



**KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MİMARLIK ANABİLİM DALI  
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PREFABRİKE VE GELENEKSEL AHŞAP ESASLI YAPIM SİSTEMLERİNİN  
KARŞILAŞTIRMALI YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

**Huriye ÖNAL**

**Yüksek Lisans Tezi**

**KONYA  
Ocak 2022**

PREFABRİKE VE GELENEKSEL AHŞAP ESASLI YAPIM SİSTEMLERİNİN  
KARŞILAŞTIRMALI YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Huriye ÖNAL

KTO Karatay Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Mimarlık Anabilim Dalı  
Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül TERCİ

Konya  
Ocak 2022

## BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Yüksek Lisans tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını basılı veya dijital biçimde arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullar dahilinde erişime açma iznini KTO Karatay Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle, Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak ve gelecekteki çalışmalar (makale, kitap, lisans, patent vb.) için tezimin tamamının veya bir bölümünün kullanım hakları yalnızca bana ait olacaktır.

Tezimin bütünüyle kendi çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izinle kullanılması zorunlu olan kaynakları, yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde izinlerin suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında, tezim, aşağıda belirtilen koşullar haricince, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve KTO Karatay Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.<sup>1</sup>

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 6 ay ertelenmiştir.<sup>2</sup>

Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.<sup>34</sup>

21 Ocak 2022

---

**Huriye ÖNAL**

---

<sup>1</sup> MADDE 6(1) Lisansüstü tezle ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

<sup>2</sup> MADDE 6(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ay aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

<sup>3</sup> MADDE 7(1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

<sup>4</sup> MADDE 7(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

## ETİK BEYAN

KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez/Proje Hazırlama ve Yazım Kurallarına uygun olarak Dr. Öğretim Üyesi Ayşegül TERECİ danışmanlığında tarafımdan üretilen bu tez çalışmasında; sunduğum tüm veri, enformasyon, bilgi ve belgeleri bilimsel etik kuralları çerçevesinde elde ettiğimi, tüm değerlendirme, analiz, bulgu ve sonuçları bilimsel usullere uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım kaynakların tümüne bilimsel normlara uygun biçimde atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

21 Ocak 2022

---

**Huriye ÖNAL**

*Aileme.*

## TEŞEKKÜR

Üniversite hayatımın ilk gününden itibaren, lisans ve lisansüstü eğitim sürecim ve akademik çalışmalarım boyunca bilgi, birikim ve deneyimleriyle her zaman yol gösteren; her konuda sabrı, özeni ve görüşleriyle destek olan çok sevgili danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül TERECİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma süresince değerli katkıları için saygıdeğer jüri üyeleri Doç. Dr. Süheyla BÜYÜKŞAHİN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kemal ERVAN'a çok teşekkürler. Aynı zamanda Mimarlık ve İç Mimarlık Bölümündeki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Çalışmamı gerçekleştirebilmem adına bilgi ve materyal desteğini esirgemeyen Öyler Ahşap İnşaat A.Ş. ve Zulle Ticaret Ltd.Şti.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve lisansüstü eğitim hayatımız boyunca güzel anılar biriktirdiğimiz, bu zorlu tez sürecindeki desteğinin yanı sıra ihtiyacım olduğu her an yardımına koşan çok değerli dostum "mahallemizin dost canlısı komşusu" Yüksek Mimar Uçman TAN'a çok teşekkür ederim.

Lise yıllarımdan bu yana devam eden dostluklarının yanı sıra; bu süreçte de yanımda olan canım arkadaşlarım Dr. Yazgı Beriy ALTUN GÜZELDEREN ve Dr. Elif KORKMAZ'a, farklı alanlarda çalışsak da tez yazım sürecini birlikte geçirdiğimiz, yaşadığım zorluklarda beni motive eden ve desteğini esirgemeyen canım arkadaşım Uzm. Klinik Psikolog Esra UZBAŞ UĞUR'a çok teşekkür ederim.

Son olarak bugün var olduğum kişiye dönüşmemi ve kendime inanmamı sağlayan, yalnızca eğitim hayatımda değil yaşamım boyunca iyi kötü her anımda yanımda olan, koşulsuz destek ve sevgilerini esirgemeyen canım annem Nuray ÖNAL'a ve canım babam Oğuz ÖNAL'a minnettarım. İyi ki varsınız.

Ocak, 2022

Huriye ÖNAL

## ÖZET

Huriye ÖNAL

Prefabrike ve Geleneksel Ahşap Esaslı Yapım Sistemlerinin Karşılaştırmalı Yaşam

Döngüsü Değerlendirmesi

Yüksek Lisans Tezi

Konya, 2022

İnşaat sektörü enerji ve kaynak tüketiminde etkin bir rol oynamakla birlikte bina tasarımında yapı malzemelerinin üretimi ve inşaat aşamasında oluşan çevresel etkilerin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu bağlamda yapı sektöründe çevresel etkilerin değerlendirilmesi için en etkili yöntem olarak yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi öne sürülmüştür. Bu süreçte endüstrileşmiş yapım sistemlerinin yaygınlaşması sonucunda prefabrike yapım sistemlerinin geleneksel yapım sistemlerine alternatif olarak kullanılmasıyla birlikte iki yapım sistemi arasında çevresel etkilerin değerlendirilmesine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Tez çalışması kapsamında yaşam döngüsü değerlendirme yöntemine bina ölçeğinde bakılarak, her iki yapım yöntemini kapsayacak şekilde ilgili standartlara göre değerlendirme metodu belirlenmiştir. Literatüre katkı sağlamak amacıyla bu çalışmada, ahşap esaslı prefabrike (ön üretim) ve ahşap esaslı geleneksel (yerinde) yapım sistemi olmak üzere iki farklı yapım sistemiyle oluşturulmuş tek aileli iki konutun yaşam döngüsü değerlendirmesi aracı kullanılarak binaların tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Değerlendirme için farklı firmalardan alınan aynı taban alanına sahip prefabrike ve geleneksel sistemle yapılması planlanan iki tek aileli konut kullanılmıştır. Bu çalışmada da yaşam ömrü 100 yıl kabul edilen örnek binalar “One Click LCA” aracı kullanılarak, yaşam döngüsü aşamalarına göre 7 çevresel etki kategorisi özelinde değerlendirilmiş ve karşılaştırma için gerekli bulgulara ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular, farklı yapım sistemleriyle oluşturulan iki konutun 100 yıllık yaşam ömrü boyunca çevresel etkilerinin belirlenmesine ve karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Karşılaştırma sonucunda; ahşap esaslı malzeme kullanımının ve prefabrike yapım sisteminin inşaat sektöründeki olumsuz çevresel etkilerin azaltılması yönünde etkili bir yapım sistemi olacağı bulunmuştur.

### **Anahtar Kelimeler**

Yaşam döngüsü değerlendirme, çevresel etki, prefabrike yapım sistemi, ahşap esaslı yapı malzemesi, tek aileli konut

## **ABSTRACT**

Huriye ÖNAL

Comparative Life Cycle Assessment of Prefabricated and Traditional Wood Based

Structural Systems

Master's Thesis

Konya, 2022

While the construction sector plays an active role in energy and resource consumption, it constitutes an important part of the environmental impacts occurring during the production of building materials and construction phase in structural design. In this context, the life-cycle assessment method has been proposed as the most effective method for the assessment of environmental impacts in the building sector. In this process, as a result of the widespread use of industrialized construction systems, it is seen that there is a need to assess the environmental impacts between the two construction systems, with the use of prefabricated construction systems as an alternative to traditional construction systems. The life-cycle assessment method was examined at the building scale, and the assessment method was determined according to the relevant standards, covering both construction methods within the scope of the thesis. In order to contribute to the literature, it is aimed with this thesis to compare the environmental effects of the buildings throughout their entire life cycle by using the life cycle assessment tool of two single-family houses built with two different construction systems, which are prefabricated (pre-production) and traditional (in-situ construction) systems produced with wood-based building materials. Two single-family houses planned to be built with the same floor area, prefabricated and traditional system, gotten from different companies, were used for assessment purposes. In this study, the sample buildings with a lifespan of 100 years were assessed using the “One Click LCA” tool, according to their life-cycle stages, in 7 environmental impact categories, and the necessary findings have been obtained for comparison. The findings allow the determination and comparison of the environmental impacts of two houses built with different construction systems over their 100-year lifespan. As a result of the comparison; It has been found that the use of wood-based materials and the prefabricated construction system will be an effective construction system in reducing the negative environmental effects in the construction sector.

### **Keywords**

Life cycle assessment, environmental impact, prefabricated construction system, wood-based building material, single family house



## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY .....	i
BİLDİRİM .....	ii
ETİK BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
TABLolar DİZİNİ .....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER DİZİNİ.....	xvii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
1. GİRİŞ .....	1
2. PREFABRİKASYON VE PREFABRİKE YAPIM SİSTEMLERİ .....	5
2.1. Prefabrikasyonda Modül, Modüler ve Modüler Yapım Kavramı .....	6
2.1.1. Modül çeşitleri.....	9
2.1.2. Modüler koordinasyon.....	10
2.2. Prefabrike Yapım Sistemlerinde Malzeme Kullanımı .....	10
2.2.1. Yapıştırılmış lamine ahşap ( <i>glulam</i> ) ( <i>GLT</i> ).....	11
2.2.2. Lamine kaplama kereste ( <i>laminated veneer lumber – LVL</i> ).....	12
2.2.3. Paralel şerit kereste ( <i>parallel strand lumber - PSL</i> ).....	13
2.2.4. Tabakalı şerit kereste ( <i>laminated strand lumber - LSL</i> ).....	14
2.2.5. Çapraz lamine ahşap ( <i>cross laminated timber - CLT</i> ).....	15
2.3. Prefabrike Yapım Sistemleri .....	16
2.3.1. Parça üretimi ve alt montaja dayalı prefabrikasyon .....	19
2.3.2. Hacimsel olmayan (panel) prefabrikasyon .....	20
2.3.3. Hacimsel (modüler) prefabrikasyon .....	21
2.3.4. Hibrit prefabrikasyon.....	22
2.3.5. Tamamlanmış (kutu) yapılar.....	22
3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ .....	23
3.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Yöntemi .....	26
3.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmenin Bina Tasarım Uygulamasında Kullanımı ..	27
3.2.1. Üretim ve İnşaat Aşaması (A Modülü).....	28

3.2.2. Kullanım Aşaması (B Modülü) .....	29
3.2.3. Kullanım Ömrünün Sonu Aşaması (C Modülü).....	32
3.2.4. Kullanım Ömrü Haricindeki Aşama (D Modülü).....	33
3.2.5. TS EN 15978 (2012) Standardına Göre Prefabrike ve Geleneksel Yapılarda Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi .....	33
3.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Aşamaları .....	34
3.3.1. Amaç ve Kapsam Tanımı (AKT) .....	36
3.3.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDE).....	39
3.3.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED).....	40
3.3.4. Yaşam Döngüsü Yorumlaması (YDY).....	45
4. MATERYAL VE METOT: YAPI TASARIM AŞAMASINDA “ONE CLICK LCA” ARACI İLE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ.....	46
4.1. Metot .....	49
4.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Aracı: One Click LCA – Building LCA .....	53
4.3. Örnek Yapı 1: Tek Aileli Ahşap Prefabrike Konut.....	54
4.4. Örnek Yapı 2: Tek Aileli Ahşap Geleneksel Konut.....	60
5. BULGULAR.....	67
5.1. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması ...	67
5.1.1. Üretim Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	69
5.1.2. İnşaat Süreci Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	70
5.1.3. Kullanım Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	71
5.1.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	73
5.2. Asitleşme Potansiyeli (AP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	73
5.2.1. Üretim Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması .....	75
5.2.2. İnşaat Süreci Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	76
5.2.3. Kullanım Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması .....	77
5.2.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	78
5.3. Ötrefikasyon Potansiyeli (EP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	79

5.3.1. Üretim Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması .....	81
5.3.2. İnşaat Süreci Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	82
5.3.3. Kullanım Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	83
5.3.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	84
5.4. Ozon Delme Potansiyeli (ODP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	85
5.4.1. Üretim Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması .....	87
5.4.2. İnşaat Süreci Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	88
5.4.3. Kullanım Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	89
5.4.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması.....	90
5.5. Alt Atmosferde (Fotokimyasal) Ozon Oluşumu (POCP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	91
5.5.1. Üretim Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması.....	93
5.5.2. İnşaat Süreci Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması.....	94
5.5.3. Kullanım Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması.....	95
5.5.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması.....	96
5.6. Birincil Enerjinin Toplam Kullanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	97
5.6.1. Üretim Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması.....	98
5.6.2. İnşaat Süreci Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması.....	99
5.6.3. Kullanım Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması.....	100
5.6.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması .....	102
5.7. Biyojenik Karbon Depolama Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	102
6. SONUÇ .....	104
KAYNAKLAR .....	108

ÖZGEÇMİŞ .....	115
EK 1. Malzeme gruplarının ve inşaat sahasındaki diğer faktörlerin çevresel etkilerinin karşılaştırılması .....	116
EK 2. Malzeme gruplarının ve inşaat sahasındaki diğer faktörlerin binaların oluşturduğu toplam etkiler içinde dağılımı .....	120

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Derecelerine göre prefabrike sistemler .....	18
Tablo 1. Derecelerine göre prefabrike sistemler (devam).....	19
Tablo 2. Yaşam döngüsü değerlendirmesine ilişkin ISO belgeleri.....	25
Tablo 3. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi terimlerine örnekler .....	42
Tablo 4. Çevresel etki kategorileri ve birimleri .....	52
Tablo 5. Ahşap prefabrike konutun yapı elemanlarına göre yapı malzemeleri ve metrajı .....	56
Tablo 6. Ahşap prefabrike konutun yaşam döngüsü çevresel etki sonuçları .....	59
Tablo 7. Ahşap geleneksel konutun yapı elemanlarına göre yapı malzemeleri ve metrajı .....	62
Tablo 8. Ahşap geleneksel konutun yaşam döngüsü çevresel etki sonuçları.....	66
Yaşam döngüsü aşamaları.....	66
Tablo 9. Küresel ısınma potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .	69
Tablo 10. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı .....	69
Tablo 11. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı .....	71
Tablo 12. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı .....	72
Tablo 13. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı .....	73
Tablo 14. Asitleşme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .....	75
Tablo 15. Prefabrike konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı .....	75
Tablo 16. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı .....	76
Tablo 16. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam).....	77
Tablo 17. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı .....	78
Tablo 18. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı.....	79
Tablo 19. Ötrofikasyon potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması ..	80
Tablo 19. Ötrofikasyon potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması (devam) .....	81

Tablo 20. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı .....	81
Tablo 21. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı .....	82
Tablo 21. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam).....	83
Tablo 22. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı.....	84
Tablo 23. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı.....	85
Tablo 24. Ozon delme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması....	86
Tablo 24. Ozon delme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması (devam) .....	87
Tablo 25. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı .....	87
Tablo 26. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı .....	88
Tablo 26. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam) .....	89
Tablo 27. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı .....	90
Tablo 28. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı .....	91
Tablo 29. Alt atmosferde ozon oluşumunun yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .....	93
Tablo 30. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı.....	93
Tablo 31. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı .....	94
Tablo 31. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam) ..	95
Tablo 32. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı .....	95
Tablo 32. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı (devam).....	96
Tablo 33. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı .....	96

Tablo 33. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı (devam) .....	97
Tablo 34. Birincil enerjinin toplam kullanımının yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .....	98
Tablo 35. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının üretim aşamasındaki dağılımı.....	99
Tablo 36. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının inşaat süreci aşamasındaki dağılımı .....	100
Tablo 37. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının kullanım aşamasındaki dağılımı .....	101
Tablo 38. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı .....	102
Tablo 39. Biyojenik karbon depolamanın karşılaştırılması .....	103

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Prefabrike yapım sistemlerinin sınıflandırılması .....	5
Şekil 2. Modülör .....	7
Şekil 3. Gridal organizasyon .....	7
Şekil 4. Prefabrike yapım sistemi ürün şeması .....	8
Şekil 5. Koordinat sisteminden faydalanılan ızgara sistem .....	9
Şekil 6. Yapıştırılmış lamine ahşap (GLT) .....	12
Şekil 7. LVL ile kontrplak arasındaki tabakalanma farkı .....	13
Şekil 8. Paralel şerit kereste .....	14
Şekil 9. Tabakalı şerit kereste .....	14
Şekil 10. Çapraz lamine ahşap .....	15
Şekil 11. Ahşap iskelet yapım sistemleri .....	16
Şekil 12. Prefabrike ve geleneksel yapım süreçlerinin karşılaştırılması.....	17
Şekil 13. Masif taşıyıcı ahşap elemanların birleşimi .....	20
Şekil 14. Küçük ve büyük boyutlu ahşap panel sistemi elemanları.....	21
Şekil 15. Yaşam döngüsü geleneksel modeli .....	26
Şekil 16. Binalar için yaşam döngüsü aşamaları ve modüller .....	28
Şekil 17. Yerinde inşaat (geleneksel) yöntemine (a) ve prefabrike yöntemine (b) uygulanan TS EN 15804 / TS EN 15987'nin modüler ilkesi .....	34
Şekil 18. Yaşam döngüsü değerlendirme aşamaları ve ilişkileri .....	35
Şekil 19. YDD için bir ürün sistemi örneği .....	37
Şekil 20. Ana işlem için girdi ve çıktılar .....	38
Şekil 21. YDED aşamasının unsurları .....	41
Şekil 22. Orta nokta ve son nokta (koruma alanı) seviyelerinde karakterizasyon modellemesi için etki kategorileri çerçevesi .....	43
Şekil 23. Birden fazla etki kategorisiyle eşleştirilen envanter verileri örneği .....	44
Şekil 24. Yorumlama aşamasındaki unsurlar ile YDD'nin diğer aşamaları arasındaki ilişki.....	45
Şekil 25. Araştırma materyalleri (1), yapım sürecine dayalı analiz yöntemi için bilgiler (2), analizde etkili dış faktörler (3), incelenen yapı bileşenleri (4).....	49
Şekil 26. Yaşam döngüsü değerlendirme aracı akış şeması.....	50
Şekil 27. Kat planı (a), arka cephe strüktürü (b).....	54
Şekil 27. Kat planı (a), arka cephe strüktürü (b) (devam).....	55
Şekil 28. Kat planı (a), ön cephe strüktürü (b), sağ cephe strüktürü (c) .....	60



Şekil 28. Kat planı (a), ön cephe strüktürü (b), sağ cephe strüktürü (c) (devam) .....	61
Şekil 29. Küresel ısınma potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması	68
Şekil 30. Asitleşme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .....	74
Şekil 31. Ötrofikasyon potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması ...	80
Şekil 32. Ozon delme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .....	86
Şekil 33. Alt atmosferde ozon oluşumunun yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .....	92
Şekil 34. Birincil enerjinin toplam kullanımının yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması .....	97
Şekil 35. Biyojenik karbon depolamanın karşılaştırılması .....	103

## SİMGELER DİZİNİ

<b>Simge</b>	<b>Açıklama</b>
cm	Santimetre
m	Metre
mm	Milimetre
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
m <sup>2</sup>	Metrekare
kg	Kilogram
NO <sub>2</sub>	Azotdioksit
m <sup>3</sup>	Metreküp
km	Kilometre
kWh	Kilowatt saat
SO <sub>2</sub>	Sülfürdioksit
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	Fosfat
CFC-11	Trikloroflorometan
MJ	Mega Joule
eq	Equivalent (eşdeğer)

## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Kısaltma</b>	<b>Açıklama</b>
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AKT	Amaç ve Kapsamın Tanımlanması
AP	Acidification Potential (Asitleşme Potansiyeli)
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CEN	European Committee for Standardization (Avrupa Standardizasyon Komitesi)
CLT	Cross Laminated Timber (Çapraz Lamine Ahşap)
ÇÜB	Çevresel Ürün Beyanları
EC-JRC	The European Commission's Joint Research Centre (Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi)
EDIP	The Environmental Development of Industrial Products (Endüstriyel Ürünlerin Çevresel Gelişimi)
EN	European Norm (Avrupa Normu)
EP	Eutrophication Potential (Ötrofikasyon Potansiyeli)
EPD	Environmental Product Declaration (Çevresel Ürün Beyanı)
EPDK	T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GLT	Glued Laminated Timber (Yapıştırılmış Lamine Ahşap)
GWP	Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
IEA	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
ISO Kuruluşu)	International Standards Organisation (Uluslararası Standartlar Kuruluşu)
LCA	Life Cycle Assessment
LSL	Laminated Strand Lumber (Lamine Şerit Kereste)
LVL	Laminated Veneer Lumber (Lamine Kaplama Kereste)
M	Modül
MRI	Midwest Research Institute (Midwest Araştırma Enstitüsü)
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozon Delme Potansiyeli)
OSB	Oriented Strand Board
POCP	Photochemical Ozone Creation Potentials (Fotokimyasal Ozon Oluşumu Potansiyeli)

PSL	Parallel Strand Lumber (Paralel Şerit Kereste)
REPA Profili Analizi)	Resource and Environmental Profile Analysis (Kaynak ve Çevre Profili Analizi)
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği)
SCL	Structural Composite Lumber (Yapısal Kompozit Ahşap)
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TRACI	Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (Kimyasalların ve Diğer Çevresel Etkilerin Azaltılması ve Değerlendirilmesi Aracı)
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UNEP Çevre Programı)	United Nations Environmental Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YDE	Yaşam Döngüsü Envanter Analizi
YDED	Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi
YDY	Yaşam Döngüsü Yorumlaması

## 1. GİRİŞ

Sanayi devrimiyle birlikte endüstrileşme hayatın her alanına girmiş ve üretimler insan gücü yerine makinelerle yapılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte ortaya çıkan nüfus artışı, yoğun kentleşme ve konut talebi, fabrika yapımı binaların üretimini gündeme getirmiştir. 2. Dünya Savaşı'ndan sonraki bu süreçte birçok tasarımcı seri üretilen konut yapımı üzerinde durmuş ve bu alanda çalışmalar yapmıştır (Erturan ve Eren, 2012). Toplumun değişmeye başlayan ihtiyaç ve istekleri doğrultusunda inşaat sektöründe endüstrileşmeye gidilerek yeni malzeme ve yapım teknikleri geliştirilmiştir. Yapım sistemlerinde endüstrileşmedeki amaç; gerekli fonksiyonları karşılayan yapıları daha az işçilikle, kısa sürede ve uygun maliyetle elde etmektir. Bu amaçla ortaya çıkan “endüstrileşmiş yapım sistemleri” standartlaşma, seri üretim ve koordinasyon ilkelerine dayanmaktadır. Böylece prefabrikasyonla çok sayıda ürün kısa sürede elde edilmeye başlanmış, şantiyede birleştirilmek üzere fabrikada üretilen elemanlar kullanılarak yapı üretiminde verimlilik sağlanmaya çalışılmıştır. Prefabrike sistemlerde yapı elemanlarının fabrikada ön montajı yapılırken aynı zamanda şantiyedeki çalışmalar da başlayabilmekte ve böylece iş gücünün de azalmasıyla birlikte inşaat süresi kısalmaktadır. Geleneksel yerinde yapım sistemiyle karşılaştırıldığında; şantiye hazırlığı ve yapı ve modülerinin üretimi eş zamanlı olarak ilerlediğinden inşaat süresinden kazanç elde edilebilmektedir (Quale vd. 2012; Smith vd., 2018; Velamati, 2012).

İnşaat sektörü dünyanın enerji ve kaynak tüketiminde etkin bir rol oynamakla birlikte önemli bir çevresel etkiye sahiptir. Bir binanın, yapımından yıkılmasına kadar olan süreçte yaşam ömrü boyunca doğal kaynak tüketimi ve salınan emisyonlar üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Dünyadaki işlenmiş hammaddelerin yaklaşık %50'si inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Hollberg ve Ruth, 2016; Nwodo ve Anumba, 2019). Ulusal Enerji Ajansı'nın (IEA) 2021'de yayınlanan son raporuna göre, inşaat sektörü nihai enerji kullanımının %36'sını, enerjiyle ilgili karbondioksit emisyonlarının ise %37'sini oluşturmaktadır. %36'lık nihai enerji kullanımının %22'sini, karbondioksit emisyonlarının %17'sini ise konut yapıları oluşturmaktadır (The United Nations Environment Programme [UNEP], 2021). Binalarda enerji kullanımının yanı sıra bina tasarımında yapı malzemeleri üretim ve inşaat aşaması da, çevresel etkilerin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalara göre yapılar, toplam hammadde

kullanımının %40'ını, atmosfere zararlı salınımların %50'sini oluşturmaktadır. Kaynak tüketimlerinin paralelinde oluşan toplam atıkların ise %35'i inşaat sektöründen kaynaklanmaktadır. Bu nedenlerle çevresel sürdürülebilirlik açısından iyileştirilmesi gereken en önemli sektörlerden biri inşaat sektörü olarak görülmektedir. Günümüzde Türkiye'de inşaat sektörüne odaklanılarak kaynak tüketiminde bina stoğunun çevresel etkilerinin azaltılmasına ve düşük karbon teknolojilerinin kullanılması üzerine çalışmalar yürütülmektedir (Çetiner ve Metin, 2011; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], 2016). Bununla birlikte Avrupa Komisyonu 2050 yılına kadar inşaat sektöründen kaynaklanan karbondioksit emisyonlarında %90 oranında bir azalma hedeflemektedir (The European Commission's Joint Research Centre [EC-JRC], 2011; Petrovic, 2019). Bu doğrultuda çevresel etkilerin değerlendirilmesi amacıyla en etkin yöntemin "yaşam döngüsü değerlendirmesi – life cycle assessment" olduğu öne sürülmüştür (Curran, 1996). İlk olarak ürün ve süreçlerin değerlendirilmesinden yola çıkılan yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi, hizmet ömrü boyunca kaynak girdi-çıktılarının mevcut ve potansiyel çevresel etkilerinin tahmin edilmesi ve bir araya getirilmesinde kullanılan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (TS EN ISO 14040:2006, 2007). Yapı sektöründe binaların kullanımdan kaynaklı çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve azaltılmasına katkıda bulunabilmek için çeşitli yöntemler uygulanmış ve yaşam döngüsü değerlendirilmesi (YDD) bunların içinde en güvenilir yöntem olarak kabul görmüştür (Bahramian ve Yetilmezsoy, 2020). İnşaat sektöründe tasarım aşamasında yaşam döngüsü değerlendirme yönteminin uygulanması, çevresel etki değerlendirme sonuçlarına göre mimar, mühendis ve diğer karar vericilere yardımcı olmaktadır (Abd Rashid ve Yusoff, 2015).

Binalarda yapılan yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi, TS EN 15978 (2012)'e göre üretim, inşaat, kullanım ve kullanım ömrünün sonu aşamalarından oluşmaktadır. Birçok çalışmada, binanın kullanım aşamasının, yaşam döngüsü enerji kullanımının %70'inden fazlasını oluşturduğu sonucuna ulaşılmış ve kullanım aşamasının analizine odaklanılmıştır (Fay vd., 2000; Ortiz vd., 2009; Passer vd., 2012). Bu analizler sonucu kullanım aşamasından kaynaklanan çevresel etkilerin azaltılması çalışmaları yapılmış ve diğer yaşam döngüsü aşamalarının etkisi üzerinde durulmaya başlanmıştır. Bazı çalışmalarda, üretim ve inşaat aşamasından kaynaklanan çevresel etkilerin, binanın tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkisinin yaklaşık %50'sini oluşturduğu sonuçlarına

ulaşılması ve binaların diğer yaşam döngüsü aşamalarının etkisine olan ilgi önemli ölçüde artmıştır (Dodoo vd., 2009; Hafner vd., 2012; Thormark, 2006).

Bu tez çalışmanın amacı; ahşap esaslı malzemelerden oluşan prefabrike ve geleneksel yerinde yapım sistemi olmak üzere iki farklı yapım sistemiyle oluşturulmuş tek aileli ve tek katlı iki konutun yaşam döngüsü değerlendirmesi aracı kullanılarak binaların beşikten mezara tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek ve karşılaştırmaktır. Çalışma kapsamında; iki ayrı firma tarafından prefabrike ve geleneksel sistemle projelendirilmiş eşit taban alanına sahip iki konut değerlendirmeye alınmıştır. Firmalardan alınan malzeme, yapım süreci, çalışan işçi sayısı bilgileri doğrultusunda veriler girilmiştir. Yapıların temel kazma işlemleri eşit kabul edilerek yalnızca toprak üstünde kalan bölümleri incelenmiş, temel bilgileri yok sayılmıştır. Kullanım aşamasındaki elektrik ve doğal gaz tüketimleri ise yıllık tüketime göre hesaplanan kaynaklardan edinilmiştir. Çalışmada kullanılan bu örnek yapıların, One Click LCA – Building LCA aracı yardımıyla yaşam döngüsü değerlendirmeleri gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde çalışmanın amacı, kapsamı, yöntemi ve sonraki bölümlerin içeriğini özetleyen açıklamalar bulunmaktadır. İkinci bölüm, prefabrike yapım sistemlerinin ve prefabrike yapım sistemlerinde kullanılan ahşap esaslı malzemeler hakkında ayrıntılı bilgileri içeren bir literatür taramasıdır. Bu bölümde prefabrikasyon tanımlanmış ve esas olarak prefabrike yapım sistemleri sınıflandırılmış ve özetlenmiştir. Üçüncü bölümde yaşam döngüsü değerlendirme yönteminin tarihçesi, değerlendirmenin standartlara dayalı olarak bina tasarımında kullanımı ve yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesine ait bilgiler yer almaktadır. Ayrıca bu bölümde, prefabrike ve geleneksel yapıların yaşam döngüsü değerlendirme yöntemlerinin farklılıkları irdelenmiştir. Dördüncü bölüm, çalışmanın materyal ve yönteminin yer aldığı kısımdır. Bu bölümde yöntem açıklandıktan sonra, örnek yapıların değerlendirmede kullanılacak verilerine dair bilgiler detaylı olarak verilmekte ve One Click LCA aracı tanıtılarak çalışmada nasıl kullanıldığı açıklanmaktadır. Beşinci bölüm, yaşam döngüsü değerlendirme aracından elde edilen bulguları ve 7 etki kategorisine göre değerlendirme sonuçlarını içermektedir. Elde edilen bulgular bu bölümde, etki kategorilerinin alt başlığında yaşam döngüsünün üretim, inşaat, kullanım ve kullanım ömrünün sonu aşamalarında karşılaştırmalı olarak

irdelenmektedir. Son olarak altıncı bölümde ise bulgular özetlenmiş ve öneriler sunularak tez çalışması sonuçlandırılmıştır.

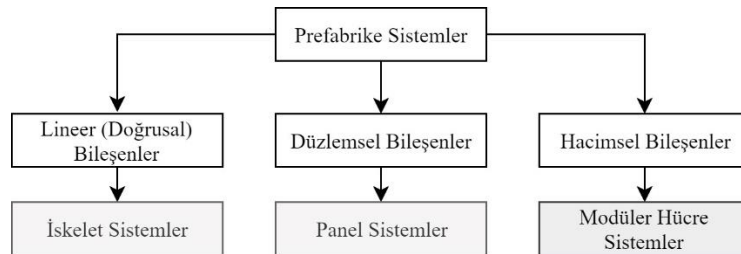


## 2. PREFABRİKASYON VE PREFABRİKE YAPIM SİSTEMLERİ

Hasol (2014), prefabrikasyonu “hazır elemanlar ya da bileşenlerle yapı kurma; şantiye çalışmasının imkanları ölçüsünde fabrika çalışması haline getirilmesi ile yapılan inşaat, ön üretim, ön yapım” olarak tanımlamıştır.

En genel tabiri ile prefabrikasyon, yapının ya da yapı bileşenlerinin şantiye dışında üretimidir. Geleneksel yapım sistemine alternatif olarak geliştirilen bu sistemin amacı bir binadaki yapı bileşen ve elemanlarının sayısını ve çeşidini azaltmaktır. Bir başka deyişle inşa edilecek olan yapıya uygun yapı elemanlarının atölyeler ve endüstriyel bantlarda nitelikli elemanlar tarafından tasarlandığı ve üretildiği süreçtir. Atölyelerde uzman kişiler tarafından teknikerlerle birlikte tasarlanan ve üretilen yapı elemanları büyüklüklerine uygun nakliye araçları ile inşaat sahasına taşındıktan sonra yerlerine monte edilmektedir. Böylece yapım süresi en aza inmekte ve kaynak tasarrufu sağlanmaktadır. Bu tür yapım sistemlerinde kullanılan prefabrike yapı parçaları ve birleşim noktalarının, modüler koordinasyon kurallarına uyması gerekmektedir. Prefabrikasyonun tanımından yola çıkılarak pek çok kavram, gelişen süreçte literatüre eklenmiştir. Bunlar; şantiye dışı imalat, önceden tasarlanmış sistemler, modern yapı yöntemleri, modüler tasarım, sistem binası, kit evleri, flat-pack, endüstriyel binalar gibi kavramlardır (Deniz, 1999; Edward ve Rand, 2016; Steinhardt vd., 2013; Yuvaraj ve Dharman, 2016).

Staib vd. (2008), “Prefabrikasyonla bina tasarımı; lineer, düzlemsel veya uzaysal olarak yapılmaktadır ve yapım sisteminin karakteristik esaslarını bu tercihler belirler.” demiştir. Bu şekilde prefabrike elemanlarla oluşturulan prefabrike yapım sistemleri Şekil 1’de olduğu gibi 3 gruba ayrılmıştır; iskelet sistemler, panel sistemler ve modüler hücre sistemler.



**Şekil 1. Prefabrike yapım sistemlerinin sınıflandırılması**

Kaynak: Staib vd. (2008) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

Ayazoğlu (2003), prefabrike sistemleri, taşıyıcı sistem biçimlenişi açısından sınıflandırıldığında;

- İskelet sistem: Yatay ve düşey düzlemlerde bulunan tek boyutlu (çizgisel) strüktürel elemanlardan oluşan sistem,
- Panel (düzlemsel) sistem: Yatay ve düşey düzlemlerde bulunan iki boyutlu (düzlemsel) strüktürel elemanlardan oluşan sistem,
- Hücre (hacimsel) sistem: Üç boyutlu, hücre birimlerden oluşan sistem olarak ayırmıştır.

Prefabrike yapım sistemleri Gibb ve Isack (2003)'e göre artan ön yapım derecelerine göre,

- Parça üretimi ve kısmi (alt) montaj (kapı, pencere gibi yapı elemanlarının montajı),
- Hacimsel olmayan (panel)
- Hacimsel
- Modüler yapı, şeklinde dört alt kategoriye ayrılmıştır.

Taşıyıcı sistem malzemesine göre ise prefabrike sistemler,

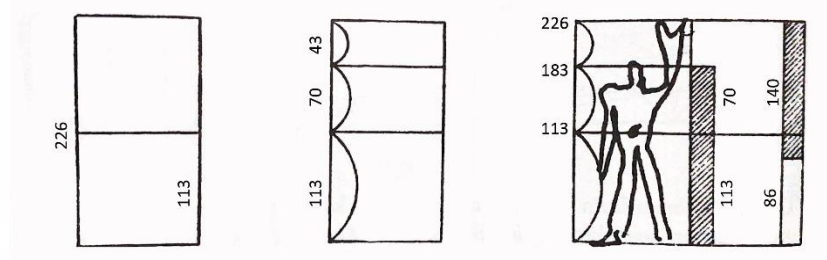
- Beton esaslı,
- Çelik ve alüminyum esaslı,
- Plastik esaslı,
- Ahşap esaslı sistemler olarak sınıflandırılmaktadır (Vural, 2005).

## **2.1. Prefabrikasyonda Modül, Modüler ve Modüler Yapım Kavramı**

Hasol (2014) modern mimarlıkta “modül” kavramını “standartlaşmayı büyük ölçüde kolaylaştıran, binanın ve bileşenlerinin ölçülerinde tekrarlanan bir uzunluk birimi” şeklinde tanımlamıştır.

Yapıların tasarımındaki modül kullanımı genellikle insan ölçüleri dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Corbusier (2011) estetik boyutlandırma ve insan vücut oranlarından yola çıkarak yapı birimlerinin oranlarının belirlenmesinde işlevsel bir boyutlandırma

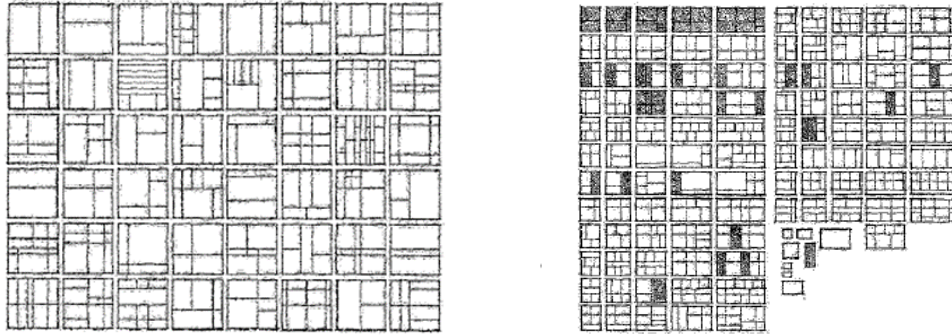
geliştirmiştir. Bu şekilde Le Corbusier'in "Modulor" kitabında bahsettiği "modulor" kavramı ortaya çıkmıştır. Le Corbusier'in ideal insanın elini kaldırdığında erişebileceği yükseklik olan 226 cm ve bunun yarısı olan 113 cm başlangıç boyutları olarak belirlenmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi Modulor'de ideal insan boyu 183 cm olarak kabul edilmiştir (Hasol, 2014; Tokgöz ve Koçak, 2009).



**Şekil 2. Modulor**

Kaynak: Ching (2014)

Ayrıca Le Corbusier'in Modulor'ünde, konut tasarımında uyguladığı, modulor oranlarıyla elde edilen diyagramlar bulunmaktadır. Bu diyagramlar Ching (2014) tarafından Şekil 3'teki gibi olup panel boyutları ve yüzeylerin çeşitliliğini göstermek amacıyla kullanılmıştır.



**Şekil 3. Gridal organizasyon**

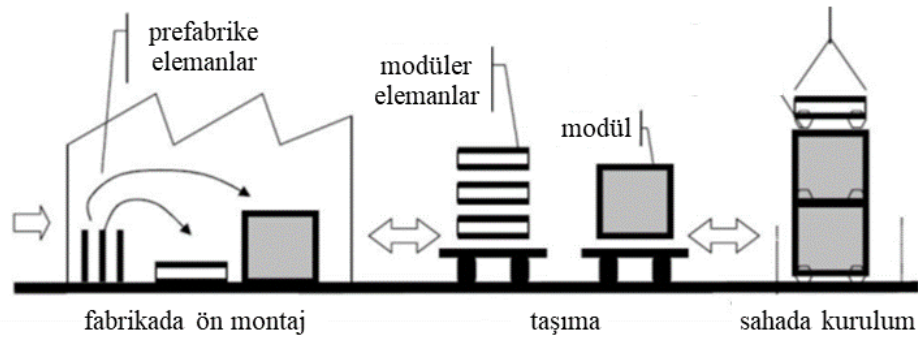
Kaynak: Ching (2014)

Günümüzde ise modül, malzeme kayıplarını önlemek ve yapı ürünleri arasında koordinasyonu sağlamak gibi üretime yönelik ekonomik fayda sağlaması amacıyla çeşitli ülkeler tarafından kabul edilen bir kavram ve boyut değeri birimi olarak görülmektedir.

Yapıyı oluşturan parçaların çeşitliliği azaltılarak ekonominin sağlanması için modül uygulaması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Tokgöz ve Koçak, 2009).

Modüler terimi, daha büyük yapılar oluşturmak için ayrı modüllerin tek başına durduğu veya bir araya getirildiği bir inşaat yöntemini veya sürecini tanımlamaktadır. Yeri değiştirilebilen binalardan farklı olarak, kalıcı modüler yapıların kullanım ömürleri boyunca tek bir yerde kalması amaçlanmıştır. Modüler bir inşaat projesini öncelikle dört etap oluşturur. İlk olarak, son kullanıcı ve herhangi bir düzenleyici otorite tarafından tasarım onayı; ikincisi, modül bileşenlerinin kontrollü bir ortamda montajı; üçüncüsü, modüllerin nihai bir varış noktasına taşınması; ve dördüncüsü ise bitmiş bir bina oluşturmak için modüler birimlerin montajıdır (Modular Building Institute, 2011). Hasol (2014) “modüler sistem” kavramını ise “yapıların ve bileşenlerin modüler bir planlama ızgarasına uygun olarak planlanması” şeklinde tanımlamıştır.

“Modüler” terimi mimaride sıklıkla “prefabrike” kelimesiyle eş anlamlı olarak kullanılmakta olup tek ve iki boyutlu strüktürel elemanlar ve üç boyutlu hacimsel prefabrike elemanlardan oluşmaktadır. İnşaat sektörü içinde birden çok üretim alanında kullanılan modüller, strüktürel olarak bağımsız birimlerden oluşmaktadır. Prefabrike yapım süreci ise, Van Gassel (2006)’in Şekil 4’teki şemasında da belirtildiği gibi prefabrikasyon ve ön montaj yöntemlerinin kullanılarak modüler strüktürlerin oluşturulduğu bir üretim süreci olarak tanımlanabilmektedir (Boafo vd., 2016; Koman ve Gür, 2014).

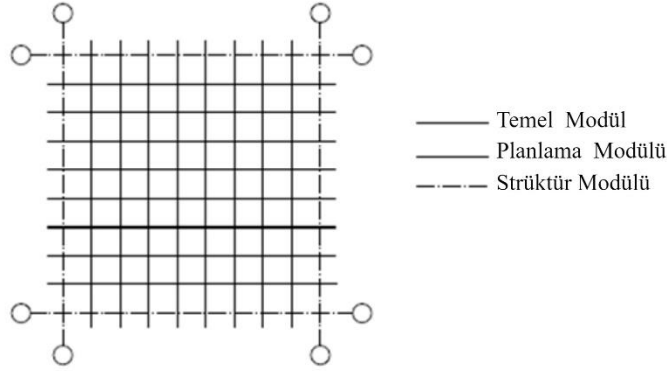


**Şekil 4. Prefabrike yapım sistemi ürün şeması**

Kaynak: Van Gassel ve Roders (2006)

### 2.1.1. Modül çeşitleri

Tokgöz ve Koçak (2008), bina tasarımında uygulanan modülleri; Şekil 5'teki gibi temel, planlama ve strüktür modülü olarak üç grupta toplamıştır.



**Şekil 5. Koordinat sisteminden faydalanılan ızgara sistem**

Kaynak: Tokgöz ve Koçak (2008)

Temel modül; yapı bileşenleri arasındaki işlevsel ve boyutsal koordinasyonu maksimize etmek ve en kolay biçimde bir araya getirebilmek adına seçilen modüler koordinasyon birimidir. Ülkemizde TSE tarafından da benimsenmiş olan standart temel modül “M” harfiyle gösterilmektedir ve  $1 M = 10 \text{ cm}$ 'dir.

Planlama modülü; genel olarak temel modülün katları şeklinde ifade edilir. Farklı bölgelere göre 3M, 6M, 12M ve 20M, 30M, 60M, 90M gibi planlama modülü çeşitleri bulunmaktadır. Binalar için ise 3M ve 6M büyük modülleri esas alınmıştır. Daha büyük planlama modülleri daha küçük planlama modüllerine kıyasla çeşitlilikte azalmaya neden olmaktadır. Fakat endüstriyel ve çok sayıda üretimde, büyük modülün daha ekonomik olduğu görülmektedir.

Ayrıca strüktür modülü; taşıyıcı sistemin aks aralıkları modülüdür. Taşıyıcı sistem sınırları ile mekân sınırlarının üst üste geldiği tasarım durumlarında, strüktür modülü ve planlama modülü tek modül olarak birlikte ele alınabilir. Yığma binalarda bu modüllerin tek olarak kullanıldığını görürüz; fakat iskelet sistemlerde farklılaştığını görmek mümkündür (Tokgöz ve Koçak, 2008).

### 2.1.2. Modüler koordinasyon

Standart bir yapı bileşeninin, sistemin bütününe uyum göstermesi gerektiğinden; bu standart bileşenler, koordinasyon boyutlarında üretildiklerinde bir değer kazanabilmektedir. Bu sebeple yapımda standartlar için modüler bir koordinasyon gerekmektedir (Tokgöz ve Koçak, 2009). Modüler koordinasyon “yapı bileşenlerinin genel koordinasyon boyutları ile, yapıda yer alan çeşitli mekân ve yapı elemanlarının, yapı bileşenleri ile koordinasyonu yönünden önem taşıyan yatay veya düşey boyutlarını belli bir standart ölçü biriminin katlarından seçerek uygulanan standartlaştırma tekniği” olarak tanımlanmıştır (Hasol, 2014). Tanımlanan modüler koordinasyonun temel amacı, bina yapımının standardizasyon yoluyla endüstrileşmesine yardım etmek olarak ifade edilebilir. Böylece yapı bileşenleri endüstriyel düzeyde yapılmış ve bina yapımında da ekonomik avantaj sağlanmış olur (Tokgöz ve Koçak, 2008).

### 2.2. Prefabrike Yapım Sistemlerinde Malzeme Kullanımı

Gelişmiş prefabrike sistemlerde beton, gazbeton, çelik, ahşap gibi geleneksel yapım sistemlerinde kullanılan malzemeler de kullanılmaktadır. Kullanılan malzemenin türüne göre modern prefabrike sistemler hafif ve ağır prefabrikasyon sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hafif prefabrikasyon sistemler, hacmine oranla ağırlığı oldukça az olan ahşap, çelik, plastik gibi malzemelerden oluşurken; ağır prefabrikasyon sistemlerde genellikle güçlendirilmiş beton sistemlerden üretilen cephe panosu, merdiven, döşeme ve duvar paneli gibi büyük ağırlığa sahip olan yapı elemanları kullanılmaktadır (Şanlı, 2020). Bu çalışmada, ahşap esaslı malzemelerden üretilen konutlar değerlendirileceği için ahşap yapı malzemesi örneklerine yer verilmiştir.

Ahşap, çeşitli inşaat uygulamalarında yapısal bir malzeme olarak kullanılmakta olup taşıyıcı eleman olarak elverişli bir malzemedir. Yapısı gereği lineer elemanlardır ve bu durum modüler iskelet sistem düzenlemelerinde uygun olmaktadır. Bunun yanı sıra hafif bir malzeme olması da zati yükleri azaltmaktadır. Az veya çok katlı konutlarda, ticari binalar için yapısal ahşap, işlenmiş ahşap ürünler ve paneller temel alınarak kullanılabilir (Larsen ve Thelandersson, 2003; Macdonald, 1997).

Genellikle çam, karaçam, ladin gibi ağaç türlerinden üretilen endüstriyel ahşap yapı malzemeleri, ahşap levha veya kereste parçalarının işlenmesiyle üretilen katmanların

yapıştırıcı veya ısıtma yöntemleri gibi diğer yöntemlerle bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir. Endüstriyel ahşap yapı malzemeleri, yüzeylerde meydana gelebilecek zararların engellenmesi ve yapı elemanının dayanımının artırılması için birbirine yapıştırılmış katmanlardan üretilmektedir. Bu tip endüstriyel ahşap yapı malzemeleri masif ahşap, ahşap kompozit, yapay ahşap veya üretilmiş panel olarak da adlandırılmaktadır (Hegger vd., 2012; Mayo, 2015).

Yaygın olarak kullanılan ahşap esaslı malzemeler; yapısal kompozit ahşaplardır. SCL (*structural composite lumber*) olarak da geçen bu ahşap türü, geliştirilen ahşap türlerinin ortak adı olarak belirlenmiştir. Bu laminasyon teknolojisiyle birlikte büyük ve küçük çaplı ahşap materyaller değerlendirilerek LVL (lamine kaplama ahşap / *laminated veneer lumber*), GLT (*glulam* / yapıştırılmış lamine ahşap), CLT (çapraz lamine ahşap / *cross laminated timber*) gibi malzemeler elde edilebilmektedir. Ahşap prefabrik sistemlerde kullanılmakta olan bu ürünler kereste endüstrisinde de alternatif niteliği taşımaktadır (Tankut ve Sözen, 2014). Bu tez çalışmasında yapısal kompozit ahşapların alt türü olarak; tutkallı lamine ahşap (*glulam*) (GLT), lamine kaplama ahşap (LVL), paralel şerit kereste (PSL), lamine şerit ahşap (LSL), çapraz lamine ahşap (CLT) malzemeler ele alınmıştır (Borgström, 2016).

### 2.2.1. Yapıştırılmış lamine ahşap (*glulam*) (GLT)

Lamine yapı elemanları, yüksek derecede prefabrikasyon ile karakterize edilen endüstriyel yapı elemanlarıdır. Yapıştırılmış lamine ahşabın üstün elastik ve mekanik özellikleri nedeniyle, bireysel kirişlerin ve kolonların üretimi ve geniş açıklıklı düzlemsel ve mekânsal yapı için kullanılabilir (Kuzman vd., 2010).

TS EN 14080 (2013)'de, lifleri özellikle paralel olarak birbirine basınç altında yapıştırılan odun lamellerinden elde edilen yapı elemanı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 6'da bir örneği verilmiş olan yapıştırılmış lamine ahşap (GLT) üretiminde, genel olarak tüm ağaç türleri bu işlem için uygun olsa da yumuşak ağaç türleri, işleme kolaylığı ve tutkal tutma kabiliyetinin daha iyi olması sebebiyle tercih edilmektedir. Ağaç türü olarak özellikle çam tercih edilmektedir. Tabaka uzunluğu 1,5-5 m aralığında olup, tabaka kalınlığı ise; düz kompozit eleman üretiminde 40-50 mm, eğrisel eleman üretiminde ise 20-30 mm olarak uygulanır ve gerektiğinde birleştirilerek daha büyük kesitte kalınlıklar elde

edilebilmektedir (Larsen ve Thelandersson, 2003; Porteous ve Kermani, 2007; Yılmaz, 2011).



### **Şekil 6. Yapıştırılmış lamine ahşap (GLT)**

Kaynak: Green ve Taggart (2020)

Yapıştırılmış lamine ahşap, daha büyük doğrusal elemanlar oluşturmak için kontrollü koşullar altında bireysel boyutlu kereste parçalarının yapıştırılmasıyla üretilmektedir. Ahşap yapılarda kolonlar, kirişler, başlıklar için glulam (GLT) kullanılabilir (Green ve Taggart, 2020).

#### **2.2.2. Lamine kaplama kereste (*laminated veneer lumber – LVL*)**

Lamine kaplama kereste, ince ahşap kaplamaların büyük bir kütükte birbirine yapıştırılmasıyla üretilir, böylece tüm kaplamaların yönelimi uzun yöne paralel olmaktadır. Lamine kaplama kereste, eşarpli veya bindirmeli derzli kaplamalarla yapıldığından, geleneksel kereste uzunluklarının çok ötesinde uzunluklarda olabilmektedir. Yapısal bir panel ürünü olarak, görünüşte tek tiptir. Bununla birlikte, Şekil 7’de görüldüğü gibi kontrplaktan farklı olarak, kaplamalar yatay olarak döşenmek yerine panelin kalınlığı boyunca dikey olarak uzanır. Düğümler, tane eğimi ve yarıklar malzeme boyunca dağıldığından veya tamamen ortadan kaldırıldığından, lamine kaplama kerestede eğilme ve ayrılma neredeyse yok kabul edilebilmektedir. Yanal kuvvetlere direnmek için diyafram hareketi gerektiğinde, bu yükleri aktarmak için paneller arasındaki bağlantılar detaylandırılabilir. Lamine kaplama kereste, kaplamaların yaklaşık %20’si, taneleri kütükteki diğer kaplamalarınkine dik olacak şekilde yönlendirilerek de üretilmektedir ve köknar ve çam başta olmak üzere bir dizi farklı ağaç türünden yapılabilir (Green ve Taggart, 2020).





**Şekil 7. LVL ile kontrplak arasındaki tabakalanma farkı**

Kaynak: Yılmaz (2011)

### 2.2.3. Paralel şerit kereste (*parallel strand lumber - PSL*)

Paralel şerit kereste, paralel yapıda döşenmiş uzun şeritlere klipten ve bitmiş yapısal bölümü oluşturmak için basınç altında bir yapıştırıcı ile birbirine bağlanan kaplamalardan üretilir. Kalitesi düşük veya gövde çapı yeterince büyük olmayan keresteyi güçlü kereste ürünlere dönüştürmek amacıyla üretilmiştir. Şekil 8'de bir örneği verilmiş olan paralel şerit kereste, maksimum kesiti  $400 \times 400$  mm olan kütüklerden üretilir. Büyüme kusurları üretimden önce ahşap şeritlerden giderildiğinden, paralel şerit kereste ürünleri tutarlı özelliklere ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir. Uzun ahşap binalarda, paralel şerit kereste, özellikle yüksek eğilme mukavemetinin gerekli olduğu direkler ve kirişler için ve ayrıca taşıyıcı panel yapımında tesadüfi kirişler, başlıklar ve lentolar için kullanılabilir. Paralel şerit kereste ile kolon ve kiriş elemanlar ve geleneksel ağır ahşap yapılar oluşturulabildiği gibi, cephe taşıyan modern sistemler de kurmak mümkündür. Paralel şerit kereste, koruyucu muameleyi kolayca kabul eder ve bu nedenle nem hasarına karşı koruma mümkündür. Görsel olarak paralel şerit kereste göze daha hoş gelmektedir bu nedenle bitmiş görünümün önemli olduğu uygulamalar için uygundur (Green ve Taggart, 2020).



**Şekil 8. Paralel şerit kereste**

Kaynak: Green ve Taggart (2020)

#### 2.2.4. Tabakalı şerit kereste (*laminated strand lumber - LSL*)

Diğer ahşap kompozitlerde yüksek dayanıma sahip ağaç türleri tercih edilirken, tabakalı şerit kereste elemanlar, her çeşit dayanım düzeyinde ve her boyutta ağaç tomruğundan üretilebilmektedir. Görünüm olarak OSB'yi andırır, ancak, Şekil 9'da görüldüğü üzere tabakalı şerit kerestede, şerit yongalarının boyutları, OSB yongalarından daha uzun, paralel şerit kereste yongalarından daha kısadır. Tabakalı şerit kerestede kullanılan teller, panelin uzunlamasına eksenine paralel olarak düzenlenir. Bu, tabakalı şerit kereste panellerine tek yönlü yayılma yeteneği verir. Bir yapıştırıcı ile birleştirildiğinde, yönlendirilmiş şeritler büyük bir hasır veya kütük haline getirilir ve preslenir. Paneller, çeşitli standart kalınlıklarda ve maksimum 2,4 metre uzunlukta olabilmektedir. Diğer mühendislik ürünü ahşap ürünler gibi, tabakalı şerit kereste de tahmin edilebilir güç, iyi nem direnci ve bükülmeyi ve büzülmeyi en aza indiren boyutsal kararlılık sunar (Green ve Taggart, 2020).



**Şekil 9. Tabakalı şerit kereste**

Kaynak: Green ve Taggart (2020)

### 2.2.5. Çapraz lamine ahşap (*cross laminated timber - CLT*)

Çapraz lamine ahşapların, klasik lamine ahşaplara göre en önemli farkı, birbirine dik yönde uzunlamasına konumlandırılan ahşap lamellerin yapısal bağlayıcı tutkallarla birleştirilerek lamine edilmesidir. Şekil 10'da çapraz lamine ahşap örneği gösterilmiştir. Lamellerin çaprazlamasına bağlanmasıyla ahşaptaki büzülme, şişme, kabarma etkenleri en aza indirildiği gibi, yüklerin birden fazla yöne transfer edilmeleri de olanaklı olmaktadır (Tokyay, 2017).



**Şekil 10. Çapraz lamine ahşap**

Kaynak: Green ve Taggart (2020)

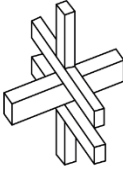
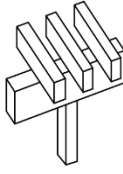
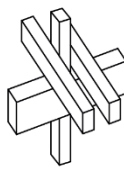
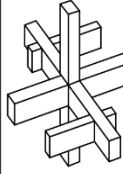
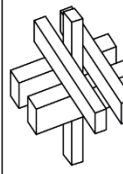
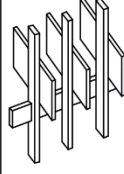
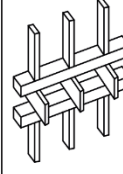
Üretim süreci açısından tabakalı tutkallı lamineden diğer farkı da lineer (tek boyutlu) strüktürel yapı elemanları yerine, sadece düzlemsel (iki boyutlu) elemanlar olarak (panel) üretim yapılmasıdır. Bu paneller; yapının duvarı, döşemesi, çatı düzlemi olabilmektedir. Panel boyutları genelde en fazla 2,95 m genişliğinde, 16 m uzunluğunda olmakta ve 3-5-7 katmanlı kesitlerle 600 mm – 400 mm arasında değişik kalınlıklar elde edilmektedir (Tokyay, 2017).

Levhalar ayrıca parmak eklemli ve uzunlamasına yapıştırılmış olabilirler. Bunun yanı sıra mekanik bağlantılı elemanlar kullanılarak da paneller bir araya getirilebilmektedir. Zıt açılarda çakılan çiviler ve önceden hazırlanmış deliklere yerleştirilen ahşap dübeller gibi elemanlarla yapısal performans sağlanmaktadır. Bu tür durumlarda dübeller farklı türden ahşaptan elde edilirler (genellikle kayın ağacı) ve panellerden daha düşük nem seviyesine kadar kurutulurlar. En dıştaki katmanların aynı lif yönelimine sahip olabilmesi adına çapraz lamine ahşap paneller tek sayıda katmanlardan oluşmaktadır (genellikle üç ya da yedi katman olarak). Panel elemanların yük taşıma kapasitelerinin artırılması gereken

durumlarda bitişik katmanlar aynı yönde yerleştirilerek kullanılır veya çekirdek katmanı çift plakadan oluşturulur (Green ve Taggart, 2020).

### 2.3. Prefabrike Yapım Sistemleri

Son zamanlarda, ahşap çerçeve ve kütük (yığma) sistemlerinden oluşan geleneksel yapım sistemleri, yerini daha modern ve hızlı üretilen yapım sistemlerine bırakmıştır. Geleneksel çerçeve sistemlerinin içinde, dikme-kiriş çerçeve sistemi, kaburga çerçeve sistemi (balon çerçeve ve platform çerçeve) gibi yapım sistemleri yer almaktadır (Lehmann, 2013). Günümüz ahşap iskelet yapım sistemi, strüktürel elemanların ileri düzeyde prefabrikasyonu, birleşim biçimleri ve bağımsız elemanların şantiye sahasında birbirine monte edilmeleri gibi yönlerden çelik ve prefabrikte betonarme iskelet sisteme benzerlik göstermektedir. Bundan yola çıkarak, Şekil 11’de gösterilen tek dikme-kiriş ve çift dikme-kiriş sistemlerin geleneksel ve kaburga konstrüksiyonlu ahşap iskelet sistemlere kıyasla ön üretime dayalı yapım süreçlerine daha iyi entegre olabildikleri görülmektedir (Goetz vd., 1992).

Geleneksel Ahşap İskelet	Tek Kolon - Kiriş		Çift Kolon - Kiriş		Kaburga Konstrüksiyonu	
	Kiriş sürekli	Kolon sürekli	Kolon ve Kiriş sürekli			
						
Geleneksel					Balon İskelet	Platform Çerçeve

Şekil 11. Ahşap iskelet yapım sistemleri

Kaynak: Goetz vd. (1992) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

Bunun yanı sıra kaburga konstrüksiyon, ahşap iskelet sistem ile panel sistem arasında geçiş oluşturması çerçevesinde önem taşımaktadır. Dikmeler sürekli olup döşeme kirişleri kat hizasındaki ana kirişle birlikte dikmelere tespit ediliyorsa sistem “balon iskelet-çerçeve (*balloon frame*)”; dikmeler kat hizasında kesiliyor, döşeme kirişleri zemin katın üst başlığı ile üst katın alt başlığı arasında yer alıyorsa sistem “platform çerçeve (*platform frame*)” adını almaktadır (Goetz vd., 1992). Ahşap iskeletli yapılar, panellerle kaplı ahşap kiriş ve dikmelerden oluşan bir iskeletle inşa edilen bir yapım sistemidir. İskelette oluşan

boşluklar, kontrplak, yönlendirilmiş yonga levha (OSB), lif levha, yapısal kompozit ahşaplar veya sunta gibi ahşap esaslı panellerle doldurulmaktadır. Alçı panel vb. ürünlerin ise yangına dayanıklılık sağlamak için çoğunlukla ahşap ile kullanıldığı görülmektedir (Larsen ve Thelandersson, 2003). Bu yapım sistemleri kullanılarak iki farklı imalatla üretim yapılabilmektedir. Bunlardan birinde; dikme, kiriş ve çatı makaslarında kullanılacak ahşap elemanlar fabrikada kesilip şantiyede birleştirilerek yerlerine yerleştirilmektedir. Diğerinde ise; dikme ve kirişler fabrikada kesilir, montaj için gerekli birleşim detaylarıyla birbirine bağlanır ve paketlenerek istenilen yere nakledilmektedir (Öztank, 2004).

Prefabrike yapım sistemleri, geleneksel yapım yöntemleriyle karşılaştırıldığında hem zaman hem de maliyet açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Şekil 12’de gösterildiği gibi, prefabrike yapım sistemlerinin kullanıldığı yapılarda modüllerin imalatı ve şantiye aşaması eş zamanlı olarak yürütülebilirken, geleneksel inşa yöntemlerinin yürütüldüğü yapılarda inşa aşaması şantiye hazırlık aşamasından sonra gerçekleşmektedir. Bu sebeple, prefabrike yapılar, geleneksel yapılara göre %40 daha hızlı inşa edilebilmektedirler. Vakit ve nakit kazancının yanı sıra prefabrike yapılar aynı zamanda daha az inşaat atığı, CO<sub>2</sub> emisyonu ve inşaat gürültüsü gibi çevresel avantajlar da sağlamaktadır (Navaratham vd., 2019).



**Şekil 12. Prefabrike ve geleneksel yapım süreçlerinin karşılaştırılması**

Kaynak: Modular Building Institute (2011) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir

Ayrıca, konvansiyonel inşaatta inşaat faaliyetleri, herhangi bir iklim değişikliği veya hava koşulu kesintisinden önemli ölçüde etkilenir. Bu arada, prefabrike inşaat yönteminde, inşaat faaliyetlerinin çoğunluğu, yani yaklaşık %80-90'ı bir fabrikada gerçekleştiğinden, bu tür kesintiler ihmal edilebilir düzeydedir. Bu da prefabrike yapım yönteminin kullanıldığı projelerin yapım süresini ve toplam maliyetini geleneksel yapım yöntemlerine göre azaltmaktadır. Ayrıca prefabrike yapıların, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla şantiyedeki işçi sayısını azaltarak, toplam işçilik maliyetini de azalttığı görülmektedir (Navaratham vd., 2019).

Prefabrike konut yapıları Tablo 1'deki gibi prefabrike derecelerine göre yüksek prefabrike ve düşük prefabrike olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Yüksek prefabrike yapım sistemleri kendi içlerinde beş alt başlıkta incelenmektedir. Bunlar; bitmiş yapı, modüler, hibrit, panel ve alt montaj bileşenli prefabrike yapım sistemleridir. Bitmiş yapı, hacimsel kutu biçimli elemanların fabrikadan direkt kullanıma hazır biçimde çıktığı üretim şeklidir. Modüler yapım sisteminde, yapısal ve hacimsel elemanlar şantiyede bir araya getirilerek yapı ortaya çıkartılmaktadır. Hibrit yapım sisteminde ise, sahada bulunan yapı iskeletine hazırlanmış olan hacimsel ve strüktürel elemanlar giydirilerek yapı tamamlanmaktadır. Bu elemanlar, banyo veya mutfak bölmeleri gibi mevcut yapısal bir çerçeveye bağlı üniteler olabilmektedir. Panel yapım sistemlerinde ise, yalnızca düzlemsel prefabrike elemanlar şantiyede yapıya eklenerek kullanılmaktadır. Alt montaj bileşenli yapım sistemi ise, yalnızca yerinde üretilmesi mümkün olmayan kapılar, pencereler ve kafes kirişler gibi önceden kesilmiş ve monte edilmiş elemanların yapıya eklenildiği yapı türleridir. Düşük prefabrike yapılarda ise yalnızca inşaat sahasında üretilmeye uygun materyallerden elde edilen elemanlar kullanılmaktadır (Bell, 2009; Gibb ve Isack, 2003; Steinhardt vd., 2013).

**Tablo 1. Derecelerine göre prefabrike sistemler**

<b>Prefabrike Derecesi</b>	<b>Tip</b>	<b>Açıklama</b>
Yüksek Prefabrike	Tamamlanmış bina	Bir şantiyeye kutu şeklinde teslim edilen, hacimsel, tamamlanmış binalar
	Modüler	Şantiyeye teslim edilen ve bir araya getirilen yapısal, hacimsel, potansiyel olarak monte edilmiş birimler

**Tablo 1. Derecelerine göre prefabrike sistemler (devam)**

	Hibrit	Hacimsel ön montaj. Banyo ve mutfak gibi bölümlerin hazır olarak eklenebilmesi
	Panel	Prekast beton paneller, yapısal ahşap paneller gibi mekân oluşturmak için kullanılan yapısal fakat hacimsel olmayan çerçeve elemanları
	Parça (bileşen) üretimi ve alt (kısmi) montaja dayalı	Önceden kesilmiş ve şantiyede üretilmeyen kafes kirişler, kapılar gibi önceden hazırlanmış bileşenlerin birleşimi
Düşük Prefabrike	Yapı malzemeler	Yerinde inşaatta kullanılan standart yapı malzemeleri

Kaynak: Bell, (2009); Gibb ve Isack (2003); Steinhardt vd., (2013)

### 2.3.1. Parça üretimi ve alt montaja dayalı prefabrikasyon

Bileşene bağlı prefabrikasyon, tek boyutlu strüktürel elemanların ve alt montaj prefabrikasyonlarının üretimini içermektedir. Tek boyutlu strüktürel elemanlar, sahada imal edilen geleneksel yöntemlerin aksine, atölyede imal edildikten sonra inşaat sahasına nakliye edilip sonrasında yerinde montajlanan elemanlardır. Alt montaja dayalı prefabrike elemanlar ise yine saha dışında ölçülendirilip üretilen, pencere ve kapı gibi elemanların yerlerine monte edilmesidir. Bu alt başlık çatı makasları, duvar çerçeveleri, bağlantı parçaları gibi, yapının demirbaşlarını da içermektedir. Kullanılan bileşenler, tasarım ve üretim aşamalarında kişiselleştirme ve esnekliğe yüksek derecede izin verirken, montajlama aşamasında ince hesaplamalara gerek duymaktadır. Bu sistemde kullanılan elemanlar çok fazla bağlantı noktası ve yüzeyine sahip olduğundan daha dikkatli hizalamalara ve yalıtım kontrollerine ihtiyaç duymaktadırlar (Bell, 2009; Boafod vd., 2016).

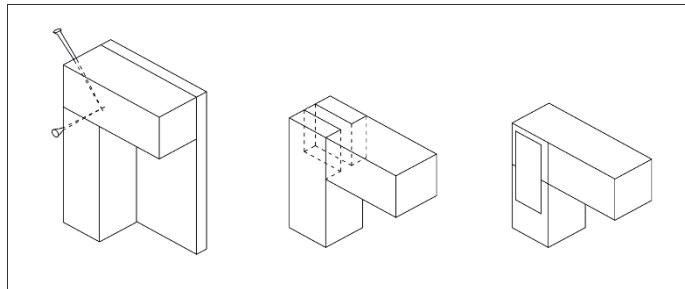
Benzer bir yapım sistemi olarak pre-cut sistem, prefabrikasyonun en eski sistemidir. Kereste parçaları gerekli boyutlarda kesilir, işlenir ve ihtiyaca göre çentiklenir ya da delinir. Parçalar bu işlemlerden sonra işaretlenir ve montajlanmaları için sahaya taşınır. Birimler halinde paketlenmeye imkân sağladığı için nakliye süreci oldukça kolaydır. Kereste ürünlerinden sahada imal etmeye göre daha doğru sonuçlar elde edilmektedir ve malzeme israfı en aza indirilmektedir (Midon vd., 1996).

### 2.3.2. Hacimsel olmayan (panel) prefabrikasyon

Panel prefabrikasyon, düzlemsel ve çizgisel elemanlardan oluşan ya da paket olarak taşınabilen elemanları tanımlamaktadır. İki veya üç kişi tarafından vinç ya da kaldırma cihazları kullanılmadan fabrikalarda elde edilen sistemler prefabrike panel sistemlerdir. Bu başlık altında incelenen elemanlar kapı yüzeyleri, pencereler, kaplama elemanları veya çerçeveler, duvarlar, zeminler ve çatı yüzeyleri olarak sayılabilir. Yapısal olarak yalıtılmış paneller de bu başlık altında incelenmektedir. Panel elemanlar, yatay biçimde istiflenmeye elverişli olmalarından ötürü nakliyeleri kolaydır fakat modüler ünitelere göre sahada daha fazla montaj işi gerektirirler (Bell, 2009; Boafıo vd., 2016). Bu sistemde ölçü birimi olarak bir modül (M) kullanılmaktadır. Normal birim 'M', kontrplak, sunta ve çimento levha gibi çoğu kaplama malzemesinin boyutuyla uyumlu olmaktadır (Midon vd., 1996).

Duvar panellerinin prefabrikasyonu ile oluşturulan yapı sistemlerinde, ahşap panellerle yapı üretimi; ahşabın yüksek dayanım gücü, kolay işlenebilirlik ve hafif yapı üretimi amaçlandığında, yapı üretimine etkili bir çözüm kazandırmaktadır. En yaygın kullanım alanı bulunan ahşap panel sistemler; masif ahşap taşıyıcı panel sistem ve taşıyıcı nitelikli yalıtımlı kompozit panel sistemdir (Vural, 2005).

Masif ahşap taşıyıcı paneller: Ahşap iskelet sisteminin boşluklarının doldurulması amacıyla ya da yapıda taşıyıcı görev alacak biçimde üretilmektedir. Ahşap iskeletin boşluklarında bir dolgu elemanı olarak kullanılacak olan paneller kendi ağırlıklarını strüktürel sisteme aktarmasının yanında; taşıyıcı görev üstlenen paneller hem kendi ağırlıklarını hem de strüktürel sisteme ait yükleri aktarmaktadırlar. Masif ahşap elemanlar Şekil 13'teki gibi bir araya gelmektedir (Goetz vd., 1992).

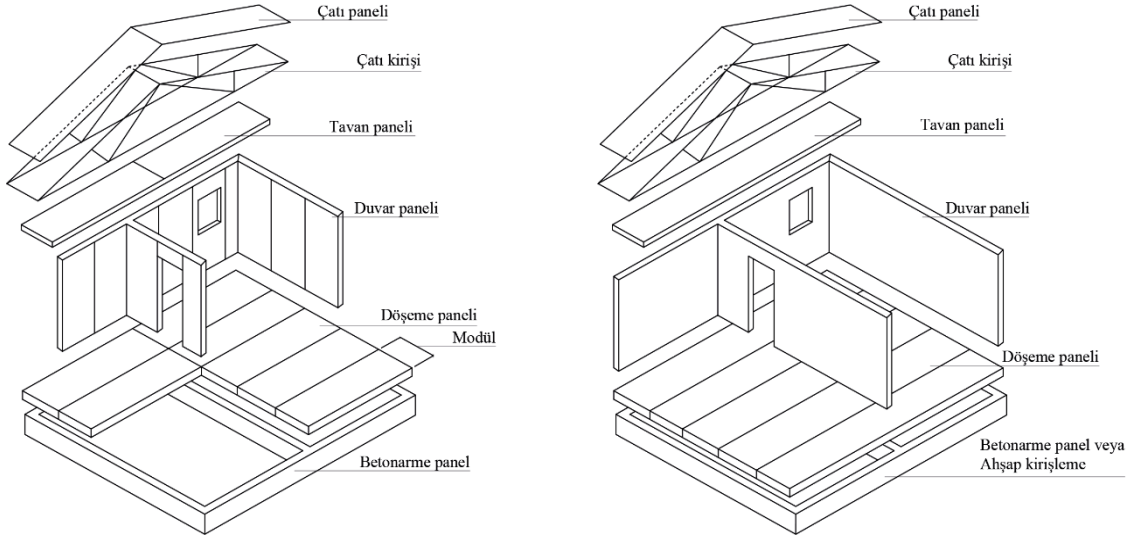


**Şekil 13. Masif taşıyıcı ahşap elemanların birleşimi**

Kaynak: Goetz vd. (1992) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.



Taşıyıcı nitelikli kompozit paneller: Bu paneller, yüzeylerini oluşturan yapay ahşap levhalar ve bu yüzey levhalarının arasında ısı yalıtımının yanı sıra levhaları bir arada tutma görevi de olan yalıtım tabakasından oluşmaktadır (Goetz vd., 1992). Panellerde kullanılan yapay ahşap levhaların yapı bünyesinde görev üstlendikleri boyutlar esas alındığında ahşap panel bileşenler; Şekil 14’teki gibi küçük boyutlu panel sistemi ve büyük boyutlu panel sistemi olmak üzere iki gruba ayrılabilir.



**Şekil 14. Küçük ve büyük boyutlu ahşap panel sistemi elemanları**

Kaynak: Goetz vd. (1992) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

### 2.3.3. Hacimsel (modüler) prefabrikasyon

Hacimsel prefabrike sistemlerde, yapılarda kullanılacak olan hacimsel elemanların tamamı fabrikada üretilmektedir. Modüler hücreler, genellikle düşey duvar panelleri ve yatay çatı panellerinin kombinasyonlarından meydana gelmektedir. Bu sistem, iş verenlerin, son ürünü teslim almadan önce sistemin nasıl görüneceğini bilmesine imkân sağlamaktadır. Saha montajı söz konusu olduğunda bu sistem diğer yöntemlere göre çok daha hızlıdır fakat nakliye için römorkların montaj için ise vinçlerin kullanılması gereklidir. Genellikle, fabrikadan sahaya nakliye edilen hacimsel birimler, yerinde harici bir dış kaplama ile birleştirilir (Midon vd., 1996; Staib vd., 2008; Tuna Sezer, 2015).

Hacimsel prefabrikasyonda kullanılan üç boyutlu bir nesne; modül, hacim ya da bölüm olarak isimlendirilmektedir. Bu üretim şekli özellikle mutfak, banyo ve fabrika bölümleri

gibi altyapı gereksinimlerinin yüksek olduğu servis alanlarını için daha uygundur. Modüller montaj kolaylığı öncelikli olarak tasarlanmıştır. Modül boyutu belirlenirken yapı içindeki konumu, nakliye ve üretim sınırlamaları dikkate alınmaktadır (Bell, 2009; Reidelbach, 1972).

#### 2.3.4. Hibrit prefabrikasyon

Hibrit prefabrikasyon, modüler (hacimsel) ve panel prefabrikasyon sistemlerinin bir arada kullanıldığı yapım sistemleridir. Bu sistemlerde, “mutfak ve banyo gibi yüksek hizmet verilen alanlar için hacimsel birimler kullanılır ve binanın geri kalanı paneller kullanılarak veya başka yollarla inşa edilir” (Gorgolewski, 2005). Hibrit prefabrikasyon sistemleri, kullanıcılarına daha fazla özelleştirme imkânı ve esneklik sunarken, iki prefabrike sistemin de faydalarını birleştirmektedir. Hibrit sistemle inşa edilen yapılar bozulmaları ve genişleme için ihtiyaç duyulan değişiklikleri en aza indirmektedir (Bell, 2009; Boafo vd., 2016).

#### 2.3.5. Tamamlanmış (kutu) yapılar

Tamamlanmış, kutu şeklindeki yapılar genellikle yer değişikliğine imkân veren, taşınabilen hacimsel prefabrike modüllerdir. Tüm yapının, atölyelerde inşa edilip bir araya getirildiği ve inşa alanına nakliyesiyle birlikte temeller üzerine oturtulduğu üretim akışına sahiptir. Bu sistemle inşa edilen yapılarda kullanılan elemanlar aynı zamanda standart çerçeveleme ve levha elamanlarını da içerebilmektedir. Diğer prefabrikasyon sistemlere kıyasla en yüksek derecede prefabrike edilmiş olan standart yapı birimleridirler. Ancak, hacimsel büyüklükleri ve ağırlıkları sebebiyle fabrikadan şantiyeye nakliyede zorluklar yaşanabilmektedir (Bell, 2009; Boafo vd., 2016).

### 3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Günümüzde, kaynakların tükenmesine ilişkin endişenin artması ile birlikte gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde çevresel performansları değerlendirmek için, sürdürülebilirliği iyileştirmek amacıyla kullanılabilen birçok araç ve teknik bulunmaktadır. Bunlardan her biri; çeşitli ürün, süreç ve hizmetlerin çevresel performansını iyileştirmeye yönelik stratejileri değerlendirmek için bir yaklaşım sunar. Bu araçlara yeni bir ek olarak ele alınan yaşam döngüsü değerlendirmesi, süreçlerin ve ürünlerin yaşam döngüleri boyunca, beşikten mezara, çevresel yükünü değerlendirmek için kullanılan bir metodolojidir (Crawford, 2011). Curran (1996), bütünsel bir değerlendirme için en uygun yöntemin, yaşam döngüsünün sistematik bir çalışması olan yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) (malzeme üretimi, inşaat / üretim süreçleri, kullanım, bakım, yenileme ve kullanım ömrü sonu işleme) ve tedarik zincirinin çevresel etkileri olduğunu belirtmiştir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, 1990'dan beri çevre alanında çalışanlar tarafından ilgi görmesine rağmen, ilk gelişmeler 1960'lara dayanmaktadır. Bu çalışma genel olarak enerji gereksinimlerinin hesaplanmasına odaklanmıştır. 1970'lerde artan petrol kriziyle Kuzey Amerika ve Avrupa'nın çeşitli ülkeleri tarafından enerji analizleri yapmak için birkaç çalışma yürütülmüş fakat bu on yıl içerisinde petrol krizinin azalmasıyla birlikte enerji kullanımını değerlendirme yaklaşımına olan ilgi zamanla azalmıştır (Curran, 1996). Daha sonra 1970'lerin ortalarında, Midwest Araştırma Enstitüsü (MRI) tarafından çevre sorunlarına odaklanan yaşam döngüsü değerlendirme çalışmaları faaliyete geçirilmiştir. Bu yöntem için MRI tarafından seçilen isim ile "Kaynak ve Çevresel Profil Analizi (REPA)" olmuştur (Klöpffer, 2006). Yapılan çalışmalar ilk zamanlarda kamu tüketimi için yayınlanmak yerine yalnızca özel şirketler için yapılmakla sınırlı kalmıştır. 1980'lerde Avrupa'daki "Yeşil Hareket" in geri dönüşümle ilgili halkın dikkatini çekmesi ile birlikte YDD yeniden ilgi çekmeye başlamıştır. Yöntemin uygulanmasını takip eden yıllarda, Avrupa'da ürünlerle ilgili benzer şekilde beşikten mezara, çevresel değerlendirmeler geliştirilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi, başlangıçta üreticilerin ürünlerinin rakip ürünlere kıyasla çevresel üstünlüğünü göstermek için karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Ürün veya süreç karşılaştırması, özellikle ekotiketleme programlarında hâlâ birçok grubun hedefi iken, bir ürünün veya sürecin çevresel performansını değerlendirmek, iyileştirmek için stratejiler belirlemek yaşam döngüsü değerlendirmesinin arkasındaki ana motivasyondur (Curran, 1996).

"Yaşam döngüsü değerlendirmesi" terimi, 1990 yılında, ABD Vermont'ta "Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği" – "*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*" (SETAC) tarafından düzenlenen bir çalışmaya katılanlar tarafından önerilmiş ve kabul edilmiştir (Horne vd., 2009). SETAC, Kuzey Amerika ve Avrupa şubeleri aracılığıyla, YDD çerçevesinin ve metodolojisinin sürekli iyileştirilmesi için işbirliği yapmak üzere YDD uygulayıcılarını bir araya getirmede koordine edici rol üstlenmiştir. "Uygulama Kuralları" bu koordinasyonun temel sonuçlarından biri olup, bu sürece SETAC'nin yanında "Uluslararası Standartlar Kuruluşu (ISO)" faaliyetleri dahil olmuştur (Heijungs ve Guinée, 2012). Uluslararası Standartlar Kuruluşu (ISO), geniş bir ürün ve faaliyet yelpazesini standartlaştırmayı amaçlayan dünya çapında özel bir kuruluştur. 1994 yılında başlayan ISO faaliyetleri ilk eksiksiz YDD standartları serisini üretmeyi amaçlamaktadır. Bu standartlar, bir YDD projesinin teknik ve organizasyonel yönleri ile ilgilidir (Bruijn, ve diğerleri, 2004). Avrupa Standartlar Komitesi (CEN) ise binaların yol açtığı çevresel etkilerin ölçülmesi, kaynakların standartlaştırılması ve çevresel performansın hesaplanması için AB ülkeleri arasında bir standartlar bütünü oluşturmak amacıyla kurulmuştur (Özeler Kanan vd., 2015). ISO ilk olarak YDD için Tablo 2'de listelendiği gibi 14000 serisi olarak adlandırılan bir dizi standart ve teknik rapor yayınlamıştır (Heijungs & Guinée, 2012). Çevre adına oluşturulan bu ilk standartlar ISO ve CEN'in birleşiminden önce hazırlanmış olup birleştikten sonra güncellenmiş çevre yönetimi standartlarıdır (Özeler Kanan vd., 2015). 1990 – 2000 dönemi, SETAC'nin koordinasyonu ve ISO'nun faaliyetleri ile on yıllık bir standardizasyon dönemi olarak görülmektedir (Heijungs ve Guinée, 2012). ISO standartları; YDD çalışmalarının yapılması, gözden geçirilmesi ve raporlanması ile ilgili şartname, tanım, yöntem ve protokollere yardımcı olmaktadır. Orijinali 1997'de üretilmiş 2006'da güncellenmiş olan ISO 14040:2006, yaşam döngüsü değerlendirmesi için ilkeleri ve çerçeveyi açıklar. Bu temel standart, bir YDD çalışmasının amacını ve kapsamını tanımlamaya, yaşam döngüsü envanterinin geliştirilmesine, yaşam döngüsü etki değerlendirmesine ve yorumlamaya ilişkin rehberliği içermektedir (TS EN ISO 14040:2006, 2007). Bunun yanısıra tekniğin ayrıntılı olarak tanımlanması için ISO 14044'e bakılmaktadır (Horne vd., 2009).

**Tablo 2. Yaşam döngüsü değerlendirmesine ilişkin ISO belgeleri**

<b>Belge Numarası</b>	<b>Tür</b>	<b>Başlık</b>	<b>Yıl</b>
14040	Uluslararası Standart	İlkeler ve çerçeve	1996, 2006
14041	Uluslararası Standart	Amaç ve kapsam tanımı ve envanter analizi	1998 <sup>1</sup>
14042	Uluslararası Standart	Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi	2000 <sup>1</sup>
14043	Uluslararası Standart	Yaşam döngüsü yorumlaması	2000 <sup>1</sup>
14044	Uluslararası Standart	Gereksinimler ve yönergeler	2006 <sup>2</sup>

Kaynak: Heijungs ve Guinée (2012) kaynağından yararlanılarak tekrar oluşturulmuştur.

<sup>1</sup> 2006'da güncellendi ve 14044 ile birleştirildi.

<sup>2</sup>14041, 14042 ve 14043'ün yerini aldı)

21. yüzyılın ilk on yılında YDD'ye olan ilgi zamanla artmış ve 2002 yılında tüm dünyada geliştirilmesi ve benimsenmesine yardımcı olmak için “Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)” ile iş birliği yapılmış ve “UNEP/SETAC Yaşam Döngüsü Girişimi” başlatılmıştır (Heijungs ve Guinée, 2012; Horne vd., 2009). Yaşam döngüsü değerlendirmesine artan ilginin bir başka göstergesi de “Çevresel Ürün Beyanları (EPD) - (ÇÜB)’nin ortaya çıkmasıdır. EPD, önceden belirlenmiş parametre kategorilerine sahip bir ürün için ISO 14040 serisi YDD standartlarına dayalı çevresel veriler kümesidir. Bu sistem, tasarımcıların çevre dostu ürün veya malzeme seçmesini kolaylaştırmaktadır (Buyle, Braet, & Audenaert, 2013). EPD'ler, diğerlerinin yanı sıra yapı malzemelerinin çevresel performansı, üretim süreci, ürün zincirleri ve ayrıca içerikler, kirleticiler ve temel çevresel etkiler vsb. hakkında standartlaştırılmış bilgiler sağlar (Wuppertal Institute, 2018).

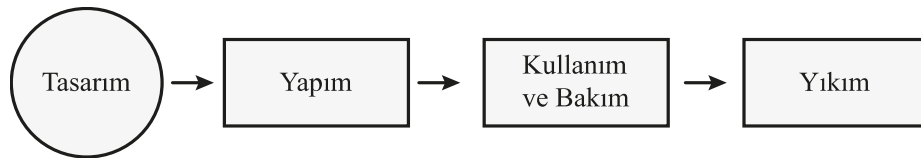
1990 yılından beri inşaat sektöründe kullanılmakta olan yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisi, binaları değerlendirmek için de önemli bir araçtır (Ortiz vd., 2009). Buna yönelik olarak 2004 yılında CEN tarafından binaların sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla Teknik Komite 350 (CEN/TC350) kurulmuştur. CEN/TC350 ISO ile birlikte oluşturduğu ve geliştirdiği ISO 14000 standartlarının ardından 2008 yılında çalışma alanını genişletmiş ve binaların yaşam döngüsü maliyetinin hesaplanması ile sosyal ve ekonomik performansının da değerlendirilmesi için standart geliştirmiştir.

Bu çalışmalarla birlikte 8 adet standart yayımlanmıştır (Özeler Kanan vd., 2015). Yayımlanan standartlar, mevcut ve tasarım aşamasındaki yapı işlerinin sürdürülebilirlik yönlerinin değerlendirilmesi ve yapı ürünlerinin çevresel ürün beyanlarının nasıl olması gerektiğinden sorumludur. Bu standartlar kümesi, sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik ve sosyal üç ana yönünü kapsamaktadır. Yaşam döngüsü çerçevesine göre iki ana standart ele alınmaktadır. Bunlar, ürün seviyesinde değerlendirme için EN 15804 ve bina seviyesinde değerlendirme için EN 15978'tir. Bu iki standart da ürünlerin ve binaların yaşam döngülerinin çeşitli aşamaları ile ilgili temel bilgi vermektedir (Gervasio ve Dimova, 2018). Türkiye standartlarına göre 2012 yılında yayımlanan TS EN 15978:2012, binanın yaşam döngüsü boyunca çevresel performansını değerlendirmek için hesaplama yöntemi tanımlamaktadır (Kuittinen vd., 2013).

Bu bölümde yaşam döngüsü değerlendirmesinin tanımına ve tarihsel gelişimine yer verilmiştir. Diğer bölümlerde yöntem ve aşamaları incelenecektir.

### 3.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Yöntemi

Binanın yaşam süreci, geleneksel lineer bir yaklaşımla ele alındığında; tasarım, yapım, bakım-onarım ve yıkım olmak üzere dört ana evre olarak tanımlanmaktadır. Bu geleneksel yaklaşımda yaşam süreci Şekil 15'te de gösterildiği gibi, doğrusal olarak ele alınmakta olup yaşam döngüsü değerlendirmede ise; başlangıç noktası olmadan döngüsel bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Çelebi vd., 2008).



**Şekil 15. Yaşam döngüsü geleneksel modeli**

Kaynak: (Çelebi G. , 2003) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

ISO 14040 (2006)'a göre bir ürünün yaşam döngüsü boyunca, hammadde ediniminden başlayarak üretimi, paketlenmesi, taşınması, kullanımı, gerektiğinde bakım-onarımı, kullanım ömrünün bitmesi, geri dönüşümü veya yıkımına kadar olan süreçteki, mevcut ve potansiyel çevresel etkileri ile ele alınmasında kullanılan yöntem “Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) - Life Cycle Assessment (LCA)” olarak tanımlanmaktadır (TS

EN ISO 14040:2006, 2007). Bu yöntemde kullanılan “yaşam döngüsü” kavramı değerlendirilen ürün veya hizmetin "beşikten mezara" takip edildiğini ifade etmektedir. “Beşik” hammaddelerin veya kaynakların çıkarılması ve gereken enerji kullanımını kapsayan süreç; aynı şekilde, “mezar” ise ortaya çıkan ürünlerin veya kullanılan kaynakların doğaya geri döndüğü yer ve zaman olarak tanımlanabilir. Mevcut ve potansiyel çevresel etkiler; kaynak kullanımını, insan sağlığını ve ekolojik sonuçları göz önünde bulundurur (Gültekin ve Çelebi, 2016; Paulsen, 2001).

ISO 14040: (2007)’a göre YDD yöntemi;

- Ürünlerin yaşam döngüsü evrelerinde çevresel potansiyelinin tanımlanarak bu ürünlerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesinde,
- Stratejik planlama, öncelik belirleme, ürün veya hizmetlerin tasarımı veya yeniden tasarımı amacıyla sanayide, sivil toplum kuruluşlarında veya kamu kuruluşlarındaki karar mercilerinin bilgilendirilmesinde,
- Ölçüm teknikleri dahil çevresel performans göstergelerinin seçiminde,
- Pazarlama araçlarının (çevresel bildirimler veya çevre etiketi uygulaması) geliştirilmesi alanlarında kullanılabilir.

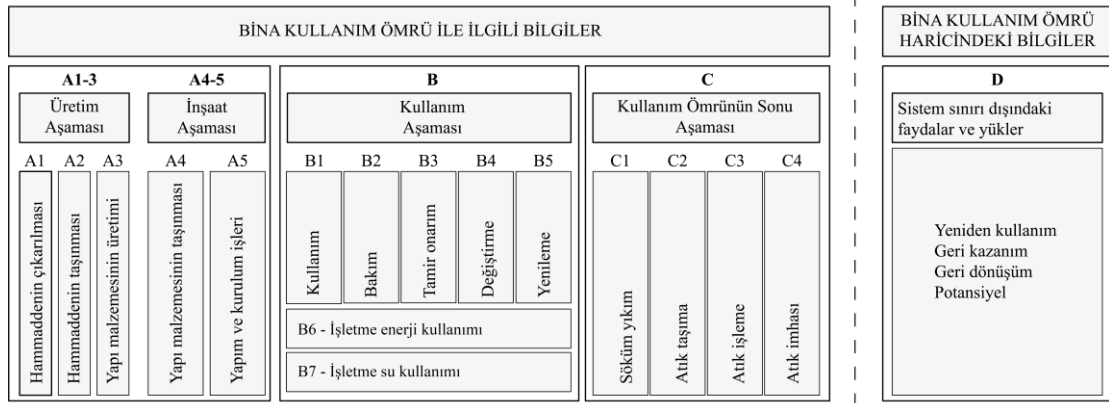
### **3.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmenin Bina Tasarım Uygulamasında Kullanımı**

Yaşam döngüsü değerlendirme bina tasarım sürecine entegre edilerek yapı malzemeleri, bileşenleri ve sistemlerinin yaşam döngüsü etkileri değerlendirilebilir ve binanın yaşam döngüsü çevresel etkilerini azaltan seçimler yapılabilir (Reiter, 2010).

Yapı malzemeleri ve bileşenlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi ile bina yaşam döngüsü değerlendirmesi arasında farklılıklar vardır. Yapı malzemesi için fonksiyonel birim sonuç bir ürüne odaklanırken, tüm bina için fonksiyonel birim genellikle m<sup>2</sup> kullanım (yaşam) alanıdır. Ayrıca bina yaşam döngüsü değerlendirme verileri, mimari çizimlerden ve teknik özelliklerinden alınırken yapı malzemelerine yönelik yaşam döngüsü değerlendirme verileri endüstriyel süreçlere dayalıdır. Ayrıca bina ölçeğinde yapılan YDD çalışmalarının; binaların uzun ömürlü olması, çeşitli fonksiyonların birleşimi olması, çevreden etkilenmesi ve binalarda kullanım aşamasının etkisi gibi özel durumları vardır (Kotaji vd., 2003; Ortiz vd., 2009; Reiter, 2010).

Yapı malzemeleri ölçeğinde yapılan YDD yapı malzemelerinin hammaddelerinin toplanması, üretimi ve taşınması, kullanımı ve yeniden kullanımına veya bertarafına kadar olan aşamalar, çevresel etkileri açısından incelenmektedir (Kim ve Rigdon, 1998).

Bina ölçeğinde yapılan YDD ise binalarda kullanılan malzemelerin sürdürülebilirliğinin yanısıra inşaat aşamasındaki süreçler dahil olmak üzere bina kullanımı ve bertarafının bulunduğu aşamaları içermektedir (ETKB, 2016). “Yapılarda sürdürülebilirlik – Binaların çevresel performansının değerlendirilmesi – Hesaplama yöntemi” başlıklı TS EN 15978 (2012) standardına göre Şekil 16’da gösterildiği gibi A, B, C ve D modülleri olmak üzere dört ana aşamada incelenmektedir. Ayrıca TS EN 15978 standardı ile yeşil bina değerlendirme sistemleri kullanılarak nicel olarak hesaplanamayan m<sup>2</sup> kullanım alanı başına çevresel performans hesabı yapılabilmektedir (ETKB, 2016).



**Şekil 16. Binalar için yaşam döngüsü aşamaları ve modüller**

Kaynak: TS EN 15978 (2012) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

### 3.2.1. Üretim ve İnşaat Aşaması (A Modülü)

Üretim (A1-A3) ve inşaat (A4-A5) aşamasında saha seçimi, bina tasarımı ve yapı malzemesi süreçleri önemlidir. Yapıda kullanılacak malzemeler ve yapı tasarımı çevresel etkilerine göre değerlendirilmekte ve bu aşama çevreye zarar verme potansiyeli en yüksek aşama olarak görülmektedir, çevreye verilen zarar uzun süreli sonuçlara yol açabilir. Hammadde çıkarılması, üretim süreci ve üretim yerinden şantiyeye taşınması gibi süreçlerin çevresel sonuçları bulunmaktadır (Çelebi G., 2003; Kim ve Rigdon, 1998; TS EN 15978, 2012).



A1-A3 modülleri “beşikten kapıya” kadar olan süreci kapsamaktadır:

- A1- Hammaddenin çıkarılması,
- A2- Hammaddenin taşınması,
- A3- Yapı malzemesinin üretimi.

A4 ve A5 modülleri farklı inşaat yapı ürünlerinin fabrikadan çıkışından inşaat işinin tamamlanmasına kadar olan süreci kapsamaktadır:

- A4- Yapı malzemesi ve ürünlerin fabrikadan bina sahasına taşınması, depolanması ve dağıtımı. İmalat ekipmanlarının bina sahasına ve bina sahasında taşınması,
- A5- Yapım ve kurulum işleri. Zeminle ilgili işler, malzemelerin depolanması, malzeme, atık ve donanımın bina sahasında taşınması, sahada yapılan üretim ve sahadaki üretim sırasında ortaya çıkan atık yönetimi vb. işlemleri içerir (TS EN 15978, 2012).

### 3.2.2. Kullanım Aşaması (B Modülü)

Kim ve Rigdon (1998)’a göre kullanım aşaması; yapı malzemesinin faydalı ömrünü ifade etmekle birlikte yapının inşa edildiği ve kullanıldığı süreci kapsamaktadır. Ayrıca kullanım aşaması, bir binanın inşa edildiği ve işletildiği süreci kapsayan yaşam döngüsü aşaması olarak da tanımlanabilir. Kaynak tüketiminin çevresel etkilerini azaltmanın yolları için inşaat ve işletme süreçleri önem taşımaktadır (Çelebi G. , 2003).

Yapım işlerinin tamamlanmasından binanın yıkılacağı zamana kadar olan bu süreç; ısıtma, soğutma, aydınlatma, su temini, asansör veya hareketli merdivenler tarafından sağlanan dahili taşıma, temizlik, işletme ve makinelerin değiştirilmesi gibi bakım işleri girmektedir (TS EN 15978, 2012).

- B1- Binanın kullanımı. Beklenen kullanım şartlarından kaynaklanan etkileri ve nitelikleri kapsar.

Örnek olarak konut içi faaliyetler, pişirme, ütöleme, yıkama verilebilir (Kuittinen vd., 2013).

- B2- Binanın bakımı aşağıdaki işlemleri içermektedir:

- Bakım için kullanılan bileşenlerin ve yardımcı ürünlerin imalatı ve taşınması,
- Binanın dışında ve içinde yapılan temizlik işlemleri,
- Bina ve bina ile ilişkili teknik sistemin işlevsel ve teknik bakımları ile binanın dış ve iç bileşenlerinin estetik kaliteleri için yapılacak işlemler.

Örnek olarak doğramaların boyanması, havalandırma sisteminin filtrelerinin değiştirilmesi verilebilir.

- B3- Binanın tamir ve onarımı, kullanım aşamasında bina bileşenlerinin tamirleri ile ilgili işlemleri kapsamaktadır. Bu işlemler aşağıdaki gibidir:
  - Bina bileşeninin tamir edilecek parçasının üretimi,
  - Üretilen parçanın taşınması, imalat etkileri ve taşıma süresinde malzeme kayıplarının nitelikleri,
  - Bina bileşeninin tamir edilecek parçasının tamir edilmesi işlemi,
  - Bileşenin sökülen parçasının atık yönetimi,
  - Bileşenin sökülen parçasının kullanım aşamasının sona ermesi.
- B4- Binanın kullanım ömrünü tamamlayan elemanlarının değiştirilmesi aşaması aşağıdaki işlemleri içermektedir:
  - Bina bileşeninin değiştirilecek parçasının üretimi,
  - Üretilen parçanın taşınması, imalat etkileri ve taşıma süresinde malzeme kayıplarının nitelikleri,
  - Bina bileşeninin tamir edilecek parçasının değiştirilmesi işlemi,
  - Bileşenin sökülen parçasının atık yönetimi,
  - Bileşenin sökülen parçasının kullanım aşamasının sona ermesi.

Örnek olarak çatı kirişlerinin değiştirilmesi, bölme duvarın değiştirilmesi, ısıtma sisteminin değiştirilmesi, pencere ve kapının değiştirilmesi verilebilir.

- B5- Binanın tadilatı ve yenilenmesi aşağıdaki işlemleri içermektedir:
  - Yeni bina bileşenin üretimi,

- Üretilen yeni bina bileşeninin taşınması,
- Yenileme işleminin bir parçası olarak yapım işlemi,
- Yenileme işlemindeki atıkların yönetimi,
- Yenilenen bina bileşeninin kullanım aşamasının sona ermesi.

Örnek olarak planın değiştirilmesi, ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin değiştirilmesi, planlanmış veya olası kullanım değişimleri için modifikasyonu verilebilir.

- B6- İşletme enerji kullanımı, bina ile bütünleşik teknik sistemler tarafından binanın kullanılması sırasında tüketilen enerjiyi (operasyonel enerji) kapsamaktadır. Binanın enerji performansı, bina kullanıcılarının farklı ihtiyaçlarının karşılamak üzere kullanılan, hesaplanan veya gerçek enerjiye dayalı olarak aşağıdakilere göre belirlenir:
  - Isıtma,
  - Sıcak su temini,
  - İklimlendirme (soğutma, nemlendirme)
  - Havalandırma,
  - Aydınlatma,
  - Pompalar, kontrol ve otomasyon sistemleri tarafından kullanılan ek enerji.

Bina ile bütünleşik asansörler, yürüyen merdivenler, güvenlik ve iletişim sistemleri de bu bölüme dahil edilmektedir. İşletme enerji kullanımıyla ilişkili tüm etki ve nitelikler tamamıyla bina ile ilgili olmalıdır.

- B7- İşletme su kullanımı, binanın işletimi sırasında kullanılan suyun tamamıyla birlikte inşaat işlerinin bitmesi ile binanın bertarafına kadar olan süreci kapsar. Üretim, nakliye, bakım ve binaya su temini B2-B5 modüllerinde ele alınırken evsel sıcak su ve diğer su kullanımı ise Modül B6'da ele alınmalıdır.

Modül B7'de ele alınan binaya ait olan işlemler aşağıdaki gibidir:

- İçme suyu,
- Sağlığın korunması için sıcak su,

- Evsel sıcak su,
- İlgili arazilerin, yeşil çatıların sulanması,
- Isıtma, soğutma, havalandırma ve nemlendirme için kullanılan su,
- Binayla bütünleşik sistemler (çeşme, yüzme havuzu vb.) tarafından kullanılan su.

Binayla bütünleşik olmayan aletler (bulaşık makinesi, çamaşır makinesi vb.) tarafından kullanılan su değerlendirilmeye dahil edilmeyebilir. Eğer dahil edilecekse ayrı olarak rapor edilmelidir (TS EN 15978, 2012).

### 3.2.3. Kullanım Ömrünün Sonu Aşaması (C Modülü)

Bir binanın kullanım ömrü, binanın faydalı hizmetini tamamlaması ve herhangi bir şekilde kullanılmasının amaçlanmamasıyla sona erer. Bu aşamada, binanın yıkımı; atılacak, geri dönüştürülecek veya yeniden kullanılacak olan malzemelerin, bina elemanları için bir kaynak olacak hale gelmesi için yapılan çoklu işlemler olarak değerlendirilebilir.

Bina sahasından temizlenecek tüm bileşenlerin ve malzemelerin kaldırılması ve sahanın sonraki kullanımlar için hazır hale getirilmesiyle bir binanın kullanım ömrünü tamamladığı varsayılmaktadır (TS EN 15978, 2012).

- C1- Binanın yıkımı, binanın hizmetine son verilmesinden sonra yapı söküm işlemleri için gerekli olan sahada ve saha dışındaki geçici işlerde gerçekleştirilen işlemler ile sahadaki yıkım ve söküm işlemlerini kapsamaktadır.
- C2- Atık taşıma işlemi, atıkların taşınmasından, yok edilmesi veya atıklar için yapılacak işlemlerin sonuna kadar olan süreci kapsamaktadır. Bu süreç, atıkların olası depolama/işleme yerlerine ve bu yerlerden taşınmasını içine almaktadır.
- C3- Atıkların işlenmesini (yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesini) içeren süreçtir. Yapı yıkımından ortaya çıkan atık parçalarının toplatılması ve yeniden kullanılacak, geri dönüştürülecek veya enerji geri kazanımında kullanılacak malzemelerin akışı içerisinde atıkların işlenmesini ifade etmektedir. Binanın kullanımı sona erdikten sonra malzeme ve ürünler öncelikle atık olarak

değerlendirilmekte daha sonra geri kazanım şartlarına uygun bulunduğu ise atık işleme aşamasına geçilmektedir.

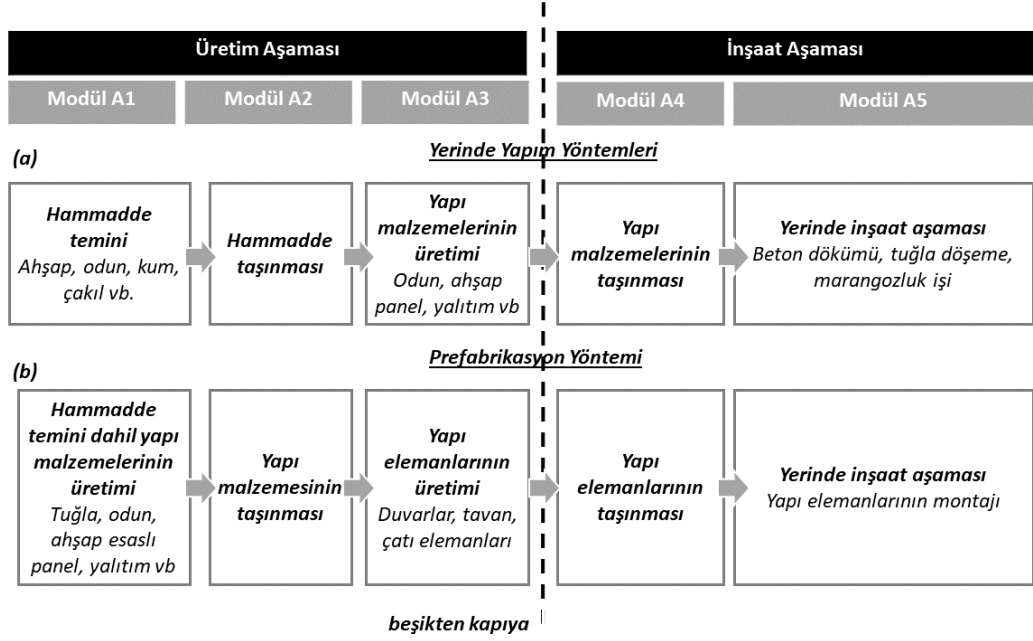
- C4- Atıkların nihai imhasını kapsamaktadır. Bu modülde, malzemelerin imhasından kaynaklanan; nötralizasyon, enerji kullanılarak veya kullanılmadan gerçekleştirilen yakma işlemleri, çöp gazlarının kullanıldığı veya kullanılmadığı durumda atıkların gömülmesi gibi çevresel yükler hesap edilmektedir (TS EN 15978, 2012).

#### 3.2.4. Kullanım Ömrü Haricindeki Aşama (D Modülü)

Yeniden kullanılacak bileşenler ile geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı için kullanılan malzemelerin, daha sonra kullanılacak potansiyel kaynaklar olarak ele alındığı aşamadır. Bu aşamada, net malzeme akışından ortaya çıkan yeniden kullanım, geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı ile elde edilen net çevresel faydalar ve yükler ile sistem dışına çıkan dışarıdan temin edilen enerji hesaba katılmaktadır (TS EN 15978, 2012).

#### 3.2.5. TS EN 15978 (2012) Standardına Göre Prefabrike ve Geleneksel Yapılarda Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Binalarda yapılan yaşam döngüsü değerlendirme aşamaları TS EN 15978 (2012) standardına göre A1-A3 (üretim), A4 (taşıma), A5 (inşaat), B1-B5 (bakım ve onarım), B6-B7 (enerji ve su), C1-C4 (kullanım ömrünün sonu) ve D modüllerine ayrılmıştır. TS EN 15804 (2012) ve TS EN 15978 (2012) standartları ilk olarak binaların geleneksel olarak yerinde inşaat yönteminin değerlendirilmesi için oluşturulmuştur. Achenbach vd. (2018)'nin prefabrike ahşap konutta üretim ve inşaat aşamasının yaşam döngüsünü değerlendirdiği çalışmada ise bu standart modülleri Şekil 17'deki gibi sınıflandırılabilmektedir.



**Şekil 17. Yerinde inşaat (geleneksel) yöntemine (a) ve prefabrike yöntemine (b) uygulanan TS EN 15804 / TS EN 15987'nin modüler ilkesi**

Kaynak: Achenbach vd. (2018) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

Yerinde inşaat yöntemine göre, A1 modülü hammadde temini, A2 modülü ise hammaddelerin taşınmasını ele almaktadır. A3 modülü de yapı malzemelerinin üretimi ile sonlandırılmaktadır. Beşikten kapıya olan yaşam döngüsünün ardından, A4 modülünde yapı malzemelerinin şantiyeye taşınması ve A5 modülünde de inşaat aşaması ele alınmaktadır.

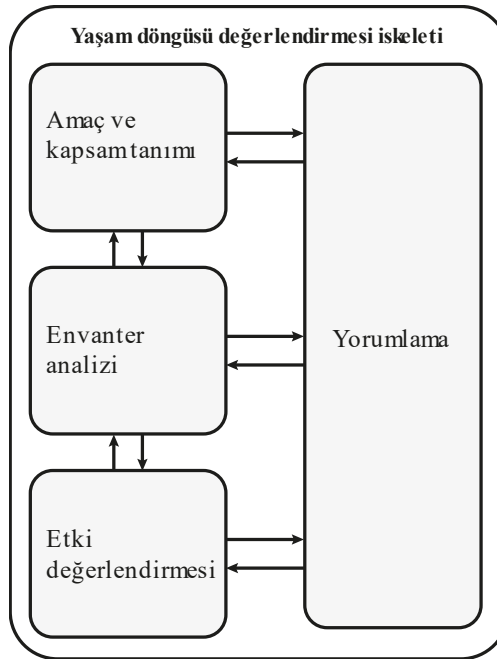
Prefabrike (ön üretim) inşaat yönteminde ise, hammadde temini ve yapı malzemelerinin üretimi A1 modülünde, yapı elemanlarını oluşturan yapı malzemelerinin nakliyesi A2 modülünde ve yapı elemanlarının imalatı da A3 modülünde ele alınmıştır. Böylelikle, A4 modülü de yapı elemanlarının şantiyeye taşınmasını içermektedir. Ön üretimle gelen yapı elemanlarının şantiyede birleştirilmesi (kurulum) işi ise A5'te ele alınmaktadır. Bu yaklaşımla, prefabrik yapı elemanları için de, üretim ve yapım aşaması arasındaki sınırın aynı yerde kalması sağlanmaktadır (Achenbach vd., 2018).

### 3.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Aşamaları

Kullanım alanları belirtilen yaşam döngüsü değerlendirmesi 4 aşamadan oluşmaktadır. Şekil 18'de gösterildiği gibi bunlar;

- Amaç ve kapsamın tanımlanması (AKT)
- Yaşam döngüsü envanter analizi (YDE)
- Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (YDED)
- Yaşam döngüsü yorumlaması (YDY)'dir (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

Bu dört aşama, ayrıntılı açıklamalarından önce özet olarak ele alınırsa; amaç ve kapsamın tanımlanması, envanter analizi için fonksiyonel biriminin, sistem sınırlarının ve veri kalite kriterlerinin belirlenmesidir. Yaşam döngüsü envanter analizi, ürün yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarında enerji, su, hammadde kullanımı ve bunlara bağlı çevresel salınımlara ilişkin bilgilerin toplanması ve organize edilmesidir. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ise olası çevresel etkilerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki etki değerlendirmesinin yapılmasıdır. Bu aşamada etki kategorileri tanımlanıp sonuçların sınıflandırılması, karakterizasyonu, normalizasyonu, gruplandırılması ve ağırlıklandırılmasına değinilmektedir. Son olarak, yaşam döngüsü yorumlaması hem yaşam döngüsü envanter analizi hem de yaşam döngüsü etki değerlendirmesinden elde edilen sonuçların kontrol edilmesi ve yorumlanmasıyla ilgilenmektedir (Sharma vd., 2011).



**Şekil 18. Yaşam döngüsü değerlendirme aşamaları ve ilişkileri**

Kaynak: (TS EN ISO 14040:2006, 2007) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

### 3.3.1. Amaç ve Kapsam Tanımı (AKT)

YDD'nin ilk aşaması olarak belirlenen amaç ve kapsamın tanımı, çalışmanın yürütülme sebeplerini ve hedef kitleyi belirlemeyi içerir. Bu aşamada belirtilen amaç için doğru sonuçların elde edilebilmesi için çalışmanın genişliğinin, derinliğinin ve ayrıntısının yeterince iyi tanımlanması gerekmektedir (Crawford, 2011; TS EN ISO 14040:2006, 2007).

#### 3.3.1.1. Amaç

Bir YDD çalışmasında en yararlı sonuçların elde edilmesini sağlamak için değerlendirme sürecine rehberlik etmesi beklenen amaç tanımının birincil önceliği; genel anlamda çevre ve insan sağlığı üzerinde en az etkiye sahip olan ürünü veya süreci seçmek ya da yeni ürün veya süreçlerin geliştirilmesine rehberlik etmek olmasının yanında, belirlenen hedeflerin çalışmayı yürütme sebeplerine yanıt verilmesi, çalışma sonuçlarının ulaştırılması istenen hedef kitleye ulaştırılması ve kamuya açıklanabilecek karşılaştırmalı beyanlarda kullanılıp kullanılmayacağını belirtmektir (Crawford, 2011; TS EN ISO 14040:2006, 2007).

#### 3.3.1.2. Kapsam

Bir YDD çalışmasının kapsamının tanımlanması, hangi yaşam döngüsü evrelerinin dikkate alınacağını ve ürün sistem sınırlarının ne olduğunun belirlenmesini, çalışmada herhangi bir varsayımın veya sınırlamanın not edilmesini ve hangi girdilerin, çıktıların ve etkilerin dahil edilip hangilerinin dahil edilmeyeceğini detaylandırmayı içermektedir (Crawford, 2011).

ISO 14040'a göre kapsamın tanımlanması için aşağıda belirtilen unsurlar tanımlanmalı ve ilgili kararlar verilmelidir:

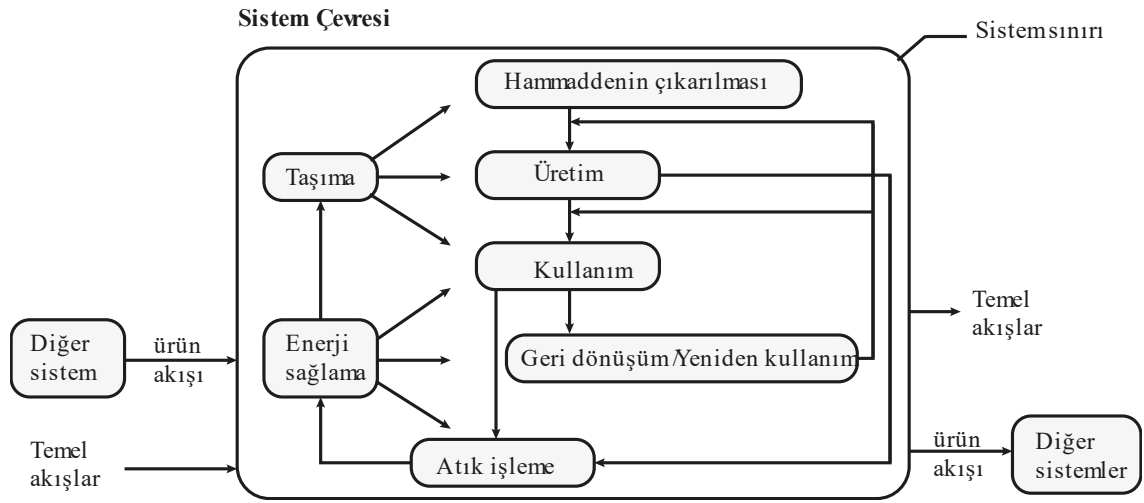
- Çalışılacak ürün sistemi
- Ürün sisteminin fonksiyonları
- Fonksiyonel birim
- Sistem sınırı



- Varsayımlar
- Veri kalitesi gerekleri
- Eleştirel gözden geçirme tipi,
- Rapor hazırlama kararları (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

YDD çalışması tekrarlı bir süreç olabileceğinden, ilerledikçe çalışmanın ilk hedeflerini karşılamak üzere kapsamın özellikleri değişiklik gerektirebilmektedir. Bu değişim ihtiyacı çalışma ilerledikçe öngörülemeyen sınırlamalar veya ek bilgiler oluşması sebebiyle olabilmektedir (Crawford, 2011; TS EN ISO 14040:2006, 2007). Kapsam tanımında belirtilen gerekli unsurların açıklamalarına aşağıda yer verilmiştir.

Ürün sistemi, çevresel etkilerin değerlendirileceği bir unsur olup AKT aşamasında net olarak tanımlanmalıdır (Gültekin ve Çelebi, 2016). Şekil 19’da gösterildiği gibi bir ürün sisteminin temel özelliği, işleviyle nitelendirilir ve sadece son ürünler cinsinden tanımlanamayabilir (TS EN ISO 14040:2006, 2007).



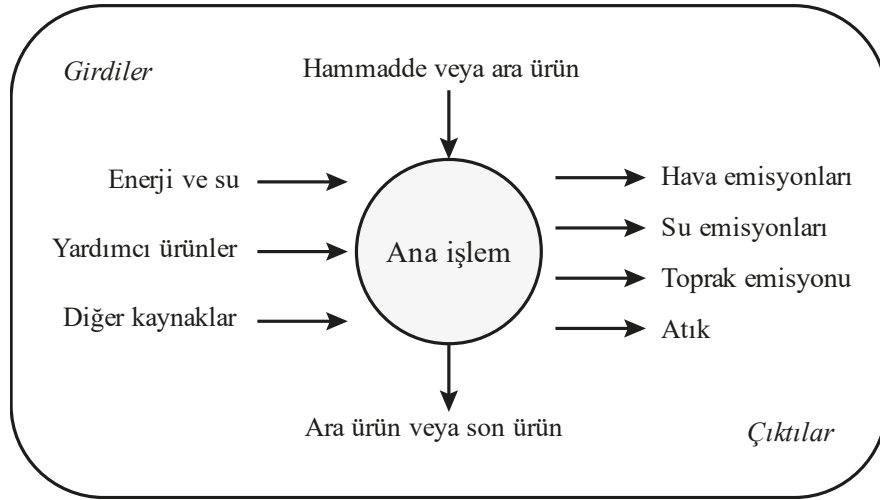
**Şekil 19. YDD için bir ürün sistemi örneği**

Kaynak: TS EN ISO 14040:2006 (2007) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

Fonksiyonel birim, belirli bir işlevi yerine getirmek için incelenen ürün veya sürecin performans özelliklerini tanımlar. Temel amacı, girdi ve çıktıların belirli bir işlevle ilişkili olmasını sağlamaktır. Bu ise, YDD çalışmasının sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla gerekmektedir ve ürünlerin ve süreçlerin birçok işlevi olabilir, dolayısıyla fonksiyonel birimin karşılaştırılan farklı ürünlerin benzer bir süre boyunca

aynı hizmetleri sunması gerekmektedir. Binalar için seçilen fonksiyonel birim, farklı projelerin homojen bir temelde karşılaştırılmasına izin verdiği için genellikle yıllık yaşam alanı birimidir (1 m<sup>2</sup>) (Crawford, 2011; Peuportier, 2001; TS EN ISO 14040:2006, 2007). TS EN 15978 (2012) standardı, m<sup>2</sup> yaşam alanı fonksiyonel birimine göre bir yapının gömülü ve operasyonel enerjilerinin tüm bina yaşamı boyunca hesaplanabilmesine olanak sağlamıştır (ETKB, 2016).

Sistem sınırları, birbirlerine girdi ve çıktılarla bağlı birim işlemlerden oluşmaktadır. Bir ürün sistemi birden fazla bağımsız girdi, çıktı ve işlemden oluşur ve sistem sınırı bu girdi, çıktı ve işlemlerden hangilerinin bir YDD çalışmasına dahil edilebileceğini tanımlamaktadır. Şekil 20’de görüldüğü gibi genellikle girdiler; hammaddeleri, yardımcı ve ara ürünleri, enerjiyi, suyu ve diğer kaynakları içerirken çıktılar ise atık işlemeyi ve üretilen ara ürünleri içermektedir (Crawford, 2011). Tanımlanan sistem sınırlarının belirlenmesinde YDD çalışmasının amaç ve kapsam tanımı, hedef kitlesi, varsayımlar ve veri kısıtlaması gibi unsurlar dikkate alınmalıdır. Bu unsurlar, yapılan çalışma sonuçlarını güven seviyesi ve çalışmanın amacına ulaşması açısından önem taşımaktadır (TS EN ISO 14040:2006, 2007).



**Şekil 20. Ana işlem için girdi ve çıktılar**

Kaynak: Crawford (2011) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

Veri kalitesi gerekleri, YDD çalışmasının sonuçlarının güvenilirliği ve uygun bir şekilde yorumlanabilmesi açısından önemlidir (TS EN ISO 14040:2006, 2007). Bu gereksinimler tanımlanırken ele alınması gereken durumlar, toplanan verilerin analiz edilen ürün veya

sürecin belirli zamansal, coğrafi ve teknolojik özellikleridir (Crawford, 2011; Gültekin ve Çelebi, 2016).

Eleştirel gözden geçirme, bir YDD çalışmasının yöntemi, verilerin toplanması, yorumlanması ve raporlanması gereklerinin ISO standartlarına uygun olup olmadığının doğrulanma sürecidir. Bu süreç; iç veya dış uzman ya da ilgili taraflardan oluşan bir heyet tarafından yürütülebilmektedir (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

Rapor hazırlama kararları, YDD çalışmasında uygulanan yöntemleri, sınırlamaları, varsayımları ve çalışmanın sonuç ve kararlarını hedef kitleye şeffaf bir şekilde sunmak olarak tanımlanabilir (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

### 3.3.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDE)

Bir yaşam döngüsü değerlendirmenin, yaşam döngüsü envanter analizi aşamasının yürütülmesi için başlangıç planını çalışmanın amaç ve kapsamının tanımlanmasını vermektedir (TS EN ISO 14044:2007, 2007). Yaşam döngüsü envanter analizi ise bir ürün sisteminin ilgili girdi ve çıktıları hesaplamak için veri toplanması ve hesaplanması prosedürlerini içermektedir. Bu tekrarlı bir süreçtir (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

#### 3.3.2.1. Veri toplama

Envantere dahil edilecek veriler, sistem sınır kapsamına dahil edilen her bir birim süreç için toplanmalıdır ve bu veriler aşağıdaki gibi ana başlıklar halinde sınıflandırılabilir:

- Enerji girdileri, hammadde girdileri, yardımcı girdiler, diğer fiziksel girdiler,
- Ürünler, yan ürünler ve atık,
- Havaya, suya ve toprağa salınımlar,
- Diğer çevresel boyutlar (TS EN ISO 14040:2006, 2007; TS EN ISO 14044:2007, 2007).

#### 3.3.2.2. Veri hesaplama (değerlendirme)

Veri toplama sonrasında;

- Toplanan verilerin geçerli kılınmasını,

- Verilerin birim süreçlerle ilişkisini,
- Verilerin fonksiyonel birimin referans akışıyla ilişkisini,
- Sistem sınırının kesinleştirilmesini

içeren değerlendirme prosedürleri, her bir birim süreci ve modellenecek ürün sisteminin tanımlı fonksiyonel birimi için tanımlanan envanter sonuçlarını üretmek için gereklidir (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

### 3.3.2.3. Akışların ve salınımların tahsisatı

Girdiler ve çıktılar, tahsis etme prosedürü ile farklı ürünlere uygulanmalıdır (TS EN ISO 14044:2007, 2007). Tek bir hammadde girdi ve çıktısına bağlı olarak üretim yapan çok az sayıda sanayi süreci bulunmaktadır. Sanayi süreçlerinin çoğunda birden fazla ürün imal edilmekte ve bunlar ara ürünleri ve atılan ürünleri hammadde olarak geri dönüştürerek kullanılmaktadır. Birden fazla ürün ve geri dönüştürme sistemleri içeren sistemler dikkate alındığında, tahsisat prosedürlerinin gerekli olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

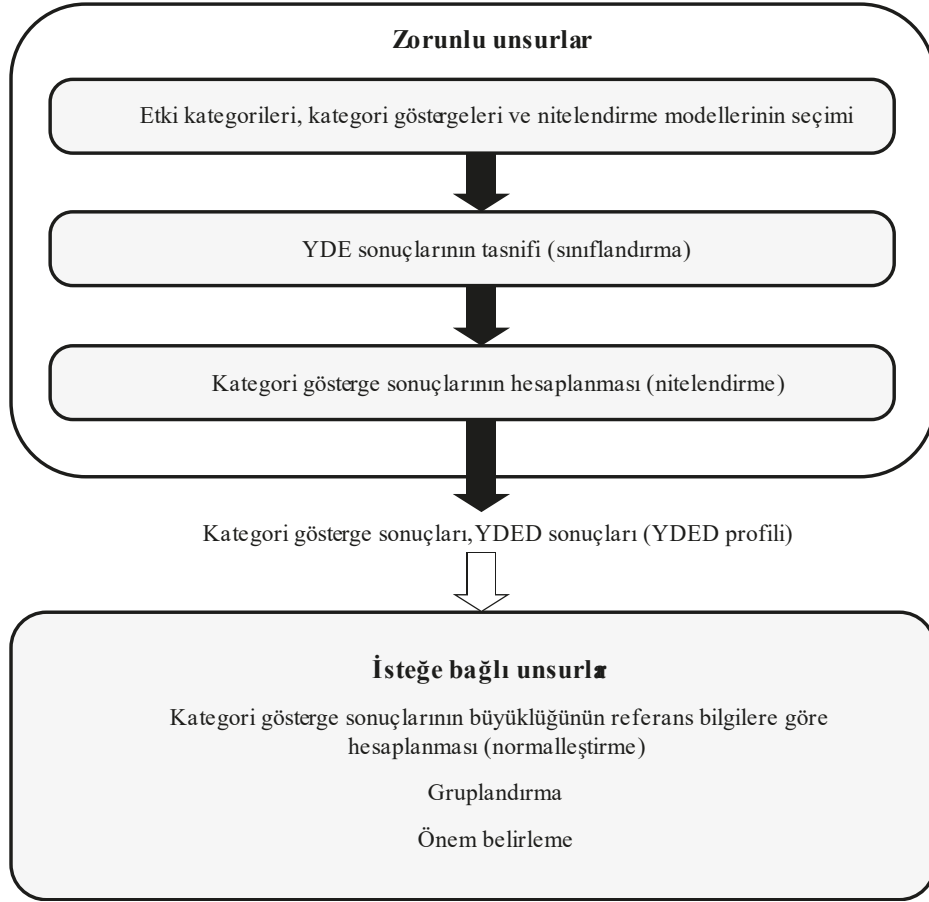
### 3.3.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED)

TS EN ISO 14044 (2007) standardı, yaşam döngüsü etki değerlendirmesini (YDED) bir ürün sisteminin potansiyel çevresel etkilerinin büyüklüğünü ve önemini anlamayı ve değerlendirmeyi amaçlayan YDD aşaması olarak tanımlamaktadır. Ayrıca YDED aşamasının amacı, yaşam döngüsü emisyonlarını ve kaynak tüketimi envanterini “koruma alanları” için göstergeler açısından korumak istediğimiz alanlar üzerindeki etkiyi değerlendirmektir. Yaygın olarak kabul edilen koruma alanları şunlardır:

- Doğal kaynaklar
- Doğal çevre
- İnsan sağlığı
- Yapılı çevre (EC-JRC, 2010; Margni ve Curran, 2012).

Şekil 21’de görüldüğü gibi YDED, zorunlu ve isteğe bağlı unsurlardan oluşmaktadır (TS EN ISO 14040:2006, 2007).

## Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi



**Şekil 21. YDED aşamasının unsurları**

Kaynak: TS EN ISO 14040:2006 (2007) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

### 3.3.3.1. Etki kategorileri, kategori göstergeleri ve nitelendirme modellerinin seçimi

Etki değerlendirme analizinin ilk adımı, çalışmanın amaç ve kapsam tanımıyla uyumlu olarak etki kategorilerinin seçimidir (Margni ve Curran, 2012). Bu adımda çevresel etkiler tanımlanmaktadır. Yaşam döngüsü envanterindeki temel akışlar daha sonra çeşitli çevresel sorunlara yol açma potansiyeline göre etki kategorilerine atanır (EC-JRC, 2010). Her bir etki kategorisi için, YDED'nin gerekli bileşenleri aşağıdaki unsurları içermektedir:

- Kategori uç noktalarının belirlenmesi,
- Verilen kategori uç noktaları için kategori göstergesinin tanımlanması

- Seçilen kategori göstergesi ve belirlenen kategori uç noktaları dikkate alınarak etki kategorisi olarak sınıflandırılabilen uygun YDE sonuçlarının belirlenmesi,
- Nitelendirme modeli ve nitelendirme faktörlerinin belirlenmesi (TS EN ISO 14044:2007, 2007).

ISO 14044 standardında kullanılan bu terimlerin örnekleri Tablo 3'teki gibidir.

**Tablo 3. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi terimlerine örnekler**

<b>Terim</b>	<b>Örnek</b>
Etki kategorisi	İklim değişikliği
YDE sonuçları	Fonksiyonel birim başına bir sera gazı miktarı
Nitelendirme modeli	Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'nin 100 yıllık temel modeli
Kategori göstergesi	Kızıl ötesi ışıma gücü (W/m <sup>2</sup> )
Nitelendirme faktörü	Her bir sera gazının küresel ısınma potansiyeli (kg CO <sub>2</sub> eş değeri/kg gaz)
Kategori gösterge sonucu	Fonksiyonel birim başına kg CO <sub>2</sub> eş değeri
Kategori uç noktaları	Mercan kayalıkları, ormanlar, tarımsal ürünler
Çevreyle olan ilgisi	Kızıl ötesi ışıma gücü, bütünleşik atmosferik ısı emilimine bağlı olan iklim üzerindeki potansiyel etkiler için bir yaklaşım

Kaynak: TS EN ISO 14044:2007 (2007) kaynağından yararlanılarak tekrar oluşturulmuştur.

TS EN ISO 14044:2007 (2007)'ye göre, envanter verilerini koruma alanları üzerindeki etkilere bağlayan etki yolu boyunca herhangi bir yerde bir etki kategorisi göstergesi seçilebilir. Etki kategorileri ve karşılık gelen göstergeler, neden-sonuç ilişkisiyle “probleme yönelik yöntemler (orta noktalar)” ve “hasara yönelik yöntemler (son noktalar)” olmak üzere iki yöntemde organize edilmektedir. Orta nokta ve son nokta seviyelerinde karakterizasyon modellemesi için etki kategorileri örneği Şekil 22'de verilmiştir (EC-JRC, 2010).



**Şekil 22. Orta nokta ve son nokta (koruma alanı) seviyelerinde karakterizasyon modellemesi için etki kategorileri çerçevesi**

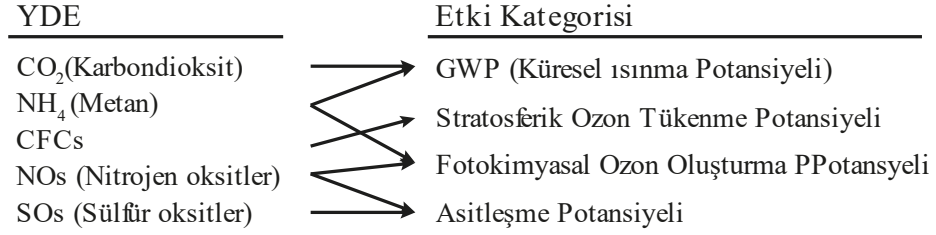
Kaynak: EC-JRC (2010) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

Orta nokta yaklaşımı; iklim değişikliği (*climate change*), insan zehirlenmesi (*human toxicity*), ötrofikasyon (*eutrophication*), asitleşme (*acidification*) ve potansiyel fotokimyasal ozon oluşumu (*potential photochemical ozone creation*) ile ilgili çevresel etkileri içerir ve bu çevresel etkiler CML tabanlı yöntem, EDIP 97 & EDIP 2003 ve IMPACT 2002+ yöntemleri kullanılmaktadır. Son nokta yaklaşımında ise; akışlar çeşitli çevresel temalara göre sınıflandırılarak her bir temanın insanlara, doğal çevreye ve kaynaklara (koruma alanlarına) verdiği zarar değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmede ise Ecoindicator 99, IMPACT 2002+ metotları kullanılmaktadır (Ortiz vd., 2009).

### 3.3.3.2. Sınıflandırma (YDE sonuçlarının tasnifi)

Yaşam döngüsü envanter analizi sonuçlarının sınıflandırılması; kullanılan emisyonların, atıkların ve kaynakların seçilen etki kategorilerine atanmasını içermektedir. Yani, envanter analizi tablosundaki verilerin bir dizi etki kategorisi altında gruplandırılmasıdır (Ortiz vd., 2009; UNEP, 2003).

Bir madde birden fazla etki kategorisine katkıda bulunursa, bütünüyle bu kategorilerin tümüne atanmaktadır, herhangi bir şekilde bölünmez. TS EN ISO 14044:2007 (2007) standardında verilen örnekte olduğu gibi hem yeryüzündeki ozon oluşumuna hem de asitleşmeye yol açabilen NO<sub>2</sub>'lerin salınmasında tüm NO<sub>2</sub> miktarı, her iki etki kategorisine de aktarılacaktır. Şekil 23'te gösterildiği gibi örnek envanter verileri birkaç etki göstergesiyle eşleştirilebilir (Margni ve Curran, 2012).



**Şekil 23. Birden fazla etki kategorisiyle eşleştirilen envanter verileri örneği**

Kaynak: Margni ve Curran (2012) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

### 3.3.3.3. Nitelendirme (Karakterizasyon - Kategori gösterge sonuçlarının hesaplanması)

Sınıflandırma sonrasında, her maddenin atandığı etki kategorilerindeki potansiyel etkisini hesaplamak için modellendiği adımdır. Bu adımda sonuç, karakterizasyon faktörleri uygulanarak etki kategorisindeki tüm katkılar için ortak olan bir birimdeki etki puanı olarak ifade edilmektedir. Bir maddenin potansiyel etkisi, kategorideki baskın bir faktöre göre verilmektedir. Margni ve Curran (2012)'ın verdiği örneğe göre "iklim değişikliği" potansiyeli tipik olarak 1 kg CO<sub>2</sub> emisyonuna dayanır ve CO<sub>2</sub> eşdeğeri birimiyle rapor edilmektedir.

### 3.3.3.4. YDED'nin isteğe bağlı unsurları

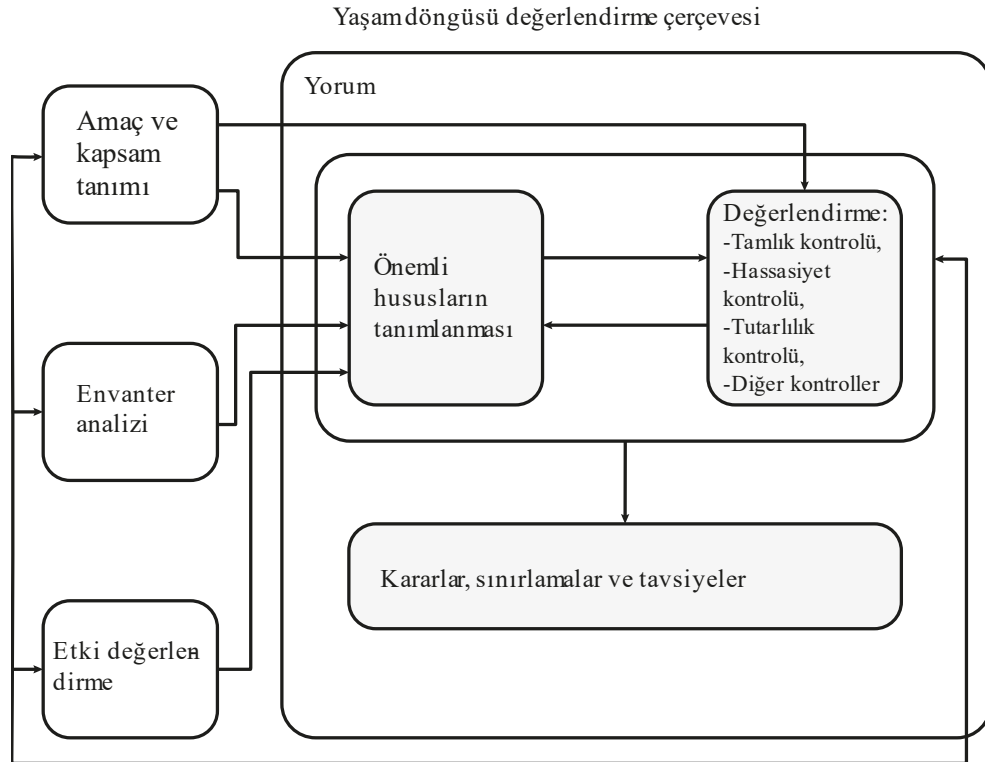
- Normalleştirme; referans değerlerine göre kategori göstergesi sonuçlarının büyüklüğünün hesaplanması (Margni ve Curran, 2012; UNEP, 2003)
- Gruplandırma; etki kategorilerinin sayısını mümkün olduğunca azaltmak ve önem sırasına göre sıralamak amacıyla gruplamak (Margni ve Curran, 2012)



- Önem belirleme; etki kategorileri arasında gösterge sonuçlarını önceliklendirmeyi ve mümkün olduğunca bir araya getirmeyi amaçlamak (UNEP, 2003).

### 3.3.4. Yaşam Döngüsü Yorumlaması (YDY)

Yaşam döngüsü yorumlaması, TS EN ISO 14040 (2007)'ya göre YDD'nin son aşaması olup YDE ve YDED'ye ait bulguların birlikte göz önünde bulundurulduğu aşamadır. Bu aşamada, amaç ve kapsamın tanımıyla uyumlu olarak yaşam döngüsü boyunca alınan kararlar, sınırlamalar ve sonuçlar açıklanarak çevresel performansın iyileştirilmesi adına tavsiyelerde bulunmaktadır. YDE ve YDED ürün sistemi hakkında bilgi oluştururken, YDD'nin amaç ve kapsam tanımı ve YDY aşamaları çalışmanın çerçevesini oluşturmaktadır. Yorumlama aşamasındaki unsurlar ile diğer YDD aşamaları arasındaki ilişki Şekil 24'te gösterilmiştir (TS EN ISO 14044:2007, 2007).



**Şekil 24. Yorumlama aşamasındaki unsurlar ile YDD'nin diğer aşamaları arasındaki ilişki**

Kaynak: TS EN ISO 14044:2007 (2007) kaynağından yararlanılarak tekrar çizilmiştir.

#### **4. MATERYAL VE METOT: YAPI TASARIM AŞAMASINDA “ONE CLICK LCA” ARACI İLE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ**

Ulusal Enerji Ajansı'nın (IEA) 2019'da yayınladığı rapordaki verilere göre inşaat sektörü, birincil enerji kullanımının %36'sını, CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. Böylece kaynakların tükenmesiyle ilgili artan endişelerle birlikte, çevresel etkilerin değerlendirilmesine ihtiyaç artmıştır. En etkin yöntem olarak “yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi” kullanılmaktadır (Curran, 1996).

Yapı ve yapı ürünlerinde yaşam döngüsü değerlendirmesi üzerine bir dizi çalışma yapılmıştır. Ülkemizde yapılan çalışmaların büyük ölçüde yapı ürünlerinin yaşam döngüsü değerlendirmeleri üzerine olduğu görülmüştür. (Gültekin ve Çelebi, 2016; Öztaş, 2014; Taygun, 2005). Atmaca (2016), Türkiye, Gaziantep'te bulunan iki binanın yaşam döngüsü enerjisini, yaşam döngüsü CO<sub>2</sub> emisyonlarını ve yaşam döngüsü maliyet analizini yapmıştır. Analizde; inşaat, kullanım ve yıkım aşamalarına odaklanılarak yapı malzemesi kalınlığının sonuçlar üzerindeki etkisinde durulmuştur. Literatür araştırması, tez çalışması ile ilgili olarak tek aileli konutlarda yaşam döngüsü değerlendirmeleri üzerine ülke dışında da farklı araştırmalar incelenmiş ve bunların sonucunda alandaki eksikler değerlendirilmiştir.

Kamali (2019) tarafından geleneksel ve iki modüler yapı sistemleriyle oluşturulmuş üç adet tek aileli konutun beşikten kapıya (A1-A3) yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. Değerlendirmede ulaşım ile ilgili verilerin, sonucu etkilediğine dair veriler bulunmuştur.

Peuportier (2001)'in çalışmasında ise farklı özellikte ve farklı yapı malzemeleriyle üretilen üç farklı tek aileli konutun yaşam döngüsü değerlendirme sonuçları karşılaştırılmış ve ahşap çerçeveli yapının çevresel etkilerinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Petrovic vd. (2019), İsveç'te ahşap bir tek aileli konuta beşikten mezara yaşam döngüsü değerlendirmesi uygulamıştır. Yalnızca küresel ısınma potansiyeli açısından yapılan değerlendirmede en yüksek etkiyi kullanım aşamasından sonra bakım-onarım ve yapı malzemelerinin üretimi oluşturmuştur. Ayrıca konutun strüktüründe kullanılan ahşap malzeme, yaygın olarak kullanılan beton ve tuğla gibi malzemelerle karşılaştırıldığında “karbon dostu” bir malzeme olarak görülmüştür.

Kim (2008)'in çalışmasında ise modüler ve geleneksel yapım sisteminin yaşam döngüsü değerlendirmesini uygulanmış ve birincil enerji tüketimi ile küresel ısınma potansiyeli arasındaki farklara bakılmıştır. Bakım-onarım aşaması hariç diğer aşamaların hesaba katıldığı çalışmada malzeme ve işçi taşımalarının önemli farklar ortaya çıkardığı görülmüştür. Çalışmada diğer etki kategorilerine yer verilmemiştir.

Gustavsson vd. (2010) çalışmalarında, yaşam ömrünü 50 ve 100 yıl seçerek iki farklı hesaplama ile 8 katlı ahşap bir yapının yaşam döngüsü boyunca enerji kullanımını ve CO<sub>2</sub> salınımlarını karşılaştırmıştır. Binanın kullanım aşamasındaki enerji tüketiminin en fazla paya sahip olduğunu ve ahşap malzeme kullanımının negatif CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleştirilmesine katkıda bulunacağını belirtmişlerdir.

König ve Cristofaro (2012), TS EN 15978 (2012) standardını takiben konut yapıları için yaptıkları yaşam döngüsü değerlendirmesinde, A1-A3 (üretim), B2-B4 ve B6, C ve D modülleri kapsamında her bina türü için farklı inşaat yöntemleri ve malzemelerinden kaynaklanan çevresel etkileri değerlendirmiştir. Örneğin ahşap malzeme için bir ahşap çerçeve yapı ve bir masif ahşap yapıyı değerlendirmişlerdir. Ancak bu değerlendirmede ürün aşamasına ait duvar, tavan, çatı elemanlarının prefabrikasyondaki işlemler ve A4-A5 (şantiyeye ulaşım-şantiye/kurulum) aşamaları dikkate alınmamıştır.

Takano vd. (2015) ise, ahşap dört katlı bir apartmanın tüm yaşam döngüsü için standartlara göre yaşam döngüsü değerlendirme yapmıştır. TS EN 15978 (2012) standardına göre inşaat aşaması (A4-A5) modülleri fabrika kapısının sonrasındaki süreçleri kapsarken fabrikadaki prefabrikasyon A3 modülünde hesaba katılmalıdır. Fakat Takano vd. (2015) bu durumun değerlendirme sonuçlarının yerinde inşaat sistemi lehine yanlış yorumlanmasına yol açabileceğini belirterek, A4-A5:P (prefabrikasyon) ve A4-A5:O (yerinde inşaat) şeklinde bir ayırım yapmıştır. A4-A5:P, yapı malzemelerinin ürünün fabrikasından prefabrikasyon fabrikasına taşınmasını ve fabrikada yürütülen prefabrikasyon sürecini içermektedir. A4-A5:O ise, yapı malzemelerinin ürün fabrikasından şantiyeye taşınmasını ve tüm yerinde inşaat sürecini içermektedir. Achenbach vd. (2018)'e göre bu ayırım, üretimin nerede bittiği ve prefabrikasyonun nerede başladığı düşüncesi ve artan prefabrikasyon seviyesiyle birlikte yerinde yürütülen süreçler ile imalata ait süreçler arasında tutarlı bir ayırım yapmak zor olacağından tanımlama sorununa yol açmaktadır. Bu nedenle, prefabrikasyon sistemlerinde bile,

fabrika kapısında üretim aşaması ve yapım aşaması arasındaki çizginin çizilmesini önermektedirler. Achenbach vd. (2018), yerinde inşaat yönteminin tercih edilmesini önlemek adına, yalnızca ürün (A1-A3) aşamasının dikkate alınmamasını ve her durumda inşaat aşamasının da (A4-A5) dikkate alınmasını tavsiye etmektedir.

Ayrıca ahşap, beton ve çelik gibi farklı malzemelerden yapılan yapıların çevresel etkilerinin karşılaştırılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Sonuçlar, ahşap esaslı malzemelerin diğerlerine kıyasla CO<sub>2</sub> emisyonları karşılaştırmasında büyük ölçüde daha düşük bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Guardigli vd., 2011; Monteiro ve Freire, 2012; Peupartier, 2001). Wegener vd. (2010) de çalışmalarında ahşap esaslı malzemelerden yapılmış ürün ve binaların enerji kullanımının, tüm yaşam döngüleri boyunca atık ürünlerinden ve sonunda geri dönüşüm potansiyellerinden geri kazanabileceklerinden daha az enerji kullanabileceklerini göstermektedir.

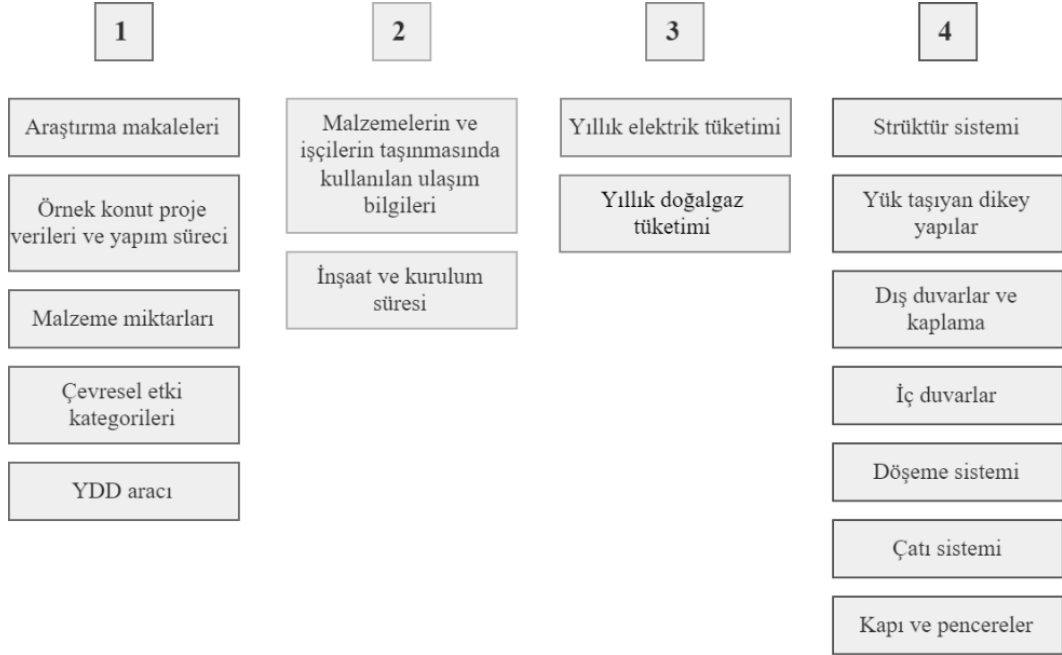
Prefabrike yapım yaklaşımı, günümüzde enerji tüketimi ve karbon salınımı üzerinde büyük paya sahip olan inşaat sektöründe daha sürdürülebilir ve çevreci bir yaklaşım olarak görülmektedir. Yapılan araştırmalara göre prefabrike yapım sistemleri, şantiyede enerji tasarrufu, daha düşük sera gazı emisyonu ve inşaat atıklarının azaltılmasına imkân sağlamaktadır. Böylece çevresel performansın iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Dodoo vd., 2014; Lara ve Chi Sun, 2014; Li vd., 2014; Chidiac ve Marjaba, 2016; Quale vd., 2012; Woo, 2017).

Yaşam döngüsü değerlendirme ile ilgili literatüre bakıldığında, Türkiye şartlarında bina bazında prefabrike ve geleneksel sistemle üretilen konutlarda yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi kullanılarak yapıların çevresel etkilerinin analiz edilip karşılaştırılmadığı görülmüştür. Yapıların neden olduğu büyük çevresel etkilerin nedenlerini anlamak için tüm yaşam döngüsü aşamalarının dikkate alınması gerektiği bulunmuş ve ayrıca diğer çalışmalarda ahşap esaslı malzemenin düşük çevresel etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur. Bu nedenlerle, literatüre katkı sağlamak amacıyla bu çalışmada, ahşap esaslı prefabrike ve ahşap esaslı geleneksel yapım sistemi olmak üzere iki farklı yapım sistemiyle oluşturulmuş tek aileli iki konutun yaşam döngüsü değerlendirmesi aracı kullanılarak binaların tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışma, yapıların tüm yaşam döngüsünü “beşikten mezara” yapı malzemelerinin üretimi ve taşınması, kullanımı ve yeniden

kullanımına veya bertarafına kadar olan aşamaları kapsamaktadır. Bu bağlamda TS EN 15978 (2012) standardı ile uyumlu tüm yaşam döngüsü aşamalarının hesaplamalarını destekleyen, “One Click LCA – Building LCA” değerlendirme aracı ile sonuçlar elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

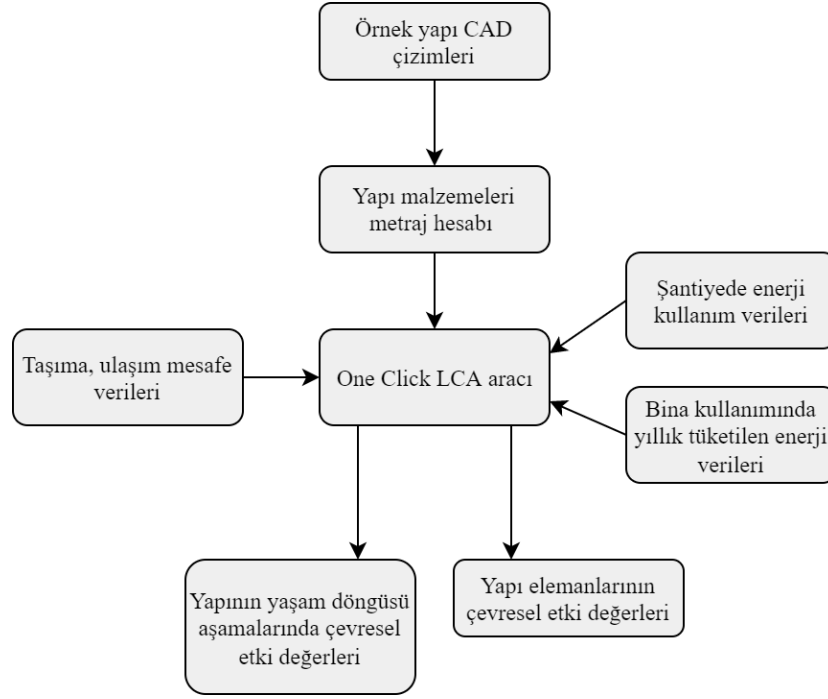
#### 4.1. Metot

Bina için yapılan bir yaşam döngüsü değerlendirmesini, yapı malzemelerinin seçimi ve miktarı, malzemelerin yaşam döngüsü aşamalarını içeren çevresel etki değerleri, yapı malzemelerinin ve bileşenlerinin taşınma mesafeleri, üretimde ve kullanımda tüketilen enerji miktarları etkilemektedir. Bu çalışmadaki araştırma materyalleri Şekil 25’te gruplandırıldığı gibi değerlendirme ile ilgili araştırma makalelerini, örnek konut projeleri ve yapım süreci bilgilerini, malzeme miktarlarını ve TS EN 15978 (2012) standardına dayalı çevresel etki kategorilerini içermektedir.



**Şekil 25. Araştırma materyalleri (1), yapım sürecine dayalı analiz yöntemi için bilgiler (2), analizde etkili dış faktörler (3), incelenen yapı bileşenleri (4)**

Kaynak: Yazar



**Şekil 26. Yaşam döngüsü değerlendirme aracı akış şeması**

Kaynak: Yazar

Binalarda yaşam döngüsü değerlendirme yönteminde kullanılan araç, TS EN 15978 standardına uygun olarak “Tüm Bina Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” yapılmasını sağlamaktadır. Değerlendirme için örnek yapıların firmalarından alınan ve tahmin edilen bilgiler doğrultusunda Şekil 26’daki akış şemasında belirtilen veriler ile birlikte analiz yapılmıştır.

Bu analiz sırasında öncelikle hesaplama periyodu yani binanın yaşam ömrü belirlenmektedir. Binaların yaşam ömrü yapı strüktürünün malzemesi ve çeşidine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Daha sonra karşılaştırma yapılabilmesi için yapının brüt iç taban alanı belirtilmektedir. Bu bilgi, farklı projeler arasında olası bir karşılaştırma yapılacağına 1 m<sup>2</sup> başına düşen sonuçları bulmak için kullanılmaktadır. Daha sonra yapıda kullanılan malzemelerin m<sup>3</sup> ve m<sup>2</sup> hesapları yapılarak metrajı çıkarılmaktadır. Bu yapı malzemelerinin çevresel etkilerinin hesaplanabilmesi için her bir malzemenin metraj hesabının kendi özgül ağırlığı ile çarpılması ve kg değerlerinin elde edilmesiyle sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan değerlendirme aracında, öncelikle yapı malzemesi seçimi yapılarak gerekli m<sup>3</sup> veya m<sup>2</sup> ölçüleri girilmesi gerekmektedir. Araçta EPD (ÇÜB)’lerden veya TS EN 15804 (2012) ile uyumlu YDD veri setlerinden ülkede

veya ÷lkeye yakın üreticilerden malzeme seçimi yapılabilmektedir. Farklı ÷lke olsa bile değerlendirme aracı, ürün bilgilerini mevcut konum şartlarıyla eşleştirme imkânı sunmaktadır. Her malzeme için iki ayrı taşıma mesafesi (km) girilebildiğinden; yerinde yapım (geleneksel) sistem için malzemelerin taşınma mesafesi tek olarak girilmekte, ön yapım (prefabrike) sistem için ise malzemelerin taşınması ve yapı elemanlarının (modüllerin) taşınması için iki ayrı mesafe girilmesi gerekmektedir. Mesafenin yanında taşımayı yapan araç (kamyon, tır vb.) verileri de girilerek IEA (2018) Türkiye uyumlu sonuçlar elde edilmesi sağlanmaktadır. Başlangıçta hizmet ömrü belirlenen bina yaşam döngüsü değerlendirmesinin B1-B5 aşamalarında, malzemelerin binanın yaşam ömrü boyunca bakım ve onarıma ihtiyaç duyup duymamasının belirlenebilmesi için ayrıca malzemeler için de hizmet ömrü değeri girilmesi gerekmektedir. Malzemelerle ilgili girilen bu veriler, sisteme kayıtlı EPD'lerinden alınan bilgilere dayanarak; A1-A3 (üretim), A4 (taşıma), B1-B5 (bakım ve onarım), C1-C4 (kullanım ömrünün sonu) ve D modüllerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Malzeme verilerinin girilmesinin ardından, şantiye operasyonları olarak verilerin girildiği bölümde, A4 (taşıma) modülünün hesaplanması üzerine işçi sayıları, inşaat süresi ve işçilerin gidiş-dönüş kaç km mesafe yaptığına dair veriler girilmektedir. Araştırmalar sonucunda, prefabrike (ön üretim) ve geleneksel (yerinde yapım) sistemlerde yaşam döngüsü değerlendirmesi yapıldığında, inşaat süresinin ve işçilerin sahaya gidiş-dönüş miktarlarının önemli olduğu tespit edilmiştir. İnşaat süresi farkını değerlendirmede kullanabilmek adına her iki yapım sisteminde de işçilerin eşit mesafede yol kat ettikleri varsayılmıştır. Bu yöntemde kullanılan değerlendirme aracında işçilerin taşınması için bir araç seçilerek; kişi sayısının kg ölçüleriyle, inşaat gün sayısının da işçilerin gidiş-dönüş mesafeleriyle çarpılarak elde edilen değerler ilgili kısma yazılmaktadır.

Bu verilerin ardından, A5 (inşaat/kurulum) aşaması için gerekli olan veriler girilmektedir. Şantiye operasyonları olarak değerlendirilen bu bölümde, inşaat sahasında kullanılan aletlerin ne olduğu ve kaç saat kullanıldığına dair veriler girilmektedir.

Binanın kullanım aşamasının değerlendirilebilmesi için ise, ÷lke konum bilgisi de belirtilerek ve tüketim miktarlarının bulunduğu kaynaklardan yararlanılarak, kWh cinsinden binanın yıllık elektrik tüketimi ve m<sup>3</sup> cinsinden de yakıt için yıllık tüketilen doğalgaz miktarı girilmektedir. Kullanılan değerlendirme aracında hesaplama için

emisyon profili olarak IEA (2018) seçilmiştir. Bu bilgiler B6 (işletme enerjisi) aşamasının hesaplanmasında etkili olmaktadır. Bu yöntemde B7 (su kullanımı) ilgili veriler hesaba katılmamıştır.

Bu çalışmanın sistem sınırı, TS EN 15978 (2012) ve TS EN 15804 (2012) standartlarına göre A1-A3 (üretim), A4 (taşıma), A5 (inşaat/kurulum), B1-B5 (bakım ve onarım), B6 (işletme enerjisi), C1-C4 (kullanım ömrünün sonu) ve D (dış etkiler) modüllerini kapsamaktadır. Bu aşamaların sonuçları ayrı sunulduğu gibi tüm yaşam döngüsü için de sonuç paylaşılmaktadır. Değerlendirme aracı tarafından D modülü toplam sonuçlara dahil edilmemekte ve sonuçları ayrıca paylaşılmaktadır. Değerlendirmeye alınacak çevresel etkiler ve birimleri ise Tablo 4'teki gibidir.

**Tablo 4. Çevresel etki kategorileri ve birimleri**

<b>Etki Kategorisi</b>	<b>Birim</b>
Küresel ısınma potansiyeli, GWP	kg CO <sub>2</sub> eş değeri
Toprağın ve suyun asitleştirme potansiyeli, AP	kg SO <sub>2</sub> eş değeri
Ötrofikasyon potansiyeli, EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eş değeri
Ozon tabakasının delme potansiyeli, ODP	kg CFC11 eş değeri
Alt atmosferde ozon oluşumu potansiyeli, POCP	kg Etilen eş değeri
Birincil enerjinin toplam kullanımı (hammadde hariç)	MJ
Biyojenik karbon depolama	kg CO <sub>2</sub> eş değeri bio

Kaynak: TS EN 15978 (2012)

Ahşap esaslı taşıyıcı sistem bazında karşılaştırma yapmak üzere, farklı firmalardan alınan bilgiler doğrultusunda prefabrike ve geleneksel sistemde tek aileli konut yapıları örnek alınmıştır. Karşılaştırma yapabilmek adına konutlar ile ilgili yapı malzemesi miktarları ve yapım sürecine dayalı ayrıntılı bilgiler 4.3. ve 4.4. bölümünde verilmektedir.



#### 4.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Aracı: One Click LCA – Building LCA

EN TS 15978 standardıyla uyumlu “One Click LCA” yazılımı, Bionova Ltd. tarafından geliştirilmiştir. Bu yazılım, farklı bina sertifikaları ve hesaplama şemaları sunmakla birlikte, bu çalışmada “*complete building LCA* - tüm bina YDD” aracı kullanılmıştır. Bu aracı kullanarak, standartlaştırılmış bir veri tabanı ile binanın yaşam döngüsü boyunca bütün bir yaşam döngüsü değerlendirmesini hesaplamak mümkündür. Çalışma prensibi ise, binada kullanılan yapı malzemelerinin kg değerleriyle veri tabanındaki katsayılarla çarpılması sonucu çevresel etki sonuçlarının elde edilmesidir. Bu araç belirlenmeden önce farklı değerlendirme araçları da incelenmiş fakat Türkiye konumu için, EPD’lere dayalı verilerin tüm yaşam döngülerinin değerlendirilmesinde zorluklarla karşılaşmıştır. One Click LCA aracı ise malzemelere ait bilgileri mevcut ülke konum şartlarıyla eşleştirme imkânı sunmaktadır. Aynı şekilde yakıt verileri için de Enerji Koruma Ajansı’nın Türkiye verilerine göre hesaplama yapmaktadır. Ayrıca, yazılım içinde yapı malzemelerini seçmek, değiştirmek ve karbon emisyonlarının nasıl azaltılacağını simüle etmek mümkündür (One Click LCA, 2021a; Petrovic vd., 2019).

One Click LCA, veri tabanı “Çevresel Ürün Beyannameleri”ni (EPD) (ÇÜB) kullanmaktadır. Veri tabanına girilen EPD’ler, TS EN 15804 (2012) ve ISO 14025 (2008) standartlarına uygun olup yapı ürünleri hakkında ayrıntılı teknik açıklama içermektedir. Dahil edilen tüm AB veri tabanları TS EN 15804 standardına, Kuzey Amerika veri tabanları ise ISO 14040 (2007) ve ISO 14044 (2007) standartlarına uygundur. Şu an için veri tabanının 10.000’den fazla farklı yapı malzemesini kapsadığı belirtilmektedir. Yerel yapı malzemeleri için kapsamlı YDD veri tabanı bulunmuyor ise de bu yazılımda, belirli bir alanda yerel üretim koşullarıyla eşleşen sonuçlar elde etmek için verileri yerelleştirmeye imkân tanıyan yerel bir telafi metodu kullanılmaktadır (One Click LCA, 2021a; One Click LCA, 2021b).

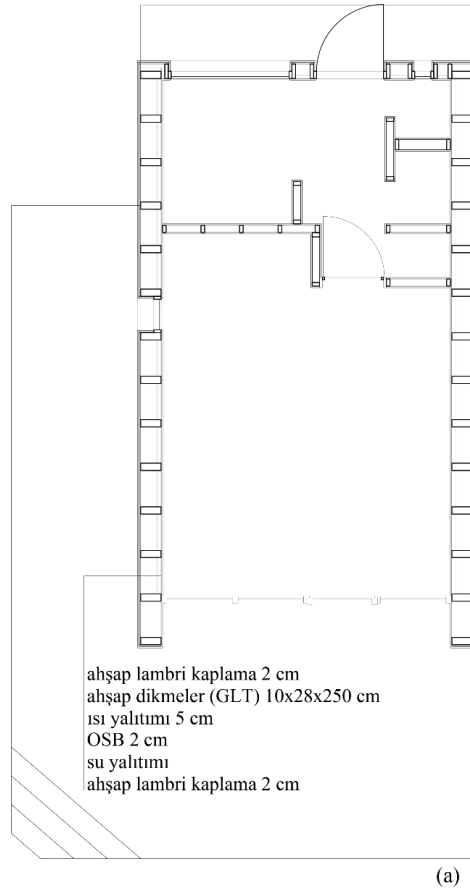
One Click LCA aracında, malzemelerin çevresel etkilerinin çoğu, farklı EPD veri tabanlarından toplanan üretici veya ürün kategorisi EPD’lerine ve yapı malzemesi üreticilerinden alınan bilgilere dayanmaktadır. Bu araçta, CML yöntemine ve TRACI etki kategorisine dayalı olarak TS EN 15804’te listelenen çevresel etki değerlendirme kategorileri Avrupa pazarı için, 2001 yılında Leiden Üniversitesi tarafından oluşturulan, TS EN 15978 ve TS EN 15804 standartlarının gerektirdiği CML tabanlı yöntem

kullanılmaktadır. Kuzey Amerika pazarı için ise, ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından geliştirilen “Kimyasal ve Diğer Çevresel Etkileri Azaltma ve Değerlendirme Aracı” TRACI kullanılmaktadır (Bare, 2011; CML, 2021; One Click LCA, 2021a). Bu çalışmada; önceki başlıkta bahsedilen 7 etki kategorisi hesaplanmıştır.

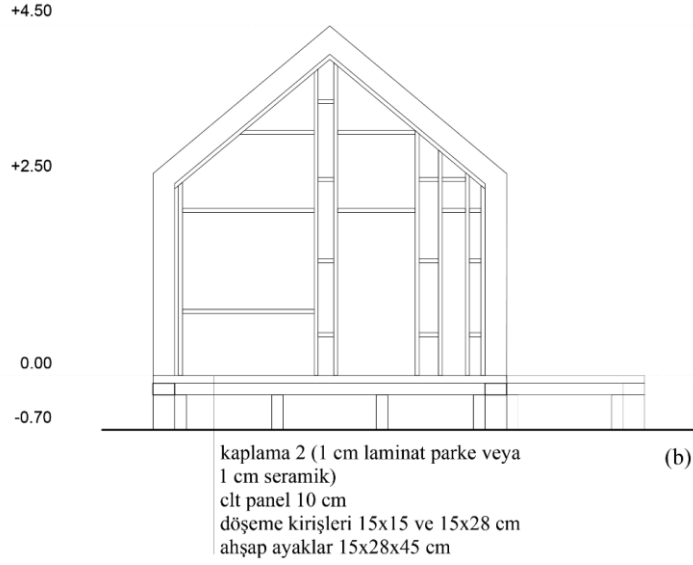
### 4.3. Örnek Yapı 1: Tek Aileli Ahşap Prefabrike Konut

Çalışma için kullanılacak ilk örnek, ahşap prefabrike konut olup üretici firmadan alınan bilgiler değerlendirme verilerine dahil edilmiştir. Fonksiyonel birimin belirlenmesinde Petrovic vd. (2019)’nin ahşap konutta yaptığı yaşam döngüsü değerlendirme çalışmasından yararlanılarak bina yaşam ömrü 100 yıl kabul edilmiştir. Çalışmanın sistem sınırı, standartlara göre (A1-C4) modüllerini kapsamaktadır.

Veri analizi için öncelikle firmadan projenin CAD çizimleri edinilmiştir. 30 m<sup>2</sup>’lik iç taban alanına sahip ahşap prefabrike konutun plan ve kesitleri Şekil 27’deki gibidir. Konut 4,50 metre yüksekliğinde olup ve tek katlıdır.



Şekil 27. Kat planı (a), arka cephe strüktürü (b)



**Şekil 27. Kat planı (a), arka cephe strüktürü (b) (devam)**

Kaynak: Yazar

Henüz projenin üretimi tamamlanmadığından taşıyıcı sistemle ilgili detay bilgileri yazılı olarak proje sahiplerinden alınmıştır. Bu bilgilere göre, dikme ve çatı kirişlerinde 10x28 cm ebadında GLT kullanılmaktadır. Duvar ve çatı kaplama kesiti dıştan içe sırasıyla, 2 cm ahşap lambri kaplama, su yalıtımı, 2 cm OSB, ısı yalıtımı için 10x28 cm dikmeler arasında koyun yünü ve 2 cm ahşap lambri kaplama ile bitirilmiştir. Bu ölçülerdeki duvar ve çatı elemanları fabrikada üretilip sahada gizli birleşim detaylarıyla birleştirilmektedir. Projeye göre döşeme için +0.70 kotunda 3 katlı 10 cm kalınlığında CLT panel kullanılmıştır. CLT panelin taşınması ise 15x28 cm GLT ayaklar ve kirişlerle sağlanmıştır. İç mekânda CLT panelin üstü laminant parke ile kaplanmış, ıslak hacimlerde seramik kullanılmıştır. İç duvarlarda ise 5x10 cm GLT dikmelerin kaplaması ahşap lambri ile yapılmış ve zeminde olduğu gibi ıslak hacim duvarları seramikle kaplanmıştır. Terasın zemin döşemesi CLT panel ile bitirilmiştir.

Doğramalar ise ahşap çerçevesi seçilmiş olup pencereler üç camlı passivhaus sertifikalı olarak planlanmıştır. Yapının arka ve sol cephelerinde 170x125, 30x210 ve 50x90 cm ölçülerinde üç camlı ahşap çerçevesi üç adet pencere bulunmaktadır. Ön cephesi ise 13 m<sup>2</sup> olarak ölçülmüş üç camlı ahşap çerçevesi bir doğrama ile tamamlanmıştır. Ayrıca 100x210 ve 90x200 cm ölçülerinde ahşap çerçevesi iki kapı yer almaktadır. Ölçüleri verilen yapı malzemelerinin m<sup>3</sup> ve m<sup>2</sup> bazında metrajları, kullanılan değerlendirme

aracındaki sınıflandırmaya göre Tablo 5'teki gibi çıkarılmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirme aracında bulunan farklı üreticilerin EPD'lerine dayalı uygun malzemeler seçilmiş, malzemelerin m<sup>3</sup> ve m<sup>2</sup> değerleri yazılmıştır. Üretim aşaması (A1-A3) modülleri hammadde çıkarma (A1), üreticiye hammadde nakliyesi (A2) ve malzeme üretiminin (A3) etkilerini kapsar. Malzemelerin üretiminin çevresel etkileri ilk olarak bu aşamada ele alınmaktadır. Seçilen malzemelerin hizmet ömrü değerleri, hizmet ömürlerinin sonuna ulaşan yapı ürünlerinin değiştirilmesinden kaynaklanan çevresel etkilerin bulunması için sistemde kayıtlı halleriyle bırakılmaktadır. Yazılımda malzemenin kullanımı, bakımı, onarımı, değiştirilmesi ve yenilenmesi aşaması (B1-B5) modülleri bir arada ele alınmakta ve sağlanan etkiler yapı malzemelerinin kullanım ömrüne ve binanın kullanım ömrüne göre hesaplanmaktadır. Bu aşama, yeniden üretim aşamasının yanı sıra değiştirilen malzemenin imalatından atıkların bertaraf edilmesine kadar oluşan ve atıkların işlenmesinden kaynaklanan etkileri kapsamaktadır.

**Tablo 5. Ahşap prefabrike konutun yapı elemanlarına göre yapı malzemeleri ve metraji**

<b>Bölümler</b>	<b>Malzemeler</b>	<b>Hacim / Alan</b>
<b>Dış duvarlar ve cephe</b>	OSB (2 cm)	1,11 m <sup>3</sup>
	Ahşap lambri kaplama (2 cm)	2,02 m <sup>3</sup>
	Alçıpan (2 cm)	0,14 m <sup>3</sup>
	Seramik (1 cm)	7 m <sup>2</sup>
	Isı yalıtımı (5 cm)	34,4 m <sup>2</sup>
	Su yalıtımı	52,7 m <sup>2</sup>
<b>Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar</b>	GLT (10x28 cm)	2,03 m <sup>3</sup>
	GLT (5x20 cm)	0,28 m <sup>3</sup>
<b>İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar</b>	GLT (5x10 cm)	0,44 m <sup>3</sup>
	Ahşap lambri kaplama (2 cm)	0,63 m <sup>3</sup>
	Alçıpan (2 cm)	0,28 m <sup>3</sup>
	Seramik (1 cm)	14 m <sup>2</sup>
<b>Yatay yapılar: kiriş, zemin, çatı</b>	GLT (15x28 cm)	0,88 m <sup>3</sup>
	GLT (15x28 cm)	2,22 m <sup>3</sup>
	GLT (15x15 cm)	0,56 m <sup>3</sup>
	CLT panel (10 cm)	6,8 m <sup>3</sup>
	Laminant parke (1 cm)	25 m <sup>2</sup>
	Su yalıtımı	1,84 m <sup>2</sup>
	Seramik (1 cm)	1,82 m <sup>2</sup>

**Tablo 5. Ahşap prefabrike konutun yapı elemanlarına göre yapı malzemeleri ve metraji (devam)**

<b>(Çatı)</b>	GLT (10x28 cm)	2,08 m <sup>3</sup>
	OSB (2 cm)	1,8 m <sup>3</sup>
	Isı yalıtımı (5 cm)	31,2 m <sup>2</sup>
	Su yalıtımı	47,65 m <sup>2</sup>
	Çatı kaplama (shingle)	47,65 m <sup>2</sup>
<b>Pencere ve kapılar</b>	Dış kapı	2,1 m <sup>2</sup>
	İç kapı	1,8 m <sup>2</sup>
	Pencere (ön cephe-üç camlı)	13,05 m <sup>2</sup>
	Pencere (arka ve yan cephe-çift camlı)	3,2 m <sup>2</sup>

Kaynak: Yazar

Malzemelerin seçimi ve miktarlarının hesaplama aracına girilmesinden sonra üretilen her bir malzemenin taşıma mesafeleri yazılmaktadır. Proje sahibi firmadan edinilen bilgilere göre, ahşap malzemeler Kastamonu'dan, yalıtım malzemeleri Manisa'dan alınmakta ve yapı elemanlarının üretimi ise Bursa'da yapılmaktadır. Konutun Konya ilinde inşa edileceği varsayılmış olup hammaddelerden ahşap malzemenin fabrikaya ulaşımı için Kastamonu – Bursa arası 540 km, fabrikadan sahaya ulaşım için Bursa – Konya arası 490 km, yalıtım malzemelerinin ulaşımı için ise Manisa – Konya arası 540 km olarak hesaplamaya alınmıştır. Yapı malzemelerinin fabrikadan şantiye sahasına taşınmasının etkileri, şantiyeye ulaşım/taşıma (A4) modülünde ele alınmaktadır. Prefabrike yapım sisteminde, prefabrik yapı elemanlarının taşınması da çevresel etkiye neden olacağından, fabrikada ön üretimle üretilen yapı elemanlarının taşıma mesafesi de ayrıca hesaplamaya dahil edilmiştir. Bu çalışmada yapı elemanlarının taşınması için girilen taşıma mesafesi verileri şantiyeye ulaşım aşamasının (A4:2) modülünde ele alınmıştır. Binanın yaşam döngüsü içerisinde, malzemelerin yaşam döngüleri tamamlandığında ve değişime ihtiyacı olduğunda değiştirme ve yenileme (B4-B5) aşamaları için bu taşıma mesafeleri dikkate alınmaktadır. Ayrıca değerlendirme aracında “şantiyeye ek ulaşım verileri” kısmına girilen veriler de bu aşamada değerlendirilmektedir. Şantiyede çalışan işçilerin sahaya geliş-gidişleri sırasında oluşan etkileri hesaba bu bölümde dahil edilmiştir. Firmadan alınan 3 gün kurulum süresi ve 4 çalışan işçi sayısı bilgileriyle veri girişi yapılmıştır. Uygun olarak sadece kg verisi girilebildiğinden, her bir işçi 75 kg kabul edilmiş ve şantiyeye gidiş 30 km, dönüş 30 km alınarak hesaplanmıştır. Malzemelerin taşınması için

20-26 ton kapasitesinde yarı römork kamyon, işçilerin taşınmasında ise her biri için seçilebilen en küçük taşıt olarak minibüs değerlendirmeye alınmıştır. Malzeme ile ilgili veriler girildikten sonra inşaat/kurulum aşaması (A5) modülünde değerlendirilmek üzere şantiyede enerji kullanımının ölçülmesi için inşaat sahasında kullanılan makine verileri girilmiştir. Firmadan alınan bilgiye göre sahada bir vinç kullanılarak prefabrik yapı elemanlarının montajı sağlanmaktadır. Toplam 6 saatlik bir vinç çalışma süresi değerlendirmeye alınmıştır.

Binanın kullanım aşamasındaki (B6) modülünde, operasyonel enerji kullanımının etkilerini hesaplamak için elektrik ve doğalgaz tüketimi verileri değerlendirilmektedir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. [TEİAŞ] (2021) aylık üretim-tüketim raporlarından alınan verilere göre tek aileli bir evde; aydınlatma ve buzdolabı, bulaşık makinesi, fırın, çamaşır makinesi, elektrikli süpürge, ütü, bilgisayar ve televizyon gibi ev aletlerinin kullanımından kaynaklanan elektrik tüketimi hesaplandığında aylık 253 kWh bulunduğu görülmüştür. Yazılımda Türkiye şartları belirtilerek yıllık 3036 kWh elektrik kullanımı girilmiştir. Doğalgaz tüketimi için ise, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu [EPDK] (2018)'ndan alınan verilere dayanarak Selçuk ve Pasinlioğlu (2020), m<sup>2</sup> başına yıllık 7,7 m<sup>3</sup> doğalgaz tüketimi olduğunu hesaplamıştır. Bu çalışma için 30 m<sup>2</sup>'lik bir konutun 231 m<sup>3</sup> doğalgaz tükettiği sonucuna varılmış ve bulunan değer yıllık doğalgaz tüketimi olarak girilmiştir. Veri eksikliğinden kaynaklı olarak kullanım aşamasında operasyonel su kullanımı (B7) modülü hesaba katılmamıştır. Yaşam döngüsü değerlendirme aracında, EPD'lere dayalı seçilen yapı malzemelerinin çevresel etki değerleri, binanın kullanım sonu aşamasında yıkım (C1), atık işlemeye taşıma (C2), yeniden kullanım-geri kazanım-geri dönüşüm için atıkların işlenmesi (C3) ve geri dönüştürülemeyen atıkların bertarafı (C4) modüllerinde (C2-C4) olarak bir arada değerlendirilmiştir.

Yazılıma girilen verilere ve hesaplamalara göre, tek aileli ahşap prefabrike konutun YDD sonuçları Tablo 6'da sunulmaktadır. Prefabrike konuttan kaynaklanan toplam karbondioksit eşdeğeri emisyonlarına, tüm yaşam döngüsü aşamalarının toplam etkisi 100 yıllık bir yaşam ömrü için yaklaşık 301 ton CO<sub>2</sub> eq'dir. Belirtilen sistem sınırları doğrultusunda, CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyonları bina yaşam ömrüne ve brüt iç taban alanına bölünerek 100,3 kg CO<sub>2</sub> eq / m<sup>2</sup> / yıl olarak bulunmuştur.

**Tablo 6. Ahşap prefabrike konutun yaşam döngüsü çevresel etki sonuçları**

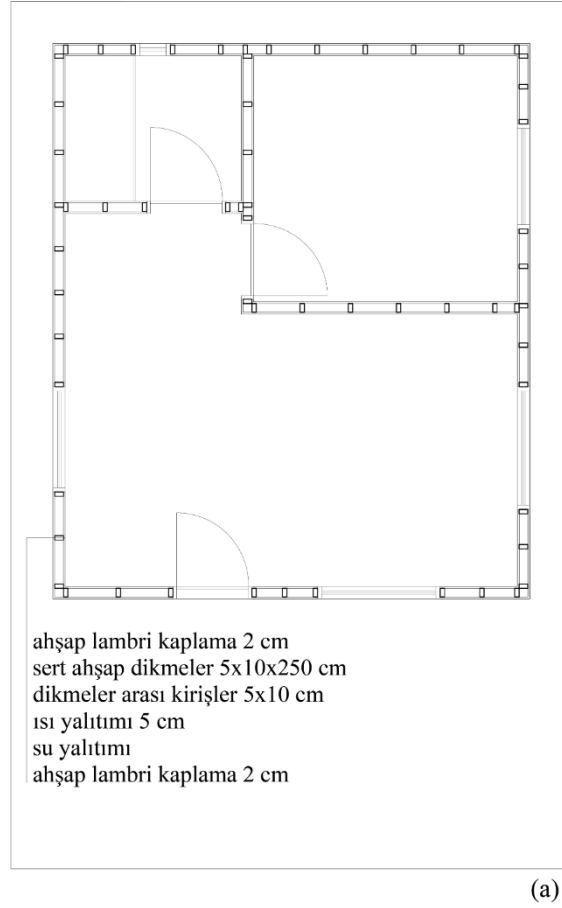
Yaşam döngüsü aşamaları	Yaşam döngüsü modülleri		Küresel ısınma kg CO <sub>2</sub> eq	Asitleştirme kg SO <sub>2</sub> eq	Ötrofikasyon kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq	Ozon delme potansiyeli kg CFC-11 eq	Alt atmosferde ozon oluşumu Kg Etilen	Birincil enerjinin toplam kullanımı MJ	Biyojenik karbon depolama kg CO <sub>2</sub> eq bio
Üretim aşaması	A1-A3	Yapı malzemeleri üretimi	5,53E+03	4,19E+01	1,50E+01	3,20E-04	4,74E+00	3,39E+05	1,62E+04
	İnşaat aşaması	A4 (toplam)	Şantiyeye ulaşım / taşıma	1,02E+03	2,59E+00	6,20E-01	1,30E-05	-6,00E-01	1,26E+04
	A4	Şantiyeye ulaşım / taşıma	7,31E+02	1,91E+00	4,60E-01	1,30E-05	-3,80E-01	8,55E+03	
	A4:2	Şantiyeye ulaşım / taşıma (2. Kısım)	2,86E+02	6,70E-01	1,60E-01	1,30E-13	-2,20E-01	4,07E+03	
	A5	İnşaat / kurulum süreci	1,97E+03	6,81E+00	4,04E+00	2,90E-04	2,50E-01	3,63E+04	
Kullanım aşaması	B1-B5	Bakım ve malzeme değişimi	6,24E+03	3,43E+01	7,78E+00	3,10E-04	3,94E+00	1,31E+05	
	B6	Enerji kullanımı	2,84E+05	1,66E+03	3,64E+02	1,30E-02	6,27E+01	4,17E+06	
Kullanım ömrünün sonu aşaması	C1-C4	Kullanım ömrünün sonu	2,28E+03	2,22E+00	9,10E-01	4,50E-06	1,40E-01	4,74E+03	
Dış etkiler	D	Dış etkiler (toplam hesaplamaya dahil değildir)	-5,70E+03	-6,19E+00	-9,90E-01	-1,90E-06	-6,40E-01	-1,00E+05	
		<b>Toplam</b>	<b>3,01E+05</b>	<b>1,75E+03</b>	<b>3,93E+02</b>	<b>1,39E-02</b>	<b>7,12E+01</b>	<b>4,69E+06</b>	<b>1,62E+04</b>
		1 m <sup>2</sup> yaşam alanına göre sonuçlar	1,00E+04	5,84E+01	1,31E+01	4,63E-04	2,37E+00	1,56E+05	5,04E+02

Kaynak: Yazar

#### 4.4. Örnek Yapı 2: Tek Aileli Ahşap Geleneksel Konut

Çalışma için kullanılacak diğer örnek, yerinde inşaat yöntemiyle yapılan ahşap geleneksel konut olup üretici firmadan alınan bilgiler değerlendirme verilerine dahil edilmiştir. Bu örnekte de fonksiyonel birimin belirlenmesinde Petrovic vd. (2019)'nin ahşap konutta yaptığı yaşam döngüsü değerlendirme çalışmasından yararlanılarak bina yaşam ömrü 100 yıl kabul edilmiştir. Çalışmanın sistem sınırı, standartlara göre (A1-C4) modüllerini kapsamaktadır.

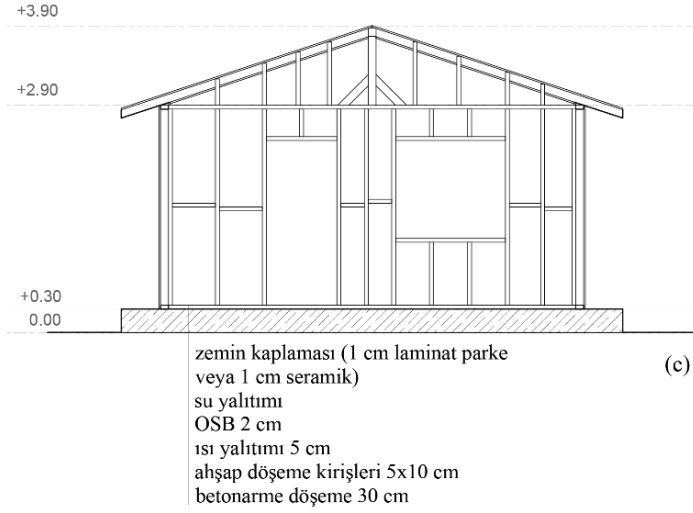
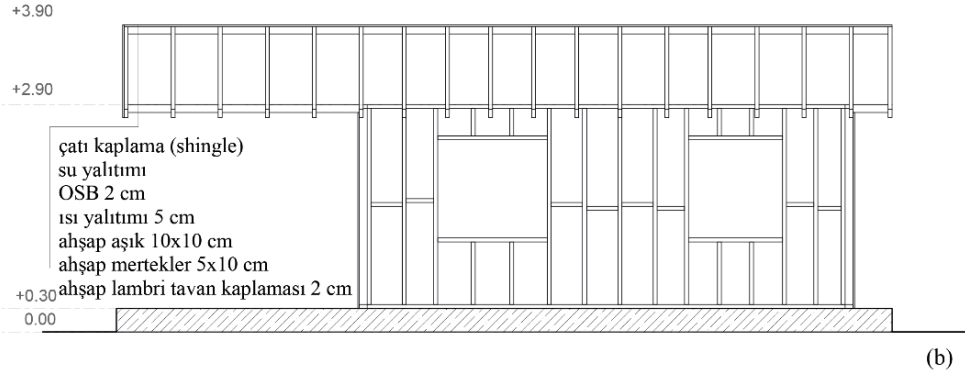
Veri analizi için öncelikle firmadan projenin CAD çizimleri edinilmiştir. 30 m<sup>2</sup>'lik iç taban alanına sahip ahşap geleneksel konutun plan ve kesitleri Şekil 28'deki gibidir. Konut 3,90 metre yüksekliğinde ve tek katlıdır.



Şekil 28. Kat planı (a), ön cephe strüktürü (b), sağ cephe strüktürü (c)

Kaynak: Yazar





**Şekil 28. Kat planı (a), ön cephe strüktürü (b), sağ cephe strüktürü (c) (devam)**

Kaynak: Yazar

Örnek projeye benzer konutlar yerinde görülmüş ve taşıyıcı sistemle ilgili detay bilgileri görüşme sonucunda proje sahiplerinden alınmıştır. Bu bilgilere göre, döşemede konut verandasının da dahil olduğu, 30 cm yüksekliğinde 93 m<sup>2</sup>'lik betonarme döşeme kullanılmıştır. İç mekânda +0.30 kotundaki betonarme döşemenin üstü sırasıyla, 50 cm aralıklarla araları taş yünüyle kaplı 5x10 sert ahşap ara kirişler, 2 cm OSB, su yalıtımı ve ahşap laminat parke ile kaplanmıştır. Ayrıca ıslak hacimlerde de OSB'den sonra seramik kullanılmıştır. Ahşap iskeletli yapının dış duvarlarında ise 50 cm aralıklarla 5x10 cm ebadında sert ahşap dikmeler ve aralarında 5x10 cm sert ahşap kirişler kullanılmaktadır. Duvar kaplama kesiti dıştan içe sırasıyla, 2 cm ahşap lambri kaplama, su yalıtımı, ısı yalıtımı için 5x10 cm dikme ve kirişler arasında kalacak şekilde taş yünü ve 2 cm ahşap lambri ile bitirilmiştir. Islak hacime gelen dış duvarların içi 2 cm alçıpan ile kapatılmış ve seramik ile kaplanmıştır. İç duvarlarda ise 5x10 cm sert ahşap dikme ve kirişlerin

kaplaması ahşap lambri ile yapılmış ve ıslak hacim iç duvarları da seramikle kaplanmıştır. Verandanın zemin döşemesi seramik ile bitirilmiştir. Yapının üstü ise 10x10 cm aşık ve 5x10 cm ahşap mertekler ile geçilmiştir. Çatı kesiti ise dıştan içe, shingle çatı kaplama, su yalıtımı, 2 cm OSB, mertekler arası taş yünü ve tavan kaplaması olarak ahşap lambri kaplama ile bitirilmiştir.

Doğramalar ise ahşap çerçevesi olup pencereler çift camlı olarak seçilmiştir. Yapının ön, sağ ve sol cephelerinde toplam iki adet 140x125 cm, iki adet 120x125 cm; arka cephesinde ise 40x40 cm ölçülerinde olmak üzere beş adet pencere bulunmaktadır. Ayrıca iki adet 90x200 cm ölçülerinde ahşap çerçevesi iç kapı ve 90x210 cm ölçülerinde ahşap çerçevesi dış kapı yer almaktadır. Ölçüleri verilen yapı malzemelerinin m<sup>3</sup> ve m<sup>2</sup> bazında metrajları, kullanılan değerlendirme aracındaki sınıflandırmaya göre Tablo 7'deki gibi çıkarılmıştır. Proje sahiplerinden alınan bilgiler ele alınarak yaşam döngüsü değerlendirme aracında bulunan farklı üreticilerin EPD'lerine dayalı uygun malzemeler seçilmiş, malzemelerin m<sup>3</sup> ve m<sup>2</sup> değerleri yazılmıştır. Üretim aşaması (A1-A3) modülleri hammadde çıkarma (A1), üreticiye hammadde nakliyesi (A2) ve malzeme üretiminin (A3) etkilerini kapsar. Malzemelerin üretiminin çevresel etkileri ilk olarak bu aşamada ele alınmaktadır. Seçilen malzemelerin hizmet ömrü değerleri, hizmet ömürlerinin sonuna ulaşan yapı ürünlerinin değiştirilmesinden kaynaklanan çevresel etkilerin bulunması için sistemde kayıtlı halleriyle bırakılmaktadır. Yazılımda malzemenin kullanımı, bakımı, onarımı, değiştirilmesi ve yenilenmesi aşaması (B1-B5) modülleri bir arada ele alınmakta ve sağlanan etkiler yapı malzemelerinin kullanım ömrüne ve binanın kullanım ömrüne göre hesaplanmaktadır. Bu aşama, yeniden üretim aşamasının yanı sıra değiştirilen malzemenin imalatından atıkların bertaraf edilmesine kadar oluşan ve atıkların işlenmesinden kaynaklanan etkileri kapsamaktadır.

**Tablo 7. Ahşap geleneksel konutun yapı elemanlarına göre yapı malzemeleri ve metraji**

<b>Bölümler</b>	<b>Malzemeler</b>	<b>Hacim / Alan</b>
<b>Dış duvarlar ve cephe</b>	Ahşap lambri kaplama (2 cm)	2,1 m <sup>3</sup>
	Alçıpan (2 cm)	0,17 m <sup>3</sup>
	Seramik (1 cm)	8,6 m <sup>2</sup>
	Isı yalıtımı (5 cm)	44 m <sup>2</sup>
	Su yalıtımı	58,4 m <sup>2</sup>

**Tablo 7. Ahşap geleneksel konutun yapı elemanlarına göre yapı malzemeleri ve metraji (devam)**

<b>Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar</b>	Sert ahşap dikme (5x10 cm)	1,08 m <sup>3</sup>	
<b>İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar</b>	Sert ahşap dikme (5x10 cm)	0,38 m <sup>3</sup>	
	Ahşap lambri kaplama (2 cm)	0,68 m <sup>3</sup>	
	Alçıpan (2 cm)	0,16 m <sup>3</sup>	
	Seramik (1 cm)	8 m <sup>2</sup>	
<b>Yatay yapılar: kiriş, zemin, çatı</b>	Beton	19 m <sup>3</sup>	
	Donatı (demir)	1900 kg	
	Sert ahşap kiriş (5x10 cm)	0,68 m <sup>3</sup>	
	Isı yalıtımı (5 cm)	20 m <sup>2</sup>	
	Su yalıtımı	3,4 m <sup>2</sup>	
	OSB (2 cm)	0,58 m <sup>3</sup>	
	Laminant parke (1 cm)	27 m <sup>2</sup>	
	Seramik (1 cm) (ıslak hacim ve teras)	31 m <sup>2</sup>	
	<b>(Çatı)</b>	Sert ahşap (5x10 cm-10x10 cm)	0,76 m <sup>3</sup>
		OSB (2 cm)	1,32 m <sup>3</sup>
Isı yalıtımı (5 cm)		28,8 m <sup>2</sup>	
Su yalıtımı		65,8 m <sup>2</sup>	
Çatı kaplama (shingle)		65,8 m <sup>2</sup>	
<b>Pencere ve kapılar</b>	Ahşap lambri kaplama (2 cm)	0,5 m <sup>3</sup>	
	Kapı 1	3,6 m <sup>2</sup>	
	Kapı 2	1,9 m <sup>2</sup>	
	Pencereler (çift camlı)	6,66 m <sup>2</sup>	

Kaynak: Yazar

Malzemelerin seçimi ve miktarlarının hesaplama aracına girilmesinden sonra üretilen her bir malzemenin taşıma mesafeleri yazılmaktadır. Proje sahibi firmanın, yapı malzemelerinin çeşitli ve değişen yerlerden alındığını belirtmesine istinaden, ahşap ve yalıtım malzemeleri için prefabrike konutta edinilen üretim yeri bilgileri varsayılarak kabul edilmiştir. Bu bilgilere göre, ahşap malzemeler Kastamonu'dan, yalıtım malzemeleri Manisa'dan temin edilmektedir. Betonarme için ise betonun Konya'da bir fabrikadan, demirin ise İskenderun'dan alındığı varsayılmıştır. Yerinde inşaat sistemiyle yapılan geleneksel konutta, yapı malzemeleri direkt olarak fabrikadan gelip inşaat sahasında işlem görmektedir. Bu yapım sisteminde, yapı elemanları inşaat sahasında

hazırlanıldığından her malzeme için birer taşıma mesafesi girilmiştir. Konutun Konya ilinde inşa edileceği varsayılmış olup hammaddelerden ahşap malzemenin inşaat sahasına ulaşımı için Kastamonu – Konya arası 465 km, betonun ulaşımı için Konya içinde 10 km, inşaat demirinin ulaşımı için İskenderun – Konya arası 470 km ve yalıtım malzemelerinin ulaşımı için ise Manisa – Konya arası 540 km olarak hesaplamaya alınmıştır. Yapı malzemelerinin fabrikadan şantiye sahasına taşınmasının etkileri, şantiyeye ulaşım/taşıma (A4) modülünde ele alınmaktadır. Binanın yaşam döngüsü içerisinde, malzemelerin yaşam döngüleri tamamlandığında ve değişime ihtiyacı olduğunda değiştirme ve yenileme (B4-B5) aşamaları için bu taşıma mesafeleri dikkate alınmaktadır. Ayrıca değerlendirme aracında “şantiyeye ek ulaşım verileri” kısmına girilen veriler de bu aşamada değerlendirilmektedir. Şantiyede çalışan işçilerin sahaya geliş-gidişleri sırasında oluşan etkileri hesaba bu bölümde dahil edilmiştir. Firmadan alınan 15 gün inşaat süresi ve 4 çalışan işçi sayısı bilgileriyle veri girişi yapılmıştır. Uygun olarak sadece kg verisi girilebildiğinden, her bir işçi 75 kg kabul edilmiş ve şantiyeye gidiş 30 km, dönüş 30 km alınarak hesaplanmıştır. Malzemelerin taşınması için 20-26 ton kapasitesinde yarı römork kamyon ve beton mikseri, işçilerin taşınmasında ise her biri için seçilebilen en küçük taşıt olarak minibüs değerlendirmeye alınmıştır. Malzeme ile ilgili veriler girildikten sonra inşaat aşaması (A5) modülünde değerlendirilmek üzere şantiyede enerji kullanımının ölçülmesi için inşaat sahasında kullanılan makine verileri girilmiştir. Üreticiden gelen ahşap malzemeler standart boyutlarda gelip sahada projeye uygun ölçülerde kesilerek kullanılmaktadır. Ahşap malzemeler için toplam 60 saatlik profesyonel kullanıma uygun elektrikli testere ve beton dökümü için ise toplam 1 saatlik vibratör çalışma süresi değerlendirmeye alınmıştır.

Binanın kullanım aşamasındaki (B6) modülünde, operasyonel enerji kullanımının etkilerini hesaplamak için elektrik ve doğalgaz tüketimi verileri değerlendirilmektedir. TEİAŞ (2021) aylık üretim-tüketim raporlarından alınan verilere göre tek aileli bir evde; aydınlatma ve buzdolabı, bulaşık makinesi, fırın, çamaşır makinesi, elektrikli süpürge, ütü, bilgisayar ve televizyon gibi ev aletlerinin kullanımından kaynaklanan elektrik tüketimi hesaplandığında aylık 253 kWh bulunduğu görülmüştür. Yazılımda Türkiye şartları belirtilerek yıllık 3036 kWh elektrik kullanımı girilmiştir. Doğalgaz tüketimi için ise, EPDK (2018)’den alınan verilere dayanarak Selçuk ve Pasinlioğlu (2020), m<sup>2</sup> başına yıllık 7,7 m<sup>3</sup> doğalgaz tüketimi olduğunu hesaplamıştır. Bu çalışma için 30 m<sup>2</sup>’lik bir

konutun 231 m<sup>3</sup> doğalgaz tükettiği sonucuna varılmış ve bulunan değer yıllık doğalgaz tüketimi olarak girilmiştir. Veri eksikliğinden kaynaklı olarak kullanım aşamasında operasyonel su kullanımı (B7) modülü hesaba katılmamıştır.

Yaşam döngüsü değerlendirme aracında, EPD'lere dayalı seçilen yapı malzemelerinin çevresel etki değerleri, binanın kullanım sonu aşamasında yıkım (C1), atık işlemeye taşıma (C2), yeniden kullanım-geri kazanım-geri dönüşüm için atıkların işlenmesi (C3) ve geri dönüştürülemeyen atıkların bertarafı (C4) modüllerinde (C1-C4) olarak bir arada değerlendirilmiştir.

Yazılıma girilen verilere ve hesaplamalara göre, tek aileli ahşap geleneksel konutun YDD sonuçları Tablo 8'de sunulmaktadır. Geleneksel konuttan kaynaklanan toplam karbondioksit eşdeğeri emisyonlarına, tüm yaşam döngüsü aşamalarının toplam etkisi 100 yıllık bir yaşam ömrü için yaklaşık 315 ton CO<sub>2</sub> eq'dir. Belirtilen sistem sınırları doğrultusunda, CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyonları bina yaşam ömrüne ve brüt iç taban alanına bölünerek 104,88 kg CO<sub>2</sub> eq / m<sup>2</sup> / yıl olarak bulunmuştur.

**Tablo 8. Ahşap geleneksel konutun yaşam döngüsü çevresel etki sonuçları**

Yaşam döngüsü aşamaları	Yaşam döngüsü modülleri		Küresel ısınma kg CO <sub>2</sub> eq	Asitleştirme kg SO <sub>2</sub> eq	Ötrofikasyon kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq	Ozon delme potansiyeli kg CFC-11 eq	Alt atmosferde ozon oluşumu kg Etilen	Birincil enerjinin toplam kullanımı MJ	Biyojenik karbon depolama kg CO <sub>2</sub> eq bio
Üretim aşaması İnşaat aşaması	A1-A3	Yapı malzemeleri üretimi	1,72E+04	7,25E+01	1,81E+01	7,10E-04	1,33E+01	1,93E+05	8,02E+03
	A4	Şantiyeye ulaşım / taşıma	1,12E+03	3,35E+00	8,30E-01	7,60E-05	2,30E-01	6,63E+03	
	A5	İnşaat / kurulum süreci	1,97E+03	6,81E+00	4,04E+00	2,90E-04	2,50E-01	3,63E+04	
Kullanım aşaması	B1-B5	Bakım ve malzeme değişimi	6,67E+03	3,20E+01	1,08E+01	4,20E-04	2,92E+00	1,73E+05	
	B6	Enerji kullanımı	2,84E+05	1,66E+03	3,64E+02	1,30E-02	6,27E+01	4,17E+06	
Kullanım ömrünün sonu aşaması	C1-C4	Kullanım ömrünün sonu	3,79E+03	3,77E+00	1,17E+00	1,10E-04	5,50E-01	1,44E+04	
Dış etkiler	D	Dış etkiler (toplam hesaplamaya dahil değildir)	-4,98E+03	-1,57E+01	-5,04E+00	-1,70E-04	-2,36E+00	-5,57E+04	
		<b>Toplam</b>	<b>3,15E+05</b>	<b>1,78E+03</b>	<b>3,99E+02</b>	<b>1,46E-02</b>	<b>7,99E+01</b>	<b>4,59E+06</b>	<b>8,02E+03</b>
		1 m <sup>2</sup> yaşam alanına göre sonuçlar	1,05E+04	5,94E+01	1,33E+01	4,86E-04	2,66E+00	1,56E+05	2,67E+02

Kaynak: Yazar

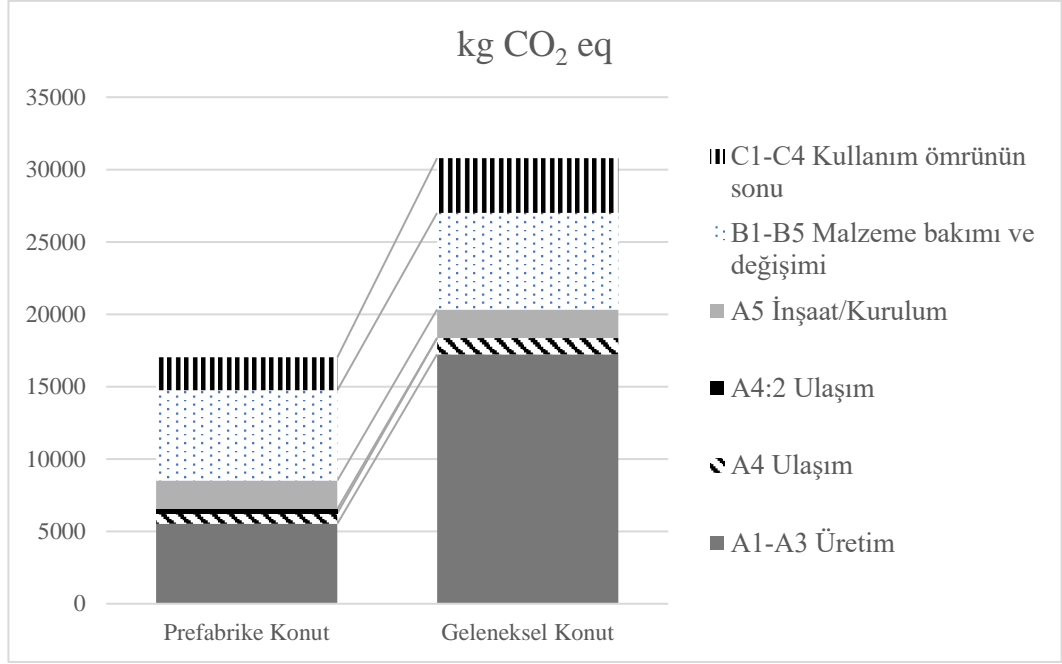
## **5. BULGULAR**

Bu çalışma ahşap esaslı malzeme kullanılarak, prefabrike (ön yapım) ve geleneksel (yerinde yapım) olmak üzere iki farklı yapım sisteminin yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle çevresel etkilerinin karşılaştırılmasına odaklanmaktadır. Metot kısmında açıklanan değerlendirme akış şeması ile edinilen bulgular, TS EN 15978 standardı çerçevesinde One Click LCA – Building LCA aracı kullanılarak tek aileli konut yapılarının beşikten mezara çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. 7 etki değerlendirme kategorisine ait bulgular yaşam döngüsü aşamalarına göre alt başlıklarda irdelenmektedir. Karşılaştırmalı olarak incelenen bulgular sonucunda tek aileli gibi küçük konut yapıları için tercih edilecek yapım sistemlerinin çevreye etkileri değerlendirilmiştir. Bulgularda verilen grafiklere ek olarak Ek 1 ve Ek 2’de konutlarda kullanılan malzeme gruplarının ve inşaat sahasındaki diğer faktörlerin çevresel etkilerinin karşılaştırılması ve binaların oluşturduğu toplam etkiler içinde dağılımına yer verilmiştir.

### **5.1. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması**

Küresel ısınma potansiyeli, atmosferdeki artan sera gazı emisyonlarının neden olduğu küresel yüzey sıcaklarındaki değişimi olarak tanımlamaktadır. CML tabanlı yöntemle göre çıktılar kg CO<sub>2</sub> eq birimiyle ifade edilmektedir (One Click LCA, 2021a).

Şekil 29’daki grafikte karşılaştırmalı olarak gösterilen küresel ısınma potansiyeli (GWP) sonuçlarına bakıldığında toplam 301 ton CO<sub>2</sub> eq yayan prefabrike konut, 315 ton CO<sub>2</sub> eq yayan geleneksel konuta göre daha az küresel ısınma potansiyeli etkisi oluşturmaktadır.



**Şekil 29. Küresel ısınma potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Kaynak: Yazar

Tablo 9’da toplam etkilerin yaşam döngüsü aşamalarındaki dağılımına bakıldığında, kullanım aşamasında enerji kullanımı modülü (B6) prefabrike ve geleneksel konut için sırasıyla toplam etkilerin %94,34 ve %90,22’sini teşkil etmektedir. B6 modülünün oranının fazla olması sebebiyle grafiğin okunabilirliğini artırmak adına B6 modülü grafikten çıkarılmış ve tabloda değerlerine yer verilmiştir. Enerji kullanımı her ikisi için de 284 ton CO<sub>2</sub> eq hesaplanmasına rağmen, geleneksel konutta yaşam döngüsünün diğer aşamalarında yayılan etkilerin prefabrike konuta oranla daha fazla olmasından dolayı enerji kullanımı (B6) modülünün oranı diğer aşamalara kıyasla daha az görülmektedir. Prefabrike konutta bu oranı sırasıyla %2,07 ve %1,84 ile kullanım aşamasında bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) modülü ve üretim aşaması (A1-A3) modülü takip etmektedir. Geleneksel konutta ise üretim aşaması (A1-A3) modülü %5,48 oranla, %2,12 oranındaki kullanım aşamasında bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) modülünden daha fazla etki yaymaktadır. Konutların küresel ısınma potansiyel etkileri arasındaki en büyük farkı üretim aşaması (A1-A3) oluşturmaktadır. Beşikten mezara yaşam döngüsü aşamaları kapsamında küresel ısınma potansiyelinin etkilerinin karşılaştırması alt başlıklarda incelenmiştir.



**Tablo 9. Küresel ısınma potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Konut	A1-A3 Üretim	A4 Ulaşım	A4:2 Ulaşım	A5 İnşaat/ Kurulum	B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	B6 Enerji kullanı mı	C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Toplam	Birim
Ahşap Prefab rike	5530,49 %1,84	731,19 %0,24	286,13 %0,10	1965,91 %0,65	6239,18 %2,07	283866, 64 %94,34	2275,07 %0,76	300894, 62 %100	kg CO <sub>2</sub> eq
Ahşap Gelen eksel	17240,27 %5,48	1118,88 %0,36	-	1970,70 %0,63	6670,11 %2,12	283866, 64 %90,22	3787,97 %1,20	314654, 57 %100	kg CO <sub>2</sub> eq

Kaynak: Yazar

#### 5.1.1. Üretim Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Beşikten kapıya üretim aşaması, şantiyeye taşınmaya hazır yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının etkilerini kapsamaktadır. Tablo 9'daki değerlere bakıldığında geleneksel konutun üretim aşamasında prefabrike konuta oranla daha fazla küresel ısınma potansiyeli etkisinin olduğu görülmektedir. Tablo 10'da konutlardaki yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı görülmektedir. Bu sonuçlara göre her ikisinde de “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunun etkisi en fazla olmuştur. Konutlardaki bu yapı bileşeni grubunun aralarındaki fark karşılaştırıldığında ise, prefabrike konutta zemin döşemesi için yapılandırılmış lamine ahşap (GLT) ve çapraz lamine ahşap (CLT) kullanılmasına karşın geleneksel konutta betonarme döşeme kullanılması olduğu görülmüştür.

**Tablo 10. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta A1-A3 Üretim	Geleneksel konutta A1-A3 Üretim
Dış duvarlar ve cephe	1095,24	659,10
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	170,50	344,42
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	203,54	245,72
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	3025,14	15464,27
Pencere ve kapılar	1036,06	526,77

Kaynak: Yazar

Küresel ısınma potansiyeline en fazla katkısı olan malzemeler prefabrike konutta, %23,9 oranında duvar kaplamasında ve çatıda kullanılan OSB, %21,5 oranında zeminde kullanılan CLT, %13,7 oranında ön cephede kullanılan üç camlı ahşap pencere ve %11,3 oranında ahşap dikmelerde ve kirişlerde kullanılan GLT olmuştur. Geleneksel konutta ise, sırasıyla %43,2 ve %32,5 oranında zeminde kullanılan beton ve donatılar, %5,4 oranında ahşap dikme ve kirişler, %5 oranında döşemede ve çatıda kullanılan OSB olmuştur.

#### 5.1.2. İnşaat Süreci Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

İnşaat aşaması, ulaşım (A4) ve inşaat/kurulum (A5) modüllerini içermektedir. A4 modülü ürünlerin fabrikadan şantiyeye taşınmasını ve işçilerin şantiyeye ulaşımının küresel ısınma potansiyeline etkilerini kapsamaktadır. A5 modülü ise inşaat veya kurulum sırasında inşaat sahasında enerji ve su kullanımı, atık yönetimi ve malzeme israfı dahil diğer etkileri kapsamaktadır. Bu aşamalar için m<sup>2</sup>'ye göre toplam tahmini inşaat atığı, elektrik kullanımı ve dizel kullanımını veren şantiye senaryolarına ek olarak firmalardan alınan bilgilere göre şantiyedeki makine kullanımı ve şantiyeye ulaşım için ek geziler olan işçi ulaşımı verileri girilmiş ve etkileri karşılaştırılmıştır.

Prefabrike konutta ulaşım (A4) modülü, toplam küresel ısınma potansiyeli etkilerinin %0,34'ünü, geleneksel konutta ise %0,36'sını oluşturmaktadır. Tablo 9'daki yaşam döngüsü aşamalarının karşılaştırıldığı değerlere bakıldığında geleneksel konutun ulaşım (A4) modülünde prefabrike konuta oranla daha fazla küresel ısınma potansiyeli etkisinin olduğu görülmektedir. Tablo 11'deki sonuçlara göre ise bu farkın büyük oranda şantiyeye ulaşım için ek seferlerde görüldüğü üzere işçilerin şantiyeye ulaşımıyla bağlantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Prefabrike konutta yapı malzemelerinin taşınmasına ek olarak yapı elemanlarının (modüllerin) taşınmasının da ek ulaşımına neden olmasına karşın, daha kısa sürede kurulumunun tamamlanmasının önemli bir etken olduğu görülmektedir. İnşaat/kurulum (A5) modülü her iki yapıım sisteminde de yaklaşık %0,60 oranında etkili olup şantiyedeki makine kullanımlarının etkisiyle prefabrike konutun lehine sonuçlanmıştır.

**Tablo 11. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A4:2 Ulaşım</b>	<b>Geleneksel konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A5 İnşaat/Kurulum</b>	<b>Geleneksel konutta A5 İnşaat</b>
Dış duvarlar ve cephe	89,36	29,50	55,30	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	54,06	36,92	33,32	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	47,33	9,34	37,75	-	-
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	386,32	210,38	321,68	-	-
Pencere ve kapılar	22,41	-	12,25	-	-
İşçi ulaşımı	131,71	-	658,5	-	-
Şantiye senaryoları	-	-	-	1820,61	1820,61
Makine kullanım saatleri	-	-	-	145,30	150,10

Kaynak: Yazar

### 5.1.3. Kullanım Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada kullanım aşaması, bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) ve enerji kullanımı (B6) modüllerini içermektedir. B1-B5 modülü binanın yaşam döngüsü boyunca yapı malzemelerinin hizmet ömürlerine bağlı olarak değiştirilmesinden kaynaklanan etkileri kapsamaktadır. Tablo 9'daki değerlere göre, bu modül her iki yapım sisteminde de yaklaşık %2 oranında etkili olup geleneksel sistemin bu aşamada küresel ısınma potansiyeline etkisinin daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tablo 12'de konutlardaki

yapı bileşenlerinin küresel ısınma potansiyeline etkilerinin dağılımı görülmektedir. Prefabrike ve geleneksel konutun B1-B5 modülüne katkısının en fazla “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunda laminant parke ve çatı kaplama malzemesinden kaynaklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu malzemeleri prefabrike konutta ön cephedeki üç camlı ahşap pencere, geleneksel konutta ise dış duvardaki su yalıtımı takip etmektedir. Enerji kullanımı (B6) modülü ise ilk karşılaştırmada bahsedildiği gibi her iki yapım sistemi için de %90’larda bir sonuçla en büyük etki oranına sahip olmuştur. Bu modülde, yapının kullanımındaki elektrik ve doğalgaz tüketimi ele alınmıştır. Küresel ısınma potansiyeline en fazla etki elektrik tüketiminde olmuştur.

**Tablo 12. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Geleneksel konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Prefabrik e konutta B6 Enerji kullanımı</b>	<b>Geleneksel konutta B6 Enerji kullanımı</b>
Dış duvarlar ve cephe	1153,66	1296,89	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,00	0,00	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	315,79	180,45	-	-
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	2697,61	4139,24	-	-
Pencere ve kapılar	2072,12	1053,53	-	-
Elektrik kullanımı	-	-	231549,58	231549,58
Yakıt kullanımı (doğalgaz)	-	-	52317,06	52317,06

Kaynak: Yazar

#### 5.1.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Küresel Isınma Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Kullanım ömrünün sonu aşaması C1-C4 modülleriyle yıkım ve atıkların bertarafına kadar olan süreci kapsamaktadır. Bu aşamada da, geleneksel konutun küresel ısınma potansiyeline katkısı prefabrike konuta göre daha fazla bulunmuştur. Tablo 13'e göre her iki yapıım sisteminde de kullanım ömrünün sonu aşamasının küresel ısınma potansiyeline en fazla etkinin "yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar" grubunda çatı kaplama malzemesinden kaynaklı olduğu görülmüştür. Prefabrike konutta bu malzemeyi zeminde kullanılan çapraz lamine ahşap takip ederken, geleneksel konutta beton ve ahşap kirişlerin etkisinin takip ettiği görülmektedir.

**Tablo 13. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının küresel ısınma potansiyeline etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu</b>	<b>Geleneksel konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu</b>
Dış duvarlar ve cephe	140,58	141,67
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	140,11	538,81
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	67,82	230,96
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	1915,44	2867,50
Pencere ve kapılar	11,12	9,03

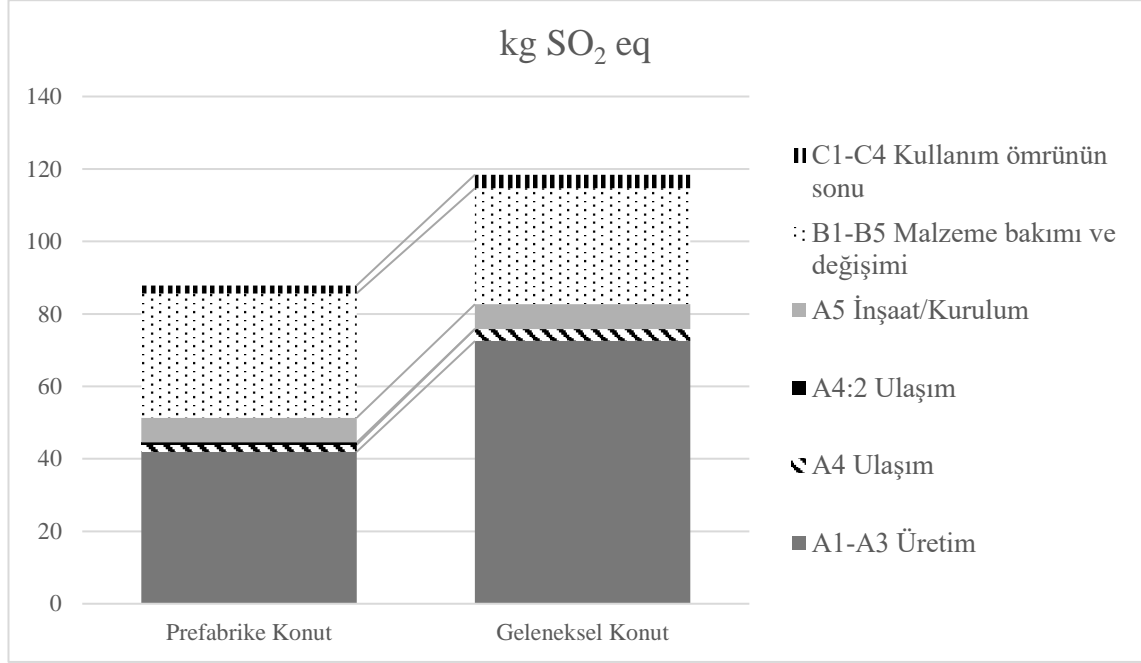
Kaynak: Yazar

#### 5.2. Asitleşme Potansiyeli (AP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Asitleşme potansiyeli, maddelerin ortamdaki asitleştirici etkisini açıklamaktadır. CO<sub>2</sub> gibi maddelerin suda kolayca çözünmesiyle asitlik oranı artar ve bu durum suların asitlenmesi gibi küresel bir etkiye yol açmaktadır. Toprak ve suların asitlenmesi, genel olarak hava kirleticilerin asitlere dönüşmesi yoluyla meydana gelmekte ve durum yağmur suyunun ve sisin pH'ının düşmesine neden olmaktadır. Asitleşme potansiyeli birimi,

CML tabanlı yöntemle göre çıktılar kg SO<sub>2</sub> eşdeğerleriyle ifade edilir (One Click LCA, 2021a).

Şekil 30'daki grafikte karşılaştırmalı olarak gösterilen asitleşme potansiyeli (AP) sonuçlarına göre prefabrike konut toplam 1,75 ton SO<sub>2</sub> eq, geleneksel konut ise 1,78 ton SO<sub>2</sub> eq oluşturmaktadır. Bu durumda geleneksel konutun asitleşme potansiyeline etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.



**Şekil 30. Asitleşme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Kaynak: Yazar

Tablo 14'te toplam asitleşme potansiyeli etkilerinin yaşam döngüsü aşamalarındaki dağılımına bakıldığında da, prefabrike ve geleneksel konut için en fazla etkinin sırasıyla toplam asitleşme potansiyeli etkilerinin %95 ve %93,35'inin enerji kullanımı (B6) modülünde etki ettiği görülmektedir. Bu etki değerlendirme faktöründe de B6 modülünün oranının fazla olması sebebiyle grafiğin okunabilirliğini artırmak adına B6 modülü grafikten çıkarılmış ve tabloda değerlerine yer verilmiştir. Her iki konutta da kullanım aşamasını, üretim aşaması (A1-A3) modülü takip etmektedir. Şekil 30'a bakıldığında konutların asitleşme potansiyeli etkileri arasındaki en büyük farkı üretim aşaması (A1-A3) oluşturmaktadır. Beşikten mezara yaşam döngüsü aşamaları kapsamında asitleşme potansiyelinin etkilerinin karşılaştırması alt başlıklarda incelenmiştir.

**Tablo 14. Asitleşme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Konut	A1-A3 Üretim	A4 Ulaşım	A4:2 Ulaşım	A5 İnşaat/ Kurulum	B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	B6 Enerji kullanımı	C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Toplam	Birim
Ahşap Prefabrike	41,92	1,91	0,67	6,81	34,32	1663,87	2,22	1751,72	kg SO <sub>2</sub> eq
	%2,39	%0,11	%0,04	%0,39	%1,96	%94,99	%2,32	%100	
Ahşap Geleneksel	72,50	3,35	-	6,81	32,01	1663,87	3,77	1782,30	kg SO <sub>2</sub> eq
	%4,07	%0,19	-	%0,38	%1,80	%93,35	%0,21	%100	

Kaynak: Yazar

### 5.2.1. Üretim Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Şantiyeye taşınmaya hazır yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının etkilerini kapsayan beşikten kapıya üretim aşaması, Tablo 14'teki değerlere bakıldığında prefabrike konutun üretim aşaması 42 kg SO<sub>2</sub> eq ile toplam asitleşme potansiyeli etkilerinin %2,39'unu, geleneksel konutun üretim aşaması ise 72,5 kg SO<sub>2</sub> eq ile %4,07'sini kapsamaktadır. Tablo 15'te konutlardaki yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı görülmektedir. Bu sonuçlara göre her ikisinde de “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunun etkisi en fazla olmuştur. Konutlardaki bu yapı bileşeni grubunun aralarındaki fark karşılaştırıldığında ise bir önceki etki kategorisine benzer şekilde, prefabrike konutta zemin döşemesi için yapıştırılmış çapraz lamine ahşap (CLT) kullanılmasına karşın geleneksel konutta betonarme döşeme kullanılması olduğu görülmektedir.

**Tablo 15. Prefabrike konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta	Geleneksel konutta
	A1-A3 Üretim	A1-A3 Üretim
Dış duvarlar ve cephe	6,59	4,37
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	2,40	2,76
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	1,29	1,66
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	23,13	58,86
Pencere ve kapılar	8,51	4,85

Kaynak: Yazar

### 5.2.2. İnşaat Süreci Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Ulaşım (A4) ve inşaat/kurulum (A5) modülleri, inşaat süreci aşamasında yer almaktadır. A4 modülü ürünlerin fabrikadan şantiyeye taşınmasını ve işçilerin şantiyeye ulaşımının asitleşme potansiyeline etkilerini kapsamaktadır. A5 modülü ise inşaat veya kurulum sırasında inşaat sahasında enerji ve su kullanımı, atık yönetimi ve malzeme israfı dahil diğer etkileri kapsamaktadır. Bu aşamalar için m<sup>2</sup>'ye göre toplam tahmini inşaat atığı, elektrik kullanımı ve dizel kullanımını veren şantiye senaryolarına ek olarak firmalardan alınan bilgilere göre şantiyedeki makine kullanımı ve şantiyeye ulaşım için ek geziler olan işçi ulaşımı verileri girilmiş ve etkileri karşılaştırılmıştır.

Prefabrike konutta ulaşım (A4, A4:2) modülü, toplam asitleşme potansiyeli etkilerinin %0,15'ini, geleneksel konutta ise %0,19'unu oluşturmaktadır. Tablo 14'teki yaşam döngüsü aşamalarının karşılaştırıldığı değerlere bakıldığında, ulaşım (A4) modülünde 3,35 kg SO<sub>2</sub> eq ile geleneksel konutun, 2,58 kg SO<sub>2</sub> eq değerindeki prefabrike konuta oranla daha fazla asitleşme potansiyeli etkisinin olduğu görülmektedir. Tablo 16'daki sonuçlara göre ise bu farkın büyük oranda şantiyeye ulaşım için ek seferlerde görüldüğü üzere işçilerin şantiyeye ulaşımıyla bağlantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Prefabrike konutta yapı malzemelerinin taşınmasına ek olarak yapı elemanlarının (modüllerin) taşınmasının da ek ulaşımına neden olmasına karşın, daha kısa sürede kurulumunun tamamlanmasının asitleşme potansiyeli için de önemli bir etken olduğu görülmektedir. İnşaat/kurulum (A5) modülü her iki yapım sisteminde de yaklaşık %0,40 oranında etkili olup şantiyedeki makine kullanımlarının farklı olmasına karşın çok yakın kgSO<sub>2</sub> eq değerleri elde edilmiştir.

**Tablo 16. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A4:2 Ulaşım</b>	<b>Geleneksel konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A5 İnşaat/Kurulum</b>	<b>Geleneksel konutta A5 İnşaat</b>
Dış duvarlar ve cephe	0,22	0,07	0,13	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,13	0,09	0,08	-	-



**Tablo 16. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam)**

İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,12	0,02	0,09	-	-
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	0,94	0,49	0,73	-	-
Pencere ve kapılar	0,05	-	0,03	-	-
İşçi ulaşımı	0,46	-	2,28	-	-
Şantiye senaryoları	-	-	-	6,59	6,59
Makine kullanım saatleri	-	-	-	0,22	0,22

Kaynak: Yazar

### 5.2.3. Kullanım Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada kullanım aşaması, bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) ve enerji kullanımı (B6) modüllerini içermektedir. B1-B5 modülü binanın yaşam döngüsü boyunca yapı malzemelerinin hizmet ömürlerine bağlı olarak değiştirilmesinden kaynaklanan çevresel etkileri kapsamaktadır. Tablo 14’teki değerlere göre, bu modül her iki yapım sisteminde de yaklaşık %2 oranında etkili olup prefabrike sistemin bu aşamada 2 kg SO<sub>2</sub> eq farkla asitleşme potansiyeline etkisinin daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonucun sebepleri irdelendiğinde Tablo 17’de konutlardaki yapı bileşenlerinin asitleşme potansiyeli etkilerinin dağılımına bakılarak, prefabrike konutta “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatı” grubunun etkisinin geleneksel konuta kıyasla daha az olmasına karşın ön cephenin tamamında kullanılan üç camlı ahşap pencerenin asitleşme potansiyeline katkısının daha fazla olmasının neden olduğu görülmüştür. Enerji kullanımı (B6) modülü ise ilk karşılaştırmada bahsedildiği gibi her iki yapım sistemi için de ortalama %95’lerde bir sonuçla en büyük etki oranına sahip olmuştur. Bu modülde, yapının kullanımındaki

elektrik ve doğalgaz tüketimi ele alınmıştır. Asitleşme potansiyeline de en fazla etki elektrik tüketiminde olmuştur.

**Tablo 17. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Geleneksel konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Prefabrike konutta B6 Enerji kullanımı</b>	<b>Geleneksel konutta B6 Enerji kullanımı</b>
Dış duvarlar ve cephe	6,91	7,71	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,00	0,00	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	1,02	0,58	-	-
Yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar	9,37	14,02	-	-
Pencere ve kapılar	17,02	9,70	-	-
Elektrik kullanımı	-	-	1509,49	1509,49
Yakıt kullanımı (doğalgaz)	-	-	154,38	154,38

Kaynak: Yazar

#### 5.2.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Asitleşme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Yıkım ve atıkların bertarafına kadar olan süreci kapsayan kullanım ömrünün sonu aşaması (C1-C4) modüllerinde, geleneksel konutun asitleşme potansiyeline katkısı prefabrike konuta kıyasla daha fazla bulunmuştur. Tablo 18'e bakıldığında asitleşme potansiyeline en fazla etkinin "yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar" grubunda prefabrike konut için döşemede kullanılan çapraz lamine ahşap, geleneksel konut için döşemede

kullanılan beton olduğu görülmektedir. Prefabrikte konutta bu malzemeyi çatıda kullanılan OSB ve çatı kaplama malzemesi takip ederken, geleneksel konutta çatı kaplama malzemesinin etkisinin takip ettiği görülmüştür.

**Tablo 18. Prefabrikte ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının asitleşme potansiyeline etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı**

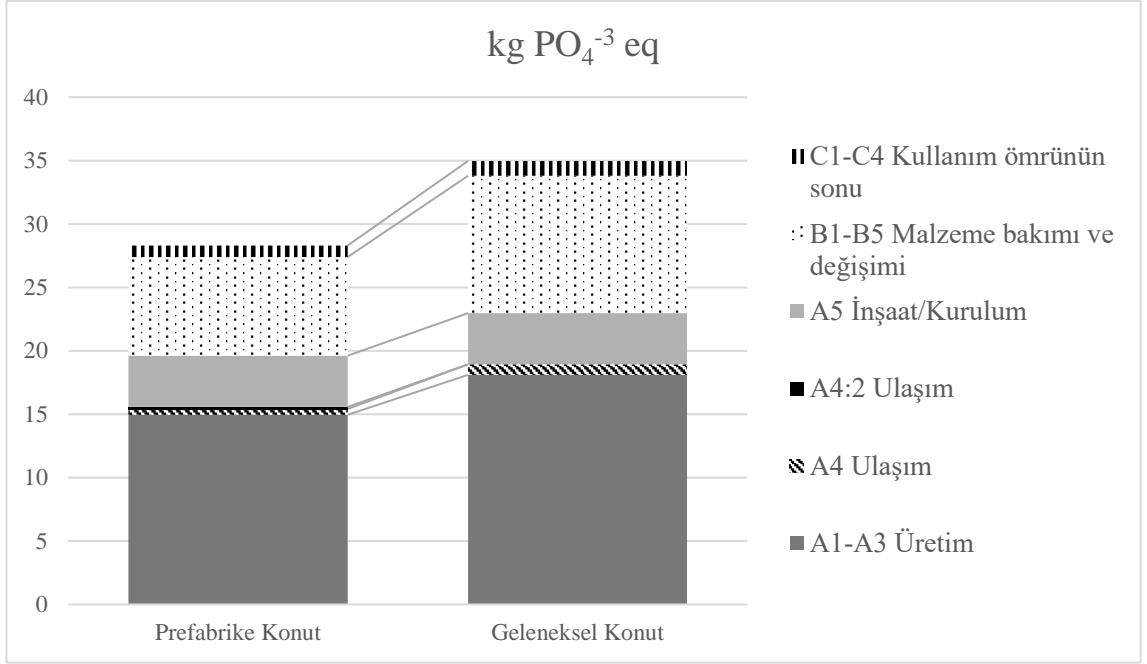
Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrikte konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Geleneksel konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu
Dış duvarlar ve cephe	0,32	0,18
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,19	0,42
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,11	0,21
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	1,53	2,92
Pencere ve kapılar	0,06	0,03

Kaynak: Yazar

### 5.3. Ötrofikasyon Potansiyeli (EP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

“Ötrofikasyon potansiyeli, toprağa veya suya; belirli türlerin bir ekosisteme hakim olmasına neden olan, diğer türlerin hayatta kalmasını tehlikeye atan ve hatta popülasyonların yok olmasına neden olan mineral besin maddeleri eklemenin etkisini açıklamaktadır.” Azot veya fosfor içeren bileşiklerin emisyonu nedeniyle tatlı su ekosisteminin besin elementleri ile zenginleştirildiğinin göstergesidir. Belirli bir yerdeki besinlerin zenginleşmesi olarak da tanımlanabilir ve aşırı besin kaynağı hassas ekosistemlerde istenmeyen bitki büyümesine neden olmaktadır. Ötrofikasyon potansiyeli birimi, CML tabanlı yöntemle göre çıktılar kg  $PO_4^{-3}$  eşdeğerleriyle ifade edilir (One Click LCA, 2021a).

Şekil 31’deki grafikte karşılaştırmalı olarak gösterilen ötrofikasyon potansiyeli (EP) sonuçlarına bakıldığında toplam 392,59 kg  $PO_4^{-3}$  eq oluşturan prefabrikte konut, 399,25 kg  $PO_4$  eq etkiye sebep olan geleneksel konuta göre ötrofikasyon potansiyeline daha az katkıda bulunmaktadır.



**Şekil 31. Ötrofikasyon potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Kaynak: Yazar

Tablo 19’da toplam etkilerin yaşam döngüsü aşamalarındaki dağılımına bakıldığında, kullanım aşamasında enerji kullanımı modülü (B6) prefabrike ve geleneksel konut için sırasıyla toplam ötrofikasyon potansiyeli etkilerinin %92,79 ve %91,24’ünü oluşturmaktadır. B6 modülünün oranının fazla olması sebebiyle grafiğin okunabilirliğini artırmak adına B6 modülü grafikten çıkarılmış ve değerlerine tabloda yer verilmiştir. Şekil 31’e bakıldığında konutların ötrofikasyon potansiyeli etkileri arasındaki en büyük farkın üretim aşaması (A1-A3) ve kullanım aşamasının malzeme bakım ve değişimi (B1-B5) modülleri arasında olduğu görülmektedir. Beşikten mezara yaşam döngüsü aşamaları kapsamında ötrofikasyon potansiyelinin etkilerinin karşılaştırması alt başlıklarda incelenmiştir.

**Tablo 19. Ötrofikasyon potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Konut	A1-A3 Üretim	A4 Ulaşım	A4:2 Ulaşım	A5 İnşaat / Kurulum	B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	B6 Enerji kullanımı	C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Toplam	Birim
Ahşap Prefabrike	14,95	0,46	0,16	4,04	7,78	364,29	0,91	392,59	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq

**Tablo 19. Ötrofikasyon potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması (devam)**

	%3,81	%0,12	%0,04	%1,03	%1,98	%92,79	%0,23	%100	
Ahşap Geleneksel	18,10	0,83	-	4,04	10,83	364,29	1,17	399,35	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq
	%4,53	%0,21	-	%1,01	%2,71	%91,24	%0,29	%100	

Kaynak: Yazar

### 5.3.1. Üretim Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Beşikten kapıya üretim aşaması, şantiyeye taşınmaya hazır yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının etkilerini kapsamaktadır. Tablo 19'daki değerlere bakıldığında geleneksel konutun üretim aşamasında prefabrike konuta oranla daha fazla ötrofikasyon potansiyeli etkisinin olduğu görülmektedir. Tablo 20'deki konutlardaki yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı görülmektedir. Bu sonuçlara göre her ikisinde de “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunun etkisi en fazla olmuştur. Konutlardaki bu yapı bileşeni grubunun aralarındaki fark karşılaştırıldığında ise bir önceki etki kategorisine benzer şekilde, prefabrike konutta zemin döşemesi için yapıştırılmış çapraz lamine ahşap (CLT) kullanılmasına karşın geleneksel konutta betonarme döşeme kullanılması olduğu görülmektedir.

**Tablo 20. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta A1-A3 Üretim	Geleneksel konutta A1-A3 Üretim
Dış duvarlar ve cephe	2,36	1,11
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,94	0,90
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,42	0,54
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	9,55	14,69
Pencere ve kapılar	1,68	0,85

Kaynak: Yazar

### 5.3.2. İnşaat Süreci Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

İnşaat süreci aşaması, ulaşım (A4) ve inşaat/kurulum (A5) modüllerini içermektedir. A4 modülü ürünlerin fabrikadan şantiyeye taşınmasını ve işçilerin şantiyeye ulaşımının küresel ısınma potansiyeline etkilerini kapsamaktadır. A5 modülü ise inşaat veya kurulum sırasında inşaat sahasında enerji ve su kullanımı, atık yönetimi ve malzeme israfı dahil diğer etkileri kapsamaktadır. Bu aşamalar için m<sup>2</sup>'ye göre toplam tahmini inşaat atığı, elektrik kullanımı ve dizel kullanımını veren şantiye senaryolarına ek olarak firmalardan alınan bilgilere göre şantiyedeki makine kullanımı ve şantiyeye ulaşım için ek geziler olan işçi ulaşımı verileri girilmiş ve etkileri karşılaştırılmıştır.

Tablo 19'da yaşam döngüsü aşamalarının karşılaştırıldığı değerlere bakıldığında, ulaşım (A4) modülünde geleneksel konutun ötrofikasyon potansiyelinin 0,83 kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq değeri ile, ötrofikasyon potansiyeli 0,62 kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq olan prefabrike konuta oranla daha fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Prefabrike konutta ulaşım (A4, A4:2) modülü, toplam ötrofikasyon potansiyeli etkilerinin %0,16'sını, geleneksel konutta ise %0,21'ini oluşturmaktadır. Tablo 21'deki sonuçlara göre ise bu farkın büyük oranda şantiyeye ulaşım için ek seferlerde görüldüğü üzere işçilerin şantiyeye ulaşımıyla bağlantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Prefabrike konutta yapı malzemelerinin taşınmasına ek olarak yapı elemanlarının (modüllerin) taşınmasının da ek ulaşımına neden olmasına karşın, daha kısa sürede kurulumunun tamamlanmasının önceki çevresel etki potansiyellerinde olduğu gibi ötrofikasyon potansiyeli için de önemli bir etken olduğu görülmektedir. İnşaat/kurulum (A5) modülü her iki yapım sisteminde de yaklaşık %1 oranında etkili olup şantiyedeki makine kullanımlarının farklı olmasına karşın, bu modülde eşit ve 4,04 kg PO<sub>4</sub> eq değerleri elde edilmiştir.

**Tablo 21. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A4:2 Ulaşım</b>	<b>Geleneksel konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A5 İnşaat/Kurulum</b>	<b>Geleneksel konutta A5 İnşaat</b>
Dış duvarlar ve cephe	0,05	0,02	0,03	-	-

**Tablo 21. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam)**

Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,03	0,02	0,02	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,03	0,01	0,02	-	-
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	0,23	0,12	0,17	-	-
Pencere ve kapılar	0,01	-	0,01	-	-
İşçi ulaşımı	0,12	-	0,58	-	-
Şantiye senaryoları	-	-	-	3,99	3,99
Makine kullanım saatleri	-	-	-	0,04	0,05

Kaynak: Yazar

### 5.3.3. Kullanım Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada kullanım aşaması, bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) ve enerji kullanımı (B6) modüllerini içermektedir. B1-B5 modülü binanın yaşam döngüsü boyunca yapı malzemelerinin hizmet ömürlerine bağlı olarak değiştirilmesinden kaynaklanan etkileri içermektedir. Tablo 19'daki değerlere göre, bu modül prefabrike konutta 7,78 kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq değerle %1,98 oranında, geleneksel konutta 10,83 kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq değerle %2,71 oranında etkili olup geleneksel sistemin bu aşamada ötrofikasyon potansiyeline etkisinin daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tablo 22'de konutlardaki yapı bileşenlerinin ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin dağılımı görülmektedir. Tabloya göre konutlardaki yapı bileşenlerinin ötrofikasyon potansiyeli etkilerinin dağılımına bakılarak, prefabrike konutta ön cephedeki üç camlı ahşap çerçevenin etkisinin geleneksel konuttaki pencerelere kıyasla daha fazla olmasına karşın, geleneksel sistemde “yatay yapılar: kiriş,

döşeme ve çatılar” grubunda seramik ve laminant zemin kaplama malzemelerinin ötrofikasyon potansiyeline katkısının 4,64 kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq kadar belirleyici ölçüde daha fazla olmasının neden olduğu görülmüştür. Enerji kullanımı (B6) modülü ise ilk karşılaştırmada bahsedildiği gibi her iki yapım sistemi için de ortalama %92’lerde bir sonuçla en büyük etki oranına sahip olmuştur. Bu modülde, yapının kullanımındaki elektrik ve doğalgaz tüketimi ele alınmıştır. Ötrofikasyon potansiyeline de en fazla etki elektrik tüketiminde olmuştur.

**Tablo 22. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Geleneksel konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Prefabrike konutta B6 Enerji kullanımı</b>	<b>Geleneksel konutta B6 Enerji kullanımı</b>
Dış duvarlar ve cephe	1,36	1,22	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,00	0,00	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,08	0,15	-	-
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	7,68	3,04	-	-
Pencere ve kapılar	1,70	3,37	-	-
Elektrik kullanımı	-	-	353,93	353,93
Yakıt kullanımı (doğalgaz)	-	-	10,36	10,36

Kaynak: Yazar

#### 5.3.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Ötrofikasyon Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Kullanım ömrünün sonu aşaması C1-C4 modülleriyle yıkım ve atıkların bertarafına kadar olan süreci kapsamaktadır. Bu aşamada da, geleneksel konutun ötrofikasyon potansiyeline katkısı prefabrike konuta göre daha fazla bulunmuştur. Tablo 23’e göre her iki yapım sisteminde de kullanım ömrünün sonu aşamasının ötrofikasyon potansiyeline



en fazla etkinin “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunda olduğu görülmektedir. Prefabrike konutta en fazla etkiye çatıda kullanılan OSB neden olurken, geleneksel konutta çatıda kullanılan OSB’nin yanısıra daha fazla oranda zeminde kullanılan beton neden olmaktadır.

**Tablo 23. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ötrofikasyon potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı**

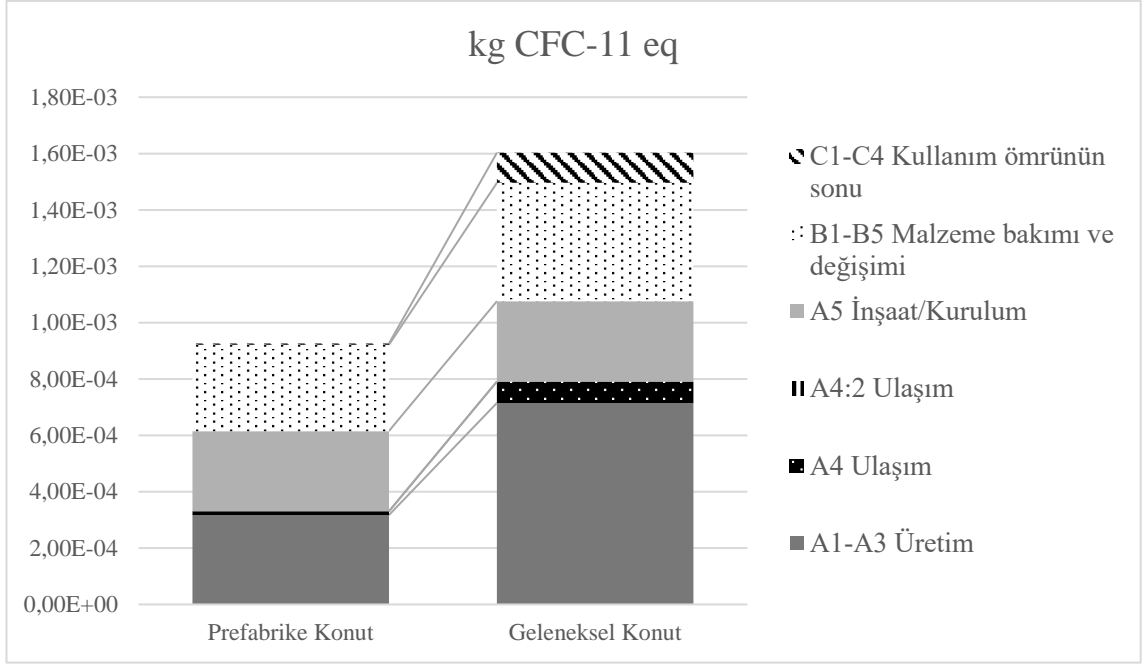
<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu</b>	<b>Geleneksel konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu</b>
Dış duvarlar ve cephe	0,23	0,04
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,04	0,10
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,02	0,05
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	0,60	0,96
Pencere ve kapılar	0,02	0,02

Kaynak: Yazar

#### **5.4. Ozon Delme Potansiyeli (ODP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması**

Atmosferdeki zararlı güneş ışınlarını emen ve dünya yüzeyine ulaşmasını engelleyen stratosferik ozon tabakasının tahrip olmasına neden olan etkiyi açıklamaktadır. Ozon delme (tüketme) potansiyeli birimi, CML tabanlı yöntemle göre çıktılar kg CFC-11 eşdeğerleriyle ifade edilmektedir (One Click LCA, 2021a).

Şekil 32’deki grafikte karşılaştırmalı olarak gösterilen ozon delme potansiyeli (ODP) sonuçlarına göre prefabrike konut toplam 1,35E-02 kg CFC-11 eq, geleneksel konut ise 1,41E-02 kg CFC-11 eq olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 32. Ozon delme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Kaynak: Yazar

Bu karşılaştırmada geleneksel konutun asitleşme potansiyeline etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Tablo 24’te toplam ozon delme potansiyeli etkilerinin yaşam döngüsü aşamalarındaki dağılımına bakıldığında da prefabrike ve geleneksel konut için en fazla etkinin sırasıyla toplam ozon delme potansiyeli etkilerinin %93,12 ve %88,66’sının enerji kullanımı (B6) modülünde olduğu görülmektedir. Bu etki değerlendirme faktöründe de B6 modülünün oranının fazla olması sebebiyle grafiğin okunabilirliğini artırmak adına B6 modülü grafikten çıkarılmış ve tabloda değerlerine yer verilmiştir. Her iki konutta da kullanım aşamasını, üretim aşaması (A1-A3) modülü takip etmektedir. Şekil 32’ye bakıldığında konutların ozon delme potansiyeli etkileri arasında inşaat/kurulum (A5) modülü dışında diğer aşamaların arasındaki farklar net bir şekilde görülmektedir.

**Tablo 24. Ozon delme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Konut	A1-A3 Üretim	A4 Ulaşım	A4:2 Ulaşım	A5 İnşaat/Kurulum	B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	B6 Enerji kullanımı	C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Toplam	Birim
Ahşap Prefabrike	3,17E-04	1,32E-05	1,31E-13	2,85E-04	3,06E-04	1,25E-02	4,48E-06	1,35E-02	kg CFC11 eq

**Tablo 24. Ozon delme potansiyelinin yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması (devam)**

	%2,35	%0,10	%0,00	%2,12	%2,27	%93,12	%0,03	%100	
Ahşap Gelen eksele	7,15E-04	7,60E-05	-	2,85E-04	4,20E-04	1,25E-02	1,07E-04	1,41E-02	kg CFC11 eq
	%5,06	%0,54	-	%2,02	%2,97	%88,66	%0,76	%100	

Kaynak: Yazar

#### 5.4.1. Üretim Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Şantiyeye taşınmaya hazır yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının etkilerini kapsayan beşikten kapıya üretim aşaması, Tablo 24'teki değerlere bakıldığında prefabrike konutun üretim aşaması 3,17E-04 kg CFC-11 eq ile toplam ozon delme potansiyeli etkilerinin %2,35'ini, geleneksel konutun üretim aşaması ise 7,15E-04 kg CFC-11 eq ile %5,06'sını kapsamaktadır. Tablo 25'te konutlardaki yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı görülmektedir. Bu sonuçlara göre her ikisinde de “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunun etkisi en fazla olmuştur. Konutlardaki bu yapı bileşeni grubunun aralarındaki fark karşılaştırıldığında ise, prefabrike konutta zemin döşemesi için yapıştırılmış çapraz lamine ahşap (CLT) kullanılmasına karşın geleneksel konutta betonarme döşeme kullanılmasının neden olduğu görülmektedir. Ayrıca prefabrike konutta ön cephede kullanılan üç camlı ahşap çerçeveli pencerenin de ozon delme potansiyelinin üretim aşamasına etkisinin önemli ölçüde olduğu görülmüştür.

**Tablo 25. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta A1-A3 Üretim	Geleneksel konutta A1-A3 Üretim
Dış duvarlar ve cephe	3,43E-05	2,119E-05
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	2,03E-06	2,21E-05
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	8,02E-06	1,449E-05
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	1,77E-04	5,63E-04
Pencere ve kapılar	9,53E-05	9,426E-05

Kaynak: Yazar

#### 5.4.2. İnşaat Süreci Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Ulaşım (A4) ve inşaat/kurulum (A5) modülleri, inşaat süreci aşamasında yer almaktadır. A4 modülü ürünlerin fabrikadan şantiyeye taşınmasını ve işçilerin şantiyeye ulaşımının asitleşme potansiyeline etkilerini kapsamaktadır. A5 modülü ise inşaat veya kurulum sırasında inşaat sahasında enerji ve su kullanımı, atık yönetimi ve malzeme israfı dahil diğer etkileri kapsamaktadır. Bu aşamalar için m<sup>2</sup>'ye göre toplam tahmini inşaat atığı, elektrik kullanımı ve dizel kullanımını veren şantiye senaryolarına ek olarak firmalardan alınan bilgilere göre şantiyedeki makine kullanımı ve şantiyeye ulaşım için ek geziler olan işçi ulaşımı verileri girilmiş ve etkileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda malzemelerin taşınmasının ozon delme potansiyeline etkisinin değerlendirmeye alınamayacak kadar az olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Malzeme taşınmasının etkisi yalnızca geleneksel konuttaki betonun taşınmasında fark edilmektedir. Tablo 26'daki inşaat süreci aşamasındaki sonuçlara göre, farklı yapım sistemindeki iki konutun ozon delme potansiyeline etkilerinin büyük oranda işçilerin ulaşımından elde edilen verilere dayalı olduğu görülmüş ve prefabrike konutun daha kısa sürede tamamlanmasıyla ozon delme potansiyeline katkısının daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. İnşaat/kurulum (A5) modülü her iki yapım sisteminde de yaklaşık %0,2 oranında etkili olup şantiyedeki makine kullanımlarının farklı olmasına karşın birbirine çok yakın kg CFC-11 eq değerleri elde edilmiştir.

**Tablo 26. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A4:2 Ulaşım</b>	<b>Geleneksel konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A5 İnşaat/Kurulum</b>	<b>Geleneksel konutta A5 İnşaat</b>
Dış duvarlar ve cephe	4,11E-14	1,35E-14	2,5E-14	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	2,48E-14	1,69E-14	1,5E-14	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	2,17E-14	4,29E-15	1,7E-14	-	-

**Tablo 26. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam)**

Yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar	1,78E-13	9,64E-14	1E-05	-	-
Pencere ve kapılar	1,03E-14	-	5,6E-15	-	-
İşçi ulaşımı	1,32E-05	-	6,6E-05	-	-
Şantiye senaryoları	-	-	-	2,60E-04	2,60E-04
Makine kullanım saatleri	-	-	-	2,53E-05	2,53E-05

Kaynak: Yazar

#### 5.4.3. Kullanım Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada kullanım aşaması, bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) ve enerji kullanımı (B6) modüllerini içermektedir. B1-B5 modülü binanın yaşam döngüsü boyunca yapı malzemelerinin hizmet ömürlerine bağlı olarak değiştirilmesinden kaynaklanan çevresel etkileri kapsamaktadır. Tablo 24'teki değerlere göre, bu modül her iki yapım sisteminde de yaklaşık %2 oranında etkili olup geleneksel sistemin bu aşamada 1E-04 kg CFC-11 eq farkla ozon delme potansiyeline etkisinin daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuca etki eden malzemeler irdelendiğinde Tablo 27'de konutlardaki yapı bileşenlerinin ozon delme potansiyeli etkilerinin dağılımına bakılarak, geleneksel konutta çatıda uygulanan su yalıtımının ve zeminde seramik kullanımının ODP etkilerinin, prefabrike konutta ön cephenin tamamında kullanılan üç camlı ahşap çerçeveli pencerelerin ODP etkisine oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Enerji kullanımı (B6) modülünün ise ilk karşılaştırmada bahsedildiği gibi her iki yapım sistemi için de en fazla ozon delme potansiyeli etkisine sahip olduğu görülmektedir. Bu modülde, yapının kullanımındaki elektrik ve doğalgaz tüketimi ele alınmıştır. Ozon delme potansiyeline de en fazla etki elektrik tüketiminde olmuştur.

**Tablo 27. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Geleneksel konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi</b>	<b>Prefabrike konutta B6 Enerji kullanımı</b>	<b>Geleneksel konutta B6 Enerji kullanımı</b>
Dış duvarlar ve cephe	1,37E-05	1,55E-05	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0.00	0,00	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	6,23E-06	3,56E-06	-	-
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	9,54E-05	2,12E-04	-	-
Pencere ve kapılar	1,91E-04	1,89E-04	-	-
Elektrik kullanımı	-	-	8,37E-03	8,37E-03
Yakıt kullanımı (doğalgaz)	-	-	4,16E-03	4,16E-03

Kaynak: Yazar

#### 5.4.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Ozon Delme Potansiyelinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Yıkım ve atıkların bertarafına kadar olan süreci kapsayan kullanım ömrünün sonu aşaması (C1-C4) modüllerinde, geleneksel konutun ozon delme potansiyeline katkısı prefabrike konuta kıyasla daha fazla bulunmuştur. Tablo 28'e göre ozon delme potansiyeline en fazla etkinin "yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar" grubunda prefabrike konut için çatıda kullanılan OSB ve çatı kaplama malzemesi, geleneksel konut için döşemede kullanılan beton olduğu görülmektedir.

**Tablo 28. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının ozon delme potansiyeline etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı**

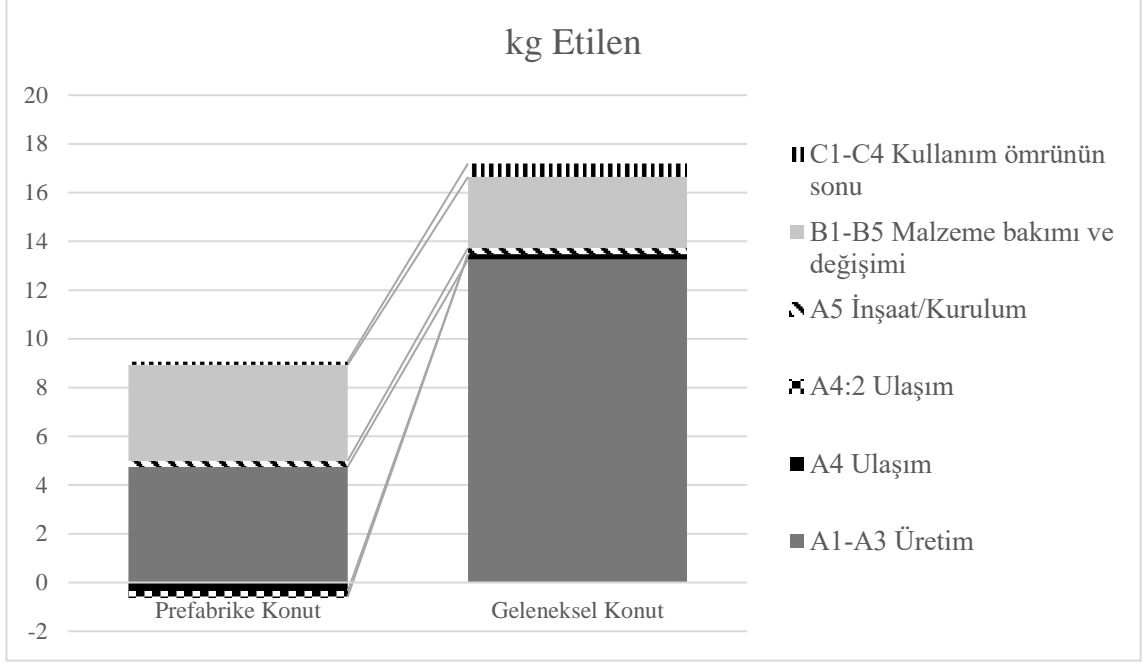
<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu</b>	<b>Geleneksel konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu</b>
Dış duvarlar ve cephe	9,64E-07	3,18E-07
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	6,64E-11	2,09E-06
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	5,18E-07	1,03E-06
Yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar	2,95E-06	1,04E-04
Pencere ve kapılar	4,95E-08	4,47E-08

Kaynak: Yazar

### **5.5. Alt Atmosferde (Fotokimyasal) Ozon Oluşumu (POCP) Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması**

Alt atmosferde (fotokimyasal) ozon oluşumu, atmosferdeki maddelerin fotokimyasal sis oluşturma etkisini açıklamaktadır, bu durum yaz dumanı olarak da bilinmektedir. Fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli olarak geçen etkinin birimi, CML tabanlı yöntemle göre çıktılar kg Etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) eşdeğerleriyle ifade edilmektedir (One Click LCA, 2021a).

Şekil 33'teki grafikte karşılaştırmalı olarak gösterilen alt atmosferde ozon oluşumu (POCP) sonuçlarına bakıldığında toplam 71,2 kg Etilen'e sebep olan prefabrike konut, 80 kg Etilen oluşturan geleneksel konuta göre daha az alt atmosferde ozon oluşumuna etki etmektedir.



**Şekil 33. Alt atmosferde ozon oluşumunun yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Kaynak: Yazar

Tablo 29’da toplam etkilerin yaşam döngüsü aşamalarındaki dağılımına bakıldığında, kullanım aşamasında enerji kullanımı modülünün (B6) prefabrike ve geleneksel konut için sırasıyla toplam etkilerin %86,64 ve %78,5’ini yaymaktadır. B6 modülünün oranının fazla olması sebebiyle grafiğin okunabilirliğini artırmak adına B6 modülü grafikten çıkarılmış ve tabloda değerlerine yer verilmiştir. Enerji kullanımı her ikisi için de 62,73 kg Etilen hesaplanmasına rağmen, geleneksel konutta yaşam döngüsünün diğer aşamalarında yayılan etkilerin prefabrike konuta oranla daha fazla olmasından dolayı enerji kullanımı (B6) modülünün oranı diğer aşamalara kıyasla daha az görülmektedir. Prefabrike konutta bu oranı sırasıyla %6,55 ve %5,44 ile üretim aşaması (A1-A3) modülü ve kullanım aşamasında bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) modülleri takip etmektedir. Geleneksel konutta ise üretim aşaması modülü %16,57 oranla, %3,66 oranındaki kullanım aşamasında bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) modülünden daha fazla etki oluşturmaktadır. Konutların alt atmosferde ozon oluşumuna etkileri arasındaki en büyük farkı üretim aşaması (A1-A3) meydana getirmektedir. Beşikten mezara yaşam döngüsü aşamaları kapsamında alt atmosferde ozon oluşumu etkilerinin karşılaştırması alt başlıklarda incelenmiştir.



**Tablo 29. Alt atmosferde ozon oluşumunun yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Konut	A1-A3 Üretim	A4 Ulaşım	A4:2 Ulaşım	A5 İnşaat/ Kurulum	B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	B6 Enerji kullanı mı	C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Toplam	Birim
Ahşap Prefab rike	4,74	-0,38	-0,22	0,25	3,94	62,73	0,14	71,19	kg Etilen eq
	%6,55	%0,53	%0,31	%0,34	%5,44	%86,64	%0,20	%100	
Ahşap Gelen eksel	13,25	0,23	-	0,25	2,92	62,73	0,55	79,92	kg Etilen eq
	%16,57	%0,28	-	%0,31	%3,66	%78,49	%0,69	%100	

Kaynak: Yazar

#### 5.5.1. Üretim Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması

Beşikten kapıya üretim aşaması, şantiyeye taşınmaya hazır yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının etkilerini kapsamaktadır. Tablo 29'daki değerlere bakıldığında geleneksel konutun üretim aşamasında, prefabrike konuta oranla alt atmosfer ozon oluşumuna etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 30'da konutlardaki yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı görülmektedir. Bu sonuçlara göre, prefabrike konutta çatı kaplama malzemesini ve döşemede kullanılan çapraz lamine ahşabı içeren “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunun etkisi en fazla olmuştur. Geleneksel konutta da aynı şekilde “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunda bulunan betona ek olarak “kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar” grubunda bulunan sert ahşap dikmelerin etkisi yoğun görülmektedir.

**Tablo 30. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta A1-A3 Üretim	Geleneksel konutta A1-A3 Üretim
Dış duvarlar ve cephe	0,37	0,16
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,31	2,88
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,11	1,05
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	2,98	8,88
Pencere ve kapılar	0,98	0,27

Kaynak: Yazar

### 5.5.2. İnşaat Süreci Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması

Ulaşım (A4) ve inşaat/kurulum (A5) modüllerini içeren bu aşamada alt atmosferde ozon oluşumu etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ulaşım (A4) modülünde ahşap esaslı malzemelerin taşınmasının fotokimyasal ozon oluşumu için eksi değerler oluşturduğu görülmektedir. Bulunan bu değerler, yüzde katkılarının hesaplanmasında mutlak değerler olarak kullanılmaktadır (Zampori vd., 2016). Tablo 31'e bakıldığında prefabrike yapım sisteminde A4 ve A4:2 modülleri toplamında -0,60 kg Etilen'e, geleneksel yapım sisteminde A4 modülünün ise 0,23 kg Etilen'e sebep olduğu görülmüştür. Aradaki 0,83 kg Etilen farkının işçilerin ve betonarme için gerekli malzemelerin taşınmasından kaynaklı olduğu görülmektedir. İnşaat/kurulum (A5) modülündeki değerler eşit bulunmuştur.

**Tablo 31. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A4:2 Ulaşım</b>	<b>Geleneksel konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A5 İnşaat/Kurulum</b>	<b>Geleneksel konutta A5 İnşaat</b>
Dış duvarlar ve cephe	-0,07	-0,02	-0,05	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	-0,04	-0,03	-0,03	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	-0,04	-0,01	-0,03	-	-
Yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar	-0,32	-0,16	-0,21	-	-
Pencere ve kapılar	-0,02	-	-0,01	-	-
İşçi ulaşımı	0,11	-	0,55	-	-
Şantiye senaryoları	-	-	-	0,22	0,22

**Tablo 31. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin inşaat süreci aşamasındaki dağılımı (devam)**

Makine kullanım saatleri	-	-	-	0,02	0,02
--------------------------	---	---	---	------	------

Kaynak: Yazar

### 5.5.3. Kullanım Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada kullanım aşaması, bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) ve enerji kullanımı (B6) modüllerini içermektedir. B1-B5 modülü binanın yaşam döngüsü boyunca yapı malzemelerinin hizmet ömürlerine bağlı olarak değiştirilmesinden kaynaklanan etkileri içermektedir. Tablo 29'daki değerlere göre, bu modülde prefabrike konutun geleneksel konuta kıyasla 1 kg Etilen farkla daha fazla alt atmosfer ozon oluşumuna neden olduğu görülmektedir. Tablo 32'de konutlardaki yapı bileşenlerinin alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin dağılımına bakıldığında, her iki konutun da B1-B5 modülüne en fazla “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” grubunda zemine döşenen laminant parkeden kaynaklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aradaki farka sebep olan malzeme ise, prefabrike konutun ön cephesinde kullanılan üç camlı ahşap çerçeveli cam olduğu görülmektedir. Enerji kullanımı (B6) modülünün ise ilk karşılaştırmada bahsedildiği gibi her iki yapı sistemi için de en fazla alt atmosferde ozon oluşumuna etkisine sahip olduğu görülmektedir. Bu modülde, yapının kullanımındaki elektrik ve doğalgaz tüketimi ele alınmıştır. Alt atmosferde ozon oluşumuna da diğer çevresel etkilerde olduğu gibi en fazla etki elektrik tüketiminde olmuştur.

**Tablo 32. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	Geleneksel konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	Prefabrike konutta B6 Enerji kullanımı	Geleneksel konutta B6 Enerji kullanımı
Dış duvarlar ve cephe	0,27	0,31	-	-

**Tablo 32. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım aşamasındaki dağılımı (devam)**

Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,00	0,00	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,10	0,06	-	-
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	1,61	2,03	-	-
Pencere ve kapılar	1,95	0,53	-	-
Elektrik kullanımı	-	-	52,24	52,24
Yakıt kullanımı (doğalgaz)	-	-	10,48	10,48

Kaynak: Yazar

#### 5.5.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Alt Atmosferde Ozon Oluşumu Etkilerinin Karşılaştırılması

Kullanım ömrünün sonu aşaması C1-C4 modülleriyle yıkım ve atıkların bertarafına kadar olan süreci kapsamaktadır. Bu aşamada da geleneksel konutun alt atmosferde ozon oluşumuna katkısı prefabrike konuta göre daha fazla bulunmuştur. Tablo 33'e göre her iki yapım sisteminde de kullanım ömrünün sonu aşamasının alt atmosferde ozon oluşumuna en fazla etkinin "yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar" grubunda olduğu görülmüştür. Geleneksel konutta bu grubu "kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar" takip etmektedir. Bu gruplardaki alt atmosferde ozon oluşumuna etki eden malzemeler ise, prefabrike konutta döşemede kullanılan çapraz lamine ahşap ve geleneksel konutta döşemede ve dış duvarlarda kullanılan sert ahşap dikme ve kirişlerin olduğu görülmektedir.

**Tablo 33. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Geleneksel konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu
Dış duvarlar ve cephe	0,02	0,02
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0,02	0,17

**Tablo 33. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının alt atmosferde ozon oluşumuna etkilerinin kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı (devam)**

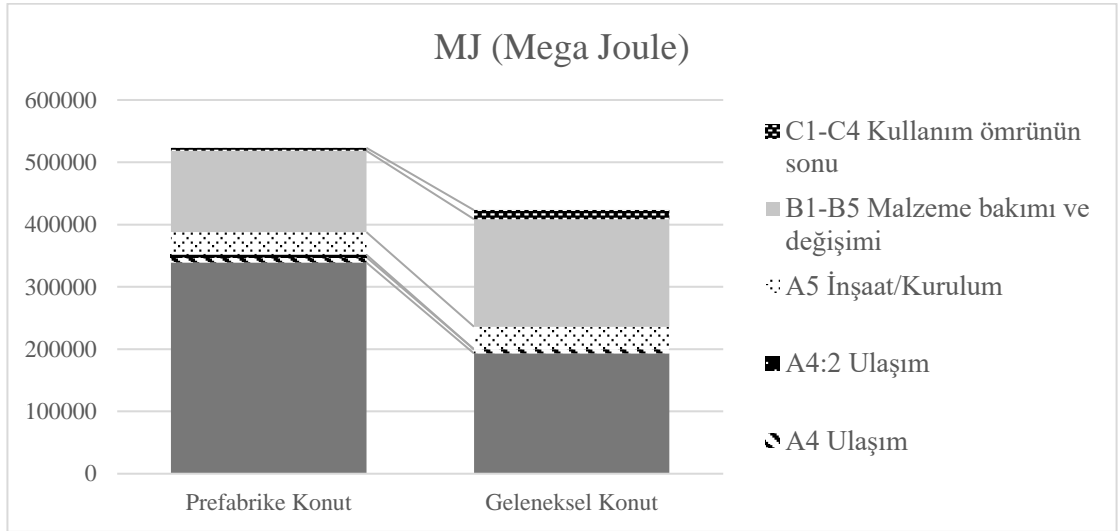
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	0,01	0,07
Yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar	0,10	0,30
Pencere ve kapılar	0,01	0,002

Kaynak: Yazar

### 5.6. Birincil Enerjinin Toplam Kullanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması

Değerlendirme aracından çıkan sonuçlara göre bu kriter, hammadde olarak kullanılan birincil enerji kaynakları hariç, yenilenebilir ve yenilenemeyen birincil enerji kullanımını değerlendirmektedir. Birincil enerji değerleri MJ (Mega Joule) cinsinden rapor edilmektedir (One Click LCA, 2021a).

Şekil 34'teki grafikte karşılaştırmalı olarak gösterilen birincil enerjinin toplam kullanımı sonuçlarına göre prefabrike konut yapımında geleneksel konuta kıyasla 10 bin MJ daha fazla birincil enerji kullanımı olmuştur.



**Şekil 34. Birincil enerjinin toplam kullanımının yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Kaynak: Yazar

Tablo 34'e bakıldığında birincil enerji kullanımının aşamalara göre dağılımına ilişkin sonuçlardan yola çıkarak en fazla etkinin kullanım aşamasındaki kullanım enerjisi (B6) modülünde olduğu görülmektedir. Bu etki değerlendirme faktöründe de B6 modülünün aynı değerleri vermesi ve oranının fazla olması sebebiyle grafiğin okunabilirliğini artırmak adına B6 modülü grafikten çıkarılmış ve tabloda değerlerine yer verilmiştir. Her iki konutta da kullanım aşamasını, üretim aşaması (A1-A3) modülü ve sonrasında malzeme bakımı ve değişimi (B1-B5) modülleri takip etmektedir. Beşikten mezara yaşam döngüsü aşamaları kapsamında birincil enerjinin toplam kullanımının karşılaştırması alt başlıklarda incelenmiştir.

**Tablo 34. Birincil enerjinin toplam kullanımının yaşam döngüsü aşamaları ile karşılaştırılması**

Konut	A1-A3 Üretim	A4 Ulaşım	A4:2 Ulaşım	A5 İnşaat/ Kurulum	B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	B6 Enerji kullanımı	C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Toplam	Birim
Ahşap Prefab rike	338936,7 0	8554,79	4073,15	36292,81	130617,94	416997 2,08	4741,35	4,70E+ 06	MJ
	%7,22	%0,18	%0,09	%0,77	%2,78	%88,85	%0,10	%100	
Ahşap Gelen eksel	193176,3 1	6626,36	-	36302,0 5	172573,40	416997 2,08	14538,10	4,60E+ 06	MJ
	%4,21	%0,14	-	%0,79	%3,76	%90,78	%0,31	%100	

Kaynak: Yazar

#### 5.6.1. Üretim Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması

Şantiyeye taşınmaya hazır yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının etkilerini kapsayan beşikten kapıya üretim aşaması, Tablo 34'teki değerlere bakıldığında prefabrike konutun üretim aşaması yaklaşık 339 bin MJ ile toplam birincil enerji kullanımının %7,22'sini, geleneksel konutun üretim aşaması ise yaklaşık 193 bin MJ ile %4,21'ini kapsamaktadır. Tablo 35'te konutlardaki yapı bileşeni gruplarının birincil enerji kullanımına etkilerinin üretim aşamasındaki dağılımı görülmektedir. Bu sonuçlara göre her iki yapıda da “yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar” grubunun etkisi en fazla olmuştur. Prefabrike konutun üretim aşamasındaki birincil enerji kullanımının geleneksel konutta kullanılan betonarme döşemeye rağmen daha yüksek olmasının sebebi araştırıldığında; döşemede çapraz lamine ahşabın, dikey ve yatay taşıyıcılarda yapıştırılmış lamine ahşabın kullanımı

işlenmiş yapısal ahşap malzeme olması sebebiyle hammadde ediniminden sonra yapı elemanlarının üretiminin ekstra işlemler gerektirmesinden kaynaklı olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte geleneksel konutta kullanılan işlem görmemiş sert ahşap dikme ve kirişlerin birincil enerji kullanımını katkısının olmadığı görülmektedir.

**Tablo 35. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının üretim aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta A1-A3 Üretim</b>	<b>Geleneksel konutta A1-A3 Üretim</b>
Dış duvarlar ve cephe	13712	8728
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	11468	0
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	7456	3675
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	286394	157663
Pencere ve kapılar	19907	23112

Kaynak: Yazar

#### 5.6.2. İnşaat Süreci Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması

Ulaşım (A4) ve inşaat/kurulum (A5) modülleri, inşaat süreci aşamasında yer almaktadır. Birincil enerjinin kullanılmasında A4 modülü yalnızca ürünlerin fabrikadan şantiyeye taşınmasını kapsamaktadır. A5 modülü ise inşaat veya kurulum sırasında inşaat sahasında enerji ve su kullanımı, atık yönetimi ve malzeme israfı dahil diğer etkileri kapsamaktadır. Bu aşamalar için m<sup>2</sup>'ye göre toplam tahmini inşaat atığı, elektrik kullanımı ve dizel kullanımını veren şantiye senaryolarına ek olarak firmalardan alınan bilgilere göre şantiyedeki makine kullanımı verileri girilmiş ve etkileri karşılaştırılmıştır. Tablo 36'daki sonuçlara göre, diğer etki kategorilerinin aksine birincil enerjinin kullanımına ek ulaşım verileri olarak işçi ulaşımını dahil edilmediğinden prefabrike konutun inşaat süreci aşamasının ulaşım (A4) modülünde toplam birincil enerji kullanımı geleneksel konuta kıyasla daha fazla çıkmıştır. Eşit m<sup>2</sup> alan girilen şantiye senaryolarının inşaat/kurulum (A5) modülünde aynı değerleri vermesi ile birlikte makine kullanım saatleri de iki yapım

sisteminde de farklı makinelerin kullanılmasına karşın birbirine yakın değerlere ulaşılmıştır.

**Tablo 36. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının inşaat süreci aşamasındaki dağılımı**

<b>Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler</b>	<b>Prefabrike konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A4:2 Ulaşım</b>	<b>Geleneksel konutta A4 Ulaşım</b>	<b>Prefabrike konutta A5 İnşaat/Kurulum</b>	<b>Geleneksel konutta A5 İnşaat</b>
Dış duvarlar ve cephe	1275	421	789	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	772	525	476	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	675	133	539	-	-
Yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar	5514	2994	4648	-	-
Pencere ve kapılar	319	-	175	-	-
İşçi ulaşımı	0	-	0	-	-
Şantiye senaryoları	-	-	-	34009	34009
Makine kullanım saatleri	-	-	-	2283	2283

Kaynak: Yazar

### 5.6.3. Kullanım Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması

Bu çalışmada kullanım aşaması, bakım ve malzeme değişimi (B1-B5) ve enerji kullanımı (B6) modüllerini içermektedir. B1-B5 modülü binanın yaşam döngüsü boyunca yapı malzemelerinin hizmet ömürlerine bağlı olarak değiştirilmesinden kaynaklanan birincil



enerji kullanımını kapsamaktadır. Tablo 37’deki karşılaştırmaya göre, malzeme bakımı ve değişimi (B1-B5) modüllerinde geleneksel konutun birincil enerji kullanımını prefabrike konuta göre yaklaşık 37 bin MJ daha fazla olduğu görülmektedir. Her iki konutta da “yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar” grubunun en fazla birincil enerji kullanıma sebep olduğu görülmekte ve bunun hizmet ömrü tükenen zemin kaplama malzemelerinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca prefabrike yapıda kullanılan üç camlı ahşap çerçeve pencerenin yalıtım açısından daha iyi performans göstermesi sebebiyle, daha fazla m<sup>2</sup>’ye sahip pencerelerinin olmasına rağmen birincil enerji kullanımını değeri daha az bulunmuştur. Enerji kullanımını (B6) modülü ise ilk karşılaştırmada bahsedildiği gibi her iki yapı sistemini için de ortalama %90’larda bir sonuçla en büyük etki oranına sahip olmuştur. Bu modülde, yapının kullanımındaki elektrik ve doğalgaz tüketimi ele alınmıştır. Birincil enerji kullanımına da en fazla katkı elektrik tüketiminde olmuştur.

**Tablo 37. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının kullanım aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	Geleneksel konutta B1-B5 Malzeme bakımı ve değişimi	Prefabrike konutta B6 Enerji kullanımı	Geleneksel konutta B6 Enerji kullanımı
Dış duvarlar ve cephe	8142	9683	-	-
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	0	0	-	-
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	11149	6371	-	-
Yatay yapılar: giriş, zemin ve çatılar	71513	110596	-	-
Pencere ve kapılar	39813	46223	-	-
Elektrik kullanımı	-	-	3317654	3317654
Yakıt kullanımı (doğalgaz)	-	-	852318	852318

Kaynak: Yazar

#### 5.6.4. Kullanım Ömrünün Sonu Aşamasında Birincil Enerjinin Toplam Kullanımının Karşılaştırılması

Yıkım ve atıkların bertarafına kadar olan süreci kapsayan kullanım ömrünün sonu aşaması (C1-C4) modüllerinde, geleneksel konutun birincil enerji tüketimine katkısı prefabrike konuta kıyasla daha fazla bulunmuştur. Tablo 38'e göre her iki yapım sisteminde de kullanım ömrünün sonu aşamasının birincil enerjinin kullanımına en fazla etkinin "yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar" grubunda olduğu görülmektedir. Prefabrike konutta en fazla etkiye zeminde kullanılan çapraz lamine ahşap neden olurken, geleneksel konutta ise zeminde kullanılan beton neden olmaktadır.

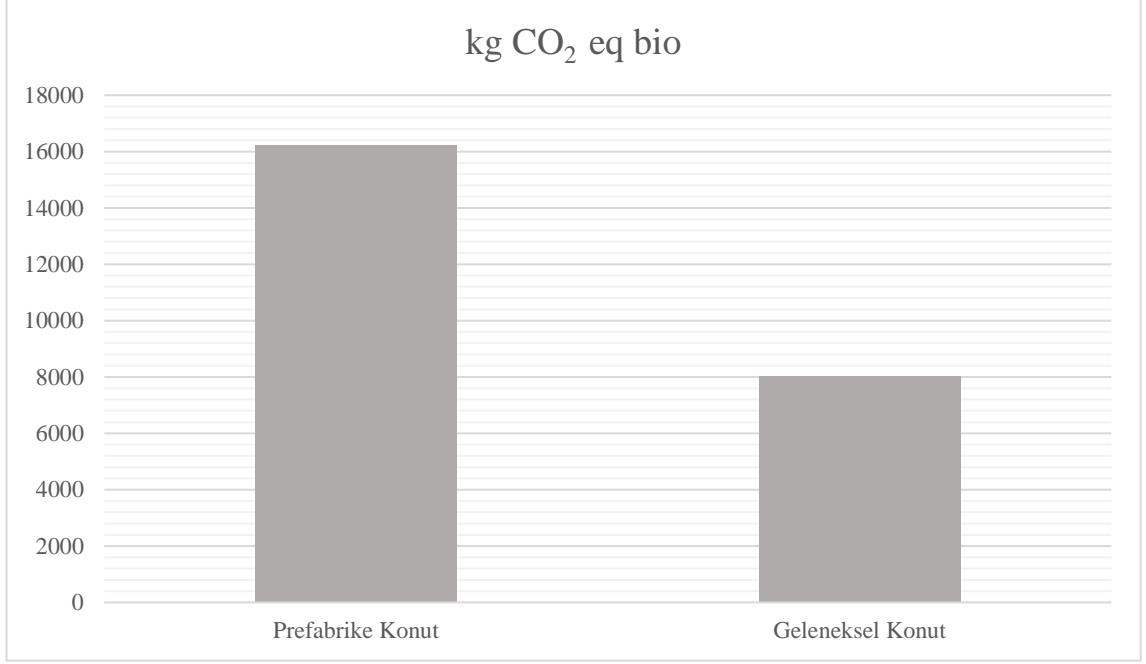
**Tablo 38. Prefabrike ve geleneksel konutta kullanılan yapı bileşeni gruplarının birincil enerjinin toplam kullanımının kullanım ömrünün sonu aşamasındaki dağılımı**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu	Geleneksel konutta C1-C4 Kullanım ömrünün sonu
Dış duvarlar ve cephe	546	507
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	505	0
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	339	203
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	3220	13581
Pencere ve kapılar	131	67

Kaynak: Yazar

#### 5.7. Biyojenik Karbon Depolama Sonuçlarının Karşılaştırılması

Odun, biyoatık gibi biyokütle malzemelerinin yakılması ile oluşan emisyonlar, biyojenik karbon emisyonlarıdır. Biyojenik karbon yakalama ve depolama, CO<sub>2</sub>'nin atmosfere salınmasını engellemeye hizmet etmektedir. Birimi, CML tabanlı yöntemle göre kg CO<sub>2</sub> eq bio ile ifade edilmektedir (One Click LCA, 2021a).



**Şekil 35. Biyojenik karbon depolamanın karşılaştırılması**

Kaynak: Yazar

Ahşap esaslı biyokütle malzemelere dayalı olan etki kategorisinin Şekil 35 ve Tablo 39'daki karşılaştırmasına bakıldığında prefabrike konutun katkısının neredeyse yarı yarıya daha fazla olduğu görülmektedir. Prefabrike konutta, biyojenik karbon depolamayı en fazla etkileyen ahşap esaslı malzemeler “yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar” ve “kolon ve taşıyıcı dikey yapılar” gruplarında kullanılan çapraz lamine ahşap (CLT) ve dikme ve kirişlerde kullanılan yapıştırılmış lamine ahşap (GLT) olurken, geleneksel konutta ise sert ahşap kiriş ve dikmelerin yanı sıra ahşap lambri kaplamalar olmuştur.

**Tablo 39. Biyojenik karbon depolamanın karşılaştırılması**

Konutlarda yapı bileşenleri ve diğer etkenler	Prefabrike konutta A1-A3 Üretim	Geleneksel konutta A1-A3 Üretim
Dış duvarlar ve cephe	1990,53	1516,20
Kolonlar ve taşıyıcı dikey yapılar	1910,37	1515,04
İç duvarlar ve taşıyıcı olmayan yapılar	818,74	1024,03
Yatay yapılar: kiriş, zemin ve çatılar	11106,37	3655,38
Pencere ve kapılar	386,87	306,95

Kaynak: Yazar

## 6. SONUÇ

Bu tez çalışması, tek aileli konut örnekleri üzerinden binalarda farklı yapım sistemlerinin kullanımının 100 yıllık yaşam ömrü perspektifinde yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle, çevresel etkilerinin değerlendirilmesine ve karşılaştırılmasına odaklanmaktadır.

İnşaat sektörünün enerji ve kaynak tüketiminde etkin bir rol oynamasının yanı sıra bina tasarımında yapı malzemelerinin üretim ve inşaat aşamasında oluşan çevresel etkilerin önemli bir kısmını oluşturduğu bilinmektedir. Bir yapının, yaşam ömrü boyunca yapımından yıkılmasına kadar olan süreçte salınan emisyonlar üzerinde önemli etkisi bulunmakta ve bu nedenle inşaat sektörü sürdürülebilirlik açısından kontrol altına alınması ve iyileştirilmesi gereken en önemli sektörlerden biri olarak görülmektedir. Birçok tez ve makale çalışmasında bu sorun ele alınmış ve yapı ve yapı ürünlerinin çevresel etkilerinin belirlenebilmesi adına yaşam döngüsü değerlendirme yönteminin kullanıldığı görülmüştür.

Yaşam döngüsü değerlendirme metodu kullanılarak mimarlık alanında yapılan tez çalışmaları incelendiğinde, değerlendirmenin yapı ürünleri ve bina cephesi ölçeğinde kaldığı ya da yaşam döngüsünün bir kısmı ve tek çevresel etki kategorisi kullanılarak ele alındığı görülmektedir. Yapımında beton, çelik ve ahşap gibi farklı malzemelerin kullanıldığı yapım sistemlerinin beşikten kapıya değerlendirme sonuçlarının karşılaştırılmasına ilişkin örnekler bulunmakla birlikte yapım sistemlerinin yapım sürecine dayalı olarak karşılaştırılmasına ilişkin çalışmaya ihtiyaç duyulması, iki farklı örnek yapı üzerinden yaşam ömürleri boyunca, beşikten mezara, çevresel etkilerinin karşılaştırılmasını içeren çalışmaya zemin hazırlamıştır. Binalardan kaynaklanan çevresel etkilerin nedenlerini anlayabilmek için tüm yaşam döngüsünün dikkate alınması gerekmektedir.

Tez çalışmasında temel problem olarak belirlenen “prefabrike (ön üretim) ve geleneksel (yerinde yapım) sistemlerinin yaşam döngüsü değerlendirme sonuçlarındaki farkların incelenmesi” amacıyla literatür taraması ve örnek yapıların değerlendirmeleri detaylı olarak irdelenerek elde edilen bulgulardan çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan literatür taramasında, yapım sistemleri, standartlara dayalı yaşam döngüsü değerlendirme metodu detaylı olarak irdelenmiştir. İncelemeler sonucunda binalarda yaşam döngüsü değerlendirme yöntemine bakıldığında, bina tasarım aşamasında yapı malzemelerinin önemli olduğu kadar yapım sistemine karar verilmesinin önemine değinilmiştir ve yalnızca üretim aşamasının (A1-A3) dikkate alınmamasının, her durumda inşaat aşamasının da (A4-A5) dikkate alınmasının gerektiği görülmektedir.

Prefabrike yapım sistemleri birçok ülkede konutlar için geleneksel olarak yapılan yerinde yapım sistemlerine alternatif olarak kullanılmaktadır. Prefabrike konut inşaatı, malzeme ve zaman açısından belirli avantajlara sahip olsa da, geleneksel yapım sisteminden farklı bir altyapı gerektirmesiyle iki yöntem arasında çevresel etkilerin değerlendirilmesine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında her iki yapım yöntemini kapsayacak şekilde yaşam döngüsü değerlendirme metodları incelenmiş olup yapının yaşam ömrü boyunca çevresel etkilerinin değerlendirilebilmesi için ahşap yapı malzemeleriyle üretilen prefabrike ve geleneksel inşaat firmalarından alınan verilere dayanarak ve çeşitli varsayımlarda bulunarak 7 çevresel etki kategorisi özelinde değerlendirme bulgularına ulaşılmıştır. Bu yöntem için “One Click LCA” aracı kullanılarak binaların yaşam ömrü 100 yıl olarak varsayılmıştır. Bina için yapılan yaşam döngüsü değerlendirme sonucunda, kullanılan araçta yer alan; küresel ısınma potansiyeli, asitleşme, ötrofikasyon, ozon delme (tüketme) potansiyeli, alt atmosferde (fotokimyasal) ozon oluşumu, birincil enerji kullanımı ve son olarak biyojenik karbon depolama etkilerinin değerleri bulunmuştur.

Tez çalışmasında bulunan bulgulara göre, yöntemde belirtilen sistem sınırları doğrultusunda değerlendirmeye alınan etki kategorilerinin geneline bakıldığında prefabrike yapım sisteminde oluşan ortalama etkilerin geleneksel yapım sistemine kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Önceki tez ve makale çalışmalarında, üzerinde durulan küresel ısınma potansiyeli etkileri değerlendirildiğinde; prefabrike konut için CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyonları 100,30 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>/yıl iken geleneksel konutun CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyonları 104,88 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>/yıl olarak hesaplanmıştır.

Bulgular çevresel etki kategorileri sonuçları içerisinde TS EN 15978 (2012) standardına dayalı olarak yaşam döngüsü aşamalarına göre irdelendiğinde, bütün etki kategorilerinde binaların kullanım aşamasında yer alan enerji kullanımı modülünün en fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir. Enerji kullanımı sonucuna ulaşabilmek için ilgili kurumların

raporlarından edinilen yıllık elektrik ve doğalgaz tüketim verilerinden yararlanılmıştır. Bu modülü, özellikle döşeme malzemesindeki farklılıklara dayanarak üretim aşaması takip etmektedir. 100 yıllık yaşam ömrü referans olarak verilmesi dolayısıyla, değerlendirme aracında seçilen malzemelerin sunduğu hizmet ömürleri doğrultusunda, iç mekânda kullanılan kaplama malzemelerinin bakım ve değişime gereksinim duymalarından ötürü kullanım aşamasında yer alan malzemelerin bakım ve değişimi modülü de çevresel etkilerin yaşam döngüsü aşamalarına etkisinde önemli bir yer kaplamaktadır.

Bulgular karşılaştırıldığında değerlendirmeye alınan çevresel etkilerin sonuçlarına göre, üretim aşaması ve inşaat süreci aşamasındaki ulaşım ve inşaat/kurulum modüllerinin belirleyici ölçüde katkı sağladığı görülmektedir. Üretim aşamasında, ahşap prefabrike yapım sisteminde kullanılan, fabrikada üretilen yapısal ahşap elemanların geleneksel sistemde kullanılan ahşap elemanlara kıyasla ağırlıklarının fazla olmasına karşın EPD'lere dayalı olarak malzemelerin çevresel etki değerlerinin salınımına katkısının daha az olmasıyla birlikte, geleneksel sistemde tercih edilen betonarme döşemenin etkisinin de önemli oranda olduğu görülmüştür. Karşılaştırmada ele alınan inşaat süreci aşamasında ise, prefabrike yapım sisteminde ön üretimle üretilen yapı elemanlarının yapı malzemelerine ek olarak, fabrikadan şantiyeye taşınmasının da çevresel etkilere neden olmasına karşın birleştirilmek üzere hazır elemanların şantiyeye gelmesinin faydası olarak inşaat süresinin kısılması ve bu durumun işçilerin ulaşımını da etkilemesiyle birlikte inşaat süreci aşaması (A4 ve A4:2) modüllerinde de prefabrike yapım sisteminin daha az çevresel etkiye neden olduğu görülmektedir. İnşaat/kurulum (A5) modülünü etkileyen sahadaki makine kullanım saatleri için prefabrike yapım sisteminde vinç kullanımının etkisinin önemli ölçüde olduğu görülmüş ve geleneksel yapım sisteminde şantiyede kullanılan makine kullanım sürelerinin fazla olmasına karşın birbirine yakın çevresel etkide buldukları sonucuna ulaşılmıştır.

Değerlendirme süreci ele alınarak sonuçlara bakıldığında; envanter analizi için Türkiye tabanlı çevresel verilerin yetersizliği dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, kullanılan aracın malzemelerin çevresel verilerini Türkiye konumuna göre entegre etmesinden yararlanılmıştır. Bu nedenle varsayıma dayalı yaklaşımlar değişken sonuçlar oluşturabileceğinden, birçok alanda geniş çaplı ürün yelpazesiyile Türkiye tabanlı çevresel

verilerin ulaşılabilir olmasının gerekli olduğu görülmüştür. İnaşat sektöründe yaşam döngüsü değerlendirme yönteminin kullanımının sağlanması yapıda planlanan ve n görülen verilere dayanarak birçok yapının çevresel etkilerinin tasarımı aşamasında belirlenebilmesi ve bulunan sonuçlara göre yapım sürecine karar verilmesine olanak sağlayabilir.

Sonuçlar ilk olarak, önceki tez çalışmalarında edinilen bilgilere uygun olarak yapıda ahşap esaslı malzeme kullanımının, beton esaslı malzemelere kıyasla çevresel etkileri üzerinde büyük ölçüde daha düşük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmanın ana probleminin sonucuna bakıldığında ise prefabrike yapım sisteminin yaygınlaşmasının, inşaat sektöründeki olumsuz çevresel etkilerin azaltılması yönünde etkili bir yapım sistemi olacağı anlaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında, tek aileli tek katlı iki konut üzerinden yapım sistemlerinin çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilerden de yararlanılarak ileride yapılacak çalışmalarda daha büyük ölçekli yapılarda yapım sistemlerinin etkilerinin değerlendirilmesi umulmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abd Rashid, A., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 244-248.
- Achenbach, H., Wenker, J., & Rüter, S. (2018). Life cycle assessment of product-and construction stage of prefabricated timber houses: a sector representative approach for Germany according to EN 15804, EN 15978 and EN 16485. *European journal of wood and wood products*, 76(2), 711-729.
- Atmaca, A. (2016). Life-cycle assessment and cost analysis of residential buildings in South East of Turkey: part 2—a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 925-942.
- Ayazoğlu, İ. (2003). *Prefabrike panel sistemlerle konut üretiminde mimari tasarım sorunları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bahramian, M., & Yetilmezsoy, K. (2020). Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy and Buildings*, 219.
- Bare, J. (2011). *TRACI 2.0: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*. Clean Technologies and Environmental Policy .
- Bell, P. (2009). *Kiwi prefab: Prefabricated housing in New Zealand: An historical and contemporary overview with recommendations for the future*. Master Thesis, Victoria University of Wellington.
- Boafo, F., Kim, J.-H., & Kim, J.-T. (2016). Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways. *Sustainability*, 6-7.
- Borgström, E. (2016). *Design of timber construction Volume 1: Structural aspects of timber construction*. Stockholm: Swedish Wood.
- Bruijn, H., Duin, R., Huijbregts, M., Guinee, J., Gorree, M., Heijungs, R., . . . Kleijn, R. (2004). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers.
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 379-388.
- Chidiac, S. E. & Marjaba, G. E., (2016). Sustainability and resiliency metrics for buildings—Critical review. *Building and Environment*, 101, 116-125.
- Ching, F. D. (2014). *Mimarlık Biçim, Mekân ve Düzen*. İstanbul: YEM Yayın.
- CML. (2021). *CML-IA Characterisation Factors*. CML-IA Department of Industrial Ecology - Characterisation Factors: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>. Erişim tarihi: 11 Aralık 2021
- Corbusier, L. (2011). *Modulor*. İstanbul: Yem Yayınları.
- Crawford, R. H. (2011). *Life cycle assessment in the built environment*. Taylor & Francis.
- Curran, M. A. (1996). *Environmental life-cycle assessment*. New York: McGraw-Hill.



- Çelebi, G. (2003). Environmental discourse and conceptual framework for sustainable architecture. *Gazi University Journal of Science*, 16(1), 205-216.
- Çelebi, G. Ü., Gültekin, A. B., Harputlugil, G. U., Bedir, M., & Tereci, A. (2008). *Yapı-Çevre İlişkileri*. İstanbul: TMMOB Mimarlar Odası Sürekli Mesleki Gelişim Merkezi Yayınları-10.
- Çetiner, İ., & Metin, B. (2011). Enerji etkin konut yenilemelerinde enerji tüketimi ve yaşam dönemi maliyetlerinin değerlendirilmesi: İstanbul örneği. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiri Kitabı*, (s. 865-887).
- Deniz, Ö. Ş. (1999). *Çok katlı konut tasarımında, kullanıcıların esneklik taleplerini karşılayacak yapı elemanlarının seçimine yönelik bir karar verme yaklaşımı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dodoo, A., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2009). Carbon implications of end-of-life management of building materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(5), 276-286.
- Dodoo, A., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2014). Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems. *Energy and Buildings*, 82, 194-210.
- EC-JRC. (2010). Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment (LCIA) models and indicators. *ILCD Handbook - International Reference Life Cycle Data System*. European Commission - Joint Research Center.
- EC-JRC. (2011). Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment (LCIA) models and indicators. *ILCD Handbook - International Reference Life Cycle Data System*. European Commission - Joint Research Center.
- Edward, A., & Rand, P. (2016). *Architectural detailing: function, constructibility, aesthetics*. John Wiley & Sons.
- EPDK. (2018). *Doğal Gaz Piyasası Sektör Raporu*. Ankara: Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- Erturan, B., & Eren, Ö. (2012). Modüler Yapım Tekniği İle Bina Etkinliğini Ve Verimliliğini Geliştirme Yaklaşımının Değerlendirilmesi. *E-Journal of New World Sciences Academy*.
- ETKB . (2016). *Bütünleşik bina tasarımı yaklaşımı - Türkiye ortamı ve koşullarına uyarlama raporu*. Ankara: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Fay, R., Graham, T., & Usha, I. (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Build Res Inf*, 31-41.
- Gervasio, H., & Dimova, S. (2018). *Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*. EC EUR 29123 EN, European Union.
- Gibb, A., & Isack, F. (2003). Re-engineering through pre-assembly: client expectations and drivers. *Building research & information*, 31(2), 146-160.
- Goetz, K., Moehler, K., & Natterer, J. (1992). *Timber Design and Construction Sourcebook*. New York: McGraw-Hill Publishing Company.

- Gorgolewski, M. (2005). The potential for prefabrication in United Kingdom Housing to Improve Sustainability. Smart and Sustainable Built Environments. *Smart & Sustainable Built Environments*, 119-128.
- Green, M., & Taggart, J. (2020). *Tall wood buildings: Design, construction and performance*. Birkhäuser.
- Guardigli, L., Monari, F., & Bragadin, M. (2011). Assessing environmental impact of green buildings through LCA methods: A comparison between reinforced concrete and wood structures in the European context. *Procedia Engineering*, 21,, 1199-1206.
- Gustavsson, L., Joelsson, A., & Sathre, R. (2010). Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*, 230-242.
- Gültekin, A. B., & Çelebi, G. (2016). Yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi kapsamında yapı ürünlerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yönelik bir model önerisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*(3), 1-36.
- Hafner, A., Winter, S., & Takano, A. (2012). Wooden products as building material in life cycle analysis . *Proceedings of the third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2012)* (s. 1530-1537). Taylor & Francis Group.
- Hasol, D. (2014). *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*. İstanbul: YEM Yayın.
- Hegger, M., Drexler, H., & Zeumer, M. (2012). *Adım adım yapı malzemeleri*. YEM Yayın.
- Heijungs, R., & Guinée, J. (2012). An Overview of the Life Cycle Assessment Method - Past, Present, and Future. M. A. Curran içinde, *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products* (s. 15-41). Cincinnati: Scrivener Publishing.
- Hollberg, A., & Ruth, J. (2016). LCA in architectural design—a parametric approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 943-960.
- Horne, R., Grant, T., & Verghese, K. (2009). *Life cycle assessment: principles, practice, and prospects*. Melbourne: CSIRO Publishing.
- IEA. (2019). *Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. Global Status Report for Buildings and Construction.
- Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*, 204.
- Kim, D. (2008). *Preliminary Life Cycle Analysis of Modular and Conventional Housing in Benton Harbor, MI*. PhD Thesis, University of Michigan Ann Arbor, Australia.
- Kim, J.-J., & Rigdon, B. (1998). *Sustainable architecture module: Qualities, use, and examples of sustainable building materials*. National Pollution Prevention Center for Higher Education.
- Klöpffer, W. (2006). The role of SETAC in the development of LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), 116-122.

- Koman, İ., & Gür, N. V. (2014). Modüler Yapımda Güncel Yaklaşımlar. *Mimarist*, 40-44.
- Kotaji, S., Schuurmans, A., & Edwards, S. (2003). *Life cycle assessment in building and construction. A state-of-the-Art report*. SETAC Press.
- König, H., & Cristofaro, L. (2012). Benchmarks for life cycle costs and life cycle assessment of residential buildings. *Build Res Inf*, 558-580.
- Kuittinen, M., Ludvig, A., & Weiss, G. (2013). *Wood in Carbon Efficient Construction: Tools, Methods and Applications*. Finland: Hämeen Kirjapaino Oy.
- Kuzman, K., & diğ., v. (2010). Glued Laminated Timber in Architecture. *Drvna Industrija*, 197-204.
- Lara, J., & Chi Sun, P. (2014). Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. *Automation in Construction*, 39, 195-202.
- Larsen, H. J., & Thelandersson, S. (2003). *Timber Engineering*. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Lehmann, S. (2013). Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. *Sustainable Cities and Society*, 57-67.
- Li, Z., Shen, G., & Alshawi, M. (2014). Measuring the impact of prefabrication on construction waste reduction: An empirical study in China. *Resources, conservation and recycling*, 91, 27-39.
- Macdonald, A. (1997). *Structural Design for Architecture*. Oxford: Architectural Press.
- Margni, M., & Curran, M. (2012). Life cycle impact assessment. M. Curran içinde, *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products* (s. 67-99). Ohio: Scrienver Publisging LLC.
- Mayo, J. (2015). *Solid wood: case studies in mass timber architecture, technology and design*. Routledge.
- Midon, M., Pun, C., Tahir, H., & Kasby, N. (1996). *Construction manual of prefabricated timber house*. Forest Research Institute Malaysia.
- Modular Building Institute. (2011). *Permanent Modular Construction 2011 Annual Report*. The Voice of Commercial Modular Construction.
- Monteiro, H., & Freire, F. (2012). Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy and Buildings*, 47, 572-583.
- Navaratham, S., Ngo, T., Gunawardena, T., & Henderson, D. (2019). Performance review of prefabricated building systems and future research in Australia. *Buildings*, 38.
- Nwodo, M., & Anumba, C. (2019). A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach. *Building and Environment*, 162.
- One Click LCA. (2021a). *Life Cycle Assessment software FAQ*. Erişim adresi: <https://www.oneclicklca.com/support/faq/>. Erişim tarihi: 11 Aralık 2021

- One Click LCA. (2021b). <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015256560-What-is-an-EPD->. Erişim adresi: <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015256560-What-is-an-EPD->. Erişim tarihi: 11 Aralık 2021
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and building materials*, 23(1), 28-39.
- Özeler Kanan, N., Gültekin, A., & Çelebi, G. (2015). Yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi kapsamında enerji verimli cephe sistemlerine ilişkin bir literatür araştırması. *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, (s. 858-865). Ankara.
- Öztank, N. (2004). Orta yükseklikteki (4-8 kat) konut yapılarında ahşap teknolojisinin uygulanabilirliği. *Doktora Tezi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Öztaş, S. (2014). *Türk yapı malzemesi sektörü için yaşam döngüsü etki değerlendirmesine yönelik bir model önerisi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Passer, A., Kreiner, H., & Maydl, P. (2012). Assessment of the environmental performance of buildings: a critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings. *Int J LCA*, 17(9), 1116-1130.
- Paulsen, J. (2001). *Life cycle assessment for building products- The significance of the usage phase*. Doctoral Thesis, Kungliga Tekniska Hogskolan, Stockholm.
- Petrovic, B. M. (2019). Life cycle assessment of a wooden single-family house in Sweden. *Applied Energy*, 251.
- Peuportier, B. (2001). Energy and Buildings. *Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context*, 33(5).
- Porteous, J., & Kermani, A. (2007). *Structural Timber Design to Eurocode 5*. İngiltere: Blackwell Publishing.
- Quale, J., Eckelman, M., Williams, K., Sloditskie, G., & Zimmerman, J. (2012). Construction matters: comparing environmental impacts of building modular and conventional homes in the United States. *Journal of industrial ecology*, 16(2), 243-253.
- Reidelbach, J. (1972). *Modular Housing. 1972: Statistics & Specifics*. Modco.
- Reiter, S. (2010). Life cycle assessment of buildings-a review. *Proceedings of ArcelorMittal International Network in Steel Construction 2010: Sustainability Workshop*. Bruxelles: ArcelorMittal & ArGENCo.
- Selçuk, G., & Pasinlioğlu, S. (2020). Türkiye’de Hanehalkı Ve Konut Büyüklüklerinin, Doğalgaz Tüketimi Kapsamında Değerlendirilmesi . *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1861-1877.
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871-875.

- Smith, R., Hamedani, M., & Griffin, G. (2018). Developing Timber Volume Calculators Through a Comparative Case Study Analysis of Wood Utilization in On-Site and Off-Site Construction Methods. *Technology/ Architecture+ Design*, 2(1), 55-67.
- Staib, G., Dörrhöfer, A., & Rosenthal, M. (2008). *Components and systems: Modular Construction: Design, Structure, New technologies*. Edition Detail.
- Steinhardt, D., Manley, K., & Miller, W. (2013). *Reshaping housing: the role of prefabricated systems*.
- Şanlı, E. (2020, Ağustos). *Çapraz Lamine Ahşabın Strüktürel Kullanımının ve Performans Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Takano, A., Hafner, A., Linkosalmi, L., Ott, S., Hughes, M., & Winter, S. (2015). Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 299-312.
- Tankut, N., & Sözen, E. (2014). Ülkemiz orman endüstrisinde mühendislik ürünü ağaç malzemeleri ve orman varlığına etkileri. *II. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*, (s. 795-800). Isparta.
- Taygun, G. (2005). *Yapı ürünlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesine yönelik bir model önerisi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TEİAŞ. (2021, Aralık 13). *2021 Yılı Aylık Elektrik Üretim-Tüketim Raporları*. Erişim adresi: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/> , <https://gazelektrik.com/faydali-bilgiler/elektrik-tuketimi> adresinden alındı
- Thormark, C. (2006). The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment*, 41(8), 1019-1026.
- Tokgöz, H., & Koçak, Y. (2008). Endüstrileşmiş Bina Tasarımında Modüler Koordinasyonun Rolü. *Politeknik Dergisi*, 11(3), 275-284.
- Tokgöz, H., & Koçak, Y. (2009). Modüler Koordinasyonun Bina Tasarımında Uygulanması. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*(20), 83-92.
- Tokyay, V. (2017). *Mimarlık ve Ahşap Yapı İlişkileri*. İstanbul: Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi.
- TS EN 14080. (2013). *Ahşap Yapılar -Tutkallı lamine kereste ve tutkallı masif ahşap-Özellikler*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 15804. (2012). *Yapıların sürdürülebilirliği - Mamullere ilişkin çevresel beyanlar - Yapı mamullerinin mamul kategorisi için ana kurallar*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 15978. (2012). *Yapılarda sürdürülebilirlik - Binaların çevresel performansının değerlendirilmesi - Hesaplama yöntemi*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN ISO 14025 (2007). *Çevre etiketleri ve beyanları - Tip iii çevre beyanları - Prensipler ve prosedürler*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü
- TS EN ISO 14040:2006. (2007). *Çevre yönetimi - Hayat boyu değerlendirme - İlkeler ve çerçeve*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü. ISO 14040:2006 Environmental

- Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=37456) adresinden alındı
- TS EN ISO 14044:2007. (2007). *Çevre yönetimi - Hayat boyu değerlendirme - Gereker*. Ankara: Türk Standardartları Enstitüsü.
- Tuna Sezer, G. (2015). *Modüler Hücre Yapım Sistemlerinin Çok Katlı Yapılarda İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- UNEP. (2003). *Evaluation of environmental impacts in life cycle assessment*. United Nations Publication.
- UNEP. (2021). *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi.
- Van Gassel, F., & Roders, M. (2006). A Modular Construction System, How to design its Production Process. *International Conference On Adaptable Building Structures*, (s. 1-13). Eindhoven.
- Velamati, S. (2012). Feasibility, benefits and challenges of modular construction in high rise development in the United States: a developer's perspective. *PhD Thesis*. Massachusetts Institute of Technology.
- Vural, N. (2005). *Doğu Karadeniz Bölgesi Kırsal Yerleşmelerinde Ahşap Esaslı Prefabrike Sistem Kullanımı Üzerine Bir Modelleme*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Wegener, G., Pahler, A., & Tratzmiller, M. (2010). Bauen mit Holz= Aktiver Klimaschutz. Ein Leitfaden. *Holzforschung Muenchen: Munich, Germany*.
- Woo, J. (2017). A post-occupancy evaluation of a modular multi-residential development in Melbourne, Australia. *Procedia Engineering*, 180, 365-372.
- Wuppertal Institute. (2018). *Training Handbook: Sustainable Construction*. Germany: Wuppertal Institute.
- Yılmaz, D. G. (2011). *Ahşap kompozit elemanlarla oluşturulmuş geniş açıklıklı sistemlerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yuvaraj, V., & Dharman, R. (2016). Present application of resource management in prefabricated and in-situ construction. *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ)*.
- Zampori, L., Saouter, E., Castellani, V., Schau, E., Cristobal, J., & Sala, S. (2016). *Guide for interpreting life cycle assessment result*. Luxembourg: JRC Science Hub, EUR 28266 EN.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Huriye Önal

### EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2018, KTO Karatay Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyetleri : Önal, H., Tereci, A., (2021). Yapılı çevrede yaşam döngüsü değerlendirme örneklerinin tek aileli konut özelinde irdelenmesi, 5. Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi. Ankara. (Tam metin bildiri/ Sözlü Sunum)

Mars 2050 Yaşam Alanı Fikir Yarışması – Bursa Teknik Üniversitesi – Bursa Bilim ve Teknoloji Merkezi (1. Mansiyon Ödülü) (Temmuz 2020)

### İŞ DENEYİMİ

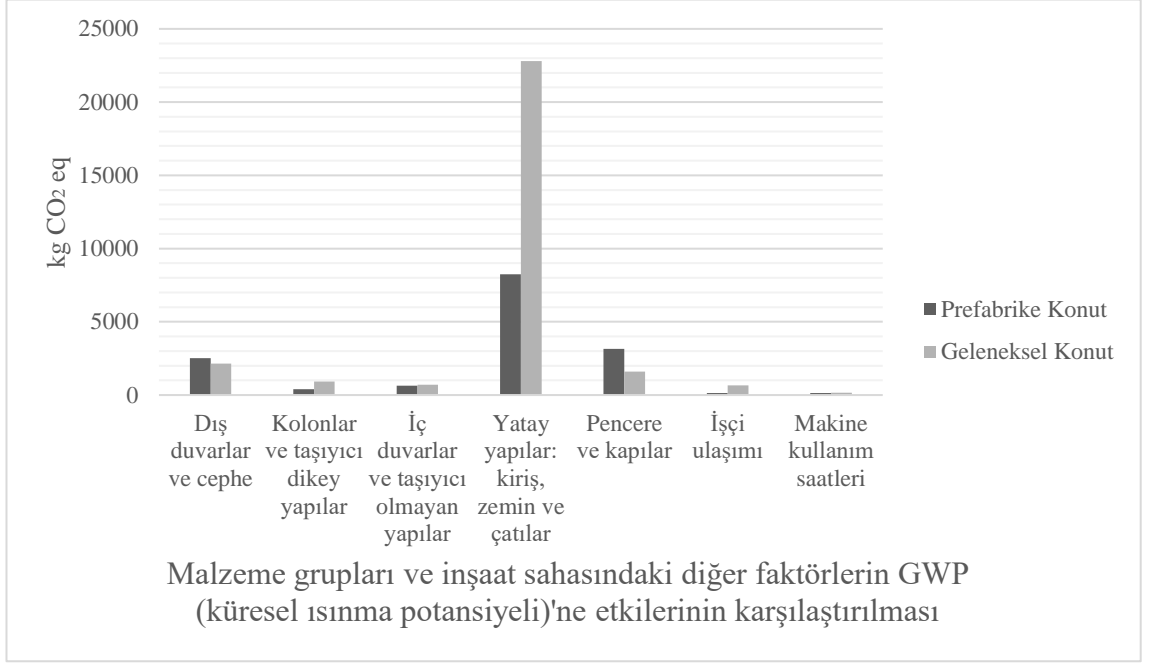
Stajlar : 2016, Stajyer Mimar, Bayır Diamond İnşaatı. 2017, Stajyer Mimar, MSA Mimarlık, Ankara.

Projeler :

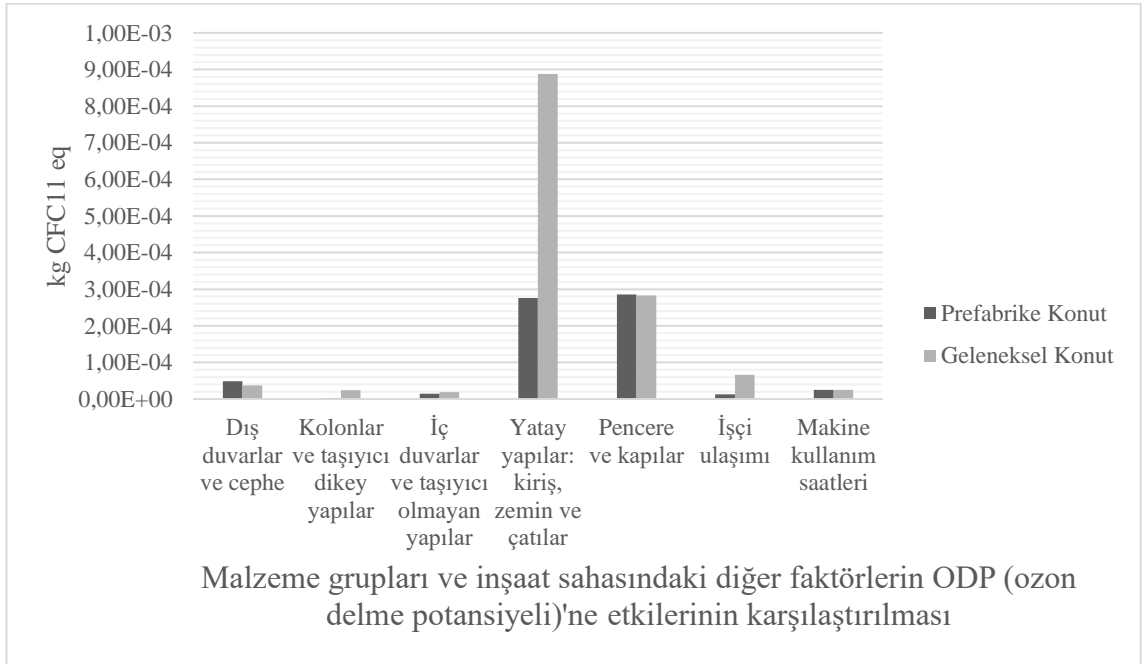
Çalıştığı Kurumlar : 2019 – 2021, Proje Asistanı, KTO Karatay Üniversitesi  
2021 – ..., Araştırma Görevlisi, KTO Karatay Üniversitesi

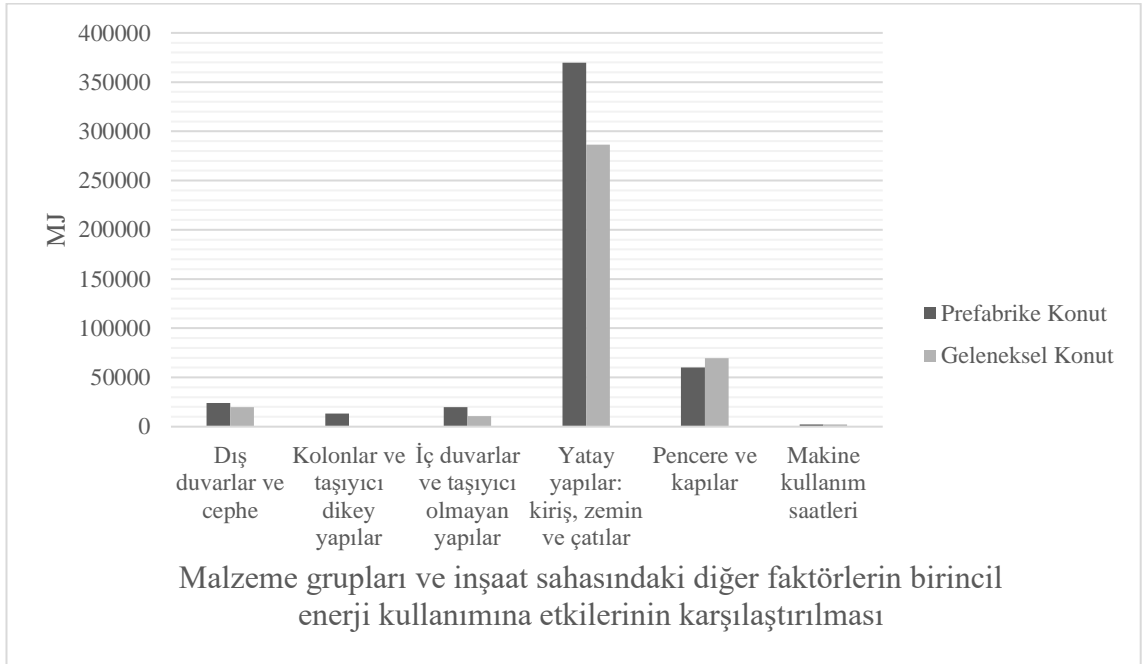
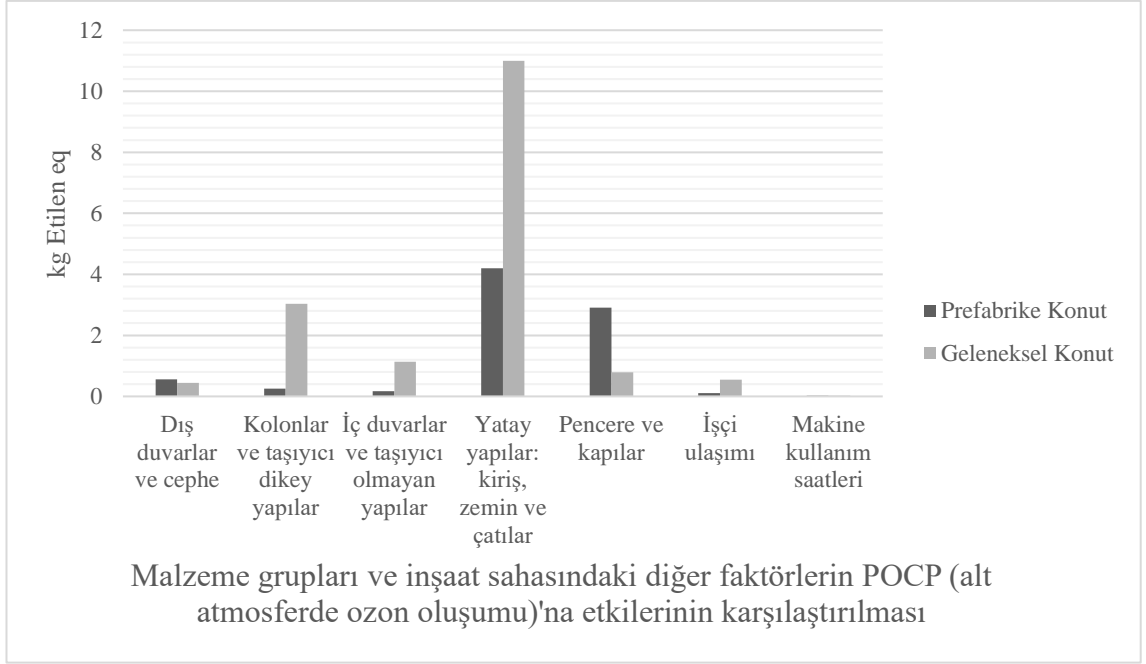
Tarih: 21 Ocak 2022

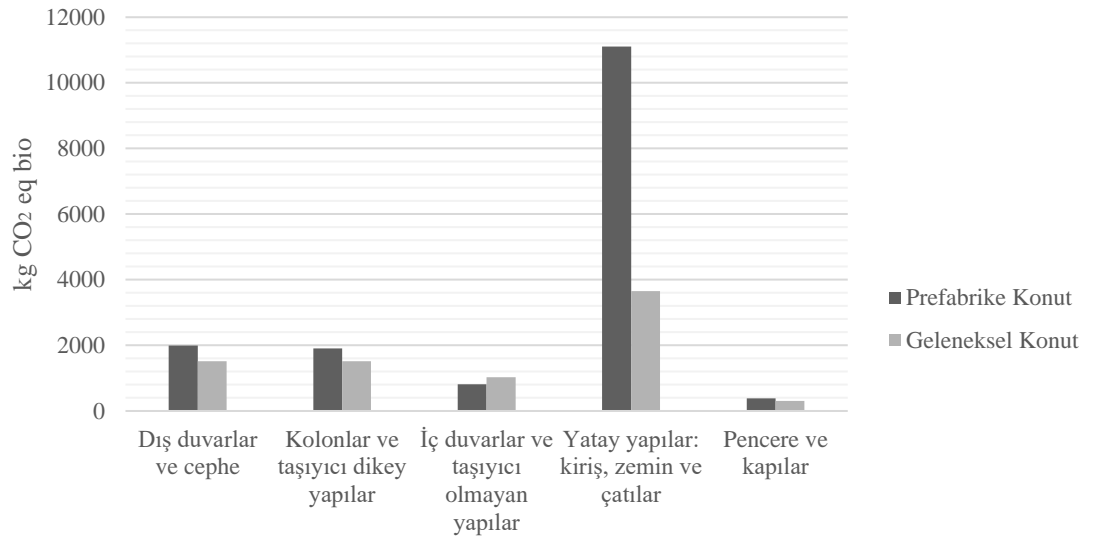
## EK 1. Malzeme gruplarının ve inşaat sahasındaki diğer faktörlerin çevresel etkilerinin karşılaştırılması





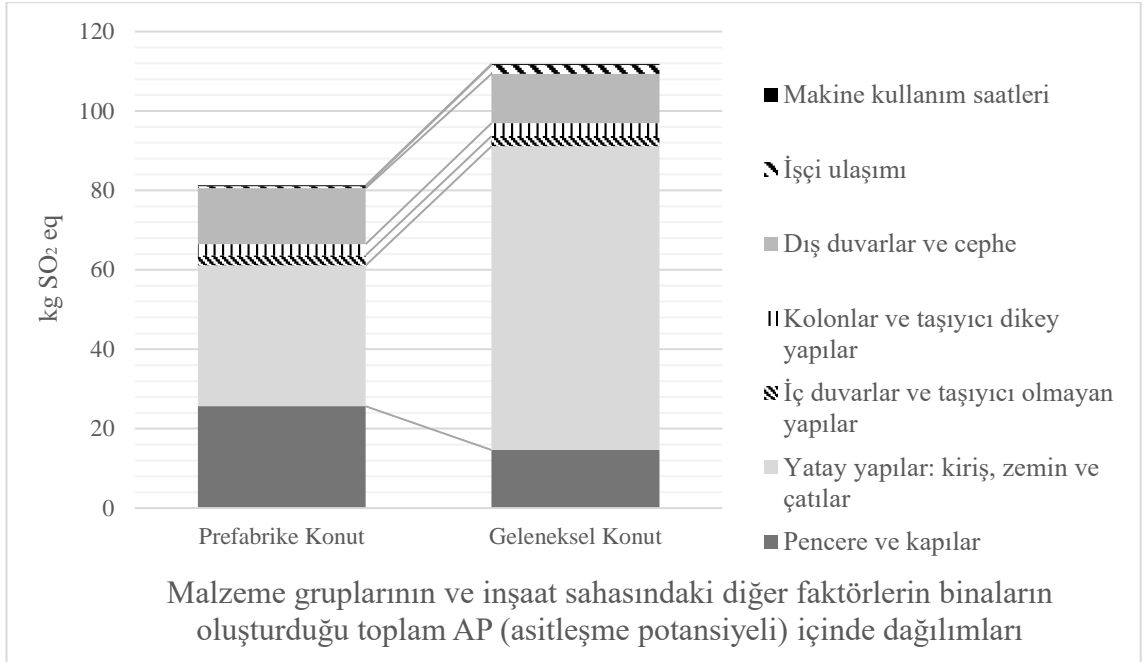
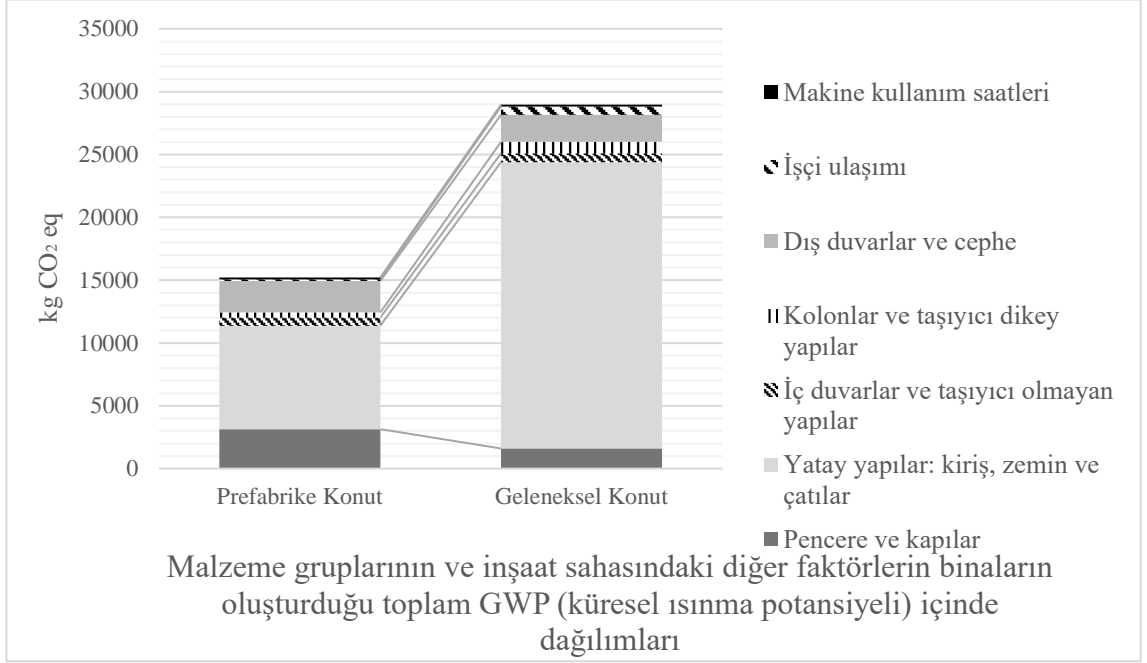


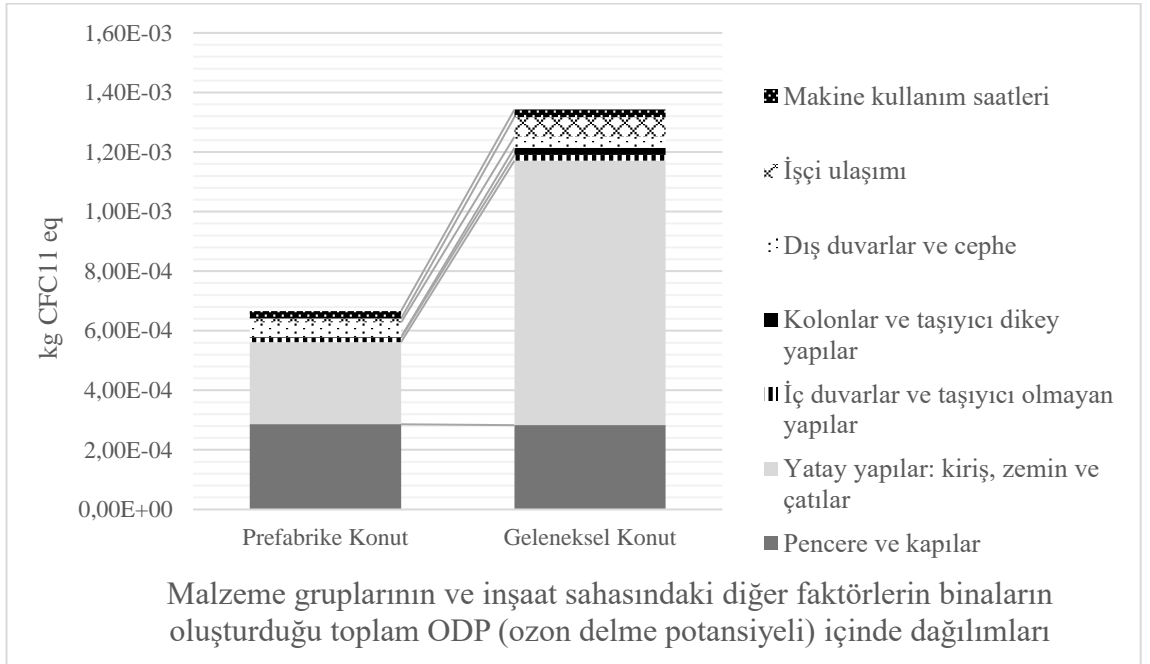
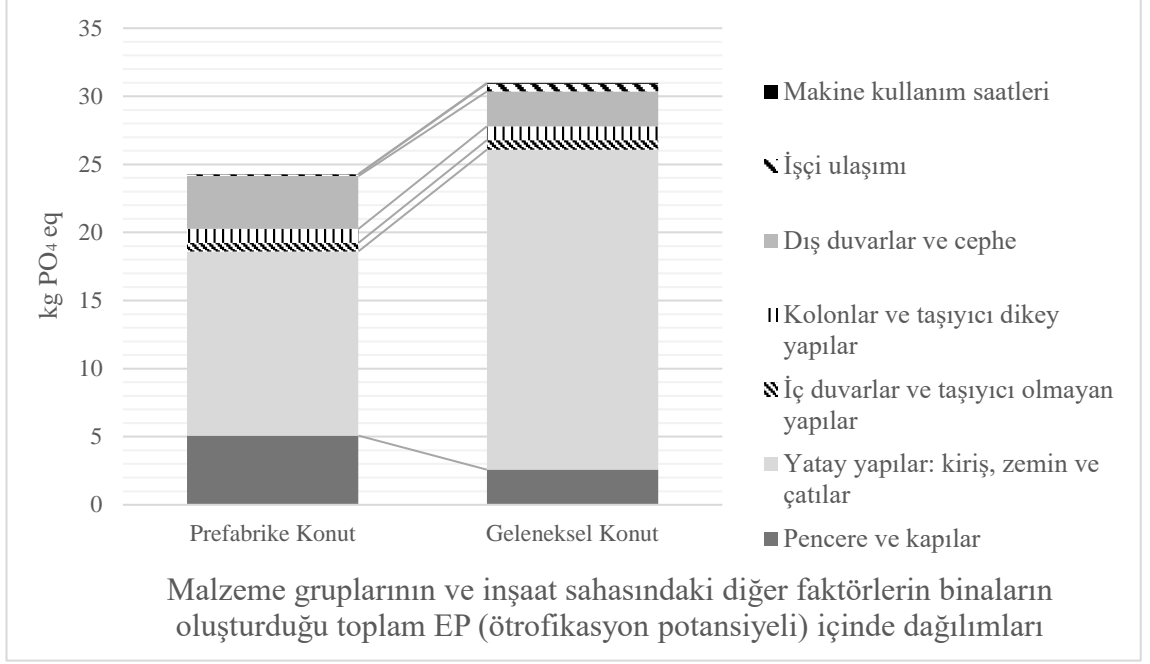


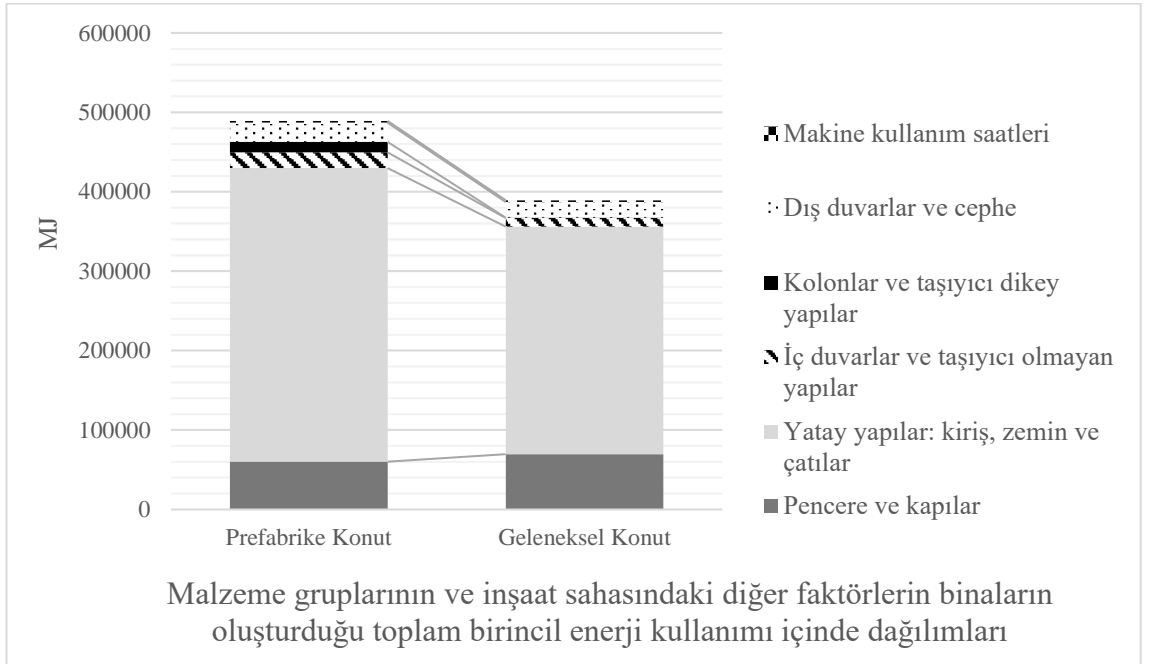
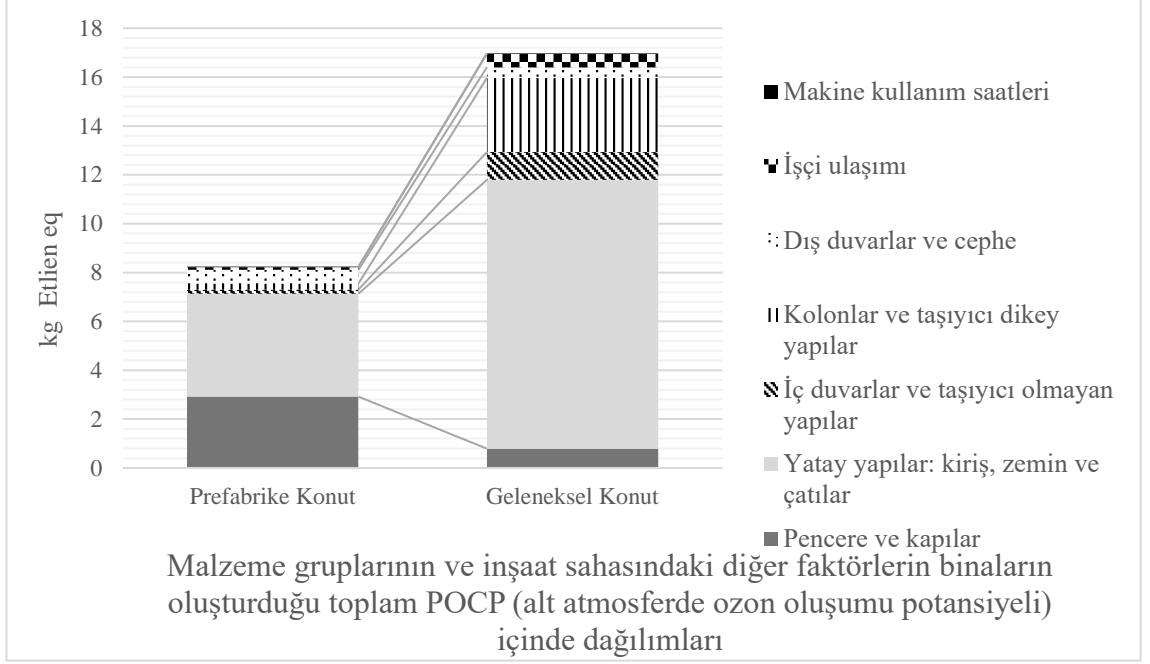


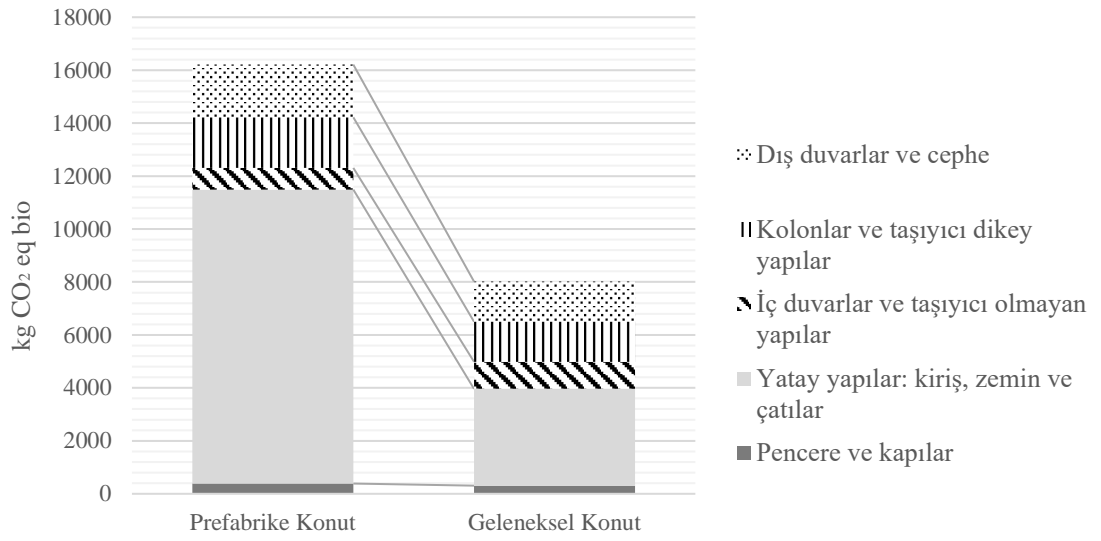
Malzeme grupları ve inşaat sahasındaki diğer faktörlerin biyojenik karbon depolamaya etkilerinin karşılaştırılması

## EK 2. Malzeme gruplarının ve inşaat sahasındaki diğer faktörlerin binaların oluşturduğu toplam etkiler içinde dağılımı









Malzeme gruplarının ve inşaat sahasındaki diğer faktörlerin binaların oluşturduğu toplam biyojenik karbon depolama içinde dağılımları