



Entransy-based environmental and life cycle cost analysis to determine optimum insulation thickness: Effect of the fuel sources

Uğur Akbulut*

Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdoğan University, 53100, Rize, Türkiye

Highlights:

- Determination of optimum insulation thickness related to entransy dissipation
- Entransy-based environmental impact and life cycle cost analysis
- Effect of fuel types on entransy-based environmental and life cycle cost analysis

Keywords:

- Entransy
- Life Cycle Cost
- Environmental Impact
- Optimum Insulation Thickness

Article Info:

Received: 09.11.2022

Accepted: 25.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1201401

Correspondence:

Author: Uğur Akbulut
e-mail:
ugur.akbulut@erdogan.edu.tr
phone: +90 535 555 0875

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the influence of fuel sources on entransy-based environmental impact and life cycle cost (LCC) analysis while determining the optimum insulation thickness (OIT) were investigated. It was observed that increasing the thickness of the insulation minimizes entransy loss, resulting in environmental and economic benefits that reach their peak at the optimum point. The calculated net savings in entransy costs at the economical OIT are 13.32 \$/m² for hydrogen, 3.19 \$/m² for ethanol, 1.5 \$/m² for diesel, 0.96 \$/m² for lignite, 0.035 \$/m² for methanol, and 0.012 \$/m² for natural gas, respectively.

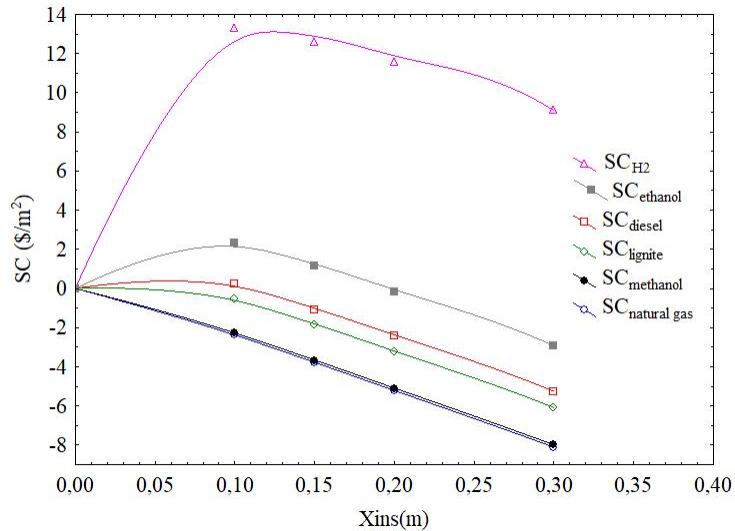


Figure A. Variations of net savings in entransy costs as a function of insulation thickness

Purpose: The aim of this research is to assess the influence of fuel sources on entransy-based environmental impact and LCC analysis while determining the OIT.

Theory and Methods: Entransy-based impact and LCC analysis are used to determine OIT of a described wall system which is insulated exteriorly. Analyses are carried out for the province of Istanbul, Turkey, considering energy demand in the heating period. Hydrogen, methanol, ethanol, natural gas, diesel and lignite are chosen as fuel sources, while glasswool is selected as the insulation material.

Results: The use of different fuels for a designed heating process affects the environmental and economic OIT, the total environmental impact, net environmental savings, the entransy loss, net savings in entransy, fuel consumption, CO₂ emissions, fuel costs, insulation costs, total costs, and net savings in entransy costs. In this study, all of these parameters were calculated as a function of insulation thickness and presented.

Conclusion: This paper contributes to determining OIT by using entransy-based environmental and life cycle cost analysis considering both environmental and economic benefits. The effects of the fuel sources on these analyses are discussed. Considering calculated the total environmental impacts natural gas comes to the fore in today's conditions, and domestic lignite resources can be an alternative to it. However, when the calculated net savings in entransy costs are examined, hydrogen takes the lead. For this reason, green and low-cost hydrogen production methods should be preferred as marketing policies in the future.



Optimum yalıtım kalınlığının entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti analizi ile belirlenmesi: Yakıt türünün etkisi

Uğur Akbulut*

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 53020, Rize, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Entransy dispasyonuna bağlı olarak optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi
- Entransy tabanlı çevresel etki ve yaşam döngüsü maliyeti analizi
- Yakıt türünün entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti analizine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.11.2022

Kabul: 25.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1201401

Anahtar Kelimeler:

Entransy,
yaşam döngüsü maliyeti,
çevresel etki,
optimum izolasyon kalınlığı

ÖZ

Bu çalışmada, optimum yalıtım kalınlığının (OYK) entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti (YDM) analizi ile belirlenmesinde yakıt türünün etkisi araştırılmıştır. Analizler İstanbul için ısıtma dönemindeki enerji gereksinimi dikkate alınarak yapılmıştır. İncelenen yakıt türleri olarak hidrojen, metanol, etanol, doğalgaz, dizel yakıt ve linyit, yalıtım malzemesi olarak ise camyünü seçilmiştir. Çevresel ve ekonomik OYK, toplam çevresel etki ve net çevresel kazanç, entransy kaybı ve net entransy tasarrufu, yakıt tüketimi, CO₂ emisyonu, yakıt maliyetleri, yalıtım maliyetleri, toplam maliyetler ve entransy maliyetlerindeki net tasarruflar değerlendirilmiştir. Camyünü için çevresel ve ekonomik OYK'ları sırasıyla: i) hidrojen kullanıldığında 0,297 m ve 0,0855 m; ii) metanol kullanıldığında 0,211 m ve 0,0044 m; iii) etanol kullanıldığında 0,226 m ve 0,0419 m; iv) doğalgaz kullanıldığında 0,126 m ve 0,0026 m; v) dizel yakıt kullanıldığında 0,185 m ve 0,0287 m; vi) linyit kullanıldığında ise 0,138 m ve 0,0230 m olarak tespit edilmiştir. Hesaplanan toplam çevresel etki ve entransy tabanlı yıllık toplam maliyetler değerlendirildiğinde günümüz şartlarında doğalgazın ön plana çıktığı ve yerli linyit kaynaklarımızın buna alternatif olabileceği anlaşılmaktadır. Ancak hesaplanan net çevresel kazanç ve entransy maliyetindeki net tasarruf miktarları incelendiğinde hidrojen başı çekmektedir. Buna istinaden gelecekte pazarlama politikası olarak yeşil ve düşük maliyetli hidrojen üretim yöntemleri tercih edilmelidir.

Entransy-based environmental and life cycle cost analysis to determine optimum insulation thickness: Effect of the fuel sources

H I G H L I G H T S

- Determination of optimum insulation thickness related to entransy dissipation
- Entransy-based environmental impact and life cycle cost analysis
- Effect of fuel types on entransy-based environmental and life cycle cost analysis

Article Info

Received: 09.11.2022

Accepted: 25.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1201401

Keywords:

Entransy,
life cycle cost,
environmental impact,
optimum insulation thickness

ABSTRACT

In this study, the influence of fuel sources on entransy-based environmental impact and life cycle cost (LCC) analysis while determining the optimum insulation thickness (OIT) has been investigated. Analyses are carried out for the province of Istanbul, Turkey, considering energy demand in the heating period. Hydrogen, methanol, ethanol, natural gas, diesel fuel, and lignite are chosen as fuel sources, while glasswool is selected as the insulation material. The environmental and economic OIT, the total environmental impact and net environmental savings, the entransy loss and net savings in entransy, fuel consumption, CO₂ emissions, fuel costs, insulation costs, total costs, and net savings in entransy costs are evaluated. The optimum environmental and economic glasswool insulation thicknesses are calculated to be: i) for hydrogen 0.297 m and 0.0855m, ii) for methanol 0.211 m and 0.0044m, iii) for ethanol 0.226 m and 0.0419m, iv) for natural gas 0.126 m and 0.0026 m, v) for diesel 0.185 m and 0.0287 m, vi) and for lignite 0.138 m and 0.0230 m. According to the environmental and economic evaluation made in this study, it is understood that natural gas comes to the fore and that our domestic lignite resources can be an alternative to this. In addition, in order to reduce the environmental impact factor of hydrogen, which is a pure carbon-free fuel, green and low-cost hydrogen production methods should be preferred.

1. Giriş (Introduction)

Enerji tüketimi ile iklim değişkenleri arasında uzun dönemli bir denge ilişkisi vardır. Etkili bir enerji tüketim stratejisi, küresel ısınma sorununun hafifletilmesine yardımcı olabilir [1]. Konut ve ticari binalar, toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturmakta ve bu sektörlerdeki enerji talebinin çoğunluğuna ısı kayıpları neden olmaktadır [2]. Isıtma ve soğutma, bir binanın enerji tüketiminin önemli kısmını kapsadığından, optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi, çevresel etkinin ve enerji kullanımıyla ilişkili maliyetlerin azaltılması için etkili bir yoldur [3].

Yalıtım malzemelerinin kullanılmasının ekonomik faydaları Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM) analizi ile belirlenir. Bu analizde sistemin kullanım ömrü ve mevcut güç faktörü dikkate alınarak toplam sistem maliyeti minimuma indirilir. Bu OYK'ni belirlemek için etkili bir araç ve yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır [4]. Literatürdeki birçok çalışmada, enerji ve ekserji yaklaşımı ile OYK'ni belirlemek için YDM analizi kullanılmaktadır. Bazı çalışmalar sadece yalıtım malzemesi tipinin [5-8] etkisine odaklanırken, bazıları yakıt türünün etkisini değerlendirmektedir [9-13]. Bu çalışmalar genellikle dünyanın çeşitli yerlerindeki geleneksel yalıtım malzemeleri (taşyünü, camyünü, XPS vb.) ve yakıt türleri (kömür, doğalgaz, fuel oil vb.) üzerinde yoğunlaşmıştır. Hasan [5] yakıt olarak dizel kullanırken taşyünü için 1 ve 1,7 yıl ve polistiren izolasyon için 1,3 ve 2,3 yıl geri ödeme süreleri ile yaşam döngüsü sürecinde 21 $\$/m^2$ 'ye varan tasarruf elde etmiştir. Çomaklı ve Yüksel [6], oldukça soğuk olan Doğu Anadolu iklim bölgesi için genişleşmiş polistirenin OYK'ni hesaplamıştır. Yakıt olarak kömür kullanımında Erzurum için 1,46 yıllık geri ödeme süresi ile yaşam döngüsü sürecinde 12,113 $\$/m^2$ 'ye varan önemli bir tasarruf tespit etmişlerdir. Alsayed ve Tayeh [7] ise farklı dış duvar yapılarına sahip Filistin binaları için farklı derece-gün sıcaklıklarını göz önünde bulundurarak YDM analizlerini yapmışlardır. Bu çalışmada yaz iklimlendirmesi için elektrik, kış ısıtması için LPG kullanılmış; yalıtım malzemesinin de polistiren ve poliüretan olduğu varsayılmıştır. İncelenen tüm vakalarda OYK 0,4 ile 9 cm arasında değişmektedir; 18 °C baz sıcaklığında tasarruf 4 ile 8 $\$/m^2$.yıl arasında olmuş ve ayrıca geri ödeme süreleri sırasıyla 0,9 ile 1,6 yıl arasında hesaplanmıştır. Aydın ve Bıykoğlu [8], çalışmalarında Türkiye'deki konutlar için OYK'ni belirlemişlerdir. Bu süreçte ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını dikkate almışlardır. Isıtma ihtiyacı TS825, soğutma ihtiyacı ise TS EN ISO 13790 standardına uygun olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, ısıtma ve soğutma enerji kaynakları olarak sırasıyla doğal gaz ve elektrik seçilmiştir. Toplam maliyet yaklaşımına dayalı YDM analizi 30 yıl sistem ömrü dikkate alınarak uygulanmıştır. İklim bölgelerine göre OYK değerleri: duvar (0,30–0,19 $W/m^2 K$) için 10,5 cm ile 17,3 cm; tavan (0,24–0,16 $W/m^2 K$) için 17,5 cm ile 26,8 cm; zemin (0,49–0,32 $W/m^2 K$) için 6 cm ile 9,8 cm arasında değişmektedir. Ayrıca binaların OYK ile yalıtılması ile TS 825'te verilen sınır değerlere göre %12,9 ila %21,5 arasında enerji tasarrufu sağlanacağı belirtilmiştir. Bolattürk [9], YDM analizini kullanarak Türkiye'nin dört iklim bölgesinden 16 şehir için OYK, enerji tasarrufunu ve geri ödeme sürelerini hesaplamıştır. Ayrıca yalıtım malzemesi olarak polistiren ile birlikte beş farklı yakıt; kömür, doğal gaz, akaryakıt, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ve elektrik değerlendirilmiştir. Hesaplanan OYK 2 ila 17 cm arasında, enerji tasarrufu %22 ile %79 arasında ve geri ödeme süreleri şehre ve yakıt türüne göre 1,3 ile 4,5 yıl arasında değişmektedir. Sonuç olarak, yüksek maliyetli bir yakıt kullanılırken enerji tasarrufunun önemli olduğu vurgulanmıştır. Dombaycı vd. [10] Denizli yöresinde yakıt olarak kömür, doğal gaz, LPG, fuel oil ve elektriğin kullanıldığı ekstrüde polistiren ve taş yünü yalıtımlı duvar konstrüksiyonları için YDM analizi yapmış ve OYK'ni hesaplamıştır. Kömür ve doğal gazın ekonomik nedenlerle tercih edilen yakıtlar olduğuna ve çevresel etkiler açısından doğal gazın kullanılmasının daha iyi olabileceğine

dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada bulunan optimum sonuç, yakıt olarak kömür ve yalıtım malzemesi olarak ekstrüde polistirenin kullanıldığı durum için hesaplanan 14,09 $\$/m^2$ yaşam döngüsü tasarrufu ve 1,43 yıl geri ödeme süresidir. Kaynaklı [11], Bursa'da bir prototip bina üzerinde çeşitli mimari tasarım özellikleri için uzun dönem derece-saat değer kayıtlarını dikkate alan bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada farklı yakıt türleri için YDM analizine dayalı olarak toplam maliyetler sunulmuştur. OYK'nin nispeten pahalı bir yakıt için daha yüksek bir değer aldığı belirtilmiştir. Yakıt türlerine göre Bursa için OYK 5,3 ila 12,4 cm arasında, Türkiye için ise 3,0 ila 23,1 cm arasında değişmektedir. Ayrıca maliyet açısından en uygun yakıt tüm iklim bölgeleri için doğal gaz olarak görünmektedir. Uçar ve Balo [12], beş enerji kaynağı ve dört yalıtım malzemesini karşılaştırarak farklı iklim bölgelerindeki çeşitli şehirler için dış duvarların OYK'ni incelemiştir. P1–P2 yöntemi kullanılarak net enerji tasarrufu hesaplanmıştır. Sonuç olarak, OYK'nin 1,06 ile 7,64 cm arasında değiştiği, enerji tasarrufunun 19 $\$/m^2$ ile 47 $\$/m^2$ arasında değiştiği ve geri ödeme sürelerinin şehir ve yakıt cinsine göre 1.8 ile 3.7 yıl arasında değiştiği bulunmuştur. En fazla enerji tasarrufu Ağrı'da LPG kullanımıyla, en az enerji tasarrufu ise Aydın'da doğalgaz kullanımıyla sağlanmıştır. Arslan vd. [13] farklı linyit türleri ve doğal gaz kullanılması durumunda OYK'ni belirlemek için ekserji tabanlı YDM analizini kullanmıştır. Yanma parametrelerinin de OYK üzerinde etkili olduğuna, ayrıca karbon ve nem içeriğine bağlı olarak yakıt türlerinin de baskın parametreler olduğuna dikkat çekmişlerdir. Sonuç olarak yakıt türleri, duvar türleri ve yanma parametrelerine bağlı olarak 0,0307 m ile 0,1465 m arasında değişen OYK değerleri elde edilmiştir.

Literatürde, enerji dönüşüm sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek için kullanılan en yaygın yöntemler enerji ve ekserji analizleridir. Bunlara ilaveten, "entransy" olarak bilinen başka bir kriter de sunulmaktadır. Entransy ısı ve elektrik iletiminin karşılaştırılmasına dayanır. Bir cismin entransy değeri o cismin ısı transfer kabiliyetini tanımlar (tıpkı bir kapasitörün elektrik enerjisinin yük transfer kabiliyetini belirlemesi gibi) [14]. Entransy, ısı iletimini optimize etmek için kullanışlı bir araçtır [15-20]. Ayrıca diğer bazı ısı transferi uygulamaları için de kullanılır [21-25]. Son yıllarda, küresel ısınmanın sonucu olarak ortaya çıkan problemler oldukça artmıştır ve artık sadece ekonomik kaygılara dayanarak optimum yalıtım kalınlığını belirlemek uygun değildir. Bu gerçek göz önünde bulundurularak OYK, sistemin toplam çevresel etkisinin minimize edildiği bir çevresel etki analizi ile belirlenebilir. Bu kapsamda Eco indikatör-99 faydalı bir araçtır. Eko indikatör-99 çevresel etkiyi sayılar veya puanlar cinsinden göstererek nispeten karmaşık olan yaşam döngüsü analizini basitleştirir. Bu yöntem, bir ağırlıklandırma içerir. Ağırlıklandırmanın ardından, ilgili çevresel etkiye göre hesaplanan her bir ürün veya süreç için tek bir puanın atanmasını sağlar. Bu puan, ortalama bir Avrupa vatandaşının ekonomideki genel üretim/tüketim teşebbüslerini göz önüne alarak yıllık çevresel yükünü temsil eder. Eko indikatör-99, "çevreye verilen zarar" insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynaklar şeklinde üç alt başlıkta tanımlar [26]. Özel vd. [3] yakın zamanda, çevresel etki analizi, YDM analizi ve entransy analizi dahil olmak üzere OYK'ni hesaplamak için alternatif bir yöntem geliştirmiştir. Çevresel etki ve YDM göz önünde bulundurularak Bilecik ili için OYK'ni araştırmak için entransy yaklaşımını ve tek bir duvar tipini kullanmışlardır. Doğal gaz kullanan bir ısıtma sistemi analiz edilmiştir. Sistemin toplam çevresel etkisinin optimum noktada minimum değerine ulaşana kadar azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, entransy kaybı, yalıtımın kalınlığı arttıkça düşer, ancak bir minimumu yoktur. Aynı şekilde sistemin net entransy tasarrufu da yalıtımın kalınlığı ile artar ancak hiçbir zaman maksimum değerine ulaşmaz. Sonuç olarak bu çalışmada çevresel ve ekonomik OYK'leri, sırasıyla: camyünü için 0,15m ve 0,012m ve taşyünü 0,064m ve 0,007m olarak belirlenmiştir. Bu araştırmayı takiben

Gülten [27], yalıtım malzemelerinin OYK üzerindeki çevresel etkilerini incelemek için entransy tabanlı çevresel ve termoekonomik analizi kullanmıştır. Yakıt olarak doğalgaz kullanımında yalıtım malzemesi olarak seçilen taşıyıcı ve camyünü dört ayrı şehir ve iki farklı duvar türü için incelenmiştir. Dıştan yalıtımlı duvarlar için ekonomik OYK 0,0615 ile 0,0001 m arasında bulunurken, sandviç duvar modeli için 0,0530 ile 0,0027 m arasında değişmektedir. Ayrıca, çevresel OYK 0,021 ile 0,0174 m arasında değişmekte olup ekonomik OYK'dan daha yüksek değerler almaktadır.

Yapılan literatür taraması, önceki çalışmalarda geleneksel yakıtların OYK üzerindeki etkisine odaklanıldığını göstermektedir. Buna ilaveten, sadece yalıtım malzemesi tipine ve iklim koşullarına odaklanılarak OYK'nın belirlenmesi için entransy tabanlı çevresel etki ve YDM analizini kullanan sadece birkaç çalışma mevcuttur. Literatürde, OYK belirlenirken entransy tabanlı çevresel etki ve YDM analizinin kullanılması halinde farklı yakıt türlerinin etkisini inceleyen bir çalışma yoktur. Bu çalışma ile mevcut literatür, hidrojen, metanol ve etanol gibi trend enerji kaynakları ile zenginleştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışma, çeşitli yakıt türleri kullanıldığında optimum çevresel ve ekonomik yalıtım kalınlığı belirlerken entransy tabanlı çevresel etki ve YDM analizlerinin nasıl yapılacağına dair bir örnek teşkil etmektedir.

2. Modelleme ve Analiz (Modelling and Analysis)

Bu çalışmanın kapsamı, yakıt türlerinin entransy tabanlı çevresel etki ve YDM analizi üzerindeki etkisini karakterize etmektir. Bu nedenle, aşağıdaki varsayımları içeren ayrıntılı bir vaka çalışması sunulmaktadır.

2.1. Kabuller (Assumptions)

- Dıştan yalıtımlı bir duvar incelenmektedir.
- Daha önceki entransy bazlı çevresel etki ve YDM analizlerine göre, cam yünü taş yününe göre daha çevre dostu ve ekonomiktir [3, 27]. Bu nedenle yalıtım malzemesi olarak cam yünü seçilmiştir.
- Hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel ve linyit olmak üzere altı yakıt türü karşılaştırılmıştır.
- CO₂ çevre için ana kirletici olarak kabul edilmiştir. Evsel ısıtma sürecinde ortaya çıkan az miktarda SO₂ and NO_x in etkileri ihmal edilmiştir.

- Nüfus yoğunluğunun fazla olması ve akaryakıt fiyatlarındaki çarpıcı artışlar nedeniyle farklı yakıt türlerine geçiş olasılığı nedeniyle analizler İstanbul ili için yapılmıştır.
- Hesaplamalar birim duvar yüzey alanı ve sadece ısıtma periyodu için yapılmıştır.

İncelenen duvar sistemi (Şekil 1) dıştan yalıtımlı olup iç sıva, tuğla, yalıtım malzemesi ve dış sıva katmanlarını içermektedir. Malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca hesaplamalarda kullanılan parametreler Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 1. İncelenen duvar sisteminin özellikleri (Properties of investigated wall system) [4]

Malzeme	Kalınlık (m)	k (W/mK)	R'' (m ² K/W)
İç sıva	0,02	0,87	0,023
Tuğla	0,13	0,45	0,289
İzolasyon	*	0,032	**
Dış sıva	0,03	1,4	0,021
R _i			0,125
R _o			0,040
R _{T,mins}			0,498

*İzolasyon kalınlığı parametrik olarak değişmektedir.

**R'' değeri izolasyon kalınlığına ve Tablo 1'de verilen değerlere bağlı olarak hesaplanmaktadır.

2.2. Entransy tabanlı çevresel etki analizi (Entransy-based environmental impact analysis)

Duvar yüzeyinin birim alanından ısı kaybı (J/m²) Eş. 1 kullanılarak hesaplanır [46].

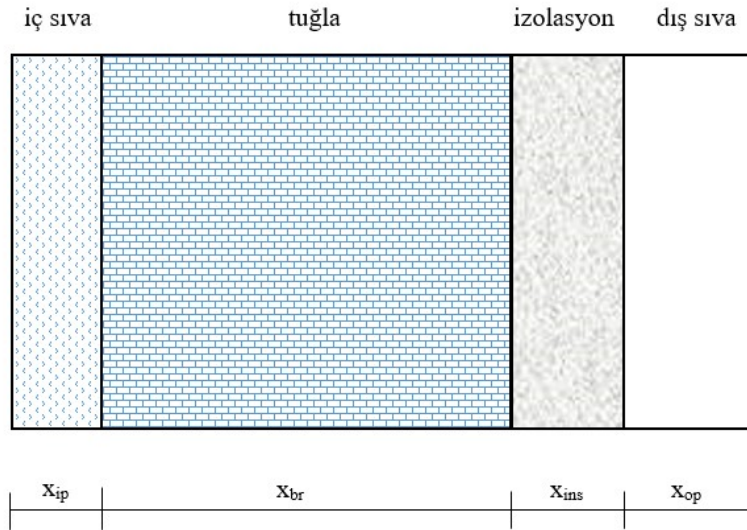
$$q = 86400 \cdot HDD \cdot U \quad (1)$$

HDD, ısıtma gün derecesini ve U, duvarın ısı transfer katsayısını (W/m² K) göstermekte olup birim duvar alanı için yıllık entransy kaybı (J.K/m²) Eş. 2 ile verilmektedir [3].

$$G = q(T_i - T_o) = 86400 \cdot HDD \cdot U \cdot (T_i - T_o) \quad (2)$$

Burada, T_i (K) and T_o (K) sırasıyla iç hava ve çevrenin sıcaklıklarıdır.

Bir mol hidrokarbon yakıt (C_aH_bO_sS_d) için stokiyometrik yanma reaksiyonu (R1)'de verilmiştir [47].



Şekil 1. İncelenen duvar sistemi (Investigated wall system)

Tablo 2. Hesaplamalarda kullanılan parametreler (Parameters which are used in the calculations)

Parametre	Birim	Değer	Kaynak
Camyünü çevresel etki puanı	mPts/kg	2,1	[3]
Hidrojen çevresel etki puanı	mPts/kg	830	[28]
Metanol çevresel etki puanı	mPts/kg	135	[29]
Etanol çevresel etki puanı	mPts/kg	188	[29]
Doğalgaz çevresel etki puanı	mPts/kg	114	[3]
Dizel çevresel etki puanı	mPts/kg	180	[30]
Linyit çevresel etki puanı	mPts/kg	26	[26]
CO ₂ çevresel etki puanı	mPts/kg	5,45	[3]
Çevre sıcaklığı	K	272,15	[31]
İç hava sıcaklığı	K	296,15	[3]
Isıtma gün derecesi	°C/yıl	1865	[4]
Hidrojenle ısıtma sistemi verimi		0,50	[32]
Metanol boyler verimi		0,90	[33]
Etanol boyler verimi		0,90	[33]
Doğalgaz boyler verimi		0,90	[4]
Dizel boyler verimi		0,80	[4]
Linyit sobası verimi		0,72	[34]
Camyünü yoğunluğu	kg/m ³	45	[3]
Hidrojen LHV	MJ/kg	120	[35]
Metanol LHV	MJ/kg	19,9	[35]
Etanol LHV	MJ/kg	26,7	[35]
Doğalgaz LHV	MJ/kg	50,2	[3]
Dizel LHV	MJ/kg	42,6	[35]
Linyit LHV	MJ/kg	17	[36]
Hidrojen birim fiyatı	\$/kg	10	[37]
Metanol birim fiyatı	\$/kg	0,12	[38]
Etanol birim fiyatı	\$/kg	1,3	[39]
Doğalgaz birim fiyatı	\$/kg	0,25	[40]
Dizel birim fiyatı	\$/kg	1,1	[41]
Linyit birim fiyatı	\$/kg	0,30	[42]
Camyünü birim fiyatı	\$/m ³	29	[43]
Faiz oranı	%	14	[44]
Enflasyon oranı	%	54,44	[45]

$$C_{\alpha}H_{\beta}O_{\gamma}N_{\delta}S_{\epsilon} + (\alpha + \beta + \gamma + \delta)(O_2 + 3,77 N_2) \alpha CO_2 + \frac{\beta}{2} H_2O + \epsilon SO_2 + \left\{ 3,77(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} + \epsilon) + \frac{\gamma}{2} \right\} N_2 \quad (R1)$$

ve yıllık yakıt tüketimi (kg/m²) Eş. 3'teki gibi tanımlanmıştır [27],

$$m_F = \frac{86400.HDD.U.(T_1 - T_0)}{\eta.\Delta H_{rx}.T_{rx}} \quad (3)$$

Burada, η yanma sisteminin verimini, ΔH_{rx} (J/kg) reaksiyon sıcaklığı ve basıncındaki yakıtın reaksiyon entalpisini, T_{rx} (K) yakıtın reaksiyon sıcaklığını ifade etmektedir.

Analizlerde, CO₂ çevre için ana kirlenici olarak kabul edilmiş ve evsel ısıtma sürecinde ortaya çıkan az miktarda SO₂ and NO_x in etkileri ihmal edilmiştir. Bu bağlamda, CO₂ emisyonu (kg/m²) Eş. 4'deki gibi hesaplanır.

$$m_{CO_2} = \frac{\alpha \text{ kmol}.M_{CO_2}}{1 \text{ kmol}.M_{fuel}} m_F = \frac{\alpha \text{ kmol}.M_{CO_2}}{1 \text{ kmol}.M_{fuel}} m_F = \frac{\alpha \text{ kmol}.M_{CO_2}}{1 \text{ kmol}.M_{fuel}} \left(\frac{86400.HDD.U.(T_1 - T_0)}{\eta.\Delta H_{rx}.T_{rx}} \right) \quad (4)$$

Burada, α 1 kmol yakıtın yanması sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonunu, M_{CO_2} (kg/kmol) karbondioksitin molar kütlelerini, M_{fuel} ise yakıtın molar kütlelerini göstermektedir.

Bu çalışmada araştırılacak olan yakıt türleri olarak hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel ve linyit seçilmiştir. Hidrojenin stokiyometrik yanması sonucunda karbondioksit açığa çıkmamaktadır. Literatürde

%90'dan fazla metan içerdiği doğal gazın kimyasal formülü CH₄ olarak kabul edilmiştir [3, 27]. Ayrıca dizelin kimyasal formülü C₁₂H₂₃ [48], ve linyitin kimyasal formülü C₃₉H₃₅O₁₀NS [49] olarak kabul edilmiştir. İncelenen yakıt türleri için stokiyometrik yanma reaksiyonları ve CO₂ emisyonlarının denklemleri türetilerek ve Tablo 3'te verilmiştir.

Eş. 5 ve Eş. 6 sırasıyla yalıtımsız ve yalıtımlı duvarın ısı transfer katsayılarını göstermektedir [3].

$$U_{nins} = \frac{1}{R_i + R_{ip} + R_{br} + R_{op} + R_o} = \frac{1}{R_{T,nins}} \quad (5)$$

$$U_{ins} = \frac{1}{R_i + R_{ip} + R_{br} + R_{ins} + R_{op} + R_o} = \frac{1}{R_{T,ins}} \quad (6)$$

Eş.7 ise yalıtımlı duvar için toplam çevresel etki puanını (mPts/m²) yansıtmaktadır [3, 26].

$$B_{T,ins} = (b_F m_F + b_{CO_2} m_{CO_2} + b_{ins} \rho_{ins} x_{ins})_{ins} \quad (7)$$

Burada b_F , b_{CO_2} ve b_{ins} sırasıyla yakıt, CO₂ ve izolasyon malzemesinin çevresel etki değerlerini (mPts/kg) temsil etmektedir. Ayrıca, yalıtım malzemesinin yoğunluğu ve kalınlığı q_{ins} ve x_{ins} olarak belirtilmiştir.

Net çevresel tasarruf (mPts/m²) Eş. 8 kullanılarak hesaplanabilir [3, 27];

$$S = (b_F m_F + b_{CO_2} m_{CO_2})_{nins} - (b_F m_F + b_{CO_2} m_{CO_2} + b_{ins} \rho_{ins} x_{ins})_{ins} \quad (8)$$

Tablo 3. İncelenen yakıtlar için stokiyometrik yanma reaksiyonları ve CO₂ emisyonu denklemleri (Stoichiometric combustion reactions and CO₂ emission equations for the examined fuels)

Yakıt	Stokiyometrik yanma reaksiyonu	CO ₂ emisyon denklemi
Hidrojen	2H ₂ + O ₂ → 2 H ₂ O	(R2) m _{CO₂,H₂} = 0
Metanol	2CH ₃ OH + 3O ₂ → 2CO ₂ + 4 H ₂ O	(R3) m _{CO₂,Methanol} = 1,375 m _F
Etanol	C ₂ H ₅ OH + 3O ₂ → 2CO ₂ + 3H ₂ O	(R2) m _{CO₂,Ethanol} = 1,913 m _F
Doğalgaz	CH ₄ + 2(O ₂ + 3,76 N ₂) → CO ₂ + 2 H ₂ O + 7,52 O ₂	(R4) m _{CO₂,NG} = 2,75 m _F
Dizel	C ₁₂ H ₂₃ + (12 + 23)(O ₂ + 3,77 N ₂) → 12CO ₂ + $\frac{23}{2}$ H ₂ O + $\left\{3,77(12 + \frac{23}{4})\right\}$ N ₂	(R5) m _{CO₂,Diesel} = 3,16 m _F
Linyit	C ₃₉ H ₃₅ O ₁₀ NS + (39 + 35 + 10 + 1)(O ₂ + 3,77 N ₂) → 39CO ₂ + $\frac{35}{2}$ H ₂ O + SO ₂ + $\left\{3,77(39 + \frac{35}{4} - \frac{10}{2} + 1) + \frac{10}{2}\right\}$ N ₂	(R6) m _{CO₂,Lignite} = 2,42 m _F

Duvar için hesaplanan net entransy kaybı tasarrufu ise (J.K/m²) Eş. 9'daki gibidir.

$$SG = G_{nins} - G_{ins} \quad (9)$$

OYK, B_T'nin x'e göre türevi alınarak ve sifıra eşitlenerek hesaplanır. OYK'ında B_T minimum değere ulaşacaktır. U parametresi, x değişkenine bağlıdır. Türev işlemini basitleştirmek ve sonucu daha basit ve net hale getirmek için, duvar ısı transfer katsayısının bir varyasyonu olarak yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonundaki değişimi gösteren bağımsız A ve B parametreleri Eş. 10 ve Eş. 11'deki gibi tanımlanmıştır.

$$A = \frac{m_{F,ins}}{U_{ins}} = \frac{86400 \text{ HDD} (T_1 - T_0)}{\eta \Delta H_{rx} T_{rx}} \quad (10)$$

$$B = \frac{m_{CO_2}}{U_{ins}} = \frac{\alpha \text{ kmol.M}_{CO_2}}{1 \text{ kmol.M}_{fuel}} \frac{86400 \text{ HDD} (T_1 - T_0)}{\eta \Delta H_{rx} T_{rx}} \quad (11)$$

Son olarak, çevresel OYK Eş. 12 kullanılarak hesaplanabilir.

$$x_{opt,env} = \sqrt{\frac{k_{ins}(b_F A + b_{CO_2} B)}{b_{ins} \rho_{ins}}} - k_{ins} R_{T,nins} \quad (12)$$

2.3. Entransy tabanlı YDM analizi (Entransy-based LCC analysis)

Entransy kavramını YDM analizi ile birleştirmek için, birim duvar yüzeyinin metrekaresi başına yıllık yakıt maliyeti Eş. 13 kullanılarak elde edilmiştir:

$$C_F = c_F m_F \quad (13)$$

Burada, c_F birim yakıt maliyetidir (\$/kg). Bugünkü değer faktörü (PWF) sistemin ömrü boyunca oluşacak yakıt maliyetini hesaplamak için kullanılmıştır. Enflasyon oranı, g, ve faiz oranı, i PWF'yi etkileyen değişkenlerdir. Enflasyona göre düzeltilmiş faiz oranı r ise Eş. 14 yardımıyla hesaplanabilir.

$$r = \begin{cases} \frac{i-g}{1+g} ; i > g \\ \frac{g-i}{1+i} ; i < g \end{cases} \quad (14)$$

Böylece PWF Eş. 15'deki gibi tanımlanır [46].

$$PWF = \begin{cases} \frac{1-(1+r)^{-N}}{1+g} ; i \neq g \\ (1+i)^{-1} ; i = g \end{cases} \quad (15)$$

Burada, N yalıtım malzemesinin ömrüdür. Sonuç olarak, yıllık yakıt maliyeti Eş. 16 kullanılarak hesaplanabilir.

$$C_F = c_F PWF m_F \quad (16)$$

Yalıtım malzemesinin toplam maliyeti (\$/m²) ise Eş. 17'deki şekilde tahmin edilebilir,

$$C_{ins} = c_{ins} x_{ins} \quad (17)$$

c_{ins} yalıtım malzemesinin birim hacim başına maliyetini göstermek üzere entransy tabanlı yıllık toplam maliyet ise (\$/m²) Eş. 18 ile hesaplanır.

$$C_T = c_T PWF m_F + c_{ins} x_{ins} \quad (18)$$

Birim duvar yüzey alanı başına entransy maliyetindeki net tasarruf (\$/m²) Eş. 19 ile verilmektedir.

$$SC = C_{T,nins} - C_{T,ins} \quad (19)$$

Ekonomik OYK, SC'nin r'ye göre türevi alınarak ve sifıra eşitlenerek hesaplanmalıdır ve OYK'nda SC, minimum değere ulaşır. Böylece, ekonomik OYK Eş. 20 kullanılarak hesaplanabilir.

$$x_{opt,eco} = \sqrt{\frac{A k_{ins} c_F PWF}{c_i}} - k_{ins} R_{T,nins} \quad (20)$$

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada yakıt türünün, OYK'nı belirlemek üzere kullanılan entransy tabanlı çevresel etki ve YDM analizleri üzerindeki etkisi araştırılarak sonuçlar değerlendirilmektedir. Yakıt türü olarak hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel ve linyit; yalıtım malzemesi olarak cam yünü seçilerek bir vaka çalışması şeklinde değerlendirme yapılmıştır. Entransy kaybı Türkiye'nin İstanbul şehri için ısıtma sezonu HDD değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 4'de, bu çalışmada hesaplanan çevresel ve ekonomik optimum yalıtım kalınlıkları ile literatürdeki bazı değerlerin karşılaştırılması verilmektedir. Literatürde bu çalışmada kullanılan entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti analizinin kullanıldığı iki adet çalışma bulunmaktadır [3, 27]. Tablo 4 de görüldüğü üzere sözü edilen çalışmalarda yalıtım malzemesi ve yakıt olarak camyünü ve doğalgaz ele alınmıştır. Ancak seçilen iklim bölgesi ve incelenen duvar sistemleri bu çalışmadan farklıdır. Bu çalışmada, İstanbul iklim şartlarında incelenen duvar sistemi için doğalgaz yakıtı kullanımında çevresel optimum yalıtım kalınlığı 0,126 m olarak bulunmuş olup mukayese edilen çalışmalarda Bilecik iklim şartlarında 0,150 m [3] ve Kars iklim şartlarında 0,214 m olarak tespit edilmiştir. Daha soğuk iklim şartlarında daha fazla miktarda yakıt tüketimi olduğu gerçeğinden yola çıkarak bu sonucun tutarlı olduğu görülmektedir. Yine bu çalışmada hesaplanan ekonomik optimum yalıtım kalınlıklarını öncelikle bu iki çalışmada bulunan değerlerle mukayese

Tablo 4. Hesaplanan çevresel ve ekonomik optimum yalıtım kalınlıklarının literatürdeki bazı değerlerle karşılaştırılması
(Comparison of the calculated environmental and economic optimum insulation thicknesses with some values from the literature)

Metot	Şehir	Yakıt	Yalıtım Malzemesi	Çevresel OYK (m)	Ekonomik OYK (m)	Kaynak
ETÇVYDMA	İstanbul	Hidrojen	Camyünü	0,297	0,0855	Bu çalışma
		Metanol	Camyünü	0,211	0,0044	
		Etanol	Camyünü	0,226	0,0419	
		Doğalgaz	Camyünü	0,126	0,0026	
		Dizel	Camyünü	0,185	0,0287	
		Linyit	Camyünü	2,022	0,0230	
ETÇVYDMA	Bilecik	Doğalgaz	Camyünü	0,15	0,012	[3]
		Doğalgaz	Taşyünü	0,064	0,007	
ETÇVYDMA	Kars	Doğalgaz	Camyünü	0,214	0,0615	[27]
		Doğalgaz	Taşyünü	0,0960	0,0208	
YDMA	Filistin	Dizel	Taşyünü	—	0,028-0,039	[5]
		Dizel	Polisitren	—	0,020-0,043	
		Dizel	Taşyünü	—	0,061-0,072	
		Dizel	Polisitren	—	0,046-0,057	
YDMA	Erzurum	Kömür	Stropor	—	0,105	[6]
		Kars	Kömür	—	0,107	
		Erzincan	Kömür	—	0,085	
YDMA	İstanbul	Doğalgaz	Polisitren	—	0,043	[9]
		Kömür	Polisitren	—	0,052	
		Dizel	Polisitren	—	0,087	
		Elektrik	Polisitren	—	0,094	
		LPG	Polisitren	—	0,103	
YDMA	Denizli	Doğalgaz	Sert Köpük (EPS)	—	0,076	[10]
		Kömür	Sert Köpük (EPS)	—	0,095	
		Dizel	Sert Köpük (EPS)	—	0,138	
		Elektrik	Sert Köpük (EPS)	—	0,259	
		LPG	Sert Köpük (EPS)	—	0,174	
YDMA	Kocaeli	Doğalgaz	Ekstrüde Polisitren	—	0,0106	[12]
		Kömür	Ekstrüde Polisitren	—	0,0113	
		Dizel	Ekstrüde Polisitren	—	0,0252	
		Elektrik	Ekstrüde Polisitren	—	0,0324	
		LPG	Ekstrüde Polisitren	—	0,0408	
ETYDMA	Kütahya	Çeşitli Linyitler (Tunçbilek, Soma, Yatağan) ve Doğalgaz	XPS, EPS, Taşyünü	—	0,031-0,147	[13]

* ETÇVYDMA: Entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti analizi,

**YDMA: Yaşam döngüsü maliyet analizi,

***ETYDMA: Ekserji tabanlı yaşam döngüsü maliyet analizi

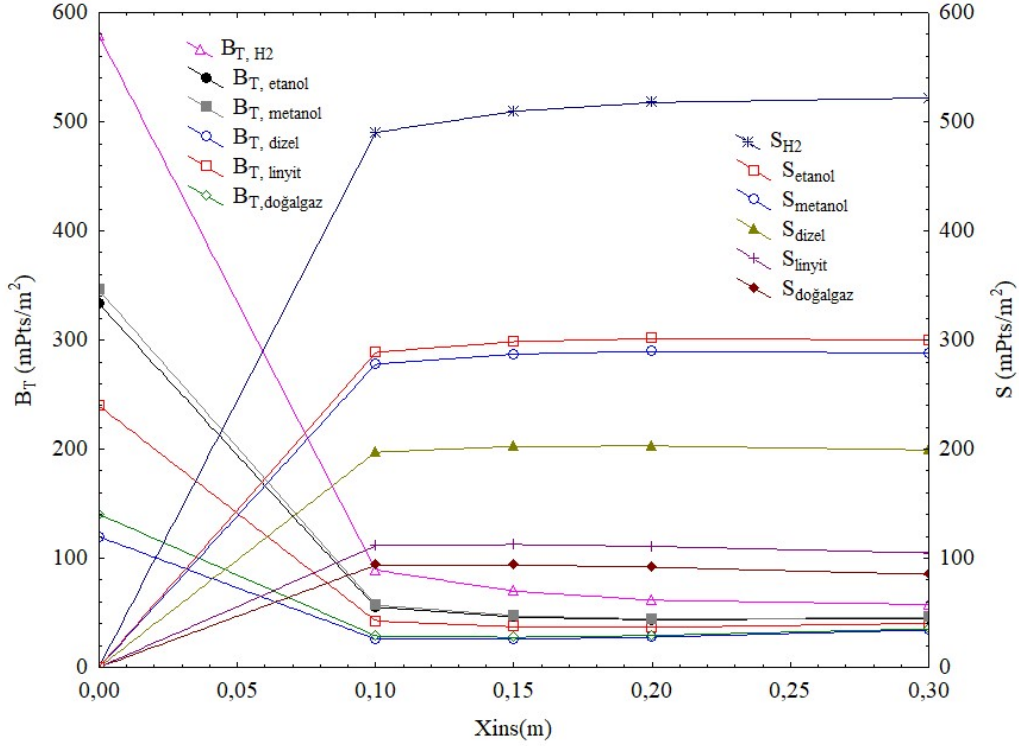
etmek yerinde olacaktır. Ancak bu sefer ekonomik parametrelerin etkin rol oynayacağı göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada, İstanbul iklim şartlarında incelenen duvar sistemi için doğalgaz kullanımında hesaplanan ekonomik optimum yalıtım kalınlığı 0,0026 m'dir. Bu değer, mukayese edilen çalışmalarda Bilecik iklim şartlarında 0,012 m [3] ve Kars iklim şartlarında 0,0615 m olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak sadece daha soğuk iklim şartlarında daha fazla miktarda yakıt tüketimi olduğundan hesaplanan ekonomik optimum yalıtım kalınlığının daha büyük olduğu kanaatine varmak mümkün değildir. Mukayese edilen çalışmalarda farklı duvar sistemlerinin incelendiği ve farklı tarihlerde yapılan çalışmalara etkileyen ekonomik parametrelerin de oldukça etkili olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla bu çalışmada bulunan değerler diğerlerinden oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bunun sebepleri, yakıt tüketiminin düşük olması, dolar bazında yakıt maliyeti ve izolasyon malzemesinin maliyetinin daha ucuz olması ve hesaplanan bugünkü değer faktörünün daha küçük olmasıdır. Burada not etmek gerekir ki dolar bazında yakıt ve izolasyon malzemesinin ucuz olması ekonomi açısından olumlu iken hesaplanan bugünkü değer faktörünün küçük olması olumsuzdur. Bugünkü değer faktörünün küçük olması içinde bulunduğumuz düşük faiz-yüksek enflasyon sarmalının bir sonucudur. Tablo 4'de sunulan diğer çalışmalarda entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti analizi metodu kullanılmamıştır. Ayrıca bu çalışmalarda yalnızca ekonomik optimum yalıtım kalınlığı

incelenmiştir. Metot olarak mukayese edildiğinde entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti analizi kullanılarak hesaplanan ekonomik optimum yalıtım kalınlığı değerlerinin yaşam döngü maliyet analizi ve ekserji tabanlı yaşam döngüsü maliyet analizi metodu kullanılarak bulunan ekonomik optimum yalıtım kalınlıklarına göre nispeten küçük olduğu söylenebilir. Dolayısıyla pratikte uygulanabilir optimum yalıtım kalınlıkları ortaya çıkmamaktadır. Bunun nedeni entransy dispasyonun yakıt entransy akısından kayda değer ölçüde küçük olmasıdır [3]. Bu metodu incelenen vaka çalışmaları için iklim şartları, yalıtım malzemeleri, yakıt türleri, ekonomik parametreler, çevresel etkiler gibi farklı parametreler açısından bir değerlendirme aracı olarak görmek yerinde olacaktır.

3.1. Entransy tabanlı çevresel etki analizi (Entransy-based environmental impact analysis)

Şekil 2 farklı yakıt türleri olarak hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel veya linyit kullanıldığında yalıtım kalınlığının bir fonksiyonu olarak toplam çevresel etki ve net çevresel tasarruftaki değişimi göstermektedir.

Şekil 2'ye göre toplam çevresel etki değerleri OYK'na kadar azalmakta ve sonra tekrar yükselmektedir. Bunun aksine net çevresel



Şekil 2. Farklı yakıt türleri için yalıtım kalınlığının toplam çevresel etki ve net çevresel tasarrufa etkileri (Effects of insulation thickness on the annual environmental impact and the net environmental savings for different fuel types)

tasarruf değerleri OYK'nda maksimum çevresel etkiye ulaşana kadar artar ve daha sonra düşmeye başlar. Camyünü için hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel ve linyit kullanıldığında çevresel OYK'ları sırasıyla 0,297 m, 0,211 m, 0,226 m, 0,126 m, 0,185 m ve 0,138 m'dir. Bulunan çevresel optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen toplam çevresel etki ve net çevresel tasarruf değerleri: hidrojen için 57,59 ve 521,82 mPts/m², metanol için 43,31 ve 289,93 mPts/m² ve etanol için 44,15 ve 301,71 mPts/m², doğal gaz için 25,34 ve 94,24 mPts/m², dizel için 36,5 ve 203,15 mPts/m², linyit için ise 27,57 ve 112,69 mPts/m² olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan çevresel etki değerlerine göre, araştırılan yakıtlar en çevre dostu olandan çevreye en az duyarlı olana doğru doğal gaz, linyit, dizel, metanol, etanol ve hidrojen olarak sıralanabilir. Hidrojenin bu düzenlemedeki yeri, kullanılan hidrojen üretim yöntemleri nedeniyle hidrojenin çevresel etki faktörünün hala çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle yakın gelecekte hidrojenin çevresel etki faktörünü azaltmak için yeşil ve düşük maliyetli hidrojen üretim yöntemleri tercih edilmelidir.

Şekil 3'te camyünü için yalıtım kalınlığının bir fonksiyonu olarak entransy kaybı ve entransy kaybındaki net tasarruf gösterilmektedir.

Şekil 3'ten, yalıtım kalınlığının artmasıyla birlikte entransy kaybı logaritmik olarak azalırken, entransy kaybındaki net tasarrufun aynı eğilimde arttığı anlaşılmaktadır. Bu parametreler için optimum bir değer yoktur ancak ilk andaki değişimlerinin ani olup daha sonra yavaşladığı görülmektedir. Ayrıca bu parametreler yakıt türünden bağımsızdır. Örneğin 0,05 m yalıtım kalınlığında entransy kaybı ve entransy kaybındaki net tasarruf sırasıyla 3,02 GJ/K.m² ve 9,47 GJ/K.m² olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4 ve Şekil 5'de, yakıt olarak hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel veya linyit kullanılırken camyünü yalıtım kalınlığının bir

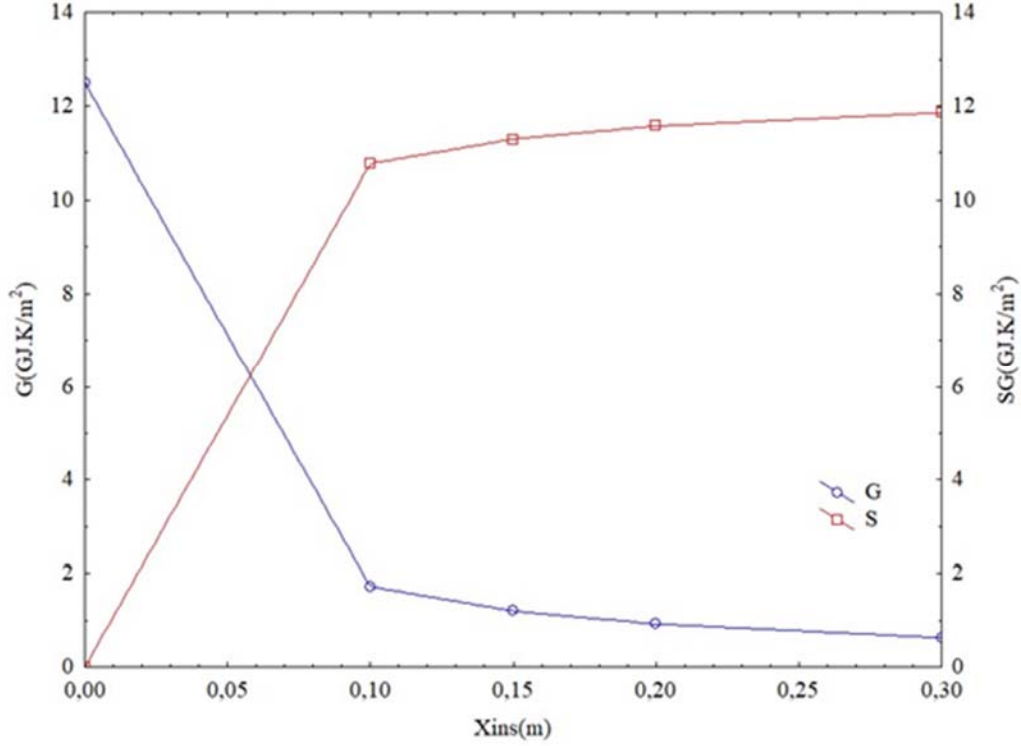
fonksiyonu olarak yakıt tüketimi ve CO₂ emisyon değerleri görülmektedir.

Şekiller 4. ve 5'de görüldüğü üzere, yalıtım kalınlığının artması enerji gereksinimini azaltarak hem yakıt tüketimini hem de CO₂ emisyonunu azaltır ancak bu durum OYK'na kadar devam eder. Bu çalışmanın kabulleri ve koşulları dahilinde hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, motorin ve linyit karşılaştırıldığında, hidrojen tabanlı yakıt tüketim oranları sırasıyla 1; 3,35; 2,5; 1,33; 1,76 ve 4,9'dur. Ayrıca doğal gaz bazı CO₂ emisyon oranları sırasıyla 0; 1,26; 1,31; 1; 1,33 ve 3,69'dur. Bulunan sonuçlar, örneğin 0,05 m yalıtım uygulaması yapıldığında hem yakıt tüketiminin hem de CO₂ emisyonunun %75,8 oranında azalacağını göstermektedir.

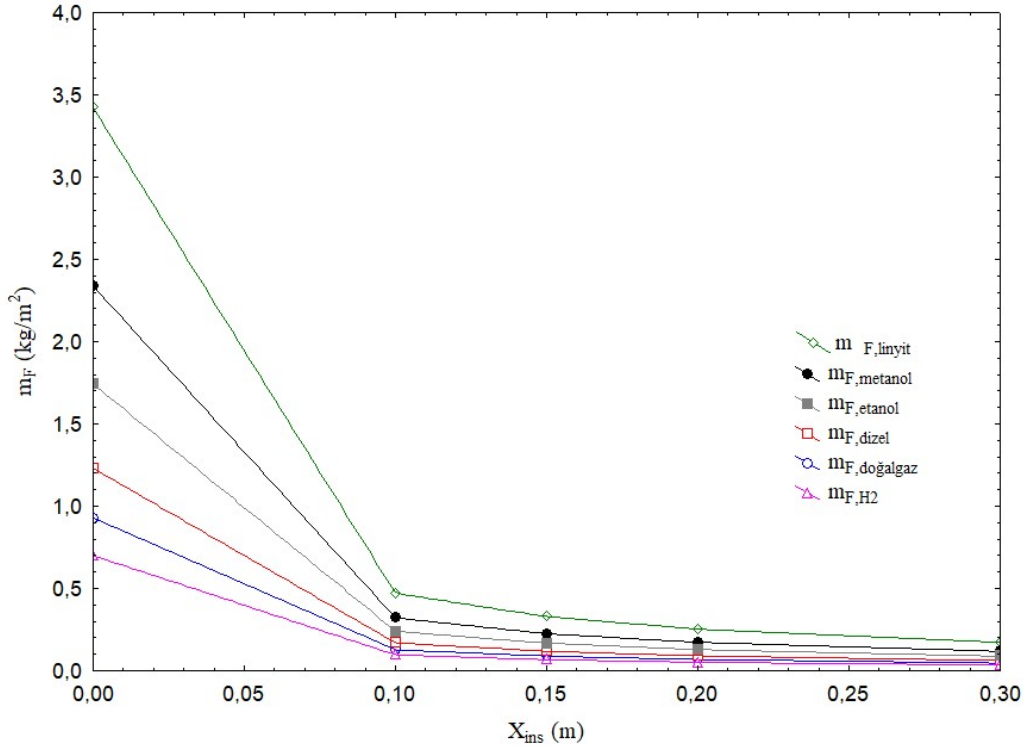
3.2. Entransy tabanlı YDM analizi (Entransy-based environmental impact analysis)

Yakıt olarak hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel veya linyit kullanılırken camyünü için yalıtım kalınlığının bir fonksiyonu olarak, yakıt maliyeti ve yalıtım maliyeti (Şekil 6'da), toplam maliyet (Şekil 7'de), entransy maliyetindeki net tasarruf (Şekil 8'de) gösterilmektedir.

Yalıtım kalınlığı ile birlikte yalıtım maliyeti doğrusal olarak artarken yakıt maliyeti başta keskin bir düşüş göstermekte, bundan sonra düşüş daha küçük değerlerle devam etmektedir. Ayrıca yakıt maliyetleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla doğal gaz, metanol, linyit, dizel, etanol ve hidrojen şeklinde sıralanabilir (Şekil 6). Yalıtım kalınlığı arttıkça toplam maliyet ekonomik OYK olarak adlandırılan belirli bir noktaya kadar azalmaktadır (Şekil 7). Yakıt olarak hidrojen, metanol, etanol, doğal gaz, dizel veya linyit kullanıldığında camyünü için ekonomik OYK'ları sırasıyla 0,0855 m, 0,0044 m, 0,0419 m, 0,0026 m, 0,0287 m ve 0,0230 m olarak hesaplanmıştır. Bu kalınlıklar



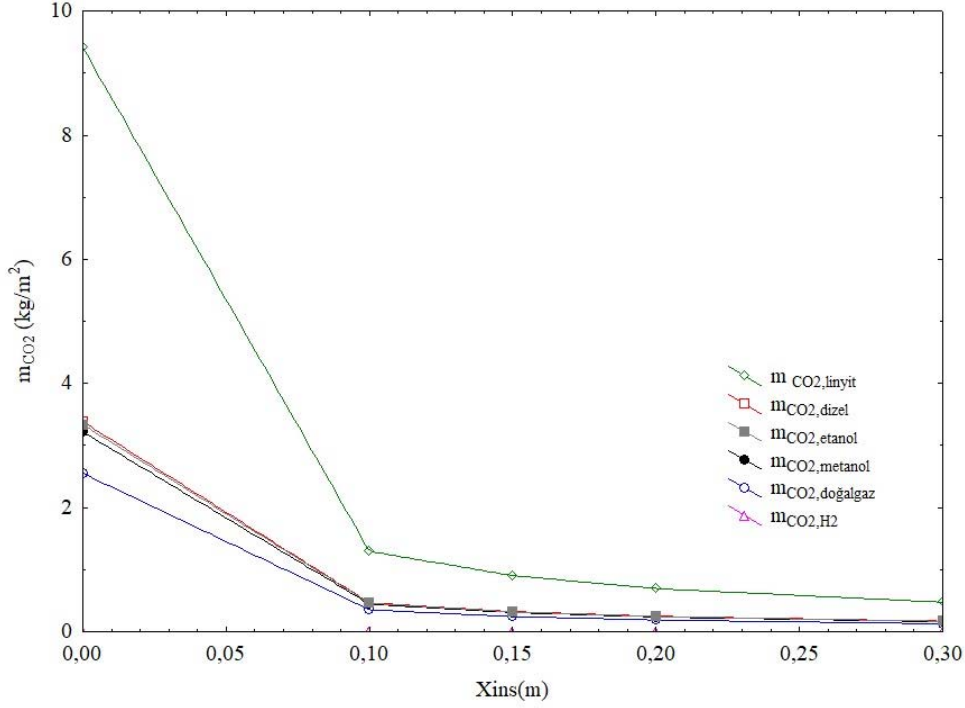
Şekil 3. Farklı yakıt türleri için yalıtım kalınlığının entransy kaybı ve entransy kaybındaki net tasarrufa etkileri (Effects of insulation thickness on the entransy loss and the net savings for different fuel types)



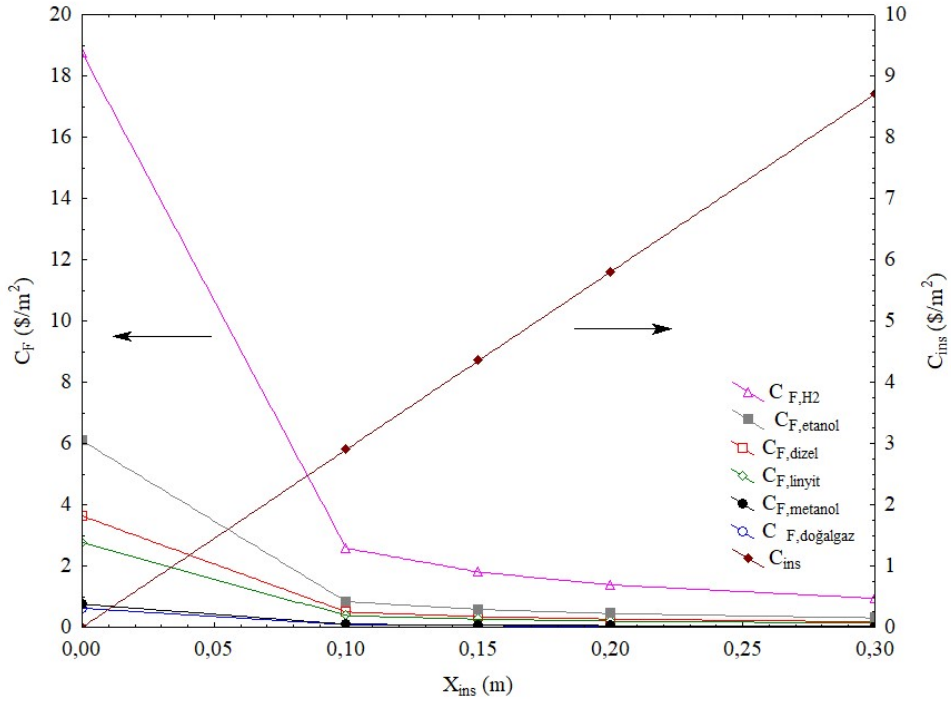
Şekil 4. Farklı yakıt türleri için yalıtım kalınlığının yakıt tüketimine etkileri

literatürdeki diğer çalışmalarla nispeten mukayese edilebilir, çünkü disipasyonu yakıt entransy akısından kayda değer ölçüde küçüktür

[3]. Ayrıca, ekonomik OYK'larında toplam maliyet ve entransy maliyetindeki net tasarruf, sırasıyla: hidrojen kullanıldığında 5,43



Şekil 5. Farklı yakıt türleri için yalıtım kalınlığının CO₂ emisyonuna etkileri
(Effects of insulation thickness on the CO₂ emission for different fuel types)

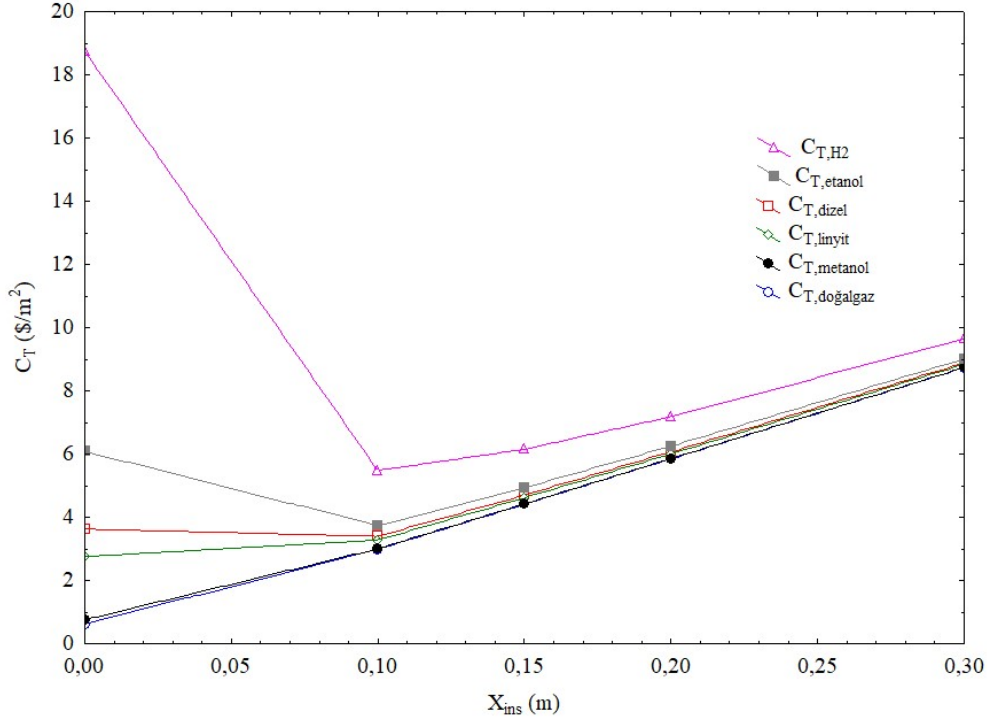


Şekil 6. Farklı yakıt türleri için yalıtım kalınlığının yakıt maliyeti ve yalıtım maliyetine etkileri
(Effects of insulation thickness on the fuel cost and the insulation cost for different fuel types)

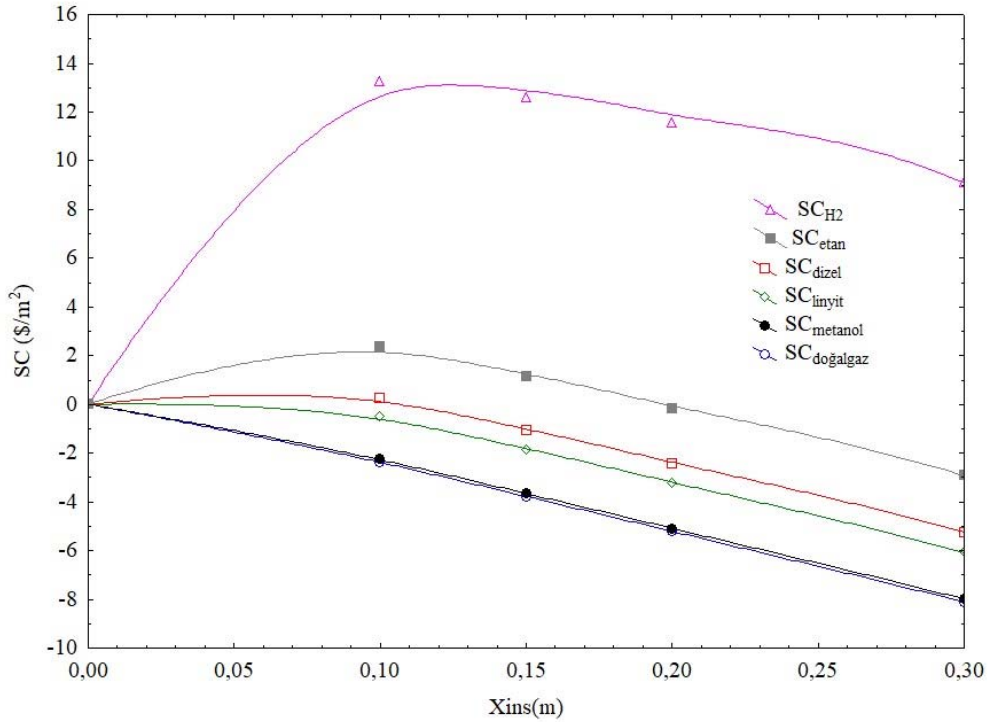
\$/m² ve 13,32 \$/m²; metanol kullanıldığında 0,72 \$/m² ve 0,035 \$/m²; etanol kullanıldığında 2,89 \$/m² ve 3,19 \$/m²; doğalgaz kullanıldığında 0,61 \$/m² ve 0,012 \$/m²; dizel kullanıldığında 2,13 \$/m² ve 1,5 \$/m²; linyit kullanıldığında 1,80 \$/m² ve 0,96 \$/m²'dir (Şekil 7 ve Şekil 8).

4. Simgeler (Symbols)

- b : Birim kütle başına çevresel etki puanı (mPts/kg)
- B : Birim yüzey alanı başına çevresel etki puanı (mPts/m²)
- c : Malzemenin birim maliyet (\$/kg)



Şekil 7. Farklı yakıt türleri için yalıtım kalınlığının toplam maliyete etkileri
(Effects of insulation thickness on the total cost for different fuel types)



Şekil 8. Farklı yakıt türleri için yalıtım kalınlığının entransy maliyetindeki net tasarrufa etkileri
(Effects of insulation thickness on the net savings in entransy cost for different fuel types)

C	: Yıllık entransy maliyeti (\$/m ²)	HDD	: Isıtma gün derecesi (°C/yıl)
g	: Enflasyon oranı (%)	i	: Faiz oranı (%)
G	: Yıllık entransy kaybı (J.K/ m ²)	m	: Birim alan başına yıllık kütle (kg/m ²)

N	: Ömür (yıl)
PF	: Bugünkü değer faktörü
R''	: Isıl direnç (m ² K/W)
S	: Yıllık net çevresel tasarruf (mPts/m ²)
SC	: Entransy maliyetindeki yıllık net tasarruf (\$/m ²)
SG	: Entransy kaybındaki yıllık net tasarruf (J.K/m ²)
T	: Sıcaklık (°C veya K)
U	: Isı transfer katsayısı (W/ m ² K)
V	: Hacim(m ³)
x	: Yalıtım kalınlığı (m)

4.1. Latin Harfleri (Latin letters)

ΔH	: Entalpi (J/kg)
η	: Verim (%)

4.2. Kısaltmalar (Abbreviations)

YDM	: Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost)
LHV	: Alt Isıl Değer (Lower Heating Value) (J/kg)
OYK	: Optimum Yalıtım Kalınlığı (Optimum Insulation Thickness) (m)

4.3. Alt indisler (Subscripts)

br	: Tuğla
CO ₂	: Karbondioksit
F	: Yakıt
i	: İç
ins	: Yalıtım
ip	: İç sıva
nins	: Yalıtımsız
o	: Dış
op	: Dış sıva
opt	: Optimum
rx	: Reaksiyon
T	: Toplam

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, optimum yalıtım kalınlığının (OYK) entransy tabanlı çevre ve yaşam döngüsü maliyeti (YDM) analizi ile belirlenmesinde yakıt türünün etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- OYK'nda hem çevresel etki hem de toplam maliyet azalmaktadır.
- Yalıtım kalınlığının artırılması, entransy kaybını azaltarak OYK'nda maksimum ekonomik ve çevresel faydaları sağlamaktadır.
- Isınma sürecinde farklı yakıtların kullanılması kimyasal yapıları nedeniyle yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonunu dolayısıyla çevresel etkiyi ve toplam maliyeti etkiler.
- Camyünü için çevresel ve ekonomik OYK'ları sırasıyla: hidrojen kullanıldığında 0,297 m ve 0,0855m; metanol kullanıldığında 0,211 m ve 0,0044m; etanol kullanıldığında 0,226 m ve 0,0419m; doğalgaz kullanıldığında 0,126 m ve 0,0026 m; dizel yakıt kullanıldığında 0,185 m ve 0,0287 m; vi) linyit kullanıldığında 0,138 m ve 0,0230 m olarak hesaplanmıştır. Bu kalınlıklar literatürdeki diğer çalışmalarla nispeten mukayese edilebilir, çünkü entransy kaybı yakıt entransy değerinden kayda değer ölçüde küçüktür.
- Hesaplanan çevresel ve ekonomik OYK için toplam çevresel etki ve net çevresel kazanç değerleri: hidrojen kullanıldığında 57,59 ve 521,82 mPts/m²; metanol kullanıldığında 43,35 ve 289,89 mPts/m²; etanol kullanıldığında 44,15 ve 301,71 mPts/m²; doğalgaz kullanıldığında 25,34 ve 94,24 mPts/m²; dizel yakıt kullanıldığında 36,5 ve 203,15 mPts/m²; linyit kullanıldığında 27,57 ve 112,69 mPts/m² olarak hesaplanmıştır.

- Camyünü için tespit edilen çevresel ve ekonomik OYK için hesaplanan toplam maliyet ve entransy maliyetindeki net tasarruf: hidrojen kullanıldığında 5,43 ve 13,32 \$/m²; metanol kullanıldığında 0,72 ve 0,035 \$/m²; etanol kullanıldığında 2,89 ve 3,19 \$/m²; doğalgaz kullanıldığında 0,61 ve 0,012 \$/m²; dizel kullanıldığında 2,13 ve 1,5 \$/m²; linyit kullanıldığında 1,80 ve 0,96 \$/m² dir
- Entransy kaybı ve entransy kaybındaki net tasarruf yakıt türünden bağımsızdır.
- Bu çalışmanın kabulleri ve koşulları dahilinde hidrojen, metanol, etanol, doğalgaz, motorin ve linyit karşılaştırıldığında, hidrojen tabanlı yakıt tüketim oranları sırasıyla 1; 3,35; 2,5; 1,33; 1,76 ve 4,9'dur. Ayrıca doğalgaz bazlı CO₂ emisyon oranları sırasıyla 0; 1,26; 1,31; 1; 1,33 ve 3,69'dur. Bulunan sonuçlar, örneğin 0,05 m yalıtım uygulaması ile hem yakıt tüketiminin hem de CO₂ emisyonunun %75,8 oranında azalacağını göstermektedir.

Öneriler:

Bu çalışmada elde edilen bulgulara göre hesaplanan toplam çevresel etki ve entransy tabanlı yıllık toplam maliyetler değerlendirildiğinde günümüz şartlarında doğalgazın ön plana çıktığı ve yerli linyit kaynaklarımızın buna alternatif olabileceği anlaşılmaktadır. Ancak hesaplanan net çevresel kazanç ve entransy maliyetindeki net tasarruf miktarları incelendiğinde hidrojen başı çekmektedir. Buna istinaden gelecekte pazarlama politikası olarak yeşil ve düşük maliyetli hidrojen üretim yöntemleri tercih edilmelidir.

Kaynaklar (References)

1. Akhmat G., Zaman K., Shukui T., Sajjad F., Does energy consumption contribute to climate change? Evidence from major regions of the world, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 36, 123–134, 2014.
2. Yücer C.T., Hepbasli A., Thermodynamic analysis of a building using exergy analysis method, *Energy Build.*, 43, 536–542, 2011.
3. Özel G., Açıkkalp E., Görgün B., Yamık H., Caner N., Optimum insulation thickness determination using the environmental and life cycle cost analyses based entransy approach, *Sustainable Energy Technol. Assess.*, 11, 87–91, 2015.
4. Küreççi N.A., Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers, *Energy Build.*, 118, 197–213, 2016.
5. Hasan A., Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost, *Appl. Energy*, 63, 115–124, 1999.
6. Çomaklı K., Yüksel B., Optimum insulation thickness of external walls for energy saving, *Appl. Therm. Eng.*, 23, 473–479, 2003.
7. Alsayed M.F., Tayeh R., Life cycle cost analysis for determining optimal insulation thickness in Palestinian buildings, *J. Build. Eng.*, 22, 101–112, 2019.
8. Aydın N., Biyikoglu A., Determination of optimum insulation thickness by life cycle cost analysis for residential buildings in Turkey, *Sci. Technol. Built Environ.*, 27 (1), 101–112, 2021.
9. Bolattürk A., Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey, *Appl. Therm. Eng.*, 26, 1301–1309, 2006.
10. Dombaycı Ö.A., Gölcü M., Pancar Y., Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources, *Appl. Energy*, 83, 921–928, 2006.
11. Kaynaklı O., A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness, *Renewable Energy*, 33, 1164–1172, 2008.
12. Ucar A., Balo F., Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey, *Appl. Energy*, 86, 730–736, 2009.
13. Arslan O., Özgür M.A., Yildizay H.D., Yamık H., Köse R., Fuel effects on optimum insulation thickness: Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 32 (2), 128–147, 2009.
14. Guo Z.Y., Entransy—A physical quantity describing heat transfer ability, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50, 2545–2556, 2007.

15. Feng H., Chen L., Xie Z., Sun F., Thermal insulation constructal optimization for steel rolling reheating furnace wall based on entransy dissipation extremum principle, *Sci China Technol Sci*, 55 (12), 3322–3333, 2012.
16. Feng H., Chen L., Sun F., “Volume-point” heat conduction constructal optimization based on entransy dissipation rate minimization with three-dimensional cylindrical element and rectangular and triangular elements on microscale and nanoscale, *Sci China Technol Sci*, 55 (3), 779–794, 2012.
17. Feng H., Chen L., Xie Z., Sun F., Constructal entransy dissipation rate minimization for variable cross-section insulation layer of the steel rolling reheating furnace wall, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 52, 26–32, 2014.
18. Feng H., Chen L., Xie Z., Ding Z., Sun F., Generalized constructal optimization for the secondary cooling process of slab continuous casting based on entransy theory, *Sci China Technol Sci*, 57 (4), 784–795, 2014.
19. Feng H., Chen L., Xie Z., Sun F., Constructal entransy dissipation rate minimization for triangular heat trees at micro and nanoscales, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 84, 848–855, 2015.
20. Feng H., Chen L., Xie Z., Sun F., Constructal entransy dissipation rate minimization for “volume-point” heat conduction at micro and nanoscales, *J. Energy Inst.*, 88, 188–197, 2015.
21. Feng H., Chen L., Xie Z., Sun F., Constructal designs for insulation layers of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions, *Appl. Therm. Eng.*, 100, 925–931, 2016.
22. Chen L., Progress in entransy theory and its applications, *Sci China Technol Sci*, 57 (34), 4404–4426, 2012.
23. Chen L., Progress in study on constructal theory and its applications, *Sci China Technol Sci*, 55 (3), 802–820, 2012.
24. Chen L., Progress in optimization of mass transfer processes based on mass entransy dissipation extremum principle, *Sci China Technol Sci*, 57 (12), 2305–2327, 2014.
25. Cheng X., Chen Q., Hu G., Liang X., Entransy balance for the closed system undergoing thermodynamic processes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 60, 180–187, 2013.
26. Goedkoop M.J., Spriensma R., The Eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report, Amersfoort, Netherlands. <https://pre-sustainability.com/files/2013/10/EI95FinalReport.pdf>, 2001, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
27. Gülten A., Determination of optimum insulation thickness using the entransy based thermoeconomic and environmental analysis: a case study for Turkey, *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42 (2), 219–232, 2020.
28. The Eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment, Manual for designers, https://pre-sustainability.com/legacy/download/EI99_Manual.pdf, 2000, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
29. Amelio A., Genduso G., Vreysen S., Luis P., Van der Bruggen B., Guidelines based on life cycle assessment for solvent selection during the process design and evaluation of treatment alternatives, *Green Chem.*, 16, 3045–3063, 2014.
30. Lelek L., Kulczycka J., Life cycle assessment of opencast lignite mining, *Int J Coal Sci Technol*, 8 (6), 1272–1287, 2021.
31. Yılmaz T., Bulut H., Türkiye için yeni dış ortam sıcaklık tasarımı değerleri, V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir-Türkiye, 293–311, 3-6 Ekim, 2001.
32. Hydrogen A decarbonisation route for heat in buildings?, LETI, London, Feb 1-12, 2021. https://www.leti.london/_files/ugd/252d09_54035c0c27684afca52c7634709b86ec.pdf, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
33. Methanol New Energy Applications in China: Boilers and Cook Stoves, Center for Global New Energy Strategy Studies of Peking University and Methanol Institute, pp. 1-39. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/04/IB-CS-Report-MI-20180402.pdf>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
34. Qing L., Jiang J., Qi J., Deng J., Yang D., Wu J., Duan L., Hao J., Improving the energy efficiency of stoves to reduce pollutant emissions from household solid fuel combustion in China, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, (3), 369–374, 2016.
35. Engineering Toolbox, Fuels - Higher and Lower Calorific Values, https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
36. Lignite lower calorific value, <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
37. Hydrogen market price, <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/20004-cost-electrolytic-hydrogen-production.pdf>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
38. Methanol market price, <https://turkish.alibaba.com/g/methanol-prices.html>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
39. Ethanol market price, https://www.globalpetrolprices.com/USA/ethanol_prices/, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
40. Natural gas market price, <https://www.igdas.istanbul/perakende-satis>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
41. Diesel fuel market price, <https://www.opet.com.tr/akaryakit-fiyatları/istanbul-avrupa>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
42. Lignite market price, <https://www.akakce.com/arama/?q=linyit>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
43. Glasswool market price, <https://www.cimri.com/dis-cephe-yalitim-malzemeleri>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
44. Türkiye interest rate, <https://tradingeconomics.com/turkey/interest-rate>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
45. Türkiye inflation rate, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Subat-2022-45791>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
46. Cüce E., Cüce P.M., Wood C.J., Riffat S.B., Optimizing insulation thickness and analyzing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings, *Energy Build.*, 77, 28-39, 2014.
47. The stoichiometric combustion reaction for one mole hydrocarbon fuel, <https://en.wikipedia.org/wiki/Combustion>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
48. Diesel chemical formula, <https://sites.google.com/site/qfa201213fuels/introduction/3-5-enthalpy-of-combustion-of-gasoline-and-diesel>, Erişim tarihi: 1 Mart 2022.
49. Bhoi S., Banerjee T., Mohanty K., Insights on the combustion and pyrolysis behavior of three different ranks of coals using reactive molecular dynamics simulation, *RSC Adv.*, (6), 2559–2570, 2016.

