

GÜNEŞ IŞINIMI VE DUVAR YÖNÜ DİKKATE ALINARAK OPTİMUM ISIL YALITIM KALINLIĞININ BELİRLENMESİ

Ömer KAYNAKLI*, Sevcan ÖZDEMİR*, M. İhsan KARAMANGİL**

*Uludağ Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa.

**Uludağ Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa.

kaynakli@uludag.edu.tr, s_ozdemir75@hotmail.com, ihsan@uludag.edu.tr

(Geliş/Received: 18.03.2011; Kabul/Accepted: 20.02.2012)

ÖZET

Bu çalışma, bina dış duvarlarına uygulanan ısı yalıtım kalınlığının optimizasyonu üzerinedir. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak güneş ışınımı dikkate alınmış ve binanın dış duvarlarına uygulanacak yalıtım kalınlığının yöne bağlı değişimi incelenmiştir. Çalışmada örnek olarak İstanbul ili ele alınmış, ortalama hava sıcaklığı ölçümlerinden ve hesaplanan güneş ışınımı değerlerinden hareketle binanın farklı yönleri (doğu, batı, kuzey, güney) için optimum yalıtım kalınlıkları belirlenmiştir. Derece-gün (*DG*) tabanlı optimizasyonda ömür, faiz ve enflasyon oranlarını dikkate alan ömür döngüsü maliyet analizi kullanılmıştır. Sonuç olarak, sadece dış hava sıcaklık verilerine dayanan toplam *DG* sayısı 1827 iken güneş ışınımı dikkate alındığında doğu, batı, kuzey ve güneye bakan dik yüzeyler için sırasıyla 1633, 1628, 1719 ve 1535 elde edilmiştir. Buna bağlı olarak bu yüzeyler için optimum yalıtım kalınlıkları ise sırasıyla 4,8 cm, 4,8 cm, 5,2 cm ve 4,3 cm olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optimum yalıtım kalınlığı, güneş ışınımı, derece-gün, güneş-hava sıcaklığı.

DETERMINATION OF OPTIMUM THERMAL INSULATION THICKNESS CONSIDERING SOLAR RADIATION AND WALL ORIENTATION

ABSTRACT

This study focuses on the optimization of the thermal insulation thickness applied to external walls of a building. Different from other studies in the literature, taking into account the incident solar radiation on a wall, the variation of optimum thermal insulation thickness in respect to the wall orientation has been investigated. By using the measured average air temperatures and the calculated solar radiation flux, the optimum insulation thicknesses have been determined for different orientations of a building wall (east, west, north, south). The life cycle cost analysis, which considers lifetime, discount and inflation rates, and based on the degree-days (*DD*) has been used for the optimization. As a result, while the total *DDs* based on only the outside air temperature data is 1827, the total *DDs* considering solar radiation are 1633, 1628, 1719 and 1535 for east-, west-, north- and south-facing vertical surfaces, respectively. Accordingly, the optimum insulation thicknesses for these surfaces have been calculated as 4.8 cm, 4.8 cm, 5.2 cm and 4.3 cm respectively.

Key Words: Optimum thermal insulation thickness, solar radiation, degree-days, solar-air temperature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji tüketimi ülkelerin en önemli sorunlarından biridir. Mevcut enerji kaynaklarının kısıtlılığı ve aynı zamanda enerji tüketiminin neden olduğu çevre kirliliği, enerji korunumunu zorunlu hale getirmiştir. Enerji korunumu, binalarda enerji tüketimini azaltarak sağlanabilir. Bunu sağlamanın yollarından biri de bina dış duvarlarına ısı yalıtım uygulamaktır. Türkiye gibi enerji üretim ve tüketim miktarları arasında büyük fark olan ülkeler için enerjinin etkin bir biçimde

kullanılması çok önemlidir [1,2]. Ülkemizin, enerji kaynakları açısından çok zengin olmadığı bir gerçektir. Enerji ihtiyacının %60-65'lik bir kısmı dışarıdan ithal edilmektedir [3,4]. Ayrıca bu ihtiyaç her yıl yaklaşık %4,4 gibi bir oranda da artış göstermektedir [5].

Isıl yalıtım kalınlığının artmasıyla yalıtım malzemesi maliyeti artarken, binadan olan ısı kaybının azalması nedeniyle diğer taraftan enerji giderleri azalır. Dolayısıyla yalıtım kalınlığı için enerji ve yalıtım

maliyetlerinin toplamını minimize eden optimum bir değer söz konusudur [6]. Literatürde ısı yalıtım kalınlığının optimizasyonu üzerine birçok çalışma vardır [1,2,6-10]. Ancak bu çalışmalarda güneş ışınımı dikkate alınmamış veya yöne bağlı bir analiz yapılmamıştır. Al-Khajawa [11]'de güneş-hava sıcaklık (T_{g-h}) kavramından yararlanılarak Katar için güneş ışınımı verileri hesaba katılmıştır. Ancak çalışmada, farklı yönler göre (doğu, batı, kuzey ve güney) bir analiz yapılmamıştır. Özel [12] sonlu farklar metodunu kullanarak duvardan olan ısı yüklerini hesaplamış ve Elazığ ili için duvar yönlerine göre güneş yüklerini dikkate almıştır.

TS 825 - Binalarda Isı Yalıtım Kuralları - standardı [13], ülkemizdeki enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan binaların ısıtılmasında kullanılan enerji miktarını sınırlayarak enerji tasarrufu sağlamayı hedeflemektedir. Türkiye, TS 825'de derece-gün (DG) sayılarına göre 4 bölgeye ayrılmıştır. 1. bölge ısıtma için en az enerji ihtiyacının olduğu, 4. bölge ise en fazla enerji ihtiyacının olduğu bölgeyi temsil etmektedir.

Bu çalışmada, dış duvarlara uygulanacak yalıtım kalınlığının optimum değerinin tespiti üzerinde durulmuştur. Ancak diğer çalışmalardan farklı olarak güneş ışınımının etkisi dikkate alınarak farklı yönler bakan dik yüzeyler (binanın dış duvarları) için yalıtım kalınlığının nasıl değiştiği belirlenmiştir. Bu amaçla, yüzeylere düşen anlık güneş ışınımı değerlerinin hesaplanması için matematiksel model kurulmuş ve örnek il (İstanbul) için 10 yıllık dış hava sıcaklık verilerinden hareketle güneş ışınımının etkisini ifade eden güneş-hava sıcaklıkları her yön için hesaplanmıştır. Yöne bağlı DG değerlerinin tespitinin ardından enerji ve yalıtım maliyetinin toplamını minimize eden optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır.

2. MATEMATİKSEL MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

2.1 Derece-Gün Yöntemi (Degree-Day Method)

Enerji gereksiniminin tahmini için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de DG 'dür. DG değeri belirli bir referans sıcaklık (T_b) alınarak hesaplanır. Binanın yapısal özellikleri (duvar tipi, yalıtım durumu, hava sızıntıları, güneş ışınımı durumu), iklim koşulları ve bina kullanıcılarının kişisel tercihleri gibi faktörler referans sıcaklığın belirlenmesini etkilemektedir. Bu çalışmada $T_b = 18^\circ\text{C}$ alınmıştır [10,14]. Toplam derece-gün sayısı için eşitlik (1) ve (2) kullanılabilir [10].

$$DG = \sum_1^{365} (T_b - T_{g-h}) \quad (T_{g-h} < T_b) \quad (1)$$

$$DG = 0 \quad (T_{g-h} > T_b) \quad (2)$$

Burada T_b referans sıcaklığı ve T_{g-h} güneş-hava sıcaklığıdır. T_{g-h} günlük ortalama dış hava sıcaklığına güneş ışınımının etkisinin ilave edilmesiyle bulunur [15,16].

2.2 Güneş Işınımı Değerlerinin Hesaplanması (Calculation of Solar Radiation)

Yatay yüzeye düşen güneş ışınımı değerlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle atmosfer dışında yatay yüzeye gelen günlük güneş ışınımı değerleri ($\dot{q}_{o,h}$) eşitlik (3) aracılığıyla, daha sonra ise eşitlik (4) ile yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımı miktarı (\dot{q}_h) hesaplanır. Burada güneş ışınımının hesabıyla ilgili temel denklemler verilecektir. Daha kapsamlı bilgiler için Yiğit ve Atmaca [17] ve Duffie ve Beckman [18]'e başvurulabilir.

$$\dot{q}_{o,h} = \frac{G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (3)$$

$$\left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right]$$

$$\frac{\dot{q}_h}{\dot{q}_{o,h}} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

Bu denklemlerde G_{sc} güneş sabiti (1367 W/m^2 [17]), n/N izafi güneşlenme süresi, $\dot{q}_h / \dot{q}_{o,h}$ berraklık indeksi (K_T ile gösterilir), a ve b bölgeye bağlı ampirik sabitlerdir. Kılıç ve Öztürk [19]'da bölge ve aylara göre n/N değerleri verilmiştir ve Türkiye için a ve b katsayıları deklinasyon açısı (δ), rakım (Z) ve enlem açısına (ϕ) bağlı olarak belirlenmiştir.

$$a = 0,103 + 0,000017Z + 0,198 \cos(\phi - \delta) \quad (5)$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(\phi - \delta) \quad (6)$$

Direkt güneş ışınımının geliş açısı (θ) diğer açılar cinsinden en genel haliyle aşağıda verilen eşitlikle ifade edilir.

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (7)$$

Bu ifade dik yüzey ($\beta=90^\circ$) için aşağıdaki gibi elde edilir. Bu eşitlik bütün yönler (doğu, batı, kuzey ve güney) için geçerlidir.

$$\begin{aligned} \cos \theta &= -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (8)$$

Dik yüzeyin yönü dikkate alındığında eşitlik (8) yüzeyin azimut açısına (γ) göre değişmektedir. Güney için azimut açısı $\gamma=0^\circ$, batı için $\gamma=90^\circ$, kuzey için $\gamma=180^\circ$ ve doğu için $\gamma=270^\circ$ alınarak aşağıda verilen denklemler elde edilir.

Güneye bakan dik yüzey ($\gamma=0^\circ$, $\beta=90^\circ$) için,

$$\cos \theta = \cos \delta \sin \phi \cos \omega - \sin \delta \cos \phi \quad (9)$$

Batıya bakan dik yüzey ($\gamma=90^\circ$, $\beta=90^\circ$) için,

$$\cos \theta = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (10)$$

Kuzeye bakan dik yüzey ($\gamma=180^\circ$, $\beta=90^\circ$) için,

$$\cos \theta = \sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega \quad (11)$$

Doğuya bakan dik yüzey ($\gamma=270^\circ$, $\beta=90^\circ$) için,

$$\cos \theta = -\cos \delta \sin \omega \quad (12)$$

Yatay yüzey ($\beta=0^\circ$) için tanımlanan güneş geliş açısı (θ_z) eşitlik (7)'den elde edilir.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (13)$$

Eşitlik (8) ve Eşitlik (13)'den elde edilen $\cos \theta$ ve $\cos \theta_z$ değerlerinin oranlanmasıyla her yön için ayrı ayrı R_b değerleri hesaplanabilir.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (14)$$

Yatay yüzey için ortalama günlük yayılı ışınım ($\dot{q}_{h,d}$), daha önce bahsedilen berraklık indeksine (K_T) bağlı olarak şu şekilde ifade edilir [20].

$$\dot{q}_{h,d} = \dot{q}_h (0,703 - 0,414K_T - 0,428K_T^2) \quad (15)$$

Dik yüzeye düşen toplam ışınım miktarı ise o yöne ait direkt, yayılı ve yansıyan ışınımın toplamına eşittir ve her yön için ayrı ayrı hesaplanması gerekir.

$$\dot{q}_s = \dot{q}_h \left(1 - \frac{\dot{q}_{h,d}}{\dot{q}_h}\right) R_b + \dot{q}_{h,d} \left(1 + \frac{\cos \beta}{2}\right) + \dot{q}_h \rho \left(1 - \frac{\cos \beta}{2}\right) \quad (16)$$

ρ yerin yansıtma oranıdır. Bitki örtüsüne, topografik yapıya ve kar durumuna bağlı olmakla birlikte ortalama 0,2 değeri alınabilir [17,21].

Bu çalışmada, yatay ve farklı yönlerde bakan dik yüzeylere düşen güneş ışınımının hesabı için

kullanılan denklemler Yiğit ve Atmaca [17] ve Duffie ve Beckman [18]'den alınmıştır. Daha detaylı bilgi için bu kaynaklara başvurulabilir.

2.3 Güneş-Hava Sıcaklığının Hesaplanması (Calculation of Solar-Air Temperature)

Güneş-hava sıcaklığının hesaplanması için eşitlik (17) kullanılabilir [16].

$$T_{g-h} = T_a + \frac{\alpha_s \dot{q}_s}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_a^4 - T_{surr}^4)}{h_o} \quad (17)$$

Burada T_a günlük ortalama dış hava sıcaklığı, α_s yutma katsayısı, \dot{q}_s güneş ışınımı (W/m^2), h_o bileşik (taşınım-ışınım) ısı transferi katsayısı, ε yüzeyin yayma katsayısı, σ Stefan-Boltzman sabiti, T_{surr} çevreleyen yüzeylerin ortalama sıcaklığıdır. Bu eşitlikte ikinci terim yüzeyin güneş ısı kazancını gösterirken, son terim yüzey ile çevre arasındaki ışınlama ısı transferi için düzeltme faktörüdür. Pratikte, bu değer dik yüzeyler için sıfırdan yatay yüzeyler için 3,9 değerine kadar değişir [16]. Bu çalışmada güneş-hava sıcaklığı her yüzey (yatay ve dikey yüzeyler) için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

2.4 Toplam Isı Transfer Katsayısının Hesaplanması (Calculation of Overall Heat Transfer Coefficient)

Yalıtımın olduğu tipik bir duvar için toplam ısı geçirgenliği, U ,

$$U = \frac{1}{1/h_i + R_w + x/k + 1/h_o} \quad (18)$$

şeklinde dir. Burada h_i ve h_o sırasıyla iç ve dış taraftaki ısı taşınım katsayıları, R_w yalıtımsız duvarın ısı direnci, x ve k sırasıyla yalıtım malzemesinin kalınlığı ve ısı iletim katsayısıdır. Binanın iç ve dış tarafındaki ısı taşınım katsayıları için $h_i = 8,3 W/m^2K$ ve $h_o = 17 W/m^2K$ değerleri kullanılmıştır [10,11]. Yalıtımsız duvarın toplam ısı direnci $R_{t,w}$ olmak üzere toplam ısı geçirgenliği yeniden düzenlenirse,

$$U = \frac{1}{R_{t,w} + x/k} \quad (19)$$

elde edilir.

2.5 Maliyetler ve Optimum Yalıtım Kalınlığı (Costs and Optimum Insulation Thickness)

Birim yüzey alan için ısıtmanın yıllık maliyeti eşitlik (20) ile hesaplanabilir.

$$C_A = \frac{86400 DG C_f}{(R_{t,w} + x/k) Hu \eta} \quad (20)$$

Bu çalışmada, binanın kullanım ömrü süresince enerji maliyet hesaplamalarında ömür maliyet analizi kullanılmıştır. Toplam ısıtma maliyeti hesaplanırken ömür süresi (LT) ve bugünkü değeri (PV) birlikte değerlendirilmesi gerekir. PV değeri düzeltilmiş faiz oranına (r) ve zamana bağlıdır. Düzeltilmiş faiz oranı aşağıda verilen denklem aracılığıyla bulunur.

$$r = (i-g)/(1+g) \quad (21)$$

Burada g enflasyon oranı ve i faiz oranıdır. Bu durumda PV denklemi [22],

$$PV = \frac{(1+r)^{LT} - 1}{r(1+r)^{LT}} \quad (22)$$

Burada LT ömür süresidir ve 20 yıl olarak kabul edilmiştir [23-25]. Yalıtımın toplam maliyeti ($C_{t,ins}$) aşağıda verilen denklemle bulunur.

$$C_{t,ins} = C_{ins} \times \quad (23)$$

Sonuç olarak toplam ısıtma maliyeti eşitlik (24) ile hesaplanır.

$$C_t = \frac{86400 DG C_f PV}{(R_{t,w} + x/k) Hu \eta} + C_{t,ins} \quad (24)$$

(24) no'lu denklemin yalıtım kalınlığına (x) göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse optimum yalıtım kalınlığı elde edilir.

$$x_{opt} = 293,94 \left(\frac{DG C_f k PV}{Hu C_{ins} \eta} \right)^{1/2} - kR_{t,w} \quad (25)$$

2.6 Parametreler (Parameters)

Çalışmada yer alan duvarın özellikleri Tablo 1'de, yakıtla ilgili özellikler ve PV analizinde kullanılan bazı finansal ve maliyet parametreleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Faiz ve enflasyon oranları için son 5 yılın ortalama verileri kullanılmıştır [26].

Tablo 1. Duvarı oluşturan malzemeler ve ısı iletim katsayıları (Wall materials and thermal conductivities)

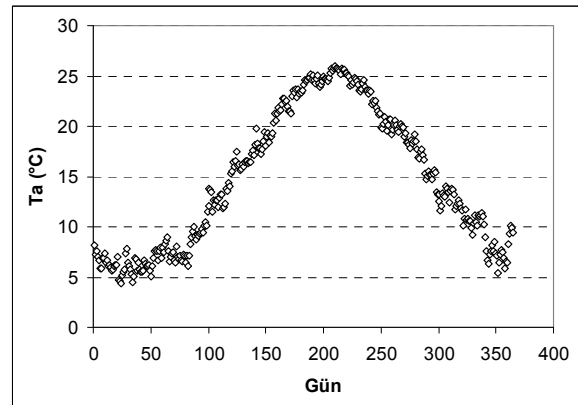
Kalınlık (m)	Malzeme	Isı iletim katsayısı (W/mK)
0,02	İç sıva	0,87
0,19	Delikli tuğla	0,45
x	Yalıtım (polistren)	0,034
0,015	Dış sıva	1,4

Tablo 2. Yakıt, yalıtım özellikleri ve finansal parametreler [10,15,26] (Fuel, insulation properties and financial parameters)

Parametre	Değer
Yakıt (Doğalgaz)	
Alt ısı değer, H_u	34526000 J/m ³
Fiyat, C_f	0,568 TL/m ³
Isıtma sisteminin verimi, η	0,93
Yalıtım malzemesi (polistren)	
Isı iletim katsayısı, k	0,034 W/mK
Fiyat, C_{ins}	240 TL/m ³
Finansal parametreler	
Enflasyon oranı, g	0,09
Faiz oranı, i	0,12
Ömür, LT	20
Şimdiki değer, PV	15,2 (eş. 22)

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

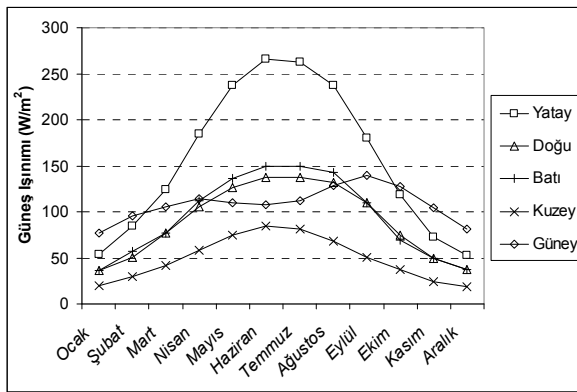
Enerji hesaplamalarında, meteorolojik sıcaklıkların bir yıl yerine uzun periyotlu ölçümlere dayanması güvenilirlik açısından önem arz etmektedir [14]. Bu çalışmada, İstanbul (41° K enlemi, 29° D boylamı) için yapılan 10 yıllık meteorolojik ölçüm verileri kullanılmıştır [27]. İzafi güneşlenme süresi (n/N değerleri) aylara göre bir miktar değişiklik göstermekle birlikte yıllık ortalama 0,52'dir [19]. Bu çalışmada daha hassas sonuçlar elde edilebilmesi için söz konusu referansta belirtilen aylık veriler kullanılmıştır. İstanbul için ortalama hava sıcaklığının değişimi Şekil 1'de verilmiştir.



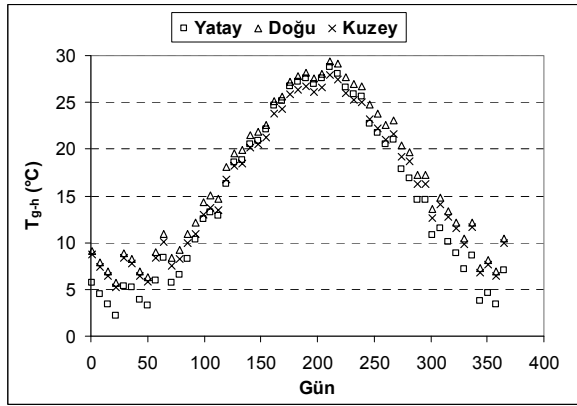
Şekil 1. 10 yıllık ortalama hava sıcaklığının değişimi (The variation of 10-year average air temperature)

Güneş ışınımının yalıtım kalınlığı üzerine etkisini görebilmek için yatay yüzey ve dik yüzeye (doğu, batı, kuzey ve güney) düşen güneş ışınımı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2'de yüzeylere düşen güneş ışınımının yıl içindeki değişimi görülmektedir. Yılın büyük bir kısmında yatay yüzey, dik yüzeylere göre daha fazla güneş ışınımı almaktadır (yıllık ortalama 156 W/m²). Dik yüzeyler arasında doğu ve batı

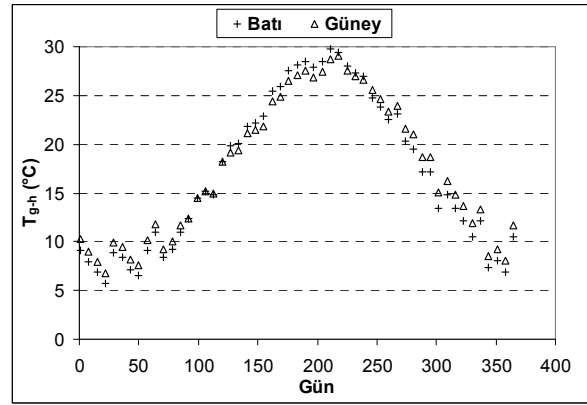
yönleri özellikle yaz aylarında daha fazla ışınlam alırken yılın tamamı göz önüne alındığında özellikle güney yönü ön plana çıkmaktadır. Doğu, batı ve güney yöne bakan dik yüzeyler için yıllık ortalama değerler sırasıyla 90, 94 ve 109 W/m²'dir. Kuzey yönüne bakan dik bir yüzey yıllık ortalama 50 W/m² ile güneş ışınlamını en az alan yüzey olmaktadır. Şekil 3(a) ve 3(b)'de ise yüzeye düşen güneş ışınlamının etkisinin dahil olduğu T_{g-h} sıcaklıkların değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi T_{g-h} sıcaklıklar, güneş ışınlamı nedeniyle hava sıcaklıklarında genel olarak bir miktar daha büyüktür ve yüzeyin konumuna göre değişiklik göstermektedir. Dik yüzeyler arasında bu sıcaklıklar en düşük olduğu yön kuzeydir. Bu durum, Şekil 2'de verilen güneş ışınlamı değerleriyle de uyumludur.



Şekil 2. Aylara göre güneş ışınlamı değerleri (W/m²) (Solar radiation flux vs. months)

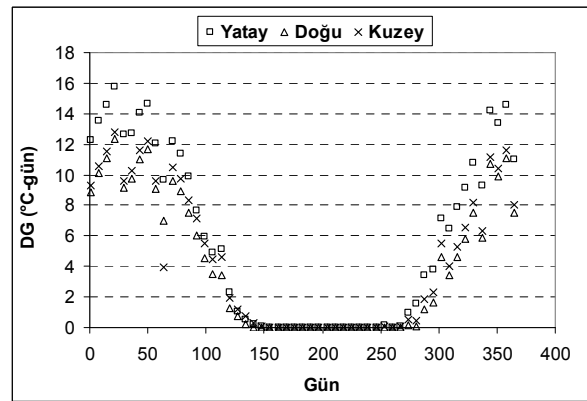


Şekil 3 (a). T_{g-h} değerleri (Yatay yüzey, doğu ve kuzeye bakan dik yüzeyler için) (T_{g-h} values for horizontal surface, vertical surfaces facing east and north)

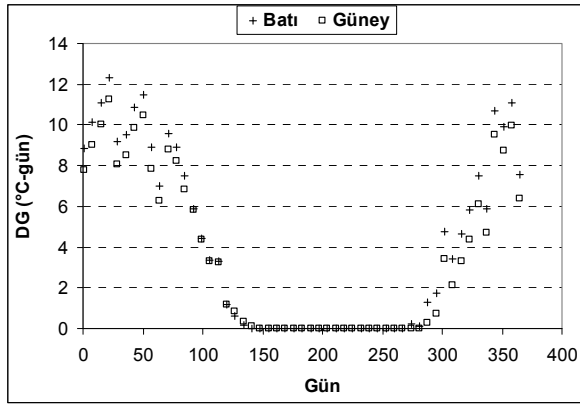


Şekil 3 (b). T_{g-h} değerleri (batı ve güneye bakan dik yüzeyler için) (T_{g-h} values for the west and south-facing vertical surfaces)

Şekil 4 (a) ve (b)'de ısıtma ihtiyacını gösteren DG değerinin değişimi görülmektedir. Kış aylarında DG değerleri yüksek iken yaz aylarında ısıtma ihtiyacı olmadığından DG değerleri sıfır çıkmıştır. Toplam DG sayısı yatay yüzey ve dik yüzeyler (doğu, batı, kuzey ve güney) için sırasıyla 2392, 1633, 1628, 1719 ve 1535 elde edilmiştir. Eğer güneş ışınlamı dikkate alınmasaydı, sadece meteorolojik hava sıcaklığı ölçümlerine göre DG hesaplanması durumunda 1827 elde edilecekti. Dikkat edilirse, dik yüzeyin tüm yönleri için güneş ışınlamı nedeniyle DG sayıları azalmıştır, yani ısıtma için daha az enerji gerekmektedir. Ancak, yatay yüzey için DG değerinin büyük çıkmasının nedeni, eşitlik (17)'den görüldüğü gibi yatay yüzeyin ışınlamla ısı kaybının fazla olmasıdır.



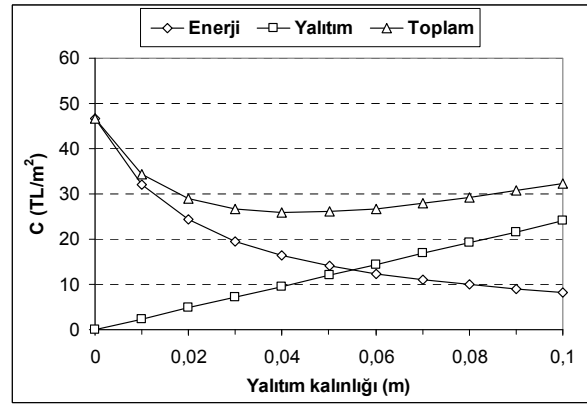
Şekil 4 (a). DG değerleri (yatay yüzey, doğu ve kuzeye bakan dik yüzeyler için) (DG values for horizontal surface, vertical surfaces facing east and north)



Şekil 4 (b). DG değerleri (batı ve güneye bakan dik yüzeyler için) (DD values for the west and south-facing vertical surfaces)

Şekil 5’de örnek olarak güneye bakan bir dik yüzey için yalıtım kalınlığı ile maliyetlerin (enerji, yalıtım ve toplam) değişimi verilmiştir. Dış duvara uygulanan yalıtımın kalınlığı arttıkça doğal olarak duvarın toplam ısıl direnci artar ve duvardan olan ısı kaybı azalır. Isı kaybının azalmasıyla şekilden görüldüğü gibi yıllık yakıt maliyeti azalan bir eğimle azalmaktadır. Çünkü yalıtım kalınlığı arttıkça, duvar toplam ısıl direnci azalan bir eğimde artmaktadır. Uygulanan yalıtım kalınlığının artması daha fazla yalıtım malzemesi kullanılması anlamına gelmektedir. Bu nedenle, yalıtım kalınlığı arttıkça yalıtım maliyeti ($C_{t,ins}$) de lineer olarak artmaktadır. Yakıt ve yalıtım maliyetlerinin toplamından oluşan toplam maliyet (C_t), yalıtım kalınlığı ile belirli bir dereceye kadar azalmakta ancak daha sonra artmaktadır. Toplam maliyetin minimum olduğu nokta en uygun yalıtım kalınlığı değerini vermekte ve optimum yalıtım kalınlığı olarak adlandırılmaktadır. Bu noktanın sağında ve solunda (yani daha fazla ve az yalıtım kullanılması durumunda) ya yalıtım ya da yakıt maliyetinden dolayı toplam maliyet artma eğilimi göstermektedir. Şekil 5’de görüldüğü gibi, güneye bakan dik duvar için 29 TL/m² toplam maliyet ile en uygun yalıtım kalınlığı yaklaşık 5 cm olarak hesaplanmıştır. Diğer yönler için ise benzer yöntemle hesaplamalar yapıldığında elde edilen optimum yalıtım kalınlıkları Tablo 3’de özetlenmiştir.

Verilen tablodan, güneş ışınımının yalıtım kalınlığı üzerinde etkisinin önemi görülmektedir. Doğu ve batı yönleri arasında kayda değer bir farkın olmamasına karşın, kuzey ve güney yönleri arasından yaklaşık 0,5 cm yalıtım kalınlığı farkı bulunmaktadır. Bu fark, özellikle güneş ışınımının daha yoğun olduğu bölgeler için daha büyük olacaktır. Ülkemizde bina kabuğuna yalıtım uygulamaları yapılırken yönler göre bu değişimin dikkate alınması enerji tasarrufu açısından son derece önemli olacaktır.



Şekil 5. Güneye bakan dik yüzey için yalıtım kalınlığının maliyete etkisi (The effect of insulation thickness on the cost for south facing wall)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Türkiye gibi enerji kaynaklarının sınırlı olduğu ve bu nedenle büyük ölçüde enerjide dışa bağımlı ülkelerde, özellikle birincil enerjinin yoğun olarak tüketildiği ve ısı kayıplarının çok fazla olduğu konut sektöründe enerjinin korunumu gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır.

Enerji maliyetlerinin artması, konutlarda yalıtımın önemini belirgin hale getirmiştir. Bu çalışmada, güneş ışınımını dikkate alarak optimum yalıtım kalınlığı hesabı için örnek bir prosedür sunulmuştur. Farklı yönler bakan bina dış duvarları için gerekli yalıtım kalınlıklarının değişimi incelenmiştir. Yüze gelen güneş ışınımının yıl içindeki değişimine bakıldığında en az ışınım yaklaşık 50 W/m² değeriyle kuzey yönüne bakan dik yüzeyde olduğu, en fazla ışınım ise yatay yüzey ve güneye bakan dik yüzeyde sırasıyla 156 ve 109 W/m² olduğu görülmektedir. Sadece dış hava sıcaklık verileri kullanılarak hesaplanan toplam DG sayısı 1827 iken yüze gelen güneş ışınımı dikkate alındığında, enerji ihtiyacı azalarak doğu, batı, kuzey ve güneye bakan dik yüzeyler için DG sayıları sırasıyla 1633, 1628, 1719 ve 1535 elde edilmiştir. Elde edilen güneş ışınımı yüklerinin sıcaklık eşdeğeri hesaplandıktan sonra ısıl yalıtım kalınlığına etkisi bulunmuştur. Yatay yüzey için yaklaşık 6,1 cm, doğu ve batıya bakan duvarlar için yaklaşık 4,8 cm, kuzey ve güneye bakan duvarlar için sırasıyla yaklaşık 5,2 ve 4,3 cm yalıtım kalınlıkları toplam maliyeti minimum yapan optimum sonuçlardır. Yatay yüzeye düşen ışınımın diğer yüzeylere göre daha fazla olmasına karşın bu yüzeyden ışınımın ısı kaybının fazla oluşu, gerekli yalıtım kalınlığının da büyük çıkmasına neden olmuştur. Dik yüzeyler arasında kuzey yönü güneş ışınımını en az alan yön olduğundan, en fazla yalıtım bu yönde yapılması gerekmektedir.

Tablo 3. Farklı yöne bakan yüzeyler için optimum yalıtım kalınlıkları (Optimum insulation thicknesses for different orientations)

	Yatay Yüzey	Dik Yüzey (Bati)	Dik Yüzey (Doğu)	Dik Yüzey (Kuzey)	Dik Yüzey (Güney)
Toplam maliyet, C_t (TL/m ²)	34,3	28,1	28,2	29,9	25,9
Optimum yalıtım kalınlığı, x_{opt} (m)	0,0607	0,0477	0,0479	0,0515	0,0433

Sonuç olarak bu çalışmada, ülkemizde enerji giderlerini azaltmaya yönelik yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan ısı yalıtım için uygulanabilir, pratik sonuçlar elde edilmiştir. Enerji maliyetlerinin yüksek olduğu ülkemizde yalıtımla sağlanan tasarruf kullanıcılar ve dolayısıyla ülke ekonomisine olumlu katkı sağlayacaktır. Isıl yalıtım kalınlıklarının belirlenmesinde güneş ışınımından kaynaklanan ısı kazancının ve bina kabuğunda yöne göre farklılıkların göz önünde bulundurulması enerji ve dolayısıyla maliyetler açısından daha ekonomik sonuçlar doğuracaktır.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

a, b	: Bölgeye bağlı sabitler (eş. 5 ve 6)
C_A	: Birim yüzey alan için ısıtmanın yıllık maliyeti (TL/m ²)
C_f	: Yakıt maliyeti (TL/m ³)
C_{ins}	: Yalıtım malzemesinin birim fiyatı (TL/m ³)
C_t	: Toplam maliyet (TL/m ²)
$C_{t,ins}$: Yalıtımın toplam maliyeti (TL/m ²)
DG	: Derece-Gün değeri (°C gün)
g	: Enflasyon oranı
G_{sc}	: Güneş sabiti (W/m ²)
h_i	: İç taraftaki ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
h_o	: Bileşik (taşınım-ışınım) ısı transferi katsayısı (W/m ² K)
Hu	: Yakıtın alt ısı değeri (J/m ³)
i	: Faiz oranı
k	: Yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/mK)
K_T	: Berraklık indeksi
LT	: Ömür
n/N	: İzafi güneşlenme süresi
PV	: Şimdiki değer
$\dot{q}_{o,h}$: Atmosfer dışında yatay yüzeye gelen günlük güneş ışınımı (W/m ²)
\dot{q}_h	: Yatay yüzeye gelen günlük toplam güneş ışınımı (W/m ²)
$\dot{q}_{h,d}$: Yatay yüzeye gelen günlük yayılı güneş ışınımı (W/m ²)
\dot{q}_s	: Eğik yüzeye gelen günlük toplam güneş ışınımı (W/m ²)
r	: Düzeltilmiş faiz oranı
R_b	: Geometrik faktör
R_w	: Yalıtımsız duvarın ısı direnci (m ² K/W)
$R_{t,w}$: Yalıtımsız duvarın toplam ısı direnci (m ² K/W)
T_a	: Günlük ortalama dış hava sıcaklığı (°C)

T_b	: Referans sıcaklığı (°C)
T_{g-h}	: Güneş-hava sıcaklığı (°C)
T_{surr}	: Çevreleyen yüzeylerin ortalama sıcaklığı (°C)
U	: Toplam ısı geçiş katsayısı (W/m ² K)
x	: Yalıtım malzemesinin kalınlığı (m)
x_{opt}	: Optimum yalıtım kalınlığı (m)
α_s	: Yutma katsayısı
β	: Eğim açısı
γ	: Yüzey azimut açısı
δ	: Deklinasyon açısı
ε	: Yüzeyin yayma katsayısı
η	: Yakma sisteminin verimi
θ	: Güneş geliş açısı
θ_z	: Zenit açısı
ρ	: Yer in yansıtma oranı
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti
ϕ	: Enlem açısı
ω	: Saat açısı
ω_s	: Güneş batış açısı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yamankaradeniz, R. ve Kaynaklı, Ö., "Isıtma Süreci ve Optimum Yalıtım Kalınlığı Hesabı ", **VIII. Ulusal Tesisat Mühendisleri Kongresi**, İzmir, 187-195, 25-28 Ekim 2007.
2. Aytaç, A. ve Aksoy, U.T., " Enerji Tasarrufu İçin Dış Duvarlarda Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Isıtma Maliyeti İlişkisi", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 21, No 4, 753-758, 2006.
3. Oğulata, R.G., "Sectoral Energy Consumption in Turkey", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 6, 471-480, 2002.
4. Kaygusuz, K. ve Kaygusuz, A., "Energy Sustainable Development. Part II: Environmental Impacts Of Energy Use", **Energy Sources**, Cilt 26, 1071-1082, 2004.
5. Demirbaş, A., "Energy Balance, Energy Sources, Energy Policy, Future Developments and Energy Investment in Turkey", **Energy Conversion and Management**, Cilt 42, 1239-1258, 2001.
6. Hasan, A., "Optimizing Insulation Thickness for Buildings Using Life Cycle Cost", **Applied Energy**, Cilt 69, 269-283, 2001.
7. Bolattürk, A., "Determination of Optimum Insulation Thickness for Building Walls With Respect to Various Fuels and Climate Zones in

- Turkey”, **Applied Thermal Engineering**, Cilt 26, 1301-1309, 2006.
8. Özel, M., “Bina Dış Duvarlarının Optimum Yalıtım Kalınlıkları İçin Dinamik Yaklaşım ve Maliyet Analizi”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 23, No 4, 879-884, 2008.
 9. Özel, M. ve Pıhtılı, K., “Isıtma ve Soğutma Derece-Gün Değerlerini Kullanarak Optimum Yalıtım Kalınlığını Belirlenmesi”, **Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi**, Cilt 26, No 3, 191-197, 2008.
 10. Bolattürk, A., “Optimum Insulation Thicknesses for Building Walls With Respect To Cooling and Heating Degree-Hours in the Warmest Zone of Turkey”, **Building and Environment**, Cilt 43, No 6, 1055-1064, 2008.
 11. Al-Khawaja, M.J., “Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation”, **Applied Thermal Engineering**, Cilt 24, 2601-2610, 2004.
 12. Özel, M., “Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method”, **Applied Energy**, Cilt 88, 2429-2435, 2011.
 13. TS 825, “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 1999.
 14. Büyükalaca, O., Bulut H. ve Yılmaz T., “Analysis of Variable-Base Heating and Cooling Degree-Days for Turkey”, **Applied Energy**, Cilt 69, 269-283, 2001.
 15. Kaynaklı, Ö., Kılıç, M. ve Yamanakaradeniz. R., “Isıtma ve Soğutma Süreci İçin Dış Duvar Optimum Yalıtım Kalınlığını Hesabı”, **TTMD Dergisi**, Cilt 65, 39-45, 2010.
 16. Çengel, Y.A., **Heat Transfer: A Practical Approach**, McGraw-Hill Inc., 1998.
 17. Yiğit, A. ve Atmaca, İ., **Güneş Enerjisi**, Alfa-Aktüel Yayınları, Bursa, 2010.
 18. Duffie, J.A. ve Beckman, W.A., **Solar Engineering of Thermal Processes**, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1991.
 19. Kılıç, A. ve Öztürk, A., **Güneş Enerjisi**, Kipaş Dağıtımçılık, İstanbul, 1983.
 20. Tiris, M., Tiris, C. ve Ture, I.E., “Diffuse solar radiation correlations: Applications to Turkey and Australia”, **Energy**, Cilt 20, 745-749, 1995.
 21. CIBSE Building Energy Code, Measurement of Energy Consumption and Comparison with Target for Existing Building and Services, 1982.
 22. Mearig, T., Coffee, N. ve Morgan M., **Life Cycle Cost Analysis Handbook**, State of Alaska, Department of Education & Early Development Education Support Services Facilities, 1st ed., 1999.
 23. Yu, J., Yang, C., Tian, L. ve Liao D., “A Study on Optimum Insulation Thicknesses of External Walls in Hot Summer and Cold Winter Zone of China”, **Applied Energy**, Cilt 86, 2520-2529, 2009.
 24. Mahlia, T.M.I. ve Iqbal, A., “Cost Benefits Analysis and Emission Reductions of Optimum Thickness and Air Gaps for Selected Insulation Materials for Building Walls in Maldives”, **Energy**, Cilt 35, 2242-2250, 2010.
 25. Mahlia, T.M.I., Taufiq, B.N., Ismail ve Masjuki, H.H., “Correlation Between Thermal Conductivity and The Thickness of Selected Insulation Materials for Building Wall”, **Energy and Buildings**, Cilt 39, 182-187, 2007.
 26. T.C. Başbakanlık Türkiye İstatistik Kurumu, 2010.
 27. T.C. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, 2010.