



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Merkezi ısıtma sistemlerinde yerüstü ve yeraltı ön yalıtımlı boruların optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve yakıt emisyon hesabı

Optimum insulation thickness, energy saving and fuel emission calculation of aboveground and underground pre-insulated pipes in central heating systems

Yazarlar (Authors): Okan KON¹, Utku İLHAN²

ORCID¹: 0000-0002-5166-0258

ORCID²: 0000-0003-2326-6306

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kon K.ve İlhan U., “Merkezi ısıtma sistemlerinde yerüstü ve yeraltı ön yalıtımlı boruların optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve yakıt emisyon hesabı”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 189-203, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.741280

Merkezi Isıtma Sistemlerinde Yerüstü ve Yeraltı Ön Yalıtımlı Boruların Optimum Yalıtım Kalınlığı, Enerji Tasarrufu ve Yakıt Emisyon Hesabı

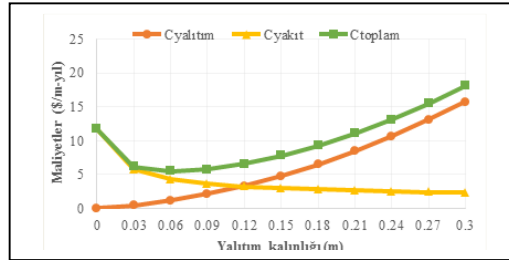
Optimum Insulation Thickness, Energy Saving and Fuel Emission Calculation of Aboveground and Underground Pre-Insulated Pipes in Central Heating Systems

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Ön yalıtımlı üretilen borularda ikinci yalıtım kalınlığı tespit edilmesi (Determination of the second insulation thickness in pre-insulated produced pipes)
- ❖ Yerüstü ve yer altı borularının yalıtım kalınlığı hesaplanması (Calculation of the insulation thickness of aboveground and underground pipes)
- ❖ Yerüstü ve yeraltı ön yalıtımlı borularda yalıtım kalınlığına bağlı emisyonların hesaplanması (Calculation of emissions based on insulation thickness in underground and aboveground pre-insulated pipes)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Yeraltındaki ısıtma sistemi borularının maliyet odaklı optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. (Cost-oriented optimum insulation thicknesses were calculated for underground central heating system pipes.)



Şekil 5. Doğal gaz ve taş yünü için yeraltı 50 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı maliyetler değişimi / **Figure 5.** Change of cost depending on insulation thickness in case of using 50 mm pipe diameter underground for natural gas fuel and rock wool

Amaç (Aim)

Merkezi ısıtma sistemlerinde kullanılacak ikinci yalıtımın optimum yalıtım kalınlığını ve emisyonu hesaplamaktır. (Calculation of the optimum insulation thickness and emission of the second insulation to be used in central heating systems)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Yer üstü ve yer altı boruların derece gün metoduna bağlı yakıt tüketimi tespit edilmiştir. Yanma denklemlerinden yararlanarak emisyon değerleri bulunmuştur. (Aboveground and underground pipes were calculated fuel consumption based on degree day method. Emission values were found by using combustion equations.)

Özgünlük (Originality)

Yeni uygulanmaya başlanan ön yalıtımlı üretilen borular için ikinci yalıtım tabakasının ve enerji tüketiminin hesaplanmıştır. (It is the calculation of the second insulation layer and energy consumption for the pre-insulated produced pipes is examined.)

Bulgular (Findings)

Yer üstü borulama optimum yalıtım kalınlığı 5,4 cm ile 15,3 cm arasında, yer altı borulama sistemi için ise 5,1 cm ile 12,8 cm arasında değiştiği hesaplanmıştır. (It has been calculated that the optimum insulation thickness of the aboveground piping varies between 5.4 cm and 15.3 cm and for the underground piping system varies between 5.1 cm and 12.8 cm.)

Sonuç (Conclusion)

Hem yer altı hem de yerüstü boru yalıtımında ikinci yalıtım için optimum yalıtım kalınlığının en düşük olduğu uygulama ekstrüde polistiren ve doğalgazda hesaplanmıştır. (The lowest insulation thickness for the second insulation is calculated when using extruded polystyrene insulation material and natural gas)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Merkezi Isıtma Sistemlerinde Yerüstü ve Yeraltı Ön Yalıtımlı Boruların Optimum Yalıtım Kalınlığı, Enerji Tasarrufu ve Yakıt Emisyon Hesabı

Araştırma Makalesi / Research Article

Okan KON^{1,*}, Utku İLHAN²

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü, 10145, Çağış Kampüsü/Balıkesir

²Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

10145, Çağış Kampüsü/Balıkesir

(Geliş/Received : 22.05.2020 ; Kabul/Accepted : 03.11.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 12.12.2020)

ÖZ

Enerji ihtiyacının her geçen gün arttığı dünyamızda enerjiyi verimli kullanmak çok önemli bir hale gelmiştir. Enerji verimliliğinde en etkin yöntemlerden biri de ısı yalıtımı uygulamalarıdır. Bu çalışmada merkezi ısıtma sisteminde yer üstü ve yer altı olmak üzere iki farklı ön yalıtımlı borulama sistemi için 50, 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000 mm boru çaplarında ikinci yalıtımın optimum yalıtım kalınlığına bağlı ekonomik ve çevresel etkiler hesaplanmıştır. Hesaplamalarda derece-gün yöntemi kullanılmıştır. Hesaplamalar için Balıkesir ili seçilmiştir. Yalıtım malzemesi olarak XPS ve taş yünü, yakıt türü olarak ise doğalgaz, kömür ve fuel-oil kullanılmıştır. Çalışmada yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi kullanılarak 10 yıllık ömür süresi için hesaplamalar yapılmıştır. Yer üstü borulama sistemlerinde tüm parametreler değerlendirildiğinde optimum yalıtım kalınlığı 5,4 cm ile 15,3 cm arasında, yer altı borulama sistemi için ise 5,1 cm ile 12,8 cm arasında değiştiği hesaplanmıştır. Enerji tasarrufu yer üstü borulama sistemi için 8,69 \$/m-yıl ile 281,33 \$/m yıl arasında, yer altı borulama sistemi için 6,26 \$/m-yıl ile 72,43 \$/m-yıl arasında hesaplanmıştır. CO₂ emisyonu yer üstü borulama sistemi için 2,1 kg/m ile 33,06 kg/m arasında, yer altı borulama sistemi için ise 2,04 kg/m ile 32,14 kg/m arasında gerçekleşmiştir. SO₂ emisyonu yer üstü borulama sistemi için 0,011 kg/m ile 0,088 kg/m arasında, yer altı borulama sistemi için 0,011 kg/m ile 0,086 kg/m arasında değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Merkezi ısıtma, boru yalıtımı, optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu, ısıtma derece-gün.

Optimum Insulation Thickness, Energy Saving and Fuel Emission Calculation of Aboveground and Underground Pre-Insulated Pipes in Central Heating Systems

ABSTRACT

In our world, where the need for energy increases day by day, it has become crucial to use energy efficiently. One of the most effective methods of energy efficiency is thermal insulation applications. In this study, economic and environmental effects based on optimum insulation thickness of 50, 100, 200, 400, 600, 800, and 1000 mm pipe diameters for two different pre-insulated piping systems, aboveground and underground, were calculated. The degree-day method was used in calculations. Balıkesir province was chosen for calculations. extruded polystyrene (XPS) and rock wool were used as insulation materials and natural gas, coal, and fuel oil were used as fuel types. In the study, calculations were made for a 10-year life using life cycle cost (LCC) analysis. When all parameters are evaluated in aboveground piping systems, it is calculated that the optimum insulation thickness varies between 5.4 cm and 15.3 cm and the underground piping system is found as 5.1 cm and 12.8 cm. Energy savings have been calculated between 8.69 \$/m-year and 281.33 \$/m-year for aboveground piping system and between 6.26 \$/m-year and 72.43 \$/m-year for underground piping system. CO₂ emission values were between 2.1 kg/m and 33.06 kg/m for the aboveground piping system and between 2.04 kg/m and 32.14 kg/m for the underground piping system. The SO₂ emission ranges from 0.011 kg/m to 0.088 kg/m for the aboveground piping system and from 0.011 kg/m to 0.086 kg/m for the underground piping system.

Keywords: Central heating, pipe insulation, optimum insulation thickness, energy saving, heating degree-day.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde dünyadaki enerji kaynakları, her gün biraz daha artmakta olan enerji talebi ile birlikte hızla tükenme eğilimi göstermektedir. Bu durum varolan sınırlı enerji

kaynaklarından daha da fazla yararlanabilmek ve enerji tasarrufunu daha fazla değerlendirmeye yöneltmektedir [1]. Enerji kaynakları, ısınmadan, aydınlanmaya ve çeşitli üretim faaliyetlerinin gerçekleşmesi için en önemli parametrelerdendir. Ülkemizde sürekli olarak nüfusun artması ve sanayileşme faaliyetlerinin hızla artış

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : okan@balikesir.edu.tr

göstermesiyle birlikte enerji kaynaklarına olan ihtiyaç giderek artış göstermiştir. Enerji kaynakları ülkeler için çok önemli bir konudur. Bu durum ülkemiz için ise enerji kaynakları açısından dışa bağımlı ülke olması sebebiyle daha önemli hale gelmiştir [2].

Ülkemizde enerji kullanımı çoğunlukla dört ana sektör olan sanayi, inşaat, ulaştırma ve tarım alanlarında incelenmektedir. Ülkemizde binalarda kullanılan enerji miktarı toplam enerjinin %30'u kadardır. Ayrıca evlerde tüketilen enerjinin %82'si ısınma amaçlı kullanılmaktadır [3]. Yapılmış olan hesaplamalarda ülkemiz, binalarda %30, sanayide %20, ulaşımda %10 enerji tasarruf potansiyeline sahiptir ve eğer %10 oranında tasarruf edildiğinde 25 milyar USD tasarrufun yanında 50 milyon ton CO₂ atmosfere az salınmış olacaktır [4]. Tesisat ömrünün uzatılması, proses sıcaklığının korunması, soğuk hatlarda yoğunlaşmanın önlenmesi, sıcak hatlarda işçi sağlığı ve güvenliğinin sağlanması yapılacak yalıtımla sağlanabilir. Tesisat yalıtımı herhangi bir proseste akışkanın taşınması sırasında meydana gelebilecek ısı kayıp ve istenmeyen ısı kazançlarının azaltılmasının en etkin yoludur [5]. Yapılarda ve tesisatta ısı yalıtımı uygulamaları ile daha az miktarda enerji tüketiminin gerçekleşmesiyle çevreye sera gazı salınımı da azalmakta ve dünyanın büyük problemlerinden biri olan küresel ısınmanın engellenmesine de katkıda bulunmaktadır [6].

Literatürde borulama sistemlerinde yalıtım ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Öztürk vd [7] yaptıkları çalışmada, sıcak su boru sistemlerinin tasarımı için dört optimizasyon yöntemi incelemişler ve maliyetin minimize edilmesine dayanan optimizasyon yönteminin en iyi yöntem olmadığı ancak en basit olduğu, ekserji ve maliyet parametrelerinin kullanıldığı yöntemin kullanılabilirlik açısından önerildiğini belirtmişlerdir. Başoğul ve Keçebaş [3] yaptıkları çalışmada Afyonkarahisar ilinin ısıtma yüklerine dayalı bölgesel ısıtma boru sistemlerinin ekonomik ve çevresel etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yakıt olarak kömür, doğal gaz, fuel-oil, LPG ve jeotermal enerji, yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılmıştır. Optimum yalıtım kalınlığı, 10 yıllık ömür boyunca enerji tasarrufu, geri ödeme süresi ve CO₂, CO ve SO₂ emisyonları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda optimum yalıtım kalınlığının 0,085-0,259 m ve enerji tasarrufunun 10,041-231,200 \$/m arasında değiştiği hesaplanmıştır. Ayrıca jeotermal enerjinin ekonomik ve çevresel açıdan iyi seçim olduğu ve ısı yalıtımı yapıldığında atmosfere salınan CO₂ miktarında %21 azalma olacağı hesaplanmıştır. Keçebaş [8] yaptığı çalışmada, yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi kullanarak bölgesel ısıtma sistemlerindeki optimum boru yalıtımını ve enerji tasarrufunu incelemiştir. Çalışmasında Afyonkarahisar ili için XPS yalıtım malzemesi kullanıldığında optimum yalıtım kalınlığı 0,122 ile 0,318 m arasında ve enerji tasarrufu 72,88 ile 639,24 TL/m arasında değiştiğini bulmuştur. Ayrıca en fazla yıllık enerji tasarrufu fuel-oil yakıtı kullanıldığında olurken en az

tasarruf ise jeotermal enerji için elde edilmiştir. Kayfeci [9] yaptığı çalışmada, yaşam döngüsü maliyet (YDM) analiz metodunu kullanarak ısıtma boru sistemleri için enerji tasarrufu, geri ödeme süresi ve optimum yalıtım kalınlığını hesaplamıştır. Çalışma Isparta ilinde beş farklı yalıtım malzemesi (Köpük levha, XPS, Taş yünü, EPS, Fiberglass) ve beş farklı boru çapları (50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm) için yapılmış ve yakıt olarak doğal gaz kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda optimum yalıtım kalınlığı 0,048-0,134 m arasında ve enerji tasarrufu 10,84-49,78 \$/m arasında değiştiği bulunmuştur. Keçebaş [10] yaptığı çalışmada, bölgesel ısıtma boru sistemlerinde yer altına gömülü çelik borularda yalıtımın ekonomik faydalarını incelemiş ve yer altına gömülen borular ile galeriden geçirilen borular arasında bazı karşılaştırmalar yapmıştır. Yaşam döngüsü maliyet analizi kullanılarak yapılan çalışmada dört farklı yakıt türü (Kömür, Doğalgaz, Fuel-oil, Jeotermal), dört farklı boru ebadı (50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm) ve XPS yalıtım malzemesi için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri dönüş süresi değerleri bulunmuştur. Çalışmanın sonucunda en tasarruflu yakıtın fuel-oil olduğu bulunmuş olup, doğalgaz yakıtı için 100 mm ve 200 mm çaptaki borular kullanıldığında sırasıyla %79 ve %83'e yakın tasarruf sağlandığı belirtilmiştir. Jeotermal enerji için enerji tasarrufu 36,72-88,81 TL/m arasında değişirken fuel-oil yakıtı için enerji tasarrufu 209,07-512,26 TL/m arasında değiştiği bulunmuştur. Yıldız ve Ersöz [11] yaptıkları çalışmada, VRF (değişken soğutucu akış) sistemlerinin kurulu bina boru şebekesinin optimum yalıtım kalınlığı 10 yıllık ömür süresince enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri yüksek basınçlı gaz boruları, düşük basınçlı gaz boru hatları ve düşük basınçlı sıvı boru hatları için belirlenmiştir. Net enerji tasarrufları P1-P2 maliyet analiz yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. VRF sisteminin ısıtma modunda, optimum yalıtım kalınlığı, yüksek basınçlı gaz boru hattında 16-20 mm arasında, düşük basınçlı sıvı boru hattı için 11-13 mm arasında bulunmuştur. VRF sisteminin soğutma modunda ise optimum yalıtım kalınlığı, düşük basınçlı gaz boru hattı için 7-8 mm arasında bulunmuştur. Başoğul vd. [12] yaptıkları çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi ve yaşam döngüsü maliyet analiz yöntemlerini karşılaştırarak optimum yalıtım kalınlığını ve çevresel etkilerini incelemişlerdir. Çalışma dört farklı boru çapı (50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm), dört farklı yakıt türü (Kömür, Doğalgaz, Fuel-oil, LPG) ve iki farklı yalıtım malzemesi (Taş yünü ve Cam yünü) değerlendirilerek yapılmıştır. Sonuç olarak optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde yaşam döngüsü maliyet yönteminin kullanılmasının daha avantajlı olduğu görülmüş ve çevresel etkiler için ise yaşam döngüsü maliyet yöntemi yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Çallı [13] yaptığı çalışmasında, çeşitli ısıtma derece-gün (IDG) değerleri için (1000, 3000, 5000 ve 7000 °C-gün) çelik ve plastik borularda yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizini kullanarak optimum yalıtım kalınlığını ve enerji tasarrufunu hesaplamıştır. Çalışmada, çelik boru için (50

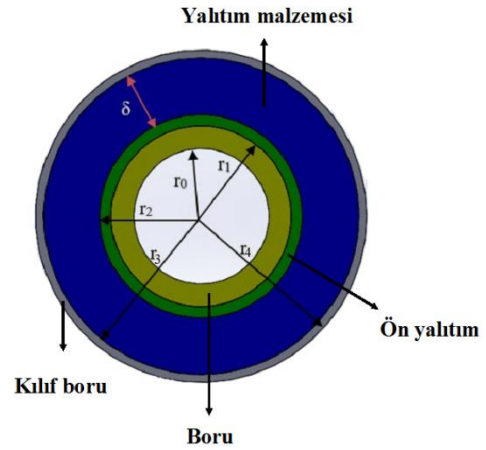
mm, 100 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm) boru çapları, plastik boru için (50 mm, 75 mm, 110 mm, 160 mm, 200 mm) boru çapları, yalıtım malzemesi olarak (Taş yünü, XPS, EPS) ve yakıt türü olarak ise (Kömür, Doğalgaz, Fuel-oil) için hesaplamalar yapılmıştır. Çalışma sonucunda optimum yalıtım kalınlığının çelik borularda 5 cm ile 16 cm arasında değiştiği, en tasarruflu yakıt olarak kömür ve en tasarruflu yalıtım malzemesinin XPS olduğu bulunmuştur. Ertürk [14] yaptığı çalışmada, yaşam döngüsü maliyet (YDM) analiz yöntemini kullanarak Afyonkarahisar ili ısıtma yüklerine göre borularda optimum yalıtım kalınlığını, farklı boru çapları (50 mm, 100 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm), üç farklı yalıtım malzemesi (Taş yünü, XPS, EPS) ve farklı yakıt türleri (Kömür, Doğalgaz, Fuel-oil) için incelemiştir. Çalışma sonucunda optimum yalıtım kalınlığının 5,18 cm ile 15,80 cm arasında değiştiği ve büyük çaplı borular için tek bir değer kullanılması önermiştir. En tasarruflu yakıt olarak fuel-oil ve en tasarruflu yalıtım malzemesi olarak EPS olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmada amaç, Balıkesir ili ısıtma derece-gün değerleri baz alınarak merkezi ısıtma sistemlerinde ısı aktarımı yapan yer üstü ve yer altı ön yalıtımlı boru sistemleri için kullanılacak optimum yalıtım kalınlığını enerji tasarrufunu ve yakıt tüketimlerini hesaplamaktır. Çalışmada kullanılan boru sistemi piyasada yeni kullanılan ön yalıtımlı boru sistemi olup ön yalıtım, yalıtım ve kılıf boru katmanlarından oluşmaktadır. Bu borulama sisteminin yer altında olması durumu ve yer üstünde olması durumunda ikinci yalıtımın optimum yalıtım kalınlığı değişimi ve enerji tasarrufu, CO₂ ve SO₂ emisyonu değerleri incelenmiştir. Çalışmada 50 mm, 100 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm ve 1000 mm olmak üzere 7 farklı boru çapı, yalıtım malzemesi olarak ekstrüde polistren (XPS) ve taş yünü, yakıt olarak ise doğalgaz, kömür ve fuel-oil için hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmada, ısıtma derece gün hesabı 21 yıllık maksimum ve minimum dış ortam hava sıcaklıkları ve 19,5 °C temel sıcaklık baz alınarak yapılmıştır. Maliyet hesabı ise yaşam döngüsü maliyet (YDM) analiz yöntemi kullanılarak P1-P2 metodu ile 10 yıllık ömür için hesaplanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

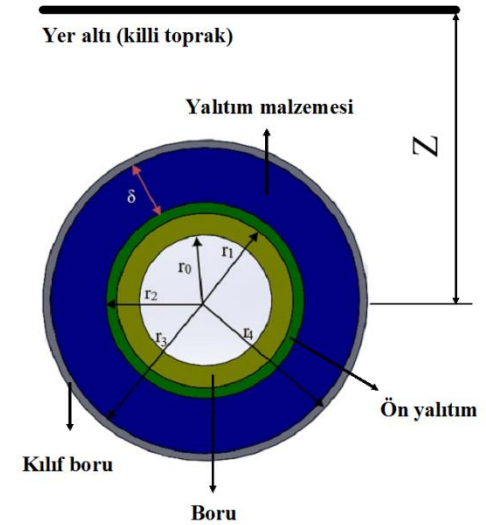
2.1 Boru Sistemlerinin özellikleri (Properties of Piping System)

Merkezi ısıtma sistemleri için ısının üretildiği ve aktarıldığı elemanlar büyük önem taşımaktadır. Merkezi ısıtma sistemlerinde ısı aktarımı borulama sistemleri ile gerçekleşmektedir. Borulama sisteminde ortamın sıcaklık ve nemine bağlı olarak meydana gelen yoğuşma, terleme, korozyon gibi ısı kayıplarına neden olan etmenlerin önlenmesi yalıtım uygulamasının önemini göstermektedir [15,16].



Şekil 1. Yer üstü borulama sistemi [10]. (Aboveground piping system)

Çalışmada yer üstü borulama sisteminde kullanılan ön yalıtımlı boru sistemini oluşturan katmanlar Şekil 1’de verilmiştir. Yalıtım malzemesi ile çelik boru arasında polietilen malzeme ve yalıtım malzemesinin sonunda ise polietilen kılıf boru (kaplama) ile boru sistemi oluşturulmuştur. Çalışmada yer altı borulama sisteminde kullanılan ön yalıtımlı boru sistemini oluşturan katmanlar Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yer altı borulama sistemi [10]. (Underground piping system)

2.2 Isı Kaybı ve Enerji Gereksinimi Hesabı (Calculation of Heat Loss and Energy Requirement)

Merkezi ısıtma için kullanılacak boru sisteminde yer üstü borulama sistemi için meydana gelen ısı kaybı denklem (1) ve yer altı borulama sistemi için ise denklem (2) ile hesaplanmaktadır [8,9,10].

$$Q_{byü} = U.A.(T_{ts} - T_d) = U.A.ΔT \quad (1)$$

$$Q_{bya} = U.A.(T_{ts} - T_1) = U.A.ΔT \quad (2)$$

Bu eşitliklerde U boru sisteminin toplam ısı transfer katsayısı, A borunun toplam yüzey alanı, T_{is} boru içindeki suyun ortalama tasarım sıcaklığı, T_d ise dış ortam sıcaklığı ve T_t ise toprak sıcaklığıdır. Boru sistemindeki tüm tabakaları için toplam ısıl direnç R_b yer üstü borulama sistemi için denklem (3) ve yer altı borulama sistemi için denklem (4) gibi hesaplanmaktadır [8,9,10].

$$R_{byü} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_2} + \dots + \frac{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}{2\pi L k_n} + \frac{1}{h_d A_d} \quad (3)$$

$$R_{bya} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_2} + \dots + \frac{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}{2\pi L k_n} + \frac{\ln\left(\frac{4Z}{r_n}\right)}{2\pi L k_t} \quad (4)$$

Bu eşitliklerde k (1, 2, ..., n) boru sistemi katmanlarının ısı iletim katsayısını, k_t toprağın ısı iletim katsayısını, r (1,2,...,n) boru sistemi katmanlarının yarıçaplarını, Z boru sisteminin merkezinden toprak üst seviyesine olan yüksekliği olup bu çalışmada 1 m seçilmiştir. L ise boru sisteminin boyunu ifade etmektedir. Boru sisteminin iç yüzey alanı $A_i = 2\pi L r_0$ ve dış yüzey alanı $A_d = 2\pi L r_n$ ifadesi ile hesaplanmaktadır. Yer üstü yalıtımsız boru sistemi katmanlarının toplam ısıl direnci denklem (5), yer altı yalıtımsız boru sistemi için toplam ısıl direnç denklem (6) ile hesaplanmaktadır [8,9,10].

$$R_{byü,y-sız} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{1}{h_d A_d} \quad (5)$$

$$R_{bya,y-sız} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{4Z}{r_1}\right)}{2\pi L k_t} \quad (6)$$

Çalışmada kullanılan borulama sistemi için formülleri tekrar düzenlenirse, yer üstü yalıtımlı boru sistemi katmanlarının toplam ısıl direnci denklem (7), toprağa gömülü yalıtımlı boru sistemi için toplam ısıl direnç denklem (8) ile hesaplanmaktadır [8,9,10].

$$R_{byü,y} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_b} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_{öny}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_y} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L k_{kap}} + \frac{1}{h_d A_d} \quad (7)$$

$$R_{bya,y} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_b} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_{öny}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_y} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L k_{kap}} + \frac{\ln\left(\frac{4Z}{r_4}\right)}{2\pi L k_t} \quad (8)$$

Yukarıdaki eşitliklerde; k_b çelik borunun ısı iletim katsayısı, $k_{öny}$ ön yalıtım malzemesinin ısı transfer katsayısı k_y yalıtım malzemesinin ısı transfer katsayısı, k_{kap} kılıf borunun ısı transfer katsayısı, A_d boru sisteminin son tabakasının dış yüzey alanıdır ve $A_d = 2\pi L r_4$ eşitliği ile hesaplanmakta, h_i boru sisteminin iç yüzeyi için ısı taşınım katsayısı olup denklem (9) ile hesaplanmakta ve h_d ise boru sisteminin dış yüzeyinin ısı taşınım katsayısı olup denklem (10) ile hesaplanabilmektedir [8,9,17].

$$h_i = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (k_i / D) \quad (9)$$

$$h_d = 11.58 \left(\frac{1}{D} \right)^{0.2} [2 / (T_{ms} + T_d)]^{0.181} (T_{ms} - T_d)^{0.266} (1 + 2.86 V_d)^{0.5} \quad (10)$$

Yukarıdaki eşitliklerde ki boru içindeki suyun ısı transfer katsayısı, T_{ms} boru sisteminin ortalama dış yüzey sıcaklığı ve $d = D + 2\delta$ ile hesaplanabilir. Yer altı ve yer üstü yalıtımlı ve yalıtımsız boru sistemlerinin toplam ısı transfer katsayıları arasındaki fark eşitlik (11) gibidir [8,9,17].

$$\Delta U = U_{y-sız} - U_y = \frac{1}{R_{b,y-sız}} - \frac{1}{R_{b,y}} \quad (11)$$

Yıllık enerji tüketimi ve maliyet analizi genellikle tasarım ısı yükü hesaplamaları ile birlikte yapılır. Yıllık ısı tüketimini hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılır. Yıllık enerji tüketimini tahmin etmenin en basit ve etkili yolu günlük sıcaklık verilerini kullanarak yıllık ısıtma derece günlerin (IDG) sayısını belirlemektir [10].

Isıtma derece-gün değeri belirli bir denge sıcaklık değeri (T_b) referans alınarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada denge sıcaklığı değeri 19,5 °C alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Boruda meydana gelen yıllık ısı kaybı aşağıdaki eşitlik ile bulunmaktadır [8,9,12,14].

$$Q_A = 86400 \cdot IDG \cdot U \quad (12)$$

Boru sistemi için yıllık enerji gereksinimi yıllık ısı kaybının ısıtma sisteminin verimine (η_{is}) bölünmesiyle elde edilir [8,12,14].

$$E_g = \frac{86400 \cdot IDG \cdot U}{\eta_{is}} \quad (13)$$

Boru sistemi için yıllık yakıt tüketimi ise, yıllık enerji gereksiniminin yakıtın alt ısıl değerine (H_{alt}) bölünmesiyle elde edilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır [8,9,12,14].

$$m_{yakıt} = \frac{86400 \cdot IDG \cdot U}{H_u \cdot \eta_{is}} \quad (14)$$

2.3 Maliyet, Enerji Tasarrufu, Optimum Yalıtım Kalınlığı Hesabı (Calculation of Cost, Energy Saving and Optimum Insulation Thickness)

Maliyet analizi yapılırken toplam maliyet için; enflasyon, faiz ve yıllık ömür süresi beraber hesaplanmaktadır. Bu yöntem sistemin inşası ve temini gibi tüm maliyetleri kapsamaktadır [18]. Yaşam Döngüsü Maliyet (YDM) metodu iki ekonomik göstergenin toplamı olarak ifade edilir. Bunlardan ilki olan (P1) ilk yıl için yakıt fiyatına ömür fiyatının oranıdır. P1'in en düşük olduğu değer ortalama yakıt fiyatlarının yüksek olduğunu gösterir. P1 enflasyon oranı (d), faiz oranı (i) ve ömür süresine (N) bağlı olarak hesaplanır. İkinci ekonomik gösterge olan P2 ise yalıtımın ilk yatırım maliyeti (R_v), işletme ve bakım giderleri (M_s) parametrelerine bağlı olarak oluşan ekonomik göstergedir ve denklem (17) ile hesaplanabilir. Bu çalışmada bakım ve işletme giderlerini olmadığı düşünülerek hesaplamalar yapılmış ve P2 değeri 1 olarak alınmıştır [4,8,19].

$$P_1 = \frac{1}{(d-i)} \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^N \right] \text{ eğer } i \neq d \quad (15)$$

$$P_1 = \frac{N}{1+i} \text{ eğer } i = d \quad (16)$$

$$P_2=1+P_1M_s-\frac{R_v}{(1+d)^N} \quad (17)$$

Boru sisteminde oluşan toplam yakıt maliyeti, eşitlik (14) ile hesaplanabilen yıllık yakıt tüketiminin yakıtın birim fiyatı (C_Y) ile çarpılmasıyla elde edilir ve eşitlik (18) şeklinde ifade edilebilir. Yalıtım malzemesinin toplam maliyeti, yalıtım malzemesinin birim hacmi (C_{Yal}) ile yalıtımda kullanılan malzemenin hacmi $V=\pi.(r_3^2-r_2^2).L$ ifadesi ile çarpılarak hesaplanabilir ve denklem (19) ile ifade edilir. Merkezi ısıtma sistemindeki borulama sistemi için toplam maliyet ise denklem (20) ile ifade edilir [8,19].

$$C_{yakıt}=\frac{86400.IDG.U.C_Y}{H_u.\eta_{hs}} \quad (18)$$

$$C_{yalıtım}=C_{Yal}.V \quad (19)$$

$$C_{toplam}=P_1.C_{yakıt}+P_2.C_{yalıtım} \quad (20)$$

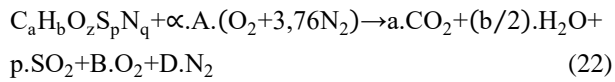
Yalıtımlı boru için toplam enerji tasarrufu (S) ise P1-P2 yöntemi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [8,20].

$$S=P_1.C'_{yakıt}-P_2.C_{Yal}.V \quad (21)$$

$C'_{yakıt}$ yalıtımlı ve yalıtımsız sistem arasındaki maliyet farkına eşittir. Optimum yalıtım kalınlığı ise toplam maliyet minimize edilerek ya da enerji tasarrufu maksimize edilmesiyle elde edilir [8,20].

2.4. Emisyonların Hesaplanması (Calculation of emissions)

Merkezi ısıtma borulama sistemi için yalıtım uygulaması ile ısı kayıplarının azalmasına ek olarak çevresel emisyon değerlerinde de azalma sağlamaktadır. Yakıtların yanma denkleminin genel kimyasal formülü aşağıdaki eşitlikteki gibidir [4,12,21,22].



A, B ve D için oksijen denkleştirilirse değerler aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ifade edilir [4,21,22].

$$A=(a+\frac{b}{4}+p-\frac{z}{2}) \quad (23)$$

$$B=(\alpha-1).(a+\frac{b}{4}+p-\frac{z}{2}) \quad (24)$$

$$D=3,76.\alpha.(a+\frac{b}{4}+p-\frac{z}{2})+\frac{q}{2} \quad (25)$$

CO (karbonmonoksit) ve NOx (azotoksit) emisyonları ihmal edilmiş olup 1 kg yakıtın yanmasıyla üretilen yanma emisyonları aşağıdaki eşitliklerdeki gibidir [4,12,21,22].

$$M_{CO_2}=\frac{a.CO_2}{M} \quad (26)$$

$$M_{SO_2}=\frac{p.SO_2}{M} \quad (27)$$

Yukarıdaki eşitliklerin sağ tarafı yakılan toplam yakıtın miktarı $m_{yakıt}$ yazılarak türetilirse, CO₂ ve SO₂ toplam emisyonları aşağıdaki eşitliklerle bulunur [4,12,21,22].

$$M_{CO_2}=\frac{44.a}{M}m_{yakıt} \quad (28)$$

$$M_{SO_2}=\frac{64.p}{M}m_{yakıt} \quad (29)$$

M yakıtın mol ağırlığıdır ve denklem (30) ile hesaplanır. Eşitlikteki a, b, z, p, q ise yakıtların kimyasal formülündeki elementlerin bileşimidir [4,12,21,22].

$$\dot{M}=12a+b+16z+32p+14q \quad (30)$$

2.5. Hesaplamalarda Kullanılan Değerler (Parameters used in calculations)

Çalışmada iki farklı boru çapı için değerler hesaplanmıştır. Kullanılan paslanmaz çelik boru (ANSI B 36.10) 7,99 g/cm³ yoğunluk, 1371-1399 °C erime noktası, 16,2 W/m.K iletkenlik katsayısı değerlerine sahip olup boruya ait özellikler Çizelge 1'de verilmiştir. Balıkesir ili için derece-gün (DG) değeri Çizelge 2'de gösterilmiştir. Çalışmada kömür, doğalgaz ve fuel-oil yakıtları için hesaplamalar yapılmış ve bu yakıtların özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Yalıtım malzemesi olarak XPS ve taş yünü malzemeleri kullanılmıştır. Yalıtım malzemesine ait özellikler Çizelge 4'te gösterilmiştir. Kullanılan ekonomik parametreler Çizelge 5'te verilmiştir. Merkezi ısıtma borulama sisteminde kullanılan akışkanlarla ilgili değerler Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 1. Boru sisteminde kullanılan paslanmaz çelik borunun özellikleri [14]. (Features of the stainless steel pipe used in the piping system)

Nominal Boru Ebadı (mm)	Nominal Boru Ebadı (inç)	Dış çap (mm)	Et kalınlığı (mm)	Ağırlık sınıfı	Sch No	Birim ağırlık (kg/m)
50	2	60,3	3,91	STD	40	5,44
100	4	114,3	6,02	STD	40	16,07
200	8	219,1	8,18	STD	40	42,55
400	16	406,4	9,53	STD	30	93,27
600	24	610,0	9,53	STD	20	141,12
800	32	813,0	9,53	STD	10	188,82
1000	40	1016,0	9,53	STD	-	236,53

Çizelge 2. Balıkesir ili ısıtma derece-gün değeri [23]. (Heating degree-day values of Balıkesir province)

Şehir	Derece-gün
Balıkesir	2312

Çizelge 3. Yakıtlar ve özellikleri [4,14]. (Fuels and their properties)

Yakıtlar	Fiyat	Alt Isıl Değer (H_u)	Verim (η_{is})	Kimyasal Formül
Kömür	0,3129 (\$/kg)	$29,260 \times 10^6$ (J/kg)	%65	$C_{7,078}H_{5,149}O_{0,517}S_{0,01}N_{0,086}$
Doğal gaz	0,4453 (\$/m ³)	$34,485 \times 10^6$ (J/m ³)	%93	$C_{1,05}H_4O_{0,034}N_{0,022}$
Fuel-oil	0,7935 (\$/kg)	$41,278 \times 10^6$ (J/kg)	%80	$C_{7,3125}H_{10,407}O_{0,04}S_{0,026}N_{0,02}$

Çizelge 4. Yalıtım malzemeleri ve özellikleri [14]. (Insulation materials and properties)

Yalıtım malzemesi	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Birim Fiyat (\$/m ³)
Ekstrüde polistren (XPS)	28-30	0,031	62
Taş yünü	100	0,040	44

Çizelge 5. Ekonomik parametreler [24,25]. (Economic parameters)

Ekonomik parametre	Değer
Faiz	% 26,5
Enflasyon	% 24,52
Ömür	10 yıl
P_1	8,63
P_2	1

Çizelge 6. Kullanılan akışkanlar ile ilgili değerler [14]. (Values related to the fluids used)

Parametre	Değer
Boru içi ortalama sıcak su sıcaklığı	$[90+70] / 2 = 80^{\circ}\text{C}$
Boru sisteminin ortalama dış yüzey sıcaklığı	93°C
Boru sistemi içindeki sıcak su hızı	0,8 m/s
Boru sistemi dışındaki hava hızı	0,2 m/s

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

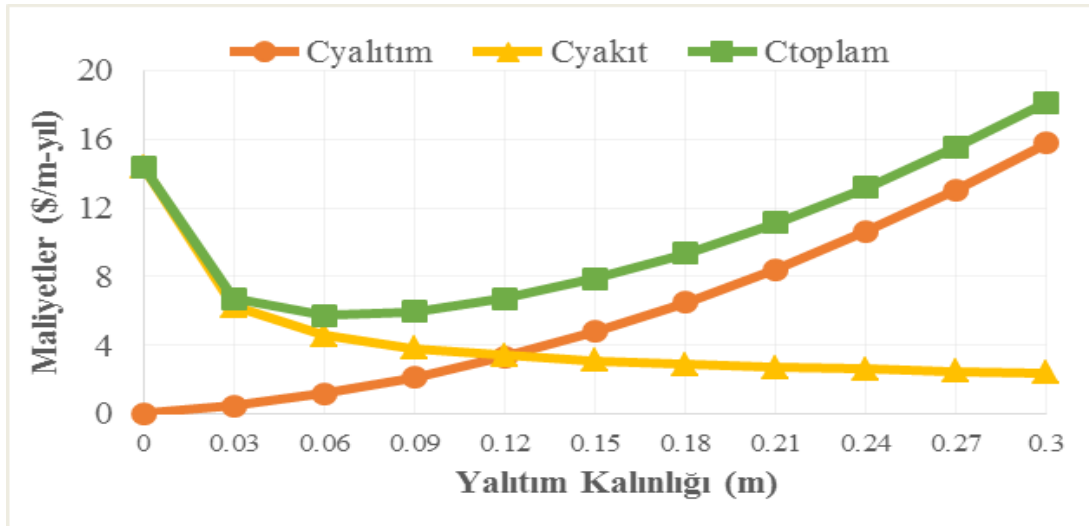
3.1. Optimum Yalıtım Kalınlığı (Optimum Insulation Thickness)

Çalışmada Balıkesir ilinin ısıtma derece-gün değerinden yararlanarak ısı kayıpları ve yaşam döngüsü maliyet (YDM) analiz metodu ile maliyetler hesaplanmıştır. 50, 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000 mm boru çapları için doğalgaz, kömür ve fuel-oil yakıtları kullanılmıştır. Yalıtım malzemesi olarak ekstrüde polistiren (XPS) ve taş yünü için yer üstü ve yer altı borulama sistemlerinin optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve yakıt emisyonu değerleri hesaplanmıştır. Yer üstü ve yer altı borulama sisteminde yalıtım kalınlığının artmasıyla ısı kayıpları azalmakta ve dolayısıyla enerji gereksinimi de azalmaktadır bu durum toplam maliyetinde azalması anlamına gelmektedir. Ancak yalıtım kalınlığının fazla artışı ise toplam maliyeti arttırmaktadır. Toplam maliyetin en az olduğu değer, uygulanan yalıtımın en uygun değeri olan optimum yalıtım kalınlığı değerini

kalınlığı değeri 50 mm, 100 mm 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm ve 1000 mm boru çapları için sırasıyla 6,6 cm, 7,9 cm, 9,2 cm, 10,3 cm, 11 cm, 11,4 cm ve 11,6 cm olarak hesaplanmıştır.

Yer altı borulama sistemi için doğalgaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi kullanılması durumu Şekil 5'te 50 mm boru çapı için Şekil 6'da ise 1000 mm boru çapı için verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi yalıtım kalınlığı arttıkça toplam maliyet optimum noktaya kadar düşmüş daha sonra ise artmıştır. Optimum yalıtım kalınlığı değeri 50 mm, 100 mm 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm ve 1000 mm boru çapları için sırasıyla 6,2 cm, 7,3 cm, 8,2 cm, 8,9 cm, 9,1 cm, 9,1 cm ve 9,1 cm olarak hesaplanmıştır.

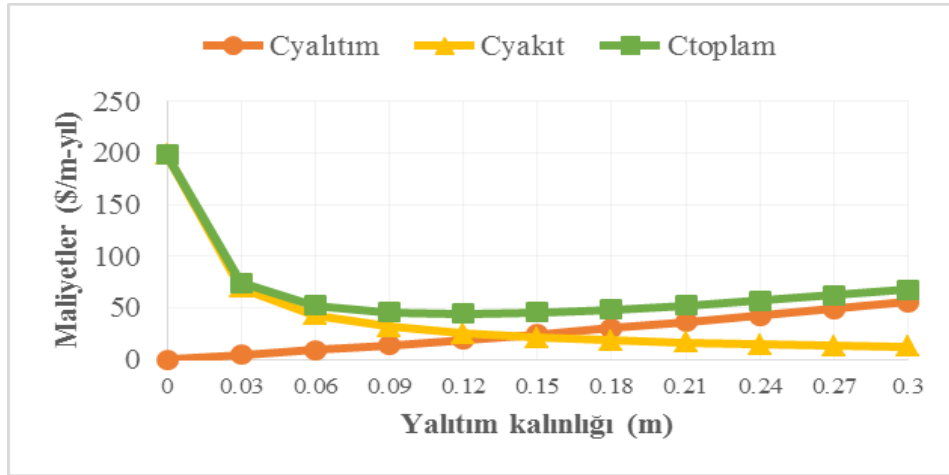
Grafikler incelendiğinde yer üstü ve yer altı merkezi ısıtma boru sistemleri için boru çapının artması ile optimum yalıtım kalınlığı değerinin de arttığı görülmüştür. Boru çapının artışı ile ısı transfer alanı artmış ve bu sebeple ısı kayıpları artmıştır. Isı



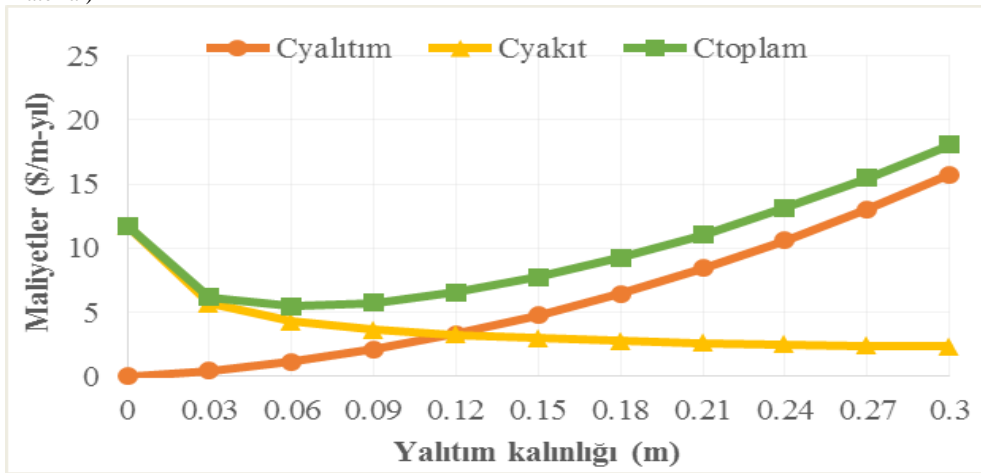
Şekil 3. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer üstü borulama sistemi 50 mm boru çapı kullanımı durumunda yalıtım kalınlığına bağlı maliyet değişimi (Change of cost depending on insulation thickness in case of using 50 mm pipe diameter for an aboveground piping system for natural gas fuel and rock wool insulation material)

vermektedir. Yer üstü borulama sistemi için doğalgaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi kullanılması durumu Şekil 3'de 50 mm boru çapı için Şekil 4'de ise 1000 mm boru çapı için verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi yalıtım kalınlığı arttıkça toplam maliyet önce düşmüş daha sonra ise artmıştır. Optimum yalıtım

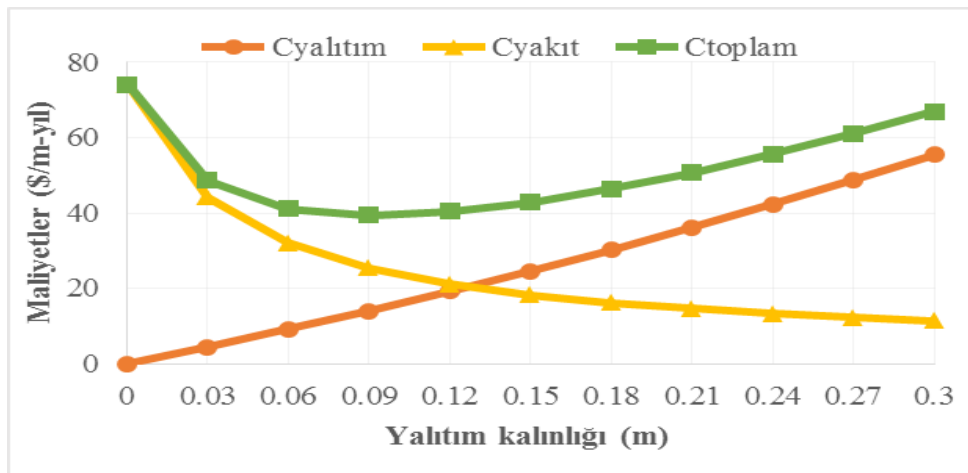
kayıplarının artışı daha yüksek kalınlıkta yalıtım uygulanarak önlenmektedir. Yer altı borulama sisteminin yer üstü borulama sistemine göre daha düşük optimum yalıtım kalınlığı değeri kullanılması gerektiği görülmüştür.



Şekil 4. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer üstü borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı maliyet değişimi (Change of cost depending on insulation thickness in case of using 1000 mm pipe diameter for an aboveground piping system for natural gas fuel and rock wool insulation material)



Şekil 5. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer altı borulama sistemi 50 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı maliyetler değişimi (Change of cost depending on insulation thickness in case of using 50 mm pipe diameter for an underground piping system for natural gas fuel and rock wool insulation material)



Şekil 6. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer altı borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığı maliyetler ilişkisi (Change of cost depending on insulation thickness in case of using 1000 mm pipe diameter for an underground piping system for natural gas fuel and rock wool insulation material)

Balıkesir ili için yakıt türleri, yalıtım malzemeleri ve çeşitli boru çaplarında optimum yalıtım kalınlığı değerleri yer üstü borulama sistemi için Çizelge 7’de yer altı borulama sistemi için Çizelge 8’de verilmiştir.

belirtmektedir. Yer üstü merkezi borulama sistemi için XPS yalıtım malzemesi kullanılması durumunda yakıtlara göre enerji tasarrufu Şekil 7’de 50 mm boru çapı için, Şekil 8’de ise 1000 mm boru çapı için verilmiştir.

Çizelge 7. Yer üstü borulama sistemi boru çaplarına göre optimum yalıtım kalınlıkları (Optimum insulation thicknesses for an aboveground piping system according to pipe diameters)

Parametre	Yakıt türü	Yalıtım malzemesi	Boru çapları (mm)						
			50	100	200	400	600	800	1000
Optimum yalıtım kalınlığı (m)	Doğalgaz	XPS	0,054	0,063	0,072	0,08	0,084	0,086	0,088
		Taş yünü	0,066	0,079	0,092	0,103	0,110	0,114	0,116
	Kömür	XPS	0,058	0,068	0,078	0,087	0,091	0,094	0,096
		Taş yünü	0,072	0,085	0,099	0,112	0,119	0,124	0,127
	Fuel-oil	XPS	0,069	0,081	0,093	0,104	0,110	0,114	0,117
		Taş yünü	0,085	0,101	0,118	0,134	0,143	0,149	0,153

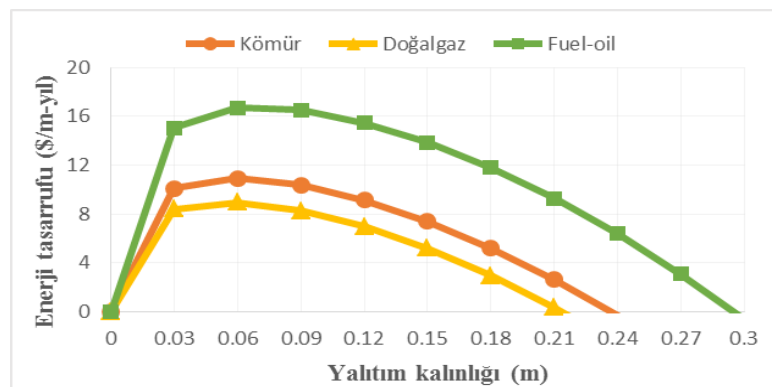
Çizelge 8. Yer altı borulama sistemi boru çaplarına göre optimum yalıtım kalınlıkları (Optimum insulation thicknesses for an underground piping system according to pipe diameters)

Parametre	Yakıt türü	Yalıtım malzemesi	Boru çapları (mm)						
			50	100	200	400	600	800	1000
Optimum yalıtım kalınlığı (m)	Doğalgaz	XPS	0,051	0,058	0,065	0,069	0,069	0,069	0,069
		Taş yünü	0,062	0,073	0,082	0,089	0,091	0,091	0,091
	Kömür	XPS	0,055	0,063	0,071	0,075	0,077	0,077	0,077
		Taş yünü	0,068	0,079	0,09	0,097	0,100	0,101	0,102
	Fuel-oil	XPS	0,066	0,076	0,086	0,093	0,096	0,097	0,097
		Taş yünü	0,081	0,095	0,108	0,119	0,124	0,127	0,128

3.2 Enerji Tasarrufu (Energy Saving)

Yer üstü ve yer altı merkezi ısıtma borulama sistemlerinde yalıtım uygulanması ile büyük miktarda

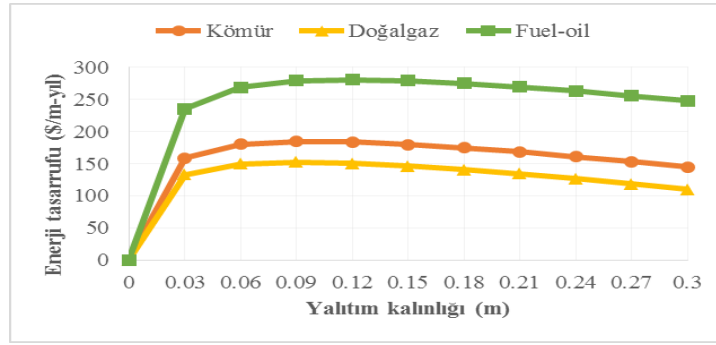
Enerji tasarrufu değeri yakıt olarak doğalgaz ve yalıtım malzemesi olarak XPS kullanıldığında 50 mm, 100 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm ve 1000 mm boru



Şekil 7. Doğal gaz yakıtı ve XPS yalıtım malzemesi için yer üstü borulama sistemi 50 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı enerji tasarrufu değişimi (Energy saving change due to insulation thickness in case of using aboveground piping system 50 mm pipe diameter for natural gas fuel and XPS insulation material)

enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Yalıtım kalınlığının artmasıyla enerji tasarrufu değeri önce artış göstermekte ve daha sonra azalmaktadır. Enerji tasarrufunun azalmaya başladığı nokta bize optimum yalıtım kalınlığını ve en fazla enerji tasarruf miktarını

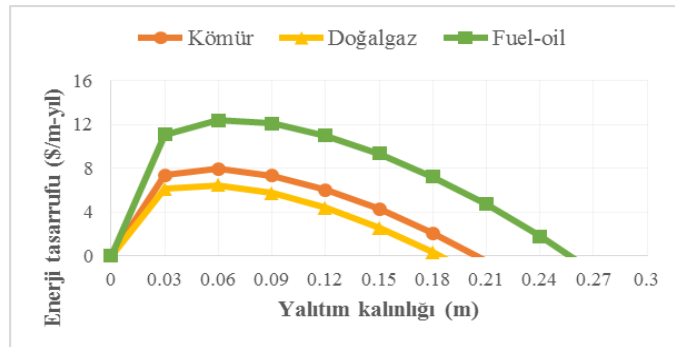
çapları için sırasıyla 8,99 \$/m-yıl, 17,23 \$/m-yıl, 33,26 \$/m-yıl, 61,74 \$/m-yıl, 92,40 \$/m-yıl, 122,71 \$/m-yıl ve 149,41 \$/m-yıl olarak hesaplanmıştır.



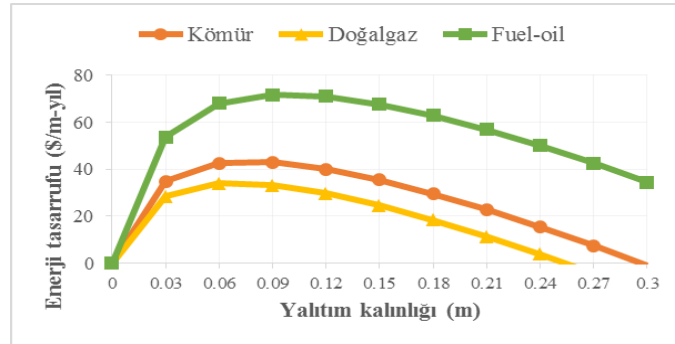
Şekil 8. Doğal gaz yakıtı ve XPS yalıtım malzemesi için yer üstü borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı enerji tasarrufu değişimi (Energy saving change due to insulation thickness in case of using aboveground piping system 1000 mm pipe diameter for natural gas fuel and XPS insulation material)

Yer altı merkezi ısıtma borulama sistemi için XPS yalıtım malzemesi kullanılması durumunda yakıtlara göre enerji tasarrufu Şekil 9'da 50 mm boru çapı için, Şekil 10'da ise 1000 mm boru çapı için verilmiştir. Enerji tasarrufu değeri yakıt olarak doğalgaz ve yalıtım malzemesi olarak XPS kullanıldığında 50 mm, 100 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm ve 1000 mm boru çapları için sırasıyla 6,53 \$/m-yıl, 10,70 \$/m-yıl, 16,47 \$/m-yıl, 23,05 \$/m-yıl, 27,73 \$/m-yıl, 31,19 \$/m-yıl ve

tasarrufu değerlerinin de arttığı görülmüştür. Büyük çaplı borularda enerji tasarrufunun fazla olmasının nedenleri ısı transfer alanının artması ile kullanılan yalıtım kalınlığı artmasıdır. Yakıt türlerine göre değerlendirildiğinde iki borulama sisteminde en fazla enerji tasarrufu fuel-oil yakıtı kullanılması durumunda en az ise doğalgaz kullanılması durumunda gerçekleşmiştir. Enerji tasarrufunun kullanılan yakıtın birim maliyeti ile doğru orantıda olduğu görülmüştür. Yer üstü merkezi ısıtma



Şekil 9. Doğal gaz yakıtı ve XPS yalıtım malzemesi için yer altı borulama sistemi 50 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı enerji tasarrufu değişimi (Energy saving change due to insulation thickness in case of using underground piping system 50 mm pipe diameter for natural gas fuel and XPS insulation material)



Şekil 10. Doğal gaz yakıtı ve XPS yalıtım malzemesi için yer altı borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı enerji tasarrufu değişimi (Energy saving change due to insulation thickness in case of using underground piping system 1000 mm pipe diameter for natural gas fuel and XPS insulation material)

34,07 \$/m-yıl olarak hesaplanmıştır.

Grafikler incelendiğinde yer üstü ve yer altı merkezi ısıtma boru sistemleri için boru çapının artması ile enerji

borulama sistemlerinde yer altı merkezi borulama sistemine göre toplam maliyet daha fazla olduğu için daha yüksek enerji tasarrufu elde edilmiştir.

Balıkesir ili için yakıt türleri, yalıtım malzemeleri ve çeşitli boru çaplarında enerji tasarrufu değerleri yer üstü borulama sistemi için Çizelge 9'da yer altı borulama sistemi için Çizelge 10'da verilmiştir.

kg/m-yıl, yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında 16,98 kg/m-yıl olmaktadır. SO₂ emisyonu değeri yakıt olarak kömür kullanıldığında 0,068 kg/m yıl, yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında 0,088 kg/m-yıl olmaktadır. Yakıt

Çizelge 9. Yer üstü borulama sistemi boru çaplarına göre enerji tasarrufları (Energy savings according to aboveground piping system pipe diameters)

Parametre	Yakıt türü	Yalıtım malzemesi	Boru çapları (mm)						
			50	100	200	400	600	800	1000
Enerji tasarrufu (\$/m-yıl)	Doğalgaz	XPS	8,992	17,231	33,262	61,738	92,404	122,7	149,410
		Taş yünü	8,693	16,895	32,964	61,625	92,551	123,1	153,528
	Kömür	XPS	10,929	20,886	40,259	74,677	111,750	148,399	184,782
		Taş yünü	10,563	20,472	39,875	74,483	111,835	148,793	185,503
	Fuel-oil	XPS	16,776	31,889	61,275	113,497	169,777	225,435	280,710
		Taş yünü	16,217	31,241	60,630	113,047	169,644	225,665	281,328

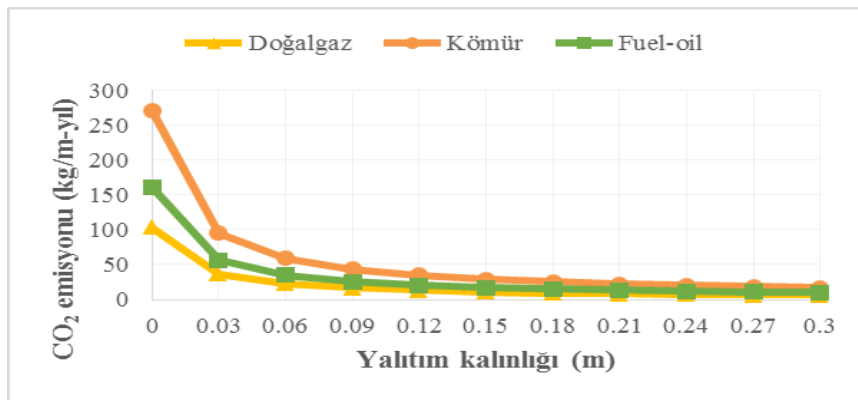
Çizelge 10. Yer altı borulama sistemi boru çaplarına göre enerji tasarrufları (Energy savings according to underground piping system pipe diameters)

Parametre	Yakıt türü	Yalıtım malzemesi	Boru çapları (mm)						
			50	100	200	400	600	800	1000
Enerji tasarrufu (\$/m-yıl)	Doğalgaz	XPS	6,527	10,699	16,473	23,049	27,725	31,194	34,069
		Taş yünü	6,261	10,413	16,240	22,995	27,895	31,592	34,690
	Kömür	XPS	7,986	13,102	20,265	28,600	34,699	39,342	43,261
		Taş yünü	7,659	12,744	19,954	28,479	34,823	39,718	43,887
	Fuel-oil	XPS	12,417	20,398	31,801	45,859	56,172	64,564	71,853
		Taş yünü	11,908	19,823	31,255	45,247	56,121	64,824	72,429

3.3 Emisyonlar (Emissions)

Yer üstü merkezi ısıtma borulama sistemi için taş yünü yalıtım malzemesi kullanılması durumunda yakıtların kullanımlarına göre 1000 mm boru çapı için; CO₂ emisyonu Şekil 11'de, SO₂ emisyonu ise Şekil 12'de verilmiştir. CO₂ emisyonu değeri yakıt olarak doğalgaz yalıtım malzemesi olarak ise taş yünü kullanıldığında 13,59 kg/m-yıl, yakıt olarak kömür kullanıldığında 33,06

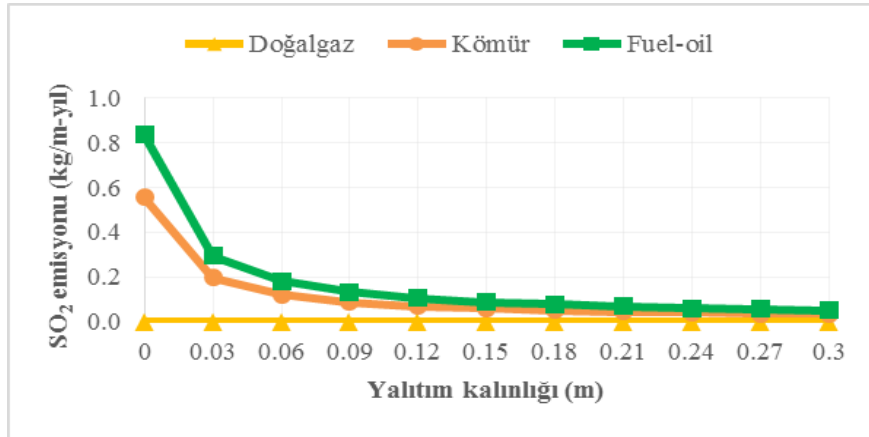
olarak doğalgaz kullanıldığında emisyon değeri çok düşük bir değer olacağından hesaba katılmamıştır. Yalıtım malzemesi olarak XPS kullanılması durumunda 1000 mm boru çapı için CO₂ emisyonu değerleri; yakıt olarak doğalgaz kullanıldığında 13,56 kg/m-yıl, yakıt olarak kömür kullanıldığında 33,03 kg/m-yıl, yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında 16,74 kg/m-yıl olmaktadır. SO₂ emisyonu değeri yakıt olarak kömür



Şekil 11. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer üstü borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı CO₂ emisyonu değişimi (CO₂ emission change due to insulation thickness in case of using an aboveground piping system for natural gas fuel and rock wool insulation material in case of using 1000 mm pipe diameter)

kullanıldığında 0,068 kg/m-yıl, yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında 0,087 kg/m-yıl olmaktadır.

kullanıldığında 13,56 kg/m-yıl, yakıt olarak kömür kullanıldığında 32,12 kg/m-yıl, yakıt olarak fuel-oil

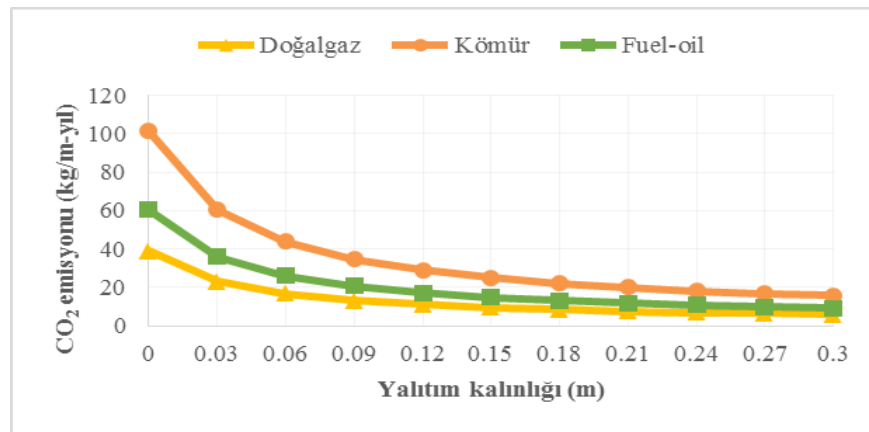


Şekil 12. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer üstü borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı SO₂ emisyonu değişimi (SO₂ emission change due to insulation thickness in case of using an aboveground piping system for natural gas fuel and rock wool insulation material In case of using 1000 mm pipe diameter)

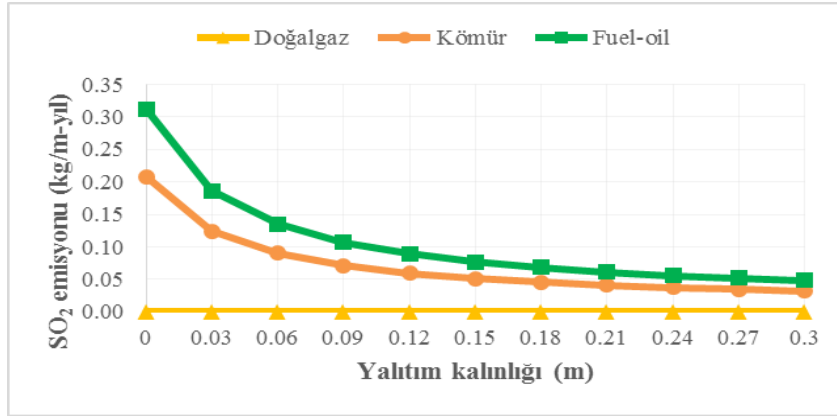
Yer altı merkezi ısıtma borulama sistemi için taş yünü yalıtım malzemesi kullanılması durumunda yakıtların kullanımlarına göre 1000 mm boru çapı için; CO₂ emisyonu Şekil 13'de, SO₂ emisyonu ise Şekil 14'de verilmiştir. CO₂ emisyonu değeri yakıt olarak doğalgaz kullanıldığında 13,20 kg/m-yıl, yakıt olarak kömür kullanıldığında 32,14 kg/m-yıl, yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında 16,54 kg/m-yıl olmaktadır. SO₂ emisyonu değeri yakıt olarak kömür kullanıldığında 0,066 kg/m-yıl, yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında 0,086 kg/m-yıl olmaktadır. Yakıt olarak doğalgaz kullanıldığında emisyon değeri çok düşük bir değer olacağından hesaba katılmamıştır. Yalıtım malzemesi olarak XPS kullanılması durumunda 1000 mm boru çapı için CO₂ emisyonu değerleri; yakıt olarak doğalgaz

kullanıldığında 16,43 kg/m-yıl olmaktadır. SO₂ emisyonu değeri yakıt olarak kömür kullanıldığında 0,066 kg/m-yıl, yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında 0,085 kg/m-yıl olmaktadır.

Grafikler incelendiğinde yer üstü ve yer altı merkezi ısıtma boru sistemleri için yalıtım kalınlığı arttıkça yakıt tüketiminin azaldığı ve böylece emisyon değerlerinin düştüğü görülmektedir. CO₂ ve SO₂ emisyonu değerlerinin yakın olduğu görülmektedir. Yakıt türlerine göre değerlendirdiğimizde iki borulama sisteminde en fazla CO₂ emisyonu değerleri yakıt tüketimi fazla olan kömür yakıtı kullanılması durumunda, en az ise doğalgaz yakıtı kullanılması durumu için hesaplanmıştır. SO₂ emisyonu değerleri ise yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında en yüksek emisyon değerine ulaşmıştır.



Şekil 13. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer altı borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı CO₂ emisyonu değişimi (CO₂ emission change due to insulation thickness in case of using an underground piping system 1000 mm pipe diameter for natural gas fuel and rock wool insulation material)



Şekil 14. Doğal gaz yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi için yer altı borulama sistemi 1000 mm boru çapı kullanılması durumunda yalıtım kalınlığına bağlı SO₂ emisyonu değişimi (SO₂ emission change due to insulation thickness in case of using an underground piping system for natural gas fuel and rock wool insulation material in case of using 1000 mm pipe diameter)

4.SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada merkezi ısıtma sistemlerinde ısı akışını sağlayan borularda yalıtım uygulamasının yer üstü ve yer altı olması durumu incelenmiştir. Yalıtım uygulaması için maliyete dayalı optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi çok önemlidir. Çalışmada, optimum yalıtım kalınlığı değeri, enerji tasarrufu, CO₂ ve SO₂ emisyonları, 50 mm, 100 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm ve 1000 mm boru çapı, ekstrüde polistren (XPS) ve taş yünü yalıtım malzemesi ve üç farklı yakıt türü (Doğalgaz, kömür, fuel-oil) için hesaplanmıştır. Hesaplamalar Balıkesir ili ısıtma derece-gün değeri kullanılarak yaşam döngüsü maliyet (YDM) analiz yöntemi P1-P2 metodu kullanılarak 10 yıllık ömür süresi için yapılmıştır.

Çalışmada, boru çapının artması ile optimum yalıtım kalınlığı değerinin de arttığı görülmüştür. Yer altı borulama sistemi için daha düşük optimum yalıtım kalınlığı değeri hesaplanmıştır. Yer üstü borulama sistemi için optimum yalıtım kalınlığı değeri 5,4 cm ile 15,3 cm arasında değiştiği hesaplanmıştır. Yer altı borulama sistemi için optimum yalıtım kalınlığı değeri 5,1 cm ile 12,8 cm arasında, değiştiği hesaplanmıştır. Optimum yalıtım kalınlığının en düşük olduğu uygulama ekstrüde polistren (XPS) yalıtım malzemesi ve doğalgaz kullanıldığında en yüksek olduğu durum ise taş yünü yalıtım malzemesi ile fuel-oil yakıtı kullanıldığında oluşmaktadır. Doğalgaz yakıtının ısı değeri ve ısı veriminin yüksek olması bu durumda etkili olmuştur.

Enerji tasarrufu değerlerinin boru çapının artışıyla arttığı hesaplanmıştır. Yer altı borulama sistemlerinde enerji tasarrufu değerleri yer üstü borulama sistemlerine göre daha az olmaktadır. Yer üstü borulama sistemi için enerji tasarrufu değerleri 8,69 \$/m-yıl ile 281,33 \$/m-yıl arasında değiştiği hesaplanmıştır. Yer altı borulama sistemi için enerji tasarrufu değeri ise 6,26 \$/m-yıl ile 72,43 \$/m-yıl arasında değiştiği hesaplanmıştır. Enerji tasarrufu yakıtın birim maliyetiyle ilgili olup birim maliyeti yüksek olan fuel-oil yakıtı için en yüksek,

doğalgaz yakıtı kullanıldığında ise en az değere ulaşmıştır.

Yer üstü ve yer altı borulama sistemlerinde boru çapı arttıkça daha fazla yakıtın yakılması sonucu CO₂ emisyon değerleri artmaktadır. Yalıtım kalınlığının artışı ile yakıt tüketimi azalmakta ve böylece CO₂ emisyonu değerleri de azalmaktadır. Yer üstü borulama sistemi CO₂ emisyonu değerleri 2,1 kg/m-yıl ile 33,06 kg/m-yıl arasında değişmektedir. Yer altı borulama sistemi CO₂ emisyonu değerleri 2,04 kg/m-yıl ile 32,14 kg/m-yıl arasında değişmektedir. CO₂ emisyonu değeri en az doğalgaz yakıtı ve XPS yalıtım malzemesi kullanılması durumunda en fazla ise kömür yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi kullanılması durumunda görülmektedir.

Yer üstü ve yer altı borulama sistemlerinde boru çapı arttıkça daha fazla yakıtın yakılması sonucu SO₂ emisyon değerleri artmaktadır. Yalıtım kalınlığının artışı ile yakıt tüketimi azalmakta ve böylece SO₂ emisyonu değerleri de azalmaktadır. SO₂ emisyonu değerleri yer üstü borulama sistemi için 0,011 kg/m-yıl ile 0,088 kg/m-yıl arasında değişmektedir. Yer altı borulama için 0,011 kg/m-yıl ile 0,086 kg/m-yıl arasında değişmektedir. SO₂ emisyonu değeri en az kömür yakıtı ve XPS yalıtım malzemesi kullanılması durumunda en fazla ise fuel-oil yakıtı ve taş yünü yalıtım malzemesi kullanılması durumunda görülmektedir. Doğalgaz yandığında kükürt bileşikleri oluşturmadığından SO₂ değeri hesaplanmamıştır.

Sembol Listesi (Symbol List)

A	: Borunun toplam yüzey alanı (m ²)
A _d	: Borunun dış yüzey alanı (m ²)
A _i	: Borunun iç yüzey alanı (m ²)
A _d	: Borunun dış yüzey alanı (m ²)
A _d	: Boru sisteminin son tabakasının dış yüzey alanı (m ²)
C _Y	: Yakıtın birim maliyeti (\$/kg, \$/m ³)

$C_{\text{yakıt}}$: Yıllık toplam enerji maliyeti (\$/m)	Re	: Reynould sayısı
$C'_{\text{yakıt}}$: Yalıtımlı ve yalıtımsız borulama sistemi maliyet farkı (\$/m)	S	: Enerji tasarrufu (\$/m-yıl)
C_{Yal}	: Birim hacimde yalıtım malzemesinin maliyeti (\$/m ³)	T_d	: Dış ortam sıcaklığı (K)
$C_{\text{yalıtım}}$: Toplam yalıtım malzemesi maliyeti (\$/m)	T_{ms}	: Boru sisteminin ortalama dış yüzey sıcaklığı (K)
C_{toplam}	: Toplam maliyet (\$/m)	T_{ort}	: Ortalama günlük sıcaklık (K)
d	: Enflasyon oranı (%)	T_t	: Toprak sıcaklığı (K)
E_g	: Boru sistemi için yıllık enerji gereksinimi (W)	T_{ts}	: Boru içindeki suyun ortalama tasarım sıcaklığı (K)
H_u	: Yakıtın alt ısı değeri (J/kg, J/m ³)	ΔT	: Boru sisteminde iç ve dış tasarım sıcaklık farkı (K)
h_d	: Boru sistemi dış yüzeyi ısı taşınım katsayısı (W/m ² .K)	U	: Boru sistemi toplam ısı transfer katsayısı (W/m ² .K)
h_i	: Boru sistemi iç yüzeyi ısı taşınım katsayısı (W/m ² .K)	ΔU	: Yalıtımsız ve yalıtımlı boru sistemlerinin toplam ısı transfer katsayıları farkı (W/m ² .K)
IDG	: Isıtma Derece-gün (°C-gün)	V	: Yalıtım malzemesinin hacmi (m ³)
i	: Faiz oranı (%)	V_d	: Dış hava hızı (m/s)
k_i	: Boru içerisindeki sıcak suyun ısı iletim katsayısı (W/m.K)	Z	: Boru merkezinden toprak üstü yükseklik (m)
k_b	: Çelik borunun ısı iletim katsayısı (W/m.K)	δ	: Optimum yalıtım kalınlığı (m)
k_{kap}	: Kılıf borunun ısı iletim katsayısı (W/m.K)	η_{is}	: Isıtma sisteminin verimi (%)
$k_{öny}$: Ön yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/m.K)		
k_t	: Toprağın ısı iletim katsayısı (W/m.K)		
k_y	: Yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/m.K)		
L	: Boru sisteminin birim uzunluğu (m)		
\dot{M}	: Yakıtın mol ağırlığı (kg/kmol)		
$m_{\text{yakıt}}$: Yıllık yakıt tüketimi (kg/m)		
N	: Ömür süresi (yıl)		
Pr	: Prantil sayısı		
P_1	: İlk yıl için yakıt fiyatına ömür yakıt fiyatının oranı		
P_2	: Yatırım sonucu ömürlük masrafların oranı		
Q_A	: Boru sisteminin yıllık ısı kaybı (W)		
$Q_{b(yü,ya)}$: Yer üstü ve yer altı boru sisteminde meydana gelen ısı kaybı (W)		
r	: Boru sistemi tabakasının yarıçapı (m)		
$R_{b(yü,ya)}$: Yer üstü ve yer altı boru sisteminin toplam ısı direnci (K/W)		
$R_{b(yü,ya),y}$: Yer üstü ve yer altı yalıtımlı boru sistemi katmanlarının toplam ısı direnci (K/W)		
$R_{b(yü,ya),y-sız}$: Yer üstü ve yer altı yalıtımsız boru sistemi katmanlarının toplam ısı direnci (K/W)		

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Okan KON: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Wrote the manuscript.

Utku İLHAN: Hesaplamaları yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. / Performed the calculates and analyse the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Oymak M., "Isıl sistem tasarımlarında ekonomik yalıtım kalınlıklarının ekserji ekonomik yöntemle belirlenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2007).
- [2] <https://www.yatirimkredi.com/turkiyenin-enerji-politikasi-ve-ekonomik-sonuclari.html> (Erişim Tarihi: 2 Mayıs 2019).
- [3] Türkiye Enerji ve Enerji Verimliliği Çalışmaları Raporu, "Yeşil Ekonomiye Geçiş", Temmuz, (2010).
- [4] Baçoğul Y. and Keçebaş A., "Economic and environmental impacts of insulation in district

- heating pipelines”, *Energy*, 36 (10): 6156-6164, (2011).
- [5] Diz B.B., “Mekanik tesisat yalıtımında karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri”, *14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 17-20 Nisan, İzmir, (2019).
- [6] Sakarya K., “Enerji verimliliği ve yalıtım”, *İZODER Dergisi*, 135, (Ocak-Şubat 2019)
- [7] Öztürk İ., Karabay H. and Bilgen E., “Thermo-economic optimization of hot water piping systems: A comparison study”, *Energy*, 31(16): 2094-2107, (2006).
- [8] Keçebaş A., “Bölgesel ısıtma sistemlerinde boru yalıtımı yoluyla enerji tasarrufu için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9 (1):1-14, (2012).
- [9] Kayfeci M., “Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials”, *Energy and Buildings*, 69: 278-284, (2014).
- [10] Keçebaş A., “Enerji tasarrufu için yer altına gömülü çelik borularda yalıtımın ekonomik faydaları”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29 (3): 206-212, (2013).
- [11] Yıldız A. and Ersöz M., “Determination of the economical optimum insulation thickness for VRF (valuable refrigerant flow) system”, *Energy*, 89: 835-844, (2015).
- [12] Başoğul Y., Demircan C. and Keçebaş A., “Determination of optimum insulation thickness for environmental impact reduction of pipe insulation”, *Applied Thermal Engineering*, 101: 121-130 (2016).
- [13] Çallı E., “Boru yalıtımı uygulamalarında ısıtma derece günlere göre optimum yalıtım kalınlığının enerji tasarrufu”, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016).
- [14] Ertürk M., “Optimum insulation thicknesses of pipes with respect to different insulation materials, fuels, and climate zones in Turkey”, *Energy*, 113:991-1003, (2016).
- [15] Elele, S. ve Çanakçı, C. Bölgesel ısıtma sistemleri ısı merkezleri tasarımı. *5. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, Jeotermal Enerji Semineri, 3-5 Ekim, İzmir. 131-140, (2001).
- [16] Böke B., “Yüzeyde yoğunlaşma problemi”, *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Yalıtım Semineri, 8-12 Nisan, İzmir, 2507-2512, (2015).
- [17] Kaynaklı Ö., “Economic thermal insulation thickness for pipes and ducts: A review study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30: 184-194, (2014).
- [18] <https://insapedia.com/yasam-dongusu-maliyet-ydm-analizi/> (Erşim Tarihi: 20 Mayıs 2019).
- [19] Keçebaş A., Alkan M. A. and Bayhan M., “Thermo-economic analysis of pipe insulation for district heating piping systems”, *Applied Thermal Engineering*, 31: 17-18, (2011).
- [20] Daşdemir A., “Boru yalıtımında farklı boru çapları için hava boşluğunun yalıtım kalınlığı ve kullanım ömrü maliyetleri üzerine etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, (2019).
- [21] Çallı E. ve Keçebaş A., “Bölgesel ısıtma sistemlerinde boru yalıtımı uygulamasının ekonomik ve çevresel faydaları”, *Tesisat Mühendisliği*, 128: 5-17, (2012).
- [22] Çomaklı, K. and Yüksel, B. Environmental impact of thermal insulation thickness in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 24, 5-6 ,933-940, (2004).
- [23]. Dombaycı Ö. A, “Degree-days maps of Turkey for various base temperatures”, *Energy*, 34: 1807-1812, (2009).
- [24] Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, Faiz verileri, (2018).
- [25] Türkiye İstatistik Kurumu, Enflasyon verileri, (2018)