

Binaların Dış Duvarlarında Uygulanacak Yalıtımın Gömülü Enerjisine Bağlı Kalınlığı ve Isıl Atalet İndeksi

Okan KON
Balıkesir Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü, Çağış Kampüsü 10145, Çağış Balıkesir

e-mail: okan@balikesir.edu.tr, ORCID ID://orcid.org/0000-0002-5166-0258
The arrival date: 28.03.2023 ; Date of Acceptance: 18.05.2023

Öz

Çalışmada, yalıtım malzemesinin farklı gömülü enerjisine (üretim enerjisine) bağlı farklı yalıtımsız duvar ısı direncine bağlı yalıtım kalınlığı hesaplanmıştır. Son yıllarda binalarda kullanılan, yapı ve yalıtım malzemelerinin başlangıçtan, ham madde halinden ve kullanımına kadar olan tüm enerjileri kapsayan, gömülü veya üretim enerjileri bina enerji tüketim incelemelerinde önemli ölçüde dikkate alınmaya başlanmıştır. Isıl atalet indeksi yapı kabuğu yalıtım kalınlığının ile birlikte bina enerji tasarrufu analizlerinde dikkate alınması gerekli önemli parametrelerdendir. Çalışmada ek olarak, yalıtım malzemesinin kalınlığına ve farklı zaman dilimleri için ısıl atalet indeksi değerleri tespit edilmiştir. Isıtma sisteminde doğal gaz ve kömür kullanıldığı kabul edilmiştir. Yalıtım malzemesi olarak poliüretan alınmıştır. En yüksek yalıtım kalınlığı, 250 ısıtma günde $2.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ısıl dirençte 30 MJ/kg gömülü enerjide, 0.064 m olarak hesaplanmıştır. En düşük yalıtım kalınlığı ise 100 ısıtma günde $2.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ısıl dirençte 150 MJ/kg gömülü enerjide, 0.006 m olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler

Gömülü enerji;
Üretim enerjisi;
Yalıtım kalınlığı;
Isıl atalet indeksi;

The Thickness of Insulation to be Applied on The External Walls of Buildings Depends on Embodied Energy and Thermal Atalet Index

Abstract

In the study, the insulation thickness was calculated depending on the different embodied energy (production energy) of the insulation material and the wall thermal resistance. In recent years, embedded or production energies, which cover all the energies used in buildings, from raw materials to building and insulation materials, have begun to be considered in building energy consumption reviews. The thermal atalet index, together with the insulation thickness of the building envelope, is one of the essential parameters to be considered in building energy-saving analysis. In the study, thermal atalet index values were determined depending on the thickness of the insulation material for different periods. Natural gas and coal are assumed to be used in the heating system, and Polyurethane was taken as insulation material. The highest insulation thickness was calculated as 0.064 m for 250 heating days, $2.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ thermal resistance and 30 MJ/kg embodied energy. The lowest insulation thickness was 0.006 m for 100 heating days with $2.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ thermal resistance 150 MJ/kg embodied energy.

Keywords

Embodied energy;
Production energy;
Insulation thickness;
Thermal atalet index;

1.Giriş

Mevcut yapı stokundaki ısıtma ve soğutması için enerji tüketiminin azaltılması, günümüzde küresel sürdürülebilirlik için bir zorluktur ve binaların zarflarının güçlendirmesi ana konulardan biridir. Mevcut binaların zarflarının çoğu düşük yalıtım seviyeleri nedeniyle yüksek ısı kayıplara sahiptirler (Aste v.d. 2015). Mevcut iklimde, ısı yalıtımı, binalarda ısıtma veya soğutma için enerji tüketimini azaltmak, yapıların ve yapı elemanlarının ömrünü uzatmak ve insan konforunu artırmak için çok önemlidir (Malka v.d. 2022).

Mimari enerji tüketimine ilişkin kapsamlı değerlendirme yapıldığında, binaların üç aşamaya ayrılabilen tüm yaşam döngüsünü dikkate almalıdır. Bunlar kullanım öncesi aşama (gömülü enerji), kullanım aşaması (işletme enerjisi) ve kullanım sonrası aşamadır (yıkım veya olası geri dönüşüm ve yeniden kullanım) (Huberman ve Pearlmutter 2008). Bina enerji verimliliğine yönelik araştırmalar, esas olarak bir binanın sürekli kullanımı için gereken enerjiye odaklanırken, üretimde, gömülü veya üretim enerjisi genellikle göz ardı edilir. Bu tür bir yaklaşım, son yıllarda bir binanın termal performansını iyileştiren, ancak yüksek somutlaştırılmış enerji malzemelerine ve ürünlerine dayanan stratejilere yol açmıştır (Huberman ve Pearlmutter 2008). Özellikle 2100 yılına kadar 2 °C' küresel sıcaklık artışı nedeniyle, gömülü veya üretim enerji kullanımının gelecekteki politika hedeflerine dahil edilmesi önemlidir (Koezjakova v.d. 2018). Operasyonel enerji kullanımı düştükçe, somutlaştırılmış enerjinin genel tüketimi en aza indirmedeki rolünün giderek daha belirgin hale gelmektedir (Huberman ve Pearlmutter 2008).

Geleneksel olarak, bina kabuğu bileşenlerinin enerji verimliliği özellikleri, yalıtım kapasitesinin yalnızca inşaat malzemelerinin termal iletkenliğine dayandığı sabit durum kullanılarak belirlenir. Bina kabuğu bileşenlerinin termal ataletini kontrol ederek, bina termal, enerji verimliliği ve yangın performansı gibi bina performansının temel yönleri bütüncül bir şekilde değerlendirilebilir, böylece birbirini etkilemeden dengeli tasarım çözümleri

elde edilir (Soret v.d., 2021). Enerji bilincine sahip bina tasarımı, bina zarfının termofiziksel özelliklerinin, öncelikle termal geçirgenlik (ısı geçiş değeri) gibi kontrol edilmesinden oluşur. Bununla birlikte, ısı geçiş değerinin yanı sıra, zarf termal ataleti de dikkate alınmalıdır. Ayrıca, termal atalet etkilerinin, diğer enerji tasarrufu önlemleri ve verimli bir bina kullanımı ile birleştirilmesi durumunda arttığı gösterilmiştir (Aste v.d., 2009).

Çalışma ile ilgili literatürü incelediğimizde, koezjakova ve arkadaşları çalışmalarında, Hollanda'daki konuttaki en yaygın malzemelerin somutlaştırılmış enerji kullanımını içeren Gömülü Enerji Veri Tabanı Yönetim Sistemi (EEDMS) kullanılarak ısı talebi ile enerji kullanımı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır (Koezjakova v.d. 2018). Amiri ve arkadaşları, yaptıkları çalışmalarında, İzlanda'da bulunan beton binanın, isteğe bağlı üç yapı malzemesi senaryosu (optimize edilmiş beton, hibrit beton-ağaç ve ağaç binalar) için yaşam döngüsü değerlendirmesini kullanarak kullanım öncesi somutlaştırılmış emisyonlara ilişkin değerlendirmeler yapmışlardır (Amiri v.d., 2021). Zhang ve arkadaşları çalışmalarında, geri ödeme yaklaşımını kullanarak yaşam döngüsü değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyet analizi kullanılarak, İspanya, Hollanda ve İsveç için prefabrike beton eleman sisteminin enerji tasarrufu, karbon azaltımı ve maliyet düşürme yaşam döngüsü performansını incelemişlerdir (Zhang v.d., 2021). Huberman ve Pearlmutter çalışmalarında, güney İsrail'in Negev çöl bölgesinde bir binada hem somutlaştırılmış hem de operasyonel enerji tüketimini analiz ederek, binanın (kütle, yalıtım ve kaplama malzemeleri) enerji gereksinimlerini 50 yıllık yaşam döngüsü boyunca optimize edebilecek yapı malzemelerini olası alternatiflerini belirlememişlerdir (Huberman ve Pearlmutter 2008). Chen ve arkadaşları çalışmalarında, Sidney, Avustralya bir bina için, malzeme tipini ve kalınlığını göz önünde bulundurarak yalıtım sisteminin toplam gömülü enerjisi ile bina kabuğunun termal performansı arasındaki dengeyi bulmak için ortak bir yazılım ve uzantısını kullanan BIM tabanlı bir zarf yalıtım

optimizasyon tasarımını önermektedirler (Chen v.d. 2020). Soret ve arkadaşları çalışmalarında, yangına tepki performansını tahmin etmek için bina bileşenlerinin termal ataletini ve termal yalıtım parametrelerinden elde etmek için sayısal bir model kullanan bütüncül bir değerlendirme yöntemi önerilmiştir (Soret v.d. 2020). Xiao and Zhang çalışmalarında, konutların bina zarfı termal performansının sıcak-yaz ve soğuk-kış alanındaki değerlendirme yöntemi, soğuk kuzey bölgelerinin yönteminde de termal atalet endeksinin bina zarfının termal performansı üzerindeki etkisi de dikkate alınarak, duvarların ve çatıların termal performansının ısı transfer katsayısı veya termal direnç ile belirlenmemesi gerektiğini belirlemişlerdir (Xiao ve Zhang 2013). Yang and Tang yaptıkları çalışmada, Almanya'da yeni inşa edilen bir dairenin enerji tüketimi üzerindeki farklı mineral elyaf, poliüretan ve vakum yalıtım panelini içeren üç farklı dış duvar yalıtım malzemelerinin etkisi araştırılmıştır. İzolasyon malzemelerinin üretimi ve bina alanı ısıtması için birincil enerji kullanımını incelemek için bir enerji analiz modeli oluşturulmuştur. Böylece, her bir yalıtım malzemesi için optimum yalıtım kalınlıkları ve türü için en düşük toplam enerji tüketimini elde edilmiştir (Yang ve Tang 2017). Reddy ve Jagadish çalışmalarında, Hindistan'daki binalarda, temel yapı malzemelerinin (çimento, çelik vb.) üretiminde enerji tüketimi ve inşaatta kullanılan farklı malzeme türleri için yapı malzemelerinin somutlaşmış enerjileri incelenmiştir. Çalışmada somutlaşmış enerjisinin, enerji verimli/alternatif yapı malzemeleri kullanıldığında %50 oranında azaltılabileceği gösterilmiştir (Reddy ve Jagadish 2003). Asdrubali ve arkadaşları çalışmalarında duvar blokları ve beton paneller gibi duvar yapı ürünlerinin yaklaşık 180 Çevre Ürünleri Beyanı kullanarak analiz etmişlerdir. Birincil enerji (yenilenebilir ve yenilenebilir) ve küresel ısınma potansiyeli ile ilgili veriler bina blok düzeyinde karşılaştırılmıştır. Böylece tasarımcıların ve üreticilerin erken tasarım aşamasında duvar ürünlerinden kaynaklanan etkileri hakkında bilgi vermişlerdir (Asdrubali v.d. 2023). Grazieschi ve arkadaşları yapı yalıtım

malzemelerinin somutlaşmış enerjisi ve karbonu hakkında, 223 Çevresel Ürün Beyanı'ndan alınan 156 değer kapsamlı incelemesi yapmışlardır. Yenilikçi ve gelişmekte olan yalıtım malzemelerine dikkat edilerek incelemişlerdir (Grazieschi v.d. 2021). Roh ve arkadaşları çalışmalarında, Güney Kore'deki 443 apartman binasının tasarım ve malzeme listeleri analiz edilerek yapı malzemelerinin somutlaşmış çevresel etkilerini dikkat alarak, binaların çevresel etkilerinin azaltmak amacıyla kullanım ömrü içeren bir yaşam döngüsü senaryolarına göre altı tip ana yapı malzemelerinin (hazır beton, donatı çeliği, beton tuğla, cam, yalıtım ve alçıtaşı) analizlerini yapmışlardır (Roh v.d. 2018). Nearing ve arkadaşları, toprak yüzeyinin yakınında ısının homojen 1-D difüzyonunu varsayarak toprak termal ataletini tahmin etmek için günlük radyasyon ve spesifik nemine bağlı iki günlük yüzey sıcaklığı ölçümü kullanmışlardır (Nearing v.d. 2012). Aste ve arkadaşları çalışmalarında, farklı dinamik özelliklere sahip birkaç dış duvar sistemi için termal ataletin rolünü artıran parametreleri araştırmışlardır (Aste v.d. 2009). Aste ve arkadaşları çalışmalarında, İtalyan daki bir ofis binası için bina zarfının (çatı, duvarlar ve zeminler) farklı güçlendirme senaryolarına bağlı dinamik termal özelliklerinin ısıtma ve soğutma enerjisi talebi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir (Aste v.d. 2015). Stéphan ve arkadaşları çalışmalarında, yüksek gözenekli kireçtaşı eski binalarda yalıtımın yaz termal ataletini üzerine etkisi değerlendirmişlerdir. Çalışmada, yalıtımından önce ve sonraki verilerinin kullanılarak, termal ataleti incelemişlerdir (Stéphan v.d. 2013). Gagliano ve arkadaşları çalışmalarında, Katanya'da (İtalya) Villa San Saverio'da bulunan büyük bir binanın doğal havalandırma ve termal ataletin kombinasyonu ile termal davranışının incelenmiştir. Çalışmada sonuç olarak, doğal havalandırma ile yüksek termal atalet kütesinin aşırı ısınma olaylarını önlediğini ve binalarda iyi konfor seviyeleri sağladığını ve yaz döneminde soğutma sistemlerinin ihtiyaçlarını azalttığını göstermektedir (Gagliano v.d. 2014). Bellahcene ve arkadaşları çalışmalarında, değişen iklim koşullarında dört konfigürasyona sahip çok katmanlı bir duvarın termal davranışını

incelemişlerdir. Termal atalet, özellikle katman sıcaklıkları üzerindeki etkisini anlamak için sayısal bir simülasyon kullanılmıştır. Çalışma, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kodu kullanılarak 2D kararsız durumda ısı transferinin modellenmesi kullanılmıştır (Bellahcene v.d. 2017). Acharya ve arkadaşları çalışmalarında, kaldırım yapımında kullanılan iki önemli kaplama malzemesi olan asfalt ve beton için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri kullanılarak aynı boyutlarda ve aynı ortam koşullarında albedo ve termal atalet değerlerinin değişimi incelenmiştir (Acharya v.d. 2021). Kon ve Caner çalışmalarında, taş kaplı ve toprak kaplı kullanılan ve kullanılmayan düz çatı tipleridir üç farklı düz yüzey için optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. Dış ortam sıcaklığı, kışın ayı için en soğuk olan ocak ayının değeri ve yazın en sıcak ay olan temmuz ayının değeri ile güneş radyasyonu kullanılmıştır. Düz çatı yüzeyler taş kaplı ve toprak kaplı siyah boyalı ile mermer ve izolasyon malzemesi olarak ekstrüde polistiren (XPS) kabul edilir (Kon ve Caner, 2023). Kon ve Yüksel yaptıkları çalışmada, Türkiye'nin kuzeybatı kesiminde yer alan Balıkesir Üniversitesi rektörlük binasının optimum yalıtım kalınlığına sahip dış duvara için binanın enerji tüketimi, ısıtma + soğutma (yıllık) dönemlerinde teorik ve pratik olarak belirlenmişlerdir (Kon ve Yüksel, 2019). Kon ve Yüksel yaptıkları diğer bir çalışmada, 7 katlı bir ana bina ve ana binaya bağlı tek katlı bir matbaadan oluşan örnek binanın çatısı, zeminleri ve dış duvarları için ısıtma, soğutma ve ısıtma+soğutma periyotları için optimum kalınlık, yakıt tüketimi ve yakıt tasarrufu ayrı ayrı hesaplanır. İzolasyon malzemesi için ekstrüde polistiren kullanılır; elektrik soğutma sistemi için kullanılırken, doğal gaz ısıtma sistemi için yakıt olarak kullanılmıştır. Hesaplamalar derece-gün yöntemine ve yaşam döngüsü-maliyet analizine göre yapılmıştır. Hesaplamalar yapılırken, ısıtma merkezine yerleştirilir ve 1 yıl boyunca ölçümler kullanılmıştır (Kon ve Yüksel 2016). Anh ve Pászory çalışmalarında, bazı yaygın, alternatif ve yeni ileri yalıtım malzemeleri için ısıl iletkenlik katsayısını etkileyen faktörler incelenmiştir. En yaygın faktörler nem içeriği, sıcaklık farkı ve yoğunluk ve

bunu dışında hava akış hızı, kalınlık, basınç ve malzeme yaşlanması gibi bazı diğer faktörler dikkate alınmıştır (Anh ve Pászory 2021). Axaopoulos ve arkadaşları çalışmalarında Yunanistan'ın Atina şehri deki örnek binada hem ısıtma hem de soğutma periyodu için üç farklı duvar tipi ile yalıtım malzemesi ve yöndeki dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır (Axaopoulos v.d. 2019). Liu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, toprak ve su faz değişiminin etkisi olan ve olmayan iki farklı Nelder-Mead algoritması kullanan iletken ısı transfer modelinin kullanmışlardır. Bu model ile gömülü boruların donmasından korunmak için dolgu malzemeleri, geometri, toplam uzunluk, yalıtım kalınlığı, boru ve yalıtım arasındaki mesafe ve borunun gömme derinliği gibi farklı faktörlerin ısıl performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, faz değişimi sırasında açığa çıkan gizli ısının ısı transfer sürecini önemli ölçüde etkilediği ve faz değişiminin yalıtım tasarımı üzerindeki etkisinin göz ardı edilmemesi gerektiği tespit edilmiştir (Liu v.d. 2019). Aytaç ve Aksoy yaptıkları çalışmada, Elazığ ili için, beş farklı yakıt türü (kömür, doğalgaz, fuel oil, LPG, elektrik) ve iki farklı yalıtım malzemesi (expande polistiren, taşyünü) için optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar dıştan yalıtımlı ve sandviç duvar olmak üzere iki farklı duvar modeli üzerinde yapılmıştır (Aytaç ve Aksoy, 2006). Axaopoulos ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Yunanistan'ın Atina'daki hem ısıtma hem de soğutma süresini ve rüzgâr hızını ve yönünü dikkate alarak, farklı bileşim ve yöndeki dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlığını belirlenmiştir. Üç tip kompozit, ısı yalıtımlı duvar seçilmiştir (Axaopoulos v.d. 2016). Malka ve arkadaşları çalışmalarında, Arnavutluk'taki farklı bina için Mathcad yazılımını kullanarak dört farklı yalıtım malzemesi (yani, EPS, Grafit, EPS, GW ve RW) ve beş enerji (elektrik, dizel, doğal gaz, sıvılaştırılmış petrol gazı ve biyokütle) için optimize edilmiş yalıtım kalınlıkları hesaplanmışlardır (Malka v.d. 2022).

Çalışmanın amacı, yalıtım malzemesinin 30, 50, 70, 100, 150 MJ/kg gömülü enerjisine (üretim enerjisine) bağlı farklı yalıtımsız duvar ısıl direncine

bağlı yalıtım kalınlığını tespit etmektir. Ek olarak, yalıtım malzemesi kalınlığına ve 60 saniye (1 dakika), 3600 saniye (1 saat) ve 86400 saniye (24 saat) için atalet indeksi değerleri bulunmuştur. Yalıtım malzemesi olarak poliüretan kullanılmıştır. Isıtma sisteminde doğal gaz ve kömür kullanıldığı kabul edilmiştir. Literatürde genel olarak duvarlar için ömür maliyet analizine dayalı optimum yalıtım kalınlığı hesaplamaları yapılmıştır. Bu çalışmada yalıtım malzemesinin gömülü enerjisine (üretim enerjisine) bağlı yalıtım kalınlığı hesaplanmıştır. Bununla birlikte yalıtım malzemesinin termal atalet indeksi tespit edilmiştir. Bu iki parametreyi birlikte hesaplanması ve incelenmesi ile literatüre katkı sağlanmış olacaktır.

2. Materyal ve Metot

Yıllık toplam ısıtma enerji yükü, ısıtma yükü ile yalıtımın gömülü enerjisine bağlı enerji değeri toplamına eşittir. Yalıtım malzemesinin gömülü enerjisine bağlı enerji yükü, yoğunluğa, ısı iletim katsayısına ve gömülü enerjiye bağlıdır. Isıtma sistemi yükü dış duvarın ısı transfer katsayısına, ısıtma gün sayısına, ısıtma sistemi verimine bağlıdır [Yang ve Tang 2017].

$$E_{Top} = E_{Isıtma} + E_{Yalıtım} \quad (1)$$

$$E_{Isıtma} = \frac{U \cdot ISG \cdot 24 \cdot N}{\eta_{Isıtma} \cdot 1000} \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{R_{duvar}} + \frac{x_{yalıtım}}{\lambda_{yalıtım}} + \frac{1}{\alpha_{dış}}} \quad (3)$$

$$E_{Yalıtım} = \frac{\rho_{yalıtım} \cdot \lambda_{yalıtım} \cdot GE_{yalıtım} \cdot 1000}{3600} \quad (4)$$

$$E_{Top} = \frac{U \cdot ISG \cdot 24 \cdot N}{\eta_{Isıtma} \cdot 1000 \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{R_{duvar}} + \frac{x_{yalıtım}}{\lambda_{yalıtım}} + \frac{1}{\alpha_{dış}} \right)} + \frac{\rho_{yalıtım} \cdot \lambda_{yalıtım} \cdot GE_{yalıtım} \cdot 1000}{3600} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 E_{Top}}{\partial x_{yalıtım}^2} = \frac{2 \cdot ISG \cdot 24 \cdot N \cdot \lambda_{yalıtım}}{\eta_{Isıtma} \cdot 1000 \cdot \left[\left(\frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{R_{duvar}} + \frac{x_{yalıtım}}{\lambda_{yalıtım}} + \frac{1}{\alpha_{dış}} \right) \right]^3} \quad (6)$$

$$x_{yalıtım} = \left[-\lambda_{yalıtım} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{R_{duvar}} + \frac{1}{\alpha_{dış}} \right) \right] + \sqrt{\frac{3 \cdot 6 \cdot ISG \cdot 24 \cdot N \cdot \lambda_{yalıtım}}{1000 \cdot \eta_{Isıtma} \cdot \rho_{yalıtım} \cdot GE_{yalıtım}}} \quad (7)$$

Burada, U tüm duvarın ısı transfer katsayısı (W/m².K), $\alpha_{iç}$ (0.13 m².K/W) ve $\alpha_{dış}$ (0.04 m².K/W) iç ve dış ortam yüzeysel ısı dirençleri, GE yalıtım malzemesinin gömülü enerjisini veya üretim enerjisi (MJ/kg), $\eta_{Isıtma}$ ısıtma sistemi verimini, ISG ısıtma gün sayısını, N yalıtım malzemesinin ömrünü (çalışmada 10 yıl alınmıştır), R_{duvar} yalıtım dışındaki duvar malzemelerinin toplam ısı direncini (m².K/W), $\lambda_{yalıtım}$ yalıtım malzemesinin (poliüretan) ısı iletim katsayısı (W/m.K), $E_{Isıtma}$ ısıtma sistemi enerji ihtiyacını, $E_{Yalıtım}$ yalıtım malzemesinin üretim enerjisini, E_{Top} toplam enerji tüketimini ve $x_{yalıtım}$ yalıtım kalınlığını göstermektedir. Bazı farklı yalıtım malzemelerinin gömülü veya üretim enerjileri örnek verilecek olursa; ekspande polistiren için 115 MJ/kg, ekstrüde polistiren için 113 MJ/kg ve mineral yünü 23 MJ/kg dir [Koezjakova v.d. 2018]. Çalışmada, poliüretan yalıtım malzemesi referans olarak alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre yalıtım malzemesinin gömülü enerji veya üretim enerji değerleri farklı alınmıştır. Böylece, yalıtım malzemesinin gömülü enerji veya üretim enerjisi 30, 50, 70, 100, 150 MJ/kg alınarak gömülü veya üretim enerjiye bağlı yalıtım kalınlığının nasıl değişeceği incelenmiştir.

$$S_{yalıtım} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot \lambda_{yalıtım} \cdot C_{yalıtım} \cdot \rho_{yalıtım}}{T}} \quad (8)$$

$$D = \sum_{i=1}^n R \cdot S \quad (9)$$

Burada, duvardaki her bir katmanın S ısı koruma kapasitesi (W/m².K), λ yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/m.K), C özgül ısı (J/kg.K), ρ yalıtım malzemesinin yoğunluğu (kg/m³) ve T zaman (saniye) göstermektedir. D termal atalet indeksi ve R duvardaki her bir katmanın ısı direnci (m².K/W) dir [Xiao ve Zhang 2013].

Tablo 1. Hesaplamalarda kullanılan Parametreler
(Yang ve Tang 2017, Kon ve Yüksel 2016, Aytaç ve Aksoy, 2006)

Parametre	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı İletim Katsayısı (W/m ² .K)	Gömülü Enerji (Üretim Enerjisi) (MJ/kg)	Spesifik Enerji (J/Kg.K)
Poliüretan Yalıtım Malzemesi	30	0.025	134	1400
Isıtma Sistemi Verimi	Kömür için % 65		Doğal Gaz için % 93	

3. Sonuçlar ve Tartışma

Yakıt olarak doğal gaz kullanıldığında, 100 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.005 m, 50 MJ/kg, 0.8 m². K/W ısı dirençte 0.004 m, 70 MJ/kg, 0.9 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 100 MJ/kg, 1.1 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 150 MJ/kg, 1.4 m². K/W ısı dirençte 0.001 m hesaplanmıştır. 150 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.008 m, 50 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.002 m, 70 MJ/kg, 0.7 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 100 MJ/kg, 0.9 m². K/W ısı dirençte 0.002 m, 150 MJ/kg, 1.1 m². K/W ısı dirençte 0.001 m hesaplanmıştır. 200 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.4 m². K/W ısı dirençte 0.005 m, 50 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 70 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 100 MJ/kg, 0.9 m². K/W ısı dirençte 0.004 m, 150 MJ/kg, 1.0 m². K/W ısı dirençte 0.003 m hesaplanmıştır. 250 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.4 m². K/W ısı dirençte 0.014 m, 50 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.008 m, 70 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.007 m, 100 MJ/kg, 0.7 m². K/W ısı dirençte 0.004 m, 150 MJ/kg, 0.8 m². K/W ısı dirençte 0.001 m hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer yalıtım kalınlıkları Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1. Yakıt olarak doğal gaz kullanımında a) 100 ısıtma günü, b) 150 ısıtma günü, c) 200 ısıtma günü ve d) 200 ısıtma günü için yalıtım malzemesinin gömülü enerjisine bağlı yalıtım kalınlığı değişimi grafikleri gösterilmiştir.

Yakıt olarak kömür kullanıldığında, 100 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.007 m, 50 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 70 MJ/kg, 0.8 m². K/W ısı dirençte 0.004 m, 100 MJ/kg, 0.9 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 150 MJ/kg, 1.1 m². K/W ısı dirençte 0.001 m hesaplanmıştır. 150 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.4 m². K/W ısı dirençte 0.008 m, 50 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.004 m, 70 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.003 m, 100 MJ/kg, 0.7 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 150 MJ/kg, 0.9 m². K/W ısı dirençte 0.002 m hesaplanmıştır. 200 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.4 m². K/W ısı dirençte 0.020 m, 50 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.012 m, 70 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.002 m, 100 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.001 m, 150 MJ/kg, 0.8 m². K/W ısı dirençte 0.003 m hesaplanmıştır. 250 gün ısıtma yapıldığında gömülü enerji (üretim enerjisi) 30 MJ/kg, 0.3 m². K/W ısı dirençte 0.009 m, 50 MJ/kg, 0.4 m². K/W ısı dirençte 0.008 m, 70 MJ/kg, 0.5 m². K/W ısı dirençte 0.009 m, 100 MJ/kg, 0.6 m². K/W ısı dirençte 0.007 m, 150 MJ/kg, 0.7 m². K/W ısı dirençte 0.003 m hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer yalıtım kalınlıkları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2. Yakıt olarak doğal gaz kullanımında a) 100 ısıtma günü, b) 150 ısıtma günü, c) 200 ısıtma günü ve d) 200 ısıtma günü için yalıtım malzemesinin gömülü enerjisine bağlı yalıtım kalınlığı değişimi grafikleri gösterilmiştir.

Isıtma gün sayısı ve duvar ısı direnç artışı ile yalıtım kalınlığının artışı doğru orantılıdır. Isıtma gün sayısı ve ısı direnç arttıkça yalıtım kalınlığı artmaktadır. Fakat gömülü enerji (üretim enerji) artışı ile yalıtım kalınlığının artışı ters orantılıdır. Gömülü enerji (üretim enerji) arttıkça yalıtım kalınlığı azalmaktadır. Yalıtım kalınlığında ısıtma gün sayısı, duvar ısı direnci ve gömülü enerji (üretim enerjisi) önemli parametrelerdir.

Yakıt olarak doğal gaz kullanıldığında 60 saniyede (1 dakikada) ısı atalet indeksi 100 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.6 m².K/W ısı direnç için 2.096, 70 MJ/kg gömülü enerjiye

bağlı olarak 0.9 m².K/W ısıl direnç için 0.419, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 1.4 m².K/W ısıl direnç için 0.419 hesaplanmıştır. 150 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.5 m².K/W ısıl direnç için 3.354, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.8 m².K/W ısıl direnç için 0.419, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 1.1 m².K/W ısıl direnç için 0.419 hesaplanmıştır. 200 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 2.096, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 0.419, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.9 m².K/W ısıl direnç için 0.042 hesaplanmıştır. 250 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 5.869, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 2.934, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.8 m².K/W ısıl direnç için 0.419 hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer değerler Tablo 2 de verilmiştir. Tablo 2’de doğal gaz yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için Isıl atalet indeksi gösterilmiştir. 3600 saniyede (1 saatte) ısıl atalet indeksi 100 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 0.271, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.9 m².K/W ısıl direnç için 0.054, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 1.4 m².K/W ısıl direnç için 0.054 hesaplanmıştır. 150 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.5 m².K/W ısıl direnç için 0.433, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.7 m².K/W ısıl direnç için 0.054, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 1.1 m².K/W ısıl direnç için 0.054 hesaplanmıştır. 200 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 0.271, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 0.054, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.9 m².K/W ısıl direnç için 0.005 hesaplanmıştır. 250 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 0.758, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 0.379, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.8 m².K/W ısıl direnç için 0.054 hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer değerler Tablo 3 de verilmiştir. Tablo 3’te Doğal gaz yakıt için, Isıtma gün sayısı,

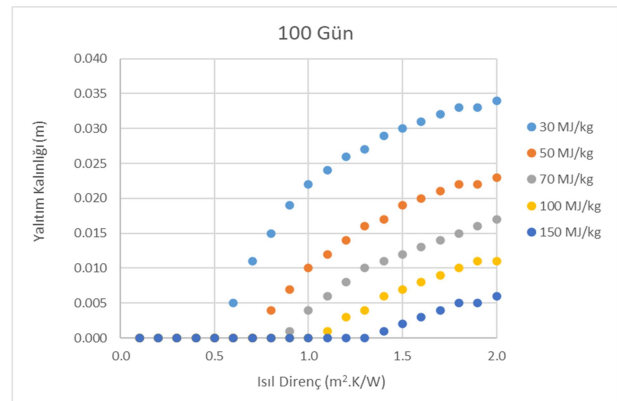
gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için Isıl atalet indeksi gösterilmiştir. 86400 saniyede (1 günde) ısıl atalet indeksi 100 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 0.055, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.9 m².K/W ısıl direnç için 0.011, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 1.4 m².K/W ısıl direnç için 0.011 hesaplanmıştır. 150 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.5 m².K/W ısıl direnç için 0.088, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.7 m².K/W ısıl direnç için 0.011, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 1.1 m².K/W ısıl direnç için 0.011 hesaplanmıştır. 200 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 0.055, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 0.011, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.9 m².K/W ısıl direnç için 0.001 hesaplanmıştır. 250 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 0.155, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 0.077, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.8 m².K/W ısıl direnç için 0.011 hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer değerler Tablo 4 de verilmiştir. Tablo 4 doğal gaz yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için Isıl atalet indeksi gösterilmiştir.

Yakıt olarak kömür kullanıldığında 60 saniyede (1 dakikada) ısıl atalet indeksi 100 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.5 m².K/W ısıl direnç için 2.034, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.8 m².K/W ısıl direnç için 1.677, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 1.1 m².K/W ısıl direnç için 0.419 hesaplanmıştır. 150 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 3.354, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.6 m².K/W ısıl direnç için 1.258, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.9 m².K/W ısıl direnç için 0.838 hesaplanmıştır. 200 ısıtma günü için 30 MJ/kg gömülü enerjisine bağlı olarak 0.4 m².K/W ısıl direnç için 8.384, 70 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak 0.5 m².K/W ısıl direnç için 0.838, 150 MJ/kg gömülü enerjiye bağlı

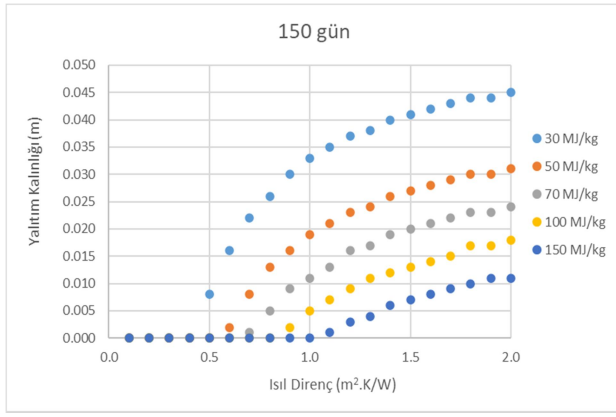
olarak $0.8 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 1.258 hesaplanmıştır. 250 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.3 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 3.773 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 3.773 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.7 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 1.258 hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer değerler Tablo 5 de verilmiştir. Tablo 5'te kömür yakıt için, ısıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısı direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için ısı atalet indeksi gösterilmiştir. 3600 saniyede (1 saatte) ısı atalet indeksi 100 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.379 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.8 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.216 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $1.1 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.054 hesaplanmıştır. 150 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.4 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.433 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.162 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.9 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.108 hesaplanmıştır. 200 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.4 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 1.082 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.108 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.8 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.162 hesaplanmıştır. 250 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.3 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.487 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.487 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.7 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.162 hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer değerler Tablo 6 da verilmiştir. Tablo 6'da kömür yakıt için, ısıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısı direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için ısı atalet indeksi gösterilmiştir. 86400 saniyede (1 günde) ısı atalet indeksi 100 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.077 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.8 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.044 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $1.1 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.011 hesaplanmıştır. 150 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.4 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.088 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.033 , 150

MJ/kg gömülü enerjiye bağlı olarak $0.9 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.022 hesaplanmıştır. 200 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.4 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.221 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.022 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.8 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.033 hesaplanmıştır. 250 ısıtma günü için $30 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjisine bağlı olarak $0.3 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.099 , $70 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.099 , $150 \text{ MJ}/\text{kg}$ gömülü enerjiye bağlı olarak $0.7 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ısı direnç için 0.033 hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer değerler Tablo 7 de verilmiştir. Tablo 7 de kömür yakıt için, ısıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısı direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için ısı atalet indeksi gösterilmiştir.

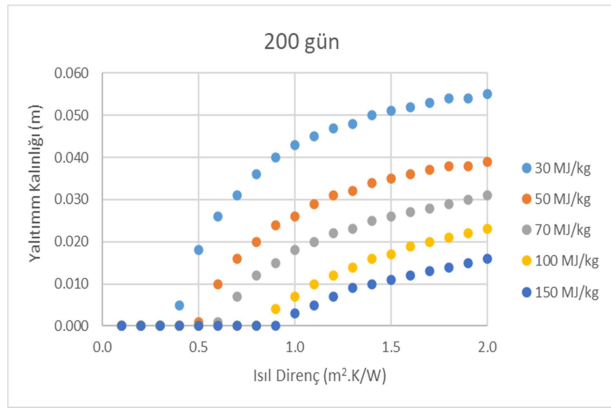
Tüm ısıtma gün değerleri ve her iki yakıt türü için yalıtım malzemesinin gömülü enerjisi artması ile daha yüksek duvar ısı dirençlerinde ısı atalet indeksi değeri hesaplanmaya başlamaktadır. Tüm zaman dilimleri için (1 dakika, 1 saat ve 1 gün) tüm ısıtma gün sayılarında aynı duvar ısı direnç değerlerinde ısı atalet indeksi tespit edilmiştir. ısı atalet indeksinde zaman diliminden çok yalıtım malzemesinin gömülü enerjisi (üretim enerjisi) etkili parametredir.



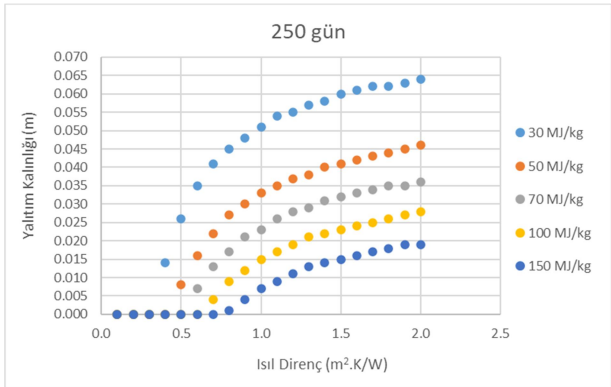
(a)



(b)

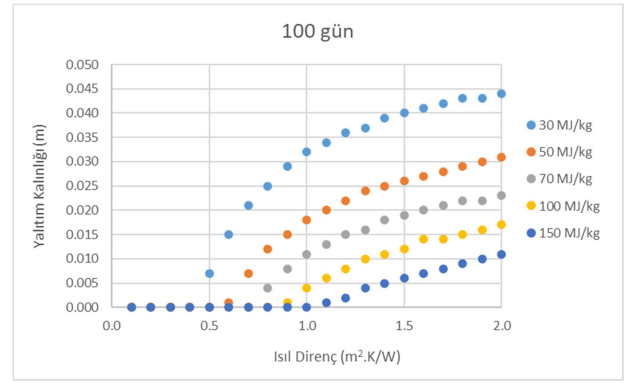


(c)

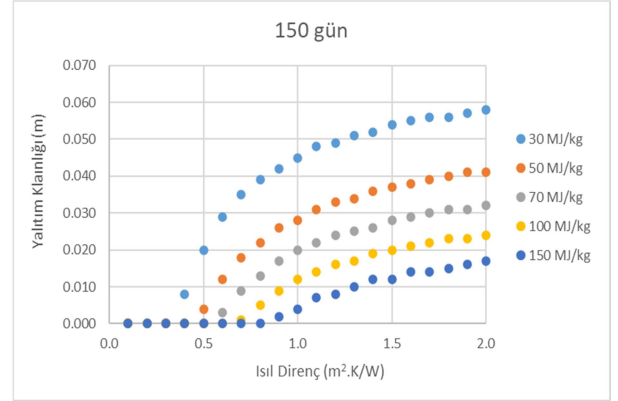


(d)

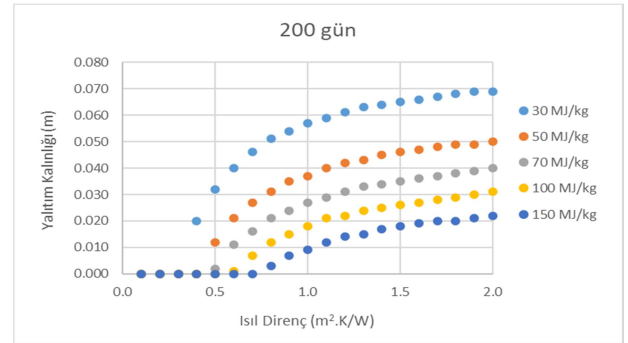
Şekil 1. Yakıt olarak doğal gaz kullanımında a) 100 ısıtma günü, b) 150 ısıtma günü, c) 200 ısıtma günü ve d) 250 ısıtma günü için yalıtım malzemesinin gömülü enerjisine bağlı yalıtım kalınlığı değişimi grafikleri



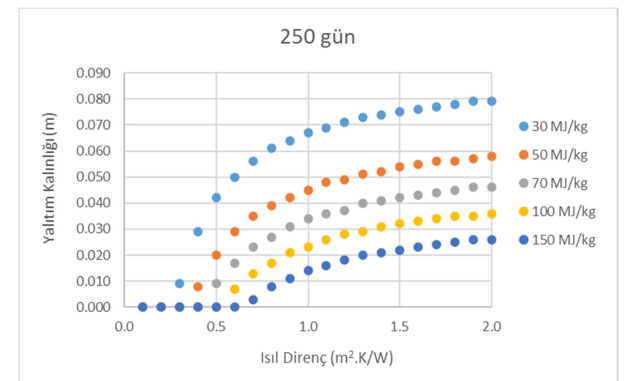
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2. Yakıt olarak kömür kullanımında a) 100 ısıtma günü, b) 150 ısıtma günü, c) 200 ısıtma günü ve d) 250 ısıtma günü için yalıtım malzemesinin gömülü enerjisine bağlı yalıtım kalınlığı değişimi grafikleri

Tablo 2. Doğal gaz yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için Isıl atalet indeksi

Isıl Direnç (m ² .K/W)	Isıtma Gün Sayısı					
	100 gün			200 gün		
	Gömülü Enerji					
	30	70	150	30	70	150
	60 saniye					
0.1	---	---	---	---	---	---
0.2	---	---	---	---	---	---
0.3	---	---	---	---	---	---
0.4	---	---	---	2.096	---	---
0.5	---	---	---	7.546	---	---
0.6	2.096	---	---	10.899	0.419	---
0.7	4.611	---	---	12.995	2.934	---
0.8	6.288	---	---	15.091	5.030	---
0.9	7.965	0.419	---	16.768	6.288	0.042
1.0	9.222	1.677	---	18.026	7.546	1.258
1.1	10.061	2.515	---	18.864	8.384	2.096
1.2	10.899	3.354	---	19.702	9.222	2.934
1.3	11.318	4.192	---	20.122	9.642	3.773
1.4	12.157	4.611	0.419	20.960	10.480	4.192
1.5	12.576	5.030	0.838	21.379	10.899	4.611
1.6	12.995	5.450	1.258	21.798	11.318	5.030
1.7	13.414	5.869	1.677	22.218	11.738	5.450
1.8	13.834	6.288	2.096	22.637	12.157	5.869
1.9	13.834	6.707	2.096	22.637	12.576	6.288
2.0	14.253	7.126	2.515	23.056	12.995	6.707

Tablo 3. Doğal gaz yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 3600 saniye (1 saat) için Isıl atalet indeksi

Isıl Direnç (m ² .K/W)	Isıtma Gün Sayısı					
	100 gün			200 gün		
	Gömülü Enerji					
	30	70	150	30	70	150
	3600 saniye					
0.1	---	---	---	---	---	---
0.2	---	---	---	---	---	---
0.3	---	---	---	---	---	---
0.4	---	---	---	0.271	---	---
0.5	---	---	---	0.974	---	---
0.6	0.271	---	---	1.407	0.054	---
0.7	0.595	---	---	1.678	0.379	---
0.8	0.812	---	---	1.948	0.649	---
0.9	1.028	0.054	---	2.165	0.812	0.005
1.0	1.191	0.216	---	2.327	0.974	0.162
1.1	1.299	0.325	---	2.435	1.082	0.271
1.2	1.407	0.433	---	2.544	1.191	0.379
1.3	1.461	0.541	---	2.598	1.245	0.487
1.4	1.569	0.595	0.054	2.706	1.353	0.541
1.5	1.624	0.649	0.108	2.760	1.407	0.595
1.6	1.678	0.704	0.162	2.814	1.461	0.649
1.7	1.732	0.758	0.216	2.868	1.515	0.704
1.8	1.786	0.812	0.271	2.922	1.569	0.758
1.9	1.786	0.866	0.271	2.922	1.624	0.812
2.0	1.840	0.920	0.325	2.977	1.678	0.866

Tablo 4. Doğal gaz yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 86400 saniye (1 gün) için Isıl atalet indeksi

Isıl Direnç (m ² .K/W)	Isıtma Gün Sayısı					
	100 gün			200 gün		
	Gömülü Enerji					
	30	70	150	30	70	150
	86400 saniye					
0.1	---	---	---	---	---	---
0.2	---	---	---	---	---	---
0.3	---	---	---	---	---	---
0.4	---	---	---	0.055	---	---
0.5	---	---	---	0.199	---	---
0.6	0.055	---	---	0.287	0.011	---
0.7	0.121	---	---	0.342	0.077	---
0.8	0.166	---	---	0.397	0.132	---
0.9	0.210	0.011	---	0.442	0.166	0.001
1.0	0.243	0.044	---	0.475	0.199	0.033
1.1	0.265	0.066	---	0.497	0.221	0.055
1.2	0.287	0.088	---	0.519	0.243	0.077
1.3	0.298	0.110	---	0.530	0.254	0.099
1.4	0.320	0.121	0.011	0.552	0.276	0.110
1.5	0.331	0.132	0.022	0.563	0.287	0.121
1.6	0.342	0.144	0.033	0.574	0.298	0.132
1.7	0.353	0.155	0.044	0.585	0.309	0.144
1.8	0.364	0.166	0.055	0.596	0.320	0.155
1.9	0.364	0.177	0.055	0.596	0.331	0.166
2.0	0.375	0.188	0.066	0.607	0.342	0.177

Tablo 5. Kömür yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 60 saniye (1 dakika) için Isıl atalet indeksi

Isıl Direnç (m ² .K/W)	Isıtma Gün Sayısı					
	100 gün			200 gün		
	Gömülü Enerji					
	30	70	150	30	70	150
	60 saniye					
0.1	---	---	---	---	---	---
0.2	---	---	---	---	---	---
0.3	---	---	---	---	---	---
0.4	---	---	---	8.384	---	---
0.5	2.934	---	---	13.414	0.838	---
0.6	6.288	---	---	16.768	4.611	---
0.7	8.803	---	---	19.283	6.707	---
0.8	10.480	1.677	---	21.379	8.803	1.258
0.9	12.157	3.354	---	22.637	10.061	2.934
1.0	13.414	4.611	---	23.894	11.318	3.773
1.1	14.253	5.450	0.419	24.733	12.157	5.030
1.2	15.091	6.288	0.838	25.571	12.995	5.869
1.3	15.510	6.707	1.677	26.410	13.834	6.288
1.4	16.349	7.546	2.096	26.829	14.253	7.126
1.5	16.768	7.965	2.515	27.248	14.672	7.546
1.6	17.187	8.384	2.934	27.667	15.091	7.965
1.7	17.606	8.803	3.354	28.086	15.510	8.384
1.8	18.026	9.222	3.773	28.506	15.930	8.803
1.9	18.026	9.222	4.192	28.925	16.349	8.803
2.0	18.445	9.642	4.611	28.925	16.768	9.222

Tablo 6. Kömür yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 3600 saniye (1 saat) için Isıl atalet indeksi

Isıl Direnç (m ² .K/W)	Isıtma Gün Sayısı					
	100 gün			200 gün		
	Gömülü Enerji					
	30	70	150	30	70	150
	3600 saniye					
0.1	---	---	---	---	---	---
0.2	---	---	---	---	---	---
0.3	---	---	---	---	---	---
0.4	---	---	---	1.082	---	---
0.5	0.379	---	---	1.732	0.108	---
0.6	0.812	---	---	2.165	0.595	---
0.7	1.137	---	---	2.490	0.866	---
0.8	1.353	0.216	---	2.760	1.137	0.162
0.9	1.569	0.433	---	2.922	1.299	0.379
1.0	1.732	0.595	---	3.085	1.461	0.487
1.1	1.840	0.704	0.054	3.193	1.569	0.649
1.2	1.948	0.812	0.108	3.301	1.678	0.758
1.3	2.002	0.866	0.216	3.410	1.786	0.812
1.4	2.111	0.974	0.271	3.464	1.840	0.920
1.5	2.165	1.028	0.325	3.518	1.894	0.974
1.6	2.219	1.082	0.379	3.572	1.948	1.028
1.7	2.273	1.137	0.433	3.626	2.002	1.082
1.8	2.327	1.191	0.487	3.680	2.057	1.082
1.9	2.327	1.191	0.541	3.734	2.111	1.137
2.0	2.381	1.245	0.595	3.734	2.165	1.191

Tablo 7. Kömür yakıt için, Isıtma gün sayısı, gömülü enerjisi, dış duvar ısıl direncine bağlı 86400 saniye (1 gün) için Isıl atalet indeksi

Isıl Direnç (m ² .K/W)	Isıtma Gün Sayısı					
	100 gün			200 gün		
	Gömülü Enerji					
	30	70	150	30	70	150
	86400 saniye					
0.1	---	---	---	---	---	---
0.2	---	---	---	---	---	---
0.3	---	---	---	---	---	---
0.4	---	---	---	0.221	---	---
0.5	0.077	---	---	0.353	0.022	---
0.6	0.166	---	---	0.442	0.121	---
0.7	0.232	---	---	0.508	0.177	---
0.8	0.276	0.044	---	0.563	0.232	0.033
0.9	0.320	0.088	---	0.596	0.265	0.077
1.0	0.353	0.121	---	0.629	0.298	0.099
1.1	0.375	0.144	0.011	0.651	0.320	0.132
1.2	0.397	0.166	0.022	0.673	0.342	0.155
1.3	0.408	0.177	0.044	0.696	0.364	0.166
1.4	0.431	0.199	0.055	0.707	0.375	0.188
1.5	0.442	0.210	0.066	0.718	0.386	0.199
1.6	0.453	0.221	0.077	0.729	0.397	0.210
1.7	0.464	0.232	0.088	0.740	0.408	0.221
1.8	0.475	0.243	0.099	0.751	0.420	0.221
1.9	0.475	0.243	0.110	0.762	0.431	0.232
2.0	0.486	0.254	0.121	0.762	0.442	0.243

4. Sonuç

Isıtma gün sayısı arttıkça yalıtım kalınlığı artmaktadır. Isıl direnç arttıkça yalıtım kalınlığı artmaktadır. Yalıtım malzemesinin gömülü enerji arttıkça yalıtım kalınlığı azalmaktadır. Doğal gaz yakıtı kullanımında; en yüksek yalıtım kalınlığı, 250 ısıtma günde 2.0 m².K/W ısıl dirençte 30 MJ/kg gömülü enerjide, 0.064 m olarak hesaplanmıştır. En düşük yalıtım kalınlığı ise 100 ısıtma günde 2.0 m².K/W ısıl dirençte 150 MJ/kg gömülü enerjide, 0.006 m olarak bulunmuştur. Kömür yakıtı kullanımında; en yüksek yalıtım kalınlığı, 250 ısıtma günde 2.0 m².K/W ısıl dirençte 30 MJ/kg gömülü enerjide, 0.079 m olarak hesaplanmıştır. En düşük yalıtım kalınlığı ise 100 ısıtma günde 2.0 m².K/W ısıl dirençte 150 MJ/kg gömülü enerjide, 0.011 m olarak bulunmuştur. Isıtma amaçlı kömür yakıtı kullanımının, doğal gaz kullanımından daha yüksek yalıtım kalınlığı değerler hesaplanmıştır.

Zaman dilimi arttıkça ısıl atalet indeksi azalmaktadır. Doğal gaz yakıtı için 250 ısıtma günü için 2.0 m².K/W duvar ısıl direncinde 60 saniyede ısıl atalet indeksi 7.965, 3600 saniyede ısıl atalet indeksi 1.028 ve 86400 saniyede 0.210 olarak hesaplanmıştır. Kömür yakıtı için 60 saniyede ısıl atalet indeksi 10.899, 3600 saniyede ısıl atalet indeksi 1.407 ve 86400 saniyede 0.287 olarak hesaplanmıştır. Kömür yakıtı kullanımında doğal gaz yakıtına göre yalıtım malzemesine bağlı ısıl atalet indeksi daha yüksek değerlerde tespit edilmiştir.

Isıtma amaçlı kömür yakıtı kullanımında, doğal gaz yakıtına göre yalıtım malzemesine bağlı ısıl atalet indeksi daha yüksek değerlerde tespit edilmiştir.

İlerideki çalışmalarda hem farklı yalıtım malzemeleri ve hem de yapı malzemelerinin gömülü veya üretim enerjileri dikkate alınarak yapı kabuğunu oluşturan dış duvar, döşeme ve tavan için yalıtım kalınlığının nasıl değişeceği incelenecektir. Buna bağlı olarak ısıl atalet indeksi hesaplamaları yapılarak, ısıl atalet indeksinin değişimi araştırılacaktır.

5. Kaynaklar

- Acharya T., Riehl B. and Fuchs A. 2021. *Effects of Albedo and Thermal Inertia on Pavement Surface Temperatures with Convective Boundary Conditions—A CFD Study. Processes*, 9, **11**, 2078.
- Amiri A., Emami N., Ottelin J., Sorvari J., Marteinsson B., Heinonen J. and Junnila S., 2021. *Embodied emissions of buildings- A forgotten factor in green building certificates, Energy and Buildings*, **241**, 110962.
- Anh L. D. H. and Pásztor Z., 2021. *An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials, Journal of Building Engineering*, **44**, 102604.
- Asdrubali, F., Grazieschi, G., Roncone, M., Thiebat, F. and Carbonaro, C. 2023. *Sustainability of Building Materials: Embodied Energy and Embodied Carbon of Masonry. Energies*, **16**, 1846.
- Aste N., Angelotti A. and Buzzetti M., 2009. *The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, Energy and Buildings*, 41, **11**, 1181-1187.
- Aste N., Leonforte F., Manfren M. and Mazzon M., 2015. *Thermal inertia and energy efficiency – Parametric simulation assessment on a calibrated case study, Applied Energy*, **145**, 111-123.
- Axaopoulos I., Axaopoulos P., Gelegenis J. and Fylladitakis E.D. 2019. *Optimum external wall insulation thickness considering the annual CO₂ emissions. Journal of Building Physics*, 42, **4**, 527-544.
- Axaopoulos I., Axaopoulos P. and Gelegenis J., 2014. *Optimum insulation thickness for external walls on different orientations considering the speed and direction of the wind, Applied Energy*, **117**, 167-175.
- Aytaç A. ve Aksoy U. T., 2006. *Enerji Tasarrufu için Dış Duvarlarda Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Isıtma Maliyeti İlişkisi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21, **4**, 753-758.
- Bellahcene L., Cheknane A., Bekkouche S.M.A. and Sahel D., 2017. *The effect of the thermal inertia on the thermal transfer in building wall, E3S Web Conf.*, **22**, 00013.
- Chen Z., Hammad A. W. A. and Akbarnezhad I. K. A., 2020. *Optimising Embodied Energy and Thermal Performance of Thermal Insulation in Building Envelopes via an Automated Building Information Modelling (BIM) Tool, Buildings*, **10**, 218.
- Gagliano A., Patania F., Nocera F. and Signorello C., 2014. *Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings, Energy and Buildings*, **72**, 361-370.
- Grazieschi G., Asdrubali F. and Thomas G., 2021. *Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review, Cleaner Environmental Systems*, **2**, 100032.
- Huberman N. and Pearlmutter D., 2008. *A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert, Energy and Buildings*, **40**, 837–848.
- Koezjakova A., Urge-Vorsatz D., Crijns-Graus W. and van den Broek M., 2018. *The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings, Energy and Buildings*, **165**, 233-245.
- Kon O. and Caner İ., 2023. *Calculation of Insulation Thickness Depending on The Coolest and Hottest Climate Conditions for Different Flat Roof Types of Buildings, Black Sea Journal of Engineering and Science*, 6, **1**, 1-9.
- Kon O. and Yüksel B., 2019. *Energy consumption based on insulation thickness of exterior walls in*

- public buildings, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy* **172**, **4**, 135-147.
- Kon O. and Yüksel B., 2016. Optimum Insulation Thickness Calculated by Measuring of Roof, Floor And Exterior Walls in Buildings Used for Different Purposes, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, **36**, **1**, 17-27.
- Liu H., Maghoul P. and Shalaby A., 2019. Optimum insulation design for buried utilities subject to frost action in cold regions using the Nelder-Mead algorithm, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **130**, 613-639.
- Malka L., Kuriqi A. and Haxhimusa A., 2022. Optimum insulation thickness design of exterior walls and overhauling cost to enhance the energy efficiency of Albanian's buildings stock, *Journal of Cleaner Production*, **381**, **1**, 135160.
- Nearing G. S., Moran M. S., Scott R. L. and Ponce-Campos G., 2012. Coupling diffusion and maximum entropy models to estimate thermal inertia, *Remote Sensing of Environment*, **119**, 222-231.
- Reddy B.V. V. and Jagadish K.S., 2003. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies, *Energy and Buildings*, **35**, **2**, 129-137.
- Roh, S.; Tae, S. and Kim, R. 2018. Analysis of Embodied Environmental Impacts of Korean Apartment Buildings Considering Major Building Materials. *Sustainability*, **10**, 1693.
- Stéphan E., Cantin R., Caucheteux A., Tasca-Guernouti S. and Michel P., 2014. Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings, *Building and Environment*, **80**, 241-248.
- Soret G.M., Vacca P., Tignard J., Hidalgo J.P., Maluk C., Aitchison M. and Torero J. L., 2021. Thermal inertia as an integrative parameter for building performance, *Journal of Building Engineering*, **33**, 101623.
- Xiao, M. and Zhang, G. Q., 2013. The Influence of Thermal Inertia Index on the Residential External Walls in Hot-Summer and Cold-Winter Areas. In *Applied Mechanics and Materials*, 368–**370**, 562–565.
- Yang, J. and Tang, J., 2017. Influence of envelope insulation materials on building energy consumption. *Front Energy*, **11**, 575–581.
- Zhang C., Hu M., Laclau B., Garnesson T., Yang X. and Tukker A., 2021. Energy-carbon-investment payback analysis of prefabricated envelope-cladding system for building energy renovation: Cases in Spain, the Netherlands, and Sweden, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **145**, 111077.