

FARKLI DIŞ DUVAR YAPILARI İÇİN OPTİMUM ISI YALITIM KALINLIĞI TESPİTİNİN EKONOMİK ANALİZİ

Ali Etem GÜREL, Zafer CİNGİZ

Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Teknik Programlar

Uzunmustafa, 81010 DÜZCE.

Email: etemgurel@gmail.com

ÖZET

Türkiye gibi enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü ithalat yoluyla karşılayan ülkelerde enerjinin tasarruflu kullanılması ekonomik açıdan büyük bir önem taşımaktadır. Yapılarda uygulanan ısı yalıtım teknolojileri, enerjiden tasarruf etmek için kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak kullanılan yalıtım malzemesi kalınlığının gereğinden fazla seçilmesi, yüksek yalıtım maliyetlerine yol açmaktadır. Bu yüzden yalıtım uygulamalarında en fazla kazancın elde edildiği optimum bir nokta söz konusudur. Yapılan çalışmada, farklı yapı malzemeleri (yatay delikli tuğla ve gaz beton) ve yalıtım şekilleriyle yalıtılmış (dıştan yalıtım ve sandviç yalıtım) bir bina dış duvarı model alınmıştır. Çalışmada söz konusu duvardan gerçekleşen ısı kaybı mevcut hesaplamalar yoluyla belirlenmiş ve ömür maliyet analizine göre (LCCA) optimum ısı yalıtım kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufları belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yalıtım, optimizasyon, enerji tasarrufu.

ECONOMICAL ANALYSIS OF DETERMINATION THERMAL INSULATION THICKNESS FOR DIFFERENT EXTERNAL WALLS

ABSTRACT

In the countries which supply big amount of their energy needs by import like Turkey using the energy economically is important. Thermal insulation technologies in buildings are the main method for using energy economically. But choosing the thickness of the insulation material redundant causes high insulation costs. For this reason, an optimum point which provides the highest price in insulation applications is the subject. In this study, different building materials (horizontal perforated brick and gas concrete), and isolated forms of insulation (exterior insulation and insulation sandwich) was a model of a building exterior wall. The study determined that the wall and the heat loss through the life-cost analysis, according to the present calculations (LCCA), the optimum thickness of insulation, energy savings and payback periods were determined.

Keywords: Insulation, optimization, energy saving.

1.GİRİŞ

Türkiye’de konutlarda tüketilen enerjinin %80’i ısıtma-soğutma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Türkiye gibi enerjisinin neredeyse tamamını ithal eden bir ülke için bu oran çok yüksektir. Çevresel sorunların da artmasıyla birlikte ülke genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının teşviki ve fosil yakıt kullanımını azaltma çabaları olsa da yüksek kurulum maliyetleri ve alt yapı zorlukları bu

girişimleri yavaşlatmaktadır. Çeşitli enerji kaynaklarının kullanımından kaynaklanan en büyük çevresel problem sera etkisi ya da küresel ısınma olarak bilinen küresel iklim değişikliğidir [1].

Enerjinin verimli olarak kullanılması, enerjii üretmekten çok daha ucuza gelecek bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji tasarrufu sadece ülke ekonomisine kazanç sağlamakla kalmayıp özellikle fosil kaynaklı

Yakıtların kullanımı sırasında oluşacak çevresel olumsuzlukları da azaltmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, özellikle konutlarda gerçekleştirilecek yalıtım uygulamaları ihtiyaçtan öte bir zorunluluk olarak görülmektedir. Konutlarda ısı kaybını azaltacak yalıtım teknolojileri incelendiğinde yalıtım kalınlığı kavramı ön plana çıkmaktadır. Her ne kadar yalıtım kalınlığının artması ısı kaybını azaltacak ve yakıt maliyetini düşürecek bir çözüm gibi görünse de yalıtım kalınlığının gerektiğinden fazla seçildiği uygulamalarda, yalıtım masrafları ve buna paralel olarak toplam maliyet artacaktır. Dolayısıyla yalıtım kalınlığının tespitinde, en iyi verimin sağlandığı, ekonomik bir optimum nokta söz konusudur [2].

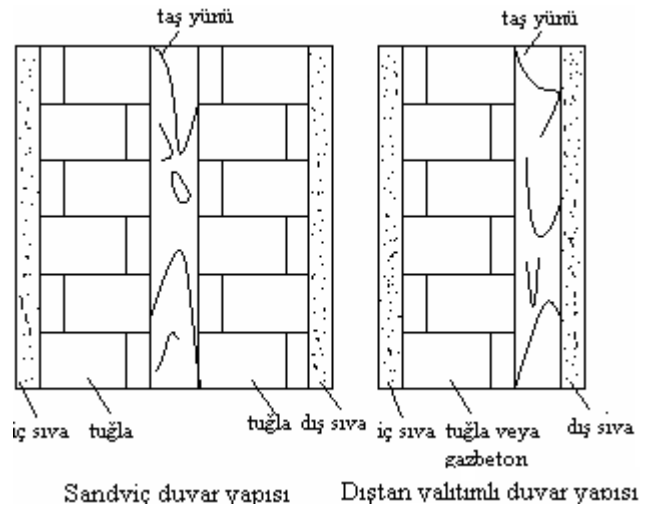
Literatürde binalarda optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesine yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır. Hasan [3] optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde life-cycle metodunu kullanmıştır. Sonuçlar polystrene ve taş yünü için enerji tasarrufunu 21\$/m² olarak göstermiştir. Çalışmanın sonucunda geri ödeme süresi taş yünü için 1-1.7 yıl polystrene için 1.3-2.3 yıl olarak belirlenmiştir. Dombaycı vd. [4] Denizli'deki binalarda, ısıtma için farklı enerji kaynaklarının kullanılması halinde dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlığını Derece-Gün değerini esas alarak hesaplamışlardır. Çalışmanın sonucunda optimum yalıtım kalınlığı kullanıldığında, enerji tasarrufu ve geri ödeme sürelerini sırasıyla 14.09\$/m² ve 1.43 yıl olarak belirlemişlerdir. Bolattürk [5] Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesinden seçilen on altı farklı şehir için optimum yalıtım kalınlıkları, enerji tasarrufları ve geri ödeme sürelerini hesaplamıştır. Hesaplama sonucunda, bu değerleri sırasıyla 0.02-0.17 m arasında, %22-%79 arasında ve 1.3-4.5 yıl arasında olarak belirlenmiştir. Uçar ve Balo [6] çalışmalarında Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesi için optimum yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik boyutunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda optimum yalıtım kalınlıklarını 1.06 ve 7.64 cm arasında enerji tasarruflarını 19\$/m² ve 47\$/m² arasında ve geri ödeme sürelerini 1.8 ve 3.7 yıl arasında belirlemişlerdir. Çomaklı ve Yüksel [7] Türkiye'nin en soğuk bölgesi için ısı yalıtımının çevresel boyutlarını değerlendirmişlerdir. Bina dış duvarında optimum yalıtım kalınlığı kullanıldığında CO₂ emisyonlarının %50 azaldığını belirlemişlerdir. Yu et al. [8] çalışmalarında Çin'in kış ve yaz bölgelerinde bulunan şehirler için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesinde farklı yalıtım malzemelerini kıyaslamışlardır. Sonuçlar farklı iklim bölgelerine göre geri ödeme sürelerinin 1.9-4.7 yıl ve life cycle tasarrufunun 39 \$/m²-54.8 \$/m² arasında değiştiğini göstermiştir. Gölcü vd. [9] dış duvarlarında yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılan bir bina duvarının optimum yalıtım kalınlıklarını, enerji tasarruflarını ve geri ödeme sürelerini hesaplamışlardır. Enerji kaynağı olarak kömür kullanıldığında; optimum yalıtım kalınlığı, yıllık tasarruf ve

geri ödeme süresi sırasıyla 0.048 m, % 42 ve 2.4 yıl olarak elde etmişlerdir.

Yapılan çalışmada, Türkiye'nin en soğuk şehirlerinden biri olan Sivas'ta farklı yapı malzemeleri (yatay delikli tuğla ve gaz beton) ve yalıtım şekilleriyle yalıtılmış (dıştan yalıtım ve sandviç yalıtım) bir bina dış duvarı model alınmıştır. Çalışmada söz konusu duvardan gerçekleşen ısı kaybı mevcut hesaplamalar yoluyla belirlenmiş ve ömür maliyet analizine göre (LCCA) optimum ısı yalıtım kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufları belirlenmiştir.

2. DIŞ DUVAR MODELLERİ

Türkiye'de dış duvar yalıtım uygulamaları genellikle sandviç duvar ve dıştan yalıtımlı duvar olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Yapı malzemesi olarak ise tuğla kullanımının yanı sıra özellikle son yıllarda artan bir ivme ile gaz beton kullanımı da yaygınlaşmıştır. Çalışmada kullanılan bina dış duvarlarına ait görünüm Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan duvar modelleri

3. DIŞ DUVAR İÇİN ISI YÜKÜ

Binalarda ısı kayıpları genellikle dış duvar yüzeyinden, pencerelerden, tavandan ve hava infiltrasyonu ile meydana gelmektedir. Yapılan çalışmada ısı kayıplarının sadece dış duvar yüzeyinden meydana geldiği kabul edilmiştir.

Dış duvarın birim alandan gerçekleşen ısı kaybı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$q = U \cdot \Delta T \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada, “U” (W/m²K) toplam ısı geçiş katsayısıdır. Birim yüzeyde meydana gelen yıllık ısı kaybı ise Eşitlik 2’de verildiği gibi “U” ve derece gün sayısı (DGS) kullanılarak hesaplanabilir [9].

$$q_A = 86400DGSU \quad (2)$$

Dış duvarın birim yüzeyinden oluşan ısı kaybı sebebiyle, ısıtma için gerekli yıllık enerji miktarı “E_A”, yıllık ısı kaybının yakıt verimine oranı ile elde edilir.

$$E_A = \frac{86400.DGS.U}{\eta} \quad (3)$$

Tipik bir duvar için toplam ısı geçiş katsayısı,

$$U = \frac{1}{R_i + R_d + R_{izo} + R_0} \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, “R_i” ve “R₀” sırası ile iç ve dış yüzeyin ısı dirençleri, “R_d” yalıtımsız duvar tabakalarının ısı direnci, “R_{izo}” ise, yalıtım malzemesinin ısı direncini ifade eder ve Eşitlik 5 ile hesaplanır [9].

$$R_{izo} = \frac{x}{k} \quad (5)$$

Eşitlik 5’te “x” yalıtım malzemesinin kalınlığını (m), “k” ise yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğini (W/mK) katsayısını ifade etmektedir.

Yalıtımsız bir duvar tabakasının toplam ısı direnci, “R₀”, “R_d” ve “R_i” nin toplamı kabul edilirse Eşitlik 4’deki ifade Eşitlik 6’daki ifadeye dönüşür.

$$U = \frac{1}{R_{TD} + R_{izo}} \quad (6)$$

Sonuç olarak ısıtma için harcanan yıllık enerji miktarı,

$$E_A = \frac{86400.DGS}{(R_{TD} + R_{izo}).\eta} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Birim alanı ısıtmak için kullanılan yıllık enerji maliyeti (C_A) ise, Eşitlik 8 kullanılarak elde edilir [7].

$$C_A = \frac{86400.DGS.C_f}{(R_{TD} + R_{izo}).H_U.\eta} \quad (8)$$

Bu eşitlikte C_f kullanılan yakıtın fiyatı olup, bu çalışmada kullanılan yakıtlara ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan yakıtlara ait özellikler

Yakıt	Fiyat	H _u	η
Kömür	0.475 TL/kg	29.295 x 10 ⁶ J/kg	0.65
Doğalgaz	0.616 TL/m ³	34.526 x 10 ⁶ J/m ³	0.93
Fuel-oil	1.85 TL/kg	40.594 x 10 ⁶ J/kg	0.80
LPG	3.73 TL/kg	46.453 x 10 ⁶ J/kg	0.90
Elektrik	0.22 TL/kWh	3.599 x 10 ⁶ J/kWh	0.99

4. YALITIM KALINLIĞININ OPTİMİZASYONU

Çalışmada ömür maliyet analizi (LCCA) kullanılmıştır. Ömür maliyet analizi bir sistemin maliyet analizini belirler. Çalışmada toplam ısıtma maliyeti, ömür süresi N ve şimdiki değer faktörü PWF kavramları ile birlikte değerlendirilmiştir. PWF, enflasyon oranı g ve faiz oranı i kullanılarak hesaplanabilir.

PWF değerinin hesabında N 10 yıl olarak alınmıştır. Enflasyon ve faiz oranları sırasıyla %5 ve %4 olarak alınmıştır (www.tcmb.gov.tr). PWF değerinin belirlenmesinde aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir [4].

$$\text{Eğer } i > g \text{ ise, } r = \frac{i - g}{1 + g}; \text{ } i < g \text{ ise, } r = \frac{g - i}{1 + i} \quad (9)$$

$$PWF = \frac{(1 + r)^N - 1}{r(1 + r)^N} \quad (10)$$

Eğer $i > g$ ise,

$$r = \frac{i - g}{1 + g} \quad (11)$$

Eğer $i < g$ ise,

$$r = \frac{g - i}{1 + i} \quad (12)$$

Sonuç olarak;

$$PWF = \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \quad (13)$$

Şeklinde ifade görür.

Eğer i değeri g değerine eşit ise, Eşitlik 13'deki ifade aşağıdaki eşitliğe dönüşür.

$$PWF = \frac{1}{1+i} \quad (14)$$

Toplam yalıtım maliyeti aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$C_{izo} = C_i \cdot x \quad (15)$$

Burada C_i yalıtım malzemesinin fiyatı (TL/m³), x ise yalıtım malzemesinin kalınlığını (m) ifade eder. Sonuçta yalıtılmış bir binanın toplam ısıtma maliyeti Eşitlik 16 ile hesaplanır.

$$C_{t,izo} = C_A \cdot PWF + C_i \cdot x \quad (16)$$

Toplam maliyeti minimuma indirecek olan optimum yalıtım kalınlığı ise aşağıdaki eşitlik ile hesap edilir.

$$X_{OP} = 293,94 \cdot \left(\frac{DGS \cdot C_f \cdot PWF \cdot k}{H_U \cdot C_i \cdot \eta_f} \right)^{1/2} - k \cdot R_{TD} \quad (17)$$

Çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

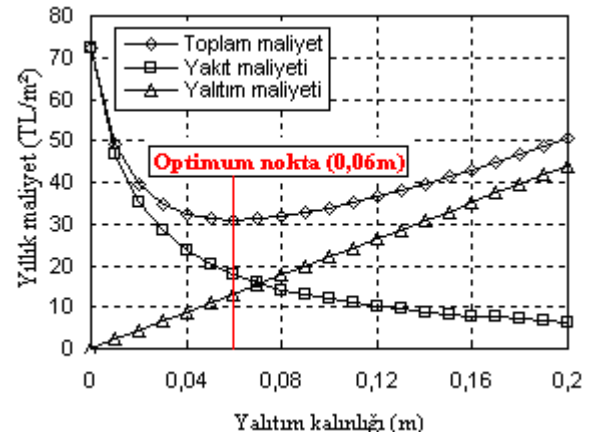
Yalıtılmış bir binanın toplam ısıtma maliyetini etkileyen iki parametre vardır. Bunlar yalıtım ve yakıt maliyetleridir. Binalarda yalıtım kalınlığının artmasına bağlı olarak ısı kaybı azalır. Bu yüzden birim alanı ısıtmak için gerekli enerji ihtiyacı azalır ve toplam maliyet düşer. Ancak yalıtım kalınlığının gereğinden fazla artırılması yalıtım maliyetini artırır. Bu durumda yüksek yalıtım maliyeti nedeniyle belli bir noktadan sonra toplam maliyet artmaya başlar. Toplam maliyetin minimum olduğu bu nokta optimum yalıtım kalınlığı değeri olarak ifade edilmektedir.

Şekil 2-4'te farklı yapı malzemeleri ve duvar tipleri için oluşan yıllık maliyetler verilmiştir. Yalıtım kalınlığının

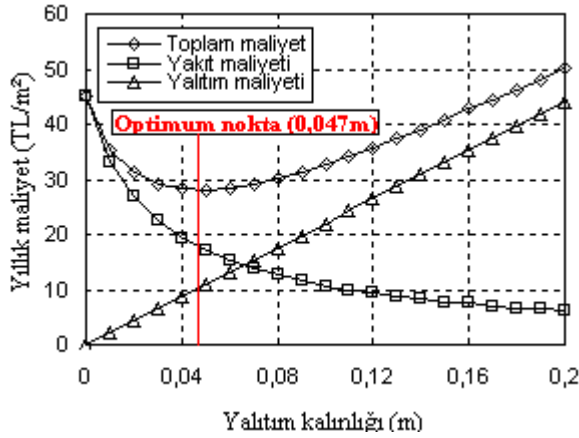
artmasıyla birlikte bütün uygulamalar için toplam maliyet azalmıştır. Bunun nedeni birim alandan gerçekleşen ısı kaybının azalmasıyla beraber yakıt tüketiminin azalmasıdır. Ancak optimum yalıtım kalınlığı değerinden itibaren lüzumsuz yere artırılan yalıtım kalınlığı, yalıtım maliyetini arttırmıştır. Bu durum neticesinde yüksek yalıtım maliyetleri toplam maliyeti arttırmaya başlamıştır.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri

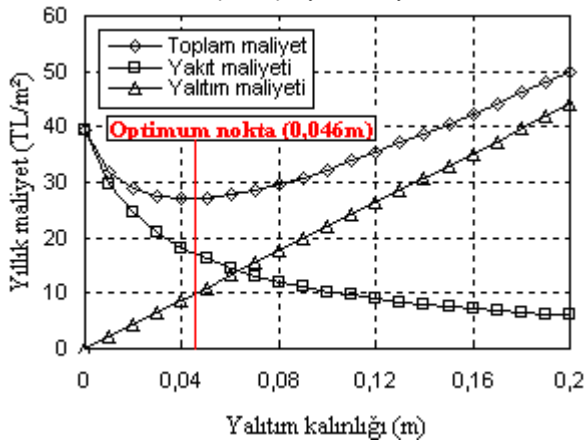
Parametre	Değer
Derece gün değeri (°C gün)	4061
Yakıtlar	Tablo 1
Yalıtım	
Taş yünü	
Isıl iletkenlik, k	0.039 W/mK
Fiyat, C_i	220TL/m ³
Yapı malzemesi	
Tuğla	
Isıl iletkenlik, k	0.45 W/mK
Gaz beton	
Isıl iletkenlik, k	0.24 W/mK
İç sıva	
Dış sıva	
Isıl iletkenlik, k	0.872 W/mK
R_{TD1} (yapı malzemesi tuğla)	0.52 m ² K/W
R_{TD2} (yapı malzemesi gaz beton)	0.85 m ² K/W
R_{TD3} (Sandviç duvar yapısı)	0.976 m ² K/W
Ömür, N	10 yıl



Şekil 2. Yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan dıştan yalıtımlı duvar modeli için oluşan yıllık maliyetler



Şekil 3. Yapı malzemesi olarak gaz beton kullanılan dıştan yalıtımlı duvar modeli için oluşan yıllık maliyetler



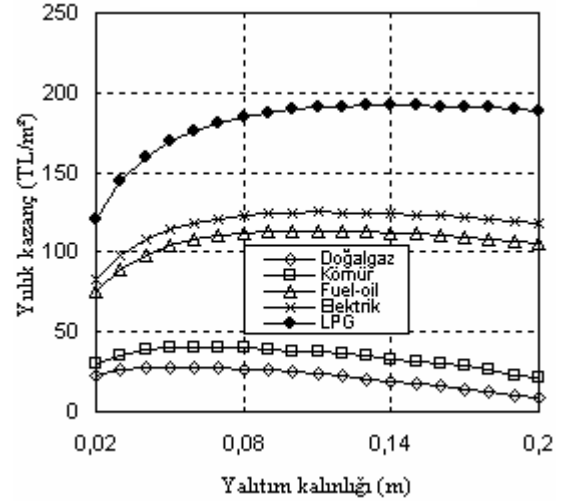
Şekil 4. Sandviç duvar yapısı için oluşan yıllık maliyetler

Kullanılan yakıtlara göre birim alandan sağlanacak yıllık kazanç, yakıt maliyeti ve PWF değeri ile doğru orantılıdır. Yakıt maliyetindeki herhangi bir artış enerji tasarrufunu arttıracaktır. Bu nedenle fuel-oil, LPG ve elektrik gibi yüksek fiyatlara sahip yakıtlar kullanıldığında elde edilecek enerji tasarrufu kömür ve doğalgaz kullanımından elde edilecek enerji tasarrufundan daha fazla olarak elde edilmektedir. Çalışmada kullanılan farklı yakıtlar için yalıtım kalınlığının yıllık kazanç üzerindeki etkileri Şekil 5-7'de gösterilmiştir.

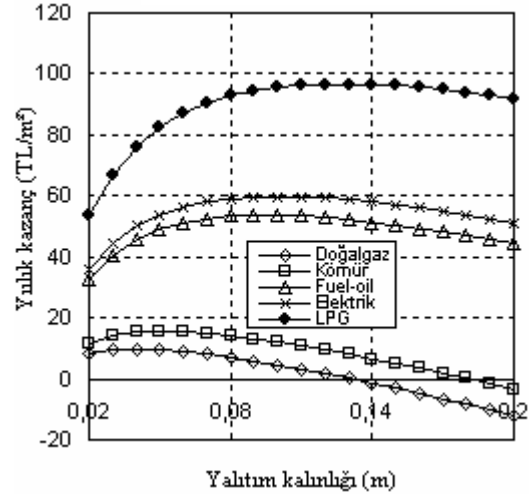
Grafiklerde görüldüğü gibi dıştan yalıtımlı bir duvarda yapı malzemesi olarak tuğla kullanımında oluşan yıllık kazanç, yapı malzemesi olarak gaz beton kullanılan duvar modeline göre çok daha fazla olmaktadır. Bu durumun başlıca nedeni gaz beton malzemesinin ısıl iletkenliğinin tuğlaya göre daha düşük olmasıdır.

Bu sayede aynı yalıtım malzemesi ve yakıt tipleri için yapı malzemesi olarak gaz beton kullanılan bina dış duvarının

birim alanından gerçekleşen ısı kaybı azalacak ve dolayısıyla yalıtıma olan ihtiyaç azalacaktır. Yapı malzemesi olarak yatay delikli tuğla kullanılan dıştan yalıtımlı duvar modelinde ise yüksek ısı kaybı neticesinde yalıtımla beraber birim alandan yüksek oranda yıllık kazanç elde edilmektedir.



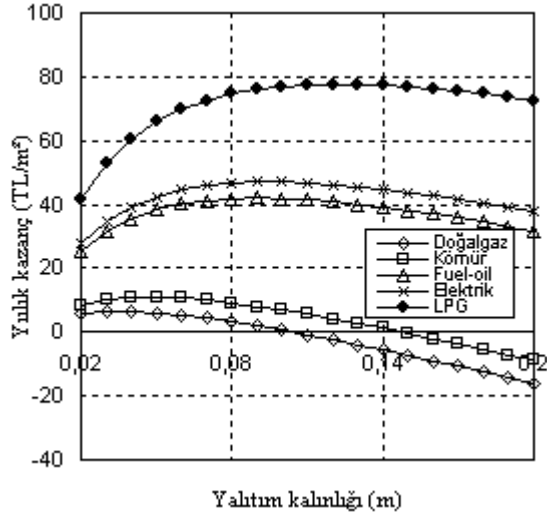
Şekil 5. Yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan dıştan yalıtımlı duvar modeli için oluşan yıllık kazançlar



Şekil 6. Yapı malzemesi olarak gaz beton kullanılan dıştan yalıtımlı duvar modeli için oluşan yıllık kazançlar

Bina dış duvarına uygulanan sandviç duvar modeli, dıştan yalıtımlı duvar modellerine göre daha az yıllık kazanç sağlamaktadır. Çünkü duvar yapısında kullanılan çift tuğla katmanı nedeniyle duvar tabakası yüksek bir ısıl direnç oluşturmaktadır ve bu sayede ısı kayıpları azalmaktadır. Dolayısıyla bu duvar modelinde her bir yakıt tipi için optimum yalıtım kalınlıkları daha düşük olarak hesaplanmaktadır. Özellikle kömür ve doğalgaz gibi düşük

maliyetli yakıtlar kullanılması durumunda yalıtım uygulaması için yapılan harcama, yakıt maliyetlerini geçmektedir. Bu nedenle yalıtım kalınlığının gereğinden fazla seçilmesi durumunda yapılan yalıtım kendisini karşılayamamakta ve uygulamadan zarar edilmektedir.



Şekil 7. Sandviç duvar yapısı için oluşan yıllık kazançlar

Tablo 3. Farklı duvar yapıları için hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları, yıllık kazançlar ve geri ödeme süreleri

Duvar tipi	Dıştan yalıtımlı duvar (tuğla) (R _{TD1})			Dıştan yalıtımlı duvar (gaz beton) (R _{TD2})			Sandviç duvar (R _{TD3})		
	X _{opt} (m)	Yıllık kazanç (TL/m ²)	Geri ödeme süresi (yıl)	X _{opt} (m)	Yıllık kazanç (TL/m ²)	Geri ödeme süresi (yıl)	X _{opt} (m)	Yıllık kazanç (TL/m ²)	Geri ödeme süresi (yıl)
Doğalgaz	0.05	28.2	1.92	0.038	9.75	3.4	0.033	6.41	4.5
Kömür	0.06	40.33	1.74	0.047	15.55	2.77	0.046	10.94	3.43
Fuel-oil	0.102	111.96	1.41	0.089	53.64	1.83	0.084	41.93	2.04
Elektrik	0.107	123.26	1.39	0.094	59.84	1.78	0.089	46.99	1.98
LPG	0.132	189.7	1.31	0.119	96.61	1.59	0.114	77.48	1.73

. Yapılan çalışmada farklı duvar modelleri için optimum ısı yalıtım kalınlıkları, yıllık kazançlar ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama, Türkiye'de uygulama alanına sahip başlıca duvar yapılarını ekonomik yönden kıyaslamak amacıyla yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda optimum yalıtım kalınlıkları; yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan dış duvar modelinde 0.05-0.132m arasında, yapı malzemesi olarak gaz beton kullanılan dış duvar modelinde 0.038-0.119m arasında ve sandviç duvar yapısında 0.033-0.114m arasında hesaplanmıştır. Aynı dış duvar yapıları için hesaplanan yıllık kazançlar 6.41- 189.7 TL/m² arasında ve geri ödeme süreleri farklı dış duvar modelleri için 1.31-4.5 yıl arasında bulunmuştur.

Semboller ve Kısaltmalar

C_f : Yakıt maliyeti (TL/kg, TL/m³, TL/kWh)
C_i : Yalıtım malzemesinin birim fiyatı (TL/m³)

Çalışma sonucunda hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları, yıllık kazançlar ve geri ödeme süreleri Tablo 3'te verilmiştir. Geri ödeme süresi, yapılan yalıtım maliyetinin kendisini ödeyeceği süre olarak açıklanabilir. Bu süre kullanılan yalıtım malzemesi, duvar katmanları ve yakıt tipleri ile doğrudan bir ilişki içerisindedir.

Fuel-oil, elektrik ve LPG gibi fiyatı yüksek yakıtların ve ısı kaybının yüksek olduğu duvar yapılarının kullanımında geri ödeme süreleri diğer uygulamalara göre yüksek çıkmaktadır. Bu gibi uygulamalarda, yüksek ısı kaybı nedeniyle birim alanı ısıtmak için çok daha fazla yakıt gerekecektir. Bu yüzden yapılan yalıtım uygulamasıyla enerjiden yüksek oranda tasarruf sağlanabilir. Bu durum geri ödeme süresini kısaltmaktadır.

C_{izo} : Yalıtım maliyeti (TL/m²)
C_A : Yıllık ısıtma maliyeti (TL/m²-yıl)
DGS : Derece gün sayısı (°C gün)
E_A : Yıllık enerji miktarı (J/m²-yıl)
g : Enflasyon oranı
H_u : Alt ısııl değer (J/kg, J/m³, J/kWh)
i : Faiz oranı
k : Yalıtım malzemesinin ısııl iletkenliği (W/mK)
U : Toplam ısııl geçiş katsayısı (W/m²K)
N : Zaman (yıl)
PWF : Şimdiki değer faktörü
Q : Birim alandan gerçekleşen ısııl kaybı (W/m²)
r : Gerçek faiz oranı
R_d : Yalıtımsız duvar tabakasının ısııl direnç katsayısı (m²K/W)
R_i : İç yüzey ısııl direnç katsayısı (m²K/W)
R_{izo} : Yalıtım malzemesi ısııl direnç katsayısı (m²K/W)
R_o : Dış yüzey ısııl direnç katsayısı (m²K/W)

R_d	: Yalıtımsız duvar tabakasının ısı direnç katsayısı (m^2K/W)
R_{TD}	: Yalıtımsız duvar tabakasının toplam ısı direnç katsayısı (m^2K/W)
R_{TD1}	: Yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan yalıtımsız duvar tabakasının toplam ısı direnç katsayısı (m^2K/W)
R_{TD2}	: Yapı malzemesi olarak gaz beton kullanılan yalıtımsız duvar tabakasının toplam ısı direnç katsayısı (m^2K/W)
R_{TD3}	: Sandviç duvar yapısının toplam ısı direnç katsayısı (m^2K/W)
x	: Yalıtım kalınlığı (m)
x_{opt}	: Optimum yalıtım kalınlığı (m)
η	: Yakıt verimi

KAYNAKLAR

- [1] Dombaycı, Ö.A., “Degree-days maps of Turkey for various base temperatures”, *Energy*, 34, 1807-1812, 2009.
- [2] Deniz, E., Gürel, A. E., Daşdemir, A., Çamur, D., “Fuel Consumption and Influences External Wall Optimum Insulation Thickness to Owning Cost of Energy, Technology, ss: 283-290, 12(4), 2009.
- [3] Hasan, A., “Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost”. *Applied Energy*, 63, 115-124, 1999.
- [4] Dombaycı, Ö.A., Gölcü M, Pancar Y. “Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources”. *Applied Energy*, 83, 921–928, 2006.
- [5] Bolattürk, A., “Determination of optimum thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey”, *Applied thermal engineering*, 26, 1301-1309, 2006.
- [6] Uçar, A., Balo, F., Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey, *Applied Energy*, 86, 730-736, 2009.
- [7] Çomaklı, K., Yüksel, B., Environmental impact of thermal insulation thickness in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 24(2), 933–940, 2004.
- [8] Yu, J., Yang, C., Tian, L., Liao, D., A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China, *Applied Energy*, 86, 2520-2529, 2009.
- [9] Gölcü, M., Dombaycı, A,Ö., Abalı, S.,”Denizli İçin Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufuna Etkisi ve Sonuçları”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 21, No 4, s. 639-644, 2006.