



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **KONUT BİNALARI İÇİN ISI YALITIM MALZEMESİNİN VE OPTİMUM YALITIM KALINLIĞININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM**

**KEMAL FERİT ÇETİNTAŞ**  
İSTANBUL AREL ÜNİVERSİTESİ

**A. ZERRİN YILMAZ**  
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

# KONUT BİNALARI İÇİN ISI YALITIM MALZEMESİNİN VE OPTİMUM YALITIM KALINLIĞININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM

*A New Approach for Determination Optimum Thermal Insulation Optimum Thermal Insulation Thickness and Material for Residential Buildings*

**Kemal Ferit ÇETİNTAŞ**  
**Zerrin YILMAZ**

## ÖZET

Dünya genelinde gerçekleşen enerji tüketimi ve sera gazı salımının önemli bir kısmının binalardan kaynaklandığı bilinmektedir. Binalarda enerji verimliliğinin sağlanması, enerji tüketimi kaynaklı gerçekleşen çevresel ve ekonomik sorunların etkisinin azaltılmasında büyük önem taşımaktadır. Bina kabuğunun termofiziksel özellikleri binanın enerji tüketimi ve sera gazı salımı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bina kabuğuna ısı yalıtımı uygulanması enerji tasarrufu sağlanması açısından sıklıkla başvurulan stratejilerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların büyük bir kısmını ısı yalıtım malzemesi kalınlığının enerji verimliliği ve maliyet açısından optimum yalıtım kalınlığının bulunmasına yönelik çalışmalar oluşturmaktadır. Ancak gerek söz konusu çalışmalar gerekse enerji verimliliği ve ısı yalıtımına yönelik standartlar bina kabuğunun ısı iletim katsayısına odaklanmakta ısı yalıtım malzemesinin yaşam döngüsü sürecinde gerçekleşen enerji tüketimi ve sera gazı salımı gibi önemli hususları dikkate almamaktadır. Isı yalıtım malzemelerinin oluşum enerjilerinin ve üretim aşamasında gerçekleşen karbon salımlarının açısından ciddi farklar olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada ısı yalıtım malzemesinin ve optimum yalıtım kalınlığının yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet açısından değerlendirilerek optimum sonuçların elde edileceği yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım çok katlı bir konut binasına uygulanarak İstanbul, İzmir ve Erzurum gibi farklı iklim bölgeleri için yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet açısından optimum değerlere sahip yalıtım malzemesi ve kalınlığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, İstanbul ve İzmir için XPS ve cam yünü, Erzurum için ise taş yünü ısı yalıtım malzemeleri optimum yaşam dönemi performansına sahip malzemeler olarak ön plana çıkmıştır. Ayrıca çalışma sonuçlarına göre ısı yalıtım ve binalarda enerji performansına yönelik standartların malzemelerin yaşam döngüsünü dikkate alacak şekilde revize edilmesi tavsiye edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Isı yalıtım malzemesi, optimum yalıtım kalınlığı, yaşam döngüsü enerji tüketimi, yaşam döngüsü karbon salımı, yaşam dönemi maliyeti.

## ABSTRACT

Energy-efficient retrofitting of buildings is an important topic for the world's future. Adding thermal insulation to the building envelope is the most common and well-known measure, but existing strategies for energy-efficient retrofits do not consider life cycle energy consumption and carbon emissions of the insulation. This paper introduces a new approach for selecting the most suitable insulation material based on its thickness and life cycle energy, carbon emission, and cost. This approach was applied to a multi-storey residential building located in Turkey's three different climate regions and the results have been summarized in this paper. Results suggest that optimum insulation materials are XPS and glass wool in İstanbul (mild and humid climate) and İzmir (hot and humid climate) and stone wool in Erzurum (cold climate). These results also suggest that insulation standards be revised to take into account the life cycle effects of insulation materials.

**Key Words:** Thermal insulation materials, optimum insulation thickness, life cycle energy analysis, carbon emission, life cycle cost.

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler enerjiye olan talebi her geçen gün arttırmaktadır. Enerji tüketimindeki artış ve enerjinin yenilemeyen kaynaklardan temini ciddi çevresel ve ekonomik sorunlara neden olmaktadır. Söz konusu sorunlar dünyanın ve insanlığın geleceği açısından büyük önem taşımaktadır. Bilindiği üzere, dünyada gerçekleşen enerji tüketiminin %40'ı, sera gazı salımının ise %30'u binalarda gerçekleşmektedir [1]. Bu nedenle binalarda enerji verimliliğinin sağlanması ekonomi, çevre kirliliğinin önlenmesi ve sürdürülebilir kalkınma açısından büyük önem taşımaktadır. Dünyada yer alan binaların önemli bir kısmını konut binaları oluşturmaktadır. Bina kabuğuna ısı yalıtımı uygulanması ve/veya ısı yalıtım kalınlığının artırılması özellikle konut binalarında en sık başvurulan enerji etkin iyileştirme yaklaşımlarının başında gelmektedir [2]. Enerji verimliliği açısından optimum ısı yalıtım kalınlığının belirlenmesi çoğu bilimsel çalışmada farklı yöntemlerle irdelenmiş ve irdelenmekte olan konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak söz konusu çalışmalar optimum yalıtım kalınlığı ve binanın enerji performansı analizlerinde binanın kullanım döneminde tükettiği enerjiyi dikkate almada enerji tüketimini yaşam döngüsü perspektifinden dikkate almamaktadır. Özellikle yapı malzemelerinin yaşam döngüsü süreci dikkate alındığı sürecin farklı aşamalarında enerji tüketimi ve buna bağlı olarak farklı miktarda sera gazı salımı gerçekleştiği bilinmektedir. Tablo 1'den görüleceği üzere ısı yalıtım malzemelerinin oluşum enerjisi ve oluşum karbon salım değerleri arasında ciddi farklar söz konusudur. Söz konusu fark, ısı yalıtımı uygulaması ile binalarda enerji verimliliğinin sağlanmasına yönelik çalışmaların büyük bir kısmında dikkate alınmamaktadır. Ayrıca binalarda enerji verimliliği ve ısı yalıtımı ile ilgili standart ve yönetmeliklerde de malzemelerin oluşum enerjisi ve oluşum karbon salımı değerleri dikkate alınmamaktadır. Standart ve yönetmelikler optimum yalıtım kalınlığını, malzemelerin oluşum enerjisi ve karbon salımı değerlerinden bağımsız olarak ele almaktadır.

**Tablo 1.** Çeşitli ısı yalıtım malzemelerinin oluşum enerjisi ve oluşum karbonu değerleri [3-5].

Malzeme	Isıl iletkenlik( $\lambda$ : w/m k)	Yoğunluk (kg / m <sup>3</sup> )	Oluşum enerjisi (Mj/ kg)	Oluşum karbonu (ton/ CO <sub>2</sub> ton)
EPS	0.03–0.04	16	74	2.51
XPS	0.03–0.04	24	96	2.55
Cam yünü	0.04	20	20	1.35
Taş yünü	0.035	30	30	1.05

Bu çalışmada yukarıda sözü edilen eksiklikten yola çıkılarak binalar için ısı yalıtım malzemesinin ve optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde yaşam döngüsü sürecinde enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyeti dikkate alan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Söz konusu yaklaşım tüm binalara uygulanabilecek şekilde geliştirilmiştir. Ancak uygulama çalışmasının bir bina tipolojisi ile kısıtlanmasından dolayı yaklaşım ve uygulama konut binaları üzerinden anlatılacaktır. Geliştirilen yaklaşım, Türkiye'nin sıcak nemli (İzmir), ılımlı nemli (İstanbul) ve soğuk (Erzurum) iklim bölgelerinde yer alan örnek bir konut binasına uygulanarak elde edilen bulgular ve sonuçlar sonraki bölümde yer almaktadır.

## 2. KONUT BİNALARI İÇİN ISI YALITIM MALZEMESİNİN VE OPTİMUM YALITIM KALINLIĞININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM:

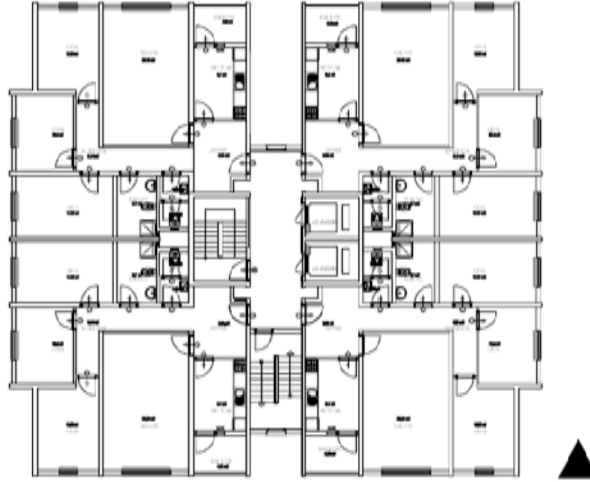
Bina kabuğu sahip olduğu yüzey alanı nedeniyle binaların enerji performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle binaların enerji etkin iyileştirilmelerinde, yapı kabuğuna ısı yalıtımı uygulanması veya mevcut yalıtım kalınlığının artırılması en sık başvurulan yaklaşımların başında gelmektedir. Ancak ısı yalıtım malzemesinin ve kalınlığının belirlenmesinde malzemenin termal performansı dikkate

alınmakta, oluşum enerjisi ve oluşum aşamasında gerçekleşen karbon salımı gibi parametreler dikkate alınmamaktadır. Bu çalışmada bina kabuğunda kullanılacak ısı yalıtım malzemesinin ve yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet açısından optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesine yönelik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım tüm bina tipolojilerine uygulanabilir. Ancak yaklaşımın uygulanmasında çalışmanın bir bina tipolojisi ile kısıtlanması uygun görülmüştür. Mevcut binaların önemli bir kısmını konut binalarının oluşturmasından dolayı çalışma konut binası ile kısıtlanmıştır. Bu nedenle geliştirilen yaklaşım ve uygulama çalışması konut binaları üzerinden anlatılacaktır. Yaklaşım detayları aşağıda verilen beş adımdan oluşmaktadır. Söz konusu adımlar ise,

- Uygulama yapılacak binanın belirlenmesi ve binaya ilişkin mimari verilerin elde edilmesi,
- Yaşam döngüsü enerji analizi (YDEA), yaşam döngüsü karbon salımı (YDKS) ve yaşam dönemi maliyetine (YDM) ilişkin analiz yöntemlerinin seçilmesi, ihtiyaç duyulan verilerin elde edilmesi ve kabullerin yapılması,
- Isı yalıtım malzemesi ve kalınlık alternatiflerinin belirlenmesi,
- Hesaplamaların yapılması ve bulguların elde edilmesi ve
- Bulguların değerlendirilerek optimum performansı gösteren seçeneklerin elde edilmesi şeklindedir.

## 2.1. Uygulama Yapılacak Binanın Belirlenmesi Ve Binaya İlişkin Mimari Verilerin Elde Edilmesi:

Yaklaşımın ilk adımında uygulama çalışmasının yapılacağı binanın belirlenmesi ve binaya ait mimari verilerin elde edilmesi yer almaktadır. Uygulama çalışmasında Başbakanlık Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) tarafından Türkiye'nin çeşitli illerinde uygulanmış olan çok katlı bir konut yapısı uygulamanın yapılacağı bina olarak belirlenmiştir. Uygulama binası C tipi olarak tanımlanan her katta 4 adet bağımsız konut ünitesinin yer aldığı çok katlı konut yapısıdır [6]. Yapı bir bodrum, zemin ve 11 kattan oluşmaktadır. Binaya ait mimari çizimler şekil 1'de görülmektedir. Her bağımsız konut ünitesi 3 adet yatak odası, servis mekânları ve salondan oluşmaktadır. Konut binasının ve binayı oluşturan yapı elemanlarının fiziksel özellikleri tablo 2 ve 3'de yer almaktadır. Uygulama çalışması için seçilen konut binasının sıcak nemli (İzmir), ılımlı nemli (İstanbul) ve soğuk (Erzurum) iklim bölgelerinde yer aldığı kabulü yapılmıştır.



Şekil 1. Uygulama çalışmasının yapıldığı konut binasının tip kat planı [6].

**Tablo 2.** Uygulama çalışmasının yapıldığı konut binasının mimari özellikleri [6].

<b>Kat sayısı</b>	1 Bodrum,1 zemin,11 normal kat	<b>Konut sayısı</b>	Her katta 4 adet
<b>Taban alanı</b>	26 m x 23 m, toplam: 576 m <sup>2</sup>	<b>Konut büyüklüğü</b>	130 m <sup>2</sup>
<b>Kat yüksekliği</b>	279 cm	<b>Bina yüksekliği</b>	37.5 m

**Tablo 3.** Uygulama çalışmasının yapıldığı konut binasının yapı elemanlarını oluşturan katmanlar [6].

<b>Yapı Elemanı</b>	<b>Katmanlar</b>
Dış duvar	Dış cephe boyası, çimento sıva (2 cm), tuğla (19 cm), çimento sıva (2 cm) U=1.57 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Çatı	Çakıl (5 cm), su yalıtımı (1 cm), şap(3 cm), ısı yalıtımı (EPS 8 cm), betonarme döşeme (20 cm), sıva (1 cm). U= 0.55 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Döşeme (iç)	Seramik kaplama (1 cm), şap(1 cm), betonarme döşeme (20 cm), sıva (1 cm), U= 3.44 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Döşeme (toprağa oturan)	Seramik kaplama (1 cm), şap (3 cm), ısı yalıtımı (EPS 8 cm), betonarme temel (20 cm), su yalıtımı(1 cm),grobeton (10cm) blokaj (10 cm). U= 0.6 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
İç Duvar	Sıvar (1 cm), tuğla (8.5 cm), tuğla (1 cm) U= 2 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Pencere	Hava dolgulu çift berrak camlı PVC doğrama (3 x 13 x 3 mm) U= 2.4 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Saydamlık oranı	25%

## 2.2. Yaşam Döngüsü Enerji Analizi (YDEA), Yaşam Döngüsü Karbon Salımı (YDKS) Ve Yaşam Dönemi Maliyetine (YDM) İlişkin Analiz Yöntemlerinin Seçilmesi, İhtiyaç Duyulan Verilerin Elde Edilmesi Ve Kabullerin Yapılması:

Yaklaşımın ikinci adımında yaşam döngüsü sürecinde gerçekleşecek olan enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet analizlerine ilişkin yöntem seçimi, ihtiyaç duyulan verilerin elde edilmesi ve kabullerin yapılması yer almaktadır. Yaklaşım ile ısı yalıtım malzemesi ve optimum kalınlığının belirlenmesinde yaşam döngüsü sürecinde enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet parametreleri dikkate alınmaktadır. Söz konusu parametrelere ilişkin yöntem ve kabuller sırası ile aktarılacaktır.

### 2.2.1. Yaşam Döngüsü Enerji Analizi İçin Yöntem Seçimi, Verilerin Toplanması Ve Kabullerin Yapılması:

Yaşam döngüsü enerji analizi (YDEA), yaşam döngüsü değerlendirme yönteminden yola çıkılarak oluşturulan ve bir ürün veya hizmetin yaşam döngüsü sürecinde tükettiği toplam enerji miktarının analiz edilmesine yönelik bir yaklaşımdır. CEN/TC 350 standardına bir binanın yaşam döngüsü yapı öncesi evre, yapı kullanımı evresi ve yapı sonrası evre olmak üzere toplam üç evreden oluşmaktadır [7]. Söz konusu evreler kendi alt aşamalarını içermektedir. Yapı öncesi evre yapıyı oluşturmak için kullanılacak malzemeleri oluşturan ham maddelerin temini, üretim tesisine nakliyesi, üretimi, şantiye ortamına nakliyesi ve binanın inşası aşamalarını içermektedir. Yapı kullanımı evresi ise yapının inşaatının tamamlandıktan sonra kullanım dönemini ve süreç içerisinde ihtiyaç duyduğu bakım ve onarım aşamalarını içermektedir. Yapı sonrası evre ise yapının hizmet ömrünü tamamladıktan sonra yıkılmasını ve oluşan atıkların bertaraf edilmesi gibi aşamaları kapsamaktadır. K. Adalberth 1997 yılında yaptığı çalışma ile YDEA yönelik bir yöntem geliştirmiştir [8]. Söz konusu yöntem binanın yaşam döngüsü sürecinde tükettiği enerji yaşam döngüsü sürecini oluşturan evrelerde gerçekleşen enerji tüketiminin toplamına eşittir ilkesine dayanmaktadır. Bu çalışmada YDEA için yöntem olarak K. Adalberth'in geliştirdiği yöntem kullanılmıştır. Yaşam döngüsü uzun bir süreci kapsamaktadır. Söz konusu süreç içerisinde gerçekleşen enerji tüketiminin hesaplanabilmesi için çeşitli verilerin elde edilmesine ve çeşitli kabullerin yapılmasına bağlıdır. YDEA ile ilgili ilk kabul yaşam döngüsü aşamalarının hangilerinin hesaplamalara dâhil edileceği hangilerinin ihmal edileceğine ilişkindir. Tablo 4'de bu çalışma kapsamında yaşam döngüsü sürecinin hangi aşamalarının hesaplamalara dâhil edildiği görülmektedir.

**Tablo 4.** Yaşam döngüsü aşamalarına ilişkin kabuller.

Evre	Modül	Kapsam
Yapı öncesi evre	Ham madde temini	Evet
	Nakliye	Evet
	Üretim	Evet
	Nakliye	Hayır
	Yapım	Hayır
Yapı kullanım evresi	Kullanım dönemi enerji tüketimi: Isıtma, soğutma, aydınlatma ve sıcak su temini	Evet
	Bakım/onarım ve yenileme	Hayır
Yapı sonrası evre	Yıkım	Hayır
	Nakliye	Hayır
	Geri dönüşüm	Hayır
	Bertaraf	Hayır

Tablo 4'den görüldüğü üzere yapı sonrası evre haricinde yapı öncesi ve yapı kullanım evreleri hesaplamalara dâhil edilmiştir. Yapı sonrasında gerçekleşen enerji tüketiminin hesaplanmasının karmaşık ve zor olması ile tüm süreç içerisinde ihmal edilebilecek bir büyüklüğe sahip olduğu daha önceki çalışmalarda ortaya konulduğundan dolayı hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Yapı öncesi ve yapı kullanım evresinde yer alan yapım ile bakım/onarım aşamaları da yine aynı sebeplerden dolayı hesaplamalara dâhil edilmemiştir.

#### Oluşum enerjisinin hesaplanması

Önceki bölümde bahsedildiği üzere bir bina çeşitli yapı malzemelerinin belirli bir sistem dâhilinde bir araya getirilmesi oluşturulmaktadır. Her yapı malzemesinin üretimi için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Yapı malzemesinin ham maddesinin çıkartılmasından üretimine kadar geçen süreçte tükettiği enerji miktarı ise oluşum enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Bina düzeyinde oluşum enerjisi ise binayı meydana getiren tüm malzemelerin oluşum enerjisinin toplamına eşittir ve 2.1'de yer alan eşitlik yardımı ile hesaplanabilir [8]. Bir binanın oluşum enerjisinin hesaplanmasında binayı oluşturan tüm yapı malzemelerinin miktarları hesaplanmalı ve oluşum enerjisi her malzeme için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Yapı malzemelerinin oluşum enerjisi için oluşum enerjisi değerlerinin yer aldığı veri tabanlarından yararlanılabilir [3-5].

$$Q_{\text{oluşum}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \cdot M_i \quad (2.1)$$

$Q_{\text{oluşum}}$ : Yapı malzemesinin oluşumu için tüketilen toplam enerji miktarı (kWh)

n: yapı malzemelerinin sayısı

i: ilgili yapı malzemeleri

$m_i$ : yapı malzemesinin miktarı (ton)

$w_i$ : yapının inşası sırasında kullanılan malzeme fire faktörü (%)

$M_i$ : inşaat malzemesinin üretimi için kullanılan enerjiyi kWh/ton

#### Nakliye enerjisinin hesaplanması

Nakliye enerjisi bina üretiminde kullanılacak yapı malzemelerinin fabrikadan şantiye ortamına taşınması esnasında tüketilecek enerji miktarını tanımlamaktadır. Nakliye enerjisi aşağıda yer alan eşitlik yardımı ile hesaplanabilir [8].

$$Q_{\text{nakliye}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \cdot d_i \cdot T_c \quad (2.2)$$

$Q_{\text{nakliye}}$ : Nakliye için tüketilen enerji miktarı (kWh)

n: yapı malzemelerinin sayısı

i: ilgili yapı malzemeleri

$m_i$ : yapı malzemesinin miktarı (ton)

$w_i$ : yapının inşası sırasında kullanılan malzeme fire faktörü (%)

$d_i$ : Malzemenin üretildiği fabrika ile şantiye arasındaki mesafe (km)

$T_c$ : Nakliye aracının tükettiği enerji miktarı ortalama (kWh/ ton km)

### Kullanım enerjisinin hesaplanması

Kullanım dönemi enerji tüketimi, binanın kullanım dönemi içerisinde konfor koşullarının sağlanması için bina alt sistemleri tarafından tüketilen enerji miktarını ifade etmektedir. Kullanım dönemi enerji tüketimi kullanım süreci içerisinde binanın ısıtılması, soğutulması, aydınlatılması ve sıcak su ihtiyacı için tüketilecek enerji miktarını kapsamaktadır. Kullanım dönemi enerji tüketimi aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir [8].

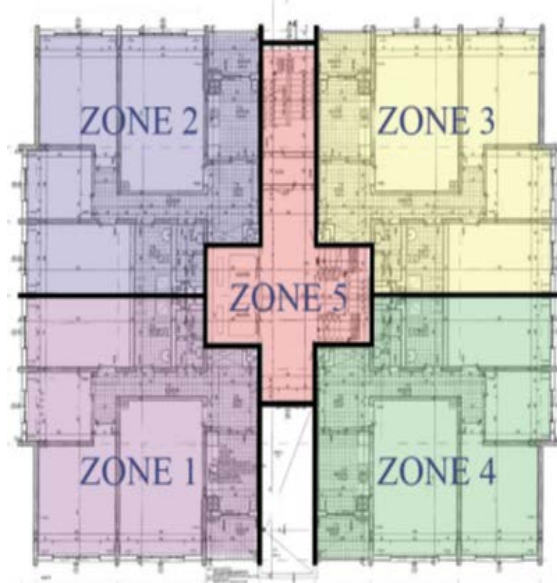
$$Q_{\text{kullanım}} = Q_{\text{kullanım yıllık}} \times \text{Bina hizmet ömrü} \quad (2.3)$$

$Q_{\text{kullanım}}$ : Bina kullanım dönemi operasyonel enerji tüketimi (kWh)

$Q_{\text{kullanım yıllık}}$ : Bina yıllık operasyonel enerji tüketimi (kWh)

Bina hizmet ömrü: Binanın hizmet süresi (Yıl)

Eşitlikte bina hizmet ömrü ile ifade edilen değer ülke şartlarına, inşaat pratiklerine ve inşaat kalitesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bina hizmet ömrü konut binaları için ortalama 50 yıl olarak kabul edilmektedir. Binalarda konfor koşullarının sağlanması için gerçekleşen enerji tüketiminin hesaplanmasında aylık/mevsimsel statik hesaplama, basit saatlik dinamik hesaplama ve detaylı dinamik hesaplama yöntemleri bulunmaktadır. Sözü edilen hesaplama yöntemlerinin uygulanmasında enerji performansı benzetim yazılımlarından yararlanılmaktadır. Bu çalışmada Design Builder adlı enerji performans analiz benzetim yazılımı kullanılmıştır. Enerji tüketimi hesaplamaları ısıtma, soğutma, aydınlatma ve sıcak su eldesi için tüketilen birincil enerji miktarı cinsinden gerçekleştirilmiştir. Enerji performans hesaplamaları için kullanıcılara, binanın ısıtma, soğutma ve aydınlatma sistemine ilişkin kabuller detaylı olarak tablo 5'de verilmiştir. Söz konusu kabullerin yapılmasında bu alanda yapılan çalışmalar ve yürürlükte olan standart ve yönetmeliklerden yararlanılmıştır [9-11]. Uygulama çalışması yapılan konut binasının termal bölgeleri şekil 2'de görülmektedir. Her bağımsız konut ünitesinin termal bölge olduğu ve bina sirkülasyon çekirdeğinin ise mekanik sistemler ile iklimlendirilmeyen ve otomatik olarak aydınlatılan bir termal bölge olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2. Uygulama yapılan konut binasının ısı bölgeleri.

**Tablo 5.** Uygulama çalışması binanın enerji performans analizi için yapılan kabuller [9-11].

ÖRNEK KONUT BİNASI	
<b>Kullanıcılar</b>	<b>Kabuller</b>
Kullanıcı sayısı	4 kişi/bağımsız konut ünitesi
Kullanım yoğunluğu	Referans[11]
Kullanıcı kaynaklı iç kazançlar	Referans [11]
<b>Aydınlatma sistemi</b>	<b>Kabuller</b>
Aydınlatma elemanı	Floresan lamba [10,11]
Aydınlatma elemanı gücü	20 W floresan lamba [10,11]
Aydınlatma sis. Kullanım dönemi	Referans [10,11]
Otomatik kontrol	Hareket duyarlı sensörlü açma kapama özelliği
<b>Mekanik sistemler</b>	<b>Kabuller</b>
Isıtma sistemi tasarım sıcaklığı	20°C Referans [9,10]
Soğutma sistemi tasarım sıcaklığı	26°C Referans [9,10]
İnfiltrasyon katsayısı (ach)	0.5 Referans [10]
Cihazlardan kaynaklanan iç kazançlar ve kullanım yoğunluğu	19 kWh / m <sup>2</sup> Referans [10,11]
Isıtma sistemi ve verimi	Sıcak su kazanlı doğal gaz yakıtlı kombi verim: 0.85
Soğutma sistemi ve performansı	Elektrikli bireysel tip klima COP=3

### 2.2.2. Yaşam Döngüsü Karbon Analizi İçin Yöntem Seçimi, Verilerin Toplanması Ve Kabullerin Yapılması:

Binaların enerji tüketimlerine bağlı olarak çevreye farklı alanlarda etkilerinin olduğu bilinmektedir. Çevresel etkiler içerisinde, enerji tüketimine bağlı olarak gerçekleşen ser gazı salımı neden olduğu küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi uzun vadeli çevresel etkiler nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Sera gazı salımı içerisinde karbon monoksit (CO) ve karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) çevresel etkisi en yüksek olan gazlardır. Söz konusu gazlar ısı depolama kapasiteleri nedeniyle küresel ısınma üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle bu yaklaşım içerisinde binaların çevresel etkileri karbon salımı bağlamında ele alınmıştır. Yaşam döngüsü karbon analizi (YDKA), YDEA yönteminden yola çıkarak binaların yaşam döngüsü sürecinde gerçekleştirdikleri karbon salımlarının analiz edilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. YDEA de olduğu gibi YDKS analizinde yaşam döngüsü sürecindeki tüm evrelerde gerçekleşen karbon salımı ayrı ayrı hesaplanarak toplanmaktadır. Söz konusu evrelerde gerçekleşen karbon salımının analizinde ise Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen yöntem kullanılabilir [12]. Bu çalışmada karbon salımı analizleri IPCC tarafından geliştirilen yönteminin ikinci tipi (tier 2) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### Oluşum sürecinde gerçekleşen karbon salımının hesaplanması

Yapı malzemesinin oluşum süreci içerisinde gerçekleşen karbon salımı 2.4 numaralı eşitlik yardımı ile hesaplanabilir [12]. Oluşum sürecinde gerçekleşen karbon salımının hesaplanması, yapı malzemelerinin oluşum enerjisinin hesaplanması gibi karmaşık ve detaylı veri ihtiyacına dayalı bir süreçtir. Yapı malzemelerinin oluşum karbon değerlerinin hesaplanmasında bu alanda yapılan çalışmalar ve veri tabanları referans alınabilir [3-5]. Oluşum karbonunun hesaplanması binayı oluşturan her yapı malzemesi için ayrı ayrı yapılarak toplam değeri alınmalıdır.

$$K_{\text{oluşum}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot K_i \quad (2.4)$$

$K_{\text{oluşum}}$ : Yapı malzemesinin üretiminde gerçekleşen karbon salımı (ton CO<sub>2</sub>/ton)

n: Yapı malzemelerinin sayısı

i: İlgili yapı malzemeleri

$m_i$ : Yapı malzemesinin miktarı (ton)

$K_i$ : Birim yapı malzemesinin birim başına karbon salımı (ton CO<sub>2</sub>/ton)



### Nakliye sürecinde gerçekleşen karbon salımının hesaplanması

Nakliye sürecinde gerçekleşen karbon salımı yapı malzemelerinin üretildiği fabrikadan şantiye ortamına olan mesafesi, nakliye aracı ve aracın yakıt tüketimine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Hesaplama 2.5'de yer alan eşitlik kullanılmaktadır [12]. Nakliye sürecinde gerçekleşen karbon salımı her mesafe için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Nakliye araçlarının yakıt tüketim değerleri ise, nakliye aracının türüne bağlı olarak benzer araçların kilometre başına düşen yakıt tüketimi değerlerinin ortalaması alınması suretiyle elde edilebilir.

$$K_{nakliye} = \sum_{n=1}^c m_n \cdot d_y \cdot f_{CO_2 yakıt} \quad (2.5)$$

$K_{nakliye}$ : Yapı malzemesinin üretiminde gerçekleşen karbon salımı (ton CO<sub>2</sub>/ton)

n: nakliye sayısı

c: ilgili nakliye tipi

$m_n$ : Nakliye mesafesi (km)

$d_y$ : Nakliye aracının birim mesafede yakıt tüketimi (lt/km)

$f_{CO_2 yakıt}$ : Yakıt cinsine göre karbon salımı dönüşüm katsayısı (ton CO<sub>2</sub>/ton, kWh, lt)

### Kullanım sürecinde gerçekleşen karbon salımının hesaplanması

Kullanım sürecinde gerçekleşen karbon salımı, süreç içerisinde binada konfor koşullarını sağlamak için bina alt sistemlerinin ihtiyaç duyduğu enerjiyi üretmesi için mekanik sistemler tarafından tüketilen yakıt türüne bağlı olarak aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir. Kullanım döneminde tüketilen yakıt tipine bağlı olarak karbon salımı dönüşüm katsayısı değerleri için ulusal standartlarda yer alan değerlerden yararlanılmıştır [10].

$$K_{kullanım} = \sum (E_{t,yakıt} \cdot f_{CO_2 yakıt}) \quad (2.6)$$

$K_{kullanım}$ : Kullanım sürecinde gerçekleşen karbon salımı (ton CO<sub>2</sub>/ton)

$E_{t,yakıt}$ : Tüketilen yakıt miktarı (ton, kWh, lt)

$f_{CO_2 yakıt}$ : Yakıt cinsine göre karbon salımı dönüşüm katsayısı (ton CO<sub>2</sub>/ton, kWh, lt)

### 2.2.3. Yaşam Dönemi Maliyet Analizi İçin Yöntem Seçimi, Verilerin Toplanması Ve Kabullerin Yapılması:

Enerji verimliliği açısından yapılacak uygulamaların ekonomik boyutu günümüzde önem kazanmaktadır. Uygulamaların enerji verimliliği sağlaması kadar ekonomik açıdan da verimli olması beklenmektedir. Yaşam dönemi maliyeti (YDM) analizi uygulamaların ekonomik yönünü yaşam dönemi perspektifinden analiz eden bir yaklaşımdır. YDM analizi ilgili çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu çalışmada Binalarda Enerji Performansı (EPBD) önerilen yöntem kullanılmıştır. Binalarda Enerji Performansı Direktifini (EPBD) 2002 yılında Avrupa birliğine üye ülkelerde yürürlüğe girmiştir. Direktif 2010 yılında revize edilerek bina enerji performansı gereksinimlerinin optimum maliyet düzeyinin belirlenmesi zorunluluk haline getirilmiştir [13]. Söz konusu optimum maliyet düzeyinin belirlenmesi için EPBD'de YDM'ni referans alan bir hesaplama yöntemi önerilmektedir. Avrupa Birliğine üye ülkelerin söz konusu yöntemi kendi ülke koşullarına uyarlayarak ülkesel bazda enerji gereksinimlerinin optimum maliyet düzeyinin belirlenmesi istenmiştir. EPBD'de yaşam dönemi maliyet hesaplamaları net bugünkü değer yöntemi ile yapılmaktadır. Net bugünkü değer yöntemi, gelecek yıllar için gerçekleşecek olan kazanç ve maliyetler buldukları yıla ait indirim faktörü ile çarpılarak söz konusu kazanç ve maliyetlerin bugünkü değerleri elde edilmesidir. Maliyet analizlerinin yapılmasına binanın enerji performansına etki eden maliyetler dikkate alınarak hesaplamalara dâhil edilir, bunun dışında kalan maliyetler ise hesaplamalara dâhil edilmez. Maliyet hesaplamaları kamu binaları için 20 yıl, konut ve diğer binalar için 30 yıllık süre için gerçekleştirilmektedir. Hesaplama için, finansal ve makroekonomik yöntem olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Finansal yaklaşımda, binanın ilk yatırım maliyeti, enerji gideri, yenileme/onarım gideri ve binanın ömrü sonundaki bedeli gibi maliyet kalemleri hesaplama dâhil edilmektedir. Finansal yaklaşım ile maliyet hesaplamasında aşağıda yer alan eşitlik kullanılmaktadır.

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j (\sum_{i=1}^{\tau} (C_{\alpha i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j)) \quad (2.7)$$

$\tau$  : hesaplama süresi (yıl)

$C_g(\tau)$  : toplam maliyet (TL)

$C_I$  : İlk yatırım maliyeti (TL)

$C_{\alpha, i}(j)$  : Yıllık giderler (TL)

$V_{f,\tau}(j)$  : binanın, hesaplama süresi sonundaki bedeli (TL)

$R_d(i)$  : i yılı için indirim oranı, eşitlik 2.8 ile hesaplanır.

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1+r/100} \right)^p \quad (2.8)$$

r: reel indirim oranı

p: hesaplama başlangıç yılından itibaren geçen yıl sayısı

Makroekonomik yaklaşımda ise, finansal yaklaşımda hesaba katılan maliyet kategorilerinin dışında sera gazı salımı maliyetleri de dikkate alınırken vergiler hesaba katılmamaktadır. Makroekonomik yaklaşım ile yapılacak hesaplamalarda ise aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j (\sum_{i=1}^{\tau} (C_{\alpha i}(j) \times R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j)) \quad (2.9)$$

$C_{c,i}(j)$ : karbon salımı fiyatı (TL)

YDM analizinin gerçekleştirilebilmesi için temel olarak iki tür veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Birincil olarak elde edilmesi gereken binanın maliyetinin hesaplanmasında ihtiyaç duyulan verilerdir. Bina maliyetinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulan birim fiyatlar, bu alanda hazırlanmış ve kamu inşaat işlerinde referans alınan birim fiyatlardan elde edilebileceği gibi, piyasada faaliyet gösteren inşaat firmalarından binanın mimari özelliklerine göre teklif alınması suretiyle de elde edilebilir. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan veriler Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 2015 yılı için yayınladığı inşaat birim fiyatlarından elde edilmiştir [14]. Ayrıca binanın kullanım döneminde gerçekleşen enerji tüketimine bağlı maliyetlerde hesaplamalarda yer aldığından enerji tüketiminin birim fiyatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Binada yakıt olarak kullanılan elektrik ve doğalgazın birim fiyatları referans konut binasının yer aldığı ildeki enerji dağıtım şirketinin birim fiyatlarından elde edilmiştir [15-20]. YDM analizleri için ihtiyaç duyulan ikincil grup veri ise makroekonomik verilerdir. Hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için enflasyon oranı, faiz oranı vb. verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu veriler Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankasının 2015 yılı için derlediği ekonomik verilerden elde edilmiştir [21].

### 2.3. Isı yalıtım malzemesi ve kalınlık alternatiflerinin belirlenmesi:

Yaklaşımın üçüncü adımı ısı yalıtım malzemesi ve kalınlık alternatiflerinin belirlenmesi işlemlerini içermektedir. Isı yalıtım malzemesinin belirlenmesinde ülkedeki inşaat pratikleri ve malzemelerin tedarik durumu gibi ölçütler dikkate alınabilir. Yalıtım malzemesinin kalınlık alternatiflerinin alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde ise yine inşaat pratikleri ve ısı yalıtım standartlarından yararlanılabilir. Bu çalışmada seçilen ısı yalıtım malzemeleri ve kalınlık alternatifleri tablo 6'da görülmektedir. Üç farklı iklim bölgesi ( sıcak nemli, ılımlı nemli ve soğuk) için toplamda 72 adet alternatif belirlenmiştir.

**Tablo 6.** Alternatiflerin listesi

Malzeme	Kalınlık	İklim bölgesi	Toplam
EPS	Yalıtımsız	İstanbul	72
XPS	3 cm	İzmir	
Cam yünü	5 cm	Erzurum	
Taş yünü	7 cm		
	9 cm		
	10 cm		
4	6	3	

## 2.4. Hesaplamaların yapılması ve bulguların elde edilmesi:

Önceki bölümde belirlenen alternatiflerin belirlenen yöntem ve yapılan kabuller dâhilinde yaşam döngüsünde enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyeti açısından performans analizleri yapılarak elde edilen bulgular bu bölüm içerisinde aktarılacaktır. Tablo 7’de farklı iklim bölgelerinde bulunan örnek konut binasının kullanım döneminde yıllık birincil enerji tüketimi görülmektedir. Örnek konut binasının kullanım dönemi enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde en yüksek tüketimin soğuk iklim bölgesi olan Erzurum ilinde, en düşük tüketimin ise ılımlı nemli iklim bölgesi olan İstanbul ilinde gerçekleştiği görülmektedir. Örnek binanın aynı fiziksel özelliklere sahip olmasına karşın İstanbul ve Erzurum gibi farklı iklim bölgelerinde yer alması durumunda birincil enerji tüketiminde yaklaşık %20’lik bir fark söz konusudur. Erzurum gibi soğuk iklim bölgesinde ısıtma enerjisi ihtiyacının yüksek olması toplam birincil enerji tüketimini önemli ölçüde arttırmaktadır.

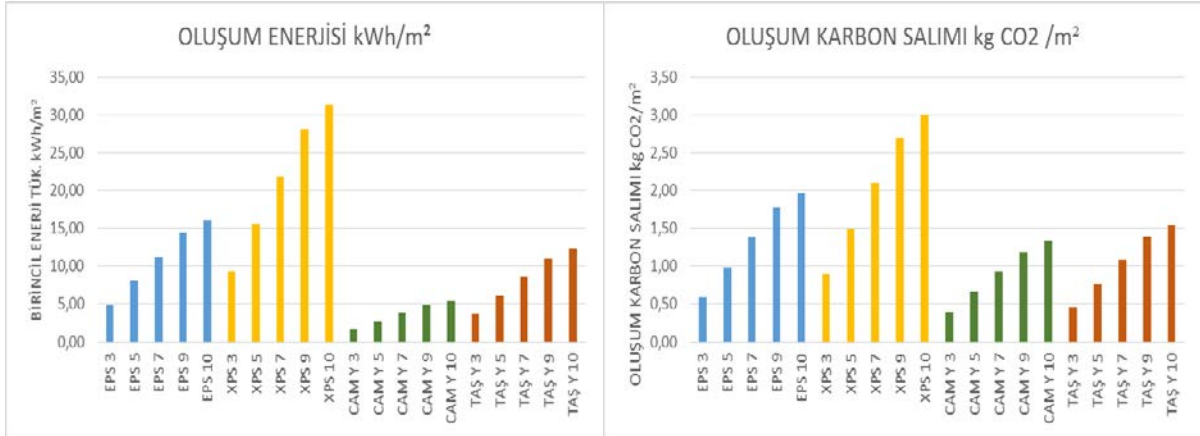
**Tablo 7.** Örnek konut binasının kullanım dönemi birincil enerji tüketimi kWh/(m<sup>2</sup> yıl)

	İstanbul	İzmir	Erzurum
Isıtma kWh/(m <sup>2</sup> yıl)	29.14	15.37	72.43
Soğutma kWh/(m <sup>2</sup> yıl)	31.43	53.80	5.14
Aydınlatma kWh/(m <sup>2</sup> yıl)	23.70	22.95	25.38
Sıcak su hazırlama kWh/(m <sup>2</sup> yıl)	17.12	17.12	17.12
<b>Toplam kWh/(m<sup>2</sup> yıl)</b>	<b>101.38</b>	<b>109.23</b>	<b>120.06</b>

**Tablo 8.** Örnek konut binasının yaşam döngüsü enerji tüketimi ve karbon salımı.

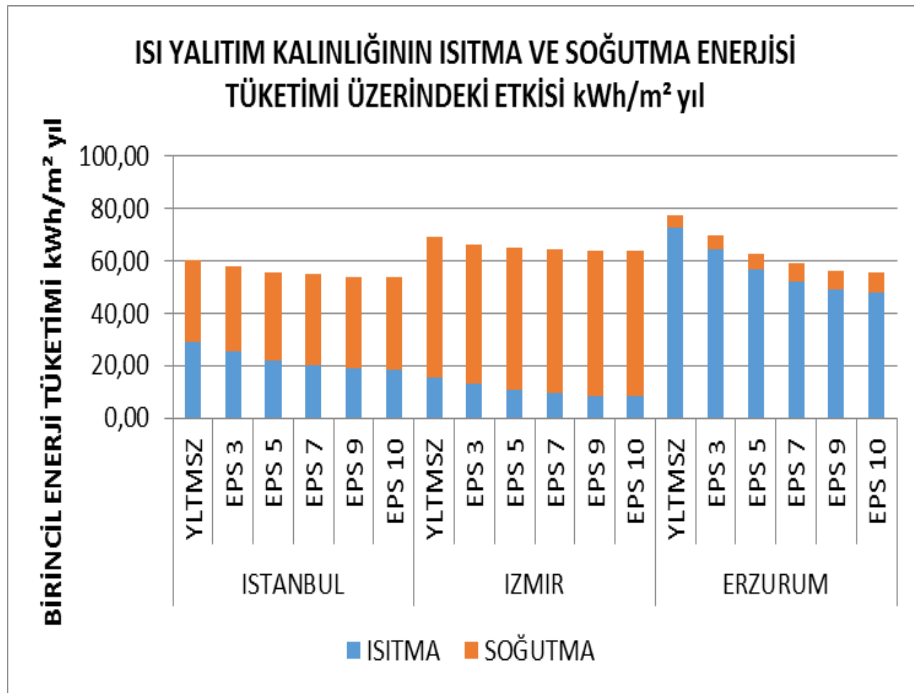
Örnek Konut Binası Yaşam Döngüsü Enerji Tüketimi Ve Karbon Salımı				
		İstanbul	İzmir	Erzurum
Enerji tüketimi	Oluşum enerjisi	4.83	4.83	4.83
	Nakliye enerjisi	0.45	0.45	0.45
	Kullanım enerjisi (yıl)	101.38	109.23	120.06
	Toplam (kWh/m <sup>2</sup> yıl)	106.66	114.51	125.34
Karbon salımı	Oluşum karbonu	0.59	0.59	0.59
	Nakliye karbonu	0.01	0.01	0.01
	Kullanım karbonu (yıl)	3373.20	4688.92	1882.16
	Toplam (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> yıl)	3373.80	4689.52	1882.76

Tablo 8’de ise örnek konut binasının yaşam döngüsü sürecinde enerji tüketimi ve karbon salımı performansı görülmektedir. Oluşum enerjisi hesaplamalarında sadece ısı yalıtım malzemesi alternatiflerinin oluşum enerjisi dikkate alınmış binaya ait diğer sabit oluşum enerjisi tüketimi hesaplama dâhil edilmemiştir. Tablo 8’den görüleceği gibi yaşam döngüsü sürecinde enerji tüketimi en yüksek Erzurum’da bulunan konut binası iken yaşam döngüsü karbon salımı açısından en yüksek salım İzmir’de bulunan konut binasında gerçekleşmektedir. Tablo 7’den görülebileceği gibi İzmir ve Erzurum’da bulunan konut binalarının ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri arasında ciddi farklar söz konusudur. İzmir’de bulunan konut binasının soğutma enerjisi tüketimi Erzurum’da bulunan konut binasının soğutma enerjisi tüketiminin yaklaşık 11 katı, ısıtma enerjisi tüketiminin ise yaklaşık %75’i kadardır. Soğutmada yakıt olarak elektrik kullanılması ve elektriğin karbon dönüşüm faktörünün doğal gazın 3 katı olmasından dolayı enerji tüketimi konusunda en yüksek tüketime sahip Erzurum’daki konut binası karbon salımı açısından en düşük karbon salımı performansını göstermektedir. Özellikle sıcak nemli iklim bölgelerinde yüksek soğutma enerjisi tüketimi ve soğutmada yakıt olarak elektriğin kullanılması soğutma enerjisi tüketimine bağlı olarak gerçekleşen karbon salımını arttırmaktadır. Bu nedenle karbon salımının azaltılmasında özellikle sıcak nemli iklim bölgelerinde soğutma enerjisi tüketiminin azaltılması, soğutmanın verimi yüksek mekanik sistemler ile karşılanması ve yakıt olarak kullanılan elektriğin yenilenebilir enerji kaynaklarından temin edilmesi büyük önem taşımaktadır.



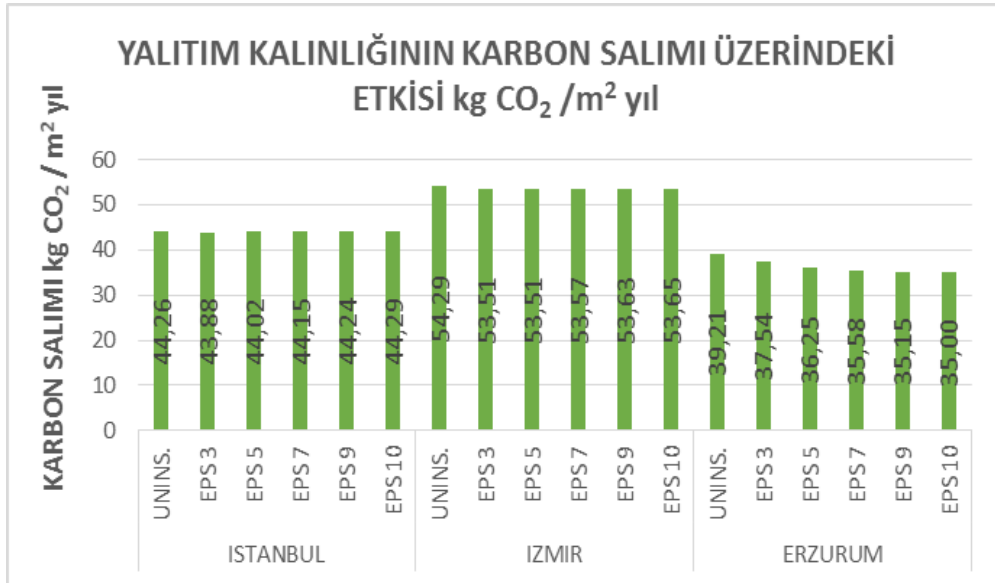
Şekil 2. Isı yalıtım malzemesi ve kalınlığı alternatiflerinin oluşum enerjisi ve oluşum karbon salımı açısından karşılaştırılması.

Şekil 2’de farklı ısı yalıtım malzemesi ve kalınlığı alternatiflerinin oluşum enerjisi ve oluşum karbon salımı açısından karşılaştırılması görülmektedir. Oluşum enerjisi açısından en düşük tüketime sahip seçenek 1,63 kWh/m<sup>2</sup> tüketim ile 3cm kalınlığında cam yünü, en yüksek tüketime sahip seçenek ise 9,40 kWh/m<sup>2</sup> tüketim ile 3cm kalınlığında XPS’dir. Yalıtım kalınlığı ile oluşum enerjisi arasında lineer bir ilişki olup yalıtım kalınlığı arttıkça oluşum enerjisi de artmaktadır. Örneğin cam yünü ısı yalıtım malzemesinde yalıtım kalınlığı 3cm den 10cm ye artırıldığında oluşum enerjisi 1,63 kWh/m<sup>2</sup>’den 5,44 kWh/m<sup>2</sup>’e artmaktadır. Seçenekler oluşum karbonu açısından karşılaştırıldığında benzer sonuçlar görülmektedir. En düşük oluşum karbonuna sahip seçenek 0,40 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> ile 3cm kalınlığında cam yünü iken, en yüksek oluşum karbonu salımı 0,90 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> ile 3cm kalınlığında XPS’de gerçekleşmektedir. Oluşum karbonu da oluşum enerjisi gibi yalıtım malzemesinin kalınlığına bağlı olarak artmaktadır. Yapı kabuğunda ısı yalıtım malzemesi olarak XPS yerine cam yünü tercih edilmesi durumunda oluşum enerjisi açısından 7,77 kWh/m<sup>2</sup>, oluşum karbonu açısından 0,50 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> tasarruf gerçekleştirme potansiyeli bulunmaktadır.



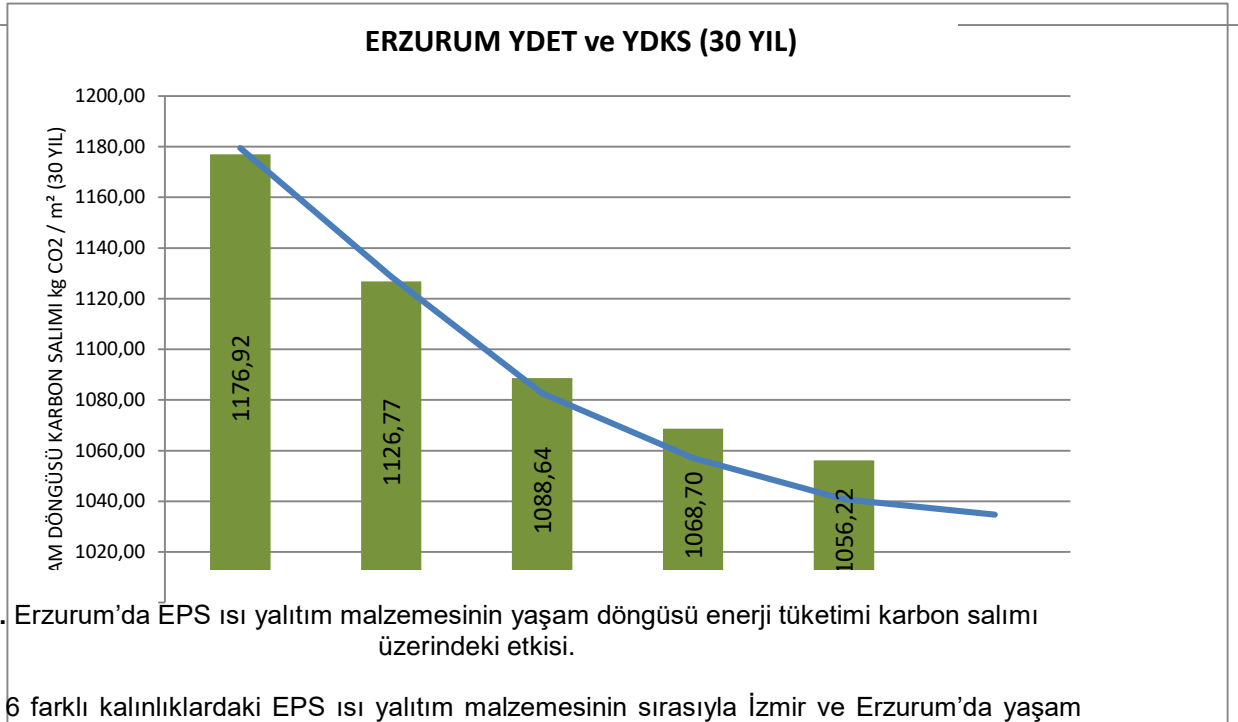
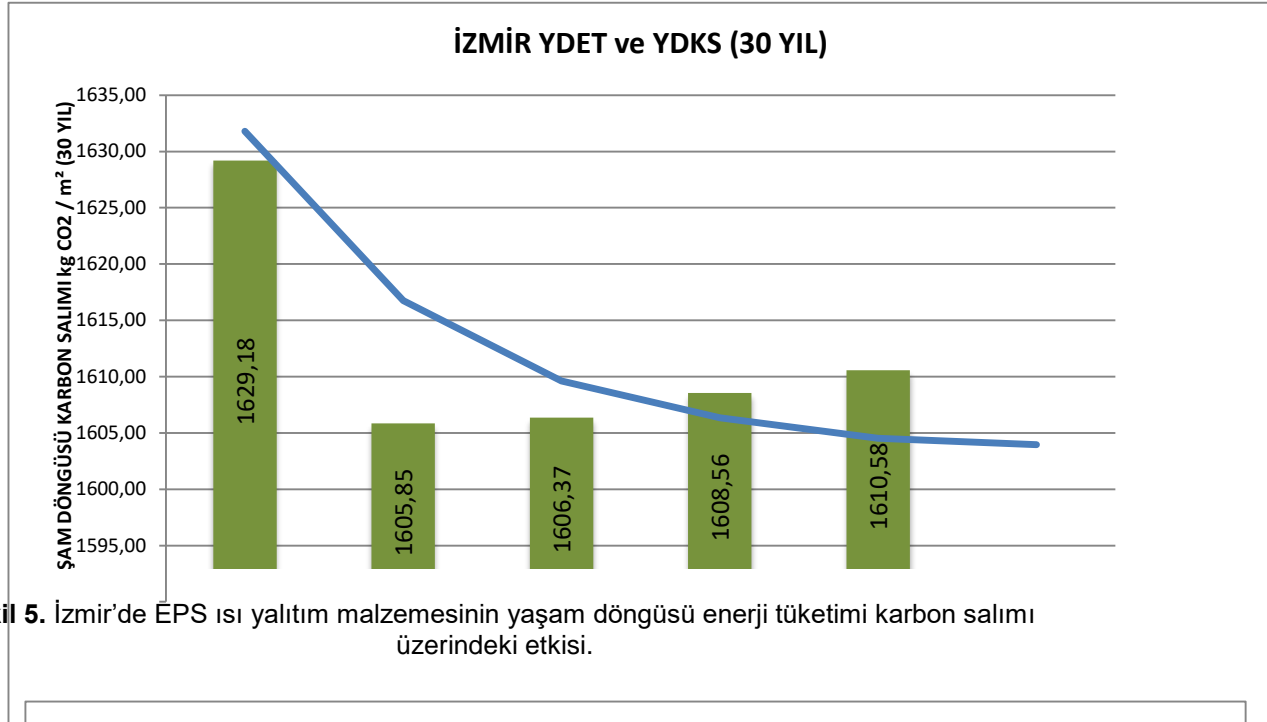
Şekil 3. Yalıtım kalınlığının iklim bölgelerine bağlı olarak ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etkisi.

Isı yalıtım kalınlığındaki artışın iklim bölgelerine bağlı olarak ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etkisi Şekil 3'de görülmektedir. Yalıtım kalınlığındaki artış iklim bölgesine bağlı olarak enerji tüketim performansını farklı şekilde etkilemektedir. Isı yalıtımı bulunmayan konut binasına 10cm ısı yalıtımı uygulanması durumunda ısıtma ve soğutma enerji tüketimi birincil enerji cinsinden ılımlı nemli iklim bölgesi İstanbul'da 60,56 kWh/m<sup>2</sup>'den 53,87 kWh/m<sup>2</sup>'e, sıcak nemli iklim bölgesi İzmir'de 69,17 kWh/m<sup>2</sup>'den 63,64 kWh/m<sup>2</sup>'e, soğuk iklim bölgesi Erzurum'da 77,57 kWh/m<sup>2</sup>'den 55,51 kWh/m<sup>2</sup>'e düşmektedir. Isı yalıtımı kalınlığının artırılması ılımlı nemli iklim bölgesinde %10, sıcak nemli iklim bölgesinde %8 ve soğuk iklim bölgesinde yaklaşık %30 enerji tasarrufu gerçekleştirmektedir. Isı yalıtım kalınlığının artırılması Erzurum gibi soğuk iklim bölgelerinde daha etkili enerji tasarrufu sağlarken sıcak nemli iklim bölgelerinde söz konusu tasarruf daha kısıtlı kalmaktadır. Isı yalıtım kalınlığındaki artış sıcak nemli iklim bölgelerinde özellikle gece soğutmasına kısıtladığından dolayı soğutma enerjisi tüketiminde artışa neden olmaktadır. Soğutmada yakıt olarak elektrik kullanılması ve elektriğin birincil enerji dönüşüm katsayısının 2,36 gibi yüksek bir değer olması toplam birincil enerji tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle sıcak nemli iklim bölgelerinde ısıtma enerjisi tüketimden sağlanan tasarruf soğutma enerjisi tüketimindeki artış nedeniyle toplam enerji tasarrufunun kısıtlı seviyede gerçekleşmesine neden olmaktadır. TS 825 binalarda ısı yalıtım yönetmeliği enerji performansı açısından ısıtma enerjisi tüketimi ve yapı kabuğunun toplam ısı geçirgenlik değerine odaklanmaktadır. Ancak yukarıdaki analizlerden görülebileceği gibi malzemelerin oluşum enerjisi, oluşum karbonu ve soğutma enerjisi tüketimi gibi parametrelerin dikkate alınması binalarda enerji verimliliği açısından önem arz etmektedir.



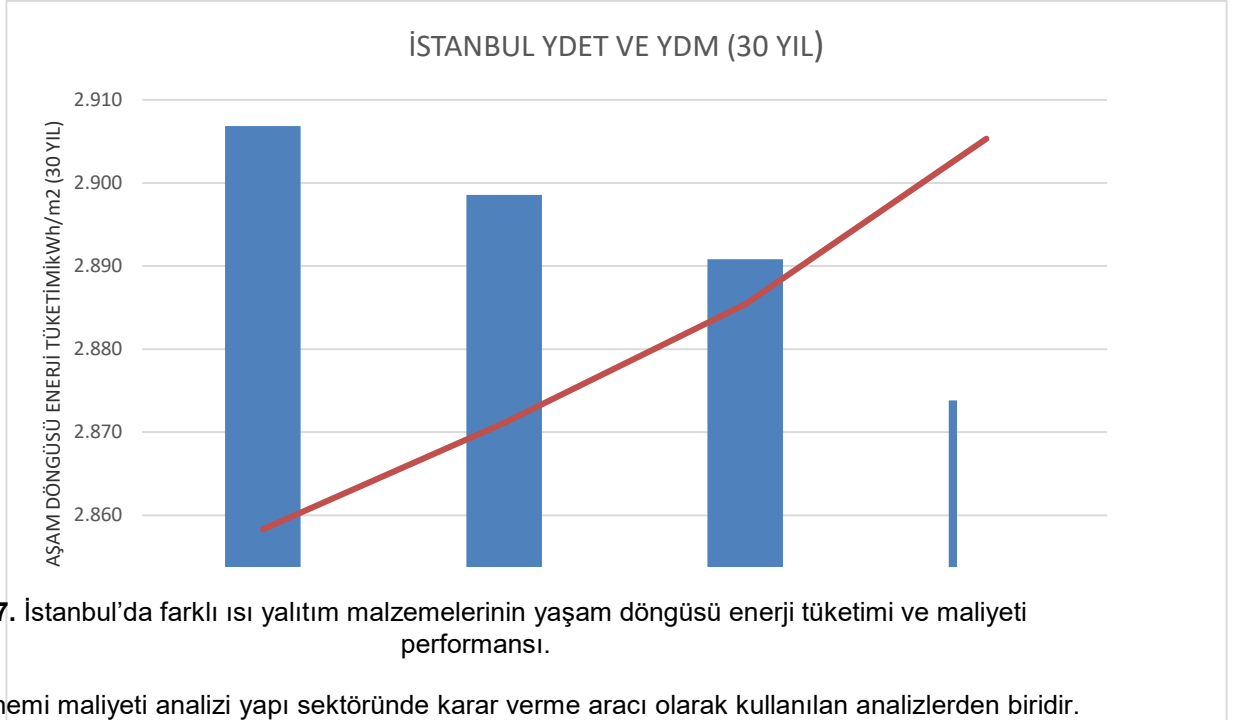
Şekil 4. Yalıtım kalınlığının karbon salımı üzerindeki etkisi.

Şekil 4'de yalıtım kalınlığındaki artışın iklim bölgesine bağlı olarak karbon salımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Yalıtım kalınlığındaki artışın birincil enerji tüketimindeki etkisine benzer etki karbon salımı üzerinde de görülmektedir. Yalıtım kalınlığının artması Erzurum gibi soğuk iklim bölgesinde karbon salımını azaltırken İzmir gibi sıcak nemli iklim bölgesinde karbon salımındaki azalma soğuk iklim bölgesine göre daha sınırlı seviyede gerçekleşmektedir. Soğutma enerjisi tüketimindeki artış birincil enerji tüketimini önemli ölçüde etkilediği gibi karbon salımını da etkilemektedir. Soğutmada yakıt olarak elektriğin kullanılması ve elektriğin yenilemeyen enerji kaynaklarından üretilmesi yüksek miktarda karbon salımına neden olmaktadır. Bu nedenle yalıtım kalınlığındaki artış özellikle sıcak nemli iklim bölgelerinde ısıtma kaynaklı karbon salımını azaltırken soğutma kaynaklı karbon salımını önemli ölçüde arttırmakta, toplamda karbon salımındaki azalmanın sınırlı seviyede kalmasına neden olmaktadır. Şekil 3 ve 4 yer alan veriler birlikte değerlendirildiğinde yalıtım kalınlığı enerji tüketimini ve buna bağlı gerçekleşen karbon salımını iklim bölgesine bağlı olarak farklı seviyede etkilemektedir. Örnek konut binası aynı fiziksel özelliğe sahip olmasına karşın iklim bölgesine bağlı olarak farklı seviyede birincil enerji tüketimi ve karbon salımı performansı göstermektedir.



Şekil 5 ve 6 farklı kalınlıklardaki EPS ısı yalıtım malzemesinin sırasıyla İzmir ve Erzurum'da yaşam döngüsü enerji tüketimi ve karbon salımına etkisini göstermektedir. Önceki paragrafta aktarıldığı üzere yalıtım kalınlığının artırılmasının yaşam döngüsü enerji tüketimi ve karbon salımına olan etkisi iklim bölgesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin sıcak nemli iklim bölgesi olan İzmir ele alındığında yalıtım kalınlığı artırıldıkça toplam birincil enerji tüketimi düşmekte ancak söz konusu düşüş 7cm kalınlıktan 10cm kalınlığa kadar sınırlı şekilde gerçekleşmektedir. Ancak aynı iklim bölgesinde 3cm den itibaren artırıldığında karbon salımı da artmaktadır. Söz konusu artışın nedeni soğutma enerjisi tüketimindeki artıştır. EPS ısı yalıtım kalınlığının artırılması yaşam döngüsü enerji tüketimi ve karbon salımı açısından soğuk iklim bölgesi olan Erzurum'da farklı performans göstermektedir. Erzurum'da yalıtım kalınlığının artırılması yaşam döngüsü enerji tüketimi ve karbon salımını azaltmaktadır. Soğuk iklim bölgelerinde gerçekleşen düşük seviyedeki soğutma enerjisi tüketimi nedeniyle yalıtım kalınlığının artması toplam birincil enerji tüketimi ve karbon salımına olumlu

yönde etki etmektedir. Özellikle sıcak nemli iklim bölgelerinde enerji korunumu ve karbon salımının indirgenmesi açısından soğutma enerjisi tüketim seviyesi büyük önem taşımaktadır. Daha önce belirtildiği üzere yüksek seviyede gerçekleşen soğutma enerjisi tüketimi ve soğutmada yakıt olarak elektriğin kullanılması birincil enerji tüketimi ve karbon salımını olumsuz yönde etkilemektedir. Birincil enerji dönüşüm katsayısı doğal gaz için 1, elektrik için 2,36'dır [10]. Bu nedenle soğutmada yakıt olarak elektrik kullanılması toplam birincil enerji tüketimini ve buna bağlı olarak gerçekleşen karbon salımını önemli ölçüde arttırmaktadır.

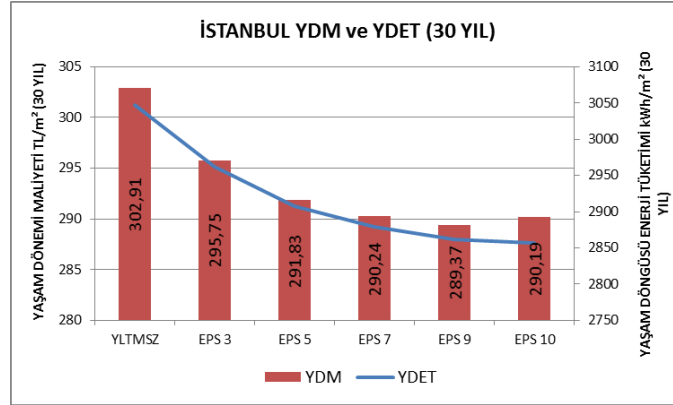


**Şekil 7.** İstanbul'da farklı ısı yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyeti performansı.

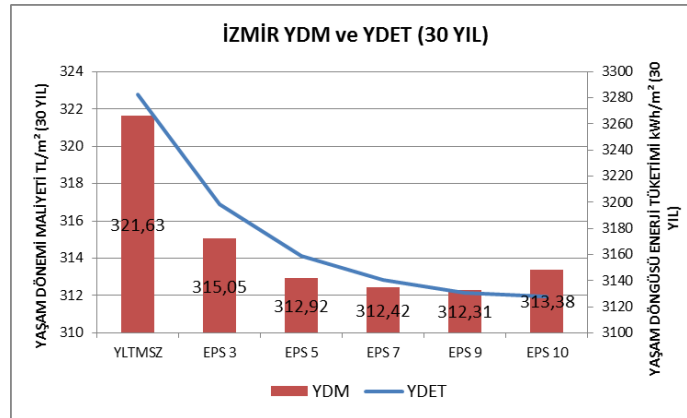
Yaşam dönemi maliyeti analizi yapı sektöründe karar verme aracı olarak kullanılan analizlerden biridir. Özellikle enerji etkin bina tasarımı veya yenilenmesinde seçeneklerin değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. Isı yalıtım malzemeleri farklı ilk yatırım maliyetine sahiptir. Ayrıca ısı yalıtım malzemelerinin binanın enerji tüketimi performansını üzerindeki etkisi farklı seviyededir. YDM hesaplamalarında binanın kullanım dönemindeki enerji tüketiminin ekonomik boyutu YDM performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Şekil 7'de farklı ısı yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyet analizi performansları görülmektedir. YDM açısından en düşük maliyete sahip seçenek 5cm kalınlığında EPS malzemesi iken en yüksek maliyete sahip seçenek 5cm kalınlığında taş yünü malzemedir. YDM açısından en düşük ve yüksek maliyete sahip seçenekler arasında 4,70 t/m<sup>2</sup> fark söz konusudur. Ancak yaşam dönemi maliyeti enerji tüketimi ile birlikte değerlendirildiğinde farklı bir sonuç çıkmaktadır. YDM açısından en düşük maliyete sahip EPS seçeneği yaşam döngüsü enerjisi tüketimi açısından en yüksek tüketime sahiptir. Bu nedenle ısı yalıtım malzemesinin ve kalınlığının belirlenmesinde enerji tüketimi üzerindeki etkisi, karbon salımı üzerindeki etkisi ve yaşam dönemi maliyeti gibi parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir.

Çeşitli kalınlıklarda EPS ısı yalıtım malzemelerinin üç farklı iklim bölgesi için yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyet performansı şekil 8,9 ve 10'da görülmektedir. Örnek konut binasında farklı kalınlıklarda EPS ısı yalıtım malzemesi kullanılması durumunda yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyet performansı iklim bölgesine göre değişkenlik göstermektedir. Soğuk iklim bölgesi olan Erzurum'da yalıtım kalınlığının artmasıyla yaşam dönemi enerji tüketimi ve maliyetin düşüş gösterdiği görülmektedir. Erzurum'da 9cm ısı yalıtım kalınlığından sonra yalıtım kalınlığındaki artışın yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyeti üzerindeki tasarruf etkisinin sınırlı seviyede kalmaktadır. Bu nedenle Erzurum için yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyet açısından optimum yalıtım kalınlığının 9cm olarak kabul edilebilir. İstanbul ve İzmir'de belirli bir yalıtım kalınlığından itibaren yaşam döngüsü enerji tüketiminin azaldığı ancak yaşam dönemi maliyetinin arttığı görülmektedir. Ilımlı nemli ve sıcak nemli iklim bölgelerinde soğutma enerjisi tüketimi yüksek seviyede gerçekleşmektedir. Soğutma sistemlerinde yakıt olarak elektriğin kullanılması ve elektriğin birim fiyatının doğal gaz a göre daha

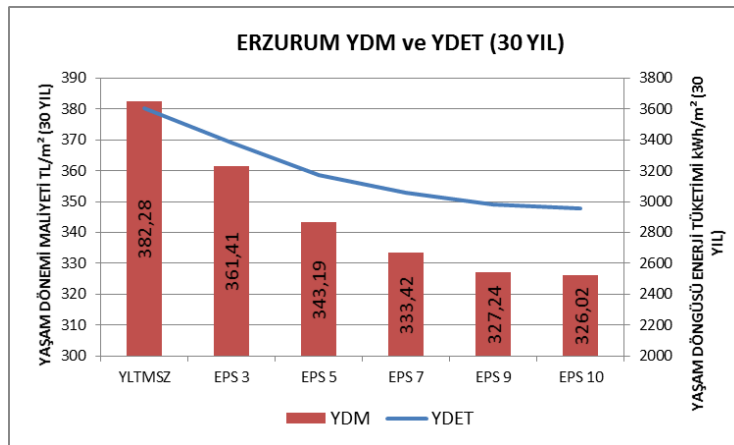
yüksek olması yaşam dönemi maliyetini arttırmaktadır. Önceki paragraflarda bahsedildiği üzere yalıtım kalınlığının artması özellikle ılımlı nemli ve sıcak nemli iklim bölgelerinde soğutma enerjisi tüketimin artmasına dolayısıyla elektrik kullanımı kaynaklı yaşam dönemi maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 8 ve 9 da yer alan farklı kalınlıklardaki EPS ısı yalıtımı malzemesine sahip konut binasının yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyet performansı incelendiğinde enerji tüketimi ve maliyet açısından optimum yalıtım kalınlığının İstanbul ve İzmir için 5cm olarak kabul edilebilir. Ancak bu bölüm içerisinde sözü edilen optimum kalınlık seçeneklerin yaşam döngüsü enerji tüketimi ve maliyeti açısından karşılaştırılmasından elde edilen bulgulardır.



Şekil 8. Çeşitli kalınlıklardaki EPS ısı yalıtım malzemesinin YDET ve YDM performansı (İstanbul).



Şekil 9. Çeşitli kalınlıklardaki EPS ısı yalıtım malzemesinin YDET ve YDM performansı (İzmir).



Şekil 10. Çeşitli kalınlıklardaki EPS ısı yalıtım malzemesinin YDET ve YDM performansı (Erzurum).



## 2.5. Bulguların Değerlendirilerek Optimum Performansı Gösteren Seçeneklerin Elde Edilmesi:

Yaklaşımın son adımı önceki adımda elde edilen bulguların derlenerek değerlendirilmesi ile yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet açısından optimum performansı gösteren seçeneklerin elde edilmesi yer almaktadır. Yürürlükte olan binalarda ısı yalıtım kuralları standardı TS 825 ısı yalıtımı uygulamaları açısından yapı kabuğunun ısı geçirgenlik katsayısına ( $U: W/(m^2K)$ ) odaklanmaktadır. Tablo 9'da çalışmada yer alan iklim bölgeleri için TS 825'e uygun yalıtım kalınlıklarında farklı ısı yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet performansları ile en düşük ve en yüksek performanslar arasındaki fark yer almaktadır. Tablodan görüldüğü üzere ısı iletkenlik değerleri ve kalınlıkları aynı olmasına karşın ısı yalıtım malzemelerinin konut binasının yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet gibi hususlarda performansına etkisi farklı şekillerde gerçekleşmektedir. En düşük ve yüksek performans arasındaki fark iklim bölgesine göre değişkenlik göstermektedir. Seçilen ısı yalıtım malzemesinin oluşum enerjisi, oluşum karbonu, termal özellikleri ve maliyeti gibi parametreler konut binasının performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle ısı yalıtım malzemesinin ve kalınlığının belirlenmesinde yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet gibi parametrelerin de dikkate alınması gerekmektedir. Geliştirilen yaklaşımın Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde bulunan örnek bir konut binasına uygulanması ile yaşam döngüsü enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet açısından optimum performans gösteren seçenekler, İstanbul için ve İzmir için XPS ve cam yünü, Erzurum için taş yünü olarak belirlenmiştir.

**Tablo 9.** Seçilen iklim bölgelerinde TS 825'e göre minimum yalıtım kalınlığı seçeneklerinin performansı

İSTANBUL			
Malzeme	Yaşam Döngüsü Enerji Tüketimi (YDET) kWh/m <sup>2</sup> (30 yıl)	Yaşam Döngüsü Karbon Salımı (YDKS) kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> (30 yıl)	Yaşam Dönemi Maliyeti (YDM) tl/m <sup>2</sup> (30 yıl)
EPS 5 cm.	2906.86	1321.60	291.83
XPS 5 cm.	2898.55	1323.91	293.11
Cam yünü 5cm.	2890.81	1322.30	294.54
Taş yünü 5 cm.	2873.83	1332.88	296.53
Fark	33.03 kwh/m <sup>2</sup>	11.28 kg co <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	4.7 tl/m <sup>2</sup>
İZMİR			
Malzeme	Yaşam Döngüsü Enerji Tüketimi (YDET) kWh/m <sup>2</sup> (30 yıl)	Yaşam Döngüsü Karbon Salımı (YDKS) kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> (30 yıl)	Yaşam Dönemi Maliyeti (YDM) tl/m <sup>2</sup> (30 yıl)
EPS 3 cm.	3198.58	1605.85	315.05
XPS 3 cm.	3188.28	1605.84	316.33
Cam yünü 3 cm.	3185.68	1605.44	316.56
Taş yünü 3 cm.	3163.50	1615.58	320.26
Fark	35.08 kwh/m <sup>2</sup>	10.14 kg co <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	5.21 tl/m <sup>2</sup>
ERZURUM			
Malzeme	Yaşam Döngüsü Enerji Tüketimi (YDET) kWh/m <sup>2</sup> (30 yıl)	Yaşam Döngüsü Karbon Salımı (YDKS) kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> (30 yıl)	Yaşam Dönemi Maliyeti (YDM) tl/m <sup>2</sup> (30 yıl)
EPS 9 cm.	2983.41	1056.22	327.24
XPS 9 cm.	2954.23	1050.56	327.92
Cam yünü 9cm.	2945.30	1051.13	331.07
Taş yünü 9 cm.	2900.03	1046.58	329.19
Fark	83.38 kWh/m <sup>2</sup>	9.64 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	3.83 tl/m <sup>2</sup>

## SONUÇ

Yapı kabuğu binaların enerji performansı üzerinde önemli etkisi olan bir yapı elemanıdır. Yapı kabuğuna ısı yalıtımı uygulaması da binalarda enerji verimliliği bağlamında en sık başvurulan uygulamaların başında gelmektedir. Özellikle ülkemizde binalarda enerji verimliliği ve ısı yalıtımı uygulamaları konuyu bütüncül bir bakış açısı ile ele almamakta sadece kullanım döneminde gerçekleşen enerji tüketimine veya yapı kabuğunun ısı geçirgenlik değerine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, bu alanda yapılan çalışmalar ile yürürlükte olan standart ve yönetmeliklerin eksik olduğu düşünülen bütüncül bakış açısına sahip bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ısı yalıtım malzemesi ve yalıtım kalınlığının belirlenmesinde konunun yaşam döngüsü perspektifinden ele alınarak enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet açısından değerlendirilmesini önermektedir. Geliştirilen yaklaşımın örnek bir konut binasına uygulanmasından elde edilen bulgulardan görülebileceği gibi ısı yalıtım malzemelerinin ısıl geçirgenlik katsayılarının birbirine yakın olmasına karşın binanın yaşam döngüsünde gerçekleşen enerji tüketimi, karbon salımı ve maliyet performansına direkt etkisi büyük ve iklim bölgesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çalışma ile elde edilen bulgulardan görülebileceği gibi yürürlükte olan standart ve yönetmeliklerin bütüncül bir bakış açısı ile revize edilmesi büyük önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular ve sonuçların çalışma kapsamına alınan parametreler dâhilinde elde edilen sonuçlar olduğu ilerde yapılacak çalışmalarda farklı parametrelerin dâhil edilmesi ile farklı sonuçlar elde edileceği unutulmamalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] UNEP(United Nations Environment Programme), <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>.
- [2] L. DE BOECK, et al. Improving the energy performance of residential buildings: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 52: 960-75.
- [3] ICE, Inventory of Carbon & Energy, University of Bath, 2008. <http://perigordvacance.typepad.com/files/inventoryofcarbonandenergy.pdf>.
- [4] Green Spec, <http://www.greenspec.co.uk/building-design/embodied-energy/>.
- [5] GABI Software, GABI 6.0 Extension Database, Construction Materials, 2014.
- [6] T.C. Başbakanlık Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ), [www.toki.gov.tr](http://www.toki.gov.tr)
- [7] CEN/TC. 350, Sustainability of Construction Works-assessment of Buildings –part 2: Framework for the Assessment of Environmental Performance, prEN,15643-2, AFNOR, 2008.
- [8] Karin Adalberth. Energy use during the Life Cycle of Buildings: a Method. Building and Environment 1997; 32: 317-320.
- [9] TS 825 'Binalarda Isı Yalıtım Kuralları' TSE, Ankara 2008.
- [10] BEP-TR 'Binalarda Enerji Verimliliği Yönetmeliği' Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara 2010
- [11] Yılmaz, Z. ve diğerleri (2015). Binalarda Optimum Enerji Verimliliği Seviyesi İçin Türkiye Koşullarına Uygun Yöntemin ve Referans Binaların Belirlenmesi. TÜBİTAK bilimsel araştırma projesi 113M596, İstanbul.
- [12] Baek, C., Park, S.H., Suzuki, M. Ve Lee, S.H. (2013). Life Cycle Carbon dioxide Assesment Tool for Buildings in The Schematic Design Phase. Energy and Buildings, 61, 275-287.
- [13] Directive 2010/31/EU, Directive of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast), 2010.
- [14] 2015 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı, Ankara, 2015.
- [15] BEDAŞ 'www.bedas.com.tr' Erişim tarihi Temmuz 2016.
- [16] İGDAŞ 'www.igdas.com.tr' Erişim tarihi Temmuz 2016
- [17] Gediz Elektrik 'www.gdzelektrik.com.tr' Erişim tarihi Temmuz 2016.
- [18] İzmir Gaz 'www.izmirgaz.com.tr' Erişim tarihi Temmuz 2016.
- [19] Aras Elektrik Dağıtım A.Ş. 'www.arasedas.com.' Erişim tarihi Temmuz 2016.
- [20] Palen Enerji 'www.palen.com.tr' Erişim tarihi Temmuz 2016.
- [21] Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası 'www.tcmb.gov.tr' Erişim tarihi Temmuz 2016.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kemal Ferit ÇETİNTAŞ**

1978 yılı İstanbul doğumludur. 2002 yılında Beykent Üniversitesi Mimarlık bölümünü bitirmiştir. 2004 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi programından ‘Çift Kabuklu Cephelerin Isı Kayıplarının Hesaplamasında Kullanılabilecek Yeni Bir Yaklaşım’ adlı yüksek lisans tezi ile yüksek mimar unvanını almıştır. 2011 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Bilimleri programında başladığı doktora eğitimine devam etmektedir. 2014 yılından itibaren İstanbul Arel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mimarlık bölümünde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Binalarda enerji verimliliği konusunda çalışmaktadır.

### **Zerrin YILMAZ**

1979 yılından beri İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Fiziksel Çevre Kontrolü Birimi’nde görev yapmakta olan, 1983-1984 yılları arasında “Lawrence Berkeley Laboratory Passive Solar Group” ile çalışan ve 1993 yılından beri İTÜ de aynı birimde görevini profesör olarak sürdüren A. Zerrin Yılmaz’ın enerji etkin tasarım, bina fiziği, yeşil bina, bina enerji simülasyonu ve enerji modelleme, iklimsel konfor, binalarda güneş enerjisi kullanımı ve yoğuşma kontrolü konularında ulusal ve uluslararası 100 den fazla yayını, ikisi halen devam etmekte olan ulusal ve uluslararası araştırmaları, yürüttüğü yüksek lisans ve doktora tezleri ve bu alanlarda uygulamaları bulunmaktadır. Binalarda enerji verimliliği, yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımı, bina enerji modelleme ve enerji etkin iyileştirme gibi alanlarda çeşitli ulusal ve AB projeleri dâhil uluslar arası projelerde çoğunlukla yönetici olarak yer almıştır. Bu alandaki CITYNET AB projesi Avrupa Komisyonu tarafından star projeler arasına alınmıştır. Binalarda Enerji Performansı hesaplama yöntemi araştırmasında BEP-TR hesaplama yönteminin net enerji hesaplama modülünü geliştiren grubun koordinatörlüğünü yapmıştır. Ayrıca, Türkiye için konutlara yönelik yeşil bina sertifikalandırma sisteminin oluşturulmasında, enerji verimliliği kredilerinin belirlenmesi ve farklı konut tipolojileri için referans binaların tanımlanması konusunda görev yapmıştır. Halen EPBD-Recast kapsamında AB ülkelerinde Referans Bina çalışmaları yapmak üzere kurulmuş TASK-FORCE1 ekibinin Türkiye’den davetli üyesi olarak görev yapmaktadır.