



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Türkiye’de konut tipi binaların ısıtma yükü altında ömür maliyet analizi yöntemi ile optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi

Determination of optimum insulation thickness based on heating load by life-cycle cost analysis for residential buildings in Turkey

Yazar(lar) (Author(s)): Nusret AYDIN¹, Atilla BIYIKOĞLU²

ORCID¹: 0000-0003-1280-4631

ORCID²: 0000-0002-2133-6721

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aydın N. ve Bıyıkoğlu A., “Türkiye’de konut tipi binaların ısıtma yükü altında ömür maliyet analizi yöntemi ile optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 901-911, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.435773

Türkiye’de Konut Tipi Binaların Isıtma Yükü Altında Ömür Maliyet Analizi Yöntemi ile Optimum Yalıtım Kalınlıklarının Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Nusret AYDIN^{1*}, Atilla BIYIKOĞLU²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Silah Sistemleri Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

(Geliş/Received : 22.06.2018 ; Kabul/Accepted : 18.12.2018)

ÖZ

Binalarda yalıtım kalınlığı, bina kabuğunun tasarımında önemli bir parametredir. Binalarda yalıtım kalınlığının belirlenmesinde, ömür maliyet analizi sıklıkla kullanılan bir optimizasyon yöntemidir. Literatürde, yakıt maliyeti ve yalıtım maliyetinden oluşan toplam maliyetin minimum olduğu yalıtım kalınlığı, optimum yalıtım kalınlığı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye’deki konut tipi binalar için ısıtma etkisi altında optimum yalıtım kalınlıklarının ömür maliyet analizi yöntemi ile belirlenmesidir. Binaların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardına göre hesaplanmıştır. Yalıtım malzemesi olarak; tavanda cam yünü, tabanda ekstrüde polistiren (XPS) ve dış duvarlarda genişletilmiş polistiren (EPS), yakıt olarak doğalgaz kullanılmıştır. Optimizasyon metodu olarak toplam maliyete dayalı optimizasyon yaklaşımını temel alan ömür maliyet analizi metodu kullanılmıştır. Optimum yalıtım kalınlıkları (U-değerleri), 30 yıllık kullanım ömrü için iklim bölgelerine göre; dış duvar için 8,1 cm ile 16,4 cm (0,38-0,20 W/m²K), tavan için 14,2 cm ile 26,8 cm (0,29-0,16 W/m²K), zemin için 5,0 cm ile 9,8 cm (0,57-0,32 W/m²K) arasında hesaplanmıştır. Sonuç olarak, TS 825 standardında belirtilen limit yalıtım kalınlıkları ile karşılaştırıldığında, optimum yalıtım kalınlıkları kullanılarak yalıtım yapılan bir binanın ülke genelinde sağlayacağı enerji tasarrufunun bölgelere göre %10,08 ile %18,88 arasında değiştiği belirlenmiştir. Geri ödeme sürelerindeki artışların en kötü durumda bile %10 değerini geçmediği düşünüldüğünde, TS 825 standardında belirtilen dört farklı iklim bölgesi için optimum yalıtım kalınlıklarının (U-değerlerinin) revize edilmesinin gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optimum yalıtım kalınlığı, ısı yalıtımı, TS 825 Standardı, ömür maliyet analizi.

Determination of Optimum Insulation Thickness Based on Heating Load by Life-Cycle Cost Analysis for Residential Buildings in Turkey

ABSTRACT

The insulation thickness of the building is an important parameter in the design of the building envelope. Life-cycle cost analysis is often used as an optimization method in determining the thickness of the insulation in buildings. In literature, the insulation thickness which the total cost is minimum is defined as the optimum insulation thickness. In this study, the optimum insulation thicknesses of residential buildings in Turkey were determined by life-cycle cost analysis (LCCA). The annual heating energy requirement of the buildings are calculated according to the Turkish Standard 825, Thermal Insulation Requirements for Buildings. Glass wool, extruded polystyrene (XPS) and expanded polystyrene (EPS) are used for ceiling, floor and wall as insulation material respectively and natural gas is used as fuel. Life-cycle cost analysis based on the total cost approach is used as the optimization method. Optimum insulation thicknesses (U-values) based on climate zones for a period of 30 years are calculated between 14,2 cm and 26,8 cm (0,29-0,16 W/m²K) for ceiling, 5,0 cm and 9,8 cm (0,57-0,32 W/m²K) for floor, 8,1 cm and 16,4 cm (0,38-0,20 W/m²K) for wall. As a result, when compared with the limited insulation thicknesses specified in TS 825 standard, it has been determined that the energy savings to be provided by an insulation building using optimum insulation thicknesses vary between 10,08% and 18,88% according to the region. These results have reached the conclusion that optimum insulation thicknesses (U-values) should be revised for all regions specified in the TS 825 standard, as the increase in payback period is considered not to exceed 10% even in the worst case.

Keywords: Optimum insulation thickness, thermal insulation, TS 825 standard, life-cycle cost analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde insan nüfusu ve tüketimi hızla çoğalmakta, buna paralel olarak enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bunun sonucunda enerji günümüzün en

stratejik unsuru haline gelmiştir. Yeterli kaynaklara sahip olmayan ülkelerin en önemli sorunlarının başında enerji ihtiyacı gelmektedir. Ayrıca, sanayileşme ve teknolojinin gelişmesiyle kişi başına düşen enerji tüketiminin artması, çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi çevresel sorunların hızla büyümesine neden olmaktadır. Hızlı tüketim ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nusretayd@yahoo.com

kısıtlı enerji kaynakları nedeniyle enerji fiyatları her geçen gün daha da artmaktadır.

Enerjinin daha verimli kullanılması ancak enerjinin korunması ile mümkün olmaktadır. Türkiye’de enerjinin yaklaşık % 35’i, toplam elektrik tüketiminin ise yaklaşık % 43’ü konutlarda kullanılmaktadır [1]. Konutlarda tüketilen bu enerjinin % 65’i ise ısıtma amacıyla harcanmaktadır [1]. İnşaat sektöründeki gelişmeler göz önüne alındığında, gelecekte ısınma için kullanılan enerji miktarının daha da artması beklenmektedir. Bu nedenle, enerji tasarrufu, kullanılan enerjinin çoğunu ithal eden ülkemiz için çok daha önemlidir. Avrupa Birliği ülkeleriyle karşılaştırıldığında, ülkemizde konutlarda kullanılan enerji oranı oldukça yüksektir. Yapılan araştırmalar; ülkemizde binalarda kullanılan enerji miktarının Avrupa Birliği ülkeleri seviyesine indirilmesi durumunda, ortalama % 30 ile 40 oranında enerji tasarrufunun mümkün olduğu göstermektedir [2].

Literatürde optimum yalıtım kalınlığı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. En basit ve sık kullanılan model, derece-gün yöntemidir. Optimum yalıtım kalınlığının hesaplanmasında bir diğer yöntem de, derece gün metodundan entegre edilen ekonomik P1-P2 modelidir. Literatürde sayısal yöntemlere dayalı dinamik geçiş modelleri de mevcuttur. Bazı çalışmalarda Fourier Serisi analizine dayanan analitik yöntemler uygulanmıştır [3].

Binalarda yalıtım kalınlığı, bina kabuğunun tasarımında önemli bir parametredir. Düşük yalıtım kalınlığı, ısının daha hızlı aktarılmasına sebep olarak ısı konfor ve enerji tasarrufu üzerinde olumsuz bir etki oluşturur. Binalarda, artan yalıtım kalınlığı ile ısı kaybı, dolayısıyla yakıt maliyeti azalır. Ancak, yalıtım kalınlığının artması yalıtım maliyetinin de artması demektir. Yakıt ve yalıtım maliyetinin toplamından oluşan toplam maliyet, belirli bir değere kadar azalır; bu seviyeden sonra tekrar artar. Dolayısıyla yalıtım kalınlığı için optimum bir değer söz konusudur. Bu optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde, zaman önemli bir parametredir. Optimizasyon süresi optimum yalıtım kalınlığını önemli ölçüde değiştirmektedir. Avrupa Birliği’nde (AB) binaların enerji talebini sınırlamaya yönelik gereksinimleri ve hesaplama kurallarını içeren temel yasal düzenleme Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (EPBD)’dir [4]. EPBD için çıkarılan tüzük ve kılavuzlara göre, Avrupa Birliği (AB), konut ve kamu binaları için 30, ticari ve konut dışı binalar için 20 yıllık bir hesaplama periyodunu kullanmayı öngörmektedir [5]. Maliyet optimizasyonu ve yaklaşık sıfır enerjili bina (nZEB), Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği’nde yer alan iki temel kavramdır.

Hasan [6], yaptığı çalışmada optimum yalıtım kalınlığı hesabı için derece-gün metodu ile birlikte ömür maliyet analizini kullanmıştır. Filistin’deki konutlar için yaptığı çalışmada, hesapladığı optimum yalıtım kalınlığıyla dış duvarların yalıtılması durumunda 10 yıllık bir zaman zarfında yaklaşık 21 \$/m² enerji tasarrufu elde edilebileceğini belirlemiştir. Geri ödeme sürelerinin, polistiren malzeme için 1-1,7 yıl, taş yünü için ise 1,3-2,3

yıl arasında değiştiğini raporlamıştır. Çomaklı ve Yüksel [7], Erzurum, Erzincan ve Kars şehirlerindeki binalarda EPS kullanarak dış duvar yalıtımı için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. 10 yıllık bir kullanım ömrü için, yalıtım malzemesi olarak EPS ve yakıt olarak kömür kullanıldığında, dış duvar için optimum yalıtım kalınlıklarını Erzurum için 0,10 m, Kars için 0,10 m ve Erzincan için 0,08 m olarak belirlemişlerdir. Özel [8], Elazığ ili için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme sürelerini üç farklı yakıt türü için hesaplamıştır. Doğalgaz, ithal kömür ve fuel-oil için optimum dış duvar yalıtım kalınlıklarını sırasıyla 0,04, 0,045 ve 0,075 m olarak hesaplamıştır. İnallı ve arkadaşları [9] çalışmalarında, İzmir, Diyarbakır, Uşak ve Bayburt olmak üzere dört farklı derece-gün bölgesinden birer şehir için TS 825 standardını kullanarak optimum yalıtım kalınlıklarını belirlemişlerdir. Dış duvar için optimum yalıtım kalınlıklarının 0,038 cm ile 0,144 cm arasında değiştiğini hesaplamışlardır. Dikmen [10] çalışmasında, Dinar’ın köylerinde inşa edilmiş olan afet konutlarını TS 825 Standardına uygunluğu açısından incelemiştir. TS 825 standardını kullanarak yaptığı hesaplamalar sonucunda, çatı için 12 cm kalınlıkta cam yünü, duvar için 8 cm kalınlıkta EPS ve toprağa oturan döşeme için 7 cm kalınlıkta XPS kullanılması gerektiğini belirlemiştir. Kürekçi [11] çalışmasında, Türkiye’nin 81 il merkezi için dört farklı yakıt (doğalgaz, kömür, fuel-oil ve LPG) ve beş farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, cam yünü, taş yünü ve poliüretan) kullanarak optimum yalıtım kalınlıklarını hesaplamıştır. Bu hesaplamalarını sadece ısıtma yükü, sadece soğutma yükü ve ısıtma ile soğutma yükünün birlikte olduğu durumlar için 10 yıllık bir optimizasyon süresi için yapmıştır.

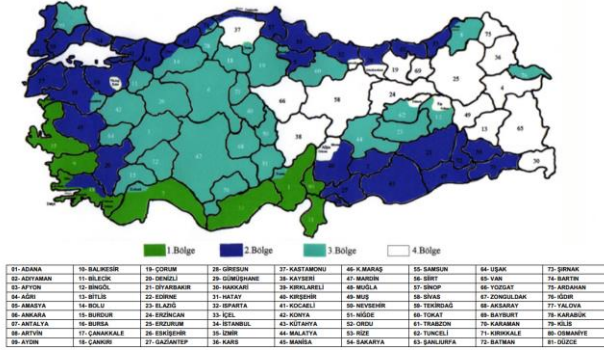
Mevcut literatür incelendiğinde, yapılan çalışmalarda genellikle derece gün metodu kullanıldığı, ömür maliyet analizinin 10 yıllık bir zaman dilimi için yapıldığı ve dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlıklarının hesaplandığı görülmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye’deki binalar için minimum enerji performans gerekliliklerinin optimum maliyet seviyelerinin hesaplanması için EPBD’ye dayanan bir yöntem kullanılmıştır. Referans binaların yıllık enerji ihtiyacı, TS 825 standardına göre hesaplanmıştır [12]. Türkiye’de dört bölge için optimum U-değerleri, optimum yalıtım kalınlığı, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme süreleri, konut tipi binalar için 30 yıllık bir süre dikkate alınarak hesaplanmıştır. Optimum yalıtım kalınlıkları; dış duvar, tavan ve taban için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Doğalgaz, ısıtma için enerji kaynağı olarak seçilmiştir. Tavan için ısı iletim katsayısı 0,045 W/m²K olan cam yünü, taban için ısı iletim katsayısı 0,035 W/m²K olan XPS ve dış duvar için ısı iletim katsayısı 0,035 W/m²K olan EPS yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır.

TS 825’e göre, Türkiye, Şekil 1’de gösterildiği gibi, ortalama sıcaklık değerlerine göre dört farklı iklim

bölgesine ayrılmıştır. TS 825 standardına göre DG1 en soğuk, DG4 ise en sıcak bölgedir. Hesaplamalar Türkiye'nin farklı iklime sahip dört bölgesi için yapılmıştır. TS 825 standardında tavan, taban ve dış duvar için belirtilen limit U-değerleri, hesaplanan optimum değerlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. TS 825 Standardına göre DG bölgeleri (Climate regions of Turkey according to the TS 825 standard)

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Hesaplamalar için Excel programında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım kullanılarak farklı yalıtım kalınlıklarına karşı gelen, yıllık enerji ihtiyaçları ve yalıtım maliyetleri hesaplanmıştır. 30 yıllık bir süre için ömür maliyet analizi yapılarak, yalıtım maliyeti ve yakıt maliyetinden oluşan toplam maliyetin minimum olduğu optimum yalıtım kalınlıkları ve optimum U-değerleri belirlenmiştir. Hesaplamalar tavan, taban ve dış duvarlar için ayrı yapılmıştır. Hesaplamalar her bir DG bölgesi için tekrarlanmıştır.

2.1. Bina Zarfının Yapısı (The Structure of Building Envelope)

Binalarda ısı kayıpları ve kazançlar genellikle dış duvar, tavan, zemin, pencere ve havalandırma yoluyla gerçekleşir. Bu çalışmada, bina zarfı ve havalandırma yoluyla oluşan ısı kayıpları ve kazançlar dikkate alınarak binanın yıllık ısıtma ihtiyacı belirlenmiştir. Hesaplamalar, aynı referans bina için dört farklı DG bölgesinde yapılmıştır.

Dış duvar, tavan ve taban yüzeylerini oluşturan zarf bileşenleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bina yalıtımında, kullanım alanına (dış duvar, tavan, taban) göre en yüksek pazar payına sahip yalıtım malzemesi tercih edilmiştir. Çatı yalıtımında %70 pazar payına sahip cam yünü, döşeme yalıtımında %85 pazar payına sahip XPS ve dış duvar yalıtımında %80 pazar payına sahip EPS yalıtım malzemesi olarak belirlenmiştir [13]. Dış duvar, tavan ve taban bileşenlerinin fiziksel özellikleri ile ısı direnç değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de sunulan ısı iletim katsayıları ve ısı direnç değerleri TS 825 standardından alınmıştır [12].

Bu çalışmada kullanılan referans binanın fiziksel özellikleri ile pencere tipi Çizelge 2'de verilmiştir.

2.2. Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacının Hesaplanması (Calculation of annual energy requirement for heating)

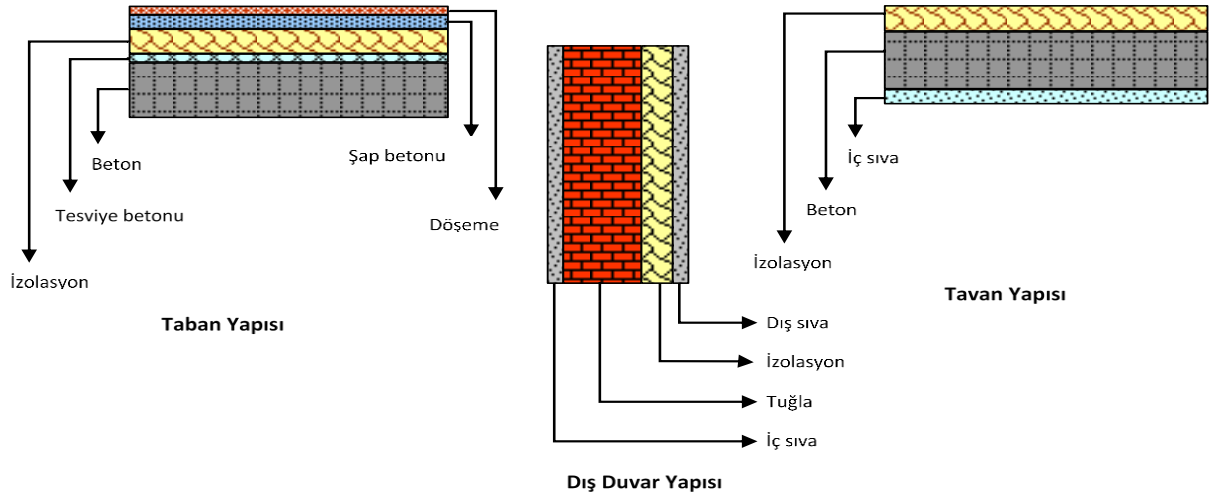
TS 825 standardında tanımlanan hesap metoduna göre, bir yapının yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (Q_{yil}), aylık net ısı ihtiyaçlarının toplanmasıyla bulunur.

$$Q_{yil} = \sum Q_{ay} \quad (1)$$

Aylık net ısı ihtiyacı (Q_{ay}), iç ortamda belli bir konfor sıcaklığını sağlamak için gereken ısı enerjisi olup binanın aylık toplam ısı kayıplarından, aylık iç ve güneş enerji kazançları toplamını çıkartmak suretiyle hesaplanır.

Çizelge 1. Yapı malzemelerinin fiziksel özellikleri (The physical properties of building materials)

Duvar Yapısı	Kalınlık (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
İç Sıva	0,02	0,7	0,029
Tuğla	0,19	0,45	0,422
Genişletilmiş Polistiren (EPS)	x	0,035	x/0,035
Dış Sıva	0,008	0,38	0,021
R _i			0,13
R _e			0,04
Tavan Yapısı	Kalınlık (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
İç Sıva	0,02	0,7	0,029
Beton	0,12	2,5	0,048
Cam yünü	x	0,045	x/0,045
R _i			0,13
R _e			0,04
Taban Yapısı	Kalınlık (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
Beton	0,12	2,5	0,048
Tesviye Betonu	0,02	1,4	0,014
Ekstrude Polistiren (XPS)	x	0,035	x/0,035
Şap Betonu	0,03	1,4	0,021
Döşeme	0,005	0,23	0,022
R _i			0,17
R _e			0



Şekil 2. Bina zarfının yapısı (The structure of the building envelope)

Çizelge 2. Bina özellikleri (The building properties)

Bina Özellikleri	Değer	Bina Özellikleri	Değer
A/V	0,30	Güney yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,g}$ (m ²)	198
Bina kullanım amacı	Konut	Doğu yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,d}$ (m ²)	142
Bina kat sayısı	10	Batı yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,b}$ (m ²)	142
Bina eni (m)	15	Kuzey yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,k}$ (m ²)	86
Bina boyu (m)	20	Toplam pencere alanı, A_P (m ²)	568
Kat yüksekliği (m)	2,80	Dış havaya açık toplam dış duvar alanı, A_D (m ²)	980
Pencereler 12 mm aralıklı çift camlı	PVC	Dış havaya açık taşıyıcı betonarme alanı, A_B (m ²)	412
Havalandırma	Doğal	Toplam cephe alanı, A_C (m ²)	1392
Taban alanı, A_t (m ²)	300	Isı kaybeden toplam yüzey alanı A_{top} (m ²)	2560
Tavan alanı, A_T (m ²)	300	Bina kullanım alanı, A_n (0,32xV _{brüt}) (m ²)	2688
Binanın brüt hacmi, $V_{brüt}$ (m ³)	8400	Havalandırılan Alan, V_h (0,8xV _{brüt}) (m ³)	6720

Aylık ısıtma enerjisi gereksinimi (Q_{ay}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır;

$$Q_{ay} = [H(\theta_i - \theta_e) - \eta_{ay}(\Phi_{i,ay} + \Phi_{s,ay})] \times t \quad (2)$$

Bu eşitlikte; aylık ısıtma enerji ihtiyacı, Q_{ay} (kWh/m²), binanın özgül ısı kaybı H (W/K), aylık ortalama iç sıcaklık θ_i (°C), aylık ortalama dış sıcaklık θ_e (°C), kazançların aylık ortalama kullanım faktörü η_{ay} , aylık ortalama iç kazançlar $\Phi_{i,ay}$ (W), aylık ortalama güneş enerjisi kazancı $\Phi_{s,ay}$ (W), zaman t (s) (saniye olarak bir ay = 86400 x 30) olarak ifade edilmiştir. Binanın özgül ısı kaybı H (W/K), aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır;

$$H = H_T + H_V \quad (3)$$

Bu eşitlikte; iletim ve taşınım ile olan ısı kaybı H_T (W/K), havalandırma yoluyla olan ısı kaybı H_V (W/K) olarak ifade edilir. İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$H_T = \sum AU + IU_I \quad (4)$$

İletim ile olan ısı kaybı hesaplamalarında ısı köprülerinden meydana gelen ısı kayıpları, IU_I ihmal edilmiştir.

$$\sum AU = U_D A_D + U_P A_P + 0,8 U_T A_T + 0,5 U_t A_t \quad (5)$$

Bu eşitlikte; Dış duvarın ısı transfer katsayısı U_D (W/m²K), Pencerelerin ısı transfer katsayısı U_P (W/m²K), Tavanın ısı transfer katsayısı U_T (W/m²K), Tabanın ısı transfer katsayısı U_t (W/m²K), Duvar alanı A_D (m²),

Pencerelerin alanı A_P (m²), Tavan alanı A_T (m²), Taban alanı A_t (m²) olarak ifade edilir. Havalandırma yoluyla ısı kaybı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$H_V = 0,33 \times n_h \times (0,8 \times V_{brüt}) \quad (6)$$

Bu eşitlikte; hava değişim oranı n_h (h⁻¹), binanın ısıtılan brüt hacmi $V_{brüt}$ (m³) olarak ifade edilir.

Eş. 2'de, aylık ısıtma enerji ihtiyacının negatif (-) olduğu aylarda enerji ihtiyacı sıfır (0) olarak kabul edilir ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacının hesaplanmasında dikkate alınmaz. Eş. 2'de yer alan aylık kazanç kullanım faktörü aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$\eta_{ay} = 1 - e^{\frac{-1}{KKO_{ay}}} \quad (7)$$

Burada, KKO_{ay} kazanç/kayıp oranıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$KKO_{ay} = \frac{(\Phi_{i,ay} + \Phi_{s,ay})}{H(\theta_i - \theta_e)} \quad (8)$$

KKO_{ay} oranı 2,5 ve üzerinde olduğu durumlarda o ay için ısıtma enerjisi ihtiyacı olmadığı kabul edilmiştir. Bu çalışmada konut tipi bina için hesaplamalar yapıldığından; ortalama iç ortam sıcaklığı $\theta_i=19^\circ\text{C}$ alınmıştır [12]. Ortalama aylık dış ortam sıcaklıkları DG bölgelerine göre TS 825 standardından alınmıştır [12]. Hesaplama yönteminde kullanılan kabuller aşağıda özetlenmiştir;

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı hesabında, hava değişim sayısı, $n_h=0,8$ (h^{-1}) olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama iç kazancı, $\Phi_{i,ay}=5$ W/m^2 olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama güneş enerjisi kazanç hesabında, saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgeleme faktörü ($r_{i,ay}$), 0,8 olarak alınmıştır. Ortalama aylık güneş ışınımı şiddeti ($I_{i,ay}$), tüm bölgeler için bina yönlerine göre sabit kabul edilerek TS 825 standardından alınmıştır[12]. Camlar için düzeltme faktörü, $F_w=0,80$ ve laboratuvar şartlarında ölçülen cam yüzeyine dik olarak gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörü, $g_{\perp}=0,75$ olarak alınmıştır.

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı hesabında, hava değişim sayısı, $n_h=0,8$ (h^{-1}) olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama iç kazancı, $\Phi_{i,ay}=5$ W/m^2 olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama güneş enerjisi kazanç hesabında, saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgeleme faktörü ($r_{i,ay}$), 0,8 olarak alınmıştır. Ortalama aylık güneş ışınımı şiddeti ($I_{i,ay}$), tüm bölgeler için bina yönlerine göre sabit kabul edilerek TS 825 standardından alınmıştır[12]. Camlar için düzeltme faktörü, $F_w=0,80$ ve laboratuvar şartlarında ölçülen cam yüzeyine dik olarak gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörü, $g_{\perp}=0,75$ olarak alınmıştır.

2.3. Yıllık Yakıt Maliyeti ve Optimum Yalıtım Kalınlığı Hesaplanması (Calculation of Annual Fuel Cost and Optimum Insulation Thickness)

Isıtma için yıllık yakıt maliyeti C_h aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$C_h = \frac{Q_{yıl}}{H_u \times n_k} \times C_f \quad (9)$$

Burada; C_f yakıt birim fiyatı ($\$/m^3$), H_u (kWh/m^3) kullanılan yakıtın alt ısı değeri ve n_k ısıtma sisteminin verimidir. Bu hesaplamalarda kullanılan yakıtın birim fiyatı [14] ve alt ısı değeri [14] Çizelge 3'de verilmiştir.

Optimum yalıtım kalınlığının hesaplanmasında ömür maliyet analizi yöntemi kullanılmıştır. N yıllık bir zaman dilimi boyunca toplam ısıtma maliyeti, bugünkü değer faktörü (PWF) kullanılarak hesaplanmıştır [8]. PWF, enflasyon ve faiz oranlarına göre aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$r = \begin{cases} \frac{(i-g)}{(1+g)}, & \text{eğer } i > g \\ \frac{(g-i)}{(1+i)}, & \text{eğer } g > i \end{cases} \quad (10)$$

$$PWF = \begin{cases} \frac{(1+r)^{N-1}}{r \times (1+r)^N}, & i \neq g \\ \frac{N}{(1+i)}, & i = g \end{cases} \quad (11)$$

Burada; PWF bugünkü değer faktörü, i faiz oranı [15], g enflasyon oranı [16], r gerçek faiz oranı ve N (yıl) ömür maliyet analizi süresidir [5]. PWF hesaplamalarında kullanılan parametreler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Hesaplamalarda kullanılan parametreler (The parameters used in calculations)

Parametre	Değer	Birim
Yakıt		
Doğal gaz		
Alt ısı değeri (H_u) [14]	9,595	(kWh/m^3)
Birim fiyat (C_f) [14]	0,325	($\$/m^3$)
Isıtma sistemi verimi (η_k)	%98	
Yalıtım Malzemesi		
Cam yünü (λ) [13]	0,045	(W/mK)
XPS (λ) [13]	0,035	(W/mK)
EPS (λ) [13]	0,035	(W/mK)
Cam yünü birim fiyatı [13]	32	($\$/m^3$)
XPS birim fiyatı [13]	120	($\$/m^3$)
EPS birim fiyatı [13]	210	($\$/m^3$)
PWF		
Faiz oranı (i) [15]	%12,75	
Enflasyon oranı (g) [16]	%10,35	
Ömür Süresi (N) [5]	30	(yıl)
Pencere [12]		
U_p	2,4	(W/m^2K)
F_w	0,8	
g_{\perp}	0,75	
$r_{i,ay}$	0,8	
Aylık iç kazançlar		
$\Phi_{i,ay}$ [12]	5	W
Hava değişim sayısı		
n_h [12]	0,8	(h^{-1})
İç Ortam Sıcaklığı		
θ_i [12]	19	$^{\circ}C$
Döviz kuru		
$\$/TL$ [17]	3,75	

Bu çalışmada, üç farklı yalıtım malzemesi kullanılarak bina zarfının optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. Yalıtım malzemelerinin fiyatları Çizelge 3'te verilmiştir[13]. Yalıtım maliyetinin (C_{ins}) hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$C_{ins} = C_i \times x \quad (12)$$

Burada; C_i , yalıtım malzemesinin ($\$/m^3$) birim fiyatı ve x ise m cinsinden yalıtım malzemesinin kalınlığıdır. Sonuç olarak, yakıt maliyeti ve yalıtım maliyetinden oluşan toplam maliyet C_T ($\$/m^2$), aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır;

$$C_T = C_h \times PWF + C_{ins} \quad (13)$$

Burada; yıllık ısıtma maliyeti C_h ($\$/m^2$), bugünkü değer faktörü PWF, yalıtım maliyeti C_{ins} ($\$/m^2$) ile ifade edilmiştir.

2.4. Net Kazanç ve Geri Ödeme Süresinin

Hesaplanması (Calculation of Net Saving and Payback Period)

30 yıllık net kazanç (NK); yalıtımsız binanın 30 yıllık toplam maliyetinden yalıtımlı binanın 30 yıllık toplam maliyeti çıkartılarak hesaplanmıştır.

$$NK = C_{To} - C_T \quad (14)$$

Burada; net kazançlar NK (\$/m²), yalıtımsız binanın 30 yıllık toplam maliyeti C_{To} (\$/m²), yalıtımlı binanın 30 yıllık toplam maliyeti C_T (\$/m²) ile ifade edilmiştir.

Gerri ödeme süresi (yıl); yalıtım maliyetinin C_{ins} (\$/m²), yıllık yakıt tasarrufuna bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yıllık yakıt tasarrufu, yalıtımsız binanın yıllık yakıt maliyetinden C_{ho} (\$/m²) yalıtımlı binanın yıllık yakıt maliyetinin C_h (\$/m²) çıkartılmasıyla elde edilmiştir. Gerri ödeme süresi aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır;

$$\text{Gerri Ödeme Süresi} = \frac{C_{ins}}{(C_{ho} - C_h)} \quad (15)$$

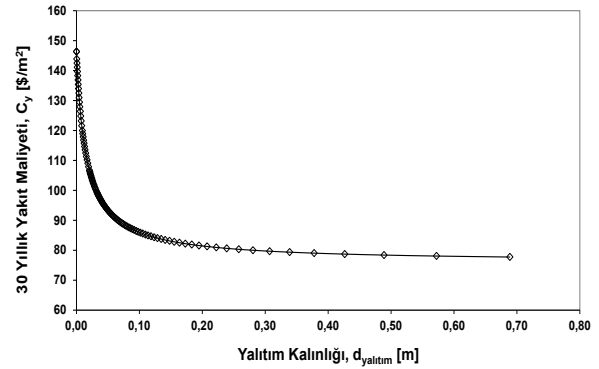
Burada; yalıtım maliyeti C_{ins} (\$/m²), yalıtımsız binanın yıllık yakıt maliyeti C_{ho} (\$/m²), yalıtımlı binanın yıllık yakıt maliyeti C_h (\$/m²) ile ifade edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

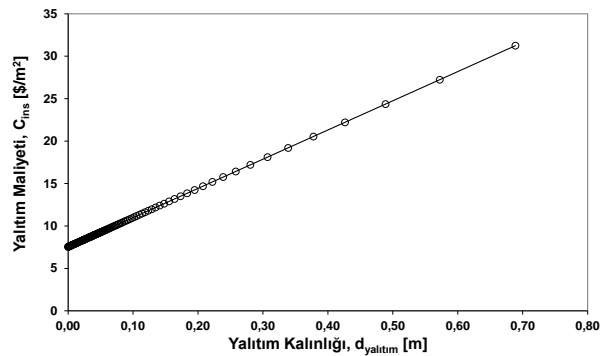
Yalıtım uygulaması, binalarda enerji tasarrufu için etkili yollardan biridir. Bu nedenle, optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi enerji verimliliği için çok önemlidir. Bu çalışmada tavan, taban ve dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlıkları ayrı ayrı hesaplanmıştır. XPS, EPS ve cam yünü hesaplamalarda kullanılan yalıtım malzemeleridir. Tavan yalıtımı için cam yünü, taban yalıtımı için XPS ve dış duvar yalıtımı için EPS kullanılmıştır. Türkiye'deki dört farklı DG bölgesi için yapılan çalışmalarda yakıt olarak doğalgaz kullanılmıştır.

Bu çalışmada optimizasyon metodu olarak ömür maliyet analizi metodu kullanılmıştır. Toplam maliyeti temel alan ömür maliyet analizi 30 yıllık bir kullanım ömrü için yapılmıştır. Ömür maliyet analizinde, yalıtım için yapılan maliyet ilk yatırım maliyetidir. Kullanım maliyeti ise 30 yıllık süre boyunca binayı ısıtma için kullanılan yakıt maliyetidir. Toplam maliyet ise yatırım maliyeti ve 30 yıllık yakıt maliyetinin toplamıdır. Yalıtımsız binalar için ilk yatırım maliyeti yoktur. Yalıtımsız binalarda sadece ısıtma için kullanılan 30 yıllık yakıt maliyeti, toplam maliyeti temsil etmektedir.

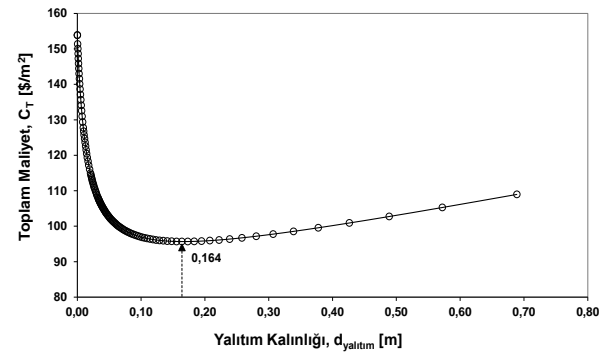
Binalarda yalıtım kalınlığı, bina kabuğunun tasarımında önemli bir parametredir. Düşük yalıtım kalınlığı, ısının daha hızlı aktarılmasına sebep olarak ısı konforu ve enerji tasarrufu üzerinde olumsuz bir etki oluşturur. Binalarda artan yalıtım kalınlığı ile ısı kaybı ve yakıt maliyeti azalır. Ancak yalıtım kalınlığının artması yalıtım maliyetinin artması demektir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, yalıtım kalınlığının artmasıyla, ısıtma için gereken enerji ihtiyacı ve 30 yıllık toplam yakıt maliyeti azalmaktadır. Bununla birlikte, yalıtım kalınlığı arttıkça, yalıtım maliyetinin Şekil 2'de görüldüğü gibi artacağı açıktır.



Şekil 1. Yalıtım kalınlığının 30 yıllık toplam yakıt maliyeti üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the 30 years heating cost)



Şekil 2. Yalıtım kalınlığının yalıtım maliyeti üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the insulation cost.)



Şekil 3. Yalıtım kalınlığının 30 yıllık toplam maliyet üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the total cost.)

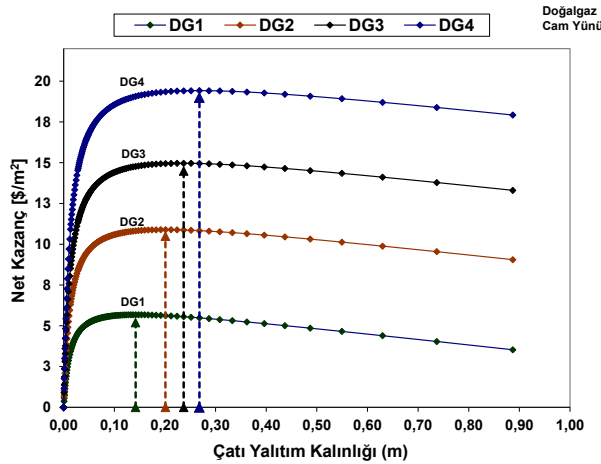
Hesaplamalarda, öncelikle, farklı yalıtım kalınlıklarında binanın ısıtılması için gerekli yıllık enerji ihtiyaçları belirlenmiştir. Daha sonra yalıtım maliyeti ve 30 yıllık yakıt maliyetinden oluşan toplam maliyetler bulunmuştur. Farklı yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen toplam maliyet; yalıtım kalınlığının artmasıyla belirli bir noktaya kadar azalmakta daha sonra Şekil 3'de görüldüğü gibi tekrar artmaya başlamaktadır. Toplam maliyetin minimum olduğu bu noktaya karşılık gelen

yalıtım kalınlığı, optimum yalıtım kalınlığı olarak ifade edilmektedir.

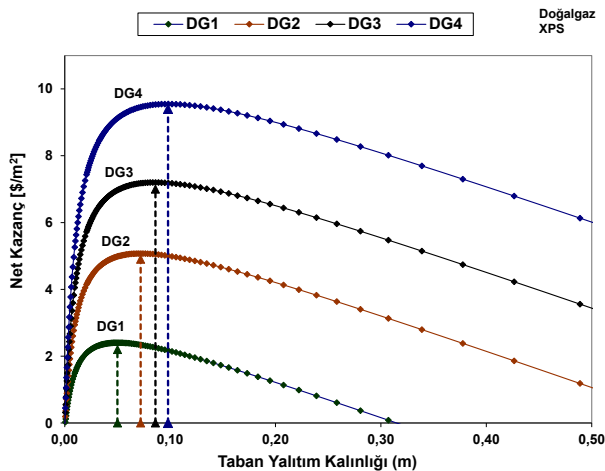
Optimum yalıtım kalınlıkları belirlendikten sonra, optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen ısı geçirgenlik katsayıları (U-değerleri) hesaplanarak her bir DG bölgesinde tavan, taban ve dış duvar için optimum U-değerleri belirlenmiştir.

Yalıtımsız binanın 30 yıllık toplam maliyetinden, yalıtımlı binanın 30 yıllık toplam maliyeti çıkartılarak 30 yıllık net kazançlar belirlenmiştir. Toplam maliyet grafiklerinde toplam maliyetin minimum olduğu nokta optimum yalıtım kalınlığını verirken net kazanç grafiklerinde net kazancın maksimum olduğu nokta optimum yalıtım kalınlığına karşılık gelmektedir.

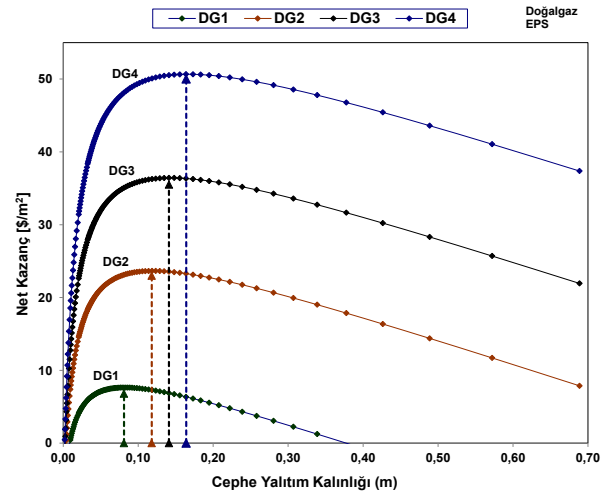
DG bölgelerine göre net kazançlar, tavan, taban ve dış duvarlar için Şekil 4-6'da verilmiştir. Net kazanç, optimum yalıtım kalınlığında maksimum değerine ulaşır. Başka bir deyişle 30 yıllık net kazancın maksimum olduğu nokta, ömür maliyet analizine göre optimum yalıtım kalınlığını belirleyen noktadır.



Şekil 4. DG bölgelerine göre çatı yalıtım kalınlığının net kazanç üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the net savings for ceiling in DG regions.)



Şekil 5. DG bölgelerine göre taban yalıtım kalınlığının net kazanç üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the net savings for floor in DG regions.)



Şekil 6. DG bölgelerine göre dış duvar yalıtım kalınlığının net kazanç üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the net savings for wall in DG regions.)

Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere, bina zarf bileşenlerinin optimum yalıtım kalınlıkları bölgelere göre farklı değerler almaktadır. DG4 bölgesinde tavan için optimum yalıtım kalınlığı 26,8 cm olurken DG1 bölgesinde zemin için sadece 5,0 cm'dir. DG4 bölgesinde dış duvar için net kazanç 50,66 \$/m² iken, zemin için DG1 bölgesinde sadece 2,40 \$/m²'dir.

Net kazançlar, bölgenin iklim koşulları ile doğru orantılıdır. Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere sıcak iklim bölgesine sahip DG1 bölgesinden daha soğuk bir iklime sahip DG4 bölgesine gidildikçe net kazançlar ve optimum yalıtım kalınlıkları artmaktadır. Daha soğuk bir iklime sahip DG4 bölgesinde ısıtma için kullanılan enerjinin daha fazla olması net kazançları artırmaktadır. Soğuk iklime sahip bölgelerde ısı yalıtımı yapılması sıcak iklime sahip bölgelerden daha gereklidir. Isıtma için gerekli enerji ihtiyacının artması daha kalın yalıtım malzemelerinin kullanılmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda yakıt maliyetinin artması optimum yalıtım kalınlığını artırmaktadır.

Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere en büyük net kazançlar dış duvarların yalıtılması durumunda elde edilmiştir. Dış duvar yalıtımından elde edilen kazançlar DG bölgelerine göre 8,12 ile 50,66 \$/m² arasında değişirken bu değerlerin DG bölgelerine göre tavan için 5,68 ile 19,42 \$/m², taban için 2,40 ile 9,55 \$/m² arasında değiştiği belirlenmiştir. Buda göstermektedir ki, en büyük ısı kayıplarının gerçekleştiği dış duvarların yalıtılması, tavan ve tabana göre enerji tasarrufu bakımından daha büyük öneme sahiptir.

DG1, DG2, DG3, DG4 bölgelerinde cephe için optimum yalıtım kalınlıkları sırasıyla 0,081 m, 0,118 m, 0,141 m ve 0,164 m olarak hesaplanmıştır. Optimum yalıtım kalınlıkları ve optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen optimum ısı geçirgenlik katsayıları (U-değerleri) farklı bölgeler için Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. DG Bölgelerine göre optimum yalıtım kalınlıkları ve U-değerleri. (The optimum insulation thicknesses and the U-values for the regions.)

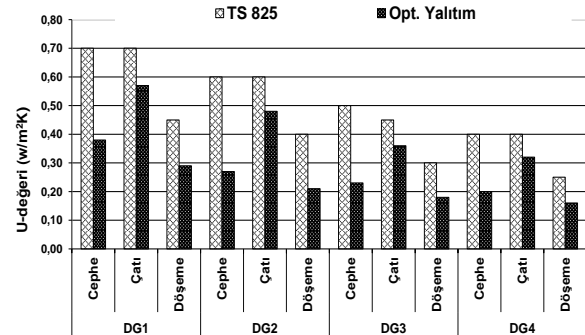
DG	Dış duvar için optimum yalıtım kalınlığı (m)	U_D (W/m ² K)	Tavan için optimum yalıtım kalınlığı (m)	U_T (W/m ² K)	Taban için optimum yalıtım kalınlığı (m)	U_t (W/m ² K)
DG1	0,081	0,38	0,142	0,29	0,050	0,57
DG2	0,118	0,27	0,201	0,21	0,072	0,42
DG3	0,141	0,23	0,237	0,18	0,086	0,36
DG4	0,164	0,20	0,268	0,16	0,098	0,32

Çizelge 5’de, bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları ve karşılık gelen U-değerleri TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılmıştır. DG1 bölgesindeki cephe için hesaplanan optimum yalıtım kalınlığı 0,081 m iken bu değer TS 825 standardında 0,040 m’dir. Optimum yalıtım kalınlıkları ile TS 825 standardında belirtilen limit yalıtım kalınlıkları arasındaki en büyük fark, dış duvar için hesaplanan değerlerde oluşurken, en küçük farkın taban için hesaplanan değerlerde oluştuğu belirlenmiştir.

DG1 bölgesinde optimum yalıtım kalınlığına göre yalıtım yapılması durumunda, dış duvar, tavan ve taban için yalıtım kalınlığının TS 825 standardına göre sırasıyla %103, % 60 ve % 25 oranında artırılması gerekmektedir. Yalıtım kalınlığında en büyük artışın dış duvarlarda olmasının iki nedeni vardır. Bunlardan birincisi; dış duvar alanının (1392 m²) taban (300 m²) ve tavan (300 m²) alanından daha büyük olması ve buna bağlı olarak dış duvarlardan olan ısı kaybının daha yüksek olmasıdır. İkinci sebep ise TS 825 standardında dış duvar için izin verilen limit U_{cephe} değerlerinin yüksek olması sonucu, TS 825 standardının daha ince yalıtıma izin vermesidir. Aynı yüzey alana sahip taban (300 m²) ve tavanda (300 m²) oluşan farkın nedeni ise ısı kayıpları hesaplanırken TS 825 standardının tavadan olan ısı kayıplarını 0,8 katsayı, tabandan olan ısı kayıplarını ise 0,5 katsayısı ile azaltmasıdır. Isı kayıplarının azalması optimum yalıtım kalınlığını azaltmaktadır. Ayrıca hesaplamalarda

kullanılan XPS fiyatının cam yünü fiyatından 3,75 kat daha pahalı olması XPS ile yapılan yalıtımın maliyetini artırmaktadır. Yalıtım maliyetinin artması optimum yalıtım kalınlığını azaltmaktadır.

Tavan, taban ve dış duvarlar için hesaplanan optimum değerler ile TS 825’te tanımlanan limit değerler Çizelge 5’de ve Şekil 8’de karşılaştırılmıştır. Çizelge 5’de görüldüğü üzere, hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları, tüm bölgelerde, TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerine karşılık gelen yalıtım kalınlıklarından daha büyüktür.

**Şekil 7.** Optimum U-değerlerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması. (Comparison of optimum U-values with TS 825 limit values.)**Çizelge 5.** Optimum yalıtım kalınlıkları ve U-değerlerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması. (Comparison of optimum insulation thicknesses and U-values with TS 825 limit values.)

DG	Yalıtım	U_D (W/m ² K)	Dış duvar için optimum yalıtım kalınlığı (m)	U_T (W/m ² K)	Tavan için optimum yalıtım kalınlığı (m)	U_t (W/m ² K)	Taban için optimum yalıtım kalınlığı (m)
DG1	TS 825	0,70	0,040	0,45	0,089	0,70	0,040
	Optimum	0,38	0,081	0,29	0,142	0,57	0,050
DG2	TS 825	0,60	0,048	0,40	0,102	0,60	0,048
	Optimum	0,27	0,118	0,21	0,201	0,42	0,072
DG3	TS 825	0,50	0,060	0,30	0,142	0,45	0,068
	Optimum	0,23	0,141	0,18	0,237	0,36	0,086
DG4	TS 825	0,40	0,079	0,25	0,175	0,40	0,079
	Optimum	0,20	0,164	0,16	0,268	0,32	0,098

Sonuçlar göstermektedir ki; dış duvar yalıtımında EPS kullanılması durumunda optimum yalıtım kalınlığı 8,1 (DG1) ile 16,4 cm (DG4) arasında, tavan yalıtımında cam yünü kullanılması durumunda optimum yalıtım kalınlığı 14,2 (DG1) ve 26,8 cm (DG4) arasında, taban yalıtımında XPS kullanılması durumunda optimum yalıtım kalınlığı 5,0 (DG1) ile 9,8 cm (DG4) arasında değişmektedir.

Çizelge 6'da, optimum yalıtım kalınlığına karşılık gelen yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme sürelerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması sunulmuştur. Çizelge 6'da görüldüğü üzere, yalıtım malzemesi ve iklim bölgesine bağlı olarak yakıt tasarrufu 26,32 ile 92,59 \$/m² arasında değişirken, geri ödeme süresi 10,2 ile 3,6 yıl arasında değişmektedir.

TS 825 standardında belirtilen limit değerleri yerine optimum yalıtım kalınlığı ile yalıtım yapılması durumunda DG1, DG2, DG3 ve DG4 bölgelerinde yıllık enerji ihtiyacının sırasıyla %18,1, %17,1, %13,3 ve %10,1 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu ve net kazançlar soğuk iklime sahip bölgelere gidildikçe artmakta, geri ödeme süresi ise azalmaktadır.

Enerji tasarrufu arttıkça geri ödeme süreleri kısalmaktadır. En düşük geri ödeme süresi soğuk iklime sahip DG4 bölgesinde 3,6 yıl olarak hesaplanmıştır. DG4 bölgesinde TS 825'de sunulan U-değerlerine karşılık gelen geri ödeme süresi 3 yıl olarak hesaplanmıştır. Geri ödeme süreleri karşılaştırıldığında, geri ödeme süresindeki 6 aylık artışa karşılık yıllık yakıt tasarrufunda %8 artış sağlandığı hesaplanmıştır. Dolayısıyla, soğuk iklim bölgelerinde optimum yalıtım kalınlığının artması sonucu yalıtım maliyeti yükselmekte ve geri ödeme süreleri kısalmaktadır.

Çizelge 5 incelendiğinde, bina zarfının, tavanda en yüksek, tabanda ise en düşük yalıtım kalınlığına ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 6'ya göre, sıcak iklime sahip DG1 bölgesinden soğuk iklime sahip DG4 bölgesine gidildikçe yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu ve net kazancın arttığı görülmektedir. Soğuk iklim bölgelerinde metrekare başına yakıt tasarrufunun daha

yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin DG4 bölgesinde metrekare başına yakıt tasarrufu DG1 bölgesinden 3,5 kat daha fazladır.

Optimum yalıtım kalınlığı ile TS 825 standardı karşılaştırıldığında; DG1 bölgesinde optimum yalıtım kalınlığı ile TS 825 standardına göre 30 yılda 3,17 \$/m² daha fazla yakıt tasarrufu ve 0,7 \$/m² daha fazla net kazanç elde edilebileceği hesaplanmıştır. Ülkemizdeki toplam bina stokunun yaklaşık 2.400.000.000 m² olduğu tahmin edilmektedir[18]. Optimum yalıtım kalınlıklarının kullanılması sonucu elde edilecek tasarrufun mertebesini belirlemek için, Türkiye'deki tüm binaların DG1 bölgesinde yer aldığı varsayılmış ve TS 825 standardına göre 3,17 \$/m² daha fazla yakıt tasarrufu ile 30 yıllık bir sürede 7.608.000.000 \$ yakıt tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır. Bu yakıt tasarrufu miktarının soğuk bölgelere gidildikçe artacağı aşikardır. Tüm binaların DG4 bölgesinde bulunduğunu varsayarsak, 30 yılda 16.872.000.000 \$ yakıt tasarrufu sağlanabilecektir. Bina stokunun DG bölgelerine eşit olarak dağıtılması durumunda ise yaklaşık 13.224.000.000 \$ yakıt tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Binaların ısıl konforu için gerekli olan enerji, Türkiye konut sektörünün toplam enerji tüketiminin % 65'ine karşılık gelmektedir [1]. Dolayısıyla, ısı yalıtımı, binalarda kullanılan enerji miktarını azaltmak için alınabilecek en etkili önlemlerden biridir. Yalıtım malzemeleri enerji verimli binalar için vazgeçilmez olmakla birlikte, yalıtım kalınlığı için optimum çözümün önemli olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmada, tavan, taban ve dış duvarların optimum yalıtım kalınlıkları, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme süreleri, Türkiye'nin dört farklı DG bölgesi için 30 yıllık ömür maliyet analizi yapılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar, TS 825 standardında belirtilen farklı DG bölgeleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Hesaplamalarda, üç farklı yalıtım malzemesi ve bir yakıt türü kullanılmıştır.

Çizelge 6. Optimum yalıtım kalınlığına karşılık gelen yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme sürelerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması. (Comparison of the annual energy requirement, fuel saving, net saving and payback periods corresponding to the optimum insulation thickness with the TS 825 limit values.)

DG	Yıllık Enerji İhtiyacı (kWh/m ²)		Yakıt Tasarrufu (\$/m ²)		Net Kazanç (\$/m ²)		Geri Ödeme Süresi (Yıl)	
	Optimum Yalıtım	TS 825	Optimum Yalıtım	TS 825	Optimum Yalıtım	TS 825	Optimum Yalıtım	TS 825
DG1	18,49	22,79	26,32	23,15	14,02	13,32	10,2	9,3
DG2	37,83	45,60	50,98	45,23	37,50	34,96	5,8	5,0
DG3	53,36	61,58	70,54	64,45	56,19	53,40	4,4	3,7
DG4	72,48	80,62	92,59	85,56	77,20	74,66	3,6	3,0

Sonuçlar bölgeye, yalıtım malzemesine ve bina zarfına bağlı olarak; optimum yalıtım kalınlığının 5,0 cm ile 26,8 cm arasında değiştiğini, yakıt tasarrufunun 26,32 $\$/m^2$ ile 92,59 $\$/m^2$ arasında değiştiğini ve geri ödeme sürelerinin 10,2 ile 3,6 yıl arasında değiştiğini göstermektedir. Sıcak iklim bölgesinden soğuk iklim bölgesine gidildikçe optimum yalıtım kalınlığı, yakıt tasarrufu ve net kazançlar artarken, geri ödeme süreleri azalmaktadır. Soğuk iklim bölgelerinde enerji tasarrufu sıcak bölgelere göre daha fazla olmaktadır. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde, ısı yalıtımı, ilk yatırım maliyetini diğer bölgelere göre daha kısa sürede amorti etmektedir.

Bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları ile TS 825 standardında belirtilen sınır değerler arasında büyük fark vardır. TS 825 standardında verilen limit yalıtım kalınlıkları bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıklarından daha küçüktür. Sonuç olarak, bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen optimum U-değerleri, TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerinden daha küçüktür. Bu nedenle TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerinin yeterli olmadığı ve azaltılması gerektiği değerlendirilmektedir. TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerinin azaltılması durumunda yakıt tüketiminin azaltılacağı ve enerjinin daha verimli kullanılacağı açıktır.

Sonuç olarak, konut tipi binalarda enerjiyi etkin bir şekilde kullanmanın ilk yolu ısıtma yükünü azaltmaktır. Isıtma yüklerini azaltmak için en ekonomik ve kullanışlı yöntem ısı yalıtımıdır. Isı yalıtımıyla enerji kaynaklarını korumak, enerji ihtiyacını azaltmak ve çevreyi korumak mümkündür. Küresel ısınma, fosil yakıtların hızla tükenmesi, artan enerji ihtiyacı ve enerji fiyatları, önümüzdeki yıllarda ısı yalıtımını daha da önemli hale getirecektir.

SİMGE VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

A/V	: Isı kaybeden toplam alan/Brüt hacim
U-değeri	: Isıl geçirgenlik katsayısı
$Q_{yıl}$: Yıllık enerji ihtiyacı, (kWh/m ²)
Q_{ay}	: Aylık enerji ihtiyacı, (kWh/m ²)
H	: Binanın özgül ısı kaybı, (W/K)
H_v	: Havalandırma yoluyla ısı kaybı, (W/K)
H_T	: İletim ve taşınım ile ısı kaybı, (W/K)
θ_i	: Aylık ortalama iç ortam sıcaklığı, (°C)
θ_e	: Aylık ortalama dış ortam sıcaklığı, (°C)
η_{ay}	: Kazançların aylık ortalama kullanım faktörü
$\Phi_{i,ay}$: Aylık ortalama iç ısı kazancı, (W)
$\Phi_{s,ay}$: Aylık ortalama güneş enerjisi kazancı, (W)
U_D	: Dış duvarın ısıl geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K)
U_P	: Pencerenin ısıl geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K)
U_T	: Tavanın ısıl geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K)
U_t	: Tabanın ısıl geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K)

A_D	: Dış duvar alanı, (m ²)
A_P	: Pencere alanı, (m ²)
A_T	: Tavan alanı, (m ²)
A_t	: Taban alanı, (m ²)
R_i	: İç yüzey ısıl iletim direnci, (m ² K/W)
R	: Toplam ısıl geçirgenlik direnci, (m ² K/W)
R_e	: Dış yüzey ısıl iletim direnci katsayısı (m ² K/W)
d	: Yapı bileşeninin kalınlığı (m)
x	: Yalıtım malzemesi kalınlığı (m)
n_h	: Hava değişim oranı (h ⁻¹)
$V_{brüt}$: Binanın ısıtılan brüt hacmi (m ³)
V_h	: Havalandırılan hacim (m ³)
A_n	: Bina kullanım alanı (m ²)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
λ	: Isı iletim katsayısı, (W/mK)
c	: Havanın özgül ısı (J/kgK)
$r_{i,ay}$: i yönünde saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgelenme faktörü
$g_{i,ay}$: i yönündeki saydam elemanların güneş enerjisi geçirme faktörü
$I_{i,ay}$: i yönünde dik yüzeylere gelen aylık ortalama güneş ışınımı şiddeti (W/m ²)
A_i	: i yönündeki toplam pencere alanı (m ²)
F_w	: Camlar için düzeltme faktörü
g_{\perp}	: Yüzeye dik gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörü
KKO_{ay}	: Kazanç/kayıp oranı
H_u	: Yakıtın alt ısı değeri
η_k	: Isıtma sistemi verimi
C	: Maliyet
C_{ins}	: Yalıtım maliyeti ($\$/m^3$)
C_h	: Yalıtımlı binanın yıllık yakıt maliyeti ($\$/m^2$)
C_{ho}	: Yalıtımsız binanın yıllık yakıt maliyeti ($\$/m^2$)
C_f	: Yakıt birim fiyatı ($\$/m^3$)
C_i	: Yalıtım malzemesinin birim fiyatı ($\$/m^3$)
C_T	: 30 yıllık toplam maliyet ($\$/m^2$)
PWF	: Bugünkü Değer Faktörü
i	: Faiz oranı
g	: Enflasyon oranı
r	: Gerçek faiz oranı
N	: Ömür maliyet süresi (yıl)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yaman, Ö., Şengül, Ö., Selçuk, H., Çalikuş, O., Kara, İ., Erdem, Ş. and Özgür, D., "Binalarda ısı yalıtımı ve ısı yalıtım malzemeleri", *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 487: 62-75, (2015).
- [2] ÇŞB, "Isı yalıtım uygulama kılavuzu", Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2-3, (2015).

- [3] Ekici, B., "TS 825 Binalarda ısı yalıtım kuralları standardının güneş ışınımı açısından değerlendirilmesi", *Megaron*, 10(1): 14-24, (2015).
- [4] EU (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). European Parliament and the Council of the European Union, 2010. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=en>.
- [5] EC (2012b). Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements. European Commission, 2012. Available: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419\(02\)&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419(02)&from=EN)
- [6] Hasan, A., "Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost", *Applied Energy*, 63(2): 115-124, (1999).
- [7] Comakli, K. and Yuksel, B., "Optimum insulation thickness of external walls for energy saving", *Applied Thermal Engineering*, 23(4): 473-479, (2003).
- [8] Özel, M., "Bina dış duvarlarının optimum yalıtım kalınlıkları için dinamik yaklaşım ve maliyet analizi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4): 879-884, (2008).
- [9] İnallı, M., Balo, F. and Uçar, A., "Yapıların dış duvarlarında optimum yalıtım kalınlığının üç farklı metotla tespiti", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 125: 5-14, (2011).
- [10] Dikmen, N., "1995 Depremi sonrası Dinar'da kurulmuş olan afet konutlarının TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'na uygunluğu açısından incelenmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2(2): 50-59, (2010).
- [11] Kürekçi, N. A., "Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers", *Energy and Buildings*, 118: 197-213, (2016).
- [12] TS 825, "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları", *Türk Standartları Enstitüsü*, 1-75, (2008).
- [13] İnternet: İZODER. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.izoder.org.tr%2F+&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [14] İnternet: BOTAS. (2018). *Tarife*. URL: <http://www.botas.gov.tr/index/tur/faaliyetler/dogalgaz/tarifeSerTukV8.asp>. [Erişim Tarihi: 20 Şubat 2018].
- [15] İnternet: TCMB. (2018). *TCMB Faiz Oranları (%) Geç Likidite Penceresi (LON)*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcmb.gov.tr%2Fwps%2Fwcm%2Fconnect%2FT%2F%2FTCMB%2BTR%2FMain%2BMenu%2FTemel%2BFaaliyetler%2FPara%2BPolitikasi%2FMerkez%2BBankasi%2BFaiz%2BOranlari%2FGec%2BLikidite%2BPenceresi%2B%2528LON%2529&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [16] İnternet: TÜİK. (2018). *Tüketici Fiyat Endeksi, Ocak 2018*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tuik.gov.tr%2FPreHaberBultenleri.do%3Fid%3D27758&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [17] İnternet: TCMB. (2018). *20.02.2018 Günü Saat 15:30'da Belirlenen Gösterge Niteliğindeki Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Kurları*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcmb.gov.tr%2Fkurlar%2F201802%2F20022018.xml&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [18] Schimschar, S., Boermans, T., Kretschmer, D., Offermann, M. and Ashok, J., "U-value maps Turkey (Final Report)", *ECOFYS*, Project number: BUIDE 15722, (2016).