

Yıllık CO₂ emisyonunu dikkate alarak bina duvarlarının optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi ve ekonomik analizi

Determination and economic analysis of the optimum insulation thickness of building walls, considering annual CO₂ emission

Arzu ŞENCAN ŞAHİN^{1*}, Tuğba KOVACI², Erkan DİKMEN³

^{1,2,3}Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
arzusencan@isparta.edu.tr, tugbakovaci@gmail.com, erkandikmen@isparta.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.08.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 25.03.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 06.02.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.03083
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Binalarda kullanılan enerji tüketiminin yaklaşık olarak %70-80'i ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimi amaçlıdır. Binalarda enerji tasarrufu için alınabilecek başlıca önlemlerden birisi ısı yalıtımıdır. Bu çalışmada Denizli ili için kış aylarında binaların ısıtılması ve yaz aylarında soğutulmasında enerji tasarrufu için farklı yakıt türlerinde optimum izolasyon kalınlıkları arasındaki en ekonomik kombinasyonun belirlenmesinde farklı izolasyon malzemeleri ve CO₂ emisyonları dikkate alınarak karşılaştırmalı bir çalışma sunulmuştur. Bu amaçla derece-saat yöntemi ve ömür maliyet analizi kullanılmıştır. Hesaplamalar dört farklı yalıtım malzemesi ve iki farklı yakıt için yapılmıştır. Çalışmada maliyeti minimum yapan optimum izolasyon kalınlığı, Denizli ili için kış aylarında ısıtma için 0.012-0.031 m, yaz aylarında soğutma için ise 0.009-0.022 m arasında değişmektedir. CO₂ emisyonu, artan yalıtım kalınlığı ile logaritmik olarak düşmektedir. Belirlenen koşullar için enerji tasarrufunda %22-24'lük farkla izolasyon malzemesi olarak camyünü uygunken, CO₂ emisyonu azlığı bakımından %10-34'lük farkla poliüretan daha uygundur. Enerji tasarrufu dikkate alındığında kömür doğalgaza göre yaklaşık %9-11 arasında daha ekonomiktir. Çevre etkisi açısından ise doğalgaz, kömür ile ısıtmaya göre, %37-40 oranında CO₂ emisyonu azlığı ile tercih edilebilir. Denizli ilinde CO₂ emisyonu için en düşük değerler, poliüretan yalıtım malzemesi ile kaplı, ısıtma kaynağı olarak doğalgaz kullanılan binada elde edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Isı yalıtımı, Optimum yalıtım kalınlığı, Enerji tasarrufu, CO₂ emisyonu.

Abstract

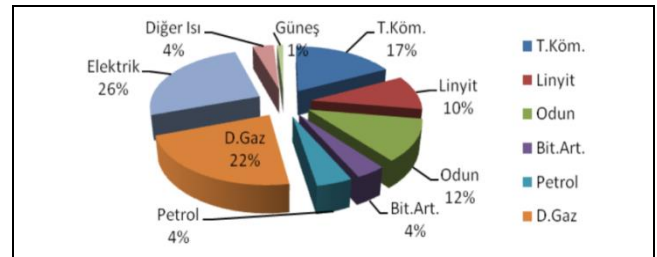
Approximately 70-80% of the buildings' energy consumption is for heating, cooling, and hot water production. One of the main measures that can be taken to save energy in buildings is thermal insulation. In this study, a comparative study is presented by considering different insulation materials and CO₂ emissions to determine the most economical combination between the optimum insulation thicknesses of different fuel types for heating and cooling of buildings in the Denizli province. For this purpose, a degree-hour method and life cost analysis is used. Calculations are made for four different insulating materials and two different fuels. The optimum insulation thickness, which minimizes the study's cost, varied between 0.012-0.031 m for heating in winter and 0.009-0.022 m for cooling in summer. CO₂ emissions are decreasing logarithmically with increasing insulation thickness. Under specified conditions, glass wool is more suitable with a 22-24% difference in energy saving; polyurethane is more suitable with a 10-34% difference in terms of low CO₂ emissions. While considering energy saving, coal is more economical between 9-11% compared to natural gas. Natural gas could be preferred with 37-40% CO₂ emission reduction compared to heating with coal in terms of environmental impact. The lowest values for CO₂ emission in the Denizli province are obtained in the building covered with polyurethane insulation material.

Keywords: Thermal insulation, Optimum insulation thickness, Energy savings, CO₂ emission.

1 Giriş

Günümüz dünyasında enerji, dünya nüfusu ve yaşam standartlarının sürekli artması ve hızlı teknolojik gelişmeler nedeniyle önemli bir kaynak ve güç olmuştur. Sürekli ve ucuz enerji arzı, ekonomik ve sosyal kalkınma için sigortadır. Nüfus artışı, dünyanın küreselleşmesi, teknolojideki gelişme ve refah düzeyinin artması, enerji kullanımının artmasına neden olmaktadır. Artan talebi karşılamak için en kolay yollarından biri fosil yakıt kaynaklarını kullanmaktır. Bununla birlikte, fosil yakıtların sınırlı miktarı, enerji fiyatının artması, çevre sorunları ve küresel ısınma gibi nedenlerle enerjinin etkin kullanımını önemli hale getirmiştir [1],[2]. Ülkemizde birincil enerji kaynakları tüketiminde petrol, 2008 yılına kadar ilk sırada yer alırken, artık yerini doğal gaza bırakmıştır. Türkiye için enerji kaynakları tüketiminde üçüncü sırada kömür yer almaktadır. Bu sıralamayı yenilenebilir enerji kaynakları ve hidroelektrik takip etmektedir [3]. Ülkelerin gelişmişlik seviyesine göre

farklılık göstermekle birlikte OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü) ülkelerinde toplam enerji kullanımının yaklaşık %30-45'i binalarda gerçekleşmektedir. Bina sektörünün enerji tüketiminde elektrik tüketimi, %26, yenilenebilir enerji, %21 ve doğal gaz %22'lik paya sahiptir (Şekil 1) [4],[5].



Şekil 1. Binalarda kullanılan enerji kaynaklarının oranları [4].

Figure 1. Proportions of energy resources used in buildings [4].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Türkiye'deki enerjinin üçte birinden fazlası soğutma ve ısıtma ihtiyaçları için harcanmaktadır. Binalarda kullanılan enerji tüketiminin yaklaşık olarak %70-80'i ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimi amaçlıdır. Değişen iklim koşullarının etkisiyle soğutma enerjisi de ısıtma enerjisi ihtiyacı kadar önemli hale gelmiştir. Binalarda enerji tasarrufu için alınabilecek başlıca önlemlerden birisi, ısı yalıtımıdır. Türkiye, ısı yalıtımı açısından yeterli miktarda üretim ve uygulama yapabilecek yerel kapasiteye sahiptir. Ülkemizde güncel mevzuatta öngörülmüş olan ısı yalıtımı seviyesi, yani bina bileşenlerinde minimum ısıl geçirgenlik değerleri, diğer birçok ülke standardıyla kıyaslandığında yetersizdir [4]. Türkiye'de binalara uygulanan ısı yalıtımının çok yaygın kullanılmamasından dolayı, binalardaki ısı kaybı ve ısı kazancı, benzer iklim koşullarına sahip Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında, çok daha fazladır. Dolayısıyla, daha fazla yakıt sarfiyatı ve çevre kirliliği meydana gelmektedir [6].

Bugün Dünya'daki enerji tüketimi arttıkça, çevre kirliliği ve sera gazı emisyonları artmaktadır. Kyoto Protokolü ile Avrupa'daki "2020 İklim ve Enerji Paketi" ve "2030 İklim ve Enerji Çerçevesi" anlaşmaları, sera gazı emisyonlarının azaltılması konusunda önemli hedefler koymaktadır. Bu bağlamda, ısı yalıtımı, enerji tüketiminin azaltılmasında ve mevcut binaların enerji performansının iyileştirilmesinde kilit rol oynamaktadır [7].

Binalarda enerji talebini azaltmak için çeşitli pasif çözümler arasında, bir yalıtım katmanı yerleştirilmesi çok yaygındır. Bununla birlikte, mevcut yasal gerekliliklere uysa bile, çok yüksek yalıtım malzemesi kalınlığı, enerji gereksinimleri, çevresel etki ve ekonomik analizler dikkate alındığında dezavantajlı olabilir. Aslında, bazı durumlarda, aşırı yalıtılmış bir bina örtüsünün, sıcak mevsimde geceleri aşırı ısıyı dışarı atmasını zorlanması, soğuk dönemlerde termal yüklerin azaltılmasıyla ilgili olan faydayı ortadan kaldıracaktır [8].

Erzurum'dan daha soğuk olan İsviçre'deki ısıl geçirgenlik değerleri Türkiye'nin ısıl geçirgenlik değerlerinden oldukça küçüktür (Tablo 1). Bu sonuç da Türkiye'deki binalardaki ısı yalıtımının geliştirilmesi gerektiği ve bu konuda çalışmaların artırılması gerektiğini göstermektedir. Genel olarak binalarda en fazla ısıl geçirgenliğin duvarlarda meydana geldiği söylenebilir. Bu çalışmada da optimum izolasyon kalınlığı hesaplamalarında sadece bina duvarları için hesaplama yapılmıştır.

Tablo 1. Bazı ülkelerdeki minimum ısıl geçirgenlik değerleri, W/m^2K [4].

Table 1. Minimum thermal transmittance values in some countries, W/m^2K [4].

	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
İsviçre	0.18	0.13	0.15	
Norveç	0.22	0.18	0.18	1.6
İngiltere	0.35	0.2	0.25	
Danimarka	0.4	0.25	0.3	
İsviçre	0.3	0.3	0.3	
Fransa	0.36-0.4	0.2-0.25	0.27-0.36	2.6
Almanya	0.3	0.2	0.4	
İtalya	0.46-0.64	0.43-0.6	0.43-0.6	
İspanya	0.66-0.82	0.38-0.45	0.66-0.82	
Türkiye (3. bölge)	0.5	0.25	0.4	2.4

Binaların yıllık ısıtma ve soğutma gereksinimlerinin hesabı, basit olarak ısıtma derecesi-gün kavramıyla elde edilebilir. Çoğu ev ve tek bölge binalar için derece günü yöntemiyle doğru sonuçlar elde edilebilmesine rağmen kalabalık ofis binaları gibi saatlik ve günlük dalgalanmalara maruz kalan binalar için bu yöntem çok kaba ve güvenilmez hale gelebilir. Bu gibi durumlarda güneş radyasyonu, sızdırma, ısı transfer katsayısı ve ekipman verimliliği gibi faktörlerini hesaba katan dinamik bir yöntem kullanılması gereklidir. Derece günlük yöntemin doğruluğu, farklı iklim bölgelerinde farklı taban sıcaklıkları kullanılarak geliştirilebilir [9].

Bölgelerin farklı iklim koşulları gibi unsurlar nedeniyle çeşitli koşullar için binalarda kullanılan farklı izolasyon malzemesi kalınlıklarının ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle izolasyon malzemelerinin optimum yalıtım üzerindeki etkileri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çalışmaların çoğu iletim yükünü derece gün kavramı ve dinamik ısı transferi modelleri de dahil olmak üzere iyi bilinen bazı yöntemleri kullanarak hesaplamışlardır. Dombayci ve Atalay [10], Kaynaklı [11], Bolattürk [12] ve Han Zhu [13] çalışmalarında ömür maliyet analizini kullanmışlardır. Kayfeci ve Keçebaş [14] çalışmalarında soğutma uygulamalarında dış duvarlarda optimum yalıtım kalınlığı ve yıllık enerji tüketimini belirlemek için iki farklı yöntem kullanmıştır: Derece-saat yöntemi ve yıllık eşdeğer tam yük soğutma saati çalışmasını kullanan yöntem. Ghislain Cyrille Vincelas [15] çalışmalarında derece-gün yöntemini kullanarak binanın yıllık soğutma yüklerini belirlemişlerdir. Binalar için optimum izolasyon kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresini bulmak için P1-P2 yöntemini kullanmışlardır.

Axaopoulos ve diğ. [16] çalışmasında ısıtma ve soğutma durumunda farklı topograf ve yönlerdeki dış duvarlar için farklı izolasyon malzemelerinin optimum izolasyon kalınlıklarını, rüzgar hızı ve yönünü dikkate alarak hesaplamıştır. Çalışmada izolasyon kalınlığı ne olursa olsun kuzey yönlü duvarların daha büyük ekonomik faydalar sağladığı belirtilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, optimum izolasyon kalınlıklarının 4.25 cm ile 15.5 cm arasında değiştiğini ve geri ödeme sürelerinin de 5.47 yıldan 12.11 yıla kadar değiştiğini göstermiştir. Bolattürk [17], çalışmasında binalarda ısıtma ve soğutma yükleri için optimum izolasyon kalınlığının hesaplanmasında P1-P2 yöntemini kullanmıştır. Çalışmada Antalya ili için optimum yalıtım kalınlığı, soğutma durumu için 3.2 cm iken, ısıtma durumu için 2.5 cm olarak belirtilmiştir. Arslanoglu Yigit [18] çalışmasında teorik-Taguchi birleştirme yöntemiyle optimum yalıtım kalınlığı üzerindeki etkin beş parametreyi (duvar, yalıtım, yakıt türü, ısıtma gün derece (HDD) ve kullanım ömrü) araştırmıştır. Sonuçlara göre HDD değerinin optimum izolasyon kalınlığı üzerinde %34.53'lük bir oranla etkili parametre olduğu görülmüştür. İkinci olarak etkili parametre %30.6'lık bir oranla yalıtım, daha sonra bunları yakıt türü (%24.18), kullanım ömrü (%8.2) ve duvar tipi (%0.67) parametreleri takip etmiştir. Bayram ve Yeşilata [19], ülkemizdeki tüm iklim noktalarına ait soğutma ve ısıtma derece-gün verilerini kullanarak, TSE 825'deki iklim bölgelerinin değerlendirilmesi yapmışlardır. Çalışmada TSE 825 uyarınca öngörülen yalıtım kalınlıklarının yeterliliği incelenmiş ve Türkiye'deki iklim (derece-gün) bölgeleri için öneriler sunulmuştur. Barrau ve Ibañez [20] çalışmasında optimum yalıtım kalınlığıyla binanın ve yalıtım malzemelerinin amortisman süreleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Amortisman sürelerinde 20 ila 50 yıl arasındaki bir artışın, bazı durumlarda, optimum yalıtım kalınlığı değerini iki katına

çıkardığı görülmüştür. Bolattürk [12] çalışmasında Türkiye'nin dört iklim bölgesinden 16 şehir ve beş farklı yakıt türü (kömür, doğal gaz, akaryakıt, sıvılaştırılmış LPG ve elektrik) için yalıtım malzemesini polistiren seçerek optimum yalıtım kalınlıklarını hesaplamıştır. Sonuçlar optimum yalıtım kalınlığının 2 ila 17 cm arasında değiştiğini, %22 ila %79 arasında enerji tasarrufu sağlandığını ve geri ödeme sürelerinin 1.3 ila 4.5 yıl arasında değiştiğini göstermiştir. Farklı yakıt tiplerinde geri ödeme süresi en yüksek doğalgaz iken en düşük LPG olarak belirlenmiştir. Kumar ve Zou [21] çalışmalarında derece-gün yöntemi ve yaşam döngüsü maliyet analizi yöntemini kullanarak, 4 yalıtım malzemesi ve 15 inşaat malzemesi için optimum yalıtım kalınlığını araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, hafif duvar malzemelerinde yalıtım yapılmasının ekonomik olarak mümkün olmadığı, bununla birlikte ağır beton ve toprak malzemeli duvarlarda ise yalıtım uygulamasının gerektiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak Denizli ili için kış aylarında binaların ısıtma ve yaz aylarında soğutma yükleri için optimum izolasyon kalınlıkları ve CO₂ emisyonları araştırılmıştır. Çalışma, yaygın olarak kullanılan dört farklı izolasyon malzemesi ve iki farklı yakıt sistemi göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Soğutma için enerji kaynağı olarak elektrik kullanılmıştır. Binaların soğutma ve ısıtma yüklerinin hesaplanması için derece gün yöntemi kullanılmıştır. İzolasyon malzemesinin optimum yalıtım kalınlığının hesaplanmasında malzeme ömrü analizi kullanılmıştır. 10 yıllık bina için geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufları hesaplanmıştır. İzolasyon kalınlıklarına bağlı olarak, farklı yakıt ve izolasyon malzemeleri için CO₂ emisyonunun değişimi incelenmiştir.

2 Optimum izolasyon kalınlığının belirlenmesi, ekonomik analiz ve CO₂ emisyonu

2.1 Hesaplamalarda kullanılan parametreler

Çalışmada varsayılan ekonomik parametreler ve izolasyon malzemesi üreticilerinden elde edilen teknik bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hesaplamalarda kullanılan parametreler.

Table 2. Parameters used in calculations.

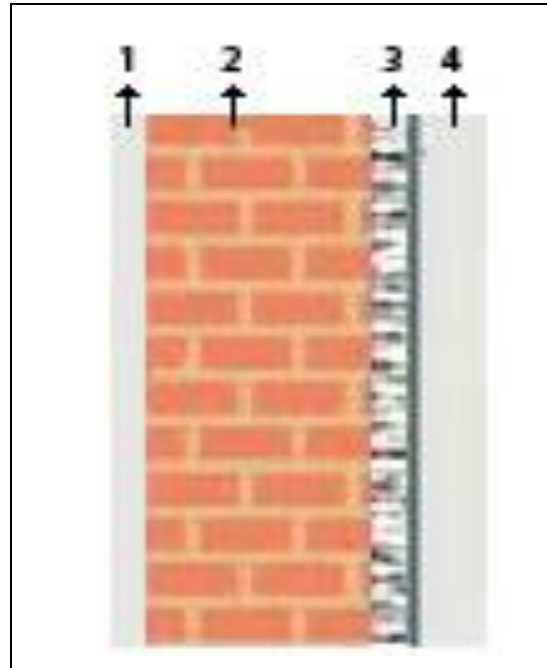
İzolasyon malzemesi	
EPS	$C_i = 120 \$/m^3$
XPS	$C_i = 180 \$/m^3$
Cam yünü	$C_i = 110 \$/m^3$
Poliüretan	$C_i = 260 \$/m^3$
Yakıt	
Kömür	$C_f = 0.14 \$/kg$ $H = 29.295 \times 10^6 J/kg$ $\eta = 65 \%$
Doğalgaz	$C_f = 0.20 \$/m^3$ $H = 34.526 \times 10^6 J/kg$ $\eta = 90 \%$
Elektrik (soğutma için)	
Fiyat	$C_e = 0.099 \$/kWh$
COP	2.5
Finansal parametreler	
Kullanım ömrü	$N = 10 \text{ yıl}$
Güncel değer faktörü	$PWF = 13.85$
HDD	1386.45 gün
CDD	630.27 gün

Isıtma ve soğutma gün dereceleri için meteoroloji genel müdürlüğü tarafından sağlanan 10 yıllık (2008-2018)

meteorolojik verilerin ortalaması kullanılmıştır [22]. Taban sıcaklığının seçilen değeri, derece-saat yöntemine göre ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanmasında önemli bir parametredir. Bu çalışma için literatürde verilen ısıtma gün derece ($HDD, T \leq 15^\circ C$) ve soğutma gün derece ($CDD, T > 22^\circ C$) değerleri kullanılmıştır.

Bu çalışmadaki model bina dış duvarlarının yapımı için, dış ve iç sıva, delikli tuğla ve bu levhalar üzerinde değişken kalınlıkta bir izolasyon tabakası planlanmıştır. Çalışmada geliştirilmiş polistiren sert köpük (EPS), ekstrüde polistiren (XPS), poliüretan ve cam yünü olmak üzere dört farklı yalıtım malzemesi seçilmiştir. İncelenen dıştan izolasyonlu duvar tipinin şematik resmi ve bina materyallerinin fiziksel özellikleri, Şekil 2'de ve Tablo 3'te verilmiştir.

1. 0.02 m iç sıva,
2. 0.13 m yatay delikli tuğla,
3. İzolasyon tabakası,
4. 0.03 m dış sıva.



Şekil 2. Tipik dıştan izolasyonlu bir duvar.

Figure 2. A typical externally insulated wall.

Tablo 3. Bina materyalleri fiziksel özellikleri.

Table 3. Physical properties of building materials.

Malzeme	Yoğunluk, kg/m ³	Isıl iletkenlik, W/mK	Özgül ısı, J/kgK
Tuğla-0.13 m	1200	0.45	1000
İç sıva (kireç harcı)-0.02 m	1800	0.87	840
Dış sıva (çimento harcı)-0.03 m	2100	1.4	900
XPS	32	0.038	1400
EPS	16	0.037	1450
Cam yünü	22	0.036	670
Poliüretan	45	0.025	1500

Yukarıda belirtilen duvar tipi için, belirtilen kalınlık ve ısı iletkenlikler dikkate alınarak, yalıtımsız kompozit duvar malzemelerinin toplam ısı direnci, R_t , Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Duvar malzemelerinin ısı dirençleri.

Table 4. The thermal resistance of wall materials.

Duvar tipi	R (m ² K/W)
İç sıva	0.0229
Yatay delikli tuğla	0.2889
Dış sıva	0.0214
$R_{iç}$	0.13
$R_{dış}$	0.04
R_t	0.50331

2.2 Dış duvar için yıllık ısıtma ve soğutma enerji gereksinimi

Bir binada oluşan ısı kayıpları, duvarlar ve tavanlar yoluyla kayıplar, havalandırma ve hava sızıntısı olarak hesaplanmaktadır. Havalandırma ve sızma, duvar yalıtımı tarafından etkilenmezken, direnç arttıkça veya iletkenlik azaldığında duvarlardaki ısı kayıpları azalır [9]. Bu çalışmada optimum izolasyon kalınlığının belirlenmesinde duvar kayıpları dikkate alınmayacaktır.

Burada, U , W/m²K olarak toplam ısı transferi katsayısı, T_b , taban sıcaklığı ve T_0 ise günlük ortalama sıcaklığı belirtmek üzere, dış duvarın birim alan başına ısı kaybı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [23]:

$$Q = U(T_b - T_0) \quad (1)$$

Birim alanındaki yıllık ısı kaybı, derecelendirme günleri kullanılarak belirlenebilir [15]:

$$Q_{Ah} = 86400 \cdot U \cdot HDD \quad (2)$$

$$Q_{Ac} = 86400 \cdot U \cdot CDD \quad (3)$$

Burada HDD ve CDD sırasıyla °C-gün olarak ısıtma ve soğutma gün-derecedir.

Toplam ısı transfer katsayısı, U , yalıtımsız duvarın toplam ısı direnci (R_t , m²K/W), yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği (k , W/mK) ve izolasyon kalınlığı (X , m) ile hesaplanabilir.

$$U = \frac{1}{R_t + \frac{X}{k}} \quad (4)$$

Duvardan olan ısı kaybı nedeniyle soğutma (E_c , W/m²) ve ısıtma (E_h , W/m²) sistemleri için birim alan başına yıllık enerji ihtiyacı şu şekilde tahmin edilebilir [15].

$$E_c = \frac{86400 \cdot U \cdot CDD}{COP} \quad (5)$$

$$E_h = \frac{86400 \cdot U \cdot HDD}{\eta} \quad (6)$$

Burada, COP ve η sırasıyla, soğutma sistemi performans katsayısını ve ısıtma sistemi verimliliğini göstermektedir.

2.3 CO₂ emisyonu hesabı

Isıtma sistemlerinde kullanılan fosil yakıtların yanması sonucunda açığa çıkan atık gazların %85'ini CO₂

oluşturmaktadır. Bu sebeple yapılan hesaplamalarda genellikle CO₂ emisyonu dikkate alınmaktadır [24].

Genelikle ısıtma sisteminin bir yakıtlı çalıştığı ve soğutma sisteminin ise elektrik kaynağı ile çalıştığı varsayılmıştır. Isıtma sisteminin verimi ve soğutma sisteminin performans katsayısı (COP) sırasıyla 0.8 ve 2.5 olarak dikkate alınmıştır. Tablo 5'te dört yalıtım malzemesinin emisyon faktörleri verilmiştir.

Tablo 5. İzolasyon materyalleri emisyon faktörleri.

Table 5. Insulation materials emission factors.

İzolasyon malzemesi	kgCO ₂ /kg
XPS	4.205
EPS	5.840
Camyünü	1.494
Poliüretan	4.307

Yıllık toplam CO₂ emisyonu üç kısma ayrılarak incelenmiştir. Bunlar, binanın ısıtma (E_h) ve soğutma (E_c) sistemlerinin kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonları ve yalıtım malzemesinin üretimi, nakliyesi ve montaj prosedürleri sırasında ortaya çıkan CO₂ emisyonlarıdır (E_{izo}). Binanın inşaat aşaması düşünüldüğünden E_{izo} değeri hesaplanırken, yalıtım malzemesinin kullanım ömrüne bölünmüştür. Duvarın birim alanı başına kg CO₂ olarak yıllık toplam CO₂ emisyonu [25]:

$$E_{tot} = E_h + E_c + E_{izo} \quad (7)$$

Yıllık ısıtma ve soğutma CO₂ emisyonları, aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir [25]:

$$E_h = \frac{Q_{Ah} f_h}{\eta} \quad (8)$$

$$E_c = \frac{Q_{Ac} f_c}{COP} \quad (9)$$

Burada, Q_{Ah} ve Q_{Ac} birim alandaki yıllık ısıtma ve soğutma iletim yükleri (kWh/m².yıl), f_h , kgCO₂/kWh cinsinden kömür ve doğalgazdan ısı enerji üretimi için CO₂ emisyon faktörü, f_c , kgCO₂/kWh cinsinden soğutma sistemi için kullanılan elektrikten kaynaklanan CO₂ emisyon faktörüdür.

Yalıtım malzemesi için E_{izo} , aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [25]:

$$E_{izo} = \frac{\rho X f_{ins}}{N} \quad (10)$$

Burada ρ , yalıtım malzemesinin yoğunluğu (kg/m³), X , yalıtım kalınlığı (m), f_{ins} , yalıtım malzemesi için CO₂ emisyon faktörü (kgCO₂/kg) ve N (yıl), yalıtım malzemesinin ömrüdür.

2.4 İzolasyon kalınlığı ve ekonomik analiz

Binalarımızdaki enerji kayıplarının nedeni, uygun yalıtım malzemesi kullanılmaması ile açıklanabilir. Uygun yalıtım malzemesi kullanımı aynı zamanda potansiyel büyümeyi de işaret etmektedir. Ayrıca, yalıtım kış ve yaz mevsimlerindeki binaların ısı kaybını/kazançlarını en aza indirgeyerek iç mekan ısı konfor koşullarını iyileştirir. Bu konuda kullanılacak yalıtım malzemesi miktarı önemli bir faktördür [26]. Fakat Türkiye'de binaların yalıtılması çok yaygın değildir ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Isıtma ve soğutma için yıllık yakıt tüketimi aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir [9],[27]:

$$m_{f,h} = \frac{86400 HDD}{(R_t + x/k)H\eta} \quad (11)$$

$$m_{f,c} = \frac{86400 CDD}{(R_t + x/k)COP\eta} \quad (12)$$

Burada H , yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg, kJ/m³)'dir.

Birim ısıtma ve soğutma maliyeti için yıllık enerji maliyetleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$C_{a,h} = m_{f,h}C_{f,h} \quad (13)$$

$$C_{a,c} = m_{f,c}C_e \quad (14)$$

Burada, $C_{a,h}$ ve $C_{a,c}$ sırasıyla \$/m² yıl olarak yıllık ısıtma enerji maliyeti ve yıllık soğutma enerji maliyeti, $C_{f,h}$ ve C_e sırasıyla yıllık yakıt maliyeti (\$/m³, \$/kg) ve elektrik maliyeti (\$/kWh)'dir.

Kullanılan yalıtım materyalinin türüne göre yıllık yalıtım maliyeti (C_y), yalıtım malzemesi birim fiyatı (C_i , \$/m³) ve izolasyon kalınlığı (X , m) yardımıyla hesaplanabilir:

$$C_y = C_i X \quad (15)$$

Güncel değer faktörü (PWF), faiz oranı (i , %), enflasyon oranı (g , %) ve bina ömrü (N , yıl) ile hesaplanabilir [13].

$$g < i \text{ ise } L = \frac{i-g}{1+g} \quad (16)$$

$$g > i \text{ ise } L = \frac{g-i}{1+i} \quad (17)$$

$$PWF = \frac{1 - (1+L)^{-N}}{L} \quad (18)$$

$$g = i \text{ ise } PWF = (1+i)^{-1} \quad (19)$$

Bu çalışmada optimum izolasyon kalınlığının belirlenmesinde kullanılan ömür maliyet analizi, bir sistemin veya bir bileşenin tüm ömrü boyunca maliyet analizini içerir [9]. Yalıtım malzemelerinin ömrü boyunca toplam ısıtma ve soğutma maliyetleri hesabında ömür 10 yıl olarak alınmıştır. 10 yıllık ömrü boyunca toplam ısıtma maliyeti, bugünkü değer faktörü, PWF ile çarpılarak mevcut değere dönüştürülmüştür.

Toplam maliyet (C_t , \$/m²) ve net enerji tasarrufu (E_s , \$/m²yıl) şu şekilde hesaplanabilir [1, 9]:

$$C_t = PWF m_f C_f \quad (20)$$

$$E_s = C_{t,nins} - C_{t,ins} \quad (21)$$

Burada $C_{t,nins}$ ve $C_{t,ins}$ sırasıyla izolasyonsuz ve izolasyonlu binanın toplam maliyetleridir. Geri ödeme süresi, yalıtım maliyetinin yalıtımsız ve yalıtımlı durumdaki birim yüzey için ısıtma ve soğutmanın enerji maliyetlerinin farkına oranıdır. C_f , yıllık yakıt maliyetidir.

Isıtma ve soğutma için optimum yalıtım kalınlığı, ısıtma ve soğutma toplam maliyetleri denklemi minimize edilerek elde edilebilir. Yıllık toplam maliyet değerlerinin yalıtım kalınlığına göre türevi alınır ve sıfıra eşitlenir, ısıtma ve soğutma derece gün için optimum yalıtım kalınlığı elde edilir [26]. Kış ve yaz ayları için izolasyon kalınlığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$X_h = \left(\frac{86400 HDD C_f PWF k}{\eta H C_i} \right)^{1/2} - R_t k \quad (22)$$

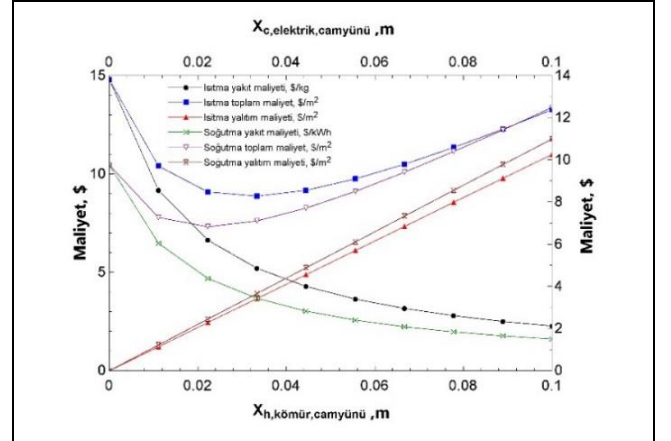
$$X_c = \left(\frac{86400 CDD C_e PWF k}{COP C_i} \right)^{1/2} - R_t k \quad (23)$$

Burada, X_h ve X_c sırasıyla metre olarak ısıtma ve soğutmadaki izolasyon kalınlıklarıdır.

3 Sonuçlar

Bu çalışmada, Denizli ilinde kış aylarında binaların ısıtma ve yaz aylarında soğutma yükleri için enerji maliyetleri dikkate alınarak optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. Her bir durum için yakıt ve elektrik maliyetleri belirlenmiş ve net enerji tasarrufları ve yıllık geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. İzolasyon malzemesi kullanımının CO₂ emisyonuna etkisi izolasyon kalınlığına bağlı olarak incelenmiştir.

Şekil 3'te Denizli ili için kışın kömürle ısıtılan ve yazın elektrik enerjisi ile soğutulan, camyünü ile yalıtılmış bir bina için maliyetler dikkate alınarak belirlenmiş optimum izolasyon kalınlığı sunulmuştur. İzolasyon kalınlığı arttıkça, ısıtma ve soğutma toplam maliyetleri önce azalma belirli bir noktadan sonra ise artma eğilimindedir.

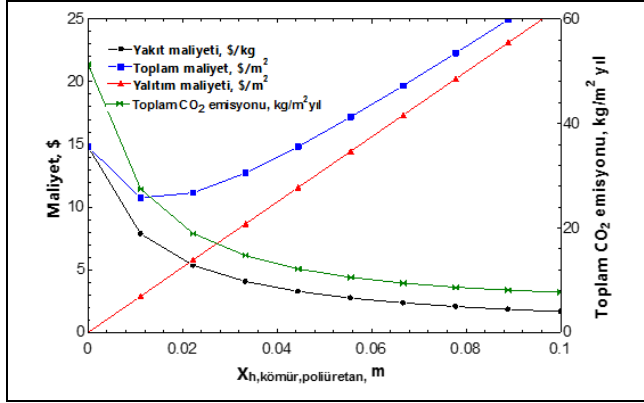


Şekil 3. Denizli ili için kömür ile ısıtılıp, elektrik enerjisi ile soğutulan bir binadaki yıllık maliyetler.

Figure 3. Annual costs for a building heated by coal and cooled by electrical energy in Denizli.

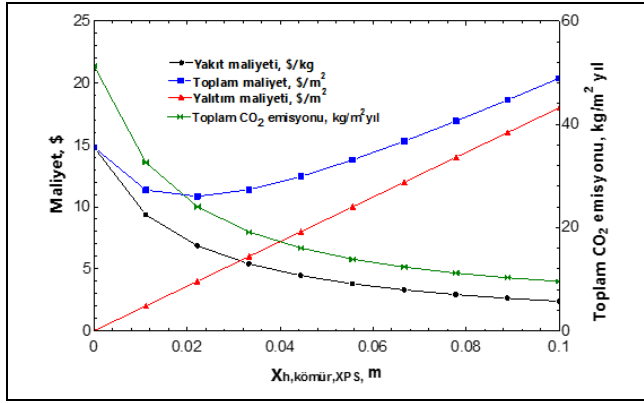
Kış aylarında kömürle ısıtılan 10 yıllık bir bina için farklı izolasyon malzemeleri kullanıldığında izolasyon kalınlığının metrekare duvar başına yıllık enerji ve yakıt maliyetleri üzerindeki etkisi Şekil 4-7'de gösterilmiştir. Grafiklerden de görüleceği gibi izolasyon kalınlığı arttıkça yakıt maliyeti azalmaktadır. Yalıtım kalınlığının artması, ısı iletim yükünü azaltacak ve yalıtım maliyetinin artmasına neden olacaktır. Yalıtım maliyetinin artması, yapının ısı kaybını azaltır, ürün miktarının artması aynı zamanda daha fazla masraf anlamına gelir. Yakıt ve yalıtım maliyetlerinin toplamı, yıllık toplam maliyeti oluşturur. Toplam maliyet başlangıçta azalır ve daha sonra yalıtım maliyeti etkisiyle artmaya başlar. Kullanılan izolasyon malzemesinin belirli bir ömrü vardır ve belirli bir izolasyon kalınlığından sonra yakıt maliyeti sürekli olarak azalmaya devam ederken, bu azalma yalıtım maliyetini karşılamak için yeterli olmaz. Yıllık toplam maliyeti en az yapan izolasyon kalınlığı optimum izolasyon kalınlığıdır. Optimum izolasyon kalınlığı kömür ile ısıtmada 0.014-0.031 m arasında

değişmektedir. Binalardaki CO₂ emisyonu ise izolasyon kalınlığı artışı ile, yaklaşık olarak yakıt maliyetine paralel olarak azalmaktadır.



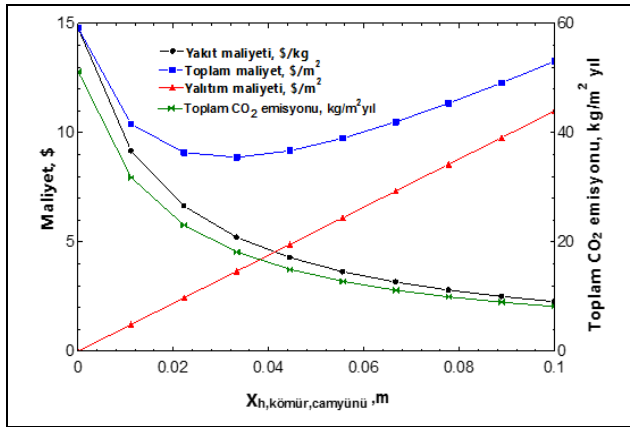
Şekil 4. Denizli ili kömürle ısıtılan poliüretan ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

Figure 4. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the building insulated with polyurethane heated with coal in Denizli.



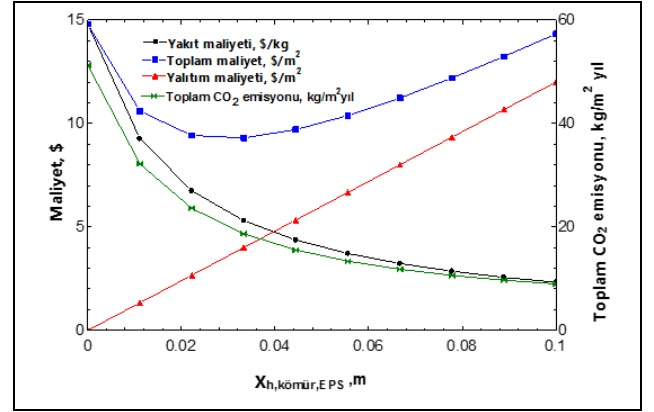
Şekil 5. Denizli ili kömürle ısıtılan XPS ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

Figure 5. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the XPS-insulated building heated with coal in Denizli.



Şekil 6. Denizli ili kömürle ısıtılan cam yünü ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

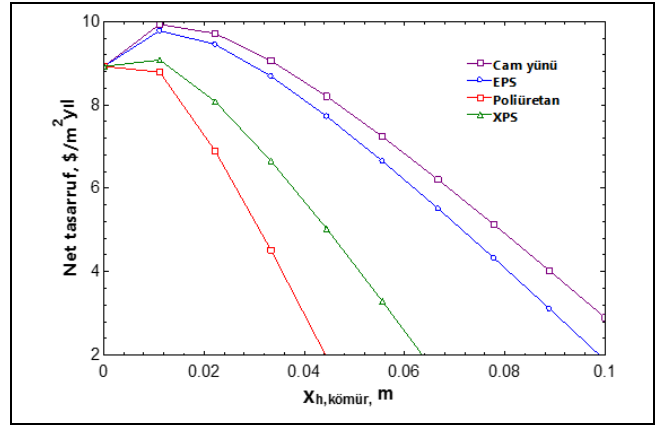
Figure 6. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the building insulated with glass wool heated with coal in Denizli.



Şekil 7. Denizli ili kömürle ısıtılan EPS ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

Figure 7. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the EPS insulated building heated with coal in Denizli.

Denizli ili için kömürle ısıtma ve elektrik ile soğutmada toplam maliyet, izolasyon malzemesi olarak cam yünü kullanıldığında minimum olmaktadır. Kömürle ısıtılan bir bina için en fazla tasarruf cam yününden sonra sırasıyla EPS ve XPS ile izolasyon yapıldığında elde edilirken, en az tasarruf poliüretan kullanıldığında elde edilmektedir (Şekil 8).

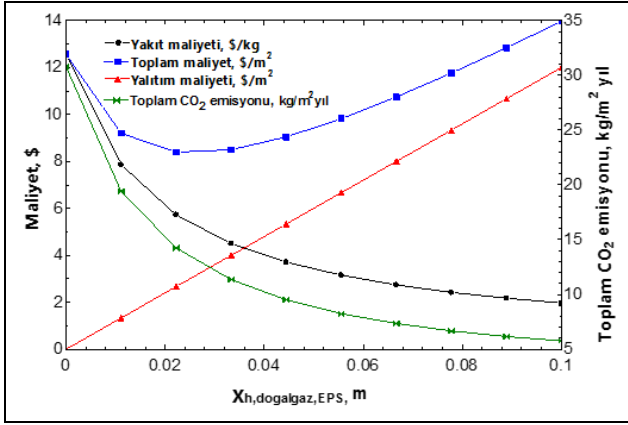


Şekil 8. Denizli ili kömür ile ısıtılan bina için enerji tasarrufları.

Figure 8. Energy savings for coal-heated building in Denizli.

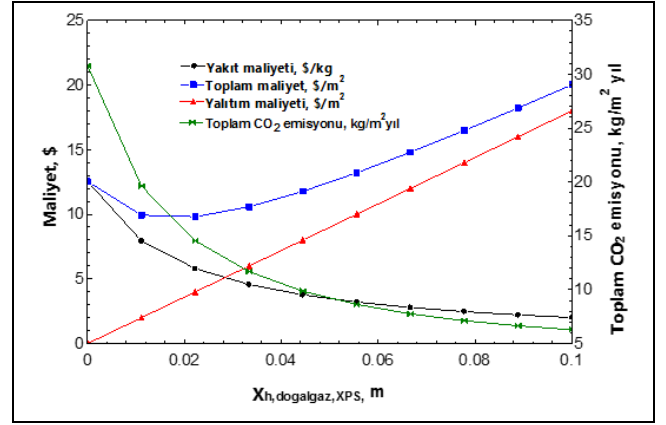
Ülkemizde birincil enerji kaynakları tüketiminde petrol yerini artık doğal gazla bırakmaya başlamıştır. Kış aylarında doğal gaz ile ısıtılan 10 yıllık bir bina için farklı izolasyon malzemeleri kullanıldığında, izolasyon kalınlığının metrekare duvar başına yıllık enerji ve yakıt maliyetleri üzerindeki etkisi Şekil 9-12'de gösterilmiştir. Optimum izolasyon kalınlığı doğal gaz ile ısıtımada 0.012-0.027 m arasında değişmektedir. İzolasyon kalınlığı artışı ile CO₂ emisyonu logaritmik olarak azalmaktadır.

Denizli ili için doğal gaz ile ısıtım ve soğutm maliyetlerinin toplamına baktığımızda sonuçlar kömürle ısıtılan binadakine benzer çıkmıştır. Enerji tasarrufu en yüksek cam yünü kullanımında elde edilmiştir. En az tasarruf ise poliüretan yalıtım malzemesi kullanıldığında elde edilmiştir (Şekil 13).



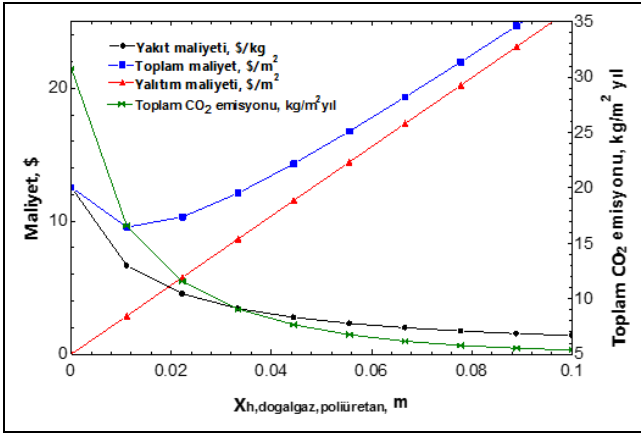
Şekil 9. Denizli ili doğalgaz ile ısıtılan EPS ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

Figure 9. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the EPS insulated building heated with natural gas in Denizli.



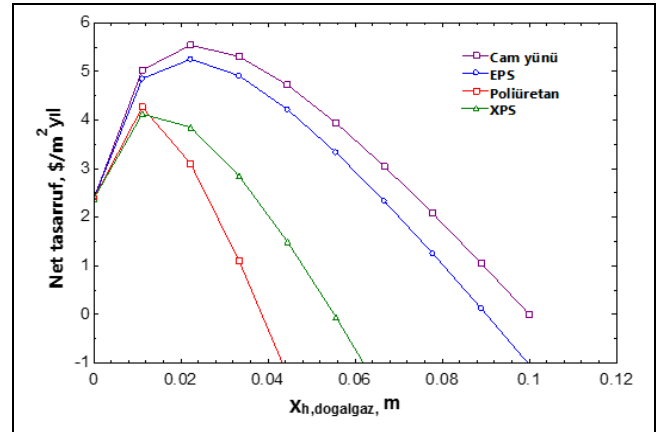
Şekil 12. Denizli ili doğalgaz ile ısıtılan XPS ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

Figure 12. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the XPS-insulated building heated with natural gas in Denizli.



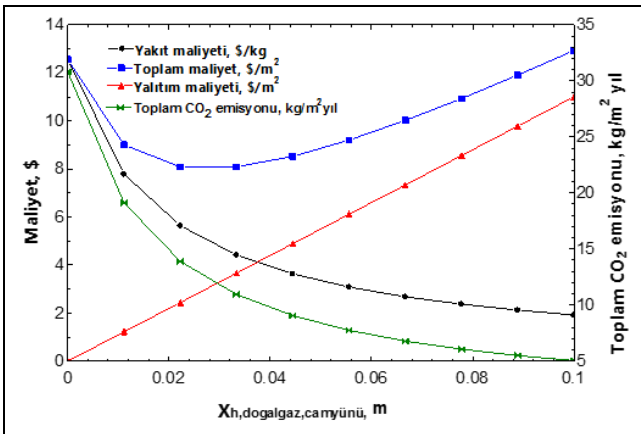
Şekil 10. Denizli ili doğalgaz ile ısıtılan poliüretan ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

Figure 10. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the building insulated with polyurethane heated with natural gas in Denizli.



Şekil 13. Denizli ili doğalgaz ile ısıtılan bina için enerji tasarrufları.

Figure 13. Energy savings for a building heated with natural gas in Denizli.



Şekil 11. Denizli ili doğalgaz ile ısıtılan cam yünü ile izole edilmiş bina için optimum izolasyon kalınlığı ve CO₂ emisyonu.

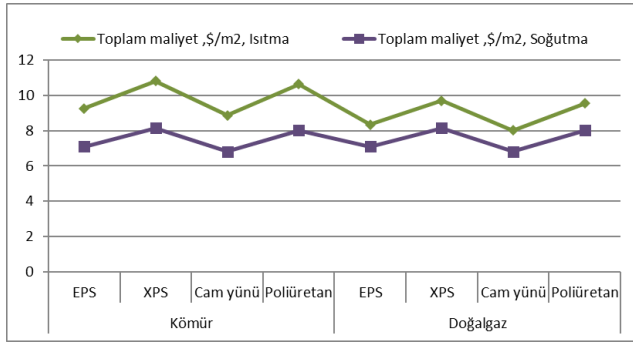
Figure 11. Optimum insulation thickness and CO₂ emission for the building insulated with glass wool heated with natural gas in Denizli.

Binaların dış duvarlarına yalıtım kalınlıklarını optimum kalınlıkta uygulamak önemli enerji tasarrufu sağlar. Şekil 14'te farklı yakıt sistemleri ve yalıtım malzemeleri için metre kare başına toplam ısıtma ve soğutma maliyetleri karşılaştırılmıştır. Soğutma sistemleri için sadece elektrik enerjisi kullanılırken, ısıtma için kömür ve doğalgaz kullanılmıştır. Hesaplamalarda enerji fiyatları yanında ısıtma ve soğutma sistemlerinin performansı da dikkate alınmıştır. Isıtma için enerjinin birim maliyeti $C_f/(H \eta)$ şeklinde hesaplanmıştır. Soğutma için enerjinin birim maliyeti $C_e/(COP)$ şeklinde hesaplanmıştır. Denizli ilinde iklimsel özellikler nedeniyle, genel olarak soğutmanın toplam maliyeti ısıtmaya göre daha düşüktür. Toplam yaz ve kış aylarında soğutma ve ısıtma maliyetlerinde genel olarak poliüretan kullanılan yapılar daha maliyetli çıkmıştır. Bir binanın ömrü boyunca yalıtımsız ve yalıtımlı durumdaki ısıtma maliyetleri arasındaki fark, o binanın enerji tasarrufunu verir. Tablo 6'da 10 yıllık bina için net tasarruf miktarı, optimum izolasyon kalınlıkları ve geri ödeme süreleri yaz aylarında ısıtma ve kış aylarında soğutma için verilmiştir. Kömür ve doğalgaz ile ısıtılan bir bina için en fazla enerji tasarrufu sırasıyla 9.20 ve 5.49 \$/m² olarak cam yünü izolasyon malzemesinde belirlenmiştir.

Tablo 6. Denizli için farklı izolasyon malzemesi ve yakıtlar için optimum izolasyon kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufu.

Table 6. Optimum insulation thickness, payback period and energy savings for different insulation materials and fuels for Denizli.

İzolasyon malzemesi	Isıtma				Soğutma			
	Yakıt	Optimum izolasyon kalınlığı, m	Enerji tasarrufu, \$/m ²	Geri ödeme süresi, yıl	Yakıt	Optimum izolasyon kalınlığı, m	Enerji tasarrufu, \$/m ²	Geri ödeme süresi, yıl
EPS	Kömür	0.0293	9.00	3.19	Elektrik	0.0203	2.65	3.92
	Doğalgaz	0.0255	5.20	3.27				
XPS	Kömür	0.0205	8.27	3.95	Elektrik	0.0131	1.61	4.87
	Doğalgaz	0.0174	4.10	3.95				
Cam yünü	Kömür	0.0313	9.20	3.01	Elektrik	0.0220	2.93	3.71
	Doğalgaz	0.0274	5.49	3.10				
Poliüretan	Kömür	0.0142	8.35	3.85	Elektrik	0.0091	1.73	4.75
	Doğalgaz	0.0121	4.23	3.87				



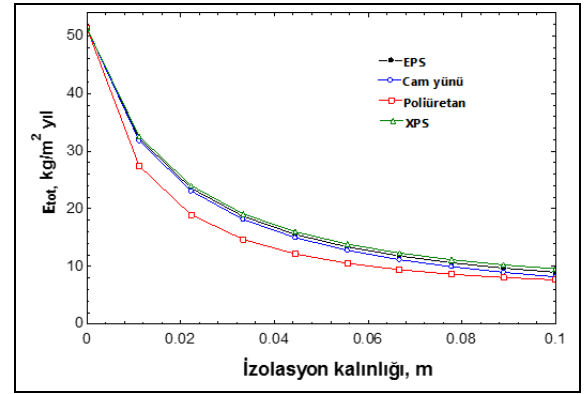
Şekil 14. Denizli ili farklı yakıt sistemleri ve yalıtım malzemeleri için metre kare başına toplam ısıtma ve soğutma maliyetleri.

Figure 14. Total heating and cooling costs per square meter for different fuel systems and insulation materials in Denizli.

Buna bağlı olarak en kısa geri ödeme süresi de 3.01 yıl ile cam yünü yalıtım malzemesi kullanımı ile elde edilmektedir. Yaz ayları için elektrik ile soğutma yapılması durumunda da en fazla enerji tasarrufu, 2.93 \$/m² değeri ile camyünü izolasyon malzemesi kullanımında elde edilmektedir. Daha kalın izolasyon malzemesi kullanımında, ilk yatırım masrafının yüksek olması maliyeti yükseltmekte, buna karşılık geri ödeme süresini kısaltmaktadır. Optimum kalınlıkta kullanılan izolasyon malzemeleri enerji tasarrufu açısından faydalıdır.

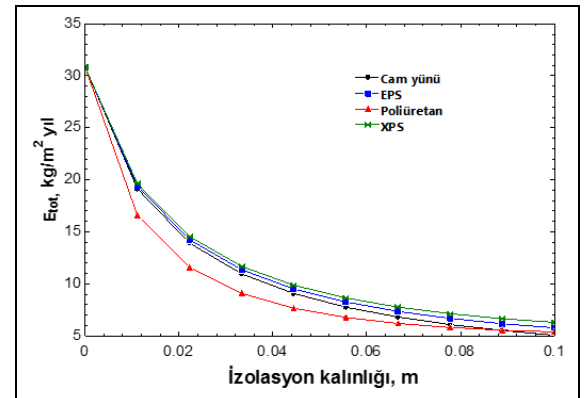
Şekil 15 ve 16'da Denizli ili için farklı yalıtım malzemeleri kullanıldığında kömür veya doğalgaz ile ısıtılan ve elektrik enerjisi ile soğutulan binalar için izolasyon kalınlığı ile CO₂ emisyonunun değişimini göstermektedir. İzolasyon kalınlığının artmasıyla CO₂ emisyonu logaritmik olarak azalmaktadır.

Isıtma kaynağı olarak hem kömür hem de doğalgaz kullanılan binalardaki CO₂ emisyonu en yüksek XPS izolasyon malzemesinde belirlenirken, onu EPS ve cam yünü izlemektedir. En düşük CO₂ emisyonu ise poliüretan izolasyon malzemesinde belirlenmiştir. Poliüretan yalıtım malzemesi kullanımı, XPS izolasyon malzemesi kullanımına göre, doğalgaz için yaklaşık %22, kömür için ise yaklaşık %24 oranında CO₂ emisyonunu azaltmaktadır.



Şekil 15. Yakıt olarak kömür kullanılan binalarda farklı yalıtım malzemelerinin CO₂ emisyonlarının izolasyon kalınlığı ile değişimi.

Figure 15. Insulation thickness versus CO₂ emissions for different insulation materials in buildings where coal used as fuel.

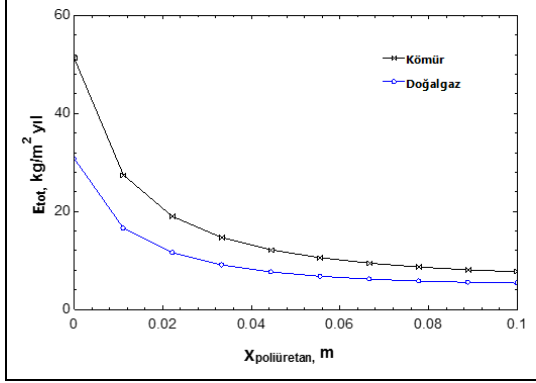


Şekil 16. Yakıt olarak doğalgaz kullanılan binalarda farklı yalıtım malzemelerinin, CO₂ emisyonlarının izolasyon kalınlığı ile değişimi.

Figure 16. Insulation thickness versus CO₂ emissions for different insulation materials in buildings where natural gas used as fuel.

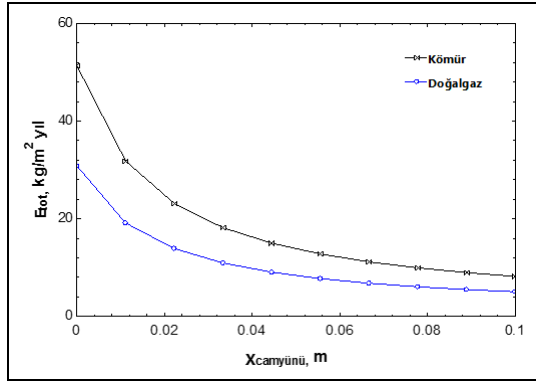
Şekil 17-20'de farklı izolasyon malzemelerinde farklı ısıtma kaynakları kullanımının CO₂ emisyonuna etkisi görülmektedir.

Her iki binada da soğutma kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanılmıştır. Isıtma kaynağı olarak kömür kullanılan binadaki CO₂ emisyonu, doğalgaz ile ısıtılan binaya göre poliüretan, cam yünü, EPS ve XPS izolasyon malzemelerinde sırasıyla yaklaşık %37.1, %39.5, %38.8 ve %38.4 kadar fazladır.



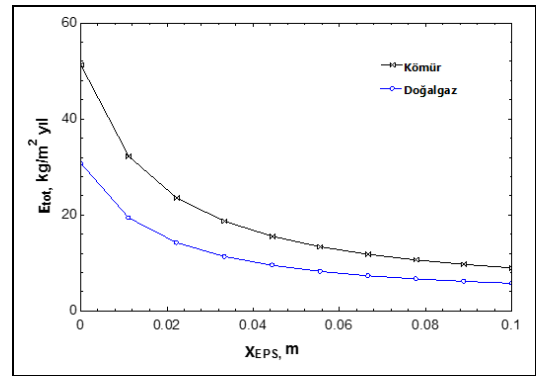
Şekil 17. Yalıtım malzemesi olarak poliüretan kullanılan binada farklı ısıtma kaynakları kullanımında CO₂ emisyonu.

Figure 17. Insulation thickness versus CO₂ emissions for different heating sources in buildings where polyurethane used as insulation material.



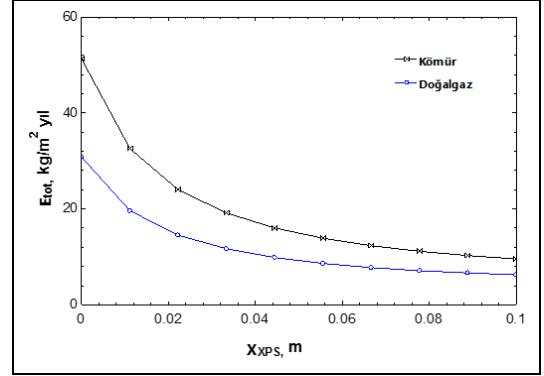
Şekil 18. Yalıtım malzemesi olarak camyünü kullanılan binada farklı ısıtma kaynakları kullanımında CO₂ emisyonu.

Figure 18. Insulation thickness versus CO₂ emissions for different heating sources in buildings where glass wool used as insulation material.



Şekil 19. Yalıtım malzemesi olarak EPS kullanılan binada farklı ısıtma kaynakları kullanımında CO₂ emisyonu.

Figure 19. Insulation thickness versus CO₂ emissions for different heating sources in buildings where EPS used as insulation material.



Şekil 20. Yalıtım malzemesi olarak XPS kullanılan binada farklı ısıtma kaynakları kullanımında CO₂ emisyonu.

Figure 20. Insulation thickness versus CO₂ emissions for different heating sources in buildings where XPS used as insulation material.

4 Tartışma

Bina duvarlarına uygulanan yalıtım kalınlığının artması, binalarda oluşacak olan ısı kaybını ve dolayısıyla yakıt tüketimini düşürecek, fakat ilk yatırım maliyetini arttıracaktır. Yalıtım kalınlığı arttıkça yalıtım maliyeti de sürekli olarak artacaktır. Toplam maliyet, izolasyonun belirlenen optimum değerine ulaşılan kadar azalacak, daha sonra artmaya başlayacaktır. Maliyeti minimum yapan optimum izolasyon kalınlığı, Denizli ili için kış aylarında ısıtma uygulaması için 0.012-0.031 m, yaz aylarında soğutma uygulaması için ise 0.009-0.022 m arasında değişmektedir. Yalıtım kalınlığındaki artışla birlikte, yıllık yakıt tüketimi azalacak ve buna bağlı olarak fosil yakıtlardan kaynaklanan hava kirliliği azalacaktır. Belirtilen koşullarda yalıtım malzemesi olarak cam yünü kullanılması %22-24 enerji tasarrufu sağlarken, poliüretan kullanılması %10-34 daha az CO₂ salımı sağlamaktadır. Enerji tasarrufu dikkate alındığında, yakıt olarak kömür kullanılması, doğalgaz kullanımına göre yaklaşık %9-11 daha ekonomiktir. Çevresel etki açısından ise yakıt olarak doğalgaz kullanılması, kömür kullanımına göre, %37-40 arası CO₂ emisyonu azlığı ile tercih edilebilir. Denizli ilinde CO₂ emisyonu için en düşük değer, yalıtım malzemesi olarak poliüretan kullanılan, ısıtma kaynağı olarak ise doğalgaz kullanılan yapılarda elde edilmektedir.

5 Discussion

Increasing the thickness of the insulation on the building walls, the heat loss that will occur in the buildings will reduce and therefore, the fuel consumption will reduce, but the initial investment cost will increase. As the insulation thickness increases, the cost of insulation increases continuously. The total cost will decrease until the insulation's optimum determined value is reached, then it will start to increase. The optimum insulation thickness, which makes the cost minimum, varies between 0.012-0.031 m for heating in the winter months and 0.009-0.022 m for cooling in the summer months. Increasing insulation thickness, annual fuel consumption reduces, and consequently, air pollution from the fossil fuels decreases. Using glass wool as insulation material provides 22-24% energy-saving, using polyurethane provides 10-34% less CO₂ emission under specified conditions. Considering energy savings, using coal as fuel is approximately 9-11% more economical than using natural gas. In terms of environmental

impact, using natural gas as fuel can be preferred with a 37-40% reduction in CO₂ emission compared to using coal. The lowest value for CO₂ emission in Denizli was obtained in buildings using polyurethane as insulation material and using natural gas as a heating source.

6 Kaynaklar

- [1] Dombaycı ÖA, Ozturk HK, Atalay Ö, Acar ŞG, Ulu EY. "The impact of optimum insulation thickness of external walls to energy saving and emissions of CO₂ and SO₂; for Turkey different climate regions". *Energy and Power Engineering*, 8(11), 327-348, 2016.
- [2] Açıkkalp E, Kandemir SY. "A method for determining optimum insulation thickness: Combined economic and environmental method". *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, 249-253, 2019.
- [3] BOTAŞ. "BOTAŞ Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı Sektör Raporu". Ankara, Türkiye, 2016.
- [4] TMMOB Makine Mühendisleri Odası. "Dünyada ve Türkiye'de Enerji Verimliliği Oda Raporu". Ankara, Türkiye, 589, 2012.
- [5] Evin D, Ucar A. "Energy impact and eco-efficiency of the envelope insulation in residential buildings in Turkey". *Applied Thermal Engineering*, 154, 573-584, 2019.
- [6] Kürekçi A, Bardakçı AT, Çubuk H, Emanet Ö. "Türkiye'nin tüm illeri için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi". *Tesisat Mühendisliği*, 131, 5-21, 2012.
- [7] Fantucci S, Garbaccio S, Lorenzati A, Perino M. "Thermoeconomic analysis of building energy retrofits using VIP - Vacuum Insulation Panels". *Energy and Buildings*, 196, 269-279, 2019.
- [8] D'Agostino D, de' Rossi F, Marigliano M, Marino C, Minichiello F. "Evaluation of the optimal thermal insulation thickness for an office building in different climates by means of the basic and modified "cost-optimal" methodology". *Journal of Building Engineering*, 24, 100743, 2019.
- [9] Yıldız A, Gürlek G, Erkek M, Özbalta N. "Economical and environmental analyses of thermal insulation thickness in buildings". *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28(2), 25-34, 2008.
- [10] Dombaycı, ÖA, Atalay Ö, Acar ŞG, Ulu EY, Ozturk HK. "Thermoeconomic method for determination of optimum insulation thickness of external walls for the houses: Case study for Turkey". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 1-8, 2017.
- [11] KaynaklıO. "Parametric investigation of optimum thermal insulation thickness for external walls". *Energies*, 4(12), 913-927, 2011.
- [12] 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.
- [13] Han Y, Zhu N. "Optimization of insulation thickness for external wall of residential buildings in cold regions of China based on life cycle cost analysis". *2010 IEEE 17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Xiamen, China, 29-31 October 2010.
- [14] Kayfeci M, Keçebaş A, Gedik E. "Determination of optimum insulation thickness of external walls with two different methods in cooling applications". *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 217-224, 2013.
- [15] Ghislain T, Cyrille Vincelas FF. "The determination of the most economical combination between external wall and the optimum insulation material in Cameroonians' buildings". *Journal of Building Engineering*, 9, 155-163, 2017.
- [16] Axaopoulos I, Axaopoulos P, Panayiotou G, Kalogirou S, Gelegenis J. "Optimal economic thickness of various insulation materials for different orientations of external walls considering the wind characteristics". *Energy*, 90, 939-952, 2015.
- [17] 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*, 43(6), 1055-1064, 2008.
- [18] Arslanoglu N, Yigit A. "Investigation of efficient parameters on optimum insulation thickness based on theoretical-Taguchi combined method". *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(6), 1824-1831, 2017.
- [19] Bayram M, Yeşilata B. "Isıtma ve soğutma derece gün sayılarının entegrasyonu". *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 06-09 Mayıs 2009.
- [20] Barrau J, Ibañez M, Badia F. "Impact of the optimization criteria on the determination of the insulation thickness". *Energy and Buildings*, 76, 459-469, 2014.
- [21] Kumar D, Zou PXW, Memon RA, Alam MDM, Sanjayan JG, Kumar S. "Life-cycle cost analysis of building wall and insulation materials". *Journal of Building Physics*, 43(5), 428-455, 2020.
- [22] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. "Isıtma ve Soğutma Gün Dereceleri". <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/gun-derece.aspx> (20.12.2017).
- [23] Meral Ö, Pıhtılı K. "Bina dış yüzeylerinin güneş ışınımını yutma oranlarının ısı akısı açısından araştırılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 167-171, 2011.
- [24] Yazıcı H. "Denizli ilinde bulunan bir binanın TS 825 hesap yöntemine göre yıllık ısı ihtiyacının, yakıt maliyetinin ve emisyon miktarının belirlenmesi". *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, 1(2), 29-38, 2011.
- [25] Axaopoulos I, Axaopoulos P, Gelegenis J, Fylladitakis ED. "Optimum external wall insulation thickness considering the annual CO₂ emissions". *Journal of Building Physics*, 42(4), 527-544, 2019.
- [26] Kaynaklı Ö, Kaynaklı F. "Determination of optimum thermal insulation thicknesses for external walls considering the heating, cooling and annual energy requirements". *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(1), 227-242, 2016.
- [27] Afif H. "Optimizing insulation thickness for building using life cycle cost". *Applied Energy*, 63, 115-124, 1999.