d) sıcaklık dereceleri, iç (ψ_i) ve dış (ψ_d) bağıl nem değerleri ve iç (R_i) ve dış (R_d) yüzeysel ısıl iletim dirençleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.90. EnP-2 yoğuşma analizi hesaplama verileri

İç sıcaklık derecesi-t_i (°C) (konut yapılarında 19°'dir. Yoğuşma hesabında +1 fazlası alınır.)	20
Dış sıcaklık derecesi -t_d (°C) (TS 825 Ek-B.2 Ocak ayı ortalama dış sıcaklık derecesi)	-0,3
İç ortamın bağıl nemi-ψ_i (TS 825 doğal havalandırma yapılan binalar)	%65
Dış ortamın bağıl nemi-ψ_d (TS 825 Ek-G Konya ili Ocak ayı ortalama bağıl nemi)	%76
İç yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,25
Dış yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,04

Yoğuşma analizi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adım, EnP-2 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve her bir katmanının iki yüzü arasındaki sıcaklık değerleri

tespit edilmiştir. İkinci adımda, iç ve dış ortamında bağıl nem değerlerine bağlı olarak doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı hesaplanmıştır. İkinci adımda gerçekleştirilmiş hesaplamalar için veriler, 30,9°C ile -20,9°C arasındaki sıcaklıklardaki doymuş buhar basıncı (P_s) değerlerini gösteren TS 825 standardı Çizelge F.1'den temin edilmiştir. Yapı kabuklarında yoğuşma olup olmadığı, grafik haline getirilen kabuk kesiti üzerinde doymuş ve gerçek buhar basıncı eğrilerinin kesişip kesişmediğine göre karar verilmektedir. Dolayısıyla üçüncü adımda da elde edilen bütün veriler, grafik haline getirilmiş (Glaser grafik metodu) olan EnP-2 öneri kabuk modeli kesiti üzerine işlenmiş ve yoğuşma kontrolü yapılmıştır.

EnP-2 öneri kabuk modeli katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabası kalınlık değerleri (S_d) Çizelge 4.91'da belirtilmiştir.

Çizelge 4.91. EnP-2 öneri kabuk modeli katmanları fiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**d** (m)	**λ** (W/m.K)	**d/λ** m².K/W	**μ**	**S_d** (μ.d)
R_i			0,25		-
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	1,28	0,0128
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	1,40	0,014
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Buhar kesici	-	-	-	-	2000
Kenevir lif yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,17	0,04	4,250	2,294	0,38998
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Kenevir lif yalıtım levhası (dış yüzey)	0,07	0,04	1,750	2,294	0,16
Su-nem kesici	-	-	-	-	0,035
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,27	3	0,03
R_d			0,04		
		TOPLAM	**6,8220**		**2003,16236**

EnP-2 öneri kabuk modeli için ısı akış yoğunluğu ve katmanları arası sıcaklık farklı Çizelge 4.91'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.91. EnP-2 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve katmanlar arası sıcaklık farkı

$Q=U.(t_i-t_d)$	0,14658 x [20-(-0,3)] 2,97567 W/m²	
δt_{iy} =	2,97567 x 0,25 =	0,743917
δt_1 =	2,97567 x 0,012 =	0,035708
δt_2 =	2,97567 x 0,01 =	0,029757
δt_3 =	2,97567 x 0,12 =	0,357080
δt_4 =	2,97567 x 4,250 =	12,646585
δt_5 =	2,97567 x 0,12 =	0,357080

δt_6 =	2,97567 x 1,750 =	5,207417
δt_7 =	2,97567 x 0,27 =	0,803430
δt_{dy} =	2,97567 x 0,04 =	0,119027
t_{iy}= t_i-δt_{iy}	20-0,743917=	**19,256083°C**
t_1= t_{iy}-δt_1	19,256083-0,0355=	**19,220375°C**
t_2= t_1-δt_2	19,220375-0,029757=	**19,190619°C**
t_3= t_2-δt_3	19,190619-0,357080=	**18,833539°C**
t_4= t_3-δt_4	18,833539-12,646585=	**6,186954°C**
t_5= t_4-δt_5	6,186954-0,357080=	**5,829874°C**
t_6= t_5-δt_6	5,829874-5,207417=	**0,622457°C**
t_{dy}= t_6-δt_7	0,622457-0,803430=	**-0,180973°C**
t_d= t_7-δt_{dy}	-0,180973-0,119027	**-0,300000°C**

Isı akış yoğunluğu tespit edilen EnP-2 öneri kabuk modeli katmanları için buhar basınç dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplamanın gerçekleşebilmesi amacıyla P_i (t_i sıcaklığına bağlı iç ortam buhar basıncı) ve P_d (t_d sıcaklığına bağlı dış ortam buhar basıncı) değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir (Çizelge 4.93).

Çizelge 4.93. EnP-2 öneri kabuk modeli iç ve dış yüzey gerçek buhar basınç değerleri

P_i	Ps_i x Ψ_i (Ps_i değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	2337x0,65=**1519,05** Pa
P_d	Ps_d x Ψ_d (Ps_d değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	401x0,76=**304,76** Pa

Bağıl nem ve sıcaklık farkından kaynaklanan buhar basıncı değişimleri, EnP-2 öneri kabuk modeli her bir katmanı hesaplanmış ve Çizelge 4.94'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.94. EnP-2 öneri kabuk modeli katmanlar arası gerçek buhar basıncı değişimi ve tespiti

δp_1	$[(P_i-P_d)x(\mu_1.d_1)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,0128)] / 2003,16236$	0,007759 Pa
δp_2	$[(P_i-P_d)x(\mu_2.d_2)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,014)] / 2003,16236$	0,008487 Pa
δp_3	$[(P_i-P_d)x(\mu_3.d_3)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(1,26)] / 2003,16236$	0,763795 Pa
δp_4	$[(P_i-P_d)x(\mu_4.d_4)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(2000)] / 2003,16236$	1212,373020 Pa
δp_5	$[(P_i-P_d)x(\mu_5.d_5)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,38998)] / 2003,16236$	0,236401 Pa
δp_6	$[(P_i-P_d)x(\mu_6.d_6)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(1,26)] / 2003,16236$	0,763795 Pa
δp_7	$[(P_i-P_d)x(\mu_7.d_7)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,16058)] / 2003,16236$	0,097341 Pa
δp_8	$[(P_i-P_d)x(\mu_8.d_8)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,035)] / 2003,16236$	0,021217 Pa
δp_9	$[(P_i-P_d)x(\mu_9.d_9)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,03)] / 2003,16236$	0,018186 Pa

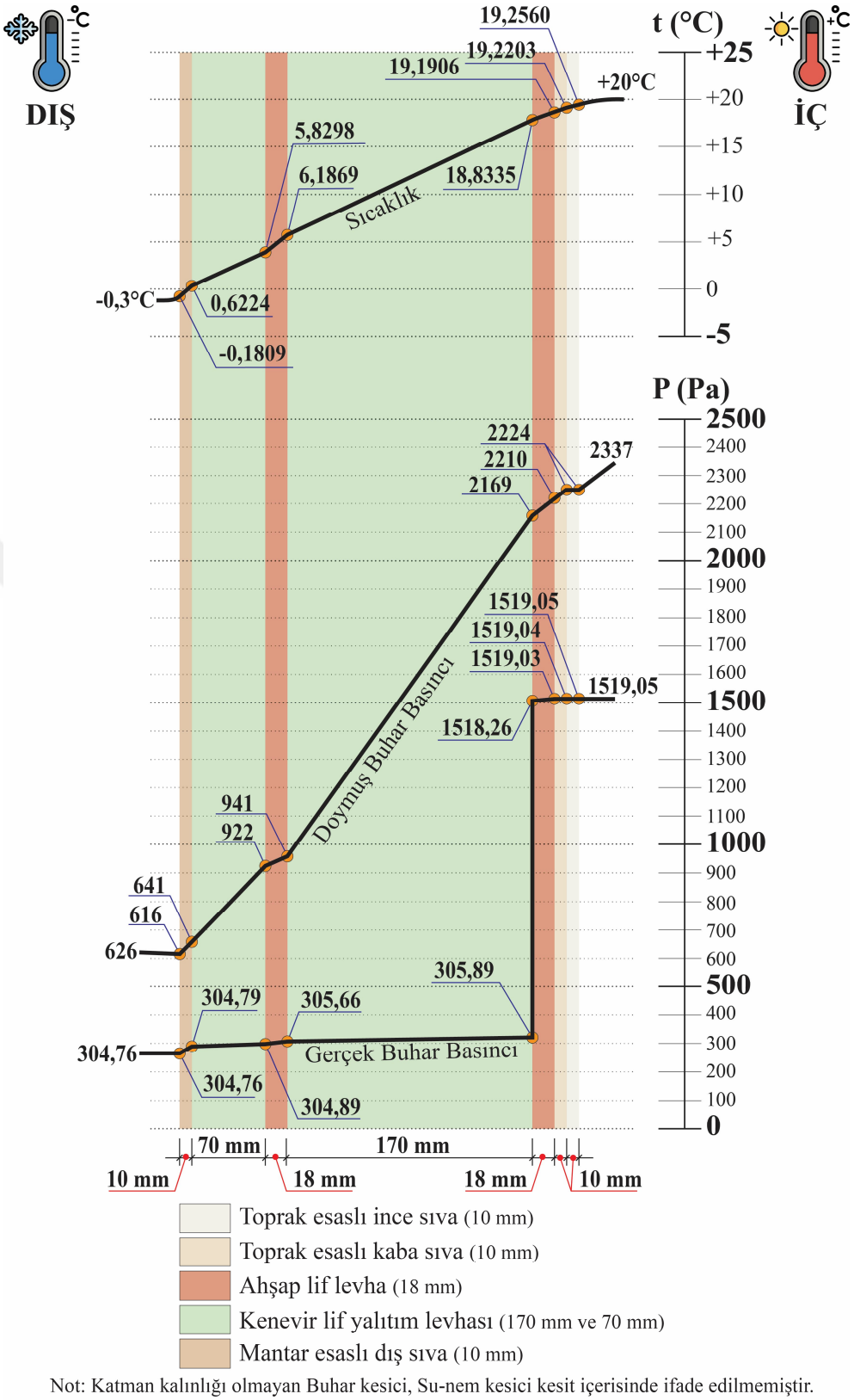
P_i	-	**1519,05 Pa**
P_{iy}	-	**1519,05 Pa**
P_1	P_{iy}- δp_1= 1519,05-0,007759=	**1519,042241 Pa**
P_2	P_1- δp_2=1519,042241-0,008487=	**1519,033754 Pa**
P_3	P_2- δp_3=1519,033754-0,763795=	**1518,269959 Pa**
P_4	P_3- δp_4=1518,269959-1212,373020=	**305,896939 Pa**
P_5	P_4- δp_5=305,896939-0,236401=	**305,660539 Pa**
P_6	P_5- δp_6=305,660539-0,763795=	**304,896744 Pa**
P_7	P_6- δp_7=304,896744-0,097341=	**304,799402 Pa**
P_8	P_7- δp_8=304,799402-0,021217=	**304,778186 Pa**
P_{dy}	P_8- δp_9=304,778186-0,018186=	**304,760000 Pa**
P_d	-	**304,760000 Pa**

Glaser grafik metoduyla yoğuşma kontrolü yapılabilmesi amacıyla EnP-2 öneri kabuk modelini oluşturan katmanların sıcaklık değerleri, bu sıcaklık değerlerine göre doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı miktarları aşağıdaki Çizelge 4.95'te ifade edilmiştir.

Çizelge 4.95. EnP-2 öneri kabuk modeli katmanları sıcaklık ve buhar basınç değerleri

Katman Yapı Malzemeleri	**t (°C)**	**Doymuş Buhar Basıncı (Pa)**	**Gerçek Buhar Basıncı (Pa)**
t_i	20	2337 (Ps_i)	1519,05 (P_i)
Toprak esaslı ince sıva iç yüzü (t_{iy})	19,256083	2224 (Ps_{iy})	1519,05 (P_{iy})
Toprak esaslı ince sıva dış yüzü (t_1)	19,220375	2224 (Ps_1)	1519,042241 (P_1)
Toprak esaslı kaba sıva dış yüzü (t_2)	19,190619	2210 (Ps_2)	1519,033754 (P_2)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_3)	18,833539	2169 (Ps_3)	1518,269959 (P_3)
Buhar kesici	-	2169 (Ps_4)	305,896939 (P_4)
Kenevir lif yalıtım levhası dış yüzü (t_4)	6,186954	941 (Ps_5)	305,660539 (P_5)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_5)	5,829874	922 (Ps_6)	304,896744 (P_6)
Kenevir lif yalıtım levhası dış yüzü (t_6)	0,622457	641 (Ps_7)	304,799402 (P_7)
Su-nem kesici	-	641 (Ps_8)	304,778186 (P_8)
Mantar esaslı sıva dış yüzü (t_{dy})	-0,180973	616 (Ps_{dy})	304,760 (P_{dy})
t_d	-0,30000	626 (Ps_d)	304,760 (P_d)

EnP-2 öneri kabuk modeli katmanlarında, gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda sıcaklık ve bağıl nem farkından kaynaklanan buhar basınç değişimlerinin herhangi bir yoğuşmaya yol açmadığı belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı iç mekânındaki havada bulunan su buharı, kabuk katmanlarında herhangi bir olumsuz etki bırakmadan atmosfere dahil olmaktadır. Yoğuşma analiz sonuçlarının yer aldığı EnP-2 öneri kabuk model kesit grafiği Şekil 4.45'te yer almaktadır.

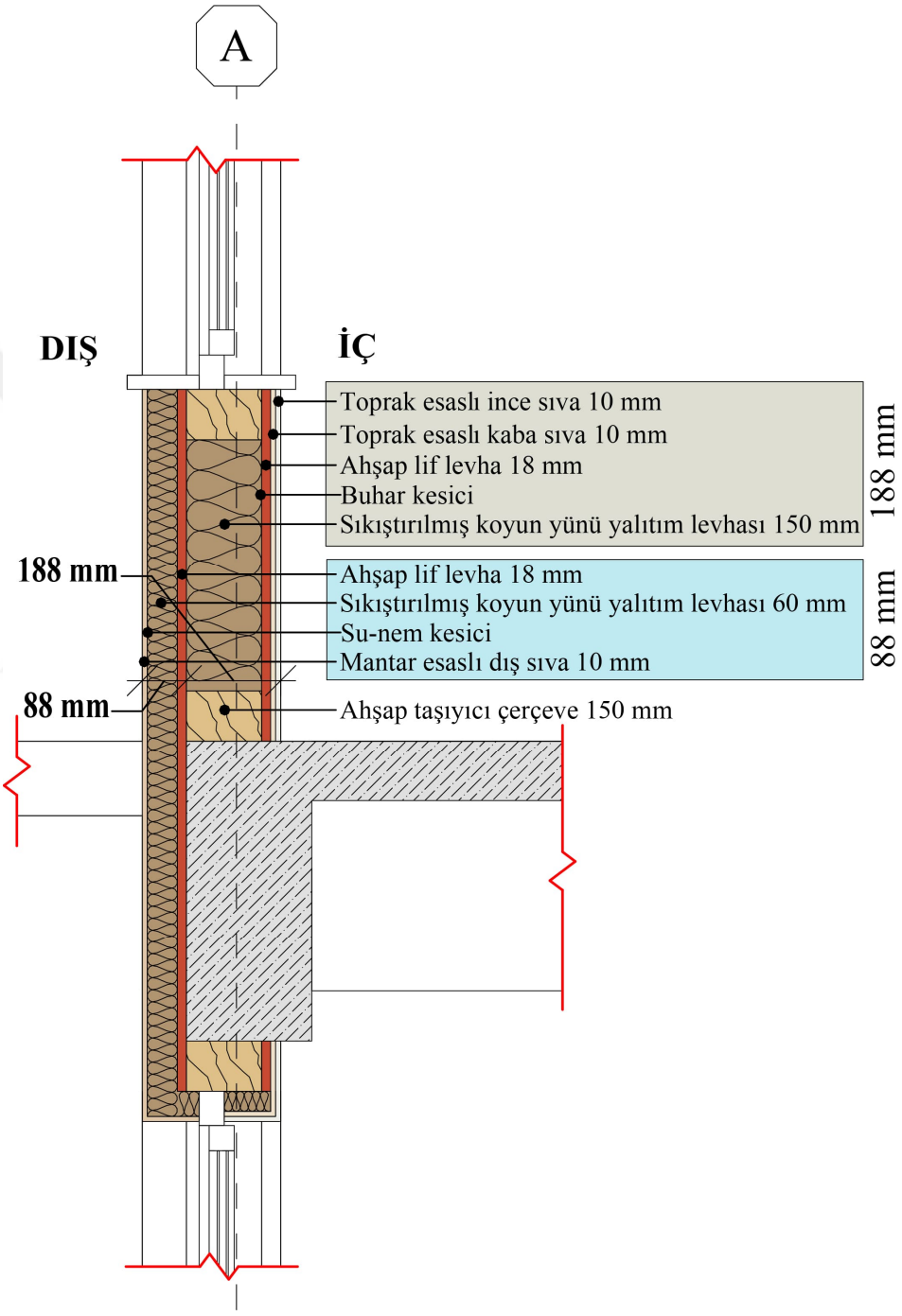


Not: Katman kalınlığı olmayan Buhar kesici, Su-nem kesici kesit içerisinde ifade edilmemiştir.

Şekil 4.45. EnP-2 öneri kabuk modeli yoğuşma analizi glaser grafiği

4.2.3. EnP-3 Koyun yünü esaslı öneri kabuk modeli

Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası kullanılan EnP-3 öneri kabuk modeli, değişken ve sabit katman kalınlıkları Şekil 4.46'da belirtilmiştir.



Şekil 4.46. EnP-3 öneri kabuk modeli kabuk katmanları

Toplam 276 mm kalınlık değerine sahip olan EnP-3 katmanı, mevcut yapı döşemesi üzerinde yer alan kısmı 188 mm iken dış yüzeydeki katmanlarının kalınlığı ise

88 mm olmuştur. Değişken olan sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levha katmanlar, ahşap taşıyıcı sistem arası 150 mm ve dış yüzey yalıtım katmanı 60 mm olarak belirlenmiştir. Söz konusu bu kalınlıklar, sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levha malzeme endüstriyel üreticisi tarafından bildirilen EPD verilerindeki ürün uygulama ölçüleri doğrultusunda kullanılmıştır.

Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası kullanılarak tasarlanmış olan EnP-3 öneri kabuk modeli için ısıl geçirgenlik katsayısı (U değeri) Çizelge 4.96'da ifade edilmiştir.

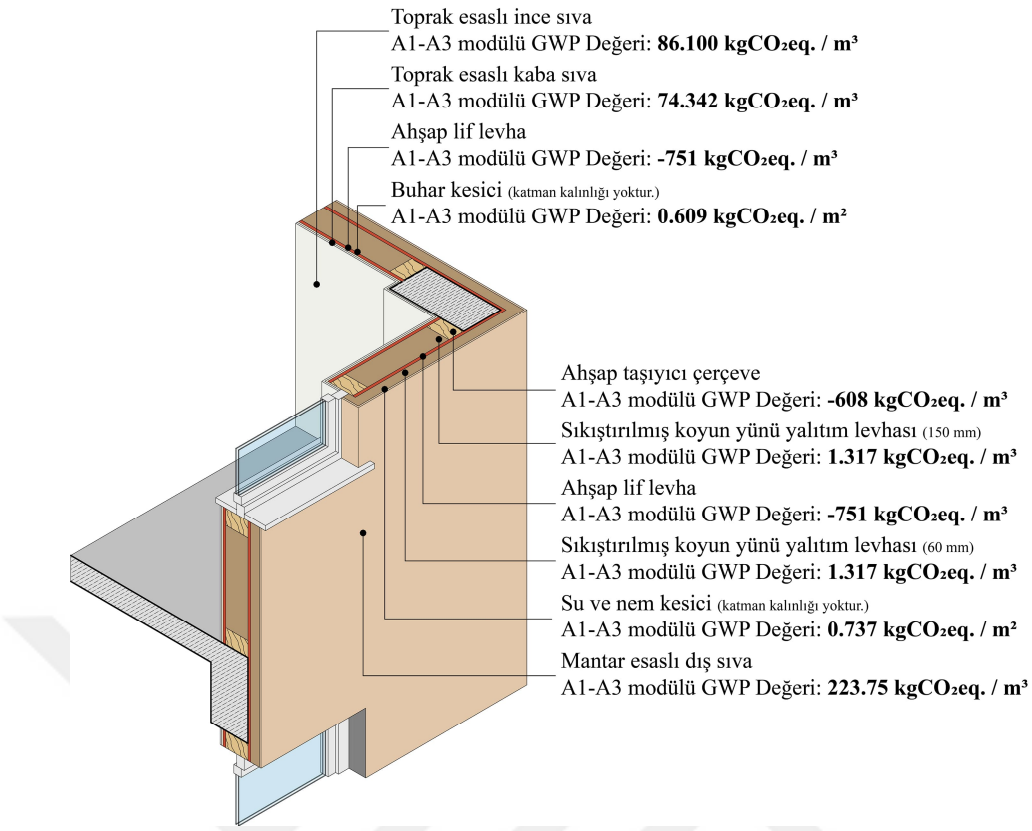
Çizelge 4.96. Koyun yünü esaslı öneri kabuk modeli EnP-3 U değeri

Katman Yapı Malzemeleri	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m².K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m².K)**
$R_{iç}$			0,13	
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Buhar kesici		-		
Ahşap taşıyıcı çerçeve sistem		-		
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,15	0,035	4,286	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası (dış yüzey)	0,06	0,035	1,714	
Su-nem kesici		-		
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,270	
$R_{dış}$			0,04	
		TOPLAM	**6,702**	**0,149**

0,149 W/m².K U değerine sahip EnP-3 modeli, doktora tez çalışması öneri kabuk modeli oluşumlarına ilişkin sınırlılık ve varsayımlar çerçevesinde belirlenmiş ilkelere uygunluğu tespit edilmiştir.

4.2.3.1. EnP-3 Gömülü karbon analizi

EnP-3 modeli için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan yapı malzemeleri, birim m³ ve m² niceliklerindeki GWP değerleri Şekil 4.47'de dijital model üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 4.47. EnP-3 öneri kabuk modeli katmanları GWP değerleri

Gömülü karbon değeri hesaplamak için EnP-3 öneri kabuk modeli, yapı bilgi modellemesi yazılımında dijital ikizi bulunan mevcut konut yapısına uygulanmıştır. EnP-3 gömülü karbon analiz sonuçları Çizelge 4.97 ve Çizelge 4.98 yer almaktadır.

Çizelge 4.97. EnP-3 öneri kabuk modeli opak bileşenler GKA

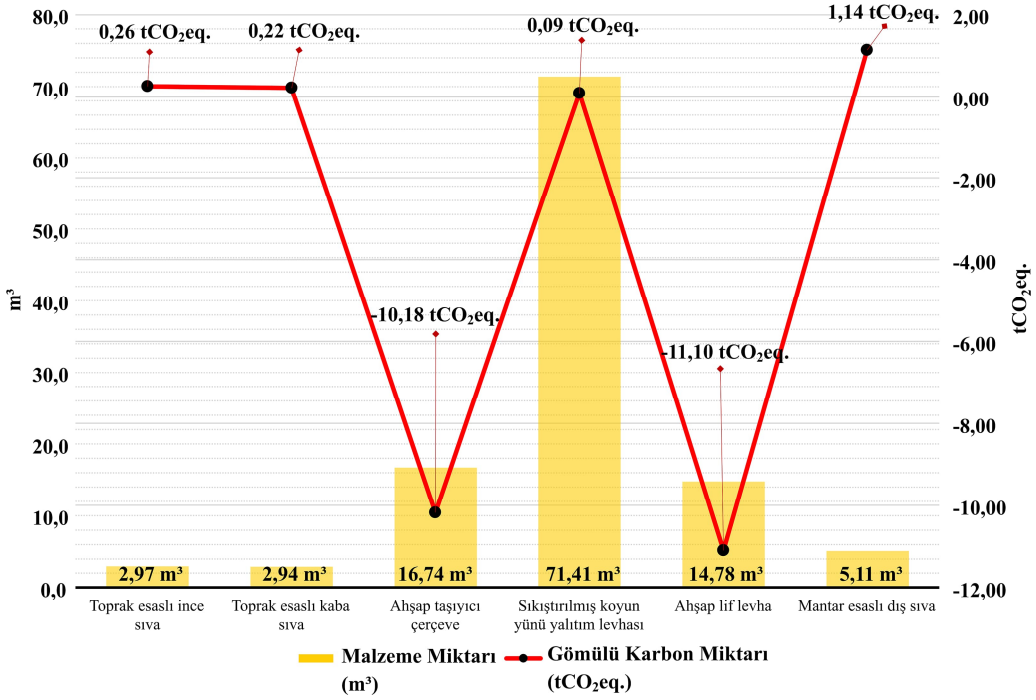
Katman Yapı Malzemeleri	**Malzeme Kalınlığı (mm)**	**Malzeme Miktarı (m^3)**	**Malzeme Miktarı (m^2)**	**Opak Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)**
Toprak esaslı ince sıva	10	2,9674741	-	86,100	255,5173
Toprak esaslı kaba sıva	10	2,9407221	-	74,342	218,6192
Buhar kesici	-	-	569,8706	0,609	347,0512
Ahşap taşıyıcı çerçeve	150	16,743750	-	-608,00	-10180,20
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	150	40,1782941	-	1,317	52,9148
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası (dış yüzey)	60	31,2313778	-	1,317	41,1317
Ahşap lif levha (toplam değer alınmıştır.)	18	14,7830970	-	-751,00	-11102,1058
Su-nem kesici	-	-	569,8706	0,737	419,9946
Mantar esaslı dış sıva	10	5,1115978	-	223,75	1143,7200
			EnP-3 GKA-Düşey Kabuk Opak Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri		**-18803,357**

Çizelge 4.98. EnP-3 öneri kabuk modeli saydam bileşenler GKA

Pencere Adı-Boyutları	Pencere Adet	Yüzey Alanı (m^2)	Saydam Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P1 200x160	6	19,20	22,065	423,648
P2 160x160	12	30,72	22,065	677,837
P3 80x160	14	17,92	22,065	395,405
P4 60x60	6	2,16	22,065	47,660
P5 100x160	12	19,20	22,065	423,648
EnP-3 GKA-Düşey Kabuk Saydam Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri				**1968,20**

Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşeni olarak uygulanmış EnP-3 öneri kabuk modeli opak bileşenleri, atmosfere herhangi bir emisyon yapmak yerine, 18803,357 kg. sera etkisine neden olan CO_2eq. gazları bünyesinde sakladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte EnP-3 öneri kabuk modeli saydam bileşenleri için 1968,20 $kgCO_2$eq. sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. EnP-3 öneri kabuk modeli söz konusu bileşenleriyle uygulandığında, mevcut yapının inşası sürecinde salınmış olan CO_2eq. gazlardan 16835,159 kg. miktarının atmosferden geri toplanmasını sağlanmıştır. Bir başka ifadeyle, EnP-3 öneri kabuk modeli mevcut yapı toplam gömülü karbon değerini -16835,159 $kgCO_2$eq. kadar azaltmıştır. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~-16,84 tCO2eq. olarak kabul edilmiştir.

Değişken katmanlarında sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhasının kullanıldığı EnP-3 öneri kabuk modeli mevcut yapı dış kabuğu olarak uygulandığında; 71,41 m^3 sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levha malzemesi, 16,74 m^2 ahşap taşıyıcı çerçeve malzemesi olan glulam malzemesi, 14,78 m^3 ahşap lif levha, 5,11 m^3 mantar esaslı sıva malzemesi ve 5,91 m^3 toprak esaslı sıva malzemesi kullanmaktadır. Söz konusu bu değerlere bağlı olarak EnP-3 öneri kabuk modeli katmanlarının bünyelerinde depolanmış olan CO_2eq. gazlar miktarı; ahşap taşıyıcı çerçeve malzeme için -10,18 tCO_2eq., ahşap lif levha malzeme için -11,10 tCO_2eq. olarak tespit edilmiştir. Ancak, sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levha malzemeler için 0,09 tCO_2eq., toprak esaslı sıva malzemeler için 0,48 tCO_2eq. ve mantar esaslı sıva malzemesi için 1,14 tCO_2eq. olmak üzere toplam 1,71 tCO_2eq. sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. Şekil 4.48'de EnP-3 katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin miktarları ile atmosferden toplanarak bünyelerinde saklanan ve atmosfere salınmış olan karbon değeri ifade edilmiştir.

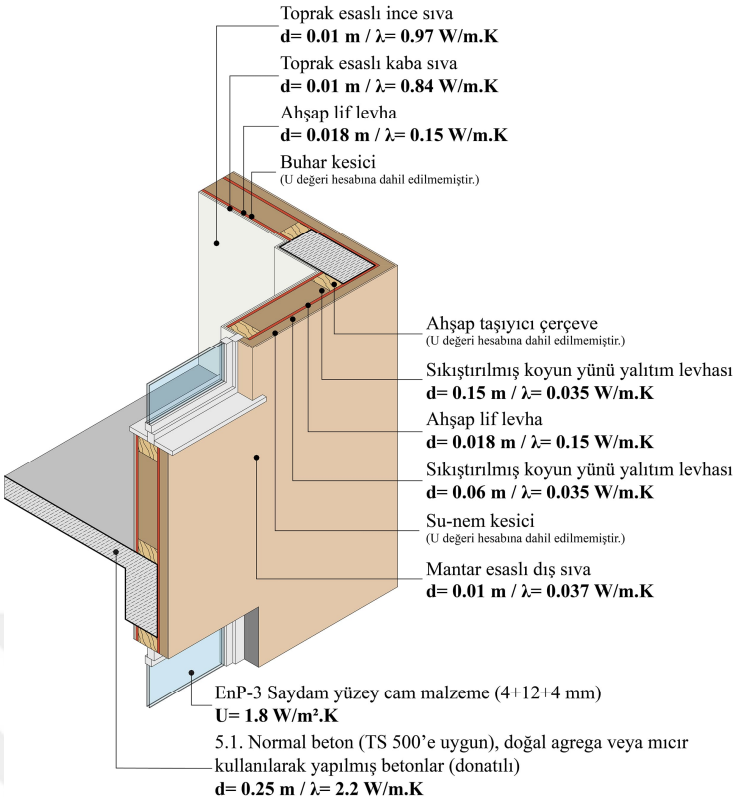


Şekil 4.48. EnP-3 öneri kabuk modeli opak yüzey gömülü karbon dağılımı

4.2.3.2. EnP-3 Kullanım karbon analizi

Koyun yünü esaslı öneri kabuk modeli olan EnP-3 uygulanmış mevcut yapı için kullanım karbon değeri, söz konusu kabuk modelin uygulandığı yapının dış ortama açık duvar ve betonarme yüzeylerinden gerçekleşen ısı kaybına bağlı olarak hesaplamıştır. Düşük sıcaklıklı iç ortama açık yüzeyler (kabuk modeli duvar ve betonarme) ve yatay kabuk bileşenleri hali hazır durumuyla korunmuştur. Dolayısıyla değinilen bu kabuk bileşenlerinin ısı kaybı mevcut yapı için gerçekleştirilmiş olan analizlerden temin edilmiştir. Ayrıca, EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı için ısı kaybeden yüzey alanları da değişmemiştir. Bu nedenle daha önce gerçekleştirilmiş analizlerden sağlanmıştır.

Bununla birlikte, EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış yapıda kullanılan saydam yüzeyler mevcut yapı hali hazırda var olan ölçü ve büyüklük değerlerine bağlı olarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Ancak saydam yüzeyler için, TS 825 (2013) standardı gereği, pencere ısıl geçirgenlik direnci olan U_P değeri 1,80 W/m².K kabul edilerek ısı kaybı tespit edilmiştir. EnP-3 öneri kabuk modeli termofiziksel özellikleri Şekil 4.49'da belirtilmiştir.



Şekil 4.49. EnP-3 düşey yapı kabuğu katmanları termofiziksel özellikleri

EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kayıp değerleri Çizelge 4.99'da belirtilmiştir.

Çizelge 4.99. EnP-3 öneri kabuk modeli ısı kayıpları

Isı Kaybeden Yüzeyler	Isı Kayıp Miktarı (W/K)
Dış ortama açık EnP-3 kabuk modeli duvar yüzeyleri (U=0,149 W/m².K))	48,23
Dış ortama açık EnP-3 kabuk modeli betonarme yüzeyler (U=0,236 W/m².K)	56,90
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık dolgu duvar yüzeyleri (U=0,335x0,5 W/m².K)	14,63
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık betonarme yüzeyleri (U=0,445x0,5 W/m².K)	1,00
MY-Isıtılmayan taban üzeri düşük taban döşeme yüzeyleri (U=0,363x0,8 W/m².K)	8,79
MY-Isıtılmayan taban üzeri normal taban döşeme yüzeyleri (U=0,401x0,8 W/m².K)	34,25
MY-Isıtılmayan taban üzeri ıslak taban döşeme yüzeyleri (U=0,414x0,8 W/m².K)	5,95
MY- Isıtılan hacim üzeri tavan döşeme yüzeyleri (U=0,241x0,8 W/m².K)	44,28
EnP-3 kabuk modeli saydam yüzeyler (U=1,8 W/m².K)	207,07
TOPLAM	**421,10**

EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda, iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kayıpları toplamı 421,10 W/K olarak bulunmuştur. Söz konusu kayba ek olarak, mevcut yapı analizlerinde belirlenmiş olan 352,47 W/K havalandırma yoluyla gerçekleşen kayıpta eklenerek EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış yanının özgül ısı kaybı 773,57 W/K olarak bulunmuştur. Bu verilerle birlikte, EnP-3 modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık ısıtma enerji ihtiyacı Çizelge 4.100'de hesaplamıştır.

Çizelge 4.100. EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

	Isı Kayıpları					**Isı Kazançları**					
Aylar	Özgül Isı Kaybı **H (W/K)**	Sıcaklık Farkı **T_i-T_d (K, °C)**			Isı Kayıpları **H . ($T_{iç}$-$T_{dış}$) (W)**	İç Isı Kazançları **ϕ_i (W)**	Güneş Enerjisi Kazançları **ϕ_s (W)**	Toplam Isı Kazançları **$\phi_T = \phi_i+\phi_s$ (W)**	KKO (kazanç kayıp oranı) **(ϕ_i+ϕ_s)/ H.(T_i-T_d)** KKO ≥2,5 olduğunda ısı kaybı yoktur.	Kazanç Kullanım Faktörü **$\eta=1-e^{-1/KKO}$**	Isıtma Enerjisi Miktarı **Q_{ay}, (kJ)**
		$T_{iç}$	**$T_{dış}$**	**$T_{iç}$-$T_{dış}$**							
Ocak	773,57	19	-0,3	19,3	17947	3488	1860,1	5348,1	0,36	0,94	25667924
Şubat		19	0,1	18,9	17575		2356,6	5844,6	0,4	0,92	23957678
Mart		19	4,1	14,9	13855		2856,6	6344,6	0,55	0,84	16061378
Nisan		19	10,1	8,9	8276		3278,4	6766,4	0,98	0,64	6621341
Mayıs		19	14,4	4,6	4277		3759,4	7247,4	2,04	0,39	1896044
Haziran		19	18,5	0,5	465		3945,6	7433,6	19,21	-	-
Temmuz		19	21,7	-2,7	-		-	-	-	-	-
Ağustos		19	21,2	-2,2	-		-	-	-	-	-
Eylül		19	17,2	1,8	1674		3014,7	6502,7	4,67	-	-
Ekim		19	11,6	7,4	6881		2403,9	5891,9	1,03	0,62	5368137
Kasım		19	5,6	13,4	12461		1793,6	5281,6	0,51	0,86	15095441
Aralık		19	1,3	17,7	16459		1621,7	5109,7	0,37	0,93	23172474

Q_{ay}= [H. ($T_{iç}$-$T_{dış}$)-η. (ϕ_i+ϕ_s)] $_{ay}$. t (J) (1 kJ = 0,278 x 10^{-3} kWh) **$Q_{yıl} = \sum Q_{ay}$=** 117840416 kJ

EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık olarak ısıtma enerjisi amaçlı kullanması gereken en az enerji miktarı 117840416 kJ olarak bulunmuştur. Isıtma amaçlı gerekli olan söz konusu değer birim çevirmesi yapıldığında yaklaşık olarak 32760 kWh (~32759,6356) etmektedir. Birim hacim başına düşen yıllık ısıtma enerjisi miktarı ($Q_{yıl}/V_{brüt}$) 15,03 kWh/m^3.yıl olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sadece ısıtma enerji kullanımını kapsayan, ısıtılan brüt döşeme alanları başına düşen ($Q_{yıl}/A_{DöşemeBrüt}$)

enerji kullanım yoğunluğu (EUI-energy use intensity) 47,59 kWh/m^2.yıl olarak bulunmuştur.

EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda en az konfor koşullarının sağlanabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan enerji miktarı 117840416 kJ eşittir. Kullanım karbonu değerinin hesaplanabilmesi için söz konusu değerin birim dönüşümü yapılmıştır (Çizelge 4.101).

Çizelge 4.101. EnP-3 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı birim dönüşümü

Isıtma enerjisi TJ (terajoule) karşılığı	0,118 TJ (1 kJ = 10^{-9} TJ) (0,117840 TJ ~ 0,118 TJ olarak alınmıştır.)
Isıtma enerjisi GJ (gigajoule) karşılığı	117,84 GJ (1 kJ = 10^{-6} GJ) (117,8404 GJ ~ 117,84 GJ olarak alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre mevcut yapı için yıllık ısıtma amacıyla ihtiyaç duyulan doğalgaz miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.102).

Çizelge 4.102. EnP-3 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi için gerekli doğalgaz miktarı

IPCC veri tabanı	2,45 ton (2,45416 ~ 2,45 ton alınmıştır.)
DEFRA veri tabanı	2,59 ton (2,58876 ~ 2,59 ton alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda yıllık ısıtma amacıyla kullanılan doğalgaz kaynaklı kullanım karbonu değerleri $tCO_2eq.$ olarak bulunmuştur. Söz konusu değerlerin ortalaması alınarak, EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu kaynaklı sera etkisi oluşturan $CO_2eq.$ gazlar miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.103).

Çizelge 4.103. EnP-3 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi kullanım karbonu miktarları

	CO_2	**CH_4**	**N_2O**
IPCC veri tabanı	6608,58	12,369	3,652
Toplam	6,62 $tCO_2eq.$ (6624,60 $kgCO_2eq.$ ~ 6,62 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
DEFRA veri tabanı	6620,83	9,97	3,08
Toplam	6,63 $tCO_2eq.$ (6633,88 $kgCO_2eq.$ ~ 6,63 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
EnP-3 Kullanım Karbonu Ortalama Değeri	**6,625 $tCO_2eq.$**		

Isıtma amacıyla EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda bir yıllık kullanılan doğalgaz miktarına bağlı olarak 6,625 tCO_2eq. gaz sera etkisi oluşturan emisyon gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sadece yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybını telafi etmek için gerekli olan en az enerji kullanımıyla oluşan CO_2eq. gazlar emisyon miktarı olan söz konusu değer, EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri karşılığı olmuştur.

4.2.3.3. EnP-3 Yoğuşma analizi

EnP-3 öneri kabuk modeli katmanlarında su buharı kaynaklı olumsuz bir etkinin gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit edilmesi amacıyla yoğuşma analizi gerçekleştirilmiştir. Buhar molekülleri de ısı akımı gibi davranmaktadır. Buna bağlı olarak iç ve dış sıcaklık farkının en fazla olduğu, en kötü durumda kabul edilen en soğuk ayda, yoğuşma olmaması halinde diğer aylarda da yoğuşma olmaz. Dolayısıyla her ay için yapılan yoğuşma analizi, çalışma kapsamında, en kötü durum olarak ifade edilen en soğuk ay için gerçekleştirilmiştir.

Yoğuşma analizi, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı içerisinde tariflendiği şekilde yapılmıştır. Çizelge 4.104'te yoğuşma analizi için gerekli olan iç (t_i) ve dış (t_d) sıcaklık dereceleri, iç (ψ_i) ve dış (ψ_d) bağıl nem değerleri ve iç (R_i) ve dış (R_d) yüzeysel ısıl iletim dirençleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.104. EnP-3 yoğuşma analizi hesaplama verileri

İç sıcaklık derecesi-t_i (°C) (konut yapılarında 19°'dir. Yoğuşma hesabında +1 fazlası alınır.)	20
Dış sıcaklık derecesi -t_d (°C) (TS 825 Ek-B.2 Ocak ayı ortalama dış sıcaklık derecesi)	-0,3
İç ortamın bağıl nemi-ψ_i (TS 825 doğal havalandırma yapılan binalar)	%65
Dış ortamın bağıl nemi-ψ_d (TS 825 Ek-G Konya ili Ocak ayı ortalama bağıl nemi)	%76
İç yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,25
Dış yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,04

Yoğuşma analizi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adım, EnP-3 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve her bir katmanının iki yüzü arasındaki sıcaklık değerleri

tespit edilmiştir. İkinci adımda, iç ve dış ortamında bağıl nem değerlerine bağlı olarak doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı hesaplanmıştır. İkinci adımda gerçekleştirilmiş hesaplamalar için veriler, 30,9°C ile -20,9°C arasındaki sıcaklıklardaki doymuş buhar basıncı (P_s) değerlerini gösteren TS 825 standardı Çizelge F.1'den temin edilmiştir. Yapı kabuklarında yoğuşma olup olmadığı, grafik haline getirilen kabuk kesiti üzerinde doymuş ve gerçek buhar basıncı eğrilerinin kesişip kesişmediğine göre karar verilmektedir. Dolayısıyla üçüncü adımda da elde edilen bütün veriler, grafik haline getirilmiş (Glaser grafik metodu) olan EnP-3 öneri kabuk modeli kesiti üzerine işlenmiş ve yoğuşma kontrolü yapılmıştır.

EnP-3 öneri kabuk modeli katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabası kalınlık değerleri (S_d) Çizelge 4.105'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.105. EnP-3 öneri kabuk modeli katmanları fiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**d** (m)	**λ** (W/m.K)	**d/λ** m².K/W	**μ**	**S_d** (μ.d)
R_i			0,25		-
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	1,28	0,0128
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	1,40	0,014
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Buhar kesici	-	-	-	-	2000
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,15	0,035	4,286	9	1,350
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası (dış yüzey)	0,06	0,035	1,714	9	0,540
Su-nem kesici	-	-	-	-	0,035
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,27	3	0,03
R_d			0,04		
		TOPLAM	**6,8220**		**2004,5018**

EnP-3 öneri kabuk modeli için ısı akış yoğunluğu ve katmanları arası sıcaklık farklı Çizelge 4.106'da ifade edilmiştir.

Çizelge 4.106. EnP-3 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve katmanlar arası sıcaklık farkı

$Q=U.(t_i-t_d)$	0,14658 x [20-(-0,3)] 2,97567 W/m²	
δt_{iy} =	2,97567 x 0,25 =	0,743917
δt_1 =	2,97567 x 0,012 =	0,035708
δt_2 =	2,97567 x 0,01 =	0,029757
δt_3 =	2,97567 x 0,12 =	0,357080
δt_4 =	2,97567 x 4,286 =	12,753709
δt_5 =	2,97567 x 0,12 =	0,357080

δt_6 =		2,97567 x 1,714 =	5,100293
δt_7 =		2,97567 x 0,27 =	0,803430
δt_{dy} =		2,97567 x 0,04 =	0,119027
t_{iy}=	t_i-δt_{iy}	20-0,743917=	**19,256083°C**
t_1=	t_{iy}-δt_1	19,256083-0,0355=	**19,220375°C**
t_2=	t_1-δt_2	19,220375-0,029757=	**19,190619°C**
t_3=	t_2-δt_3	19,190619-0,357080=	**18,833539°C**
t_4=	t_3-δt_4	18,833539-12,753709=	**6,079830°C**
t_5=	t_4-δt_5	6,079830-0,357080=	**5,722750°C**
t_6=	t_5-δt_6	5,722750-5,100293=	**0,622457°C**
t_{dy}=	t_6-δt_7	0,622457-0,803430=	**-0,180973°C**
t_d=	t_7-δt_{dy}	-0,180973-0,119027	**-0,300000°C**

Isı akış yoğunluğu tespit edilen EnP-3 öneri kabuk modeli katmanları için buhar basınç dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplamanın gerçekleşebilmesi amacıyla P_i (t_i sıcaklığına bağlı iç ortam buhar basıncı) ve P_d (t_d sıcaklığına bağlı dış ortam buhar basıncı) değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir (Çizelge 4.107).

Çizelge 4.107. EnP-3 öneri kabuk modeli iç ve dış yüzey gerçek buhar basınç değerleri

P_i	Ps_i x Ψ_i (Ps_i değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	2337x0,65=**1519,05** Pa
P_d	Ps_d x Ψ_d (Ps_d değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	401x0,76=**304,76** Pa

Bağıl nem ve sıcaklık farkından kaynaklanan buhar basıncı değişimleri, EnP-3 öneri kabuk modeli her bir katmanı hesaplanmış ve Çizelge 4.108'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.108. EnP-3 öneri kabuk modeli katmanlar arası gerçek buhar basıncı değişimi ve tespiti

δp_1	$[(P_i-P_d)x(\mu_1.d_1)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,0128)] / 2004,5018$	0,007754 Pa
δp_2	$[(P_i-P_d)x(\mu_2.d_2)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,014)] / 2004,5018$	0,008481 Pa
δp_3	$[(P_i-P_d)x(\mu_3.d_3)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(1,26)] / 2004,5018$	0,763285 Pa
δp_4	$[(P_i-P_d)x(\mu_4.d_4)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(2000)] / 2004,5018$	1211,562893 Pa
δp_5	$[(P_i-P_d)x(\mu_5.d_5)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,38998)] / 2004,5018$	0,817805 Pa
δp_6	$[(P_i-P_d)x(\mu_6.d_6)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(1,26)] / 2004,5018$	0,763285 Pa
δp_7	$[(P_i-P_d)x(\mu_7.d_7)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,16058)] / 2004,5018$	0,327122 Pa
δp_8	$[(P_i-P_d)x(\mu_8.d_8)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,035)] / 2004,5018$	0,021202 Pa
δp_9	$[(P_i-P_d)x(\mu_9.d_9)] / \sum\mu.d$ $[(1214,29)x(0,03)] / 2004,5018$	0,018173 Pa

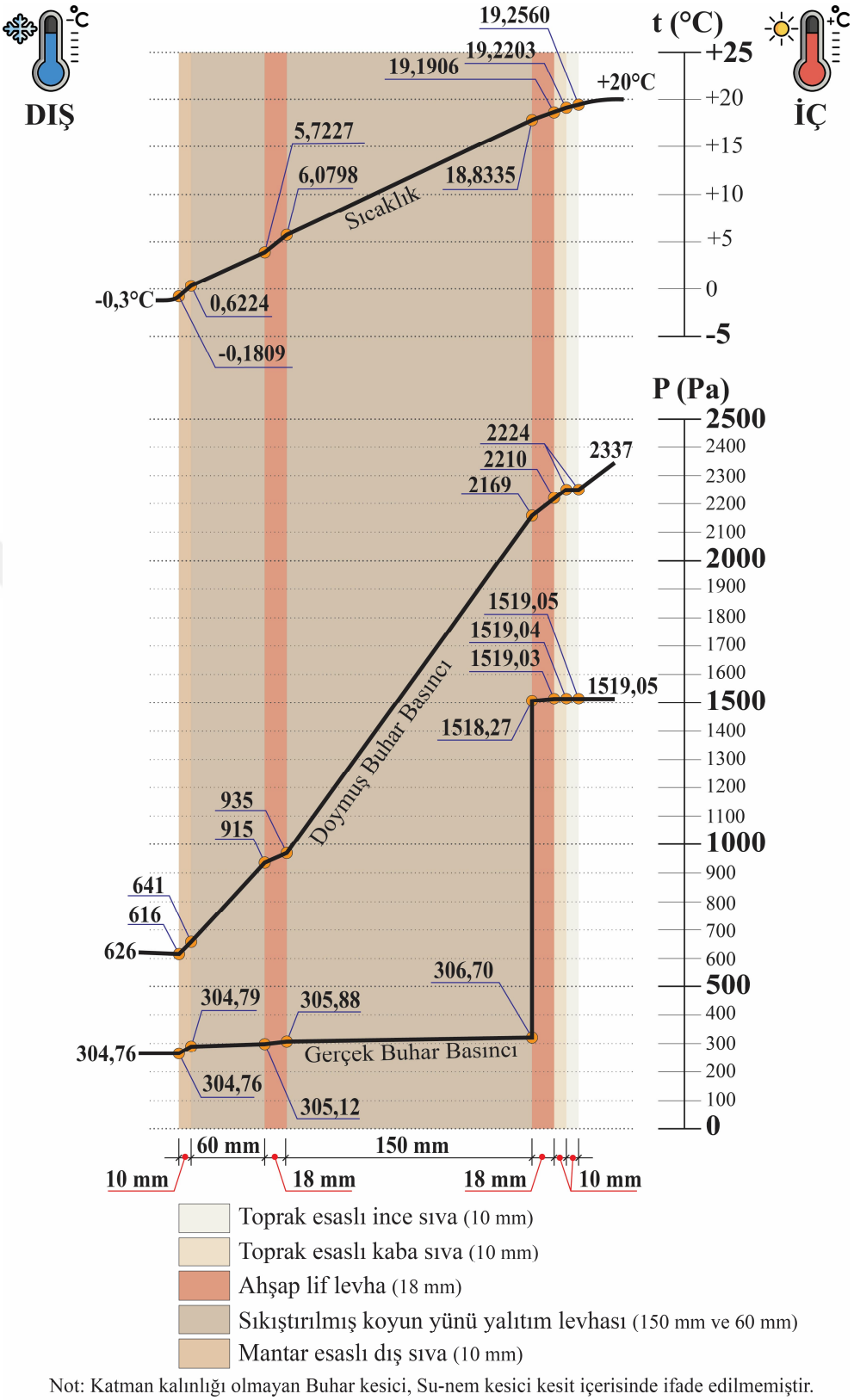
P_i	-	**1519,05 Pa**
P_{iy}	-	**1519,05 Pa**
P_1	P_{iy}- δp_1= 1519,05-0,007754=	**1519,042246 Pa**
P_2	P_1- δp_2=1519,042241-0,008481=	**1519,033765 Pa**
P_3	P_2- δp_3=1519,033754-0,763285=	**1518,270480 Pa**
P_4	P_3- δp_4=1518,269959-1211,562893=	**306,707587 Pa**
P_5	P_4- δp_5=305,896939-0,817805=	**305,889782 Pa**
P_6	P_5- δp_6=305,660539-0,763285=	**305,126498 Pa**
P_7	P_6- δp_7=304,896744-0,327122=	**304,799376 Pa**
P_8	P_7- δp_8=304,799402-0,021202=	**304,778173 Pa**
P_{dy}	P_8- δp_9=304,778186-0,018173=	**304,760000 Pa**
P_d	-	**304,760000 Pa**

Glaser grafik metoduyla yoğuşma kontrolü yapılabilmesi amacıyla EnP-3 öneri kabuk modelini oluşturan katmanların sıcaklık değerleri, bu sıcaklık değerlerine göre doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı miktarları aşağıdaki Çizelge 4.109'da ifade edilmiştir.

Çizelge 4.109. EnP-3 öneri kabuk modeli katmanları sıcaklık ve buhar basınç değerleri

Katman Yapı Malzemeleri	**t (°C)**	**Doymuş Buhar Basıncı (Pa)**	**Gerçek Buhar Basıncı (Pa)**
t_i	20	2337 (Ps_i)	1519,05 (P_i)
Toprak esaslı ince sıva iç yüzü (t_{iy})	19,256083	2224 (Ps_{iy})	1519,05 (P_{iy})
Toprak esaslı ince sıva dış yüzü (t_1)	19,220375	2224 (Ps_1)	1519,042246 (P_1)
Toprak esaslı kaba sıva dış yüzü (t_2)	19,190619	2210 (Ps_2)	1519,033765 (P_2)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_3)	18,833539	2169 (Ps_3)	1518,270480 (P_3)
Buhar kesici	-	2169 (Ps_4)	306,707587 (P_4)
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası dış yüzü (t_4)	6,079830	935 (Ps_5)	305,889782 (P_5)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_5)	5,722750	915 (Ps_6)	305,126498 (P_6)
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası dış yüzü (t_6)	0,622457	641 (Ps_7)	304,799376 (P_7)
Su-nem kesici	-	641 (Ps_8)	304,778173 (P_8)
Mantar esaslı sıva dış yüzü (t_{dy})	-0,180973	616 (Ps_{dy})	304,760 (P_{dy})
t_d	-0,30000	626 (Ps_d)	304,760 (P_d)

EnP-3 öneri kabuk modeli katmanlarında, gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda sıcaklık ve bağıl nem farkından kaynaklanan buhar basınç değişimlerinin herhangi bir yoğuşmaya yol açmadığı belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı iç mekânındaki havada bulunan su buharı, kabuk katmanlarında herhangi bir olumsuz etki bırakmadan atmosfere dahil olmaktadır. Yoğuşma analiz sonuçlarının yer aldığı EnP-3 öneri kabuk model kesit grafiği Şekil 4.50'de yer almaktadır.

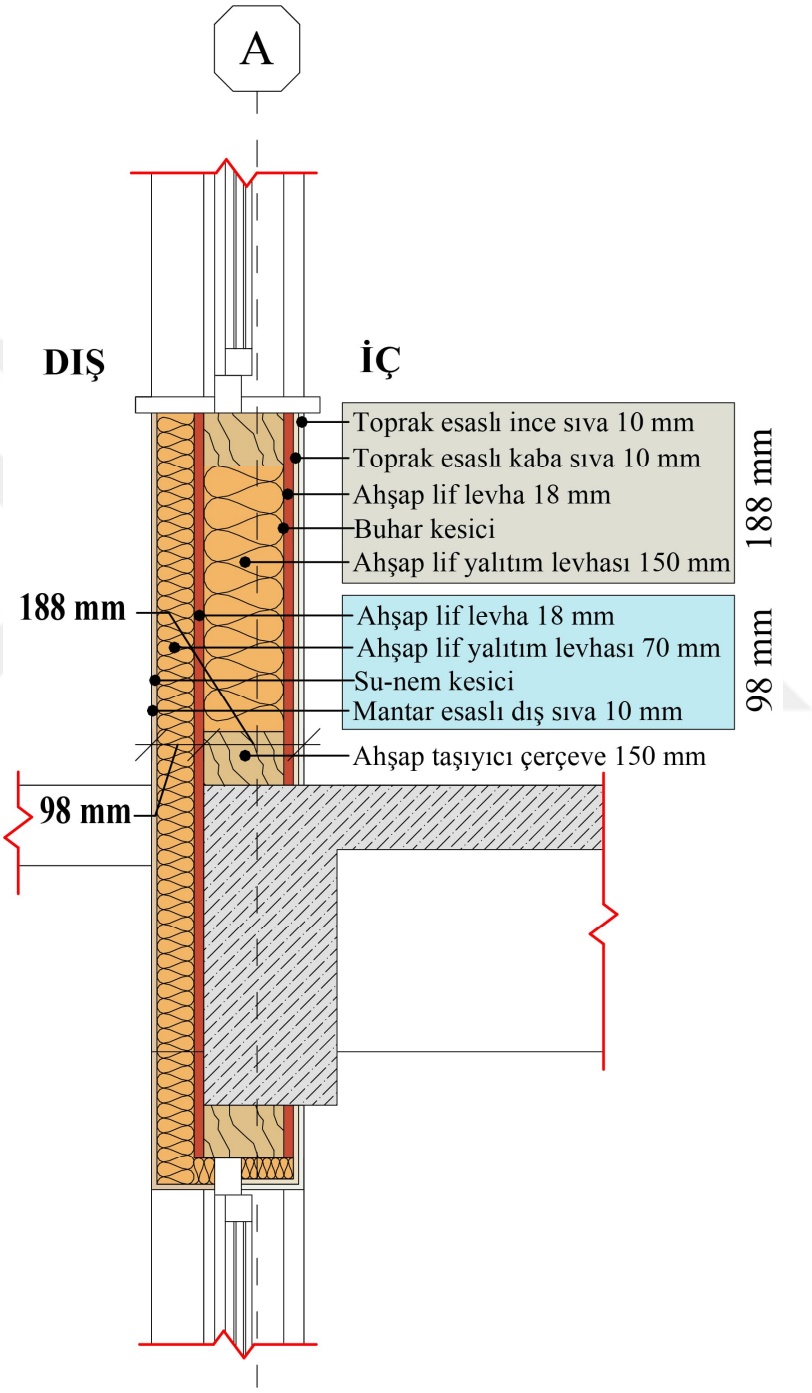


Not: Katman kalınlığı olmayan Buhar kesici, Su-nem kesici kesit içerisinde ifade edilmemiştir.

Şekil 4.50. EnP-3 öneri kabuk modeli yoğuşma analizi glaser grafiği

4.2.4. EnP-4 Ahşap esaslı öneri kabuk modeli

Ahşap lif yalıtım levhası kullanılan EnP-4 öneri kabuk modeli, değişken ve sabit katman kalınlıkları Şekil 4.51'de belirtilmiştir.



Şekil 4.51. EnP-4 öneri kabuk modeli kabuk katmanları

Toplam 286 mm kalınlık değerine sahip olan EnP-4 katmanı, mevcut yapı döşemesi üzerinde yer alan kısmı 188 mm iken dış yüzeydeki katmanlarının kalınlığı ise

98 mm olmuştur. Değişken olan ahşap lif yalıtım levha katmanlar, ahşap taşıyıcı sistem arası 150 mm ve dış yüzey yalıtım katmanı 70 mm olarak belirlenmiştir. Söz konusu bu kalınlıklar, ahşap lif yalıtım levha malzeme endüstriyel üreticisi tarafından bildirilen EPD verilerindeki ürün uygulama ölçüleri doğrultusunda kullanılmıştır.

Ahşap lif yalıtım levhası kullanılarak tasarlanmış olan EnP-4 öneri kabuk modeli için ısıl geçirgenlik katsayısı (U değeri) Çizelge 4.110'da ifade edilmiştir.

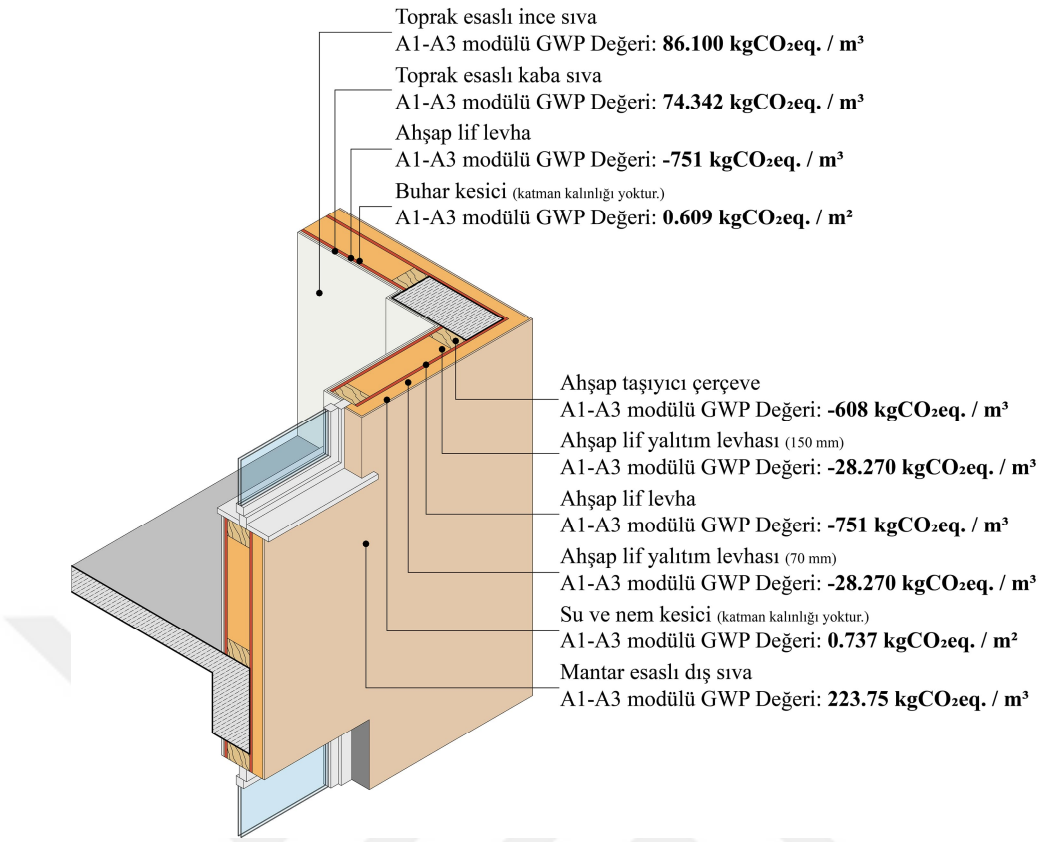
Çizelge 4.110. Ahşap esaslı öneri kabuk modeli EnP-4 U değeri

Katman Yapı Malzemeleri	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m^2.K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m^2.K)**
$R_{iç}$			0,13	
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Buhar kesici		-		
Ahşap taşıyıcı çerçeve sistem		-		
Ahşap lif yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,15	0,036	4,167	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Ahşap lif yalıtım levhası (dış yüzey)	0,07	0,036	1,940	
Su-nem kesici		-		
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,270	
$R_{dış}$			0,04	
		TOPLAM	**6,813**	**0,147**

0,147 W/m².K U değerine sahip EnP-4 modeli, doktora tez çalışması öneri kabuk modeli oluşumlarına ilişkin sınırlılık ve varsayımlar çerçevesinde belirlenmiş ilkelere uygunluğu tespit edilmiştir.

4.2.4.1. EnP-4 Gömülü karbon analizi

EnP-4 modeli için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan yapı malzemeleri, birim m³ ve m² niceliklerindeki GWP değerleri Şekil 4.52'de dijital model üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 4.52. EnP-4 öneri kabuk modeli katmanları GWP değerleri

Gömülü karbon değeri hesaplamak için EnP-4 öneri kabuk modeli, yapı bilgi modellemesi yazılımında dijital ikizi bulunan mevcut konut yapısına uygulanmıştır. EnP-4 gömülü karbon analiz sonuçları Çizelge 4.111 ve Çizelge 4.112 yer almaktadır.

Çizelge 4.111. EnP-4 öneri kabuk modeli opak bileşenler GKA

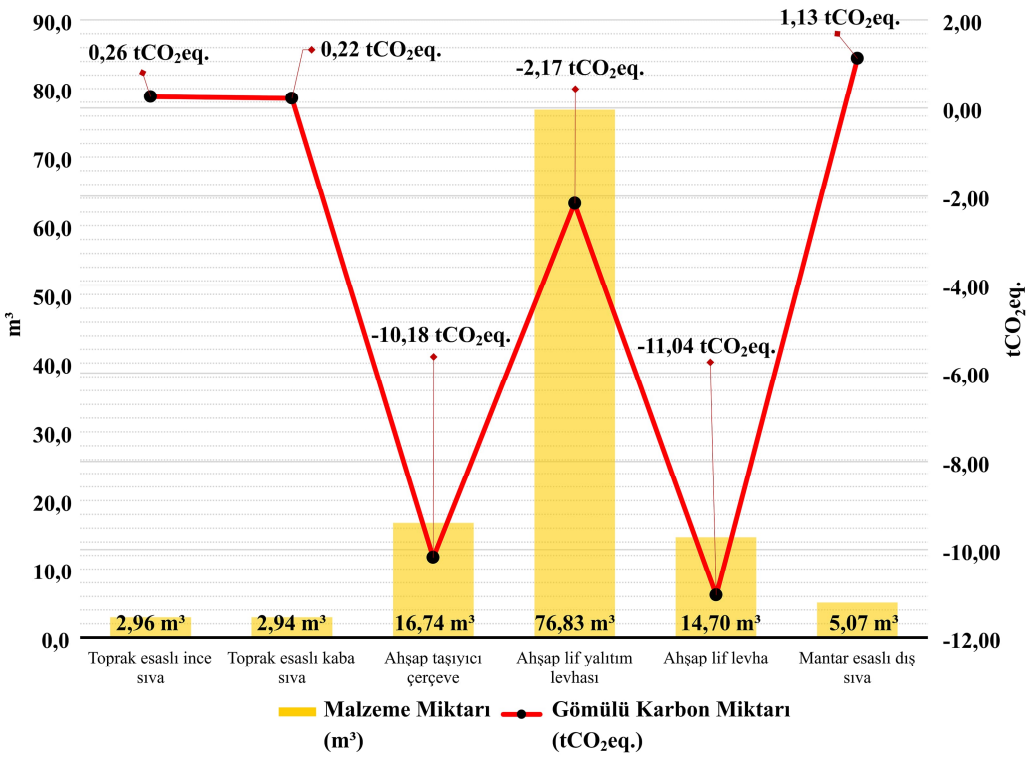
Katman Yapı Malzemeleri	**Malzeme Kalınlığı (mm)**	**Malzeme Miktarı (m^3)**	**Malzeme Miktarı (m^2)**	**Opak Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)**
Toprak esaslı ince sıva	10	2,9629188	-	86,100	255,1251
Toprak esaslı kaba sıva	10	2,9399126	-	74,342	218,5590
Buhar kesici	-	-	570,6306	0,609	347,5140
Ahşap taşıyıcı çerçeve	150	16,743750	-	-608,00	-10180,20
Ahşap lif yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	150	40,7167742	-	-28,270	-1151,0632
Ahşap lif yalıtım levhası (dış yüzey)	70	36,1133937	-	-28,270	-1020,9256
Ahşap lif levha (toplam değer alınmıştır.)	18	14,7023776	-	-751,00	-11041,4856
Su-nem kesici	-	-	570,6306	0,737	420,5548
Mantar esaslı dış sıva	10	5,0670314	-	223,75	1133,7483
			EnP-4 GKA-Düşey Kabuk Opak Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri		**-21018,173**

Çizelge 4.112. EnP-4 öneri kabuk modeli saydam bileşenler GKA

Pencere Adı-Boyutları	Pencere Adet	Yüzey Alanı (m^2)	Saydam Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P1 200x160	6	19,20	22,065	423,648
P2 160x160	12	30,72	22,065	677,837
P3 80x160	14	17,92	22,065	395,405
P4 60x60	6	2,16	22,065	47,660
P5 100x160	12	19,20	22,065	423,648
EnP-4 GKA-Düşey Kabuk Saydam Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri				**1968,20**

Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşeni olarak uygulanmış EnP-4 öneri kabuk modeli opak bileşenleri, atmosfere herhangi bir emisyon yapmak yerine, 21018,173 kg. sera etkisine neden olan CO_2eq. gazları bünyesinde sakladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte EnP-4 öneri kabuk modeli saydam bileşenleri için 1968,20 $kgCO_2$eq. sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. EnP-4 öneri kabuk modeli söz konusu bileşenleriyle uygulandığında, mevcut yapının inşası sürecinde salınmış olan CO_2eq. gazlardan 19049,975 kg. miktarının atmosferden geri toplanmasını sağlanmıştır. Bir başka ifadeyle, EnP-4 öneri kabuk modeli mevcut yapı toplam gömülü karbon değerini -19049,975 $kgCO_2$eq. kadar azaltmıştır. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~-19,05 tCO2eq. olarak kabul edilmiştir.

Değişken katmanlarında kenevir lif yalıtım levhasının kullanıldığı EnP-4 öneri kabuk modeli mevcut yapı dış kabuğu olarak uygulandığında; 76,83 m^3 ahşap lif yalıtım levha malzemesi, 16,74 m^2 ahşap taşıyıcı çerçeve malzemesi olan glulam malzemesi, 14,70 m^3 ahşap lif levha, 5,07 m^3 mantar esaslı sıva malzemesi ve 5,90 m^3 toprak esaslı sıva malzemesi kullanmaktadır. Söz konusu bu değerlere bağlı olarak EnP-4 öneri kabuk modeli katmanlarının bünyelerinde depolanmış olan CO_2eq. gazlar miktarı; ahşap taşıyıcı çerçeve malzeme için -10,18 tCO_2eq., ahşap lif levha malzeme için -11,04 tCO_2eq. ve ahşap lif yalıtım levha malzeme için -2,17 tCO_2eq. olarak tespit edilmiştir. Ancak, toprak esaslı sıva malzemeler için 0,48 tCO_2eq. ve mantar esaslı sıva malzemesi için 1,13 tCO_2eq. olmak üzere toplam 1,61 tCO_2eq. sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. Şekil 4.53'te EnP-4 katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin miktarları ile atmosferden toplanarak bünyelerinde saklanan ve atmosfere salınmış olan karbon değeri ifade edilmiştir.

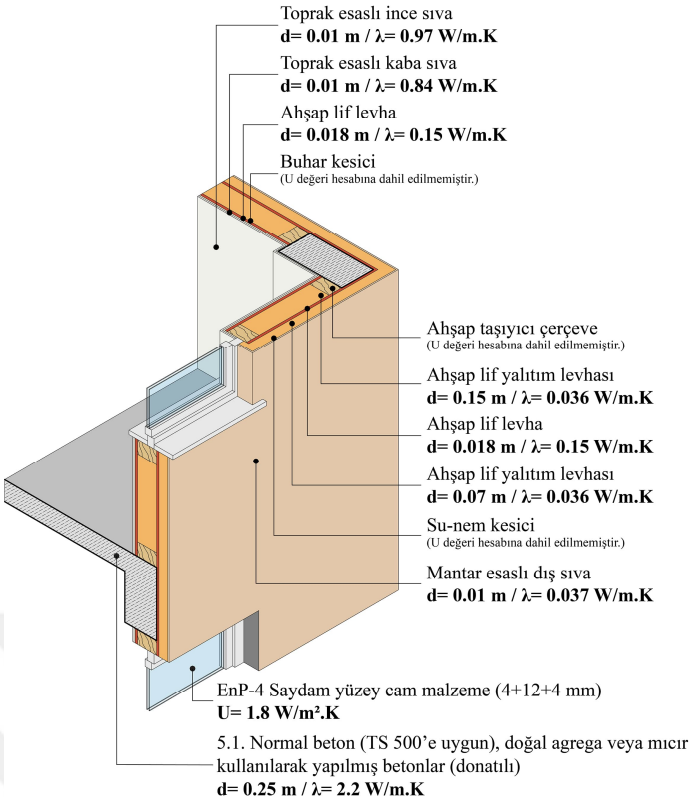


Şekil 4.53. EnP-4 öneri kabuk modeli opak yüzey gömülü karbon dağılımı

4.2.4.2. EnP-4 Kullanım karbon analizi

Ahşap esaslı öneri kabuk modeli olan EnP-4 uygulanmış mevcut yapı için kullanım karbon değeri, söz konusu kabuk modelin uygulandığı yapının dış ortama açık duvar ve betonarme yüzeylerinden gerçekleşen ısı kaybına bağlı olarak hesaplamıştır. Düşük sıcaklıklı iç ortama açık yüzeyler (kabuk modeli duvar ve betonarme) ve yatay kabuk bileşenleri hali hazır durumuyla korunmuştur. Dolayısıyla değinilen bu kabuk bileşenlerinin ısı kaybı mevcut yapı için gerçekleştirilmiş olan analizlerden temin edilmiştir. Ayrıca, EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı için ısı kaybeden yüzey alanları da değişmemiştir. Bu nedenle daha önce gerçekleştirilmiş analizlerden sağlanmıştır.

Bununla birlikte, EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış yapıda kullanılan saydam yüzeyler mevcut yapı hali hazırda var olan ölçü ve büyüklük değerlerine bağlı olarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Ancak saydam yüzeyler için, TS 825 (2013) standardı gereği, pencere ısıl geçirgenlik direnci olan U_P değeri 1,80 W/m².K kabul edilerek ısı kaybı tespit edilmiştir. EnP-4 öneri kabuk modeli termofiziksel özellikleri Şekil 4.54'te belirtilmiştir.



Şekil 4.54. EnP-4 düşey yapı kabuğu katmanları termofiziksel özellikleri

EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kayıp değerleri Çizelge 4.113'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.113. EnP-4 öneri kabuk modeli ısı kayıpları

Isı Kaybeden Yüzeyler	Isı Kayıp Miktarı (W/K)
Dış ortama açık EnP-4 kabuk modeli duvar yüzeyleri (U=0,147 W/m².K))	47,59
Dış ortama açık EnP-4 kabuk modeli betonarme yüzeyler (U=0,213 W/m².K)	51,35
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık dolgu duvar yüzeyleri (U=0,335x0,5 W/m².K)	14,63
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık betonarme yüzeyleri (U=0,445x0,5 W/m².K)	1,00
MY-Isıtılmayan taban üzeri düşük taban döşeme yüzeyleri (U=0,363x0,8 W/m².K)	8,79
MY-Isıtılmayan taban üzeri normal taban döşeme yüzeyleri (U=0,401x0,8 W/m².K)	34,25
MY-Isıtılmayan taban üzeri ıslak taban döşeme yüzeyleri (U=0,414x0,8 W/m².K)	5,95
MY- Isıtılan hacim üzeri tavan döşeme yüzeyleri (U=0,241x0,8 W/m².K)	44,28
EnP-4 kabuk modeli saydam yüzeyler (U=1,8 W/m².K)	207,07
TOPLAM	**414,91**

EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda, iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kayıpları toplamı 414,91 W/K olarak bulunmuştur. Söz konusu kayba ek olarak, mevcut yapı analizlerinde belirlenmiş olan 352,47 W/K havalandırma yoluyla gerçekleşen kayıpta eklenerek EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış yanının özgül ısı kaybı 767,38 W/K olarak bulunmuştur. Bu verilerle birlikte, EnP-4 modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık ısıtma enerji ihtiyacı Çizelge 4.114'te hesaplamıştır.

Çizelge 4.114. EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

	Isı Kayıpları					**Isı Kazançları**					
Aylar	Özgül Isı Kaybı **H (W/K)**	Sıcaklık Farkı **T_i-T_d (K, °C)**			Isı Kayıpları **H . ($T_{iç}$-$T_{dış}$) (W)**	İç Isı Kazançları **ϕ_i (W)**	Güneş Enerjisi Kazançları **ϕ_s (W)**	Toplam Isı Kazançları **$\phi_T = \phi_i+\phi_s$ (W)**	KKO (kazanç kayıp oranı) **(ϕ_i+ϕ_s)/ H.(T_i-T_d)** KKO ≥2,5 olduğunda ısı kaybı yoktur.	Kazanç Kullanım Faktörü **$\eta=1-e^{-1/KKO}$**	Isıtma Enerjisi Miktarı **Q_{ay}, (kJ)**
		$T_{iç}$	**$T_{dış}$**	**$T_{iç}$-$T_{dış}$**							
Ocak	767,38	19	-0,3	19,3	17947	3488	1860,1	5348,1	0,36	0,94	25356884
Şubat		19	0,1	18,9	17575		2356,6	5844,6	0,4	0,92	23654414
Mart		19	4,1	14,9	13855		2856,6	6344,6	0,55	0,84	15822914
Nisan		19	10,1	8,9	8276		3278,4	6766,4	0,99	0,64	6478781
Mayıs		19	14,4	4,6	4277		3759,4	7247,4	2,05	0,39	1823468
Haziran		19	18,5	0,5	465		3945,6	7433,6	19,36	-	-
Temmuz		19	21,7	-2,7	-		-	-	-	-	-
Ağustos		19	21,2	-2,2	-		-	-	-	-	-
Eylül		19	17,2	1,8	1674		3014,7	6502,7	4,67	-	-
Ekim		19	11,6	7,4	6881		2403,9	5891,9	1,04	0,62	5251497
Kasım		19	5,6	13,4	12461		1793,6	5281,6	0,51	0,86	14880305
Aralık		19	1,3	17,7	16459		1621,7	5109,7	0,38	0,93	22889946

Q_{ay}= [H. ($T_{iç}$-$T_{dış}$)-η. (ϕ_i+ϕ_s)] $_{ay}$. t (J) (1 kJ = 0,278 x 10^{-3} kWh) **$Q_{yıl} = \sum Q_{ay}$=** 116158208 kJ

EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık olarak ısıtma enerjisi amaçlı kullanması gereken en az enerji miktarı 116158208 kJ olarak bulunmuştur. Isıtma amaçlı gerekli olan söz konusu değer birim çevirmesi yapıldığında yaklaşık olarak 32292 kWh (~32291,9818) etmektedir. Birim hacim başına düşen yıllık ısıtma enerjisi miktarı ($Q_{yıl}/V_{brüt}$) 14,81 kWh/m^3.yıl olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sadece ısıtma enerji kullanımını kapsayan, ısıtılan brüt döşeme alanları başına düşen ($Q_{yıl}/A_{DöşemeBrüt}$)

enerji kullanım yoğunluğu (EUI-energy use intensity) 46,91 kWh/m^2.yıl olarak bulunmuştur.

EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda en az konfor koşullarının sağlanabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan enerji miktarı 116158208 kJ eşittir. Kullanım karbonu değerinin hesaplanabilmesi için söz konusu değerin birim dönüşümü yapılmıştır (Çizelge 4.115).

Çizelge 4.115. EnP-4 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı birim dönüşümü

Isıtma enerjisi TJ (terajoule) karşılığı	0,116 TJ (1 kJ = 10^{-9} TJ) (0,116158 TJ ~ 0,116 TJ olarak alınmıştır.)
Isıtma enerjisi GJ (gigajoule) karşılığı	116,16 GJ (1 kJ = 10^{-6} GJ) (116,15820 GJ ~ 116,16 GJ olarak alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre mevcut yapı için yıllık ısıtma amacıyla ihtiyaç duyulan doğalgaz miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.116).

Çizelge 4.116. EnP-4 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi için gerekli doğalgaz miktarı

IPCC veri tabanı	2,42 ton (2,42083 ~ 2,42 ton alınmıştır.)
DEFRA veri tabanı	2,55 ton (2,55180 ~ 2,55 ton alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda yıllık ısıtma amacıyla kullanılan doğalgaz kaynaklı kullanım karbonu değerleri $tCO_2eq.$ olarak bulunmuştur. Söz konusu değerlerin ortalaması alınarak, EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu kaynaklı sera etkisi oluşturan $CO_2eq.$ gazlar miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.117).

Çizelge 4.117. EnP-4 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi kullanım karbonu miktarları

	CO_2	**CH_4**	**N_2O**
IPCC veri tabanı	6518,82	12,201	3,602
Toplam	6,53 $tCO_2eq.$ (6534,62 $kgCO_2eq.$ ~ 6,53 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
DEFRA veri tabanı	6526,32	9,82	3,04
Toplam	6,54 $tCO_2eq.$ (6539,18 $kgCO_2eq.$ ~ 6,54 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
EnP-4 Kullanım Karbonu Ortalama Değeri	**6,535 $tCO_2eq.$**		

Isıtma amacıyla EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda bir yıllık kullanılan doğalgaz miktarına bağlı olarak 6,535 tCO_2eq. gaz sera etkisi oluşturan emisyon gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sadece yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybını telafi etmek için gerekli olan en az enerji kullanımıyla oluşan CO_2eq. gazlar emisyon miktarı olan söz konusu değer, EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri karşılığı olmuştur.

4.2.4.3. EnP-4 Yoğuşma analizi

EnP-4 öneri kabuk modeli katmanlarında su buharı kaynaklı olumsuz bir etkinin gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit edilmesi amacıyla yoğuşma analizi gerçekleştirilmiştir. Buhar molekülleri de ısı akımı gibi davranmaktadır. Buna bağlı olarak iç ve dış sıcaklık farkının en fazla olduğu, en kötü durumda kabul edilen en soğuk ayda, yoğuşma olmaması halinde diğer aylarda da yoğuşma olmaz. Dolayısıyla her ay için yapılan yoğuşma analizi, çalışma kapsamında, en kötü durum olarak ifade edilen en soğuk ay için gerçekleştirilmiştir.

Yoğuşma analizi, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı içerisinde tariflendiği şekilde yapılmıştır. Çizelge 4.118'de yoğuşma analizi için gerekli olan iç (t_i) ve dış (t_d) sıcaklık dereceleri, iç (ψ_i) ve dış (ψ_d) bağıl nem değerleri ve iç (R_i) ve dış (R_d) yüzeysel ısıl iletim dirençleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.118. EnP-4 yoğuşma analizi hesaplama verileri

İç sıcaklık derecesi-t_i (°C) (konut yapılarında 19°'dir. Yoğuşma hesabında +1 fazlası alınır.)	20
Dış sıcaklık derecesi -t_d (°C) (TS 825 Ek-B.2 Ocak ayı ortalama dış sıcaklık derecesi)	-0,3
İç ortamın bağıl nemi-ψ_i (TS 825 doğal havalandırma yapılan binalar)	%65
Dış ortamın bağıl nemi-ψ_d (TS 825 Ek-G Konya ili Ocak ayı ortalama bağıl nemi)	%76
İç yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,25
Dış yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim $m^2.K/W$)	0,04

Yoğuşma analizi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adım, EnP-4 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve her bir katmanının iki yüzü arasındaki sıcaklık değerleri

tespit edilmiştir. İkinci adımda, iç ve dış ortamında bağıl nem değerlerine bağlı olarak doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı hesaplanmıştır. İkinci adımda gerçekleştirilmiş hesaplamalar için veriler, 30,9°C ile -20,9°C arasındaki sıcaklıklardaki doymuş buhar basıncı (P_s) değerlerini gösteren TS 825 standardı Çizelge F.1'den temin edilmiştir. Yapı kabuklarında yoğuşma olup olmadığı, grafik haline getirilen kabuk kesiti üzerinde doymuş ve gerçek buhar basıncı eğrilerinin kesişip kesişmediğine göre karar verilmektedir. Dolayısıyla üçüncü adımda da elde edilen bütün veriler, grafik haline getirilmiş (Glaser grafik metodu) olan EnP-4 öneri kabuk modeli kesiti üzerine işlenmiş ve yoğuşma kontrolü yapılmıştır.

EnP-4 öneri kabuk modeli katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabası kalınlık değerleri (S_d) Çizelge 4.119'da belirtilmiştir.

Çizelge 4.119. EnP-4 öneri kabuk modeli katmanları fiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**d** (m)	**λ** (W/m.K)	**d/λ** m².K/W	**μ**	**S_d** (μ.d)
R_i			0,25		-
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	1,28	0,0128
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	1,40	0,014
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Buhar kesici	-	-	-	-	2000
Ahşap lif yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,15	0,036	4,167	2	0,300
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Ahşap lif yalıtım levhası (dış yüzey)	0,07	0,036	1,940	2	0,140
Su-nem kesici	-	-	-	-	0,035
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,27	3	0,03
R_d			0,04		
		TOPLAM	**6,9290**		**2003,0518**

EnP-4 öneri kabuk modeli için ısı akış yoğunluğu ve katmanları arası sıcaklık farklı Çizelge 4.120'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.120. EnP-4 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve katmanlar arası sıcaklık farkı

$Q=U.(t_i-t_d)$	0,14432 x [20-(-0,3)] 2,92972 W/m²	
δt_{iy} =	2,92972 x 0,25 =	0,732429
δt_1 =	2,92972 x 0,012 =	0,035157
δt_2 =	2,92972 x 0,01 =	0,029297
δt_3 =	2,92972 x 0,12 =	0,351566
δt_4 =	2,92972 x 4,167 =	12,208125
δt_5 =	2,92972 x 0,12 =	0,351566

δt_6 =		2,92972 x 1,940 =	5,683648
δt_7 =		2,92972 x 0,27 =	0,791023
δt_{dy} =		2,92972 x 0,04 =	0,117189
t_{iy}=	t_i-δt_{iy}	20-0,732429=	**19,267571°C**
t_1=	t_{iy}-δt_1	19,267571-0,035157=	**19,232414°C**
t_2=	t_1-δt_2	19,232414-0,029297=	**19,203117°C**
t_3=	t_2-δt_3	19,203117-0,351566=	**18,851551°C**
t_4=	t_3-δt_4	18,851551-12,208125=	**6,643426°C**
t_5=	t_4-δt_5	6,643426-0,351566=	**6,291860°C**
t_6=	t_5-δt_6	6,291860-5,683648=	**0,608212°C**
t_{dy}=	t_6-δt_7	0,608212-0,791023=	**-0,182811°C**
t_d=	t_7-δt_{dy}	-0,182811-0,117189	**-0,300000°C**

Isı akış yoğunluğu tespit edilen EnP-4 öneri kabuk modeli katmanları için buhar basınç dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplamanın gerçekleşebilmesi amacıyla P_i (t_i sıcaklığına bağlı iç ortam buhar basıncı) ve P_d (t_d sıcaklığına bağlı dış ortam buhar basıncı) değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir (Çizelge 4.121).

Çizelge 4.121. EnP-4 öneri kabuk modeli iç ve dış yüzey gerçek buhar basınç değerleri

P_i	Ps_i x Ψ_i (Ps_i değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	2337x0,65=**1519,05** Pa
P_d	Ps_d x Ψ_d (Ps_d değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	401x0,76=**304,76** Pa

Bağıl nem ve sıcaklık farkından kaynaklanan buhar basıncı değişimleri, EnP-4 öneri kabuk modeli her bir katmanı hesaplanmış ve Çizelge 4.122'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.122. EnP-4 öneri kabuk modeli katmanlar arası gerçek buhar basıncı değişimi ve tespiti

δp_1	$[(P_i-P_d)x(\mu_1.d_1)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,0128)] / 2003,0518	0,007760 Pa
δp_2	$[(P_i-P_d)x(\mu_2.d_2)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,014)] / 2003,0518	0,008487 Pa
δp_3	$[(P_i-P_d)x(\mu_3.d_3)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(1,26)] / 2003,0518	0,763837 Pa
δp_4	$[(P_i-P_d)x(\mu_4.d_4)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(2000)] / 2003,0518	1212,439938 Pa
δp_5	$[(P_i-P_d)x(\mu_5.d_5)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,3)] / 2003,0518	0,181866 Pa
δp_6	$[(P_i-P_d)x(\mu_6.d_6)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(1,26)] / 2003,0518	0,763837 Pa
δp_7	$[(P_i-P_d)x(\mu_7.d_7)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,14)] / 2003,0518	0,084871 Pa
δp_8	$[(P_i-P_d)x(\mu_8.d_8)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,035)] / 2003,0518	0,021218 Pa
δp_9	$[(P_i-P_d)x(\mu_9.d_9)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,03)] / 2003,0518	0,018187 Pa

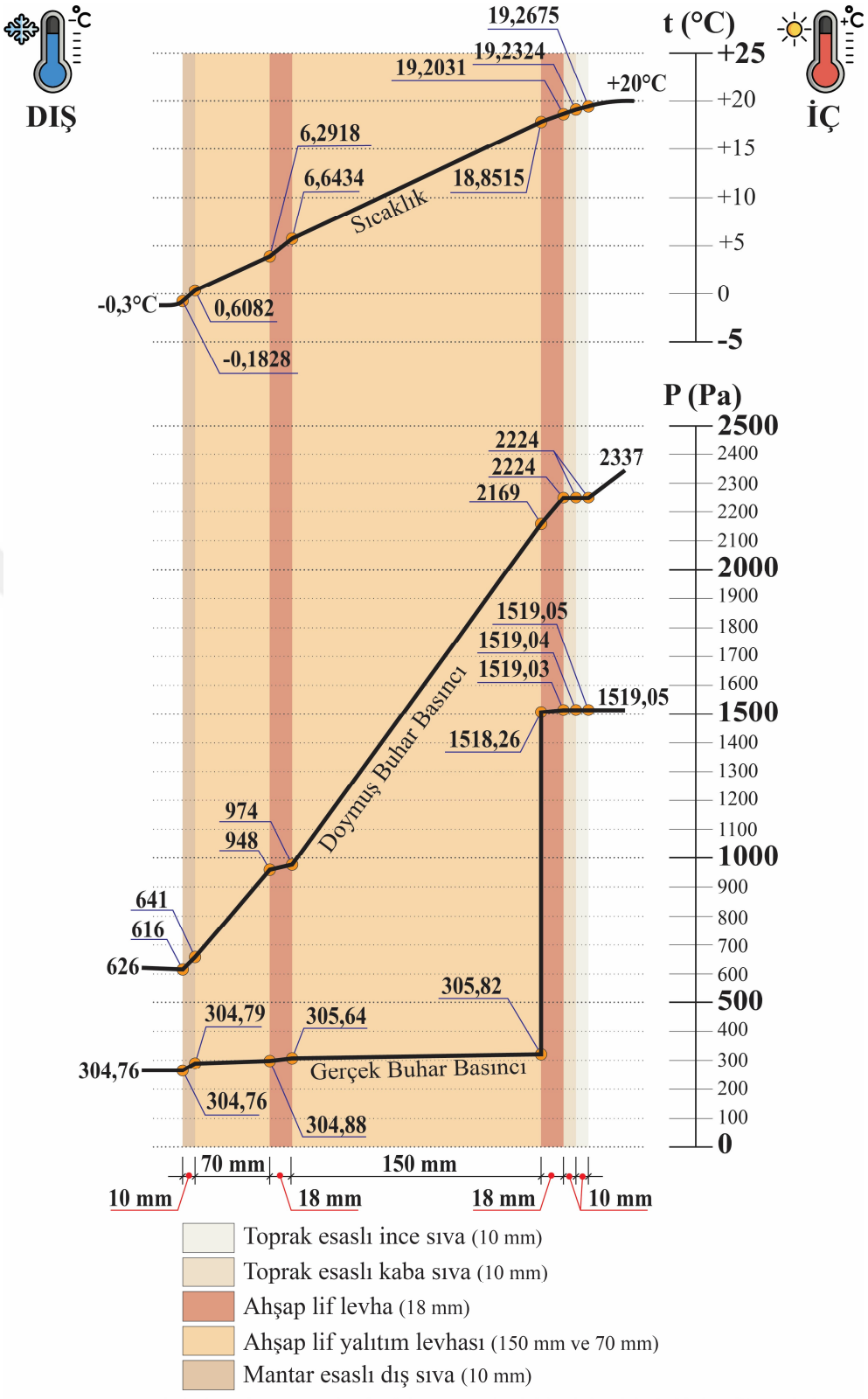
P_i	-	**1519,05 Pa**
P_{iy}	-	**1519,05 Pa**
P_1	P_{iy}- δp_1= 1519,05-0,007760=	**1519,042240 Pa**
P_2	P_1- δp_2=1519,042240-0,008487=	**1519,033753 Pa**
P_3	P_2- δp_3=1519,033753-0,763837=	**1518,269916 Pa**
P_4	P_3- δp_4=1518,269916-1212,439938=	**305,829978 Pa**
P_5	P_4- δp_5=305,829978-0,181866=	**305,648112 Pa**
P_6	P_5- δp_6=305,648112-0,763837=	**304,884275 Pa**
P_7	P_6- δp_7=304,884275-0,084871=	**304,799404 Pa**
P_8	P_7- δp_8=304,799404-0,021218=	**304,778187 Pa**
P_{dy}	P_8- δp_9=304,778187-0,018187 =	**304,760000 Pa**
P_d	-	**304,760000 Pa**

Glaser grafik metoduyla yoğuşma kontrolü yapılabilmesi amacıyla EnP-4 öneri kabuk modelini oluşturan katmanların sıcaklık değerleri, bu sıcaklık değerlerine göre doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı miktarları aşağıdaki Çizelge 4.123'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.123. EnP-4 öneri kabuk modeli katmanları sıcaklık ve buhar basınç değerleri

Katman Yapı Malzemeleri	**t (°C)**	**Doymuş Buhar Basıncı (Pa)**	**Gerçek Buhar Basıncı (Pa)**
t_i	20	2337 (Ps_i)	1519,05 (P_i)
Toprak esaslı ince sıva iç yüzü (t_{iy})	19,267571	2224 (Ps_{iy})	1519,05 (P_{iy})
Toprak esaslı ince sıva dış yüzü (t_1)	19,232414	2224 (Ps_1)	1519,042240 (P_1)
Toprak esaslı kaba sıva dış yüzü (t_2)	19,203117	2224 (Ps_2)	1519,033753 (P_2)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_3)	18,851551	2169 (Ps_3)	1518,269916 (P_3)
Buhar kesici	-	2169 (Ps_4)	305,829978 (P_4)
Ahşap lif yalıtım levhası dış yüzü (t_4)	6,643426	974 (Ps_5)	305,648112 (P_5)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_5)	6,291860	948 (Ps_6)	304,884275 (P_6)
Ahşap lif yalıtım levhası dış yüzü (t_6)	0,608212	641 (Ps_7)	304,799404 (P_7)
Su-nem kesici	-	641 (Ps_8)	304,778187 (P_8)
Mantar esaslı sıva dış yüzü (t_{dy})	-0,182811	616 (Ps_{dy})	304,760 (P_{dy})
t_d	-0,30000	626 (Ps_d)	304,760 (P_d)

EnP-4 öneri kabuk modeli katmanlarında, gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda sıcaklık ve bağıl nem farkından kaynaklanan buhar basınç değişimlerinin herhangi bir yoğuşmaya yol açmadığı belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı iç mekânındaki havada bulunan su buharı, kabuk katmanlarında herhangi bir olumsuz etki bırakmadan atmosfere dahil olmaktadır. Yoğuşma analiz sonuçlarının yer aldığı EnP-4 öneri kabuk model kesit grafiği Şekil 4.55'te yer almaktadır.

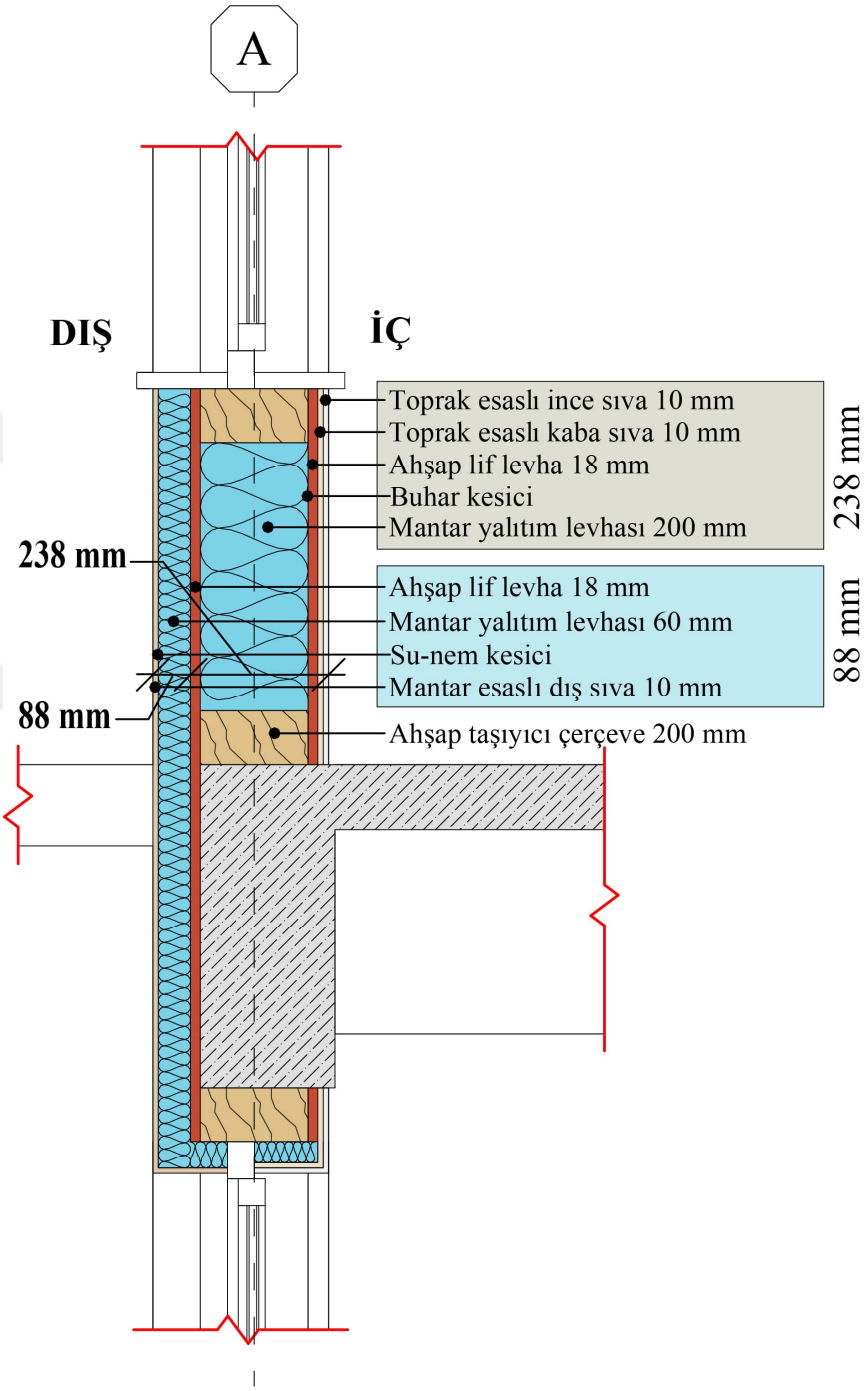


Not: Katman kalınlığı olmayan Buhar kesici, Su-nem kesici kesit içerisinde ifade edilmemiştir.

Şekil 4.55. EnP-4 öneri kabuk modeli yoğuşma analizi glaser grafiği

4.2.5. EnP-5 Mantar esaslı öneri kabuk modeli

Mantar yalıtım levhası kullanılan EnP-5 öneri kabuk modeli, değişken ve sabit katman kalınlıkları Şekil 4.56'da belirtilmiştir.



Şekil 4.56. EnP-5 öneri kabuk modeli kabuk katmanları

Toplam 326 mm kalınlık değerine sahip olan EnP-5 katmanı, mevcut yapı döşemesi üzerinde yer alan kısmı 238 mm iken dış yüzeydeki katmanlarının kalınlığı ise

88 mm olmuştur. Değişken olan mantar yalıtım levha katmanlar, ahşap taşıyıcı sistem arası 200 mm ve dış yüzey yalıtım katmanı 60 mm olarak belirlenmiştir. Söz konusu bu kalınlıklar, mantar yalıtım levha malzeme endüstriyel üreticisi tarafından bildirilen EPD verilerindeki ürün uygulama ölçüleri doğrultusunda kullanılmıştır.

Mantar yalıtım levhası kullanılarak tasarlanmış olan EnP-5 öneri kabuk modeli için ısıl geçirgenlik katsayısı (U değeri) Çizelge 4.124'de ifade edilmiştir.

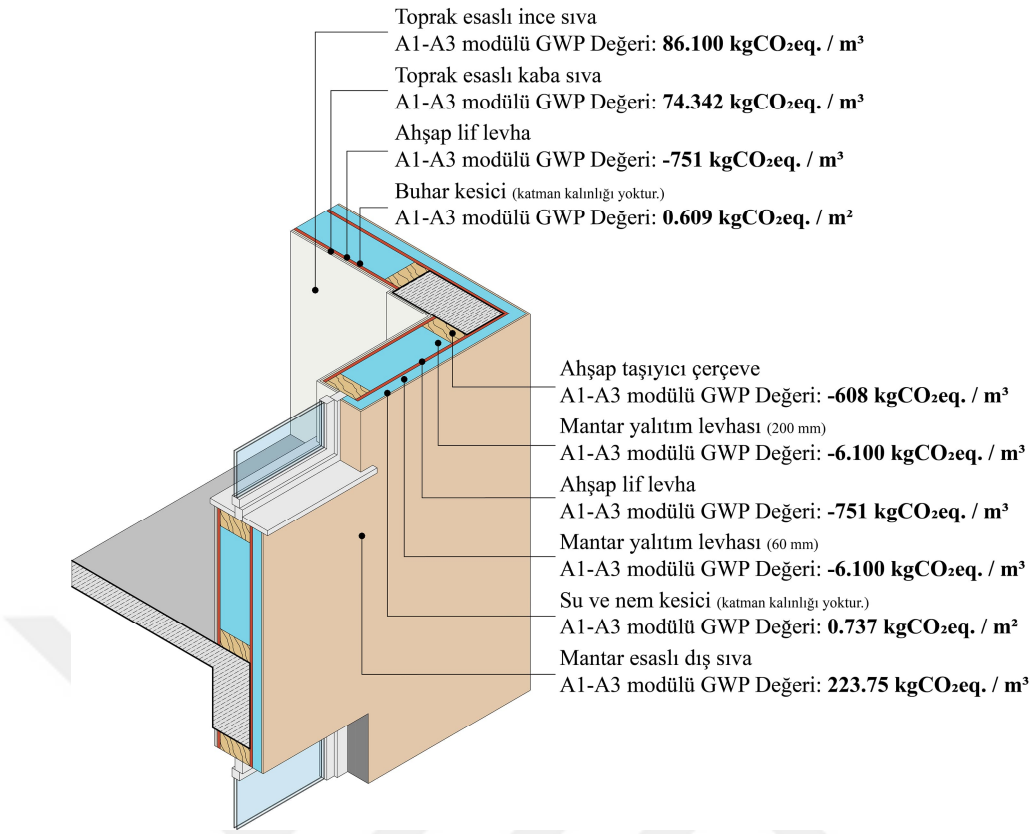
Çizelge 4.124. Mantar esaslı öneri kabuk modeli EnP-5 U değeri

Katman Yapı Malzemeleri	Katman kalınlığı **d(m)**	Isıl iletkenlik hesap değeri **λ (W/m.K)**	Isıl iletkenlik direnci **R (m^2.K/W)**	Isıl geçirgenlik katsayısı **U (W/m^2.K)**
$R_{iç}$			0,13	
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Buhar kesici		-		
Ahşap taşıyıcı çerçeve sistem		-		
Mantar yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,20	0,043	4,651	
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	
Mantar yalıtım levhası (dış yüzey)	0,06	0,043	1,395	
Su-nem kesici		-		
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,270	
$R_{dış}$			0,04	
		TOPLAM	**6,749**	**0,148**

0,148 W/m².K U değerine sahip EnP-5 modeli, doktora tez çalışması öneri kabuk modeli oluşumlarına ilişkin sınırlılık ve varsayımlar çerçevesinde belirlenmiş ilkelere uygunluğu tespit edilmiştir.

4.2.5.1. EnP-5 Gömülü karbon analizi

EnP-5 modeli için gömülü karbon değeri hesaplamasında kullanılmış olan yapı malzemeleri, birim m³ ve m² niceliklerindeki GWP değerleri Şekil 4.57'de dijital model üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 4.57. EnP-5 öneri kabuk modeli katmanları GWP değerleri

Gömülü karbon değeri hesaplamak için EnP-5 öneri kabuk modeli, yapı bilgi modellemesi yazılımında dijital ikizi bulunan mevcut konut yapısına uygulanmıştır. EnP-5 gömülü karbon analiz sonuçları Çizelge 4.125 ve Çizelge 4.126 yer almaktadır.

Çizelge 4.125. EnP-5 öneri kabuk modeli opak bileşenler GKA

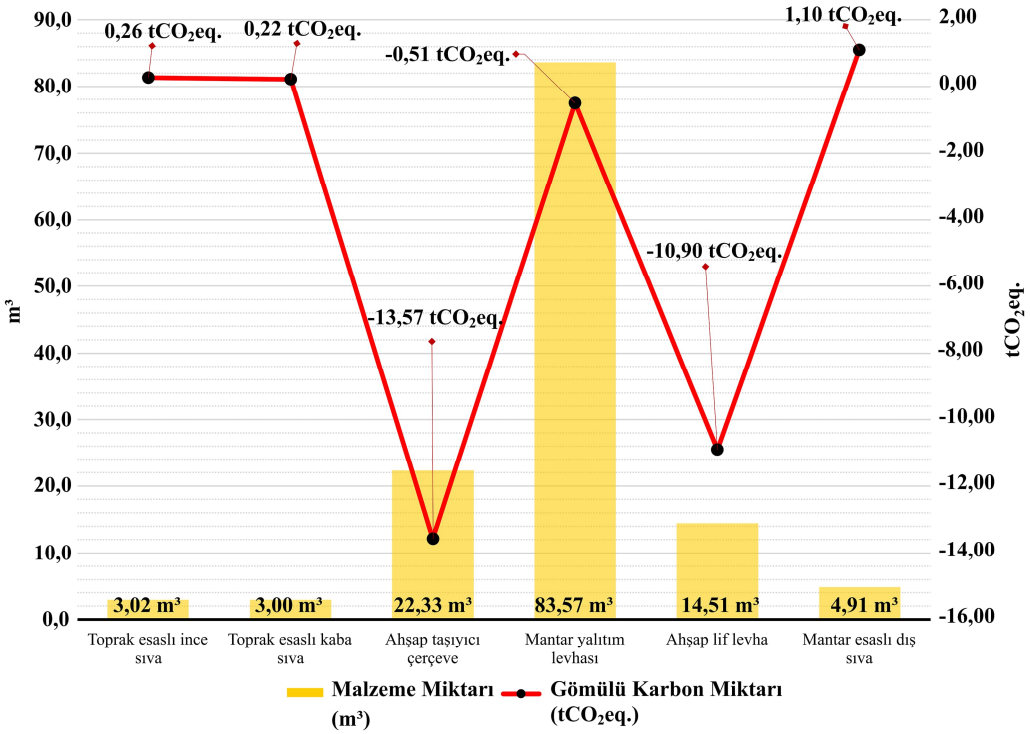
Katman Yapı Malzemeleri	**Malzeme Kalınlığı (mm)**	**Malzeme Miktarı (m^3)**	**Malzeme Miktarı (m^2)**	**Opak Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)**	**Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)**
Toprak esaslı ince sıva	10	3,0243217	-	86,100	260,4122
Toprak esaslı kaba sıva	10	2,9983488	-	74,342	222,9032
Buhar kesici	-	-	569,7282	0,609	346,9645
Ahşap taşıyıcı çerçeve	150	22,3250	-	-608,00	-13573,60
Mantar yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	200	53,5776564	-	-6,100	-326,8237
Mantar yalıtım levhası (dış yüzey)	60	29,9898200	-	-6,100	-182,9379
Ahşap lif levha (toplam değer alınmıştır.)	18	14,5108517	-	-751,00	-10897,6496
Su-nem kesici	-	-	569,7282	0,737	419,8897
Mantar esaslı dış sıva	10	4,9073984	-	223,75	1098,0304
			EnP-5 GKA-Düşey Kabuk Opak Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri		**-22632,811**

Çizelge 4.126. EnP-5 öneri kabuk modeli saydam bileşenler GKA

Pencere Adı-Boyutları	Pencere Adet	Yüzey Alanı (m^2)	Saydam Kabuk GWP (A1-A3 Modülü)	Gömülü Karbon Değeri ($kgCO_2eq.$)
P1 200x160	6	19,20	22,065	423,648
P2 160x160	12	30,72	22,065	677,837
P3 80x160	14	17,92	22,065	395,405
P4 60x60	6	2,16	22,065	47,660
P5 100x160	12	19,20	22,065	423,648
EnP-5 GKA-Düşey Kabuk Saydam Yüzeyler Toplam Gömülü Karbon Değeri				**1968,20**

Mevcut yapı düşey kabuk opak bileşeni olarak uygulanmış EnP-5 öneri kabuk modeli opak bileşenleri, atmosfere herhangi bir emisyon yapmak yerine, 22632,811 kg. sera etkisine neden olan $CO_2eq.$ gazları bünyesinde sakladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte EnP-5 öneri kabuk modeli saydam bileşenleri için 1968,20 $kgCO_2eq.$ sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. EnP-5 öneri kabuk modeli söz konusu bileşenleriyle uygulandığında, mevcut yapının inşası sürecinde salınmış olan $CO_2eq.$ gazlardan 20664,613 kg. miktarının atmosferden geri toplanmasını sağlanmıştır. Bir başka ifadeyle, EnP-5 öneri kabuk modeli mevcut yapı toplam gömülü karbon değerini -20664,613 $kgCO_2eq.$ kadar azaltmıştır. Hesaplamanın kolaylaştırılması amacıyla söz konusu değer ton miktarına dönüştürülerek ~-20,66 tCO2eq. olarak kabul edilmiştir.

Değişken katmanlarında kenevir lif yalıtım levhasının kullanıldığı EnP-5 öneri kabuk modeli mevcut yapı dış kabuğu olarak uygulandığında; 83,57 m^3 mantar yalıtım levha malzemesi, 22,33 m^2 ahşap taşıyıcı çerçeve malzemesi olan glulam malzemesi, 14,51 m^3 ahşap lif levha, 4,91 m^3 mantar esaslı sıva malzemesi ve 6,02 m^3 toprak esaslı sıva malzemesi kullanmaktadır. Söz konusu bu değerlere bağlı olarak EnP-5 öneri kabuk modeli katmanlarının bünyelerinde depolanmış olan $CO_2eq.$ gazlar miktarı; ahşap taşıyıcı çerçeve malzeme için -13,57 $tCO_2eq.$, ahşap lif levha malzeme için -10,90 $tCO_2eq.$ ve mantar yalıtım levha malzeme için -0,51 $tCO_2eq.$ olarak tespit edilmiştir. Ancak, toprak esaslı sıva malzemeler için 0,48 $tCO_2eq.$ ve mantar esaslı sıva malzemesi için 1,10 $tCO_2eq.$ olmak üzere toplam 1,58 $tCO_2eq.$ sera etkisine sahip gazlar atmosfere salınmıştır. Şekil 4.58'de EnP-5 katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin miktarları ile atmosferden toplanarak bünyelerinde saklanan ve atmosfere salınmış olan karbon değeri ifade edilmiştir.

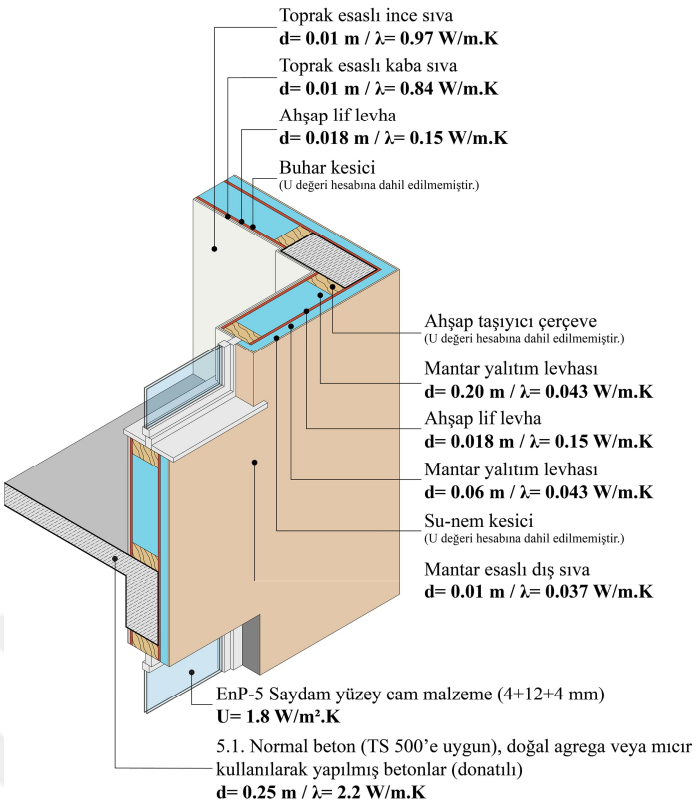


Şekil 4.58. EnP-5 öneri kabuk modeli opak yüzey gömülü karbon dağılımı

4.2.5.2. EnP-5 Kullanım karbon analizi

Mantar esaslı öneri kabuk modeli olan EnP-5 uygulanmış mevcut yapı için kullanım karbon değeri, söz konusu kabuk modelin uygulandığı yapının dış ortama açık duvar ve betonarme yüzeylerinden gerçekleşen ısı kaybına bağlı olarak hesaplamıştır. Düşük sıcaklıklı iç ortama açık yüzeyler (kabuk modeli duvar ve betonarme) ve yatay kabuk bileşenleri hali hazır durumuyla korunmuştur. Dolayısıyla değinilen bu kabuk bileşenlerinin ısı kaybı mevcut yapı için gerçekleştirilmiş olan analizlerden temin edilmiştir. Ayrıca, EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı için ısı kaybeden yüzey alanları da değişmemiştir. Bu nedenle daha önce gerçekleştirilmiş analizlerden sağlanmıştır.

Bununla birlikte, EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış yapıda kullanılan saydam yüzeyler mevcut yapı hali hazırda var olan ölçü ve büyüklük değerlerine bağlı olarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Ancak saydam yüzeyler için, TS 825 (2013) standardı gereği, pencere ısıl geçirgenlik direnci olan U_P değeri 1,80 W/m².K kabul edilerek ısı kaybı tespit edilmiştir. EnP-5 öneri kabuk modeli termofiziksel özellikleri Şekil 4.59'da belirtilmiştir.



Şekil 4.59. EnP-5 düşey yapı kabuğu katmanları termofiziksel özellikleri

EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kayıp değerleri Çizelge 4.127'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.127. EnP-5 öneri kabuk modeli ısı kayıpları

Isı Kaybeden Yüzeyler	Isı Kayıp Miktarı (W/K)
Dış ortama açık EnP-5 kabuk modeli duvar yüzeyleri (U=0,148 W/m².K))	47,91
Dış ortama açık EnP-5 kabuk modeli betonarme yüzeyler (U=0,277 W/m².K)	66,78
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık dolgu duvar yüzeyleri (U=0,335x0,5 W/m².K)	14,63
MY-Düşük sıcaklıklı ortama açık betonarme yüzeyleri (U=0,445x0,5 W/m².K)	1,00
MY-Isıtılmayan taban üzeri düşük taban döşeme yüzeyleri (U=0,363x0,8 W/m².K)	8,79
MY-Isıtılmayan taban üzeri normal taban döşeme yüzeyleri (U=0,401x0,8 W/m².K)	34,25
MY-Isıtılmayan taban üzeri ıslak taban döşeme yüzeyleri (U=0,414x0,8 W/m².K)	5,95
MY- Isıtılan hacim üzeri tavan döşeme yüzeyleri (U=0,241x0,8 W/m².K)	44,28
EnP-5 kabuk modeli saydam yüzeyler (U=1,8 W/m².K)	207,07
TOPLAM	**430,66**

EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda, iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kayıpları toplamı 430,66 W/K olarak bulunmuştur. Söz konusu kayba ek olarak, mevcut yapı analizlerinde belirlenmiş olan 352,47 W/K havalandırma yoluyla gerçekleşen kayıpta eklenerek EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış yanının özgül ısı kaybı 783,13 W/K olarak bulunmuştur. Bu verilerle birlikte, EnP-5 modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık ısıtma enerji ihtiyacı Çizelge 4.128'de hesaplamıştır.

Çizelge 4.128. EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

		Isı Kayıpları				**Isı Kazançları**					
Aylar	Özgül Isı Kaybı **H (W/K)**	Sıcaklık Farkı **T_i-T_d (K, °C)**			Isı Kayıpları **H . ($T_{iç}$-$T_{dış}$) (W)**	İç Isı Kazançları **ϕ_i (W)**	Güneş Enerjisi Kazançları **ϕ_s (W)**	Toplam Isı Kazançları **$\phi_T = \phi_i+\phi_s$ (W)**	KKO (kazanç kayıp oranı) **(ϕ_i+ϕ_s)/ H.(T_i-T_d)** KKO ≥2,5 olduğunda ısı kaybı yoktur.	Kazanç Kullanım Faktörü **$\eta=1-e^{-1/KKO}$**	Isıtma Enerjisi Miktarı **Q_{ay}, (kJ)**
		$T_{iç}$	**$T_{dış}$**	**$T_{iç}$-$T_{dış}$**							
Ocak	783,13	19	-0,3	19,3	17947	3488	1860,1	5348,1	0,35	0,94	26144852
Şubat		19	0,1	18,9	17575		2356,6	5844,6	0,39	0,92	24426830
Mart		19	4,1	14,9	13855		2856,6	6344,6	0,54	0,84	16432034
Nisan		19	10,1	8,9	8276		3278,4	6766,4	0,97	0,64	6841661
Mayıs		19	14,4	4,6	4277		3759,4	7247,4	2,01	0,39	2010092
Haziran		19	18,5	0,5	465		3945,6	7433,6	18,96	-	-
Temmuz		19	21,7	-2,7	-		-	-	-	-	-
Ağustos		19	21,2	-2,2	-		-	-	-	-	-
Eylül		19	17,2	1,8	1674		3014,7	6502,7	4,61	-	-
Ekim		19	11,6	7,4	6881		2403,9	5891,9	1,02	0,62	5552169
Kasım		19	5,6	13,4	12461		1793,6	5281,6	0,5	0,86	15427217
Aralık		19	1,3	17,7	16459		1621,7	5109,7	0,37	0,93	23610522

Q_{ay}= [H. ($T_{iç}$-$T_{dış}$)-η. (ϕ_i+ϕ_s)] $_{ay}$. t (J) (1 kJ = 0,278 x 10^{-3} kWh) **$Q_{yıl} = \sum Q_{ay}$=** 120445376 kJ

EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapının yıllık olarak ısıtma enerjisi amaçlı kullanması gereken en az enerji miktarı 120445376 kJ olarak bulunmuştur. Isıtma amaçlı gerekli olan söz konusu değer birim çevirmesi yapıldığında yaklaşık olarak 33484 kWh (~33483,81449) etmektedir. Birim hacim başına düşen yıllık ısıtma enerjisi miktarı ($Q_{yıl}/V_{brüt}$) 15,36 kWh/m^3.yıl olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sadece ısıtma enerji kullanımını kapsayan, ısıtılan brüt döşeme alanları başına düşen ($Q_{yıl}/A_{DöşemeBrüt}$)

enerji kullanım yoğunluğu (EUI-energy use intensity) 48,64 kWh/m^2.yıl olarak bulunmuştur.

EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda en az konfor koşullarının sağlanabilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan enerji miktarı 120445376 kJ eşittir. Kullanım karbonu değerinin hesaplanabilmesi için söz konusu değerin birim dönüşümü yapılmıştır (Çizelge 4.129).

Çizelge 4.129. EnP-5 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı birim dönüşümü

Isıtma enerjisi TJ (terajoule) karşılığı	0,120 TJ (1 kJ = 10^{-9} TJ) (0,120445 TJ ~ 0,120 TJ olarak alınmıştır.)
Isıtma enerjisi GJ (gigajoule) karşılığı	120,45 GJ (1 kJ = 10^{-6} GJ) (120,445 GJ ~ 120,45 GJ olarak alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre mevcut yapı için yıllık ısıtma amacıyla ihtiyaç duyulan doğalgaz miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.130).

Çizelge 4.130. EnP-5 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi için gerekli doğalgaz miktarı

IPCC veri tabanı	2,51 ton (2,50833 ~ 2,51 ton alınmıştır.)
DEFRA veri tabanı	2,65 ton (2,64598 ~ 2,65 ton alınmıştır.)

IPCC ve DEFRA veri tabanlarına göre EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda yıllık ısıtma amacıyla kullanılan doğalgaz kaynaklı kullanım karbonu değerleri $tCO_2eq.$ olarak bulunmuştur. Söz konusu değerlerin ortalaması alınarak, EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu kaynaklı sera etkisi oluşturan $CO_2eq.$ gazlar miktarı bulunmuştur (Çizelge 4.131).

Çizelge 4.131. EnP-5 kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı yıllık ısıtma enerjisi kullanım karbonu miktarları

	CO_2	**CH_4**	**N_2O**
IPCC veri tabanı	6754,44	12,642	3,732
Toplam	6,77 $tCO_2eq.$ (6770,81 $kgCO_2eq.$ ~ 6,77 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
DEFRA veri tabanı	6767,20	10,19	3,15
Toplam	6,78 $tCO_2eq.$ (6780,53 $kgCO_2eq.$ ~ 6,78 $tCO_2eq.$ alınmıştır.)		
EnP-5 Kullanım Karbonu Ortalama Değeri	**6,775 $tCO_2eq.$**		

Isıtma amacıyla EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapıda bir yıllık kullanılan doğalgaz miktarına bağlı olarak 6,775 tCO_2eq. gaz sera etkisi oluşturan emisyon gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sadece yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybını telafi etmek için gerekli olan en az enerji kullanımıyla oluşan CO_2eq. gazlar emisyon miktarı olan söz konusu değer, EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri karşılığı olmuştur.

4.2.5.3. EnP-5 Yoğuşma analizi

EnP-5 öneri kabuk modeli katmanlarında su buharı kaynaklı olumsuz bir etkinin gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit edilmesi amacıyla yoğuşma analizi gerçekleştirilmiştir. Buhar molekülleri de ısı akımı gibi davranmaktadır. Buna bağlı olarak iç ve dış sıcaklık farkının en fazla olduğu, en kötü durumda kabul edilen en soğuk ayda, yoğuşma olmaması halinde diğer aylarda da yoğuşma olmaz. Dolayısıyla her ay için yapılan yoğuşma analizi, çalışma kapsamında, en kötü durum olarak ifade edilen en soğuk ay için gerçekleştirilmiştir.

Yoğuşma analizi, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı içerisinde tariflendiği şekilde yapılmıştır. Çizelge 4.132'de yoğuşma analizi için gerekli olan iç (t_i) ve dış (t_d) sıcaklık dereceleri, iç (ψ_i) ve dış (ψ_d) bağıl nem değerleri ve iç (R_i) ve dış (R_d) yüzeysel ısıl iletim dirençleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.132. EnP-5 yoğuşma analizi hesaplama verileri

İç sıcaklık derecesi-t_i (°C) (konut yapılarında 19°'dir. Yoğuşma hesabında +1 fazlası alınır.)	20
Dış sıcaklık derecesi -t_d (°C) (TS 825 Ek-B.2 Ocak ayı ortalama dış sıcaklık derecesi)	-0,3
İç ortamın bağıl nemi-ψ_i (TS 825 doğal havalandırma yapılan binalar)	%65
Dış ortamın bağıl nemi-ψ_d (TS 825 Ek-G Konya ili Ocak ayı ortalama bağıl nemi)	%76
İç yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim m².K/W)	0,25
Dış yüzeysel ısıl iletim direnci-R_i (TS 825 standardı F.2.4.6. madde tarifi, birim m².K/W)	0,04

Yoğuşma analizi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adım, EnP-5 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve her bir katmanının iki yüzü arasındaki sıcaklık değerleri

tespit edilmiştir. İkinci adımda, iç ve dış ortamında bağıl nem değerlerine bağlı olarak doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı hesaplanmıştır. İkinci adımda gerçekleştirilmiş hesaplamalar için veriler, 30,9°C ile -20,9°C arasındaki sıcaklıklardaki doymuş buhar basıncı (P_s) değerlerini gösteren TS 825 standardı Çizelge F.1'den temin edilmiştir. Yapı kabuklarında yoğuşma olup olmadığı, grafik haline getirilen kabuk kesiti üzerinde doymuş ve gerçek buhar basıncı eğrilerinin kesişip kesişmediğine göre karar verilmektedir. Dolayısıyla üçüncü adımda da elde edilen bütün veriler, grafik haline getirilmiş (Glaser grafik metodu) olan EnP-5 öneri kabuk modeli kesiti üzerine işlenmiş ve yoğuşma kontrolü yapılmıştır.

EnP-5 öneri kabuk modeli katmanlarında yer alan yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabası kalınlık değerleri (S_d) Çizelge 4.133'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.133. EnP-5 öneri kabuk modeli katmanları fiziksel özellikleri

Katman Yapı Malzemeleri	**d** (m)	**λ** (W/m.K)	**d/λ** m².K/W	**μ**	**S_d** (μ.d)
R_i			0,25		-
Toprak esaslı ince sıva	0,01	0,84	0,012	1,28	0,0128
Toprak esaslı kaba sıva	0,01	0,97	0,01	1,40	0,014
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Buhar kesici	-	-	-	-	2000
Mantar yalıtım levhası (ahşap taşıyıcı çerçeve arası)	0,20	0,043	4,651	10	2,000
Ahşap lif levha	0,018	0,15	0,12	70	1,26
Mantar yalıtım levhası (dış yüzey)	0,06	0,043	1,395	10	0,600
Su-nem kesici	-	-	-	-	0,035
Mantar esaslı dış sıva	0,01	0,037	0,27	3	0,03
R_d			0,04		
		TOPLAM	**6,8690**		**2005,2118**

EnP-5 öneri kabuk modeli için ısı akış yoğunluğu ve katmanları arası sıcaklık farklı Çizelge 4.134'te ifade edilmiştir.

Çizelge 4.134. EnP-5 öneri kabuk modeli ısı akış yoğunluğu ve katmanlar arası sıcaklık farkı

$Q=U.(t_i-t_d)$	0,14558 x [20-(-0,3)] 2,95531 W/m²	
δt_{iy} =	2,95531 x 0,25 =	0,738827
δt_1 =	2,95531 x 0,012 =	0,035182
δt_2 =	2,95531 x 0,01 =	0,030467
δt_3 =	2,95531 x 0,12 =	0,354637
δt_4 =	2,95531 x 4,167 =	13,745620
δt_5 =	2,95531 x 0,12 =	0,354637

δt_6 =		2,95531 x 1,940 =	4,123686
δt_7 =		2,95531 x 0,27 =	0,798732
δt_{dy} =		2,95531 x 0,04 =	0,118212
t_{iy}=	t_i-δt_{iy}	20-0,738397=	**19,261173°C**
t_1=	t_{iy}-δt_1	19,261173-0,035182=	**19,225991°C**
t_2=	t_1-δt_2	19,225991-0,030467=	**19,195524°C**
t_3=	t_2-δt_3	19,195524-0,354637=	**18,840887°C**
t_4=	t_3-δt_4	18,840887-13,745620=	**5,095267°C**
t_5=	t_4-δt_5	5,095267-0,354637=	**4,740630°C**
t_6=	t_5-δt_6	4,740630-4,123686=	**0,616944°C**
t_{dy}=	t_6-δt_7	0,616944-0,798732=	**-0,181788°C**
t_d=	t_7-δt_{dy}	-0,181788-0,118212	**-0,300000°C**

Isı akış yoğunluğu tespit edilen EnP-5 öneri kabuk modeli katmanları için buhar basınç dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplamanın gerçekleşebilmesi amacıyla P_i (t_i sıcaklığına bağlı iç ortam buhar basıncı) ve P_d (t_d sıcaklığına bağlı dış ortam buhar basıncı) değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir (Çizelge 4.135).

Çizelge 4.135. EnP-5 öneri kabuk modeli iç ve dış yüzey gerçek buhar basınç değerleri

P_i	Ps_i x Ψ_i (Ps_i değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	2337x0,65=**1519,05** Pa
P_d	Ps_d x Ψ_d (Ps_d değeri TS 825 Çizelge F.1. sıcaklık değerlerine göre alınmıştır.)	401x0,76=**304,76** Pa

Bağıl nem ve sıcaklık farkından kaynaklanan buhar basıncı değişimleri, EnP-5 öneri kabuk modeli her bir katmanı hesaplanmış ve Çizelge 4.136'da belirtilmiştir.

Çizelge 4.136. EnP-5 öneri kabuk modeli katmanlar arası gerçek buhar basıncı değişimi ve tespiti

δp_1	$[(P_i-P_d)x(\mu_1.d_1)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,0128)] / 2005,2118	0,007751 Pa
δp_2	$[(P_i-P_d)x(\mu_2.d_2)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,014)] / 2005,2118	0,008478 Pa
δp_3	$[(P_i-P_d)x(\mu_3.d_3)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(1,26)] / 2005,2118	0,763014 Pa
δp_4	$[(P_i-P_d)x(\mu_4.d_4)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(2000)] / 2005,2118	1211,133906 Pa
δp_5	$[(P_i-P_d)x(\mu_5.d_5)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(2,00)] / 2005,2118	1,211134 Pa
δp_6	$[(P_i-P_d)x(\mu_6.d_6)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(1,26)] / 2005,2118	0,763014 Pa
δp_7	$[(P_i-P_d)x(\mu_7.d_7)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,60)] / 2005,2118	0,363340 Pa
δp_8	$[(P_i-P_d)x(\mu_8.d_8)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,035)] / 2005,2118	0,021195 Pa
δp_9	$[(P_i-P_d)x(\mu_9.d_9)] / \sum\mu.d$ [(1214,29)x(0,03)] / 2005,2118	0,018167 Pa

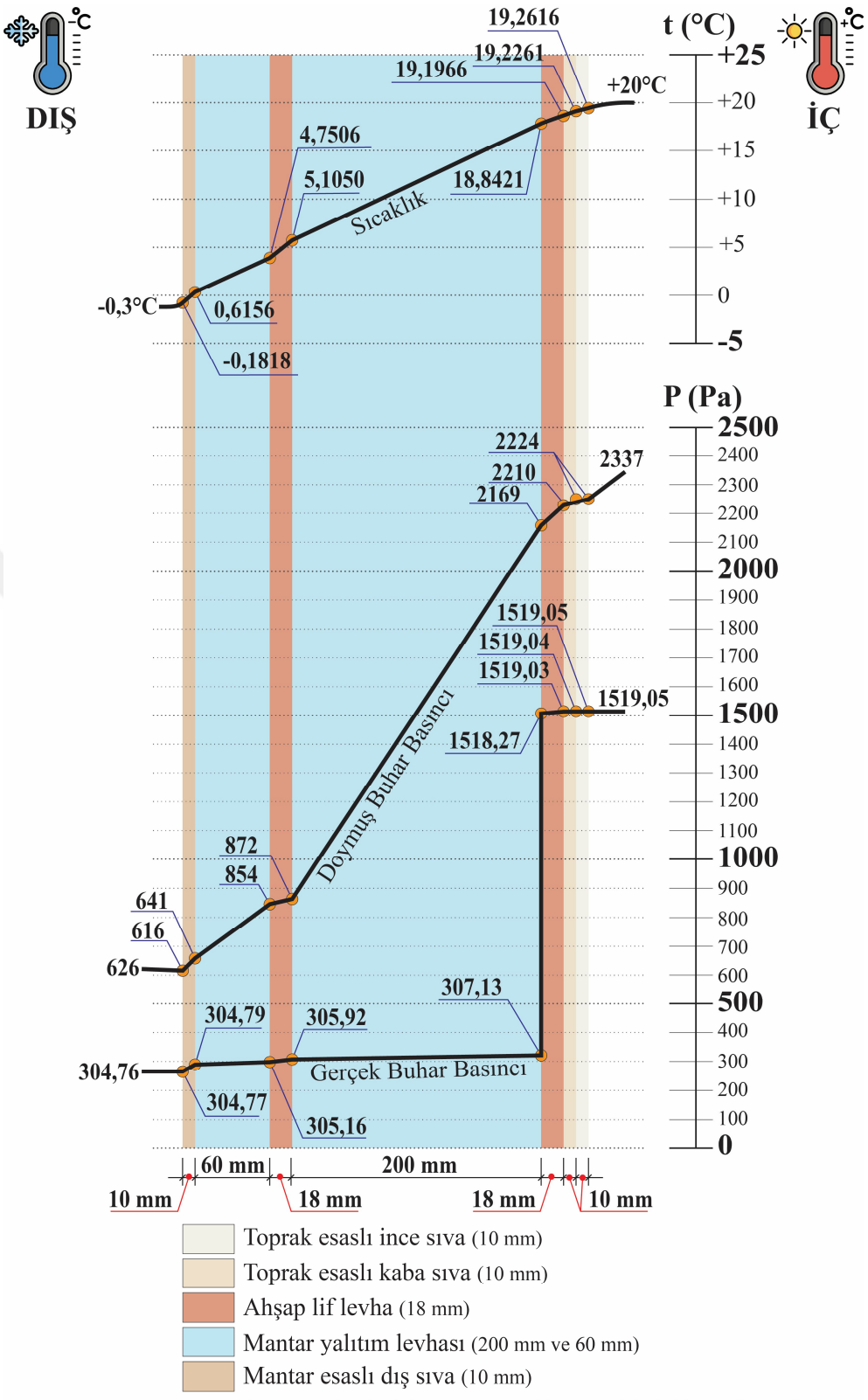
P_i	-	**1519,05 Pa**
P_{iy}	-	**1519,05 Pa**
P_1	P_{iy}- δp_1= 1519,05-0,007751=	**1519,042249 Pa**
P_2	P_1- δp_2=1519,042249-0,008478=	**1519,033771 Pa**
P_3	P_2- δp_3=1519,033771-0,763014=	**1518,270756 Pa**
P_4	P_3- δp_4=1518,270756-1211,133906=	**307,136850 Pa**
P_5	P_4- δp_5=307,136850-1,211134=	**305,925716 Pa**
P_6	P_5- δp_6=305,925716-0,763014=	**305,162702 Pa**
P_7	P_6- δp_7=305,162702-0,363340=	**304,799362 Pa**
P_8	P_7- δp_8=304,799362-0,021195=	**304,778167 Pa**
P_{dy}	P_8- δp_9=304,778167-0,018167 =	**304,760000 Pa**
P_d	-	**304,760000 Pa**

Glaser grafik metoduyla yoğuşma kontrolü yapılabilmesi amacıyla EnP-5 öneri kabuk modelini oluşturan katmanların sıcaklık değerleri, bu sıcaklık değerlerine göre doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı miktarları aşağıdaki Çizelge 4.137'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.137. EnP-5 öneri kabuk modeli katmanları sıcaklık ve buhar basınç değerleri

Katman Yapı Malzemeleri		**t (°C)**	**Doymuş Buhar Basıncı (Pa)**	**Gerçek Buhar Basıncı (Pa)**
	t_i	20	2337 (Ps_i)	1519,05 (P_i)
Toprak esaslı ince sıva iç yüzü (t_{iy})		19,261173	2224 (Ps_{iy})	1519,05 (P_{iy})
Toprak esaslı ince sıva dış yüzü (t_1)		19,225991	2224 (Ps_1)	1519,042249 (P_1)
Toprak esaslı kaba sıva dış yüzü (t_2)		19,195524	2210 (Ps_2)	1519,033771 (P_2)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_3)		18,840887	2169 (Ps_3)	1518,270756 (P_3)
Buhar kesici		-	2169 (Ps_4)	307,136850 (P_4)
Mantar yalıtım levhası dış yüzü (t_4)		5,095267	872 (Ps_5)	305,925716 (P_5)
Ahşap lif levha dış yüzü (t_5)		4,740630	854 (Ps_6)	305,162702 (P_6)
Mantar yalıtım levhası dış yüzü (t_6)		0,616944	641 (Ps_7)	304,799362 (P_7)
Su-nem kesici		-	641 (Ps_8)	304,778167 (P_8)
Mantar esaslı sıva dış yüzü (t_{dy})		-0,181788	616 (Ps_{dy})	304,760 (P_{dy})
	t_d	-0,30000	626 (Ps_d)	304,760 (P_d)

EnP-5 öneri kabuk modeli katmanlarında, gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda sıcaklık ve bağıl nem farkından kaynaklanan buhar basınç değişimlerinin herhangi bir yoğuşmaya yol açmadığı belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı iç mekânındaki havada bulunan su buharı, kabuk katmanlarında herhangi bir olumsuz etki bırakmadan atmosfere dahil olmaktadır. Yoğuşma analiz sonuçlarının yer aldığı EnP-5 öneri kabuk model kesit grafiği Şekil 4.60'da yer almaktadır.



Not: Katman kalınlığı olmayan Buhar kesici, Su-nem kesici kesit içerisinde ifade edilmemiştir.

Şekil 4.60. EnP-5 öneri kabuk modeli yoğuşma analizi glaser grafiği

4.3. Bulguların Değerlendirilmesi

Bu bölümde, doktora tezi araştırma problemine çözüm önerisi olarak geliştirilen ana hipotez ve alt hipotezler test edilmiştir. Ana hipotez ve her bir alt hipotezlerin sınanması, alan çalışması doğrultusunda sayısallaştırılmış olan mevcut yapı verileri ve doktora tezinde geliştirilmiş olan öneri kabuk modellerine ilişkin veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, soru haline getirilmiş olan araştırma problemine verilen yanıtlar olan hipotezlerin sadece sınaması gerçekleştirilmiş olmayacak aynı zamanda doktora çalışmasının önemi de açıkça ispat edilecektir.

4.3.1. H1 hipotez sınaması

Ana hipotez olan H1 hipotezi, "Yapılarda taşıyıcı sistem yüksek miktarda gömülü karbon içermektedir. Enerji verimliliğini önceleyen yeni yapılar üretmek yerine mevcut yapıların strüktürü korunarak biyolojik esaslı malzemelerle düşey kabuk değişiminin yapılması, hem atmosfere salınan karbon miktarını azaltır hem de kullanım enerjisi verimliliği sağlar." olarak tanımlanmıştı. Söz konusu tanım, Bölüm 1.2'de matematiksel bir denklem haline dönüştürülerek ifade edilmişti. Doktora çalışması ana hipotezi H1'in doğruluk sınaması, bu formülasyon üzerinden gerçekleştirilmiştir. Denklem için gerekli olan gömülü karbon değerleri Çizelge 4.138'de ve kullanım karbonu değerleri ise Çizelge 4.139'da ifade edilmiştir.

Çizelge 4.138. H1 hipotezi doğruluk sınaması gömülü karbon değerleri

Bileşen Adı	Gömülü Karbon Değeri ($tCO_2eq.$)
Mevcut yapı taşıyıcı sistem	97,96
Mevcut yapı sökülen kabuk	26,46
Mevcut yapıya uygulanan EnP-1 öneri kabuk modeli	-27,67
Mevcut yapıya uygulanan EnP-2 öneri kabuk modeli	-23,77
Mevcut yapıya uygulanan EnP-3 öneri kabuk modeli	-16,84
Mevcut yapıya uygulanan EnP-4 öneri kabuk modeli	-19,05
Mevcut yapıya uygulanan EnP-5 öneri kabuk modeli	-20,66

Çizelge 4.139. H1 hipotezi doğruluk sınaması kullanım karbonu değerleri

Bileşen Adı	Kullanım Karbonu Değeri ($tCO_2eq.$)
Mevcut yapı	8,695
EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı	6,775
EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı	6,615
EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı	6,625
EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı	6,535
EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı	6,775

Her bir öneri kabuk modeli sonuçları ayrı ayrı ele alınarak, matematiksel olarak formüle edilmiş H1 hipotezi sonuçlarının doğrulu test edilmiştir.

- **EnP-1 öneri kabuk modeli sonuçları**

Çizelge 4.140. EnP-1 öneri kabuk modeli verilerine göre H1 hipotez testi

-27,67 $tCO_2eq.$ (mevcut yapıya uygulanan EnP-1 öneri kabuk modeli gömülü karbon değeri) + **6,775 $tCO_2eq.$** (EnP-1 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri) + **26,46 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı sökülen düşey kabuk gömülü karbon değeri)	<	**97,96 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı taşıyıcı sistem gömülü karbon değeri) + **8,695 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı kullanım karbonu değeri)
2,565 $tCO_2eq.$		**106,655 $tCO_2eq.$**

Mevcut yapıya uygulanan saman esaslı EnP-1 öneri kabuk modeli düşük gömülü karbon ve kullanım karbonu değerleri sayesinde H1 hipotezi desteklenmiştir. Kabuk değişimi amacıyla yok edilecek olan mevcut yapı düşey kabuk bileşeni üretimi amacıyla atmosfere salınmış yüksek $CO_2eq.$ gaz değerlerine rağmen, EnP-1 öneri kabuk modeli aracılığıyla mevcut yapının enerji verimliliğinin artırılmasını sağlanmıştır.

- **EnP-2 öneri kabuk modeli sonuçları**

Çizelge 4.141. EnP-2 öneri kabuk modeli verilerine göre H1 hipotez testi

-23,77 $tCO_2eq.$ (mevcut yapıya uygulanan EnP-2 öneri kabuk modeli gömülü karbon değeri) + **6,615 $tCO_2eq.$** (EnP-2 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri) + **26,46 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı atılan düşey kabuk gömülü karbon değeri)	<	**97,96 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı taşıyıcı sistem gömülü karbon değeri) **+** **8,695 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı kullanım karbonu değeri)
9,305 $tCO_2eq.$		**106,655 $tCO_2eq.$**

Mevcut yapıya uygulanan kenevir esaslı EnP-2 öneri kabuk modeli düşük gömülü karbon ve kullanım karbonu değerleri sayesinde H1 hipotezi desteklenmiştir. Kabuk değişimi amacıyla yok edilecek olan mevcut yapı düşey kabuk bileşeni üretimi amacıyla atmosfere salınmış yüksek $CO_2eq.$ gaz değerlerine rağmen, EnP-2 öneri kabuk modeli aracılığıyla mevcut yapının enerji verimliliğinin artırılmasını sağlanmıştır.

- **EnP-3 öneri kabuk modeli sonuçları**

Çizelge 4.142. EnP-3 öneri kabuk modeli verilerine göre H1 hipotez testi

-16,84 $tCO_2eq.$ (mevcut yapıya uygulanan EnP-3 öneri kabuk modeli gömülü karbon değeri) + **6,625 $tCO_2eq.$** (EnP-3 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri) + **26,46 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı atılan düşey kabuk gömülü karbon değeri)	<	**97,96 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı taşıyıcı sistem gömülü karbon değeri) **+** **8,695 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı kullanım karbonu değeri)
16,245 $tCO_2eq.$		**106,655 $tCO_2eq.$**

Mevcut yapıya uygulanan koyun yünü esaslı EnP-3 öneri kabuk modeli düşük gömülü karbon ve kullanım karbonu değerleri sayesinde H1 hipotezi desteklenmiştir. Kabuk değişimi amacıyla yok edilecek olan mevcut yapı düşey kabuk bileşeni üretimi amacıyla atmosfere salınmış yüksek $CO_2eq.$ gaz değerlerine rağmen, EnP-3 öneri kabuk modeli aracılığıyla mevcut yapının enerji verimliliğinin artırılmasını sağlanmıştır.

- **EnP-4 öneri kabuk modeli sonuçları**

Çizelge 4.143. EnP-4 öneri kabuk modeli verilerine göre H1 hipotez testi

-19,05 $tCO_2eq.$ (mevcut yapıya uygulanan EnP-4 öneri kabuk modeli gömülü karbon değeri) + **6,535 $tCO_2eq.$** (EnP-4 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri) + **26,46 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı atılan düşey kabuk gömülü karbon değeri)	<	**97,96 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı taşıyıcı sistem gömülü karbon değeri) **+** **8,695 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı kullanım karbonu değeri)
13,945 $tCO_2eq.$		**106,655 $tCO_2eq.$**

Mevcut yapıya uygulanan ahşap esaslı EnP-4 öneri kabuk modeli düşük gömülü karbon ve kullanım karbonu değerleri sayesinde H1 hipotezi desteklenmiştir. Kabuk değişimi amacıyla yok edilecek olan mevcut yapı düşey kabuk bileşeni üretimi amacıyla atmosfere salınmış yüksek $CO_2eq.$ gaz değerlerine rağmen, EnP-4 öneri kabuk modeli aracılığıyla mevcut yapının enerji verimliliğinin artırılmasını sağlanmıştır.

- **EnP-5 öneri kabuk modeli sonuçları**

Çizelge 4.144. EnP-5 öneri kabuk modeli verilerine göre H1 hipotez testi

-20,66 $tCO_2eq.$ (mevcut yapıya uygulanan EnP-5 öneri kabuk modeli gömülü karbon değeri) + **6,775 $tCO_2eq.$** (EnP-5 öneri kabuk modeli uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değeri) + **26,46 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı atılan düşey kabuk gömülü karbon değeri)	<	**97,96 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı taşıyıcı sistem gömülü karbon değeri) **+** **8,695 $tCO_2eq.$** (mevcut yapı kullanım karbonu değeri)
12,575 $tCO_2eq.$		**106,655 $tCO_2eq.$**

Mevcut yapıya uygulanan mantar esaslı EnP-5 öneri kabuk modeli düşük gömülü karbon ve kullanım karbonu değerleri sayesinde H1 hipotezi desteklenmiştir. Kabuk değişimi amacıyla yok edilecek olan mevcut yapı düşey kabuk bileşeni üretimi amacıyla atmosfere salınmış yüksek $CO_2eq.$ gaz değerlerine rağmen, EnP-5 öneri kabuk modeli aracılığıyla mevcut yapının enerji verimliliğinin artırılmasını sağlanmıştır.

4.3.2. H2 hipotez sınaması

Çalışmanın alt hipotezlerinden biri olan H2 hipotezi, “Yaklaşık ±%1 farkla U (W/m².K) değerine sahip farklı biyolojik esaslı yapı malzemelerinden üretilmiş öneri kabuk modelleri değişken gömülü karbon değerine sahiptir.” olarak tanımlanmıştı. Sabit katmanları aynı ve değişken katmanları farklı malzemelerden oluşan öneri kabuk modelleri U değerleri ve mevcut yapıya uygulanmış haliyle toplam gömülü karbon değerleri Çizelge 4.145’te ifade edilmiştir.

Çizelge 4.145. Öneri kabuk modelleri U değerleri ve gömülü karbon miktarları

Öneri Kabuk Adı	Değişken Katman Malzemesi	U Değeri W/m².K	Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$
EnP-1	Saman	0,148	-27,67
EnP-2	Kenevir	0,149	-23,77
EnP-3	Koyun yünü	0,149	-16,84
EnP-4	Ahşap	0,147	-19,05
EnP-5	Mantar	0,148	-20,66

En çok ±%1 farklı U değerlerine sahip öneri kabuk modelleri değişken katmanlarında yer alan biyolojik esaslı yapı malzemesi toplam gömülü karbon değerini oldukça farklılaşmasına neden olmuştur. Bünyesinde en çok karbon depolayabilen öneri kabuk modeli 27,67 tCO2eq. değeriyle, saman esaslı değişken katmanı olan EnP-1 öneri kabuk modeli olmuştur. Kenevir esaslı değişken katmanı olan EnP-2 öneri kabuk modeli, saman esaslı EnP-1 göre %14,09 daha az karbonu bünyesinde saklamıştır. Koyun yünü esaslı değişken katmanı olan EnP-3 öneri kabuk modeli, saman esaslı EnP-1 göre %39,14 daha az karbonu bünyesinde saklamıştır. Ahşap esaslı değişken katmanı olan EnP-4 öneri kabuk modeli, saman esaslı EnP-1 göre %31,15 daha az karbonu bünyesinde saklamıştır. Mantar esaslı değişken katmanı olan EnP-5 öneri kabuk modeli, saman esaslı EnP-1 göre %25,33 daha az karbonu bünyesinde saklamıştır.

Yapı kabuğu kullanımında toplam ısıl geçirgenlik katsayıları benzer olsa bile farklı biyolojik esaslı yapı malzemeleri, bünyelerinde farklı miktarda karbon depolamıştır. Dolayısıyla doktora araştırması kapsamında tespit edilen söz konusu değerler neticesinde, H2 hipotezi desteklenmiştir.

4.3.3. H3 hipotez sınaması

Çalışmanın alt hipotezlerinden biri olan H3 hipotezi, "Mevcut yapıların düşey kabuk U (W/m².K) değerinde gerçekleştirilen iyileştirme kullanım karbonu değerini azaltarak enerji verimliliği sağlar." olarak tanımlanmıştı. Çalışmanın sınırlılıkları ve varsayımları doğrultusunda geliştirilmiş olan öneri kabuk modelleri U değerleri, öneri kabuk modellerinin mevcut yapıya uygulandığı zaman gerçekleşmiş olan kullanım karbonu değerleri, mevcut yapının hali hazır düşey kabuğunun U değeri ve mevcut yapının hali hazır kullanım karbonu değerleri Çizelge 4.146'da belirtilmiştir. Bununla birlikte, Çizelge 4.146'da mevcut yapı hali hazır kullanım karbonu değerine göre öneri kabuk modelleri uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.146. Farklı düşey kabuklar U değerleri ve kullanım karbonu miktarları

Düşey Kabuk Bileşeni	**U değeri W/m².K**	**Kullanım Karbonu Miktarı $tCO_2eq.$**	**Azalış Miktarı $tCO_2eq.$ %**
Mevcut yapı hali hazır düşey kabuk	0,345 (dolgu duvar yüzeyi)	8,695 (toplam değer)	-
EnP-1 uygulanmış mevcut yapı	0,148 (dolgu duvar yüzeyi)	6,775 (toplam değer)	**1,92** (mevcut duruma göre **%22,08** azalış vardır.)
EnP-2 uygulanmış mevcut yapı	0,149 (dolgu duvar yüzeyi)	6,615 (toplam değer)	**2,08** (mevcut duruma göre **%23,92** azalış vardır.)
EnP-3 uygulanmış mevcut yapı	0,149 (dolgu duvar yüzeyi)	6,625 (toplam değer)	**2,07** (mevcut duruma göre **%23,80** azalış vardır.)
EnP-4 uygulanmış mevcut yapı	0,147 (dolgu duvar yüzeyi)	6,535 (toplam değer)	**2,16** (mevcut duruma göre **%24,82** azalış vardır.)
EnP-5 uygulanmış mevcut yapı	0,148 (dolgu duvar yüzeyi)	6,615 (toplam değer)	**1,92** (mevcut duruma göre **%22,08** azalış vardır.)

Öneri kabuk modellerinin mevcut yapı düşey kabuğu olması durumunda, kullanım karbonu değerlerinin azaltıldığı tespit edilmiştir. En az %22,08 oranında (1,92 $tCO_2eq.$) azalış varken en çok %24,82 oranında (2,16 $tCO_2eq.$) gerçekleşmiştir.

Mevcut yapıların düşey kabuk U değerlerindeki iyileşme kullanım karbonu miktarını da azaltmıştır. Dolayısıyla doktora araştırması kapsamında tespit edilen söz konusu değerler neticesinde, H3 hipotezi desteklenmiştir.

4.3.4. H4 hipotez sınaması

Çalışmanın alt hipotezlerinden biri olan H4 hipotezi, “Biyolojik esaslı yapı malzemeleri, günümüzde yapı sektöründe sıklıkla kullanılan yapı malzemelerine (tuğla, gaz beton, çimento veya alçı esaslı sıvalar, yalıtım malzemeleri, kompozit kaplamalar vb.) göre düşey yapı kabuğu inşasında çok daha düşük karbon emisyonuna neden olur.” olarak tanımlanmıştı. Çalışmanın sınırlılıkları ve varsayımları doğrultusunda geliştirilmiş olan öneri kabuk modellerinde kullanılmış yapı malzemeleri ve mevcut yapı hali hazır düşey kabuğunda yer alan yapı malzemelerine ilişkin gömülü karbon değerler belirtilmiştir.

Çizelge 4.147. EnP-1 öneri kabuk modeli yapı malzemeleri gömülü karbon değerleri

	Katman Yapı Malzemesi	Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$
EnP-1	Toprak esaslı sıvalar	0,48
	Buhar kesici	0,35
	Ahşap taşıyıcı çerçeve	-13,57
	Saman yalıtım levhası	-7,52
	Ahşap lif levha	-10,90
	Su-nem kesici	0,42
	Mantar esaslı sıva	1,10
	TOPLAM	**-29,64**

Çizelge 4.148. EnP-2 öneri kabuk modeli yapı malzemeleri gömülü karbon değerleri

	Katman Yapı Malzemesi	Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$
EnP-2	Toprak esaslı sıvalar	0,48
	Buhar kesici	0,35
	Ahşap taşıyıcı çerçeve	-11,54
	Kenevir yalıtım levhası	-5,56
	Ahşap lif levha	-11,01
	Su-nem kesici	0,42
	Mantar esaslı sıva	1,11
	TOPLAM	**-25,74**

Çizelge 4.149. EnP-3 öneri kabuk modeli yapı malzemeleri gömülü karbon değerleri

	Katman Yapı Malzemesi	Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$
EnP-3	Toprak esaslı sıvalar	0,48
	Buhar kesici	0,35

Ahşap taşıyıcı çerçeve	-10,18
Sıkıştırılmış koyun yünü yalıtım levhası	0,09
Ahşap lif levha	-11,10
Su-nem kesici	0,42
Mantar esaslı sıva	1,14
TOPLAM	**-18,80**

Çizelge 4.150. EnP-4 öneri kabuk modeli yapı malzemeleri gömülü karbon değerleri

	Katman Yapı Malzemesi	**Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$**
EnP-4	Toprak esaslı sıvalar	0,48
	Buhar kesici	0,35
	Ahşap taşıyıcı çerçeve	-10,18
	Ahşap lif yalıtım levhası	-2,17
	Ahşap lif levha	-11,04
	Su-nem kesici	0,42
	Mantar esaslı sıva	1,13
	TOPLAM	**-21,01**

Çizelge 4.151. EnP-5 öneri kabuk modeli yapı malzemeleri gömülü karbon değerleri

	Katman Yapı Malzemesi	**Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$**
EnP-5	Toprak esaslı sıvalar	0,48
	Buhar kesici	0,35
	Ahşap taşıyıcı çerçeve	-13,57
	Mantar yalıtım levhası	-0,51
	Ahşap lif levha	-10,90
	Su-nem kesici	0,42
	Mantar esaslı sıva	1,10
	TOPLAM	**-22,63**

Çizelge 4.152. Mevcut yapı düşey kabuk malzemeleri gömülü karbon değerleri

	Katman Yapı Malzemesi	**Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$**
Mevcut Yapı	Kireç harcı, kireç-çimento harcı	3,61
	Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harçlı sıva	1,20
	W sınıfı tuğlalarla yapılan duvarlar	9,12
	Çimento harçlı sıva	6,32
	Yüzeyi pürüzlü ve kanallı levhalar	2,82
	Anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları	1,42
	TOPLAM	**24,49**

Mevcut yapı düşey kabuğunda yer alan yapı malzemeleri gömülü karbon değeri 24,49 $tCO_2eq.$ olmuştur. Söz konusu bu değere bağlı olarak, öneri kabuk modellerindeki azalışlar aşağıdaki Çizelge 4.153'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.153. Mevcut düşey kabuk yapı malzemelerine göre öneri kabuk modelini oluşturan malzemelerin gömülü karbon değeri azalış yüzdeleri

Öneri Kabuk Model	**Gömülü Karbon Değeri $tCO_2eq.$**	**Mevcut Kabuk Malzemelerine Oranla Azalış Yüzdesi**
Saman esaslı EnP-1 öneri kabuk modeli	-29,64	%221,029
Kenevir esaslı EnP-2 öneri kabuk modeli	-25,75	%205,145
Koyun yünü esaslı EnP-3 öneri kabuk modeli	-18,80	%176,766
Ahşap esaslı EnP-4 öneri kabuk modeli	-21,01	%185,79
Mantar esaslı EnP-5 öneri kabuk modeli	-22,63	%192,405

Öneri kabuk modellerinde kullanılan yapı malzemeleri, mevcut yapı düşey kabuğunu oluşturan ve yapı sektöründe sıklıkla kullanılan yapı malzemelerine göre çok daha düşük karbon emisyonuna neden olduğu tespit edilmiştir. En az %176,766 oranında (EnP-3) azalış varken en çok azalış ise %221,029 oranında (EnP-1) gerçekleşmiştir.

Biyolojik esaslı yapı malzemelerinden elde edilmiş olan öneri kabuk modelleri, günümüzde yapı sektöründe sıklıkla kullanılan yapı malzemelerine (tuğla, gaz beton, çimento veya alçı esaslı sıvalar, yalıtım malzemeleri, kompozit kaplamalar vb.) göre düşey yapı kabuğu inşasında çok daha düşük karbon emisyonuna neden olmuştur. Dolayısıyla doktora araştırması kapsamında tespit edilen söz konusu değerler neticesinde, H4 hipotezi desteklenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde iklim değişikliğinin yıkıcı etkisi artık bir uyarı olmaktan çıkmıştır. Küresel çapta gerçekleşmiş olan orman yangınları, gıda güvenliğini tehdit eden kuraklıklar gibi milyonlarca insanın hayatını doğrudan etkileyen durumlar iklim değişikliğinin bir sonucu olarak meydana gelmiştir. Söz konusu olumsuz etkilerin temelinde iklim değişikliği yer alırken, iklim değişikliğinin arka planında ise sera etkisi oluşturan emisyonlar bulunmaktadır. Birçok sektör gibi yapı sektörü de iklim değişikliği etkisi oluşturan sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Sera etkisi oluşturan bu emisyonlar, inşa aşaması öncesi ve sırasında kullanılmış olan yapı malzemelerinin üretimi için gerekli enerji kaynaklı salınımlar olarak ifade edilen gömülü karbon ve yaşam döngüsü boyunca hizmet sürecinde ihtiyaç duyulan konfor şartlarının sağlanabilmesi amacıyla tüketilen enerji kaynaklı kullanım karbonu olarak tanımlanmıştır. Bir yapının farklı yaşam döngüsü süreçlerinde gerçekleşen bu salınımların en aza indirilmesi, iklim değişikliğiyle ilgili hedeflerin yakalanabilmesi için bir zorunluluk olmuştur.

Doktora tez çalışmasıyla, yapıların söz konusu farklı yaşam döngülerinde gerçekleştirilmiş veya gerçekleştirilecek olan karbon salınımlarını en aza indirmeye yönelik bir öneri getirilmiştir. Öneri, mevcut konut yapılarının iklim değişikliğiyle mücadelede saklı olan potansiyeli üzerine kurgulanmıştır. Yapıların inşası esnasında meydana gelmiş olan çevresel etkilerin korunarak, hem mevcut yapının kullanım enerjisi verimliliği sağlanarak kullanım karbon emisyonunu azaltılmış hem de söz konusu yapının bünyesinde biyolojik esaslı yapı malzemeleri aracılığıyla atmosferik karbon depolanmıştır. Böylelikle sadece mevcut konut yapısı üretimi için zaten atmosfere salınmış sera etkisi oluşturan gazların tekrar salınmasının önüne geçilmemiş aynı zamanda iç mekân konfor şartlarının sağlanabilmesi için ihtiyaç duyulan kullanım enerji miktarı da azaltılıp kullanım karbon emisyonları düşürülmüştür.

Enerji iyileştirmesi yaklaşımıyla gerçekleştirilmiş olan bu öneri, milyonlarca metrekare büyüklüğü sahip olan ülkemiz mevcut konut stoku dikkate alındığında, iklim değişikliğinin olumsuz etkisinin azaltılmasında son derece öneme haiz olduğu ortaya çıkmıştır. Mevcut konut yapılarının büyük potansiyeli, doktora tez çalışmasında gerçekleştirilmiş analiz çalışmasıyla belirgin hale gelmiştir. Karbon depolayabilen biyolojik esaslı yapı malzemeleriyle önerilmiş olan kabuk modelleriyle, tonlarca karbon eşdeğer gazının atmosfere salınımının önünde geçilmişle kalınmamış, benzer şekilde atmosferde bulunan tonlarca karbon yapıların bünyesine hapsedilmiştir. Bu bağlamda

“Mevcut Konutların Enerji İyileştirmesinde Düşey Kabuklar İçin Düşük Karbonlu Çözüm Alternatiflerinin Analizi” başlıklı doktora tezi içerisinde araştırma probleminin çözümüne yönelik gerçekleştirilmiş olan çalışmaların ana sonuçları ve önerileri aşağıdaki ifade edilmiştir.

5.1 Sonuçlar

- **“Mevcut konut yapısı yüksek miktarda gömülü karbon değeriyle inşa edilmiştir.”** sonucuna ulaşılmıştır.

Mevcut konut yapıları inşa sürecinde kullanılmış olan yapı malzemeleri üretimleri amacıyla kullanılan enerji kaynaklı büyük miktarda karbon emisyonu atmosfere salınmaktadır. Alan çalışmasına konu olan mevcut yapı Bölüm 4.1.’de gömülü karbon değerinin hesaplanabilmesi amacıyla sayısal hale getirilmiştir. Betonarme strüktür ve düşey kabuk bileşenleri üretimleri için atmosfere salınmış olan toplam karbon miktarı 122,42 $tCO_2eq.$ olmuştur.

- **“Mevcut konut yapısının betonarme strüktür bileşenlerinin gömülü karbon miktarı, düşey kabuk bileşenlerine göre oldukça fazla çıkmıştır.”** sonucuna ulaşılmıştır.

Mevcut konut yapısının üretimiyle, ülkemiz yapım sistemlerinde hâkim malzeme olan betonarme strüktür (Duru, 2017) bileşenleri, düşey kabuk bileşenlerine göre çok daha fazla gömülü karbon emisyonuna neden olmuştur. 97,96 $tCO_2eq.$ değerine sahip betonarme bileşenler, 24,46 $tCO_2eq.$ değerine sahip düşey kabuk bileşenlerinden %72,98 daha fazla karbon emisyonunun atmosfere salınmasına yol açmıştır. Düşey kabuk bileşenlerinin toplam karbon emisyonundan yaklaşık olarak 4 kat daha fazla olan bu değer çevresel etki açısından çok önemlidir. Enerji iyileştirmesi yaklaşımıyla mevcut konut yapısının sadece tonlarca karbon salınımına neden olarak üretilmiş betonarme strüktürü korunmamış, aynı zamanda enerji verimliliği sağlanarak kullanım karbonu değeri de azaltılmıştır.

- **“Biyolojik esaslı yapı malzemeleri kullanılarak mevcut konut yapısının bünyesinde karbon depolanabilmiştir.”** sonucuna ulaşılmıştır.

Biyolojik esaslı yapı malzemeleri kullanılarak tasarlanmış olan öneri kabuk modelleri aracılığıyla alan çalışmasında irdelenmiş olan mevcut konut yapısı bünyesinde, atmosferde serbest halde bulunan karbon depolanmıştır. EnP-1 öneri kabuk modelinde 27,67 $tCO_2eq.$, EnP-2 öneri kabuk modelinde 23,77 $tCO_2eq.$, EnP-3 öneri kabuk

modelinde 16,84 $tCO_2eq.$, EnP-4 öneri kabuk modeli 19,05 $tCO_2eq.$ ve EnP-5 öneri kabuk modeli 20,66 $tCO_2eq.$ değerlerindeki karbon eşdeğer gazlar mevcut yapı bünyesinde saklanmıştır.

- **"Yapı ürünü haline gelen biyolojik esaslı malzemeler bünyelerinde farklı miktarda karbon atomu tutmuştur."** sonucuna ulaşılmıştır.

Yapı ürünü olarak kullanım imkanına sahip biyolojik malzemeler oluşumları sürecinde farklı miktarlarda karbonu bünyelerinde barındırmıştır. Doktora tezi alan çalışmasında öneri kabuk modellerinde kullanılmış olan saman, kenevir, koyun yünü, ahşap ve mantar biyolojik yapı malzemeleri, öneri kabuk modellerinin gömülü karbon değerinin farklılaşmasına neden olmuştur. Mevcut konut yapısına uygulanmış olan; saman esaslı öneri kabuk modeli gömülü karbon değeri -27,67 $tCO_2eq.$, kenevir esaslı öneri kabuk modeli -23,77 $tCO_2eq.$, koyun yünü esaslı öneri kabuk modeli -16,84 $tCO_2eq.$, ahşap esaslı öneri kabuk modeli -19,05 $tCO_2eq.$ ve mantar esaslı öneri kabuk modeli -20,66 $tCO_2eq.$ karbon bünyelerinde depolanmıştır.

- **"Biyolojik esaslı yapı malzemeleri kullanılarak tasarlanmış olan öneri kabuk modelleri aracılığıyla, mevcut konut yapısının kullanım karbonu değerini azaltarak enerji verimliliği sağlanmıştır."** sonucuna ulaşılmıştır.

Doktora tezi alan çalışmasında sayısallaştırılmış olan mevcut konut yapısının kullanım karbonu değeri 8,695 $tCO_2eq.$ olarak hesaplanmıştır. Biyolojik esaslı yapı malzemeleriyle tasarlanmış olan öneri kabuk modelleri aracılığıyla kullanım enerjisi ihtiyacını azaltılarak, kullanım karbonu salınımının düşürülmesi sağlanmıştır. Saman esaslı öneri kabuk modeli EnP-1 kullanım karbonu değeri 6,755 $tCO_2eq.$, kenevir esaslı öneri kabuk modeli EnP-2 kullanım karbonu değeri 6,615 $tCO_2eq.$, koyun yünü esaslı öneri kabuk modeli EnP-3 kullanım karbonu değeri 6,625 $tCO_2eq.$, ahşap esaslı öneri kabuk modeli EnP-4 kullanım karbonu değeri 6,535 $tCO_2eq.$ ve mantar esaslı öneri kabuk modeli EnP-5 kullanım karbonu değeri 6,755 $tCO_2eq.$ olarak tespit edilmiştir. Öneri kabuk modelleri uygulanmış mevcut yapı kullanım karbonu, ilk durumuna göre, EnP-1 modeli için %22,08, EnP-2 modeli için %23,92, EnP-3 modeli için %23,80, EnP-4 modeli için %24,82 ve EnP-5 modeli için %22,08 daha az salınıma neden olmuştur.

- **"Mevcut konut yapısında yapı malzemeleri kaynaklı çevresel etki hesaplamasında, malzemelerin çevresel ürün beyanları (EPD) ve yapı bilgi modellemesi (YBM) yazılımı önemli rol oynamıştır."** sonucuna ulaşılmıştır.

EPD belgeleri ve YBM yazılımı olan Autodesk Revit programı, hem mevcut yapının sayısal hale getirilmesi hem de öneri kabuk modellerinin hesaplanabilmesi

oldukça kolaylaştırmıştır. Yapı malzemelerine ilişkin, ön karbon değerlendirmesi yaklaşımıyla A1-A3 modülleri arası küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerleri EPD belgelerinden temin edilmiş ve yapı bilgisi modellemesi yazılımı içinde oluşturulmuş dijital model içerisinde parametre olarak girilmiştir. Bununla birlikte, duvar katmanlarına ayrı ayrı malzeme ve boyut bilgisi girilmesini sağlayan yapı bilgi modellemesi yazılımı vasıtasıyla, farklı nitelikteki malzemeye sahip katman metrajlarının kolaylıkla hesaplanması sağlanmıştır. Böylelikle mevcut konut yapısının dijital modeli yardımıyla karbon hesaplaması gerçekleştirilmiştir.

- **"Mevcut konut yapısının enerji iyileştirilerek korunması, yüksek enerji verimliliğine sahip yeni yapı inşa etmekten çok daha düşük bir çevresel etkiye neden olmuştur."** sonucuna ulaşılmıştır.

Doktora tezi kapsamında alan çalışmasında irdelenmiş olan mevcut konut yapısı üzerinde gerçekleştirilmiş olan analizler, mevcut yapıların enerji iyileştirmesi yapılarak kullanılmasının enerji verimliliğine sahip yeni bir yapı inşa etmekten çok daha düşük bir çevresel etkiye neden olacağını ortaya çıkarmıştır. Mevcut konut yapısının sadece betonarme strüktür ve düşey kabuk bileşenlerinde gerçekleştirilen gömülü karbon analizi sonucu 122,42 $tCO_2eq.$ olmuştur. Sera gazı emisyonu olan söz konusu bu değer atmosfere salınmış ve mevcut konut yapısı elde edilmiştir. Bu değer sadece en büyük gömülü karbonu miktarına sahip iki farklı bileşenin analizi sonucu ortaya çıkmıştır. Mevcut konut yapısını oluşturan bütün yapı malzemeleri de hesaplamaya dahil edilmesi durumunda sera gazı etkisi oluşturan $CO_2eq.$ gaz miktarı çok daha yüksek olacaktır. Eğer mevcut konut yapısı, enerji verimliliğine sahip benzer bir plan şeması ve nitelikte yeni bir konut üretmek amacıyla yıkılırsa, başlangıçta atmosfere zaten salınmış olan emisyonların hiçbir fiziksel karşılığı kalmamış olacaktır. Dolayısıyla iklim değişikliği etkisinin olumsuz etkilerinin azaltılmasında mevcut konut yapısının enerji güçlendirmesi yapılarak korunması, yapı sektörü kaynaklı emisyonların azaltılmasını sağlayarak büyük kazanımlara yol açmıştır.

- **"Mevcut konut yapısının enerji iyileştirmesi, düşey kabuklarda gerçekleştirilen salt bir yalıtım uygulaması değildir."** sonucuna ulaşılmıştır.

Doktora tez araştırmasında, 2000-2010 yılları arasında inşa edilmiş mevcut konut yapısının enerji verimliliğinin sağlaması amacıyla önerilen enerji iyileştirmesi yaklaşımı, düşey kabuklarda gerçekleştirilen salt bir yalıtım uygulaması olmamıştır. Yapı kabuğunun ısıl geçirgenlik katsayısının artırılarak enerji verimliliği gerçekleştirmek mümkündür. Söz konusu verimliliği elde etmek amacıyla yapı sektöründe, yüksek

miktarda çevresel etkiye neden olan petrol-kimyasal ve mineral esaslı yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Analizleri yapılmış mevcut konut yapısı için bu şekilde bir yaklaşım getirilmiş olunsaydı, kullanım enerjisinin azaltılması ve sonuç olarak, yapı bütün yaşam döngüsü dikkate alınmadan, kullanım karbonu değerinin düşürülmesine sağlanabilirdi. Ancak bu durumda ise, doktora tez çalışasının hem kaynak araştırması hem de araştırma sonuçları ve tartışma bölümlerinde de ifade edildiği üzere, yapı yaşam döngüsünde oldukça önemli olan gömülü karbon miktarı ve buna bağlı gerçekleşen çevresel etkiler ihmal edilerek, mevcut konut yapısının betonarme strüktür ve düşey kabuk bileşeni kaynaklı önceden gerçekleşmiş olan 122,42 $tCO_2eq.$ sera etkisine sahip gaz salınımı miktarı üzerine, fazladan bir de dış cephe yalıtım malzemeleri içinde gerçekleşmiş emisyonlar eklenecektir. Çevresel etkileri dikkate almayan bu yaklaşımın tam aksine, doktora tez çalışması içerisinde ahşap ve ahşap olmayan biyolojik esaslı yapı malzemeleri, prefabrik olarak tasarlanmış düşey kabuk bileşenleri olarak önerilmiş ve böylece mevcut konut yapısının sadece kullanım enerjisi kaynaklı verimliliği ve emisyon değerleri azaltılmakla kalınmamış aynı zamanda atmosferik karbon yapı bünyesinde depolanarak gömülü karbon değeri de dikkate alınmıştır. Böylelikle mevcut konut yapısı enerji iyileştirmesi, basit bir yalıtım uygulaması olmaktan çıkarılmış, iklim değişikliğinin yıkıcı etkisini azaltmaya yönelik bir yaklaşıma dönüştürülmüştür.

5.2 Öneriler

İklim değişikliğiyle mücadele de mevcut konut yapıları oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Doktora tez çalışmasında, söz konusu bu potansiyeli değerlendirebilmek amacıyla prefabrik esaslı yapı kabuğu önerisi getirilmiştir. Mevcut yapının enerji iyileştirmesi için biyolojik esaslı yapı malzemeleri kullanılarak geliştirilen öneri kabuk modelleri, sadece enerji verimliliğine katkı sağlamakla kalmamış aynı zamanda yapı üretiminde malzeme kaynaklı karbon emisyonlarının çevresel etkisinin ne kadar önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Enerji verimliliği kavramına farklı bir bakış açısı kazandırılan çalışmada, sadece kullanım karbonu değil gömülü karbon da göz önüne alınarak modeller geliştirilmiştir. Doktora tez çalışmasının yönlendirmesine bağlı olarak aşağıdaki başlıklarda hem doktora tezinde geliştirilmiş metodolojilerin ışığında öneriler hem de tez kapsamında ele alınmamış ve gelecek çalışmalara fikir olabilecek öneriler sunulmuştur.

- **Gömülü karbon değerlendirmesine yönelik öneriler**

Doktora tez çalışmasıyla gömülü karbon kavramının önemi ortaya konulmuş ve hesaplama yöntemine ilişkin bir yaklaşım geliştirilmiştir. Doktora çalışmasındaki yaklaşım ve yöntem adımlarının anlaşılması sonucu farklı yapılar için gömülü karbon değerlendirmesi yapılabilir. Böylelikle ister mevcut ister yeni tasarlanacak yapı olsun çevresel ürün beyanı (EPD) belgeleri kullanılarak söz konusu yapı kaynaklı çevresel etkiler hakkında fikir sahibi olunabilir. Çalışma içeriğinde en önemli çevresel etki göstergesi olarak küresel ısınma potansiyeli (GWP) üzerinden hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, doktora tezindeki yaklaşım ve yöntem adımları kullanılarak, diğer bütün etki göstergeleri de hesaplanabilir. Benzer şekilde, hesaplamaya dahil edilecek yaşam döngüsü değerlendirme modülleri de artırılabilir. Doktora çalışmasındaki yaklaşım sayesinde, çevresel etki bağlamında, yapı malzemelerinin önemi ortaya konmuştur. Bu yaklaşımın yönlendirmesiyle, özellikle yeni yapı üretiminde, yapı malzemesi tercihi konusunda çok daha duyarlı olunabilir. Daha düşük karbon emisyonu değerine sahip malzemeler öncelikli olarak kullanılabilir. Yine yeni yapı inşaatlarında malzeme tercihi, çalışma içeriğinde önemi sıklıkla ifade edilen ve hesaplama yaklaşımının temellendiği EPD belgelerinin olup olmadığına göre yapılabilir.

Doktora tezi kapsamında gömülü karbon değeri hesaplaması statik bir yöntem ile ele alınmıştır. Söz konusu yöntem insan kaynaklı bilgi ve veri girişini gerektirmiştir. Gelecek çalışmalar için gömülü karbon değerlendirmesinin gerçekleştirilmesinde dinamik yöntemler kullanılabilir. Yapı malzemesine ait doğru EPD verisinin seçilmesi ön şartıyla, özellikle yapı bilgi modellemesiyle entegre olarak çalışan, anlık malzeme seçimine duyarlı, çok farklı veri tabanında yer EPD belgelerine çevrimiçi hizmet sağlayabilen bir yaklaşım geliştirilebilir. Farklı araştırmacılar tarafından, özellikle ülkemizde üretimi olan ve EPD verilerine sahip yapı malzemelerinin bütün yaşam döngüsündeki karbon emisyonu değerleri, yapı bilgisi modellemesi yazılımlarında kullanılabilmesi amacıyla, bir eklenti (plug-in) haline getirilerek, çevresel etki değerlendirmesinin tasarımın ilk aşamasında kolaylıkla gerçekleştirilebilecek bir yaklaşım geliştirilebilir.

- **Kullanım karbonu değerlendirmesine yönelik öneriler**

Doktora tez çalışmasıyla kullanım karbonu hesaplamasına yönelik yenilikçi bir yaklaşım geliştirilmiştir. Doktora çalışmasındaki yaklaşım ve yöntem adımlarının anlaşılması sonucu farklı yapılar için kullanım karbonu değerlendirmesi yapılabilir. Ülkemizde yapı ruhsatı alan her bir bina için ısı yalıtım kuralları standardı olan TS 825

hesaplama metodoloji yardımıyla yapı kabuklarından gerçekleşen ısı kaybı değeri hesaplanmaktadır. Dolayısıyla tez çalışmasındaki metodoloji kullanılarak, ısıtma amaçlı gerekli olan enerji kaynaklı karbon emisyon değerleri de bulunabilir. Isıtma için doğalgaz yakıt tipine göre önerilmiş yöntem, farklı yakıt türlerine göre de değiştirilebilir. Böylelikle yapı kabuklarından gerçekleşmiş olan ısı kayıplarının sayısal sonuçları sadece bir matematiksel ifade olmaktan çıkarılarak, çevresel etkiye yönelik bir gösterge haline getirilebilir.

Doktora tezi kapsamında hesaplanan kullanım karbonu hesaplaması mimari proje ekinde yer alan yalıtım (izolasyon) detaylarına göre gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla mevcut konut yapısının ısıl geçirgenlik katsayısı olan U değeri yalıtım projesi detaylarında belirtilmiş yapı malzemelerine göre bulunmuştur. Gelecek çalışmalarda mevcut konut ve konut dışı yapılar için U değeri, gelişmiş problar kullanan yerinde ölçüm cihazlarıyla sağlanabilir. Bu tür bir ölçüm sonucu hem mimari proje ekinde yer alan yalıtım (izolasyon) projesi üzerinden hesaplanan U değerinin gerçekle örtüşüp örtüşmediğinin kontrolü yapılabilir hem de kullanım karbonu değeri hesaplanabilir. Mimari proje eklerinde yer yalan yalıtım (izolasyon) projeleri genellikle TS 825 standardına uygun olacak katman kalınlıklarını içerecek şekilde düzenlenir. Ancak, yerinde imalatın gerçekten yalıtım (izolasyon) projesine uygun yapılıp yapılmadığı ancak sahada ölçümler aracılığıyla tespit edilebilir. Bu tür bir çalışma yapılarak, mevcut konut veya konut dışı yapıların enerji güçlendirmesine yönelik öneriler getirilebilir.

- **Biyolojik esaslı malzeme kullanımına yönelik öneriler**

Doktora tez çalışmasıyla biyolojik malzemelerin yapıda kullanımına yönelik oldukça yenilikçi bir yaklaşım önerilmiştir. Doktora çalışmasındaki yaklaşım ve yöntem adımlarının doğru anlaşılması ve uygulaması ön şartıyla biyolojik esaslı yapı malzemeleri kullanılarak önerilmiş olan yapı kabukları aracılığıyla, mevcut konut veya konut dışı yapı stokunun çevresel etki göstergelerini önceleyen bir anlayışla enerji iyileştirmesi yapılabilir. Doktora tezinde mevcut konut yapıları için önerilmiş olan önerilmiş olan kabuk modelleri, yapının bünyesinde karbon depolanmasını sağlamış ve kullanım karbonu değerini azaltmıştır. Bununla birlikte yapının statik yükününde oldukça hafifletilmesi başarılmıştır. Mevcut yapı stokunun potansiyeline yönelik geliştirilmiş doktora tezi öneri kabuk modelleri, yeni yapılar için de kullanabilir. Ülkemiz özelinde hızla devam eden kentsel dönüşüm çalışmaları kapsamında her yıl milyonlarca metrekare yeni yapı inşa edilmektedir. Eğer doktora tezi kapsamında geliştirilmiş olan öneri kabuk modelleri söz konusu bu yeni yapıların düşey kabuklarında kullanılırsa, sadece deprem

kuşağında bulunan ülkemiz için statik yüklerin oldukça hafiflemesi ve hızlı bir üretim prosesi temin edilmekle kalınmamış aynı zamanda yeni konut veya konut dışı yapıların hem kullanım enerjisi kaynaklı karbon emisyonu azaltılmış hem de yeni yapıların atmosferik karbonun depolanabildiği bir hacim haline getirilmesi sağlanabilir. Yapı sektöründe bir paradigma değişikliği olabilecek bu durum, ülkemiz özelinde iklim değişikliği etkisini azaltma ve sürdürülebilir gelişme hedeflerine yaklaşma adına büyük bir kazanım olabilir. Gelişmiş birçok ülkenin aksine yurdumuzda konut sektöründe halen prefabrikasyon yaygın olarak kullanılmamaktadır. Yerinde üretim ile gerçekleştirilen imalatlar her şeyden geniş bir spektrumda çevresel etkiye neden olmaktadır. Doktora tezi kapsamında önerilmiş olan prefabrik düşey kabuk kullanımı ile bu etkilerin önüne geçilebilir. Buna ek olarak, farklı birçok test ile ölçülebilen doktora tezi prefabrik öneri kabuk modelleri, yeni veya mevcut yapılara uygulanmasıyla, döngüsel tasarımı mümkün hale getirilebilir. Söküm için tasarım anlayışı üzerinde kurgulanmış öneri kabuk modelleri, mevut veya yeni konut yapıları başta olmak üzere farklı fonksiyona sahip her türlü mevcut veya yeni yapıda döngüsel tasarımı dikkate alan düşey kabuk bileşeni olarak kullanılabilir. Doktora tezi öneri kabuk modellerinde kullanılmış olan biyolojik esaslı malzemeler, orman ürünü olan ahşap ve tarım yan ürünlerinden oluşmaktadır. Kabuk modellerinin yapı sektöründe yer alması, tarım yan ürünü olan malzemelerin çok daha farklı bir üretim ve işleme yaklaşımıyla ele alınmasını sağlayabilir. Benzer şekilde, orman ürünü olan ahşabın da özel amaçlı endüstriyel plantasyonlar şeklinde bir üretim yöntemiyle temin edilmesini sağlayabilir. Bu durum, değinilmiş olan bitkisel esaslı ürünlerin büyümeleri boyunca fotosentez aracılığıyla atmosferik karbonu bünyelerinde saklamaları değil aynı zamanda oldukça kapsamı bir imalat endüstrisinin de ortaya çıkmasıyla sonuçlanabilir. Özellikle tarım yan ürünü biyolojik esaslı malzemelerin bir yapı malzemesi olarak ülkemiz dahilinde üretimi bulunmamaktadır. Doktora tezi öneri kabuk modellerinin mevcut ve yeni yapılara uygulanmasıyla, bu ürünlerin işlenmesi ve yapı sektörü için uygun hale getirilmesi amacıyla birçok yatırımlar gerçekleştirilebilir. Böylelikle sadece döngüsel sürdürülebilirlik değil döngüsel ekonomide temin edilmiş olur. Yapı sektörü için yeni bir yapım tekniği ve anlayışı barındıran doktora tezi öneri modeli, ülkemiz özelinde kullanılan ekolojik ve ekonomik sürdürülebilirlikte uzak ana akım yapı malzemeleri ve yapım sistemlerine bir alternatif olarak, yapı sektörü içinde yer alan üniversitelerdeki mimarlık-mühendislik bölümlerinden, yapı malzemesi ve yapı üreticilerine kadar bütün paydaşlara önerilebilir.

Doktora tezi kapsamında biyolojik esaslı malzemeler kullanılarak tasarlanmış öneri kabuk modelleri üretim ve uygulama teknik detayına ilişkin sınırlılıklar getirilmiştir. Katmanların birbiriyle birleşimi ve yapıyla birleşimde yer alacak ara parçalar gibi sınırlar gelecek çalışmalar için araştırma konusu olabilir. Benzer şekilde öneri kabuk modelleri için rüzgâr, deprem ve yangın gibi başlıklarda bilimsel çalışmalar yapılabilir. Doktora çalışmasında mevcut bir konut yapısının, yapı bilgi modellemesi yazılımı aracılığıyla dijital olarak sayısallaştırılarak çevresel etkileri hesaplanmıştır. Gelecek çalışmalarda bu yöntemden farklı olarak, tek kişilik bir aile evi olacak şekilde 1:1 ölçeğinde üretimi yapılabilir. Böylelikle birçok farklı değişken yerinde test edilerek değerlendirilebilir. Büyük miktarda araştırma geliştirme desteğine ihtiyaç duyulacak bu tür bir yaklaşım, ülkemiz yapı sektöründe yer alan bütün paydaşlar için önemli bir üretme-yapma bilgisi (know-how) edimi sağlayabilir.

KAYNAKLAR

Abanda, F. H., Oti, A. H. ve Tah, J. H. M., 2017, Integrating BIM and new rules of measurement for embodied energy and CO2 assessment, *Journal of Building Engineering*, 12, 288-305.

AIA, 2013, Guide, Instructions, and Commentary to the 2013 AIA Digital Practice Documents, https://www.aiacontracts.org/resources/69541-guide-instructions-and-commentary-to-the-2013-aia-digital-practice-documents (Erişim Tarihi: 11.06.2021): [Erişim Tarihi: 11.06.2021].

Ajayi, S. O., Oyedele, L. O. ve Ilori, O. M., 2019, Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources, *Journal of Building Engineering*, 23, 324-333.

Almeida, M. ve Ferreira, M., 2018, Ten questions concerning cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation, *Building and Environment*, 143, 15-23.

Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C. ve Aste, N., 2020, Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review, *Sustainable Cities and Society*, 60, 102248.

Anastaselos, D., Giama, E. ve Papadopoulos, A. M., 2009, An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions, *Energy and Buildings*, 41 (11), 1165-1171.

Anderson, J. ve Adams, K., 2020, Embodied Carbon Guidance for Welsh Social Housing Developers, their design teams, contractors and suppliers (The home-grown homes project), https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/2020/12/WKW_tech_doc_final_2.12.2020.pdf [Erişim Tarihi: 19.02.2022]:

ARUP, 2016, The Circular Economy in the Built Environment-Key Principles of the Circular Economy, https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/circular-economy-in-the-built-environment [Erişim Tarihi: 20.02.2022]:

Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H. ve Dias, L., 2012, A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB, *Building and Environment*, 56, 370-378.

Atmaca, A. ve Atmaca, N., 2015, Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey, *Energy and Buildings*, 102, 417-431.

Atmaca, A. ve Atmaca, N., 2022, Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey, *Journal of Cleaner Production*, 340, 130691.

Attia, S., 2018, Chapter 2 - Evolution of Definitions and Approaches, In: Net Zero Energy Buildings (NZEB), Eds: Attia, S.: Butterworth-Heinemann, p. 21-51.

Attia, S., Kurnitski, J., Kosiński, P., Borodiņecs, A., Deme Belafi, Z., István, K., Krstić, H., Moldovan, M., Visa, I., Mihailov, N., Evstatiev, B., Banionis, K., Čekon, M., Vilčeková, S., Struhala, K., Brzoň, R. ve Laurent, O., 2022, Overview and future challenges of nearly zero-energy building (nZEB) design in Eastern Europe, *Energy and Buildings*, 267, 112165.

Azari, R. ve Abbasabadi, N., 2018, Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends, *Energy and Buildings*, 168, 225-235.

Ballarini, I., Corrado, V., Madonna, F., Paduos, S. ve Ravasio, F., 2017, Energy refurbishment of the Italian residential building stock: energy and cost analysis through the application of the building typology, *Energy Policy*, 105, 148-160.

Blengini, G. A. ve Di Carlo, T., 2010, The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings, *Energy and Buildings*, 42 (6), 869-880.

BM, 2016, Birleşmiş Milletler-Sürdürülebilri Kalkınma (United Nations-Sustainable Development The 17 Goals (SDG), https://sdgs.un.org/goals [Erişim Tarihi: 18.02.2022]:

Bonab, T. A., 2016, A new approach to define economically applicable energy efficient retrofit solutions for residential buildings in Turkey, Doktora Tezi, *İstabul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi*, İstanbul.

Bourbia, S., Kazeoui, H. ve Belarbi, R., 2023, A review on recent research on bio-based building materials and their applications, *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 12.

Bozkurt, E., 2007, Life cycle assessment (LCA) based home rating model for İzmir (HRM-İzmir), Doktora Tezi, *İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Bueno, C., Pereira, L. M. ve Fabricio, M. M., 2018, Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages: an application using building information modelling, *Architectural Engineering and Design Management*, 14 (5), 332-346.

Buildipedia, 2021, BIM and Sustainable Design, http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/bim-and-sustainable-design (Erişim Tarihi: 10.06.2021): [Erişim Tarihi: 10.06.2021].

Cabeza, L. F., Boquera, L., Chàfer, M. ve Vérez, D., 2021, Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis, *Energy and Buildings*, 231, 110612.

Carvalho, J. P., Alecrim, I., Bragança, L. ve Mateus, R., 2020, Integrating BIM-Based LCA and Building Sustainability Assessment, *Sustainability*, 12 (18).

Carvalho, J. P., Villaschi, F. S. ve Bragança, L., 2021, Assessing Life Cycle Environmental and Economic Impacts of Building Construction Solutions with BIM, *Sustainability*, 13 (16).

CAT, 2022, Climate Action Tracker (CAT), Warming Projections Global Update, https://climateactiontracker.org/documents/1094/CAT_2022-11-10_GlobalUpdate_COP27.pdf: [Erişim Tarihi: 01.12.2023].

Catherine, D. W., Frances, Y., Duncan, C., Andrea, C., Seif, H. A. ve John, O., 2016, Material quantities and embodied carbon dioxide in structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 0 (0), null.

Cavalliere, C., Habert, G., Dell'Osso, G. R. ve Hollberg, A., 2019, Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process, *Journal of Cleaner Production*, 211, 941-952.

Ceylan, N., 2012, Türkiye'de konut dış duvar sistemlerinde sıklıkla gerçekleştirilen ısı yalıtımı uygulamalarının üretim ve yapım süreçlerinin çevresel değerlendirmesi, Yüksek Lisan Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Chang, S., Castro-Lacouture, D. ve Yamagata, Y., 2020, Decision support for retrofitting building envelopes using multi-objective optimization under uncertainties, *Journal of Building Engineering*, 32, 101413.

Chen, X., Qu, K., Calautit, J., Ekambaram, A., Lu, W., Fox, C., Gan, G. ve Riffat, S., 2020, Multi-criteria assessment approach for a residential building retrofit in Norway, *Energy and Buildings*, 215, 109668.

Cui, J., 2020, Integration of Life Cycle Assessment within Building Information Modeling Environment, Master of Science (MSc), *KTH Royal Institute of Technology* School of Architecture and the Built Environment.

Çakmaklı, A. B., 2007, Life cycle assessment of building materials in hotel refurbishment projects: A case study in Ankara, Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

De Wolf, C., Hogroian, J. ve Ochsendorf, J., 2014, Comparing material quantities and embodied carbon in stadia, p.

DEFRA, 2023, Environmental reporting guidelines: including streamlined energy and carbon reporting and greeenhouse gas reporting, https://www.gov.uk/government/publications/environmental-reporting-guidelines-including-mandatory-greenhouse-gas-emissions-reporting-guidance: [Erişim Tarihi: 17.12.2023].

Deniz, A., 2018, Yapı kabuğunun düşük maliyetli enerji etkin iyileştirilmesine yönelik bir yaklaşım: Kamu yapısı örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Dixit, M. K., 2017, Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 390-413.

Duru, M. O., 2017, Sürdürülebilirlik ve enerji korunumu bağlamında ülkemiz konut üretiminde ahşap malzemenin önemi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 48-49.

Duru, M. O. ve Koç, İ., 2018, Ülkemiz Bina Üretiminde Kullanılan Yapım Sistemleri Kaynaklı Sorunların İrdelenmesi. 2. Uluslararası Mimarlık ve Tasarım Kongresi. Çanakkale**:** 892-899.

Duru, M. O. ve Koç, İ., 2021, Sürdürülebilir Yapı Üretiminde Yaşam Döngüsü Değerlendirme (LCA) Hesaplamalarının Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) İle Entegrasyonuna Yönelik Bir Araştırma, *STAR Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi*, 2 (3), 107-121.

Emekci, Ş., 2018, A life cycle costing based decision support tool for cost-optimal energy efficient design and/or refurbishments, Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Erkmen, F. İ., 2012, Opak düşey yapı kabuğunun enerji-emerji performansının değerlendirilmesine yönelik bir yaklaşım, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Esau, R., Jungclaus, M., Olgyay, V. ve Rempher, A., 2021, Reducing Embodied Carbon in Buildings: Low-Cost, High-Value Opportunities, *RMI (Rocky Mountain Institute) (http://www.rmi.org/insight/reducing-embodied-carbon-in-buildings)*.

Fazlı, T., 2013, Comparing environmental impacts of four building envelope configurations using e-tool LCA, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Galimshina, A., Moustapha, M., Hollberg, A., Padey, P., Lasvaux, S., Sudret, B. ve Habert, G., 2022, Bio-based materials as a robust solution for building renovation: A case study, *Applied Energy*, 316, 119102.

Galvin, R., 2010, Thermal upgrades of existing homes in Germany: The building code, subsidies, and economic efficiency, *Energy and Buildings*, 42 (6), 834-844.

Gaspar, P. L. ve Santos, A. L., 2015, Embodied energy on refurbishment vs. demolition: A southern Europe case study, *Energy and Buildings*, 87, 386-394.

Gram-Hanssen, K., 2014, Existing buildings – Users, renovations and energy policy, *Renewable Energy*, 61, 136-140.

Güçyeter, B., 2010, A method on energy-efficient retrofitting for existing building envelopes, Doktora Tezi, *İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Haapio, A. ve Viitaniemi, P., 2008, A critical review of building environmental assessment tools, *Environmental Impact Assessment Review*, 28 (7), 469-482.

Hamburg, A., Kuusk, K., Mikola, A. ve Kalamees, T., 2020, Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB, *Energy*, 194, 116874.

Hasik, V., Escott, E., Bates, R., Carlisle, S., Faircloth, B. ve Bilec, M. M., 2019, Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction, *Building and Environment*, 161, 106218.

Haugsbakk, F., 2018, Evaluations of how carbon dioxide calculations can be integrated into 3D models at an early design stage for more efficient Life Cycle Assessments on buildings, Master of Science (MSc), *KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY*.

Hollberg, A. ve Ruth, J., 2016, LCA in architectural design—a parametric approach, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21.

Hollberg, A., Genova, G. ve Habert, G., 2020, Evaluation of BIM-based LCA results for building design, *Automation in Construction*, 109, 102972.

IEA, 2018, World Energy Outlook 2018 Executive Summary, *International Energy Agency, Paris*.

İMSAD, 2023, Türkiye İMSAD Yapı Sektörü Raporu 2022, *Ekonomi ve Strateji Danışmanlık Hizmetleri İstanbul*, sf. 16.

IPCC, 2023, Taks Force on National Greenhouse Gas Inventories, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf: [Erişim Tarihi: 17.12.2023 sf: 1.18].

IStructE, 2020, How to Calculate Embodied Carbon (IStructE-The Institution of Structural Engineers), https://www.istructe.org/IStructE/media/Public/Resources/istructe-how-to-calculate-embodied-carbon.pdf [Erişim Tarihi: 20.02.2022]:

Jalaei, F., Jalaei, F. ve Mohammadi, S., 2020, An integrated BIM-LEED application to automate sustainable design assessment framework at the conceptual stage of building projects, *Sustainable Cities and Society*, 53, 101979.

Jensen, P. A. ve Maslesa, E., 2015, Value based building renovation – A tool for decision-making and evaluation, *Building and Environment*, 92, 1-9.

Jensen, P. A., Maslesa, E., Berg, J. B. ve Thuesen, C., 2018, 10 questions concerning sustainable building renovation, *Building and Environment*, 143, 130-137.

Jungclaus, M., Esau, R., Olgyay, V. ve Rempher, A., 2021, Reducing Embodied Carbon in Buildings-Low-Cost High Value Opportunities (RMI-Rocky Mountain Institute), http://www.rmi.org/insight/reducing-embodied-carbon-in-buildings [Erişim Tarihi: 18.02.2022]:

Kalaycıoğlu, E., 2017, A new approach to evaluate the nearly zero energy concept of EPBD recast at district scale, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Kamari, A., Corrao, R. ve Kirkegaard, P. H., 2017, Sustainability focused decision-making in building renovation, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6 (2), 330-350.

KBB, 2023, Konya Kent Bilgi Sistemi uydu görüntüleri, https://kentrehberi.konya.bel.tr/: [Erişim Tarihi: 12.12.2023].

Kiamili, C., Hollberg, A. ve Habert, G., 2020, Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building Based on BIM, *Sustainability*, 12, 3372.

King, B., 2017, The New Carbon Architecture: Building to Cool the Climate, New Society Publishers, p. 7-8.

Kneifel, J., O'Rear, E., Webb, D. ve O'Fallon, C., 2018, An exploration of the relationship between improvements in energy efficiency and life-cycle energy and carbon emissions using the BIRDS low-energy residential database, *Energy and Buildings*, 160, 19-33.

Koezjakov, A., Urge-Vorsatz, D., Crijns-Graus, W. ve van den Broek, M., 2018, The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings, *Energy and Buildings*, 165, 233-245.

Kovacic, I., Reisinger, J. ve Honic, M., 2018, Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1774-1786.

LETI, 2020, LETI Embodied Carbon Primer-Supplementary Guidance to the Climate Emergency Design Guide, https://www.leti.london/ecp [Erişim Tarihi: 18.02.2021]:

Lewis, M., Huang, M., Carlisle, S. ve Simonen, K., 2021a, AIA-CLF Embodied Carbon Toolkit for Architect Part II: Measuring Embodied Carbon (CLF-Carbon Leadership Forum), https://carbonleadershipforum.org/clf-architects-toolkit-part-2-measuring-embodied-carbon/ [Erişim Tarihi: 19.02.2022]:

Lewis, M., Huang, M., Carlisle, S. ve Simonen, K., 2021b, AIA-CLF Embodied Carbon Toolkit for Architect Part I: Introduction to Embodied Carbon (CLF-Carbon Leadership Forum), https://carbonleadershipforum.org/clf-architects-toolkit-part-1-intro-to-embodied-carbon/ [Erişim Tarihi: 19.02.2022]:

Lobaccaro, G., Wiberg, A. H., Ceci, G., Manni, M., Lolli, N. ve Berardi, U., 2018, Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB, *Energy and Buildings*, 167, 106-123.

Loga, T., Stein, B. ve Diefenbach, N., 2016, TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable, *Energy and Buildings*, 132, 4-12.

Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A. ve Marenco, L., 2020, From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example, *Developments in the Built Environment*, 3, 100019.

Mata, É., Kalagasidis, A. S. ve Johnsson, F., 2018, Contributions of building retrofitting in five member states to EU targets for energy savings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 759-774.

Monteiro, A., 2016, Visual Programming Language For Creating BIM Models With Level Of Development 400. 4th BIM International Conference. São Paulo & Lisboa.

Moran, P., O'Connell, J. ve Goggins, J., 2020, Sustainable energy efficiency retrofits as residenial buildings move towards nearly zero energy building (NZEB) standards, *Energy and Buildings*, 211, 109816.

Mourão, J., Gomes, R., Matias, L. ve Niza, S., 2019, Combining embodied and operational energy in buildings refurbishment assessment, *Energy and Buildings*, 197, 34-46.

Najjar, M., Figueiredo, K., Palumbo, M. ve Haddad, A., 2017, Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building, *Journal of Building Engineering*, 14, 115-126.

Nizam, R. S., Zhang, C. ve Tian, L., 2018, A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings, *Energy and Buildings*, 170, 1-14.

OurWorldinData, 2023a, Average temperature anomaly (Global average land-sea temperature anomaly relative to the 1961-1990 average temperature), https://ourworldindata.org/grapher/temperature-anomaly?time=1950..latest: [Erişim Tarihi: 01.12.2023].

OurWorldinData, 2023b, Fossil fuel consumption by fuel type, World (Fossil fuel consumption is given in terawatt-hours (TWh)). https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuel-consumption-by-fuel-type?time=earliest..2022: [Erişim Tarihi: 01.12.2023].

OurWorldinData, 2023c, Greenhouse gas emissions by sector (Greenhouse gas emissions are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents), https://ourworldindata.org/grapher/ghg-emissions-by-sector?facet=metric&uniformYAxis=0: [Erişim Tarihi: 02.12.2023].

Özkan, A., 2018, A new approach to guide early stages of building design to improve passive performance through the time-based thermal resilience metrics, Doktora Tezi, *İstabul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Pacheco-Torgal, F., 2017, Chapter 1 - Introduction to Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting, In: Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting, Eds: Pacheco-Torgal, F., Granqvist, C.-G., Jelle, B. P., Vanoli, G. P., Bianco, N. ve Kurnitski, J.: Woodhead Publishing, p. 1-20.

Pan, W. ve Teng, Y., 2021, A systematic investigation into the methodological variables of embodied carbon assessment of buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110840.

PanUnited, 2023, What is the difference between embodied carbon and operational carbon?, https://www.panunited.com.sg/what-is-the-difference-between-embodied-carbon-and-operational-carbon/: [Erişim Tarihi: 11.01.2024].

Pittau, F., Krause, F., Lumia, G. ve Habert, G., 2018, Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls, *Building and Environment*, 129, 117-129.

Pittau, F., Habert, G. ve Iannaccone, G., 2019, A Life-Cycle Approach to Building Energy Retrofitting: Bio-Based Technologies for Sustainable Urban Regeneration, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290, 012057.

Potrč Obrecht, T., Röck, M., Hoxha, E. ve Passer, A., 2020, BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review, *Sustainability*, 12 (14).

Qu, K., Chen, X., Ekambaram, A., Cui, Y., Gan, G., Økland, A. ve Riffat, S., 2020, A novel holistic EPC related retrofit approach for residential apartment building renovation in Norway, *Sustainable Cities and Society*, 54, 101975.

Reizgevicius, M., Ustinovičius, L., Cibulskiene, D., Kutut, V. ve Nazarko, L., 2018, Promoting Sustainability through Investment in Building Information Modeling (BIM) Technologies: A Design Company Perspective, *Sustainability*, 10, 600.

Resalati, S., Kendrick, C. C. ve Hill, C., 2020, Embodied energy data implications for optimal specification of building envelopes, *Building Research & Information*, 48 (4), 429-445.

Rezaei, F., Bulle, C. ve Lesage, P., 2019, Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages, *Building and Environment*, 153, 158-167.

RICS, 2012, Methodology to calculate embodied carbon of materials, *Royal Institution of Chartered Surveyors, Coventry*.

RICS, 2017, Whole Life Carbon Assessment for the Built Environment, *Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) (https://www.rics.org/globalassets/rics-website/media/news/whole-life-carbon-assessment-for-the--built-environment-november-2017.pdf)*.

Risholt, B., Time, B. ve Hestnes, A. G., 2013, Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators, *Energy and Buildings*, 60, 217-224.

Rodrigues, F., Matos, R., Alves, A., Ribeirinho, P. ve Rodrigues, H., 2018, Building life cycle applied to refurbishment of a traditional building from Oporto, Portugal, *Journal of Building Engineering*, 17, 84-95.

Röck, M., Hollberg, A., Habert, G. ve Passer, A., 2018, LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages, *Building and Environment*, 140, 153-161.

Safari, K. ve AzariJafari, H., 2021, Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development, *Sustainable Cities and Society*, 67, 102728.

Sağlam, N. G., 2017, A new approach to identify achievable nearly-zero energy building targets for existing building retrofits, Doktora Tezi, *İstabul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Shadram, F., 2018, Assessment and Optimization of Life Cycle Energy Use in Buildings, Doktora, *Luleå University of Technology*, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, sf. 15.

Shirazi, A. ve Ashuri, B., 2020, Embodied Life Cycle Assessment (LCA) comparison of residential building retrofit measures in Atlanta, *Building and Environment*, 171, 106644.

Sierra-Pérez, J., Rodríguez-Soria, B., Boschmonart-Rives, J. ve Gabarrell, X., 2018, Integrated life cycle assessment and thermodynamic simulation of a public building's envelope renovation: Conventional vs. Passivhaus proposal, *Applied Energy*, 212, 1510-1521.

Simonen, K., 2017, Life Cycle Assessment: Pocket Architecture Technical Design Series, *Routlege, London, UK*, p. 4-5.

Simonen, K., Huang, M., Rodriguez, B. X. ve Todaro, L., 2019, Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide (The Carbon Leadership Forum Department of Architecture University of Washington), https://carbonleadershipforum.org/lca-practice-guide/ [Erişim Tarihi: 20.02.2022]:

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. ve García-Martínez, A., 2017, Critical review of bim-based LCA method to buildings, *Energy and Buildings*, 136, 110-120.

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. ve Moya, L., 2020, Comparative BIM-based Life Cycle Assessment of Uruguayan timber and concrete-masonry single-family houses in design stage, *Journal of Cleaner Production*, 277, 121958.

Su, S., Wang, Q., Han, L., Hong, J. ve Liu, Z., 2020, BIM-DLCA: An integrated dynamic environmental impact assessment model for buildings, *Building and Environment*, 183, 107218.

Süt, G., 2013, Türkiye derece gün bölgelerinde mevcut çok katlı konut binalarının dış kabuğunda yapılacak enerji etkin yenileme stratejileri, Yüksek Lisan Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Ankara.

Tıkır, A., 2009, İstanbul'da mevcut bir konutun dış kabuğunun enerji etkin yenilenmesi ve ekonomik etkinliğinin değerlendirilmesine yönelik bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* İstanbul.

Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., Zhang, G. ve Maqsood, T., 2021, An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development, *Journal of Cleaner Production*, 289, 125622.

UKGBC, 2019, Circular economy guidance for construction clients: How to practically apply circular economy principles at the project brief stage, https://ukgbc.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2019/04/05150935/Circular-Economy-Report-singles.pdf [Erişim Tarihi: 20.02.2022]:

UNCC, 2023, Global warming potentials (IPCC Second Assessment Report), https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials: [Erişim Tarihi: 18.12.2023].

UNEP, 2020, Environmental Impact Points, http://michaelminn.net/energy/life-cycle-analysis/ [Erişim Tarihi: 20.02.2022]:

UNEP, 2023a, 2022 Global Status Report for Buildings and Construction Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector, https://wedocs.unep.org/20.500.11822/41133: [Erişim Tarihi: 09.01.2024].

UNEP, 2023b, Building Materials and the Climate: Constructing a New Future, https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293: [Erişim Tarihi: 09.01.2024].

URL-1, 2023, Clayworks Case Studies-Wave Residence, https://clay-works.com/?gallery=wave-residence [Erişim Tarihi:26.12.2023]:

URL-2, 2023, Clayworks Natural Clay Plasters-Design Details, Technical Guidance, Limitations, https://clay-works.com/wp-content/uploads/2023/11/Clayworks_Design_Details-To-update.pdf [Erişim Tarihi:26.12.2023]:

URL-3, 2023, AGT Ahşap MDF Panel https://www.agt.com.tr/tr/panel/mdf [Erişim Tarihi: 26.12.2023]:

URL-4, 2023, Diasen Green Building Future-Diathonite Thermactive.037 Brochure, https://blog.diasen.com/en/lp-depliant-diathonite-thermactive [Erişim Tarihi: 26.12.2023]:

URL-5, 2023, DuPont AirGuard Air&Vapour Control Layer 5814X EPD, https://www.dupont.co.uk/content/dam/dupont/amer/us/en/performance-building-solutions/public/documents/en/EPD-DuPont-AirGuard-Air-Vapour-Control-Layer-5814X.pdf [Erişim Tarihi:26.12.2023]:

URL-6, 2023, Isola Tyvek UV Facade, https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/486f8d22-be38-4e2b-3d81-08daf8c13fbb/Data [Erişim Tarihi:26.12.2023]:

URL-7, 2023, VestaEco Wall-Impact resistant and vapour-permeable thermal insulation for walls, https://www.biobasedconsultancy.com/uploads/files/innprobio-biobased-database-vestaeco_wall_en.pdf [Erişim Tarihi:27.12.2023]:

URL-8, 2023, Ekolution-Product catalog 2023 hemp fiber insulation, https://www.ekolution.se/_files/ugd/745fcc_3720abdc2c1e4a5a83486f770227734e.pdf [Erişim Tarihi:27.12.2023]:

URL-9, 2023, Thermaflee Cosywool, Ultrawool Eden Renewable Innovations, https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/78be8497-87dd-4c92-3a66-08d99c9745fc/Data [Erişim Tarihi: 27.12.2023]:

URL-10, 2023, STEICOflex flexible wood fibre cavity insulation, https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/umwelt-produktdeklaration_epd/STEICOflex_flexible_wood_fibre_cavity_insulation.pdf [Erişim Tarihi:27.12.2023]:

URL-11, 2023, Amorim Cork Insulation-Expanded insulation corkboard, https://www.amorimcorkinsulation.com/en/products/ [Erişim Tarihi: 27.12.2023]:

URL-12, 2023, HASSLACHER GmbH-Glued laminated timber, glued solid timber, blok glued glulam and special components, https://www.hasslacher.com/data/_dateimanager/zertifikate/it/Travi_DUO-TRIO/EPD_GLT_GST_BGG_SC_ISO_14025_EN_15804_A2_HASSLACHER_Holding_GmbH_en.pdf [Erişim Tarihi: 27.12.2023]:

Volk, R., Stengel, J. ve Schultmann, F., 2014, Building Information Modeling (BIM) for existing buildings Literature review and future needs, *Automation in Construction*, 38, 109-127.

WGBC, 2019, Bringing Embodied Carbon Upfront: Coordinated Action for the Building and Construction Sector to Tackle Embodied Carbon, https://www.worldgbc.org/news-media/bringing-embodied-carbon-upfront [Erişim Tarihi: 20.02.2022]:

Wolf, C. D., Yang, F., Cox, D., Charison, A., Hattan, A. S. ve Ochsendorf, J., 2015, Material quantities and embodied carbon dioxide in structures, *Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability*, 171 (7), 334-341.

WRI, 2016, Şehirlerde Bina Verimliliği Çalışmalarının İvmelendirilmesi (Accelerating Building Efficiency), https://wrisehirler.org/arastirma/yayin/%C5%9Fehirlerde-bina-verimlili%C4%9Fi-%C3%A7ali%C5%9Fmalarinin-ivmelendirilmesi-accelerating-building: [Erişim Tarihi: 04.08.2020].

Yadav, M. ve Agarwal, M., 2021, Biobased building materials for sustainable future: An overview, *Materials Today: Proceedings*, 43, 2895-2902.

Yılmaz, B. Ç. ve Özgünler, S. A., 2019, A Performance Based Method for Selection of Thermal Insulation Material: Social Housing Case, *International Refereed Journal of Design and Architecture* (16), 141-162.

Ziapour, B. M., Rahimi, M. ve Yousefi Gendeshmin, M., 2020, Thermoeconomic analysis for determining optimal insulation thickness for new composite prefabricated wall block as an external wall member in buildings, *Journal of Building Engineering*, 31, 101354.

Zinzi, M., Agnoli, S., Burattini, C. ve Mattoni, B., 2020, On the thermal response of buildings under the synergic effect of heat waves and urban heat island, *Solar Energy*, 211, 1270-1282.

EKLER

EK-1 Gömülü karbon hesabında kullanılan çevresel ürün beyan (EPD) belgeleri

C16/20 (BS16/20) hazır beton EPD belgeleri
(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

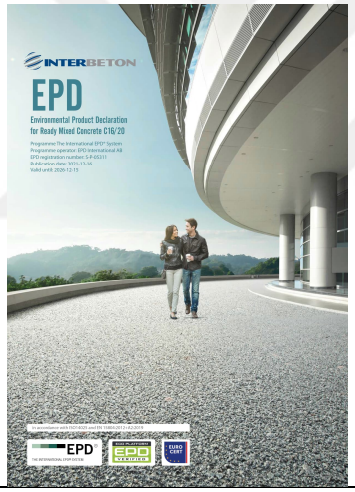
S-P-04981



S-P-07947



S-P-05311



S-P-06471



S-P-08277



ST420 donatı demiri EPD belgeleri

(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

S-P-04809



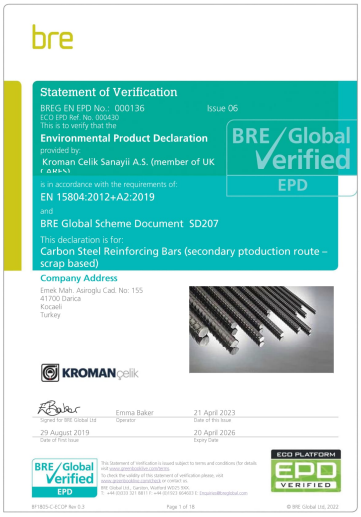
BREG EN 000080



BREG EN 000135



BREG EN 000136

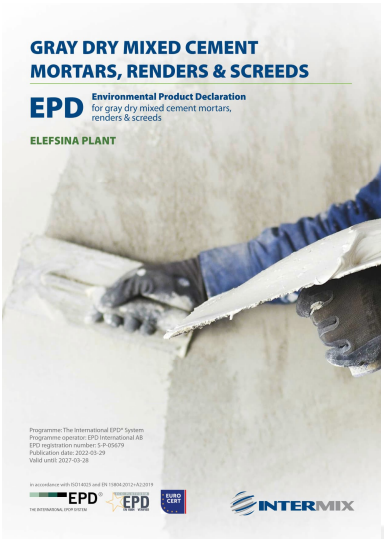


BREG EN 000276

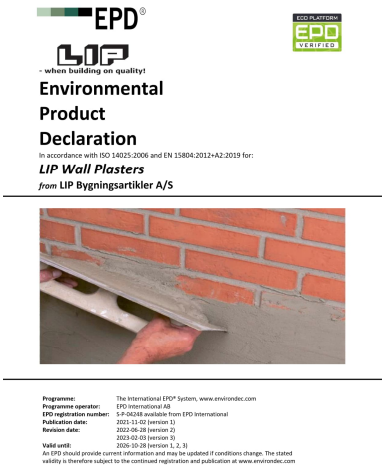


Çimento esaslı harç malzeme EPD belgeleri
(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

S-P-05679



S-P-04248



S-P-03160



20210128-DE



20220217-EN



Tuğla malzeme EPD belgeleri

(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

S-P-08942



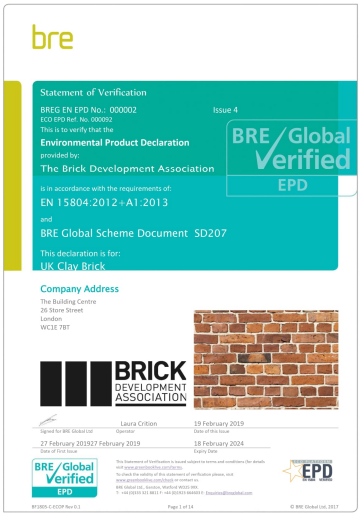
EPDIE-21-51



MD-21045-EN



BREG EN 000002



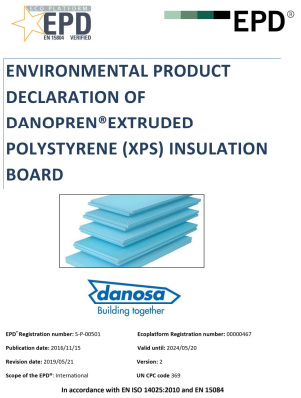
MD-21060-EN



Yalıtım levha malzeme EPD belgeleri

(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

S-P-00501



EPD-283



NEPD-3336-1961-EN



NEPD-4437-3697-EN



20190112-IBE1-EN



Cam malzeme EPD belgeleri

(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

S-P-06326



S-P-04810



S-P-01743



GFEV-GB-19.2

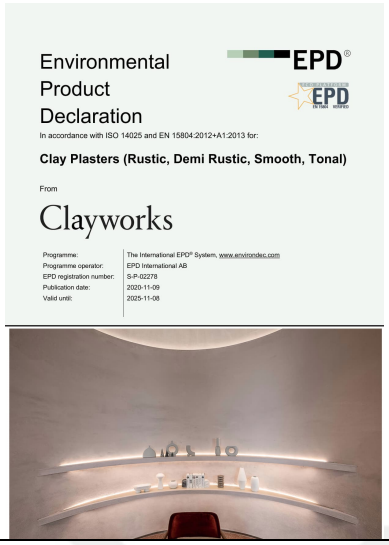


S-P-08816



Öneri kabuk modelleri sabit katman malzemeleri EPD belgeleri
(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

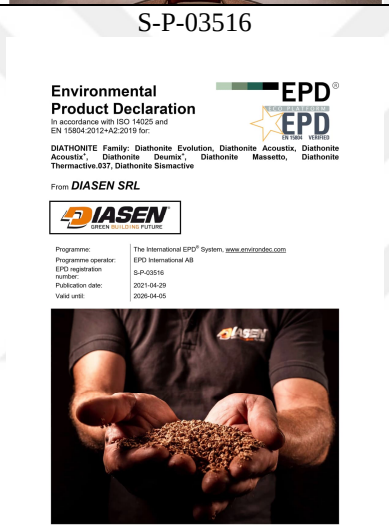
S-P-02278



S-P-01912



S-P-03516



20220295-CBA



3667-2612-EN

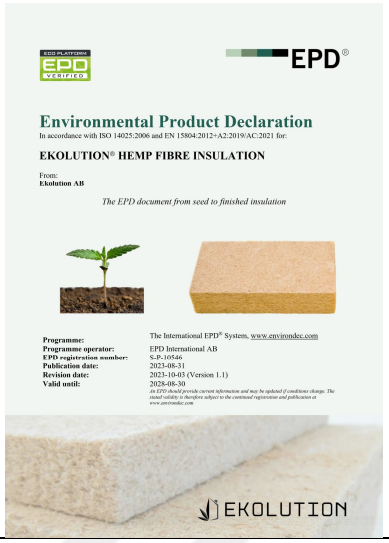


Öneri kabuk modelleri değişken katman malzemeleri EPD belgeleri
(Bütün EPD verisine erişmek için görselin üzerine tıklayınız.)

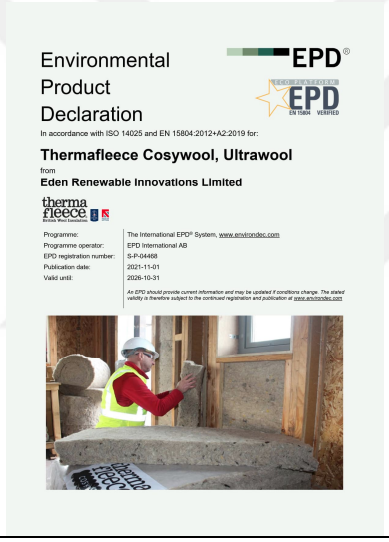
21-0123-002-00.00-EN



S-P-10546



S-P-04468



20200175-IBA1-EN



S-P-02315

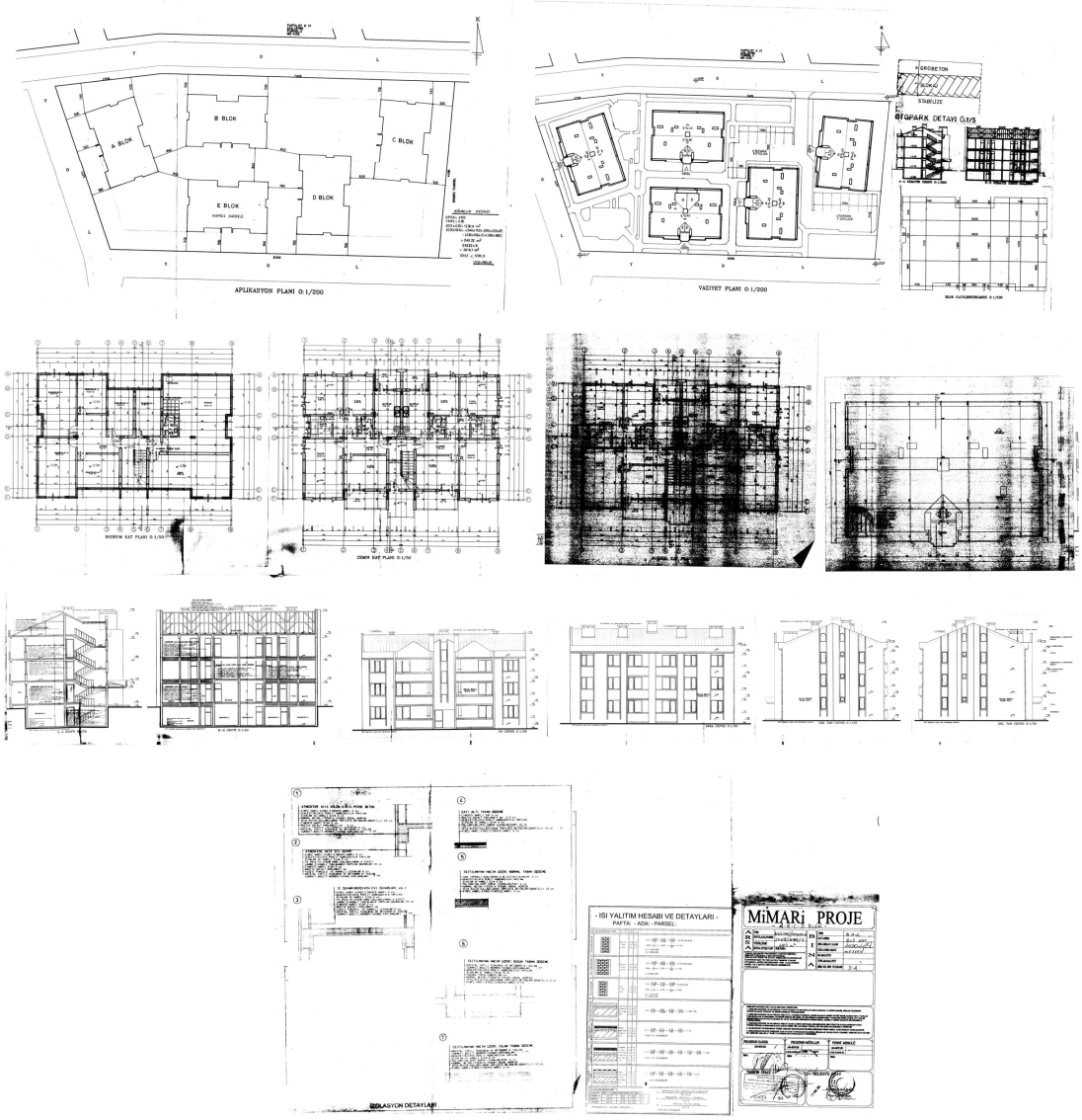


20210171-IBD1



EK-2 Çalışma materyali mevcut konut yapısına ait mimari ve statik projeler

Alan çalışmasında incelenmiş olan mevcut konut yapısı mimari projesi
(Detaylı inceleyebilmek için görselin üzerine tıklayınız.)



Alan çalışmasında incelenmiş olan mevcut konut yapısı statik projesi
(Detaylı inceleyebilmek için görselin üzerine tıklayınız.)

