



Binalarda ekonomik optimizasyon kullanılarak dış duvar ve pencerelere bağlı yakıt tüketimi ve emisyon hesabı

Okan Kon*^{id}

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çağış Kampüsü, Balıkesir, 10145, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Derece-Gün değerleri günlük maksimum ve minimum sıcaklıklar kullanılarak hesaplanmıştır.
- Çeşitli duvar malzemeleri dikkate alınarak optimum duvar malzemesi kalınlığı bulunmuştur.
- Pencereler için optimum cam sayısı tespit edilmiştir.

Makale Bilgileri

Geliş: 03.08.2016

Kabul: 11.09.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406783

Anahtar Kelimeler:

Duvar malzemeleri,
ömür maliyet analizi,
çok katlı cam,
yalıtım,
emisyon

ÖZET

Çalışmada, Türk standardı TS 825'e göre dört farklı iklim bölgesinde yer alan Aydın, Amasya, Eskişehir ve Ardahan şehirlerindeki binalar için dış duvarlar ve pencerelere bağlı ekonomik optimizasyon kullanılarak yakıt tüketimi ve emisyon hesapları yapılmıştır. İlk olarak her şehir için farklı duvar malzemeleri kullanılarak optimum dış duvar kalınlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra ekstrüde polistiren (XPS), ekpande polistiren (EPS), cam yünü ve taş yünü yalıtım malzemeleri kullanılarak dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlıkları bulunmuştur. Son olarak dört farklı şehir için optimum cam sayısı tespit edilmiştir. Hesaplamalar ömür maliyet analizi ve derecede-gün metodu kullanılarak yapılmıştır. Ek olarak bulunan bu optimum değerler için yanma denklemleri kullanılarak emisyon miktarları hesaplanmıştır. Yakıt olarak doğal gaz, kömür ve fuel-oil kullanılmıştır. Sonuçta tüm şehirler için optimum duvar malzemesi kalınlığı, en yüksek delikli tuğla ve en düşük gaz beton malzemede hesaplanmıştır. Optimum yalıtım kalınlığı ise en yüksek cam yünü ve en düşük ekstrüde polistiren yalıtım malzemesi için elde edilmiştir. Yakıt türüne bağlı olarak, sıcak iklim bölgesindeki Aydın için optimum cam sayısı 2-3, soğuk iklimdeki Ardahan için ise optimum cam sayısı 4 olarak önerilmiştir.

Calculation of fuel consumption and emissions in buildings based on external walls and windows using economic optimization

H I G H L I G H T S

- Degree-day values are calculated using the daily maximum and minimum temperatures.
- The optimum wall material thickness is found considering variety of wall materials.
- The optimal number of glasses for the windows is determined.

Article Info

Received: 03.08.2016

Accepted: 11.09.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406783

Keywords:

Wall materials,
life cycle cost analysis,
multi-layered glass,
insulation,
emissions

ABSTRACT

In this study, emissions and fuel consumption calculations are made based on external walls and windows by using economic optimization in the buildings of Aydın, Amasya, Eskişehir and Ardahan located in four different climatic zones according to TS 825. First, the optimal wall thickness of external walls are calculated using different wall materials for each city. Then, the optimum thickness for external walls are found using insulating materials like extruded polystyrene (XPS), expanded polystyrene (EPS), glass wool and rock wool. Finally, the optimal number of glasses is determined for four different cities. Calculations are performed using life cycle cost analysis and degree-day method. Additionally, emission amounts are calculated using combustion equation for optimum values obtained. Natural gas, coal and fuel oil are used as fuel. Consequently, optimum wall material thickness is calculated considering the thickest perforated and the thinnest aerated concrete for all cities. Optimum insulation thickness is also found for the thickest glass wool and the thinnest extruded polystyrene (XPS). Depending on fuel type, the optimal number of glasses is proposed as 2-3 for Aydın existing in warm climate zone and 4 for Ardahan located in cold climate zone.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hızlı nüfus artışı, şehirleşme ve yaşam kalitesinin enerjiye bağlı olarak yükselmesi enerji tüketimini arttırmıştır. Enerji tüketimindeki bu hızlı artış maliyet ve çevre sorunlarını beraberinde getirmiştir. Yüksek enerji kullanımının çevreye olan olumsuz etkileri göz ardı edilmiştir. Ancak son yıllarda fosil yakıt tüketimindeki hızlı artış atmosfere salınan fosil yakıt kaynaklı atık gazların da hızlı artmasına neden olmuştur. Bu ise şehirlerde çevre kirliliği, küresel ölçekte ise iklim değişikliğine sebep olmaktadır [1]. Görevi iç hacimlerin yeterli ölçüde aydınlatılması ve iç ortam ile dış ortam arasındaki görsel bağı sağlamak olan ve bu yüzden de saydam bir eleman olması gereken pencereler yapı kabuğunda ısı kaybının en çok gerçekleştiği yapı bileşenlerindedir. Büyük ısı kayıplarına sebep olan bu yüzeyler güneşli kış günlerinde ışınlama ısı kazancı sağlamalarına karşın, kapalı kış günlerinde kazanç çok az olduğu için dışarıya olan ısı kayıpları nedeniyle toplamda binanın ısı ihtiyacının artmasına neden olurlar [2].

Tipik bir binada ısı kaybı; %40 dış duvarlardan, %30 pencerelerden, %17 kapılardan, %7 çatıdan ve %6 döşemeden meydana gelmektedir. Görüldüğü gibi binalarda toplam ısı kaybının yaklaşık üçte biri pencerelerden meydana gelmektedir. Pencerelerden enerji kaybını azaltmanın bir yolu da iki ya da üç bölümlü pencereler kullanmaktır [3]. Enerji kayıplarını azaltan ısı yalıtımı, tüm dünyada enerji verimliliği kavramına bağlı olarak geliştirilen politikaların en önemli ayağını oluşturmaktadır. Ülkemizde konut ve yapı sektörünün, toplam enerjinin yaklaşık yüzde 30-35'ini tüketmesi ve bu alanda büyük bir tasarruf potansiyeline sahip olması, bu sektöre yönelik ilgiyi artırmıştır [4].

Optimum kalınlık uygulamalarında, malzeme kalınlığını artırılarak, enerji kayıpları azaltılabilir. Ancak kalınlığın hemen hemen hiç ısı kaybı olmayacak şekilde artırılması ne ekonomiktir ne de mümkündür. Sağlanacak enerji tasarrufları için bir denge noktası belirlenmelidir. Denge noktası, en iyi kalınlıktır. Belirli bir ekonomik ömür için malzeme ve işletim giderlerinin en az olmasını sağlayan kalınlığa en iyi kalınlık (optimum kalınlık) denilmektedir [5]. Kaynaklı Ö. vd. [4], Şişman, N. [5], Bolattürk A. [6], Çomaklı K. ve Yüksel B. [7], Dombaycı Ö. vd. [8], Ekici B. B. vd. [9], Kaynaklı Ö. vd. [10], Kaynaklı Ö. ve Yamankaradeniz R. [11], Kon O. [12], Kon O. ve Yüksel B. [13], Kurekçi N. [14] yaptıkları çalışmalarda binaların dış duvarları için ısıtma, soğutma ve ısıtma+soğutma dönemi için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu, geri-dönüş periyodu Türkiye'deki farklı şehirleri için hesaplamışlardır. Hesaplamalarda ömür maliyet analizi ve derece-gün metodu kullanılmıştır. Farklı yakıtlar ve yalıtım malzemeleri dikkate alınmıştır. Ek olarak Ulaş A. [1], Çay Y. ve Gürel A. E. [15], Çomaklı K. ve Yüksel B. [16] yaptıkları çalışmalarda yalıtım kalınlığının CO₂ ve SO₂ emisyonlarına etkisi araştırmışlardır. Dombaycı Ö. A. [17], yaptığı çalışmada, Türkiye'nin tüm şehirleri için 21 yıllık günlük maksimum ve

minimum sıcaklık değerleri kullanarak çeşitli temel sıcaklıklar için ısıtma ve soğutma derece-gün değerleri hesaplanmıştır. Karabay H. ve Arıcı M. [18] yaptıkları çalışmada, derece-gün metodu ve termoekonomik optimizasyon kullanarak, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerindeki İskenderun, İzmir, Kocaeli, Sinop, Malatya, Ankara, Van ve Ardahan şehirleri için çok camlı pencerelerin optimum cam sayısını hesaplamışlardır. Sonuçlar göstermiştir ki, yakıt tipi ve iklim bölgesine dayanarak optimum cam sayısı 2 ile 4 arasında değişmektedir. Çok camlı pencere kullanılması ile soğuk iklimlerde ısıtma dönemi boyunca 1200 \$/m² kadar enerji tasarrufu sağlanabilir. Yakıt olarak doğal gaz, kömür, fuel-oil ve LPG kullanılmıştır. Arıcı M. ve Karabay H. [3] yaptığı çalışmada, derece-gün metodu kullanılarak çift camlı pencerelerin optimum hava tabakası kalınlığı belirlenmiştir. Hesaplamalar Türkiye'nin farklı iklim bölgelerindeki İskenderun, Kocaeli, Ankara ve Ardahan şehirleri için yapılmıştır. Yakıt olarak doğal gaz, kömür, fuel-oil, elektrik ve LPG kullanılmıştır. Optimum hava tabakası 18, 20 ve 22 °C temel sıcaklık için elde edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, optimum hava tabakası kalınlığı iklim bölgesi, yakıt tipi ve temel sıcaklığa dayanarak 12 ve 15 mm arasında değişmektedir. İyi optimize edilmiş camlı pencere için %60 kadar enerji tasarrufu yapılabilmektedir. Uygunoğlu T. ve Keçebaş A.; [19] yaptığı çalışmada, enerji tüketim ve duvar malzemesi maliyetlerini içeren toplam maliyeti minimum yapan geri dönüş periyodu, tasarruf ve optimum kalınlığı tahmin etmek için ekonomik analiz yapılmıştır. LCC (life cycle cost - ömür maliyet) analizi Afyonkarahisar'daki bir binanın dış duvarları için hesaplanmıştır. Binanın yıllık enerji gereksiniminin değişimi birim alan başına çeşitli duvar tipleri için araştırılmıştır. Duvar ürünleri tek, iki, üç ve dört oyuklu içi boş bims, delikli tuğla ve gaz beton elemanlarından oluşmaktadır. Hesaplamalarda derece-gün metodu kullanılmıştır. Yakıt olarak fuel-oil, doğal gaz, kömür ve elektrik düşünülmüştür.

Çalışmada amaç, TS 825'e göre dört farklı iklim bölgesindeki Aydın, Amasya, Eskişehir ve Ardahan şehirlerindeki binalar için dış duvarlar ve pencerelere bağlı ekonomik optimizasyon kullanılarak yakıt tüketimi ve emisyon hesaplarını yapmaktır. Bu şehirler seçilirken derece-gün değerleri her iklim bölgesi için en yüksek olanlar dikkate alınmıştır. Derece gün hesabında 21 yıllık dış ortam maksimum ve minimum hava sıcaklıkları kullanılmıştır. Çalışmada her şehir için dört sıralı blok bims, delikli tuğla ve gaz beton duvar malzemeleri kullanılarak optimum dış duvar kalınlığı hesaplanmıştır. Daha sonra ekstrüde polistiren (XPS), ekpande polistiren (EPS), cam yünü ve taş yünü yalıtım malzemeleri ile dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlığı bulunmuştur. Son olarak dört farklı şehir için iki, üç ve dört camlı pencereler için optimum cam sayısı tespit edilmiştir. Hesaplamalar ömür maliyet analizi ve derecede-gün metodu kullanılarak yapılmıştır. Ek olarak bulunan bu optimum değerler için doğal gaz, kömür ve fuel-oil yakıtlara bağlı yanma denklemleri kullanılarak emisyon miktarları hesaplanmıştır.

2. TEORİK METOD (THEORETICAL METHOD)

Literatürde optimum duvar kalınlığı, optimum yalıtım kalınlığı ve optimum cam sayısı hesabı ile ilgili ayrı ayrı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada ise bunların tümü birlikte ele alınmış ve ek olarak bu optimum değerlere bağlı emisyon hesapları yapılmıştır. Literatürde derece-gün değerleri hesaplanırken günlük ortalama sıcaklıklar kullanılmaktadır, bu çalışmada ise günlük maksimum ve minimum dış ortam sıcaklıkları kullanılmıştır. Bu çalışmada, hesaplamalar Türkiye'nin dört iklim bölgesi için en yüksek ısıtma derece-gün değerleri sahip dört farklı şehir seçilerek yapıldığından diğer şehirlere örnek olacaktır.

2.1. Derece-Gün Hesabı (Degree-Day Calculation)

TS 825'e göre farklı iklim bölgelerinde bulunan Aydın, Amasya, Eskişehir ve Ardahan şehirleri için derece gün hesabında 21 yıllık dış ortam maksimum ve minimum hava sıcaklıkları kullanılmıştır. Bu şehirler seçilirken derece-gün değerleri her iklim bölgesi için en yüksek olanlar dikkate alınmıştır. Günlük maksimum (t_{max}), günlük minimum (t_{min}) ve temel sıcaklık (t_b) kullanılarak aşağıda verilen hesaplama yöntemine göre ısıtma derece-gün değerleri tespit edilmiştir. Eş. 1 ile Eş. 5 arasında verilmiştir. 19,5°C temel sıcaklık için ısıtma derece-gün değeri bulunmuştur [17]. Isıtma derece-gün değeri;

$$\text{Eğer } t_{max} > t_b, t_{min} < t_b \text{ ve } (t_{max} - t_b) < (t_b - t_{min}) \text{ ise} \\ \text{HDD}_{gün} = 0,5(t_b - t_{min}) - 0,25(t_{max} - t_b) \quad (1)$$

$$\text{Eğer } t_{max} > t_b, t_{min} < t_b \text{ ve } (t_{max} - t_b) > (t_b - t_{min}) \text{ ise} \\ \text{HDD}_{gün} = 0,5(t_b - t_{min}) - 0,25(t_{max} - t_b) \quad (2)$$

$$\text{Eğer } t_{max} < t_b, t_{min} < t_b \text{ ise } \text{HDD}_{gün} = t_b - 0,5(t_b + t_{min}) \quad (3)$$

$$\text{HDD}_{yıl} = \sum_{günler} \text{HDD}_{gün} \quad (4)$$

$$\text{HDD} = \frac{\sum_{21 \text{ yıl}} \text{HDD}_{yıl}}{21} \quad (5)$$

2.2. Optimum Dış Duvar Malzemesi Kalınlığı ve Yakıt Tüketimi Hesabı

(Optimum Exterior Wall Material Thickness and Fuel Consumption Calculation)

Duvar ısı geçiş katsayısı [19], Eş. 6'daki gibidir.

$$U = \frac{1}{R_w} \quad (6)$$

Burada, R_w duvarın bütün tabakalarının toplam ısı direncidir. Duvar olmayan malzeme için ısı direnci, Eş. 7'deki gibidir.

$$R_{un-w} = R_i + R_{ip} + R_{op} + R_0 \quad (7)$$

Burada R_i ve R_0 iç ile dış hava film ısı direncidir. Duvar malzemesinin ısı direnci, Eş. 8'deki gibidir.

$$R_w = R_i + R_{ip} + R_{wm} + R_{op} + R_0 \quad (8)$$

Burada, R_{wm} duvar malzemesinin ısı direncidir. R_{ip} ve R_{op} iç ve dış sıva ısı dirençleridir. Duvar olmayan ve duvar malzemesi genel ısı geçiş arasındaki fark; Eş. 9'daki gibidir.

$$\Delta U = U_{un-wm} - U_{wm} = \frac{1}{R_{un-w}} - \frac{1}{R_{un-w} + \left(\frac{x}{k}\right)_{wm}} \quad (9)$$

Burada, x duvar malzemesi kalınlığı ve k ise ısı iletim katsayısıdır, Duvar malzemesinin toplam fiyatı [19]; Eş. 10'daki gibidir.

$$C_{wm} = x \cdot C_v \quad (10)$$

Burada, C_v birim hacim için duvar malzemesi fiyatıdır. Toplam yakıt maliyeti; Eş. 11'deki gibidir.

$$C_H = \frac{86,400 \text{HDD} C_f}{(R_{un-w} + \left(\frac{x}{k}\right)_{wm}) H_u \eta_{H,s}} \quad (11)$$

Burada, C_f yakıt fiyatı ve H_u alt ısı değer, $\eta_{H,s}$ ısıtma sistemi verimidir. Toplam ısıtma maliyeti ise; Eş. 12'deki gibidir.

$$C_{T,H} = \frac{86,400 \text{HDD} C_f \text{PWF}}{(R_{un-w} + \left(\frac{x}{k}\right)_{wm}) H_u \eta_{H,s}} + C_{wm} \quad (12)$$

Toplam ısıtma maliyetini minimum yapan değer optimum duvar malzemesi kalınlığını verir. Optimum duvar malzemesi kalınlığı, Eş. 6'dan Eş. 11'ye kadar olan eşitlikler sonucu elde edilen toplam ısıtma maliyetinin kalınlığa göre türevi alınıp Eş. 12'nin sifıra eşitlenmesiyle Eş. 13'de verilen optimum duvar malzemesi kalınlığı eşitliği bulunur. Eş. 14'te ise duvar kalınlığına bağlı yıllık ısıtma yakıt miktarı verilmiştir [19].

$$x_{opt_{wm}} = 293,94 \left(\frac{\text{HDD} C_f \text{PWF} k_{wm}}{H_u C_v \eta_{H,s}} \right)^{1/2} - k_{wm} R_w \quad (13)$$

yıllık tüketilen ısıtma yakıt miktarı,

$$M_f = \frac{86,400 \text{HDD}}{(R_{un-w} + \left(\frac{x}{k}\right)_{wm}) H_u \eta_{H,s}} \quad (14)$$

2.3. Optimum Yalıtım Malzemesi Kalınlığı ve Yakıt Tüketimi Hesabı

(Optimum Thickness Insulation Material and Fuel Consumption Calculation)

Duvar için toplam ısı geçiş katsayısı [4, 6],

$$U = \frac{1}{(R_i + R_{w,a} + \left(\frac{y}{k}\right)_{ins} + R_o)} \quad (15)$$

Eş. 15 ile verilirken, yalıtımsız duvar için toplam ısı direnci $R_{t,w}$ 'ya göre duvarın toplam ısı geçiş katsayısı ise, Eş. 16'daki gibidir [7, 8].

$$U = \frac{1}{(R_{t,w} + \left(\frac{y}{k}\right)_{ins})} \quad (16)$$

Burada R_i ile R_o iç ve dış hava film ısı dirençleridir, y , yalıtım kalınlığı; k yalıtım malzemesi ısı iletim katsayısıdır.

Böylece (y/k) yalıtım tabakası ısı direncini gösterir. Bu değerlere bağlı olarak yıllık tüketilen ısıtma yakıt miktarı,

$$M_F = \frac{86,400 \cdot HDD}{\left(R_{t,w} + \left(\frac{y}{k}\right)_{ins}\right) H_u \eta_{H,s}} \quad (17)$$

Eş. 17 ile bulunur [9, 10]. Yıllık yakıt miktarı, yakıt fiyatı (C_f) ile çarpılması ile yakıt maliyeti hesaplanabilir. Isıtma yakıt maliyeti, Eş. 18'deki gibidir. [11, 12].

$$C_H = \frac{86,400 \cdot HDD \cdot C_f}{\left(R_{t,w} + \left(\frac{y}{k}\right)_{ins}\right) H_u \eta_{H,s}} \quad (18)$$

Yalıtım maliyeti ise, Eş. 19'daki gibi olurken [13, 14], toplam ısıtma maliyeti Eş. 20 ile bulunur [15, 16].

$$C_{t,ins} = C_{ins} \cdot y_{ins} \quad (19)$$

$$C_{T,H} = C_{H,s} \cdot PWF + C_{ins} \cdot y_{ins} = \frac{86,400 \cdot HDD \cdot C_f \cdot PWF}{\left(R_{t,w} + \left(\frac{y}{k}\right)_{ins}\right) H_u \eta_{H,s}} + C_{ins} \cdot y_{ins} \quad (20)$$

Optimum yalıtım kalınlığı hesaplanırken ömür maliyet analizi (Life Cycle Cost Analysis) yapılmaktadır. Toplam ısıtma maliyeti N yıllık ömür için bugünkü değer faktörü (PWF-Present Worth Factor) ile değerlendirilir [8, 13]. Bugünkü değer faktörü, Eş. 21 ile Eş. 23 olduğu gibi hesaplanır [8, 20].

Eğer $i > g$ ise gerçek faiz oranı,

$$r = \frac{i-g}{1+g} \quad (21)$$

eğer $i < g$ ise;

$$r = \frac{g-i}{1+i} \quad (22)$$

$$O \text{ zaman } PWF = \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \text{ olur.} \quad (23)$$

Eş. 15'den Eş. 19 kadar olan eşitliklerden elde edilen Eş. 20'nin yalıtım kalınlığına göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse [4, 8], yalıtım maliyeti ile yakıt maliyetinin en uygun olduğu noktadaki kalınlık olan, Eş. 24'te verilen optimum yalıtım kalınlığı [11, 12],

$$y_{opt,ins} = 293,94 \left(\frac{HDD \cdot C_{f,ins} \cdot PWF}{H_u \cdot C_{ins} \cdot \eta_{H,s}} \right)^{1/2} - k_{ins} R_{t,w} \quad (24)$$

formülleri ile elde edilir [13]. Burada, H_u yakıtın alt ısı değerleri, C_f yakıtın fiyatı, C_{ins} yalıtım malzemesinin fiyatı, k , yalıtım malzemesi ısı iletim katsayısı, $\eta_{H,s}$ ise ısıtma sisteminin verimini gösterir.

2.4. Optimum Cam Sayısı ve Yakıt Tüketimi Hesabı (Optimum Glass Number and Fuel Consumption Calculation)

Çok camlı pencere için genel ısı geçiş katsayısı Eş. 25 ile verilmiştir [18].

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i A} + \frac{c}{k_{cam} A} + \frac{1}{(U_{2-3,con} + U_{2-3,rad})} + \frac{c}{k_{cam} A} + \frac{1}{h_o A}} \quad (25)$$

Burada, dış camların iç yüzeyleri arasındaki $U_{2-3,con}$ iletim ve $U_{2-3,rad}$ radyasyon ısı geçiş katsayıları Eş. 26 ve Eş. 27'de verildiği gibidir.

$$U_{2-3,con} = \frac{1}{\frac{L}{A k_{hava}} + (n-2) \left(\frac{c}{A k_{cam}} + \frac{L}{A k_{hava}} \right)} \quad (26)$$

$$U_{2-3,rad} = \frac{1}{\frac{2(1-\epsilon)}{(A\epsilon)} + \frac{2(n-1)(1-\epsilon)}{(A\epsilon)} + \frac{(n-1)}{(F_{ij}A)}} \cdot \frac{\sigma(T_2^4 - T_3^4)}{(T_2 - T_3)} \quad (27)$$

Burada, n cam sayısı, L hava (12 mm) tabakası kalınlığı, A yüzey alanı, ϵ yayma katsayısı (emstivity $\epsilon=0,84$), σ Stefan-Boltzman sabiti, h_o ($=34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) ve h_i ($=8,29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) iç ve dış film hava ısı dirençleri, k_{cam} camın ısı iletim katsayısı ($k_{cam}=0,92 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), $(1-\epsilon)/(\epsilon A)$ ve $1/F_{ij}$ yüzey ile alan radyasyon dirençleridir. Fij görünüm faktörü 1 alınmıştır. Cam kalınlığı c, 4 mm kabul edilmiştir. Cam kalınlığı ve yayma katsayısı (emstivity) değeri literatürde en çok kullanılan değerler alınmıştır. Ortalama pencere içindeki ikinci ve üçüncü cam tabakası arasındaki sıcaklık 285 K ($(T_2+T_3)/2$) iken fark ise (T_2-T_3) 10 K alınmıştır [18].

Çok camlı pencere için alan başına yıllık yakıt tüketimi Eş. 28'de verildiği gibidir.

$$M_F = \frac{86,400 \cdot HDD}{\eta_{H,s} H_u} \quad (28)$$

Burada, H_u alt ısı değer ve $\eta_{H,s}$ ısıtma sistemi verimidir. Yıllık yakıt maliyeti, Eş. 29'daki gibidir.

$$C_H = \frac{86,400 \cdot HDD \cdot C_f}{\eta_{H,s} H_u} \quad (29)$$

Cam sayısına göre pencere maliyeti [18];

$$C_p = 19,25n + 49 \quad (30)$$

burada n cam sayısıdır. Eş. 29 ve Eş. 30'un toplamı sonucu toplam ısıtma maliyeti eşitliği Eş. 29 ve Eş. 30'daki gibidir.

$$C_{T,H} = C_H \cdot PWF + C_p \quad (31)$$

$$C_{T,H} = \frac{86,400 \cdot HDD \cdot C_f \cdot PWF}{\eta_{H,s} H_u} + (19,25n + 49) \quad (32)$$

2.5. Hesaplamalarda Kullanılan Değerler (The Values Used in the Calculations)

Tablo 1'de duvar malzemelerinin birim fiyatı ve ısı iletkenlik değerleri verilmiştir. Seçilen bu duvar malzemeleri literatürde en çok kullanılan duvar malzemeleridir. Tablo 2'de 2016 yılı faiz ve enflasyon değerlerini içeren mali değerler bulunmaktadır. Tablo 3'de ısıtma için gününüzde Türkiye de en çok kullanılan yakıtlar ve özellikleri verilmiştir. Tablo 4'de farklı iklim bölgelerindeki şehirlerin ısıtma derece-günleri bulunmaktadır. Bu şehirler kendi iklim bölgesindeki ısıtma derece-gün değerleri en yüksek olanlardır. Tablo 5'de literatürde en çok kullanılan yalıtım

malzemeleri ve özellikleri verilmiştir. Tablo 6’de yakıtların kimyasal formülleri bulunmaktadır.

Tablo 1. Duvar Malzemelerinin Birim Fiyatı ve Isıl İletkenlik Değerleri [19]
(Unit Price of Wall Materials and Thermal Conductivity Values)

| Duvar Malzemesi | Boyut G×U×Y | Isıl İletim Katsayısı (W/m,K) | Birim Fiyat (\$/m ³) |
|-----------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Dört Sıralı Blok bims | 250×390×180 | 0,150 | 69,90 |
| Delikli Tuğla | 135×190×190 | 0,450 | 61,62 |
| Gaz Beton | 150×250×600 | 0,150 | 190,65 |

Tablo 2. Mali Değerler [14] (Financial Values)

| Mali Değerler | Değer |
|----------------------|--------|
| Faiz Oranı, (i) | %8,25 |
| Enflasyon Oranı, (g) | %7,91 |
| Ömür, N | 10 yıl |
| PWF | 9,83 |

Tablo 3. Isıtma için Kullanılan Yakıtlar ve Özellikleri [14]
(Fuels Used For Heating and their Features)

| Yakıt | Fiyat | Alt Isıl Değer H _u | Verim η _{H,s} (%) |
|-----------|--------------------------|---|----------------------------|
| Doğal Gaz | 0,3850 \$/m ³ | 34,485×10 ⁶ J/m ³ | 93 |
| Kömür | 0,2730 \$/kg | 25,080×10 ⁶ J/kg | 65 |
| Fuel-oil | 0,7660 \$/kg | 40,546×10 ⁶ J/kg | 80 |

Tablo 4. Farklı İklim Bölgelerindeki Şehirlerin Isıtma Derece-Günleri [17, 21]
(Heating Degree-Days of Cities in Different Climate Zone)

| Şehir | İklim Bölgesi | Derece-Gün |
|-----------|---------------|------------|
| Aydın | 1 | 1572 |
| Amasya | 2 | 2576 |
| Eskişehir | 3 | 3239 |
| Ardahan | 4 | 5059 |

Tablo 5. Yalıtım Malzemeleri ve Özellikleri [14]
(Insulation Materials and Their Properties)

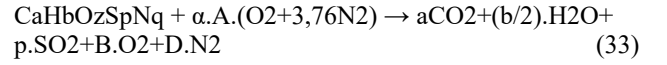
| Yalıtım Malzemeleri | k (W/m.K) | Cins (\$/m ³) |
|---------------------------|-----------|---------------------------|
| Ekstrüde Polistiren (XPS) | 0,031 | 180 |
| Ekspande Polistiren (EPS) | 0,039 | 120 |
| Cam Yünü | 0,040 | 75 |
| Taş yünü | 0,040 | 80 |

Tablo 6. Yakıtların Kimyasal Formülleri [22, 23]
(Chemical Formulas of Fuels)

| Yakıt | Kimyasal Formül |
|-----------|--|
| Kömür | C _{7,078} H _{5,149} O _{0,517} S _{0,01} N _{0,086} |
| Doğal Gaz | C _{1,05} H ₄ O _{0,034} N _{0,022} |
| Fuel-oil | C _{7,3125} H _{10,407} O _{0,04} S _{0,026} N _{0,02} |

2.6. Yanma Denklemleri (Combustion Equations)

Yakıtın yanma denkleminin genel kimyasal formülü Eş. 33’de verildiği gibi dir [16].



A, B ve D için oksijen denkleştirilirse Eş. 34, Eş. 35 ve Eş. 36 verildiği gibi olur.

$$A=(a+\frac{b}{4}+p-\frac{z}{2}) \quad (34)$$

$$B=(\alpha-1)(a+\frac{b}{4}+p-\frac{z}{2}) \quad (35)$$

$$D=3,76.\alpha.\left(a+\frac{b}{4}+p-\frac{z}{2}\right)+\frac{q}{2} \quad (36)$$

Burada CO ve NO_x emisyonları imal edilmiştir. 1 kg yakıtın yanmasıyla üretilen yanma emisyon oranları Eş. 37 ve Eş. 38’de verilmiştir.

$$M_{\text{CO}_2}=\frac{a.\text{CO}_2}{M} \text{ (kg CO}_2 \text{ / kg Yakıt)} \quad (37)$$

$$M_{\text{SO}_2}=\frac{p.\text{SO}_2}{M} \text{ (kg SO / kg Yakıt)} \quad (38)$$

Yukarıdaki denklemlerin sağ tarafı yakılan toplam yakıtın miktarı M_f yazılarak türetilirse, CO₂ ve SO₂ toplam emisyonları Eş. 39 ve Eş. 40’taki gibi bulunur.

$$M_{\text{CO}_2}=\frac{44.a}{M} M_f \text{ (kg/m}^2 \text{ yıl)} \quad (39)$$

$$M_{\text{SO}_2}=\frac{64.p}{M} M_f \text{ (kg/m}^2 \text{ yıl)} \quad (40)$$

M yakıtın mol ağırlığıdır ve Eş. 41’deki gibi bulunur [16], Burada a, b, z, p, q yakıtların kimyasal formülündeki elementlerin bileşimleridir.

$$M=12a+b+16z+32p+14q \text{ (kg/kmol)} \quad (41)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Tablo 7’de optimum duvar malzemesi kalınlığı verilmiştir. Tablo 8’de optimum duvar malzemesi kalınlığına bağlı yakıt tüketimi bulunmaktadır. Tablo 9’da optimum duvar malzemesi kalınlığında yakıt tüketimine bağlı emisyonlar verilmiştir.

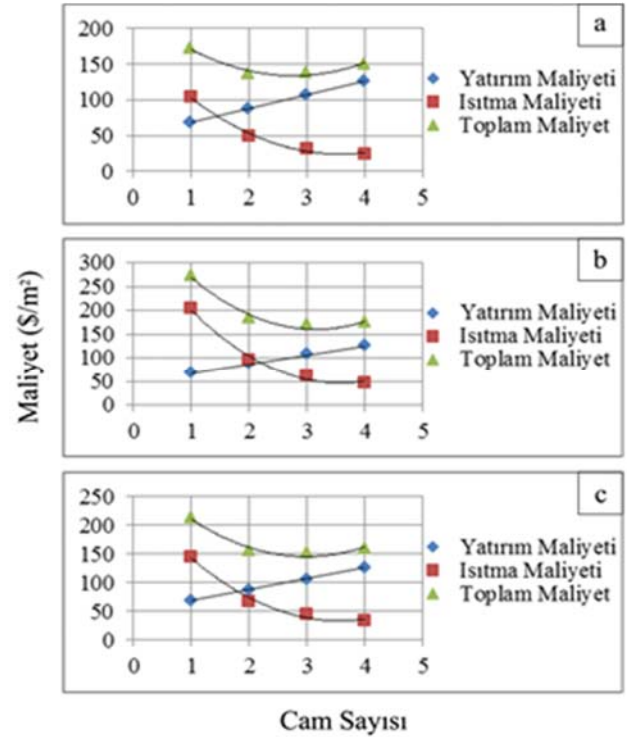
Tablo 10'da farklı duvar ve yalıtım malzemelerine bağlı optimum yalıtım kalınlığı bulunmaktadır. Tablo 11'de farklı duvar ve yalıtım malzemeleri için optimum yalıtım kalınlığına bağlı yakıt tüketimi verilmiştir. Tablo 12'de dört sıralı blok bims ve farklı yalıtım malzemeleri için optimum yalıtım kalınlığında yakıt tüketimine bağlı emisyonları bulunmaktadır. Tablo 13'de delikli tuğla ve farklı yalıtım malzemeleri için optimum yalıtım kalınlığında yakıt tüketimine bağlı emisyonlar verilmiştir. Tablo 14'de gaz beton ve farklı yalıtım malzemeleri için optimum yalıtım kalınlığında yakıt tüketimine bağlı yakıt tüketimine bağlı emisyonlar bulunmaktadır. Tablo 15'de optimum cam sayısı verilmiştir. Tablo 16'da optimum cam sayısında yakıt tüketimi bulunmaktadır. Tablo 17'de optimum cam sayısında yakıt tüketimine bağlı emisyonlar verilmiştir. Şekil 1'de Aydın şehri için, Şekil 2'de Amasya şehri için, Şekil 3'de Eskişehir şehri için, Şekil 4'de Ardahan şehri için a) doğal gaz tüketimine b) fuel-oil tüketimine c) kömür tüketimine bağlı optimum cam sayısı maliyet eğrisi verilmiştir.

Tablo 7. Optimum Duvar Malzemesi Kalınlığı (m)
(Optimum Wall Material Thickness (m))

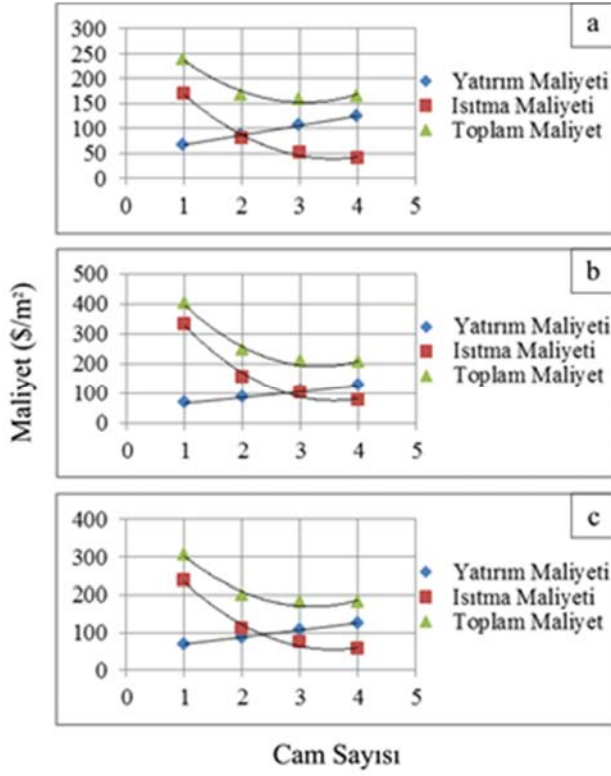
| Yakıt | Dört Sıralı Blok bims | Delikli Tuğla | Gaz Beton |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------|
| Aydın | | | |
| Doğal Gaz | 0,154 | 0,248 | 0,081 |
| Kömür | 0,188 | 0,310 | 0,101 |
| Fuel-oil | 0,229 | 0,386 | 0,126 |
| Amasya | | | |
| Doğal Gaz | 0,206 | 0,344 | 0,112 |
| Kömür | 0,249 | 0,423 | 0,138 |
| Fuel-oil | 0,302 | 0,520 | 0,170 |
| Eskişehir | | | |
| Doğal Gaz | 0,235 | 0,397 | 0,130 |
| Kömür | 0,283 | 0,486 | 0,159 |
| Fuel-oil | 0,342 | 0,595 | 0,195 |
| Ardahan | | | |
| Doğal Gaz | 0,301 | 0,520 | 0,170 |
| Kömür | 0,362 | 0,631 | 0,207 |
| Fuel-oil | 0,435 | 0,767 | 0,251 |

Tablo 8. Optimum Duvar Malzemesi Kalınlığına Bağlı Yakıt Tüketimi (kömür ve fuel-oil için kg/m², doğal gaz için m³/m²)
(Fuel Consumption Related to Optimum Wall Material Thickness (kg/m² for Coal and Fuel oil, m³/m² for Natural gas))

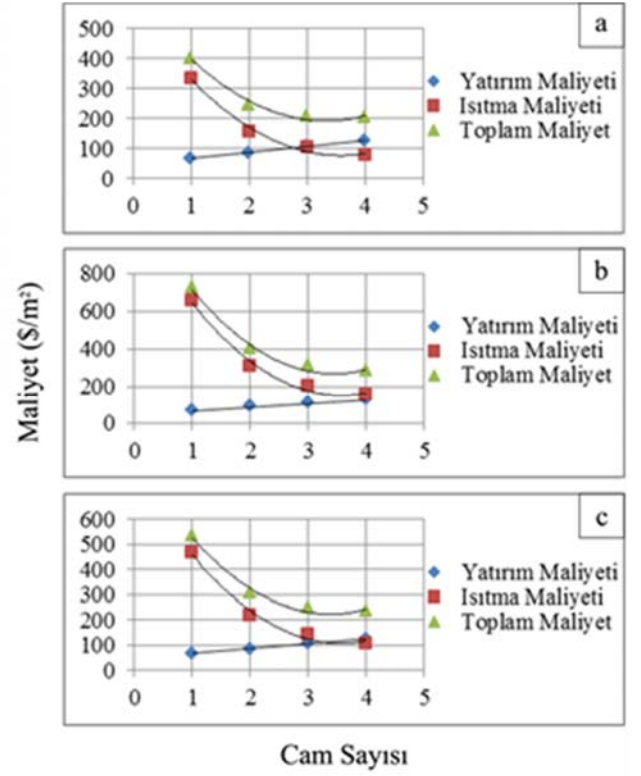
| Yakıt | Dört Sıralı Blok bims | Delikli Tuğla | Gaz Beton |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------|
| Aydın | | | |
| Doğal Gaz | 3,425 | 5,570 | 5,657 |
| Kömür | 5,705 | 9,278 | 9,423 |
| Fuel-oil | 2,415 | 3,927 | 3,988 |
| Amasya | | | |
| Doğal Gaz | 4,385 | 7,131 | 7,242 |
| Kömür | 7,304 | 11,877 | 12,062 |
| Fuel-oil | 3,091 | 5,027 | 5,105 |
| Eskişehir | | | |
| Doğal Gaz | 4,917 | 7,996 | 8,120 |
| Kömür | 8,190 | 13,318 | 13,526 |
| Fuel-oil | 3,466 | 5,637 | 5,724 |
| Ardahan | | | |
| Doğal Gaz | 6,145 | 9,993 | 10,153 |
| Kömür | 10,235 | 16,645 | 16,904 |
| Fuel-oil | 4,331 | 7,044 | 7,154 |



Şekil 1. Aydın Şehri için a) Doğal Gaz tüketimine b) Fuel-oil tüketimine c) Kömür tüketimine bağlı Optimum Cam Sayısı Maliyet Eğrisi
(Cost Curve of Optimal Number of Glass for Aydın Province Based On a) Natural Gas Consumption b) Fuel-Oil Consumption c) Coal Consumption)



Şekil 2. Amasya Şehri için a) Doğal Gaz tüketimine b) Fuel-oil tüketimine c) Kömür tüketimine bağlı Optimum Cam Sayısı Maliyet Eğrisi (Cost Curve of Optimal Number of Glass for Amasya Province Based On a) Natural Gas Consumption b) Fuel-Oil Consumption c) Coal Consumption)



Şekil 3. Eskişehir Şehri için a) Doğal Gaz tüketimine b) Fuel-oil tüketimine c) Kömür tüketimine bağlı Optimum Cam Sayısı Maliyet Eğrisi (Cost Curve of Optimal Number of Glass for Eskişehir Province Based On a) Natural Gas Consumption b) Fuel-Oil Consumption c) Coal Consumption)

Tablo 9. Optimum Duvar Malzemesi Kalınlığında Yakıt Tüketimine Bağlı Emisyonlar (kg/m^2)
(Emissions Due To Fuel Consumption at Optimum Wall Thickness Material (kg/m^2))

| Yakıt | Dört Sıralı Blok bims | | Delikli Tuğla | | Gaz Beton | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | CO ₂ Emisyonu | SO ₂ Emisyonu | CO ₂ Emisyonu | SO ₂ Emisyonu | CO ₂ Emisyonu | SO ₂ Emisyonu |
| Aydın | | | | | | |
| Doğal Gaz | 6,891 | -- | 11,206 | -- | 11,380 | -- |
| Kömür | 17,790 | 0,037 | 28,930 | 0,060 | 29,380 | 0,060 |
| Fuel-oil | 7,775 | 0,040 | 12,644 | 0,066 | 12,841 | 0,067 |
| Amasya | | | | | | |
| Doğal Gaz | 8,821 | -- | 14,345 | -- | 14,568 | -- |
| Kömür | 22,772 | 0,047 | 37,033 | 0,076 | 37,610 | 0,077 |
| Fuel-oil | 9,953 | 0,052 | 16,186 | 0,084 | 16,438 | 0,085 |
| Eskişehir | | | | | | |
| Doğal Gaz | 9,891 | -- | 16,085 | -- | 16,335 | -- |
| Kömür | 25,535 | 0,052 | 41,526 | 0,085 | 42,173 | 0,087 |
| Fuel-oil | 11,161 | 0,058 | 18,150 | 0,094 | 18,432 | 0,096 |
| Ardahan | | | | | | |
| Doğal Gaz | 12,361 | -- | 20,103 | -- | 20,424 | -- |
| Kömür | 31,913 | 0,066 | 51,898 | 0,107 | 52,705 | 0,108 |
| Fuel-oil | 13,948 | 0,072 | 22,683 | 0,118 | 23,035 | 0,120 |

Tablo 10. Farklı Duvar ve Yalıtım Malzemelerine bağlı Optimum Yalıtım Kalınlığı (m)
(Optimum Insulation Thickness On Different Walls and Insulation Materials (m))

| Yakıt | Dört Sıralı Blok bims | | | | Delikli Tuğla | | | | Gaz Beton | | | |
|------------------|-----------------------|-------|----------|----------|---------------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|
| | XPS | EPS | Cam Yünü | Taş Yünü | XPS | EPS | Cam Yünü | Taş Yünü | XPS | EPS | Cam Yünü | Taş Yünü |
| Aydın | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 0,014 | 0,024 | 0,043 | 0,040 | 0,029 | 0,043 | 0,062 | 0,059 | 0,029 | 0,043 | 0,062 | 0,060 |
| Kömür | 0,017 | 0,028 | 0,051 | 0,047 | 0,034 | 0,050 | 0,073 | 0,070 | 0,035 | 0,051 | 0,074 | 0,070 |
| Fuel-oil | 0,020 | 0,034 | 0,060 | 0,056 | 0,041 | 0,060 | 0,087 | 0,083 | 0,041 | 0,060 | 0,088 | 0,084 |
| Amasya | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 0,018 | 0,031 | 0,055 | 0,051 | 0,037 | 0,054 | 0,079 | 0,076 | 0,038 | 0,055 | 0,080 | 0,076 |
| Kömür | 0,022 | 0,036 | 0,065 | 0,061 | 0,044 | 0,064 | 0,094 | 0,089 | 0,044 | 0,065 | 0,095 | 0,090 |
| Fuel-oil | 0,026 | 0,043 | 0,077 | 0,072 | 0,052 | 0,076 | 0,111 | 0,106 | 0,053 | 0,077 | 0,112 | 0,107 |
| Eskişehir | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 0,020 | 0,034 | 0,062 | 0,058 | 0,042 | 0,061 | 0,089 | 0,085 | 0,042 | 0,062 | 0,090 | 0,085 |
| Kömür | 0,024 | 0,041 | 0,073 | 0,068 | 0,049 | 0,072 | 0,105 | 0,100 | 0,050 | 0,073 | 0,106 | 0,101 |
| Fuel-oil | 0,029 | 0,048 | 0,087 | 0,081 | 0,058 | 0,086 | 0,125 | 0,119 | 0,059 | 0,087 | 0,126 | 0,120 |
| Ardahan | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 0,026 | 0,043 | 0,077 | 0,072 | 0,052 | 0,076 | 0,111 | 0,106 | 0,053 | 0,077 | 0,112 | 0,107 |
| Kömür | 0,030 | 0,051 | 0,091 | 0,085 | 0,061 | 0,090 | 0,131 | 0,125 | 0,062 | 0,091 | 0,132 | 0,126 |
| Fuel-oil | 0,036 | 0,060 | 0,108 | 0,101 | 0,073 | 0,107 | 0,156 | 0,149 | 0,074 | 0,108 | 0,157 | 0,150 |

Tablo 11. Farklı Duvar ve Yalıtım Malzemeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığına bağlı Yakıt Tüketimi (kömür ve fuel-oil için kg/m², doğal gaz için m³/m²)(Fuel Consumption Depending On The Optimal Insulation Thickness For Different Wall and Insulation Materials (kg/m² for Coal and Fuel oil, m³/m² for Natural gas))

| Yakıt | Dört Sıralı Blok bims | | | | Delikli Tuğla | | | | Gaz Beton | | | |
|------------------|-----------------------|-------|----------|----------|---------------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|
| | XPS | EPS | Cam Yünü | Taş Yünü | XPS | EPS | Cam Yünü | Taş Yünü | XPS | EPS | Cam Yünü | Taş Yünü |
| Aydın | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 2,499 | 2,289 | 1,832 | 1,892 | 2,499 | 2,289 | 1,832 | 1,892 | 2,499 | 2,289 | 1,832 | 1,892 |
| Kömür | 4,162 | 3,812 | 3,052 | 3,152 | 4,162 | 3,812 | 3,052 | 3,152 | 4,162 | 3,812 | 3,052 | 3,152 |
| Fuel-oil | 1,762 | 1,613 | 1,292 | 1,334 | 1,762 | 1,613 | 1,292 | 1,334 | 1,762 | 1,613 | 1,292 | 1,334 |
| Amasya | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 3,199 | 2,930 | 2,345 | 2,422 | 3,199 | 2,930 | 2,345 | 2,422 | 3,199 | 2,930 | 2,345 | 2,422 |
| Kömür | 5,329 | 4,879 | 3,907 | 4,035 | 5,329 | 4,879 | 3,907 | 4,035 | 5,329 | 4,879 | 3,907 | 4,035 |
| Fuel-oil | 2,255 | 2,065 | 1,654 | 1,708 | 2,255 | 2,065 | 1,654 | 1,708 | 2,255 | 2,065 | 1,654 | 1,708 |
| Eskişehir | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 3,587 | 3,284 | 2,630 | 2,716 | 3,587 | 3,285 | 2,630 | 2,716 | 3,587 | 3,285 | 2,630 | 2,716 |
| Kömür | 5,975 | 5,472 | 4,381 | 4,525 | 5,975 | 5,472 | 4,381 | 4,525 | 5,974 | 5,472 | 4,381 | 4,525 |
| Fuel-oil | 2,529 | 2,316 | 1,854 | 1,915 | 2,529 | 2,316 | 1,854 | 1,915 | 2,529 | 2,316 | 1,854 | 1,915 |
| Ardahan | | | | | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 4,483 | 4,105 | 3,287 | 3,395 | 4,483 | 4,105 | 3,287 | 3,395 | 4,483 | 4,105 | 3,287 | 3,395 |
| Kömür | 7,467 | 6,838 | 5,475 | 5,654 | 7,467 | 6,838 | 5,475 | 5,654 | 7,467 | 6,838 | 5,475 | 5,654 |
| Fuel-oil | 3,160 | 2,894 | 2,317 | 2,393 | 3,160 | 2,894 | 2,317 | 2,393 | 3,160 | 2,894 | 2,317 | 2,393 |

Tablo 12. Dört Sıralı Blok bims ve Farklı Yalıtım Malzemeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığında Yakıt Tüketimine bağlı Emisyonlar (kg/m²)(Emissions due to Fuel Consumption at Optimum Insulation Thickness for Different Insulation Materials and Four Row Block Bims (kg/m²))

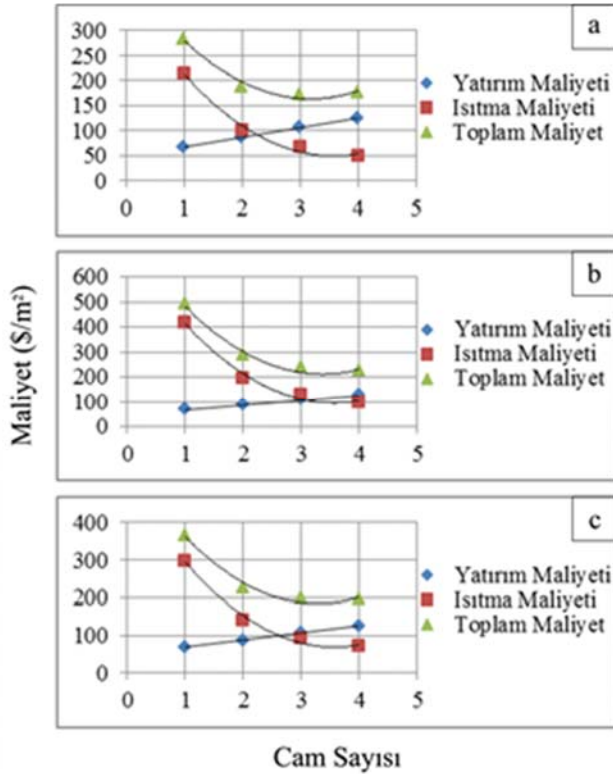
| | XPS | | EPS | | Cam Yünü | | Taş Yünü | |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ |
| Aydın | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 5,027 | -- | 4,604 | -- | 3,686 | -- | 3,807 | -- |
| Kömür | 12,978 | 0,027 | 11,886 | 0,024 | 9,516 | 0,020 | 9,828 | 0,020 |
| Fuel-oil | 5,675 | 0,029 | 5,195 | 0,027 | 4,159 | 0,022 | 4,296 | 0,022 |
| Amasya | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 6,435 | -- | 5,894 | -- | 4,718 | -- | 4,873 | -- |
| Kömür | 16,613 | 0,034 | 15,214 | 0,031 | 12,181 | 0,025 | 12,578 | 0,026 |
| Fuel-oil | 7,262 | 0,038 | 6,650 | 0,035 | 5,324 | 0,028 | 5,499 | 0,029 |
| Eskişehir | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 7,216 | -- | 6,608 | -- | 5,291 | -- | 5,464 | -- |
| Kömür | 18,629 | 0,038 | 17,061 | 0,035 | 13,659 | 0,028 | 14,107 | 0,029 |
| Fuel-oil | 8,142 | 0,042 | 7,456 | 0,039 | 5,970 | 0,031 | 6,164 | 0,032 |
| Ardahan | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 9,018 | -- | 8,259 | -- | 6,612 | -- | 6,829 | -- |
| Kömür | 23,281 | 0,048 | 21,321 | 0,044 | 17,071 | 0,035 | 17,630 | 0,036 |
| Fuel-oil | 10,176 | 0,053 | 9,319 | 0,048 | 7,461 | 0,039 | 7,706 | 0,040 |

Tablo 13. Delikli Tuğla ve Farklı Yalıtım Malzemeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığında Yakıt Tüketimine bağlı Emisyonlar (kg/m²)(Emissions due to Fuel Consumption at Optimum Insulation Thickness for Different Insulation Materials and Hollow-brick (kg/m²))

| | XPS | | EPS | | Cam Yünü | | Taş Yünü | |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ |
| Aydın | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 5,027 | -- | 4,604 | -- | 3,686 | -- | 3,807 | -- |
| Kömür | 12,978 | 0,027 | 11,886 | 0,024 | 9,516 | 0,020 | 9,828 | 0,020 |
| Fuel-oil | 5,675 | 0,029 | 5,195 | 0,027 | 4,159 | 0,022 | 4,295 | 0,022 |
| Amasya | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 6,435 | -- | 5,894 | -- | 4,718 | -- | 4,873 | -- |
| Kömür | 16,613 | 0,034 | 15,214 | 0,031 | 12,181 | 0,025 | 12,581 | 0,026 |
| Fuel-oil | 7,262 | 0,038 | 6,650 | 0,035 | 5,324 | 0,028 | 5,499 | 0,029 |
| Eskişehir | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 7,216 | -- | 6,608 | -- | 5,291 | -- | 5,464 | -- |
| Kömür | 18,629 | 0,038 | 17,061 | 0,035 | 13,659 | 0,028 | 14,107 | 0,029 |
| Fuel-oil | 8,144 | 0,042 | 7,457 | 0,039 | 5,970 | 0,031 | 6,166 | 0,032 |
| Ardahan | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 9,018 | -- | 8,259 | -- | 6,612 | -- | 6,829 | -- |
| Kömür | 23,281 | 0,048 | 21,321 | 0,044 | 17,071 | 0,035 | 17,630 | 0,036 |
| Fuel-oil | 10,176 | 0,053 | 9,319 | 0,048 | 7,461 | 0,039 | 7,706 | 0,040 |

Tablo 14. Gaz Beton ve Farklı Yalıtım Malzemeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığında Yakıt Tüketimine bağlı Emisyonlar (kg/m²)(Emissions due to Fuel Consumption at Optimum Insulation Thickness for Different Insulation Materials and Aerated Concrete (kg/m²))

| | XPS | | EPS | | Cam Yünü | | Taş Yünü | |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ |
| Aydın | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 5,027 | -- | 4,604 | -- | 3,686 | -- | 3,807 | -- |
| Kömür | 12,978 | 0,027 | 11,886 | 0,024 | 9,516 | 0,020 | 9,828 | 0,020 |
| Fuel-oil | 5,675 | 0,029 | 5,194 | 0,027 | 4,159 | 0,022 | 4,295 | 0,022 |
| Amasya | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 6,435 | -- | 5,894 | -- | 4,718 | -- | 4,873 | -- |
| Kömür | 16,613 | 0,034 | 15,214 | 0,031 | 12,181 | 0,025 | 12,581 | 0,026 |
| Fuel-oil | 7,262 | 0,038 | 6,650 | 0,035 | 5,324 | 0,028 | 5,499 | 0,029 |
| Eskişehir | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 7,216 | -- | 6,608 | -- | 5,291 | -- | 5,464 | -- |
| Kömür | 18,629 | 0,038 | 17,061 | 0,035 | 13,659 | 0,028 | 14,107 | 0,029 |
| Fuel-oil | 8,142 | 0,042 | 7,457 | 0,039 | 5,970 | 0,031 | 6,166 | 0,032 |
| Ardahan | | | | | | | | |
| Doğal Gaz | 9,018 | -- | 8,258 | -- | 6,612 | -- | 6,829 | -- |
| Kömür | 23,281 | 0,048 | 21,321 | 0,044 | 17,071 | 0,035 | 17,630 | 0,036 |
| Fuel-oil | 10,175 | 0,053 | 9,319 | 0,048 | 7,461 | 0,039 | 7,706 | 0,040 |

**Şekil 4.** Ardahan Şehri için a) Doğal Gaz tüketimine b) Fuel-oil tüketimine c) Kömür tüketimine bağlı Optimum Cam Sayısı Maliyet Eğrisi (Cost Curve of Optimal Number of Glass for Ardahan Province Based On a) Natural Gas Consumption b) Fuel-Oil Consumption c) Coal Consumption)**Tablo 15.** Optimum Cam Sayısı (Optimal Number of Glass)

| Şehir | Yakıt | | |
|-----------|-----------|-------|----------|
| | Doğal Gaz | Kömür | Fuel-Oil |
| Aydın | 2 | 3 | 3 |
| Amasya | 3 | 3 | 4 |
| Eskişehir | 3 | 4 | 4 |
| Ardahan | 4 | 4 | 4 |

Tablo 16. Optimum Cam Sayısında Yakıt Tüketimi (kömür ve fuel-oil için kg/m², doğal gaz için m³/m²) (Fuel Consumption in Optimum Number of Glass (kg/m² for Coal and Fuel oil, m³/m² for Natural gas))

| Şehir | Yakıt | | |
|-----------|-----------|--------|----------|
| | Doğal Gaz | Kömür | Fuel-Oil |
| Aydın | 12,879 | 16,696 | 8,391 |
| Amasya | 13,907 | 27,360 | 10,484 |
| Eskişehir | 17,487 | 26,231 | 13,183 |
| Ardahan | 20,825 | 40,970 | 20,590 |

Tablo 17. Optimum Cam Sayısında Yakıt Tüketimine bağlı Emisyonlar (kg/m²) (Emissions due to fuel consumption in Optimum Number of Glass (kg/m²))

| Şehir | Doğal Gaz | | Kömür | | Fuel-Oil | |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ | CO ₂ | SO ₂ |
| Aydın | 25,909 | -- | 52,058 | 0,107 | 27,019 | 0,140 |
| Amasya | 27,977 | -- | 85,309 | 0,175 | 33,758 | 0,176 |
| Eskişehir | 35,179 | -- | 81,788 | 0,164 | 42,449 | 0,220 |
| Ardahan | 41,894 | -- | 127,744 | 0,262 | 66,300 | 0,344 |

TS 825'e göre 1. bölge bulunan Aydın şehrinde farklı duvar malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,081-0,386 m arasında optimum kalınlık hesaplanmışken, 2,415-9,423 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 6,891-28,930 kg/m² CO₂ ile 0,037-0,067 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur. 2. bölge bulunan Amasya şehrinde farklı duvar malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,112-0,520 m arasında optimum kalınlık hesaplanmışken, 3,091-12,062 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 8,821-37,610 kg/m² CO₂ ile 0,047-0,085 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur. 3. bölge bulunan Eskişehir şehrinde farklı duvar malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,130-0,595 m arasında optimum kalınlık hesaplanmışken, 3,466-13,526 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 9,891-42,173 kg/m² CO₂ ile 0,052-0,096 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur. 4. bölge bulunan Ardahan şehrinde farklı duvar malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,170-0,767 m arasında optimum kalınlık hesaplanmışken, 4,331-16,904 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 12,361-52,705 kg/m² CO₂ ile 0,066-0,120 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur. Aydın şehrinde farklı duvar ile yalıtım malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,014-0,088 m arasında optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmışken, 1,292-4,162 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 3,686-12,978 kg/m² CO₂ ile 0,020-0,029 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur. Amasya şehrinde farklı duvar ile yalıtım malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,018-0,112 m arasında optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmışken, 1,654-5,329 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 4,718-16,613 kg/m² CO₂ ile 0,025-0,038 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur. Eskişehir şehrinde farklı duvar ile yalıtım malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,020-0,126 m arasında optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmışken, 1,854-5,975 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 5,291-18,629 kg/m² CO₂ ile 0,028-0,042 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur. Ardahan şehrinde farklı duvar ile yalıtım malzemesine ve yakıt türüne bağlı olarak 0,026-0,157 m arasında optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmışken, 2,317-7,467 kg/m² (veya m³/m² doğal gaz için) arasında yakıt tüketimi ve 6,612-23,281 kg/m² CO₂ ile 0,035-0,053 kg/m² arasında SO₂ emisyon miktarı bulunmuştur.

Aydın şehri için optimum cam sayısı farklı yakıt türlerine bağlı olarak 2 ve 3, optimum cam sayısında yakıt tüketimi 8,391-16,696 kg/m²(veya m³/m² doğal gaz için) arasında ve 25,909-52,058 kg/m² CO₂ ile 0,107-0,140 kg/m² arasında SO₂ emisyonu hesaplanmıştır. Amasya şehri için optimum cam sayısı farklı yakıt türlerine bağlı olarak 3 ve 4, optimum cam sayısında yakıt tüketimi 10,484-27,360 kg/m²(veya m³/m² doğal gaz için) arasında ve 27,977-85,309 kg/m² CO₂ ile 0,175-0,176 kg/m² arasında SO₂ emisyonu hesaplanmıştır. Eskişehir şehri için optimum cam sayısı farklı yakıt türlerine bağlı olarak 3 ve 4, optimum cam sayısında yakıt tüketimi 13,183-26,231 kg/m²(veya m³/m²

doğal gaz için) arasında ve 35,179-81,788 kg/m² CO₂ ile 0,164-0,220 kg/m² arasında SO₂ emisyonu hesaplanmıştır. Ardahan şehri için optimum cam sayısı farklı yakıt türlerine bağlı olarak 4. optimum cam sayısında yakıt tüketimi 20,590-40,970 kg/m²(veya m³/m² doğal gaz için) arasında ve 41,894-127,744 kg/m² CO₂ ile 0,262-0,344 kg/m² arasında SO₂ emisyonu hesaplanmıştır. Duvar malzemelerinde en yüksek fiyat gaz beton malzemede, en düşük ise delikli tuğla malzemede bulunmaktadır. En yüksek ısı iletim katsayısına delikli tuğla malzeme sahiptir. Kullanılan yakıtların en yüksek ısı değeri fuel-oil de en düşük ısı değeri ise kömür yakıtta bulunmaktadır. Isıl verime ise en yüksek doğal gaz sahiptir. Bunlara bağlı olarak Tablo 7'de verilen tüm iller için optimum duvar malzemesi kalınlığı en düşük gaz beton malzemede en yüksek ise delikli tuğla malzemede hesaplanmıştır. Tablo 8 ve Tablo 9'da görüleceği gibi en yüksek yakıt tüketimi ve CO₂ ile SO₂ emisyonları ise gaz beton malzemede en düşük dört sıralı blok bims malzemede meydana gelmiştir. Yalıtım malzemelerinin en yüksek fiyatına ekstrüde polistiren (XPS) en düşük ise cam yünü sahiptir. En yüksek ısı iletim katsayısı en yüksek cam yünü ve taş yünü, en düşük ise ekstrüde polistiren (XPS) yalıtım malzemesinde bulunmaktadır. Kullanılan yakıtların en yüksek ısı değeri fuel-oil de, en düşük ısı değeri ise kömür yakıtta bulunmaktadır. Isıl verime ise en yüksek doğal gaz sahiptir. Bunlara bağlı olarak Tablo 10'da verildiği gibi optimum yalıtım kalınlığı en düşük dört sıralı blok bims te en yüksek ise gaz beton yapı malzemesinde elde edilmiştir. Tablo 11, Tablo 12, Tablo 13 ve Tablo 14'te görüleceği gibi optimum kalınlıkta yakıt tüketimi ve CO₂ ile SO₂ emisyonları her iklim bölgesi içinde tüm yapı ve yalıtım malzemeleri için aynı hesaplanmıştır. Çok camlı pencereler için en düşük ısı geçiş katsayısı dört camlı pencerede hesaplanmıştır. Kullanılan yakıtların en yüksek ısı değeri fuel-oil de, en düşük ısı değeri ise kömür yakıtta bulunmaktadır. Isıl verime ise en yüksek doğal gaz sahiptir. Şekil 1'de verildiği gibi sıcak iklimde bulunan şehirlerde optimum cam sayısı 2-3 arasında, Şekil 2 ve Şekil 3'de verildiği gibi ılıklı iklim bölgelerinde optimum cam sayısı 3-4, Şekil 4'de verildiği gibi soğuk iklim bölgesinde 4 olarak hesaplanmıştır. Ek olarak Tablo 15'te yakıtlara bağlı olarak optimum cam sayıları görülmektedir. Tablo 16 ve Tablo 17'de verildiği gibi en yüksek yakıt kömür de en düşük ise fuel-oil'de meydana gelmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Her dört şehir için duvar malzemesi hesaplama sonuçları: En düşük duvar malzemesi optimum kalınlığı doğal gaz yakıt kullanıldığında gaz beton malzemede hesaplanmışken en yüksek optimum kalınlık ise fuel-oil yakıt kullanıldığında delikli tuğla malzemede bulunmuştur. Optimum kalınlıkta yakıt tüketimi ise en düşük miktar fuel-oil için dört sıralı blok bims duvar malzemesinde, en yüksek miktar kömür için gaz beton duvar malzemesinde tespit edilmiştir. Optimum kalınlıkta yakıt tüketimine bağlı emisyon miktarı ise en düşük doğal gaz için CO₂ emisyonu dört sıralı blok bims de ve en yüksek ise kömür için gaz beton duvar malzemesinde hesaplanmıştır. SO₂ emisyonu doğal gaz için meydana

gelmez iken en yüksek olarak fuel-oil için gaz beton malzemede meydana gelmiştir. Her dört şehir için yalıtım malzemesi hesaplama sonuçları: En düşük yalıtım malzemesi optimum kalınlığı, doğal gaz yakıt kullanıldığında dört sıralı blok bims duvar ve ekstrüde polistiren (XPS) yalıtım malzemesinde hesaplanmışken en yüksek optimum kalınlık ise fuel-oil yakıt kullanıldığında gaz beton duvar ve cam yünü yalıtım malzemesinde bulunmuştur. Optimum yalıtım kalınlığında yakıt tüketimi ise en düşük miktar fuel-oil yakıt için cam yünü yalıtım malzemesinde, en yüksek miktar kömür için ekstrüde polistiren (XPS) yalıtım malzemesinde tespit edilmiştir. Optimum kalınlıkta yakıt tüketimine bağlı emisyon miktarları ise; CO₂ emisyonu için en düşük doğal gaz ve cam yünü yalıtım malzemesinde, en yüksek kömür ve ekstrüde polistiren (XPS) yalıtım malzemesinde hesaplanmıştır. SO₂ emisyonu için doğal gaz için meydana gelmez iken en yüksek olarak fuel-oil yakıt ve ekstrüde polistiren (XPS) yalıtım malzemesinde meydana geldiği bulunmuştur.

Her dört şehir için cam sayısı hesaplama sonuçları: En düşük optimum cam sayısı doğal gaz yakıt kullanıldığında ve en yüksek optimum cam sayısı ise fuel oil yakıt kullanıldığında hesaplanmıştır. En düşük yakıt tüketimi fuel-oil yakıt için ve en yüksek yakıt tüketimi kömür yakıt için tespit edilmiştir. CO₂ emisyonu en düşük doğal gaz yakıtta en yüksek kömür yakıtta bulunmuştur. SO₂ emisyonu ise doğal gaz yakıtta meydana gelmez iken en yüksek miktar ise fuel-oil yakıtta hesaplanmıştır. 2008 yılında kullanılmaya başlayan TS 825'e göre her iklim bölgesi için tüm yapı ve yalıtım malzemeleri düşünülerek dış duvarın, 1. bölge için 0,31-0,59 W/m²K arasındaki hesaplanan ısı transfer katsayısı değerleri ile referans değer olan 0,7 W/m²K altında, 2. bölge için 0,24-0,46 W/m²K arasındaki hesaplanan ısı transfer katsayısı değerleri ile referans değer olan 0,6 W/m²K altında, 3. bölge için 0,21-0,41 W/m²K arasındaki hesaplanan ısı transfer katsayısı değerleri ile referans değer olan 0,5 W/m²K altında ve 4. bölge için 0,17-0,33 W/m²K arasındaki hesaplanan ısı transfer katsayısı değerleri ile referans değer olan 0,4 W/m²K altında hesaplanmış böylece uygulanabilir olduğu görülmüştür. Ülkemizdeki iklim bölgelerinde yer alan şehirler için pencerelerde kullanılan cam katman sayısı en düşük doğal gaz yakıt kullanıldığında ve en yüksek cam sayısı ise fuel-oil yakıt kullanıldığında elde edilmiştir. 3 katlı camlı ve 4 katlı cam tabakası sayısı kışın pencerelerden oluşan ısı kaybının, yazın ise güneşten kaynaklanan ısı kazancının azalmasına sebep olacaktır. Ancak bu camlar için uygun doğrama yapısının elde edilmesi ek bir maliyet getirecektir. Bunun için maliyete bağlı enerji tüketimi analizlerinin yapılması uygun olacaktır.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

| | |
|-----|--|
| A | : Alan (m ²) |
| Hu | : Alt Isıl Değer (J/m ³ , J/kg) |
| PWF | : Bugünkü Değer Faktörü |
| C | : Cam Kalınlığı (mm) |
| n | : Cam Sayısı |
| x | : Duvar Malzemesi Kalınlığı (m) |

| | |
|----------------|--|
| EPS | : Ekspande Polistiren |
| XPS | : Ekstrüde Polistiren |
| g | : Enflasyon Oranı |
| i | : Faiz Oranı |
| r | : Gerçek Faiz Oranı |
| Fij | : Görünüm Faktörü |
| L | : Hava tabakası kalınlığı (mm) |
| U | : Isı Geçirgenlik Katsayısı (W/m ² .K) |
| R | : Isıl Direnç (m ² .K/W) |
| k | : Isı İletim Katsayısı (W/m.K) |
| HDD | : Isıtma Derece-gün |
| C | : Maliyet (TL) |
| M | : Mol Ağırlığı (kg/kmol) |
| N | : Ömür |
| h | : Pencere için Isıl Direnç (W/m ² .K) |
| T | : Pencere İçi Sıcaklık (°C) |
| t | : Sıcaklık (°C) |
| η | : Sistem Verimi |
| σ | : Stefan Boltzman Sabiti |
| y | : Yalıtım Malzemesi Kalınlığı (m) |
| M _f | : Yakıt Tüketimi (m ³ /m ² , kg/m ²) |
| ε | : Yayma Katsayısı |

5.1 Alt İndis (İngilizce yok)

| | |
|-------|-------------------------------|
| o | : Dış |
| op | : Dış Sıva |
| w | : Duvar |
| Un-wm | : Duvar Kaplaması |
| wm | : Duvar Malzemesi |
| v | : Duvar Malzemesi Birim Hacmi |
| H,s | : Isıtma Sistemi |
| i | : İç |
| ip | : İç Sıva |
| max | : Maksimum |
| min | : Minimum |
| b | : Temel |
| t | : Toplam |
| T,H | : Toplam Isıtma |
| t,ins | : Toplam Yalıtım Malzemesi |
| f | : Yakıt |
| t,w | : Yalıtımsız Duvar |
| ins | : Yalıtım Malzemesi |

KAYNAKALAR (REFERENCE)

1. Ulaş A., Binalarda TS 825 hesap yöntemine göre ısı kaybı, yakıt tüketimi, karbondioksit emisyonu hesabı ve maliyet analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2010.
2. Bektaş B., Aksoy U.,T., Soğuk iklimlerdeki binalarda pencere sistemlerinin enerji performansı, Fırat Üniv, Fen ve Müh. Bil. Der., 17 (3), 499-508, 2005.
3. Arıcı M., Karabay H., Determination of optimum thickness of double-glazed windows for the climatic regions of Turkey, Energy and Buildings, 42 (10), 1773-1778, 2010.
4. Kaynaklı Ö., Kılıç M., Yamankaradeniz R., Isıtma ve soğutma süreci için dış duvar optimum yalıtım kalınlığı

- hesabı, TTMD Isıtma, Soğutma, Havalandırma, Klima, Yangın ve Sıhhi Tesisat Dergisi, 65, 39-45, 2010.
5. Şişman, N., Derece gün bölgeleri için bina dış duvarlarında farklı yalıtım malzemesi ve duvar yapı bileşenleri kullanılması halinde ekonomik analiz yöntemi ile en iyi yalıtım kalınlığının tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2005.
 6. Bolattürk A., Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey, Applied Thermal Engineering, 26 (11-12), 1301-1309, 2006.
 7. Çomaklı K., Yüksel B., Optimum insulation thickness of external walls for energy saving, Applied Thermal Engineering, 23 (4), 473-479, 2003.
 8. Dombaycı Ö., A., Gölçü M., Pancar Y., Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources, Applied Energy, 83 (9), 921-928, 2006.
 9. Ekici B., B., Gülten, A. A., Aksoy U., T., A study on the optimum insulation thicknesses of various types of external walls with respect to different materials, fuels and climate zones in Turkey, Applied Energy, 92, 211-217, 2012.
 10. Kaynaklı Ö., Mutlu M., Kılıç M., Bina duvarlarına uygulanan ısı yalıtım kalınlığının enerji maliyeti odaklı optimizasyonu, Tesisat Mühendisliği, 126, 48-54, 2012.
 11. Kaynaklı Ö., Yamankaradeniz R., Isıtma süreci ve optimum yalıtım kalınlığı hesabı, VII. Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 187-195, 25-28 Ekim 2007.
 12. Kon O., Farklı amaçlarla kullanılan binaların ısıtma ve soğutma yüklerine göre optimum yalıtım kalınlıklarının teorik ve uygulamalı olarak belirlenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2014.
 13. Kon O., Yüksel B., Metal dış cephe kaplamalı bir binada ısıtma ve soğutma yüküne göre dış duvar optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi, (İKSES'14) 2. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu ve Sergisi, Balıkesir, 544-553, 23-25 Ekim 2014.
 14. Kurekçi 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.
 15. Çay Y., Gürel A., E., Determination of optimum insulation thickness energy savings and environmental impact for different climatic regions of Turkey, Environmental Progress & Sustainable Energy, 32 (2), 365-372, 2013.
 16. Çomaklı K., Yüksel B., Environmental impact of thermal insulation thickness in buildings, Applied Thermal Engineering, 24 (5-6), 933-940, 2004.
 17. Dombaycı Ö. A., Degree-days maps of Turkey for various base temperatures, Energy, 34 (11), 1807-1812, 2009.
 18. Karabay H., Arıcı M., Multiple pane window applications in various climatic regions of Turkey, Energy and Buildings, 45, 67-71, 2012.
 19. Uygunoğlu T., Keçebaş A., LCC analysis for energy-saving in residential buildings with different types of construction masonry blocks, Energy and Buildings, 43 (9), 2077-2085, 2011.
 20. Okka O., Mühendislik Ekonomisi, Nobel Yayınları, 3. Baskı, Ankara, 2000.
 21. TS 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standardı, Mayıs 2008.
 22. Keçebaş A., Determination of optimum insulation thickness in pipe for exergetic life cycle assessment, Energy Conversion and Management, 105, 826-835, 2015.
 23. Ertürk M., A new approach to calculate the energy saving per unit area and emission per person in exterior wall of building using different insulation materials and air gap, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 395-406, 2016.

