



Erciyes University Journal of the Institute of Science and Technology

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

ISSN 1012-2354

Cilt (Volume): 29, Sayı (Issue): 3, Haziran/June-2013

<http://fbe.erciyes.edu.tr/>



Enerji tasarrufu için yer altına gömülü çelik borularda yalıtımın ekonomik faydaları

Ali KEÇEBAŞ*

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla

ÖZET

Anahtar Kelimeler:
Enerji tasarrufu,
Toprağa gömülü borular,
Boru yalıtımı,
Optimum yalıtım kalınlığı.

Bu çalışmada, bölgesel ısıtma boru hatlarında yer altına gömülü borulardaki yalıtımın ekonomik faydaları incelenmiştir. Boru yalıtım optimizasyonu için yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi kullanıldı. Analizde Afyonkarahisar ili için kömür, doğal gaz, fuel-oil ve jeotermal yakıtları ve çeşitli çaplarda çelik borular göz önünde bulundurulmuştur. Yalıtım malzemesi olarak ekstrüde polistiren (XPS) kullanılmıştır. Böylece çeşitli durumlar için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri dönüş süreleri belirlenmiştir. Ayrıca bu değerler yer altına gömülü ve galeriden geçirilen borular için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak aynı kalınlıkta yalıtım ve enerji tasarrufu büyük çaplı borularda bulunmuştur. Bölgesel ısıtma boru hatlarında boruların galeri içinden geçirmek yerine yer altına gömerek iletmek daha avantajlıdır.

Economic benefits of insulation in steel pipes buried into the ground for energy saving

ABSTRACT

Key Words:
Energy saving,
Buried pipes,
Pipe insulation,
Optimum insulation thickness.

In this study, the economic benefits of insulation of pipes buried into the ground in district heating pipelines were investigated. The life cycle cost (LCC) analysis was used for pipe insulation optimization. In analysis, coal, natural gas, fuel-oil and geothermal energy fuels and various diameters of steel pipes for Afyonkarahisar province were taken into consideration. The extruded polystyrene (XPS) such as insulation material was used. Thus, optimum insulation thickness, energy saving and payback periods were determined for various cases. Furthermore, these values were compared for pipes which was buried into the ground and passed from gallery. As a result, the insulation in same thickness and energy saving in a large diameter pipes were found. In district heating pipelines, the pipes buried into the ground instead of passing it to the gallery is more advantageous.

1. Giriş

Dünya’da ve ülkemizde nüfus artışı, sanayileşme, yatırımların büyümesi ve yaşam standartlarının yükselmesi enerji alanındaki teknolojik ve bilimsel çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Enerji bugün uluslararası bir sorun haline gelmiştir. Diğer taraftan, enerji harcamaları önümüzdeki yıllarda da hem kamu ve özel kurum ve kuruluşlarda hem de aile bütçesinde önemli bir yer tutmaya devam edecektir [1].

Enerji, 1970’teki enerji krizinden sonra enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü ithalat yoluyla karşılayacak olan ülkeler için en önemli konu haline gelmiştir. Özellikle Türkiye için. Türkiye’nin enerji tüketimi genellikle sanayi, inşaat, ulaştırma ve tarım gibi dört ana sektör altında incelenmektedir. İnşaat sektöründeki enerji tüketimi toplam enerji tüketiminin önemli bir parçasını oluşturur. Türkiye’de konut ve ticari binalarda kullanılan enerji miktarı toplam enerjinin %30’u kadardır. Buna ek olarak evlerde tüketilen enerjinin %82’si ise ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Bu miktar hemen hemen tüm enerjisini ithal eden Türkiye gibi bir ülke için çok lüks olarak görülebilir [2]. Bu durumu karşılamak için bir ülkenin enerji stratejisi ise enerji tasarrufu seçeneklerine yöneliktir. Bu nedenlerden dolayı Türkiye’de binalar için enerji tüketiminin minimum değerlere düşürülmesinde ulusal düzenlemeler getirilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle Türkiye’nin bu yöndeki ihtiyaçları düşünülerek 1999 yılında “Binalarda ısı yalıtım kuralları” (TS 825) [3] belirlenmiştir. TS 825 standardında ülkemiz, ısıtma derece-gün (IDG) sayılarına göre 4 bölgeye ayrılmıştır. 1. bölge, ısıtma için en az enerji ihtiyacının olduğu, 4. bölge ise en fazla enerji ihtiyacının olduğu bölgeyi temsil etmektedir.

Sınırlı enerji kaynakları ve fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan çevre kirliliği, enerji tasarrufunu zorunlu hale getirmiştir. Özellikle sanayi ve kimyasal işleme tesisleri karmaşık ve pahalı boru yapıları içerir. Boru sistemleri; su temini, yangın koruma ve bölgesel soğutma-ısıtma uygulamaları dahil olmak üzere birçok durumlarda kullanılır. Bu nedenle, boru sistemlerinde uygun yalıtım kullanımı enerji tasarrufu ve fosil yakıtların istenmeyen emisyonların azaltılmasında oldukça önemli hale gelir. Buna ek olarak ısı yalıtımı, yakıt tüketimini azaltarak enerji tasarrufu sağlamanın yanında yoğuşma ve küf sorunlarını da azaltarak yapıların ömrünü arttırmaktadır. Yalıtım malzemesinin seçiminde bölgenin ortalama dış ortam sıcaklığı, yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği ve maliyeti en önemli parametrelerdir. Yalıtım malzemesinin kalınlığının artmasıyla ısıtma için enerji tüketimi azalacaktır. Ancak bu durumda yalıtım maliyeti artacak ve bu durum toplam yatırım maliyetini de arttıracaktır. Bu nedenle yalıtım uygulamalarında toplam yatırım maliyetinin minimize edildiği optimum bir yalıtım kalınlığı değeri söz konusudur [4]. Bu optimum değer tespiti ekonomik analiz (yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi) için kritik önem taşımaktadır.

YDM analizleri genellikle enerji teknolojileri ve bina projelerinde etkili bir biçimde uygulanmaktadır. YDM analizi, bina veya boru sistemi yalıtımı üzerine daha başlangıçtaki harcamalar ile bina veya boru sisteminin ömrü boyunca net tasarruf üretebileceğini gösterir. Yani YDM yalıtım malzemeleri ve yakıtların maliyetini doğrudan etkileyen enflasyon ve faiz oranlarındaki değişimle optimum yalıtım kalınlığını belirlemek için kullanılır [5].

Literatürde boru yalıtımı üzerine çeşitli çalışmalar yer almaktadır: Zaki ve El-Turki [6], boru hatları için çok katmanlı ısı yalıtımının optimizasyonuna çalıştı. Wechsattel vd. [7], bir alana boyunca düzenli olarak sıcak su dağıtımı için optimal geometrik düzeni incelenmiştir. Yalıtım malzemesi miktarı, tüm boruların hacmi ve boru duvarı malzemesinin miktarı çalışmasındaki ana kısıtlardır. Kalyon ve Şahin [8], kontrol teorisi yaklaşımı ve en dik iniş yöntemini kullanarak ısı kaybını en aza indiren taşınım ile ısı transferine karşı bir borudaki optimum yalıtım kalınlığını araştırdı. Şahin [9], dış termal radyasyona maruz kalan kanalların optimum yalıtımı incelenmiştir. O, ısı transferi en aza indirmek amacıyla sınırlı miktarda yalıtım malzemesi kullanarak tüp boyunca optimal yalıtım kalınlığı değişimini buldu. Şahin ve Kalyon [10], ısıtım ve taşınım ile ısı transferine maruz dairesel bir tüp için kritik yalıtım yarıçapını analitik olarak incelenmiştir. Öztürk vd. [11], sıcak su boru sistemlerinin optimum tasarımı için dört farklı termo-ekonomik teknik sundu. Yaptıkları çalışmada sıcak su boru segmenti düşünülmüştür ve bu yöntemlerin farklılıklarını ve yararlarını ele almışlardır. Karabay [12], sıcak su dağıtım borusu için termo-ekonomik optimizasyon yöntemini incelenmiştir. Onun kullandığı yöntem termodinamiğin ikinci kanunu dayanıyordu. Boru ve yalıtım maliyetleri yatırım olarak kabul edildi ise optimum boru çapı ve yalıtım kalınlığını işletme maliyeti olarak ekserji yıkımı ve kaybını göz önüne alarak belirledi. Keçebaş vd. [5], YDM analizine bağlı olarak beş farklı boru çapı ve dört farklı yakıt türü için bölgesel ısıtma boru hattı şebekelerinde kullanılan boruların optimum yalıtım kalınlığını belirlemişlerdir.

Yukarıdaki gibi mevcut literatür incelendiğinde yer altına gömülü borularda yalıtım kalınlığı konusu üzerine herhangi bir çalışma görülmemiştir. Bu çalışmada ısıtma enerji ihtiyacından hareketle yer altına gömülü bölgesel ısıtma borularının yalıtımı için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri dönüş süresi YDM analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun için Türkiye’nin en soğuk şehirlerinden biri olan Afyonkarahisar’da çeşitli çelik boru çapları ve yakıtlar için bir bölgesel ısıtma sisteminin boru hattı model olarak alınmıştır. Bölgesel ısıtma sistemlerindeki yer altına gömülü boru yalıtımının ekonomik faydaları için çalışmadan elde edilen sonuçlar şekiller ile gösterilmiş ve tartışılmıştır.

2. Borulama sistemi ve analiz

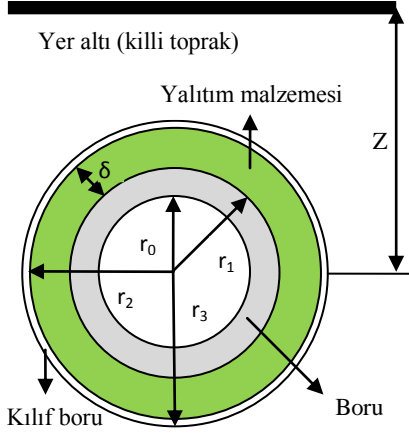
Bu çalışmada bölgesel ısıtma ile yer altına gömülü olarak uzanan çelik bir boru sistemi ele alınmış ve birim uzunluk için boru kesiti Şekil 1’de verilmiştir. Bölgesel ısıtma sistemi için sıcak su $[(90+70)/2=80 \text{ °C}]$ kararlı durum kararlı akış kontrol hacmi koşullarında sabit bir hız $[0,8 \text{ m/s}]$ ile borudan pompalandığı düşünülmüştür. Sıvı akış sürtünmesi nedeniyle olan basınç düşümleri de bu çalışmada ihmal edilmiştir.

Bölgesel ısıtma sistemlerinde borulama sistemi boyunca yer altına gömülü borudan gerçekleşen ısı kaybı genellikle aşağıdaki denklem ile hesap edilmektedir.

$$Q_b = UA(T_{ts} - T_t) = UA\Delta T \quad (1)$$

Burada; A borunun toplam yüzey alanı, T_t toprak sıcaklığı, T_{ts} boru içersindeki sıcak suyun ortalama tasarım sıcaklığı ve U borulama sistemi için toplam ısı transfer katsayısıdır.

Borulama sistemi tabakalarının toplam ısı direnci, R_b , borunun



Şekil 1. Birim uzunluktaki borulama sistemi

iç ve dış yüzeyleri arasındaki tabakaların ısı dirençleri ile bu iç yüzey üzerindeki ısı taşınım katsayısı ve topraktaki ısı dirençlerinin toplamına eşittir. Böylece borulama sisteminin tüm tabakaları için toplam ısı direnç aşağıdaki gibi verilebilir [13].

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

Burada; k_1 , k_2 , k_n borulama sistemi tabakalarının ısı iletkenliklerini ve r_1 , r_2 , r_n onların yarıçaplarını ifade eder. Z borulama sisteminin merkezinden toprak üst seviyesine olan yükseklik ve k_t ise toprağın ısı iletkenlik katsayısıdır [13]. L boru sistemi boyu iken $A_i = 2\pi L r_0$ ise borulama sisteminin boru iç yüzey alanıdır.

Bu çalışmada, yalıtımsız toprağa gömülü borulama sistemi tabakalarının toplam ısı direnci

$$R_{b,y-sız} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{4Z}{r_1}\right)}{2\pi L k_t} \quad (3)$$

ve yalıtımlı toprağa gömülü borulama sistemi tabakalarının toplam ısı direnci

$$R_{b,y} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_3} + \frac{\ln\left(\frac{4Z}{r_3}\right)}{2\pi L k_t} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada; k_1 , k_2 ve k_y sırasıyla çelik borunun, kılıf borunun ve yalıtım malzemesinin ısı transfer katsayılarıdır. Çalışmada kullanılan yer altı gömülü çelik borulara ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, h_i borulama sisteminin iç yüzeyi için ısı taşınım katsayısı ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14].

$$\frac{h_i D}{k_i} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

Burada; k_i boru içersindeki sıcak suyun ısı transfer katsayısıdır.

Yalıtımsız ve yalıtımlı borulama sistemlerinin toplam ısı transfer katsayıları arasındaki fark aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta U = U_{y-sız} - U_y = \frac{1}{R_{b,y-sız}} - \frac{1}{R_{b,y}} \quad (6)$$

Yıllık enerji tüketimi ve maliyet analizi genellikle tasarım ısı yükü hesaplamaları ile birlikte yapılır ve ısıtma sistemlerinin seçiminde önemli bir rol oynar. Yıllık ısı tüketimini hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılır. Bir binanın yıllık enerji tüketimini tahmin etmenin en basit ve etkili yolu saatlik verileri kullanarak yıllık ısıtma derece günlerin (IDG) sayısını belirlemektir. Bunun için aşağıdaki formül kullanılır.

$$IDG = (1 \text{ yıl}) \sum_1^{365} (T_b - T_{sa})^* \quad (7)$$

Burada; T_b denge sıcaklık ve T_{sa} günlük ortalama güneş hava sıcaklığıdır. Parantez üzerindeki * işareti sadece pozitif olan değerlerin hesaba katıldığını belirtmekte ve $T_b < T_{sa}$ olduğunda sıcaklık farkları sıfır olarak alınmaktadır. Temel sıcaklık ısıtmanın gerekli olduğu en alt dış sıcaklıktır. Bu çalışmada temel sıcaklık 18 °C ve Büyükalaca vd. [15] tarafından verilen saatlik veriler kullanılmıştır.

Literatürde genellikle derece günlerin binaların ısı ihtiyaçlarının belirlenmesinde kullanıldığı görülmektedir. Bunun sonucunda binaların dış duvarlarındaki ısı kaybı hesapları yapılarak optimum dış duvar yalıtım kalınlıkları hesaplanabilmektedir. Fakat, binaların ihtiyacı olan bu ısı ise bölgesel ısıtma sistemlerinde borular yardımı ile taşınmaktadır. Bu ısı taşıma esnasında borulama sisteminden kaynaklanan kayıplar neticesinde borularda optimum yalıtım kalınlığı hesaplanabilmektedir [5, 16,17]. Bu durumda, bölgesel ısıtma için borulama sisteminin yıllık ısı kaybı aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi ısıtma derece günler kullanılarak belirlenebilir.

$$Q_A = 86,400 IDG U \quad (8)$$

Borulama sistemdeki kayıplar için yıllık enerji gereksinimi yıllık ısı kaybının ısıtma sisteminin verimine (η_{is}) bölünerek

$$E_g = \frac{86,400 IDG U}{\eta_{is}} \quad (9)$$

ve bölgesel ısıtmadaki borulardan kaynaklanan kayıplar için yıllık yakıt tüketimi ise

$$m_{yakıt} = \frac{86,400 IDG U}{H_{alt} \eta_{is}} \quad (10)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada; H_{alt} yakıt tipine bağlı olarak yakıtın alt ısı değeridir. Çalışmada kullanılan yakıtlara ait özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Bölgesel ısıtmadaki borulama sisteminden kaynaklanan kayıplar nedeniyle oluşan yıllık toplam enerji maliyeti ($C_{yakıt}$) aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$C_{yakıt} = \frac{86,400 IDG U C_Y}{H_{alt} \eta_{is}} \quad (11)$$

Eşitlik (11)'de C_Y yakıt tipine dayanarak yakıtın birim maliyetidir.

Yalıtım malzemesinin birim hacmi (C_{Yal}) için toplam yalıtım malzemesi maliyeti aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan paslanmaz çelik boruya ait özellikler

Nominal boru ebadı (mm)	(inç)	Dış çap, R ₁ (mm)	Et kalınlığı, t (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
150	6	168,3	7,11	STD	40	28,26
200	8	219,1	8,18	STD	40	42,55

Not: Paslanmaz çelik boru (ANSI B 36.10) için yoğunluk, erime noktası ve iletkenlik katsayısı sırasıyla 7,99 g/cm³, 1371-1399 °C ve 16.2 W/m K'dir.

$$C_{\text{yalıtım}} = C_{\text{Yal}} V \quad (12)$$

Burada; $V = \frac{\pi}{4}(r_2^2 - r_1^2)L$ yalıtımda kullanılan malzemenin hacmidir.

Birçok termal sistemlerde ekipmanların çalıştırılması için harcanan enerji miktarı yıldan yıla önemli derecede değişmez. Bu durumda yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi, Ref. [20]'de sunulan metot kullanılarak hesaplanabilir. Bu referanstaki YDM analizi iki ekonomik terimin toplamı olarak düşünülür. İlk terim (F) ilk yıllık işletim maliyeti ile orantılı ve ikinci terim (E) ise sisteminin birinci maliyeti ile orantılıdır.

$$YDM = P_1 F + P_2 E \quad (13)$$

İlk terim (P₁), ilk yıl için yakıt fiyatına ömür yakıt fiyatının oranıdır. P₁'in en düşük değeri, ortalama yakıt fiyatlarının yüksek olduğunu gösterir. Bu potansiyel ortalama yakıt kazancının belirlenmesi açısından önemlidir. P₁, aşağıda ifade edildiği gibi enflasyon oranı (d), faiz oranı (i) ve ömür süresi (N) ile ilgili oranlardır.

$$\text{Eğer } i \neq d \text{ ise } P_1 = \frac{1}{(d-i)} \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^N \right] \quad (14)$$

$$\text{Eğer } i = d \text{ ise } P_1 = \frac{N}{1+i} \quad (15)$$

İkinci terim (P₂) ise yatırım miktarına yatırımın sonucu olarak giren ömürlük masrafların oranıdır. P₂'nin en yüksek değeri, yatırım en düşük ilk maliyete sahip olduğunda elde edilir. P₂, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_2 = 1 + P_1 M_s - \frac{R_v}{(1+d)^N} \quad (16)$$

Burada; M_s başlangıçtaki ilk maliyete yıllık bakım ve işletme maliyetlerine oranı ve R_v ilk maliyete perakende satış fiyatının oranıdır. Bu çalışmada bakım ve işletme maliyetlerinin olmadığı düşünülerek P₂ değeri 1 olarak alınmıştır. Bölgesel ısıtma için yalıtımlı borulama sistemiyle taşınan ısının toplam maliyeti aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir.

$$C_t = P_1 C_{\text{yakıt}} + P_2 C_{\text{yalıtım}} \quad (17)$$

Yalıtım malzemesi kullanılmasıyla ömür süresi üzerinden toplam enerji tasarrufu, P₁-P₂ metodu yoluyla formüle edilebilir.

$$S = \frac{86,400 P_1 IDGUC_Y}{H_{\text{alt}} \eta_{\text{is}}} - P_2 C_{\text{Yal}} V \quad (18)$$

Yalıtımlı borulama sisteminin dış yarıçapı, Eşitlik (18)'in minimize veya Eşitlik (17)'nin maksimize edilmesiyle belirlenebilir. Böylece r₂'ye göre S veya C_t'nin türevi alınarak sıfıra eşitlenir. Sonra Matlab optimization Toolbox kullanılarak optimum yalıtım kalınlığı (δ_{ins}) elde edilir. Burada δ_{ins} = r₂ - r₁'dir. Geri dönüş süresini bulma yolunda ise Eşitlik (14) veya (15)'teki durumlardan biri için P₁ seçilir. Eşitlik (18)'de seçilen P₁ yerleştirilerek sıfıra eşitlenir. Buradan ise geri dönüş süresi (N_{gd}) hesaplanmış olur. Bu çalışmada kullanılan parametreler Tablo 3'te özetlenmiştir.

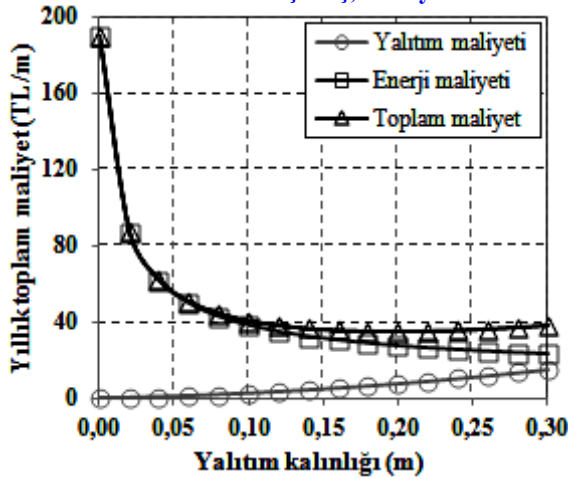
Tablo 3. Çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri

Parametreler	Değerler
Afyonkarahisar ili (3. Bölge)	
<i>Derece-gün</i>	2828 °C-gün
Yakıtlar	Tablo 2'ye bakınız
Boru	Tablo 3'e bakınız
Ekstrüde polistiren (XPS)	
<i>Yoğunluk</i>	30 kg/m ³
<i>Isı taşınım katsayısı</i>	0,032 W/m K
<i>Birim fiyatı</i>	157 TL/m ³
Killi toprak (1500 kg/m ³)	
<i>Isı taşınım katsayısı</i>	1,5 W/m K
Z	0,6 m
Enflasyon oranı	% 10,43
Faiz oranı	% 12
Ömür süresi	20 yıl

3. Bulgular ve tartışma

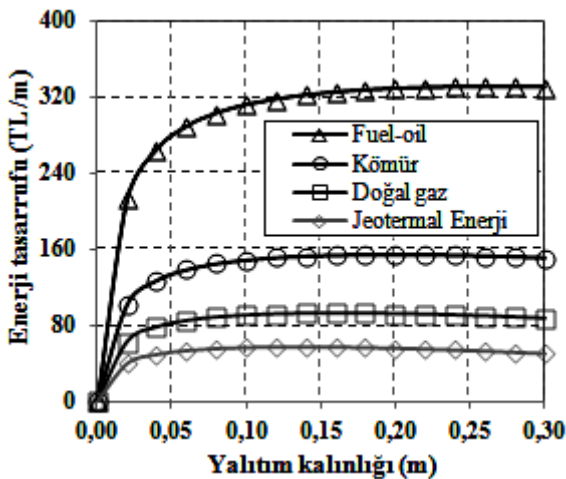
Bu çalışmada, yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi boru yalıtım ve enerji tüketim maliyetlerini içeren toplam maliyeti en aza indirmek için yer altı gömülü çelik borularda optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresini tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır. Yalıtılmış yer altı gömülü boru sisteminde taşınan sıcak su için yıllık toplam maliyetleri etkileyen iki parametre vardır. Bu parametreler yalıtım ve enerji maliyetleridir. Şekil 2'de görüldüğü gibi boru sisteminde yalıtım kalınlığının artmasına bağlı olarak enerji maliyetleri ve dolayısıyla ısı kaybı azalmaktadır. Bu yüzden birim uzunluktaki boru sisteminde taşınan suyu ısıtmak için gerekli enerji ihtiyacı azalır ve toplam maliyet düşer. Ancak yalıtım kalınlığının gereğinden fazla artırılması yalıtım maliyetini artırır. Bu durumda yüksek yalıtım maliyeti nedeniyle belli bir noktadan sonra toplam maliyet artmaya başlar. Toplam maliyetin minimum olduğu bu nokta optimum yalıtım kalınlığı değeri olarak ifade edilmektedir.

Yer altına gömülü çelik borularda yalıtım yapılmasının en



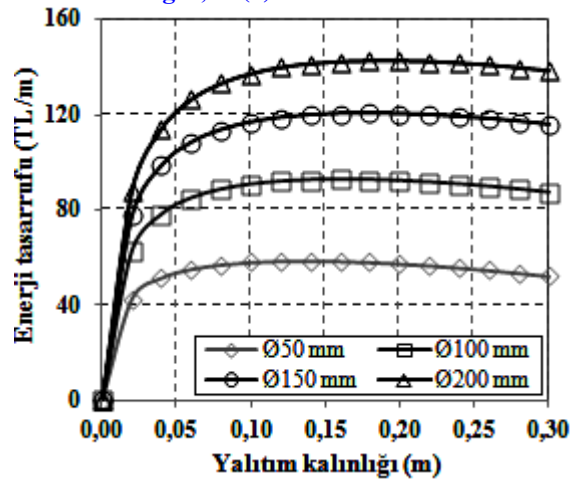
Şekil 2. Gömülü boru yalıtımı için maliyet ile yalıtım kalınlığı ilişkisi

önemli nedeni ise enerji tasarrufu yapmaktır. Şekil 3 ve 4'te görüldüğü gibi boru yalıtımında yalıtım kalınlığı artarken enerji tasarrufunun düşmeye başladığı noktada optimum yalıtım kalınlığı elde edilmiş olur. Yani enerji tasarrufu optimum yalıtım kalınlığında maksimum değeri alır. Şekil 3'te çeşitli yakıtlar için yalıtım kalınlığına göre enerji tasarrufunun değişimi gösterilmiştir. Şekilden en fazla enerji tasarrufu fuel-oil yakıtı kullanıldığında elde edilmektedir. Böyle olmasının en önemli nedeni yakıtların birim maliyetleridir. Birim maliyeti yüksek olan yakıtın enerji tasarrufu da o kadar fazla olmaktadır. Fosil yakıtların yakılmasından oluşacak hava kirliliklerinin azaltılmasında ise yakıttan elde edilecek tasarruflar düşünülmemelidir. Bundan dolayı jeotermal enerjinin olduğu yerlerde jeotermal enerji, olmadığı yerlerde ise doğal gazın kullanılması daha uygundur.



Şekil 3. Çeşitli yakıtlar için enerji tasarrufu ile yalıtım kalınlığı ilişkisi

Şekil 4'te ise farklı boru çapları için enerji tasarrufunun değişimi gösterilmektedir. Boru çapları arttıkça enerji tasarrufları da artmaktadır. Bu çalışmadaki hesaplama için pompalama masrafları düşünülmediği için böyle bir sonucun çıkması doğaldır. Ayrıca şekilden enerji tasarruf eğrileri büyük çaplı borularda birbirine yaklaştığı görülmektedir. Buradan anlaşılıyor ki büyük çaplı borularda aynı miktarda enerji tasarrufları elde edilebilecektir.



Şekil 4. Çeşitli boru çapları için enerji tasarrufu ile yalıtım kalınlığı ilişkisi

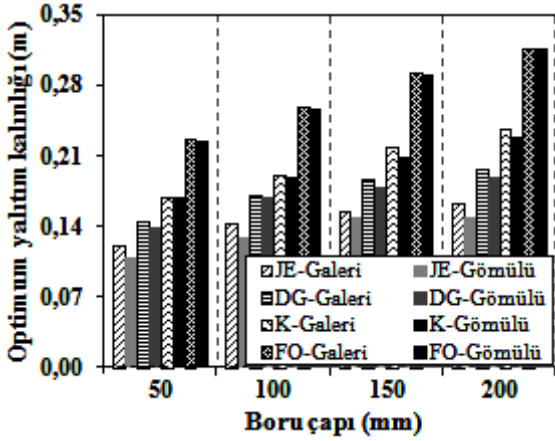
Seçilen şehir ve yalıtım malzemesi için yer altına gömülü borularda farklı yakıtlar ve boru çapları için hesaplanan değerler Tablo 4'te verilmiştir. Tablodan optimum yalıtım kalınlığının boru çaplarıyla arttığı görülmektedir. Ancak büyük çaplı borulardaki optimum yalıtım kalınlıklarının aynı olduğu görülmektedir. Buradan büyük çaplı borularda aynı kalınlıkta optimum yalıtım kalınlığı kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Enerji tasarruflarının da boru çapı arttıkça artmaktadır. Büyük çaplı borularda çok geniş ısı transfer alanı olması ve dolayısıyla yalıtım ile bunun engellenmesi büyük enerji tasarrufları sağlamaktadır. Ayrıca doğal gaz yakıtı için Ø100 ve Ø200 mm çaplarında yalıtımsız gömülü boruların, yalıtılmaları halinde sırasıyla %79 ve %83'e yakın tasarruf sağlanabilmektedir. Jeotermal enerji için enerji tasarrufu 36,72 ile 88,81 TL/m arasında değişirken fuel-oil yakıtı için 209,07 ile 512,26 TL/m arasında değişmektedir. Yer altına gömülü borulardaki yalıtım için boru çaplarının artması durumunda geri dönüş süreleri hakkında bir şey söylenememektedir. Fakat çeşitli yakıtlar için maliyetlerin yüksek olmasıyla ters orantılı olarak geri dönüş süreleri azalmaktadır. Bu durumda en düşük geri dönüş süresi fuel-oil yakıtına aittir. En fazla ise jeotermal enerji kullanılması halinde olmuştur.

Tablo 4. Yer altına gömülü borularda farklı yakıtlar ve boru çapları için hesaplanan bazı değerler

Hesap edilen değerler	Yakıtlar	Boru çapları			
		Ø50	Ø100	Ø150	Ø200
Optimum yalıtım kalınlığı (m)	Jeotermal	0,11	0,13	0,15	0,15
	Doğal gaz	0,14	0,17	0,18	0,19
	Kömür	0,17	0,19	0,21	0,23
	Fuel-oil	0,23	0,27	0,30	0,31
Enerji tasarrufu (TL/m)	Jeotermal	36,72	57,88	75,13	88,81
	Doğal gaz	58,67	92,71	120,53	142,75
	Kömür	97,81	154,64	201,38	238,86
	Fuel-oil	209,07	330,86	431,29	512,26
Geri dönüş süresi (yıl)	Jeotermal	1,41	1,37	1,63	1,69
	Doğal gaz	1,30	1,33	1,38	1,40
	Kömür	1,04	0,98	1,08	1,15
	Fuel-oil	0,89	0,88	0,87	0,89

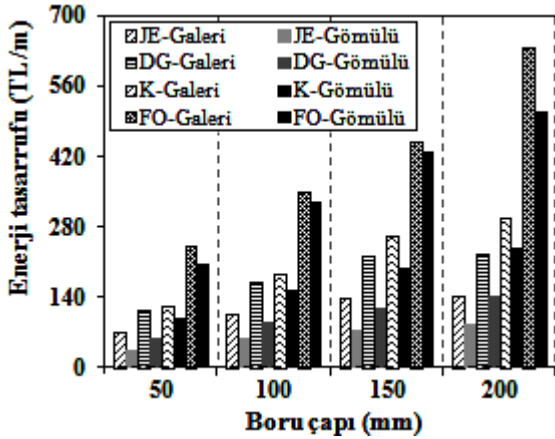
Pratikte çoğu kez bölgesel ısıtma sistemlerindeki borular toprak içinde gömülü olarak veya galeri boyunca geçirilir. Bu çalışmada hangisinin daha uygun olduğu da gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 5'te çeşitli yakıtlar için yer altına gömülü ve

galeriden geçen boruların yalıtılması halinde optimum yalıtım kalınlığının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5. Çeşitli yakıtlar için gömülü ve galeriden geçen boruların optimum yalıtım kalınlığının değişimi

Şekil 5'ten tüm yakıt ve boru çaplarında yer altına gömülmesi durumunda daha küçük optimum yalıtım kalınlıkları gerektiği görülmektedir. Fuel-oil yakıtı için her iki durumdaki optimum yalıtım kalınlığı birbirine eşit gibidir. Şekil 6'da ise enerji tasarrufları değişimi verilmiştir. Bu şekilden en fazla enerji tasarrufu boruların galeriden geçirilmesi durumunda yapılabileceği gösterilmektedir. Sonuçta yalıtımlı boruların galeri içinden geçirilmesi yer altına gömülmesinde daha fazla maliyetlidir. Enerji tasarrufu da o oranda büyük olacaktır. Türkiye'deki jeotermal bölgesel ısıtma boru hatlarına bakılacak olursa bunun böyle olduğu ortaya çıkmış olur. Bu durum matematiksel olarak bu çalışmada gösterilmiştir.



Şekil 6. Çeşitli yakıtlar için gömülü ve galeriden geçen boruların enerji tasarruflarının değişimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada yer altına gömülü çelik borularda yalıtım ile enerji tasarrufu için yaşam döngüsü maliyet (YDM) analizi kullanılarak optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri dönüş süresi hesaplandı. Türkiye'nin en soğuk şehirlerden biri Afyonkarahisar ilinde kömür, doğal gaz, fuel-oil ve jeotermal enerji gibi yakıtlar ve Ø50, Ø100, Ø150 ve Ø200 mm boru çapları için yalıtımın ekonomik faydaları incelenmiştir. Ayrıca yer altına gömülü borular ile galeriden geçirilen borular arasında bazı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışmanın sonucunda ise en tasarruflu yakıtın fuel-oil olduğu bulunmuştur. Buradan yakıtın maliyetinin büyük olması tasarrufunda büyük olmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtların hava kirliliğine neden olduğu düşünülerek Afyonkarahisar ili için jeotermal enerji uygun görülmüştür. Fakat jeotermal enerjinin olmadığı şehirler için ise doğal gaz yakıtı uygundur. Geri dönüş süresi ise maliyetin yüksek olmasına karşın o kadar kısa olmuştur. Çalışmada doğal gaz yakıtı için Ø100 ve Ø200 mm çaplarında yalıtımsız gömülü boruların, yalıtılmaları halinde sırasıyla %79 ve %83'e yakın tasarruf sağlanmıştır. Boru çapları büyüdükçe optimum yalıtım kalınlığı ve enerji tasarrufların arttığı buna karşın geri dönüş sürelerinin azaldığı sonucu da çıkmıştır. Ayrıca büyük çaplı borularda aynı kalınlıkta yalıtım kullanılabileceği ve tasarruf yapılabileceği bulunmuştur. Sonuç olarak bölgesel ısıtma boru hatlarında boruların galeri içinden geçirmek yerine yer altına gömerek iletmek daha avantajlıdır.

Semboller

- A : Borunun toplam yüzey alanı (m^2)
- A_i : Borunun iç yüzey alanı (m^2)
- C_Y : Yakıtın birim maliyeti (TL/kg, TL/ m^3 , TL/kW h)
- $C_{yakıt}$: Yıllık toplam enerji maliyeti (TL)
- C_{yal} : Birim hacim yalıtım malzemesinin maliyeti (TL/ m^3)
- $C_{yalıtım}$: Toplam yalıtım malzemesi maliyeti (TL)
- C_t : Toplam maliyet (TL)
- d : Enflasyon oranı (%)
- E_g : Boru sistemi kayıpları yıllık enerji gereksinimi (W)
- H_{alt} : Yakıtın alt ısıl değeri (J/kg, J/ m^3 , J/kW h)
- h_i : Boru sistemi iç yüzeyi ısı taşınım katsayısı (W/ m^2 K)
- i : Faiz oranı (%)
- IDG : Isıtma derece günler ($^{\circ}C$ -gün)
- k_i : Boru içi sıcak suyun ısı transfer katsayısı (W/m K)
- k_t : Toprağın ısı transfer katsayısı (W/m K)
- k_y : Yalıtım malzemesinin ısı transfer katsayısı (W/m K)
- k_1 : Çelik borunun ısı transfer katsayısı (W/m K)
- k_2 : Kılıf borunun ısı transfer katsayısı (W/m K)
- L : Boru sisteminin birim uzunluğu (m)
- $m_{yakıt}$: Yıllık yakıt tüketimi (kg, m^3 , kW h)
- N : Ömür süresi (yıl)
- N_p : Geri dönüş süresi (yıl)
- Pr : Prantl sayısı
- P_1 : İlk yıl için yakıt fiyatına ömür yakıt fiyatının oranı
- P_2 : Yatırım sonucu ömürlük masrafların oranı
- Q_A : Bölgesel ısıtmada boru sisteminin yıllık ısı kaybı (W)
- Q_b : Boru sisteminden meydana gelen ısı kayıpları (W)
- r_0 : Boru iç yarıçapı (m)
- r_1 : Boru dış yarıçapı (m)
- r_2 : Kılıf boru iç yarıçapı (m)
- r_3 : Kılıf boru dış yarıçapı (m)
- Re : Reynould sayısı
- R_b : Boru sisteminin toplam ısıl direnci (K/W)
- $R_{b,y}$: Yalıtımlı boru tabakaları toplam ısıl direnci (K/W)
- $R_{b,y-sız}$: Yalıtımsız boru tabakaları toplam ısıl direnci (K/W)
- S : Enerji tasarrufu (TL)
- T_b : Denge sıcaklık (K)
- T_{sa} : Günlük ortalama güneş hava sıcaklık (K)
- T_t : Toprak sıcaklığı (K)
- T_{ts} : Boru içi sıcak suyun ortalama tasarım sıcaklığı (K)
- U : Boru sistemi toplam ısı transfer katsayısı (W/ m^2 K)
- V : Yalıtım malzemesinin hacmi (m^3)
- YDM : Yaşam döngüsü maliyeti (TL)
- δ_{ins} : Optimum yalıtım kalınlığı (m)
- ΔT : Boru sisteminin iç ve dış tasarım sıcaklık farkı (K)
- Z : Boru merkezinden toprak üstü yükseklik (m)
- η_{is} : Isıtma sisteminin verimi (%)

Kaynaklar

1. Etemoğlu, A.B., İşman, M.K., Can, M., Bursa ve çevresinde jeotermal enerjinin kullanılabilirliğinin incelenmesi, U.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 11, 55-64, 2006.
2. Dombayci, Ö.A., Gölcü, M., Pancar, Y., Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources, Applied Energy, 83, 921-928, 2006.
3. TS 825, Binalarda ısı yalıtım kuralları, 1999.
4. Özkan, D.B., Onan, C., Optimization of insulation thickness for different glazing areas in buildings for various climatic regions in Turkey, Applied Energy, 81, 1331-1342, 2011.
5. Keçebaş, A., Alkan, M.A., Bayhan, M., Thermo-economic analysis of pipe insulation for district heating piping systems, Applied Thermal Engineering, 31, 3929-3937, 2011.
6. Zaki, G.M., Al-Turki, A.M., Optimization of multi-layer thermal insulation for pipelines, Heat Transfer Engineering, 21, 63-70, 2000.
7. Wechsato, W., Lorente, S., Bejan, A., Tree-shaped insulated designs for the uniform distribution of hot water over an area, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 3111-3123, 2001.
8. Kalyon, M., Sahin, A.Z., Application of optimal control theory in pipe insulation, Numerical Heat Transfer Part A-Applications, 41, 391-402, 2002.
9. Sahin, A.Z., Optimal insulation of ducts in extraterrestrial applications, International Journal of Energy Research, 28, 195-203, 2003.
10. Sahin, A.Z., Kalyon, M., The critical radius of insulation in thermal radiation environment, Heat and Mass Transfer, 40, 377-382, 2004.
11. Öztürk, İ.T., Karabay, H., Bilgen, E., Thermo-economic optimization of hot water piping systems: A comparison study, Energy, 31, 2094-2107, 2006.
12. Karabay, H., The thermo-economic optimization of hot-water piping systems: A parametric study of the effect of the system conditions, Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 53, 548-555, 2007.
13. Dağsöz, A.K., Yüksel, H.M., Borulardaki ısı kayıpları ve yalıtım örnekleri, 4. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir, 681-691, 4-7 Kasım 1999.
14. Holman, J.P., Heat transfer, McGraw-Hill Book Co., New York, 1992.
15. Büyükalaca, O., Bulut, H., Yılmaz, T., Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey, Applied Energy, 69, 269-83, 2001.
16. Başoğlu, Y., Keçebaş, A., Economic and environmental impacts of insulation in district heating pipelines, Energy, 36, 6156-6164, 2011.
17. Keçebaş, A., Determination of insulation thickness by means of exergy analysis in pipe insulation, Energy Conversion and Management, 58, 76-83, 2012.
18. Teknik Yayıncılık A.Ş., Yakıt fiyatları, Tesisat Enerji Teknolojileri ve Mekanik Tesisat Dergisi, <http://www.tesisat.com.tr/> [Erişim tarihi: 20/03/2012].
19. Keçebaş, A., Performance and thermo-economic assessments of geothermal district heating system: A case study in Afyon, Turkey, Renewable Energy, 36, 77-83, 2011.
20. Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley Interscience, New York, 2006.