

Araştırma Makalesi / Research Article

Alan ısıtma uygulamalarında toprak kaynaklı ısı pompasının doğalgaz sistemine alternatif olarak değerlendirilebilmesi için optimum teşvik miktarının belirlenmesi

Abdullah KAPICIOĞLU

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2982-0312>, akapicioglu@cumhuriyet.edu.tr

Geliş/ Received: 28.11.2022;

Kabul / Accepted: 17.03.2023

ÖZET: Türkiye farklı iklim kuşaklarını içinde barındıran nadir ülkelerden biridir. Oldukça soğuk bölgelerinin yanında ılıman iklim gösteren bölgeleri de bulunmaktadır. Bu çeşitlilik iklimlendirme uygulamalarında tek tip bir yöntem kullanılmasını da sınırlamaktadır. Güneyinde yer alan illerde ısıtma uygulamalarında çoğu zaman geleneksel elektrikli ısıtıcılar yeterli olurken, diğer bölgelerde yoğun olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Diğer taraftan toprak kaynaklı ısı pompaları dünyada alternatif iklimlendirme sistemleri olarak kullanılmaya başlamıştır. Fakat bu sistemlerin ilk kurulum maliyetleri kullanımını oldukça sınırlamaktadır. Fakat son yıllarda enerji arzında yaşanan sorunlar özellikle de Avrupa bölgesindeki doğalgaz arzındaki sıkıntılar ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu kapsamda, bu çalışmada ısıtma uygulamalarında toprak kaynaklı ısı pompası ile doğalgaz sistemi karşılaştırılmış ve tekno-ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile de bu sistemlerin yaygın kullanımı sağlamak için devlet tarafından sağlanması gereken optimum teşvik miktarları belirlenmiştir. Mevcut duruma göre yaklaşık %65 oranında teşvik gerektiği öngörülse de Avrupa bölgesindeki doğalgaz birim fiyat artışları göz önüne alındığında bu oran %36,8'e kadar düşmektedir.

Anahtar Kelimeler: Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri, Doğalgaz, Maliyet analizi, Soğuk iklimler, Yaşam döngüsü maliyeti

*Sorumlu yazar / Corresponding author: akapicioglu@cumhuriyet.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Kapıcıoğlu, A. (2023). Alan ısıtma uygulamalarında toprak kaynaklı ısı pompasının doğalgaz sistemine alternatif olarak değerlendirilebilmesi için optimum teşvik miktarının belirlenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 161-176.

Determining the optimum amount of incentive for using a ground source heat pump as an alternative to the natural gas system in space heating applications

ABSTRACT: Turkey is one of the rare countries that have different climatic zones. In addition to the frigid regions, there are also regions with a temperate climate. This diversity also limits the use of a uniform method in conditioning applications. While conventional electric heaters are often sufficient for heating applications in the provinces located in the south, natural gas is used extensively in other regions. On the other hand, ground-source heat pumps have started to be used as alternative conditioning systems worldwide. However, the initial setup costs of these systems limit their use considerably. However, the problems experienced in energy supply in recent years, especially in the natural gas supply in the European region, have reached severe dimensions. In this context, in this study, ground source heat pumps and natural gas systems were compared, and techno-economic analyzes were carried out in heating applications. With the results obtained, the optimum amount of incentives to be provided by the state to ensure the widespread use of these systems has been determined. Although it is foreseen that approximately 65% incentives are required according to the current situation, this rate drops to 36.8% when the natural gas unit price increases in the European region are taken into account.

Keywords: Ground source heat pump systems, Natural gas, Cost analysis, Cold climates, Life cycle cost

1. GİRİŞ

Dünyadaki nüfus ve ekonomik faaliyetlerde ciddi artışa bağlı olarak enerji talebi her geçen yıl katlanarak artmaktadır. Diğer taraftan bu talebi karşılamak için yenilenemeyen enerjilerin üretim ve tüketimde kullanılması çevre kalitesinin bozulmasını ciddi boyutlara ulaştırmaktadır. Enerji Koruma Ajansı (EPA), her geçen gün artan iklim sorunlarıyla ilişkili olarak emisyon azaltma yöntemlerinin önemine vurgu yapmaktadır (Environmental Protection Agency (EPA), 2022). Bu kapsamda sürdürülebilirlik ve gelecek nesiller için çeşitli tehditler oluşturan iklim değişikliği ile ilişkili pratik çözümler ele alınmalıdır. Yenilenebilir enerjiler çevre sorunlarıyla mücadelede önemli bir yer tutmakta ve sürdürülebilir kalkınma içinde kritik bileşen olarak kabul edilmektedir (Yang ve ark., 2022). Enerji tüketiminin yoğun olarak yaşandığı bireysel ya da toplu konutlarda yenilenebilir enerji kullanarak enerji arzının karbondan arındırılması da bu değişimde kilit rol oynamaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın 2018 yılı raporuna göre binalar ve inşaat sektörü küresel enerji tüketiminde %36'lık bir pay alarak en yüksek enerji tüketimini gerçekleştirmiş ve enerji ile ilgili tüm emisyonların neredeyse %40'ından sorumlu olmuştur (International Energy Agency (IEA), 2019). Alan ısıtma uygulamaları da buradaki en yüksek enerji tüketimlerinden birini oluşturmaktadır. Diğer taraftan küresel ölçekte alan ısıtmada kullanılan enerji miktarında 2010-2018 yılında %20 azalma gözlemlenmiştir (International Energy Agency (IEA), 2019). Bu azalışta yenilenebilir enerjinin yeri şüphesiz ki oldukça büyüktür. Ayrıca 2010-2018 yılları arasında yenilenebilir enerji kullanımı %21 artışla binalar için en hızlı büyüyen enerji kaynağı haline gelmiştir (International Energy Agency (IEA), 2019). Fakat G7 ülkelerinde artan ekonomik belirsizlik yenilenebilir enerjinin ilerlemesinde ciddi bozulmalara neden olabilir (Su ve ark., 2022). Bu nedenle, ilgili hükümetler, ekonomik istikrarın korunması ve yenilenebilir enerjiyi geçişin ilerlemesi için gerekli politika desteğini sağlamada sorumlu roller üstlenmelidir. Bu kapsamda Türkiye, enerji güvenliğini artırmak ve sürdürülebilir kalkınmayı geliştirmek için yenilenebilir enerji yatırımlarını artırmaya odaklanmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Türkiye'de konutların ısıtılmasında yaygın olarak doğalgaz sistemleri (DG-S) kullanılmakta ve konutlardaki toplam enerji talebinin %80'ini oluşturmaktadır. Diğer taraftan DG-S yerine ısı pompalarının kullanılması konutların ısı enerjisi tüketimini düşürmede oldukça etkili bir yöntemdir. Küresel bazda 2019 yılında, ısı pompalarının kullanıldığı birincil enerji tüketimindeki tasarruf, gaz yoğunluğuna kazan sistemlerine kıyasla 84,1 TWh'ye ulaşmıştır (European Heat Pump Association (EHPA), 2021). Isı pompaları kendi aralarında kaynak türüne göre hava, su (yeraltı veya yüzey suyu), toprak kaynaklı gibi alt dallara ayrılmaktadır (Kavanaugh ve Rafferty, 2014). Isı pompalarının alt türlerinden olan toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) sistemleri, sıradan ısı pompalarına kıyasla daha yüksek enerji verimlilikleri nedeniyle binaların ısıtma ve soğutma uygulamalarında ciddi avantajlar sağlamaktadır (Esen ve ark., 2007; Hepbasli ve Kalinci, 2009). Bu avantaj, hava kaynaklı ısı pompalarından (HKIP) farklı olarak TKIP sistemlerinin toprağı bir ısı kaynağı olarak kullanması sayesinde gerçekleşir (Esen, Inalli, Esen ve ark., 2007; Hepbasli ve ark., 2003; Kapıcıoğlu, 2022). Ayrıca soğuk iklimleri nedeniyle ısınmanın baskın olduğu bölgelerde hava kaynaklı ısı pompalarının ciddi performans düşüşü yaşadığı veya kullanımının sınırlandırıldığı da bilinen bir olgudur (Bertsch ve Groll, 2008; Guoyuan ve ark., 2003; You ve ark., 2016). Bu nedenle ısı pompası pazarında her geçen gün TKIP kullanımını artmakta ve 2020 yılı verilerine göre Avrupa'nın soğuk iklim kuşağında bulunan ülkelerde yurt içi ısı pompası pazarındaki payı %43'e kadar çıkmaktadır (EurObserv'ER, 2022).

TKIP sistemlerinin kullanımı genel olarak yüksek başlangıç maliyetleri nedeniyle sınırlanmakta (Nguyen ve ark., 2014) ve elektrik enerjisi kullanmaları nedeniyle elektrik birim maliyet değişimlerinden fazlaca etkilenmektedir. TKIP'ların farklı iklim ve işletme koşullarında ekonomik değerlendirmesi dünya çapında birçok çalışmaya konu olmuştur (Esen ve ark., 2006; Habibi ve Hakkaki-Fard, 2018; Han ve ark., 2021; Petit ve Meyer, 1998; Zhou ve ark., 2020). Esen ve ark. (Esen ve ark., 2006), TKIP sisteminin birçok alternatif ısıtma sistemine kıyasla ekonomik avantajlar sağladığını bildirmelerine karşın DG-S'ye karşı herhangi bir avantaj sağlamadığını belirtmişlerdir. Kapıcıoğlu ve Esen (Kapıcıoğlu ve Esen, 2022), Türkiye'nin ılıman iklim kuşağında bulunan bir TKIP sisteminin HKIP sistemine kıyasla ekonomik olarak iyi bir alternatif olduğunu bulmuşlardır. Fakat TKIP sistemleri geleneksel sistemlere kıyasla kazı/sondaj (yatay/dikey) ve toprakaltı ısı değiştirgeci (TID) maliyetleri gibi değişkenlerden kaynaklı ciddi bir ilk kurulum maliyeti gerektirmektedir. Lim ve ark. (24), bu durumun TKIP sistemlerinin kullanımında en büyük engel olduğunu belirtilmiştir. Benzer olarak Türkiye'de TKIP kullanımını oldukça sınırlıdır. Bu sınırlamada başlıca etmen ilk kurulum maliyetinin oldukça yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Kapıcıoğlu ve Esen, 2022). Kullanım sınırlamasındaki bir diğer önemli etmen ise Türkiye'de elektrik birim maliyetinin doğalgaz birim maliyetine kıyasla yüksek olmasıdır. Konu üzerine yapılan çalışmalar bu durum sadece Türkiye için geçerli bir durum olmadığı ortaya konmaktadır. Örneğin Lei ve ark. (Lei ve ark., 2018) Çin'de ofis binalarında kullanılan TKIP sistemlerinin her bölgede önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığını bildirmesine karşın TKIP sistemlerinin yaygınlaşması için bu tür projelerde hükümetin ilk yatırım maliyeti veya elektrik fiyatlarında taviz vermesi gerektiğini belirtmektedir.

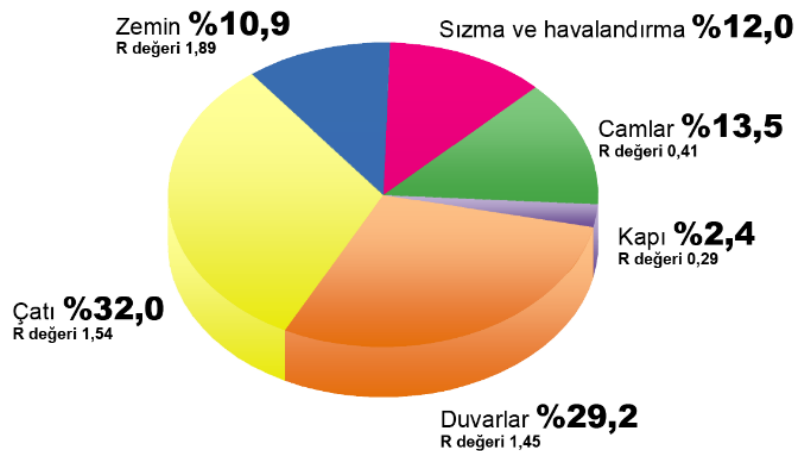
Yukarıda belirtilen literatür taramasının bir sonucu olarak TKIP sistemi gibi yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerin kullanımının yaygınlaşması hükümetler/devletler tarafından teşvik edilmesi ile mümkündür. Fakat burada sorulması gereken asıl soru teşvik miktarının ne olması gerektiğidir. Bu kapsamda yapılan bu çalışmada ısıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan DG-S ile TKIP sisteminin tekno ekonomik analizleri gerçekleştirilmiş ve TKIP sisteminin alternatif bir sistem olarak ele alınabilmesi için devlet tarafından sağlanması gereken optimum teşvik miktarları hesaplanmıştır. Yazar tarafından bilindiği kadarıyla bu konu üzerine literatürde yapılan herhangi bir

çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle literatüre önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışma kapsamında sadece DG-S'nin karşılaştırmaya alınması Türkiye'de ısıtma uygulamalarında hava kaynaklı ısı pompaları talep görmemesi/kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma temel olarak iki farklı iklimlendirme sisteminin güç tüketim değerlerinin hesaplanması, bu hesaplamalardan işletme maliyet verilerinin elde edilmesi ve işletme maliyetlerine ilaveten ilk kurulum maliyetlerini de hesaba katarak sistem maliyetlerinin karşılaştırılması ve optimum teşvik miktarlarının belirlenmesini ele almaktadır. Dolayısıyla sistemlerin performans artışının etkisi çalışma kapsamında yer almamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Alanın Isı Kaybı Hesabı

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemi toprak altı ısı değiştirgeçleri hariç tipik bir ısı pompası sistemiyle benzer özellikler taşımaktadır. Fakat ısı kaynağı/ kuyusu olarak toprak altını kullanması diğer ısı pompalarına kıyasla ciddi avantajlar sağlar. Bu avantajın temel nedeni ısıtma sezonunda toprak altı sıcaklığı dış ortam sıcaklığından yüksek, soğutma sezonunda ise düşük olmasıdır. Isıtma sezonunda toprağın termal enerjisi, toprak ısı eşanjöründe dolaşan sıvıya iletilir. Bu enerji daha sonra bir dağıtım sistemi aracılığıyla iklimlendirilecek alana iletmek üzere ısı pompası tarafından çekilir ve güçlendirilir. Sistem yazın tersine çevrilerek ısı pompası yardımıyla toprağa aktarılır. Sistemin genel performansı toprak ısı değiştirgeçleri ile yüksek oranda ilişkilidir. Çalışmaya konu olan TKIP sistemi Türkiye'nin karasal iklim kuşağında bulunan ve kış aylarının çok düşük sıcaklık değerlerine düşebildiği en soğuk illerinden biri olan Sivas ili için analiz edilmiştir. Termodinamik hesaplamalarda ASHRAE verileri referans alınmıştır. Isıtma uygulamasının gerçekleştirileceği alan daha önce ılıman iklim kuşağına göre tekno-ekonomik analizleri gerçekleştirilen (Kapıcıoğlu ve Esen, 2022) 10,1 m x 14,5 m boyutlarında 146.5 m² taban alanına sahip bir ofistir. Ofisin tavan yüksekliği 2,74 m olup pencere-duvar oranı yaklaşık %13,4'tür. Ofisin yapısal özelliklerine göre ısı kaybı hesabı HeatCAD paket programı yardımıyla yapılmış ve ofisin toplam ısı kaybı tepe değeri 10,423 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemi oluşturan bileşenlerin ısı yükü dağılımları ve ısıl özellikleri Şekil 1'de verilmiştir. Kurulum alanının tasarım sıcaklık değeri ASHRAE 2021 verilerine göre -13,5 °C ve ortalama toprak sıcaklık değeri 11.4 °C'dir (HeatCAD, 2022).



Şekil 1. Bileşen ısı kaybı oranları ve termal direnç değerleri (W/m²K)

2.2 Toprak ısı değiştirgeci boyutunun belirlenmesi

TKIP sistemlerinin en önemli parametrelerinden biri TID boyutlarının belirlenmesi ve yapılandırılmasıdır. Önceki bölümde belirtilen 10,42 kW'lık ısı kaybı tepe değeri evaporatör gücü olarak alındığında ısı pompası için gerekli TID uzunluğu aşağıda verilen eşitlik ile bulunabilir (Raugeo Sysyem Technology, 2012):

$$L_p = \frac{Q_{eva}}{S_p} \quad (1)$$

Burada S_p birim boru uzunluğu başına özgöl ısı çıkışıdır (W/m) ve zemin yapısına ve çalışma süresine bağlı olarak değişir. Farklı zemin tiplerine göre bu değerler Tablo 4'te verilmiştir. Sivas ili kahverengi toprak yapısına sahip olması nedeniyle bu toprak yapısının S_p değeri zayıf ve normal taş zemin arasındadır (İmanverdi Ekberli ve ark., 2005; Orta Anadolu Kalkınma Ajansı, 2011). Sistemin ısı kaybı referans alınarak zayıf ve normal zemin yapısı arasında yer alan bir bölgede 1800 saat/yıl çalışma süresi için yaklaşık 240 m boru gereklidir. Etkileşimi ve maliyeti en aza indirmek için dikey kuyular 4 x 60 m olarak belirlenmiştir. Hesaplanan ısı kaybı değerine göre ihtiyaç duyulan boru boyutları ve yapılandırması VDI 4640'a uygun olarak yapılmıştır.

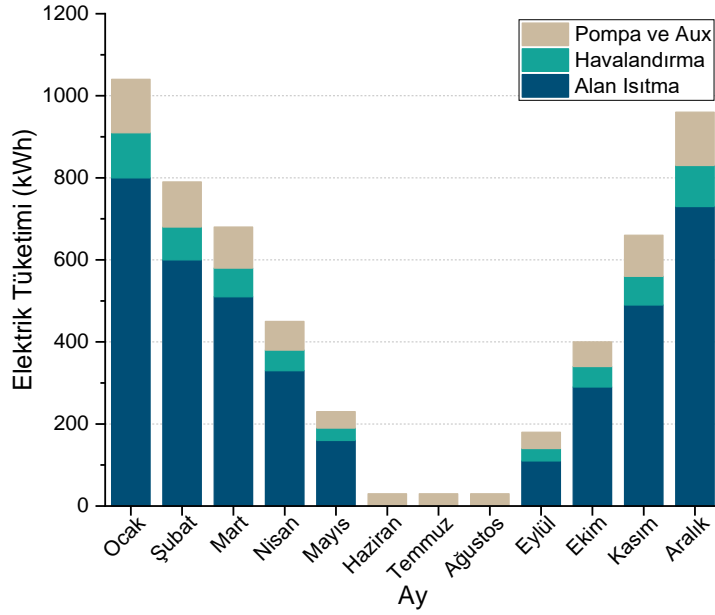
Tablo 1. Zemin tipine ve çalışma süresine bağlı olarak özgöl ısı çıkışı değerleri (27)

Zemin yapısı	Özgöl ısı çekme gücü (W/m)	
	1800 saat/yıl	2400 saat/yıl
Zayıf zemin (kuru çökelti, $\lambda < 1,5$ W/mK)	25	20
Normal taş zemin ve suya doymuş çökelti ($\lambda < 3,0$ W/mK)	60	50
Yüksek ısı iletkenliğe sahip sert taş ($\lambda > 3,0$ W/mK)	84	70

2.3 Sistemlerin tüketim değerlerinin hesaplanması

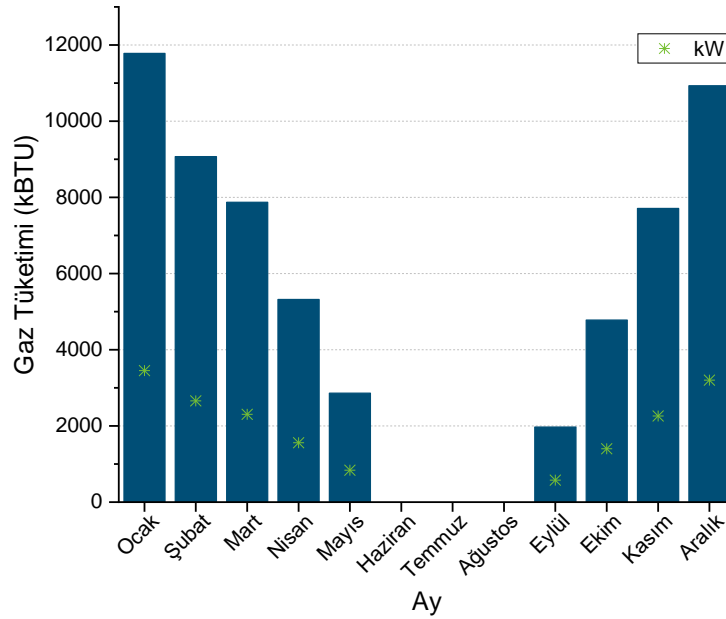
Sistemlerin işletme maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle tüketim değerlerinin belirlenmesi gerekir. Her bir sistemin yıllık güç tüketim değerleri eQUEST 3.65 paket programı yardımıyla simüle edilmiştir. eQUEST programı iklimlendirme sistemlerinin enerji ihtiyaçı hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2015; Xing ve ark., 2015a, 2015b) ve sistem güç tüketim değerlerinin güvenilir bir şekilde hesaplanmasına yardımcı olmaktadır (Shen ve Lukes, 2015). Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar; iklim verileri, alanın yapısal bileşenleri, çalışma (işletme) saatleri ve iç ortam sıcaklık tasarım değerleri gibi temel parametreler ile doğrudan ilişkilidir. Karşılaştırmaya dahil edilen iklimlendirme sisteminden bağımsız olarak bu parametreler simülasyonlarda kullanılmaktadır. Diğer taraftan sistemin ısı kaybı değerleri HeatCAD programı ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır (fark $< \%3$). TKIP sisteminin yıllık güç tüketim değeri toplam 5480 kW olarak hesaplanmıştır. Bu değere 1460 kW'lık havalandırma, sirkülasyon pompasının ve diğer bileşenlerin (aux) harcadığı güç değerleri dahildir. şekil 2'de TKIP ve sistem bileşenlerinin aylık güç tüketim değerleri verilmiştir. Sistemin aylık bazda en fazla enerji tüketim miktarı ocak ayında gerçekleşmiştir (1040 kW). Yaz ve kış aylarında eşit olmayan zemin yükleri nedeniyle ısı pompasına giren akışkanın sıcaklığında kademeli olarak düşüş söz konusu olsa da bu oldukça sınırlıdır ve hesaplamalarda bu oran %1'in altındadır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken husus yaz aylarında toprak altının şarj edilmesidir. Diğer bir ifade ile kış aylarında topraktan çekilen enerji yaz aylarında yerine konmalıdır. Bu nedenle yaz aylarında ısı pompası bypass edilerek doğağ soğutmanın

gerçekleştirilmesi planlanmış ve toprağın altına şarj edilmesi sağlanmıştır. Burada sirkülasyon pompasının harcadığı güçte hesaplamalara dahil edilmiştir.

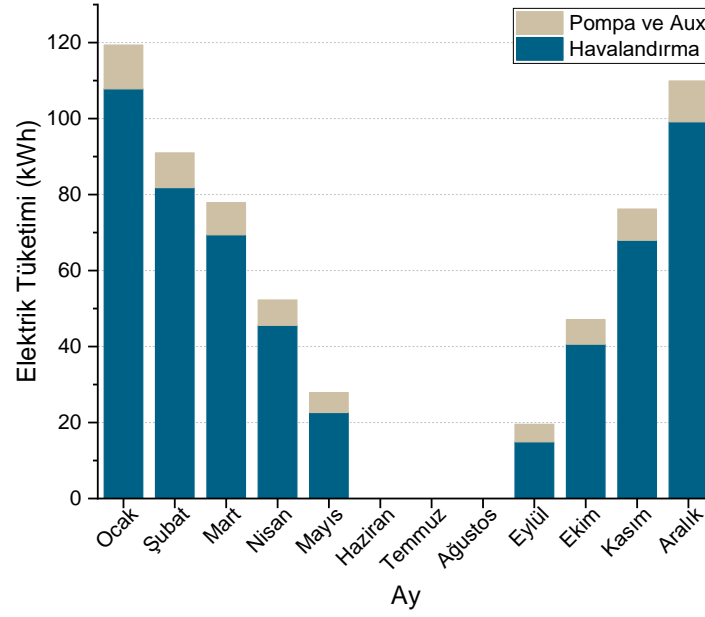


Şekil 2. TKIP sisteminin yıllık elektrik enerjisi tüketiminin aylık değişimi

DG-S'nin toplam doğalgaz enerji tüketimi 65630 kBTU (19235 kW) olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan sistem dolaşım pompasının ve havalandırma sisteminin harcadığı toplam elektrik enerjisi miktarı 657.9 kW olarak bulunmuştur. Şekil 3'te aylık doğalgaz enerji tüketim miktarları ile Şekil 4'te sistemin harcadığı elektrik enerjisi miktarları verilmiştir. Verilen şekillerden DG-S kullanıldığında sistemin harcadığı enerji miktarının yaklaşık dört kat arttığı görülebilir (3571.8 kW).



Şekil 3. Doğalgaz sisteminin yıllık gaz tüketimi değerlerinin aylık değişimi



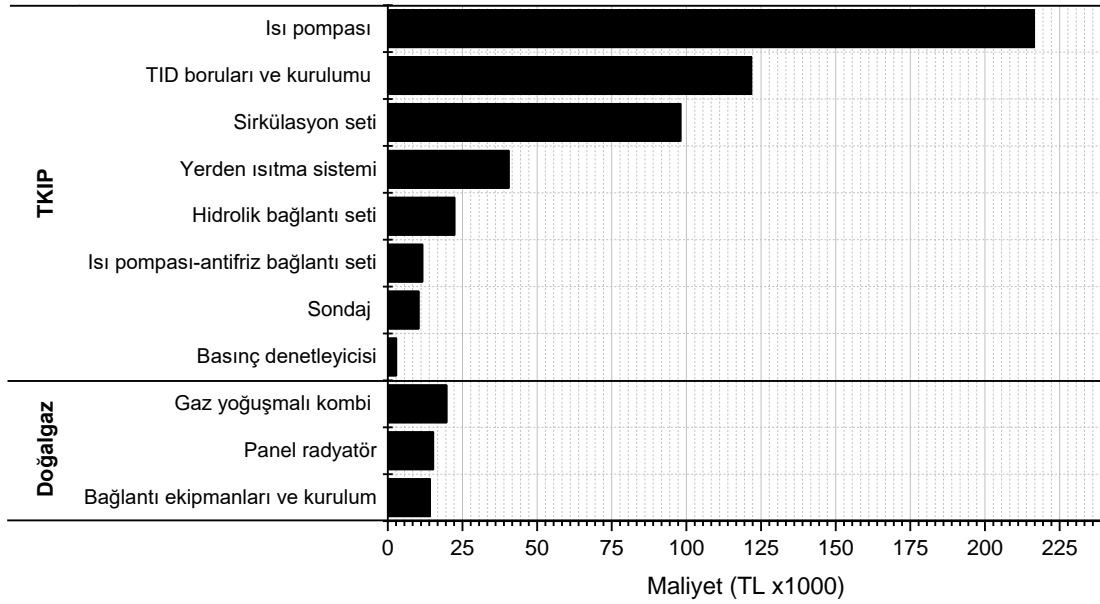
Şekil 4. Doğalgaz sisteminin yıllık elektrik enerji tüketimi değerlerinin aylık değişimi

Bahsi geçen her iki sistemin simülasyon sonuçları sistemlerin işletme maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. TKIP sisteminin enerji maliyeti, işletme süresi boyunca elektrik maliyetini içerir. Ayrıca, DG-S için enerji maliyeti, işletme süresi boyunca tüketilen doğal gazın maliyetini ve sistemin harcadığı elektrik enerjisi maliyetini içermektedir.

2.4 Sistemlerin İlk Kurulum Maliyetlerinin Belirlenmesi

Bilindiği üzere ısıtma sisteminin nominal gücünün belirlenmesinde ısı kaybı referans alınmaktadır. Daha önceki bölümlerde ısı kaybı tepe değeri 10.42 kW olarak belirtilmişti. Bu ısı yükünü sağlayan ısı pompasının ve DG-S'nin bileşen maliyetleri Şekil 5'te verilmiştir. Seçilen ısı pompasının nominal ısıtma kapasitesi 17.2 kW olup Türkiye şebeke gerilimi ile uyumludur. Isı pompası bileşen fiyatları REHAU ve Özbek Mühendislik firmalarından alınmıştır (Özbek Mühendislik, 2022; REHAU, 2021). Isı pompasının EN 14511'e göre COP değeri 4.52'dir. Soğutucu akışkan olarak R410A kullanılmaktadır (Viessmann, 2019). TKIP sistemi ile ilgili olarak alınan fiyatlar çoğunlukla yabancı para birimi cinsindedir. Yabancı para birimi Türk lirası dönüşümlerinde T.C. Merkez Bankası güncel dönüşüm kurları referans alınmıştır. Alınan fiyatlara şirketlerin uyguladığı iskontolar dahil edilmiştir. Isı pompaları 20 yıldan fazla kullanım ömrüne sahip olmasına karşın (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018) bu sürenin sağlanmasında bakımların yapılması önemli bir yer tutar. Bu nedenle maliyet kalemlerine bu bakımlar da dahil edilmiştir. TKIP sistemi için bakım maliyeti 1385 TL olarak alınmıştır (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018). Tüm sistemler için de yıllık bakım maliyeti artış oranı enflasyon oranına eşitlenmiştir. Çalışmada karşılaştırmaya dahil edilen DG-S kombisinin ısıtmada anma gücü 18 kW'tır. DG-S kombisi 813/2013 sayılı Avrupa Birliği düzenlemelerinin gerekliliklerini karşılamakta olup A sınıfı enerji verimliliğine sahiptir (Viessmann, 2021). DG-S'nin ısıtma mevsimi boyunca ortalama verimi 0,8 olarak alınmıştır. Diğer taraftan DG-S'ler TKIP sistemlerinden farklı olarak periyodik bakıma ihtiyaç duyar. Periyodik bakım maliyetleri, sistemlerin ana bileşenlerinin değiştirilmesi için yapılan masrafları temsil eder. Doğalgaz sisteminin tipik ömrü 10 yıl olarak kabul edilmektedir (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018). Ayrıca, Doğal gaz sistemi için bakım maliyetleri 1665 TL olarak alınmıştır (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018). Şekil 5'te belirtilen

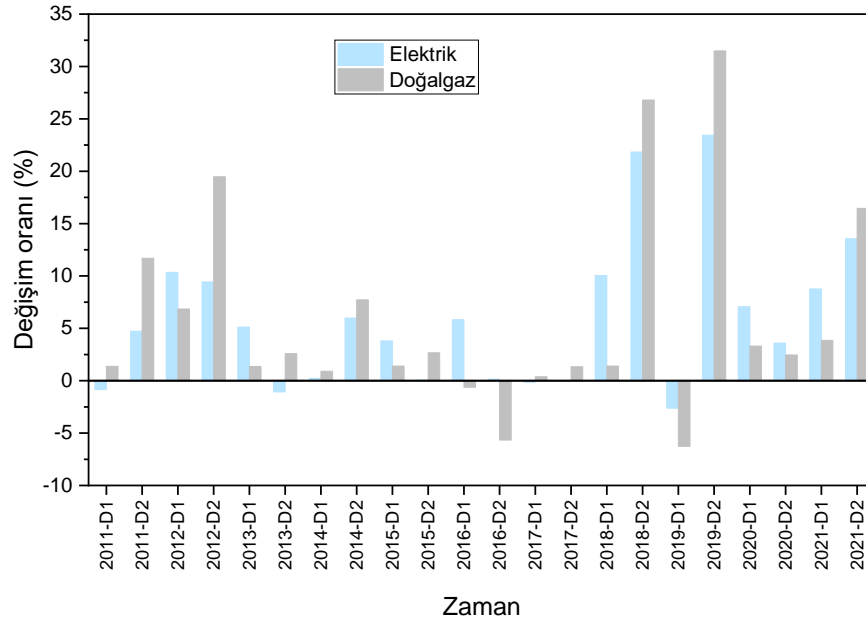
doğalgaz sistemi bileşen maliyetleri yerel firmalardan ve ilgili şirketlerin güncel fiyat tablolarından alınmıştır (Bck Doğalgaz, 2021).



Şekil 5. TKIP ve doğalgaz sistemi bileşen maliyetleri

2.5 Birim Maliyetlerin Belirlenmesi

Uzun dönem işletme maliyetlerinin belirlenmesinde en kritik bileşenlerden birisi tüketim kalemlerinin yıllık artış miktarlarının tahmin edilmesidir. Bu çalışmada gelecek elektrik fiyat artış oranı 2023-2025 yılları arasında beklenen enflasyon oranları referans alınarak %24,53 olarak belirlenmiştir (Statista, 2022). Bu değer en son yayınlanan tahminleri içermektedir. Eurostat verilerinden elde edilen Türkiye için elektrik ve doğalgaz yıllık birim fiyat değişim oranları Şekil 6'da verilmiştir (Eurostat, 2022a, 2022b). 2011-2021 yılları arasında doğalgaz maliyeti elektrik maliyetinden TL cinsinden yıllık %0,08 oranında daha fazla artmıştır. Avrupa bölgesi için ise aynı dönemdeki doğalgaz maliyeti artış oranı %0,88 olarak gerçekleşmiştir (Eurostat, 2022a, 2022b). Belirlenen enflasyon değerine bu artış değeri fark olarak yansıtılmıştır. İlk yıl için elektrik ve doğalgaz fiyatları tüm vergiler ve harçlar dahil olmak üzere sırasıyla 1,2808 TL/kWh ve 0,2915 TL/kWh olarak alınmıştır. Bu değerler 2022 yılı ilk altı aylık elektrik fiyatını temsil etmektedir (Eurostat, 2022a, 2022b). Yıllık efektif iskonto oranı (d) Merkez Bankası'nın 2021 yılı için yayınlamış olduğu tablolardan %15,75 olarak alınmıştır (TCMB, 2022).



Şekil 6. Türkiye’de elektrik ve doğalgaz birim maliyetlerinin yıllık değişim oranları

2.6 Ekonomik Analiz

Sistemlerin ısı verimleri her ne kadar önemli bir parametre olsa da sistem maliyetleri seçim sürecinde önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Ekonomik olarak sistemleri karşılaştırmak için toplam sahip olma maliyetlerinin (yaşam döngüsü maliyeti) (TSM) bilinmesi gerekir. TSM, sistem için yapılan ilk harcama ile sistemin çalışmasını sürdürmek için devam eden maliyetleri hesaba katmaktadır. Kısaca TSM, başlangıç (I) ve işletme maliyetlerinin (O) toplamı olarak ifade edilebilir ve aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanabilir:

$$TSM = I + \sum_{i=1}^n O_i \frac{1}{(1+d)^i} \quad (2)$$

Burada; d iskonto oranı, n yıl sayısı, O_i ise i inci yıldaki işletme maliyetidir. Sistemin işletme maliyetleri, güç tüketim değerlerinin ve enerji birim maliyetlerinin çarpılması ile hesaplanabilir. Bu değerler önceki bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir. Alternatif sistemler karşılaştırılırken iç karlılık oranı (IRR), iskonto edilmiş geri ödeme süresi (DPP) gibi çeşitli ekonomik göstergeler dikkate alınır. IRR, sistemin tasarım ömrü boyunca nakit akışlarının net bugünkü değerinin toplamının sıfır olduğu faiz oranı olarak tanımlanır. En yüksek IRR'ye sahip seçenek, alternatifleri değerlendirmek için en uygun sistemdir. Bir sistemi diğeriyle değiştirmek için IRR aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$(I_m - I_a) + \sum_{i=1}^n [O_{i,m} - O_{i,a}] \left(\frac{1}{(1+IRR)^i} \right) = 0 \quad (3)$$

Burada m ve a alt indisleri sırasıyla mevcut ve alternatif sistemleri temsil eder. DPP ise bir yatırımın kârının ilk maliyeti kapsadığı süreyi temsil etmektedir. DPP, iskonto edilmiş gelecekteki nakit akışlarını hesaba katarak aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilir:

$$(I_m - I_a) + \sum_{i=1}^{DPP} [O_{i,m} - O_{i,a}] \left(\frac{1}{(1+d)^i} \right) = 0 \quad (4)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

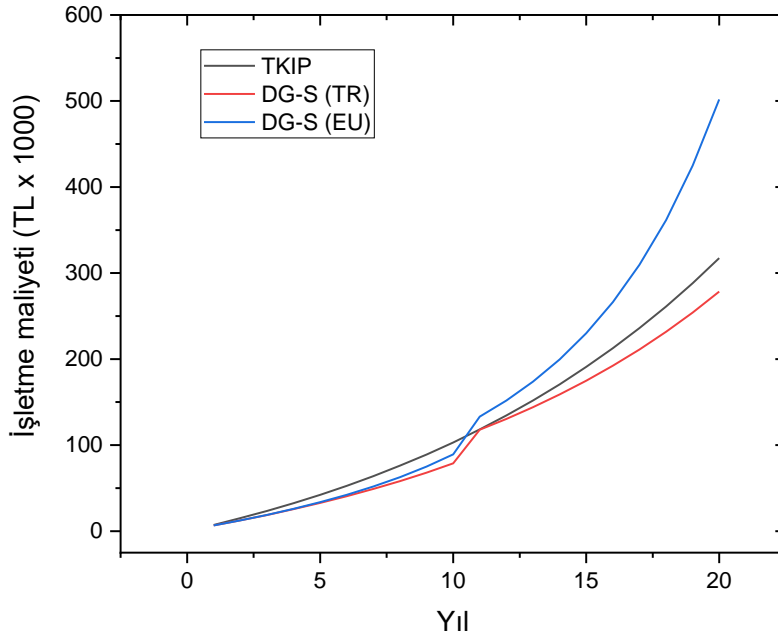
TKIP sistemlerinin DG-S'lere alternatif olarak düşünülebilmesi için son kullanıcı açısından en önemli parametre hiç şüphesiz kurulum ve işletme maliyetleridir. TKIP sistemleri ek bileşen maliyetleri (TID, sirkülasyon pompası gibi) nedeniyle diğer sistemlere kıyasla yüksek ilk kurulum maliyetine sahiptir. Bunun yanında Türkiye'ye TKIP sistem bileşenlerinin ithal yollar ile gelmesi maliyetlerin daha fazla artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu etmenler neticesinde ilk kurulum maliyetleri arasında ciddi farklar ortaya çıkmaktadır. Tablo 2'de TKIP ve DG-S'nin TSM değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Burada verilen DG-S (TR) Türkiye'deki doğalgaz artış oranları referans alınarak belirlenmiş maliyetleri, DG-S (EU) ise Avrupa bölgesindeki artış oranları referans alınarak hesaplanmış maliyetleri içerir. Bu maliyetlerin nasıl belirlendiği önceki bölümlerde detaylı olarak verilmiştir. TKIP ve DG-S arasında güç tüketimi bakımından dört kart fark olmasına karşın (TKIP lehine) işletme maliyetleri bakımından DG-S sistemi daha avantajlıdır. Buradaki avantaj doğalgaz birim maliyetinin daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat küresel olarak doğalgaz birim fiyatlarındaki artış bu avantajı tersine döndürme eğilimindedir. Son yıllarda Avrupa bölgesinde yaşanan doğalgaz krizi ülkeler bazında çok ciddi fiyat artışlarına neden olmuştur. Türkiye'den farklı olarak Avrupa bölgesinde doğalgaz maliyetleri son on yıllık veriler referans alındığında %0,8 oranında daha fazla artmıştır. Bu durumdan Türkiye'nin de etkilenmesi durumunda ortaya çıkan durum senaryosuna göre hesaplanan DG-S (EU)'nun işletme maliyetleri sistemin tasarım ömrü boyunca iki kattan fazla artmasına neden olmaktadır. Fakat bu durum senaryosuna göre bile hala TSM, TKIP sistemi için oldukça yüksektir. Genel olarak TKIP sisteminin DG-S (TR) sistemine alternatif olarak değerlendirilmesi bu mali veriler altında mümkün değildir. DG-S (EU) için ise TKIP sisteminin tasarım süresi içerisinde alternatif olabilmesi için gerekli olan IRR oranı %9,52'dir. Fakat bu değer mevcut durumlar göz önüne alındığında oldukça zordur.

Tablo 2. 20 yıllık tasarım ömrü için sistemlerin genel maliyetleri

Parametre	TKIP	DG-S (TR)	DG-S (EU)
Kurulum Maliyeti (TL)	524331	49269	49269
İşletme Maliyeti (TL)	265066	187964	411395
Periyodik Bakım Maliyeti (TL)	-	27583*	27583*
Bakım Maliyeti (TL)	52305	62879	62879
Toplam TSM (TL)	841702	327695	551126

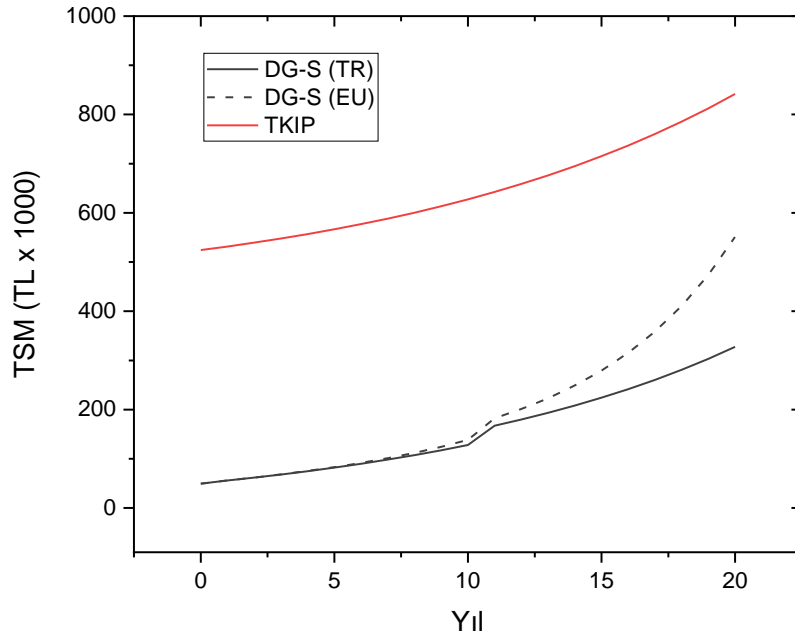
*%50 periyodik bakım maliyetin 10. yıldaki değeri

Şekil 7'de tasarım ömrü boyunca yıllık işletme maliyetleri verilmiştir. TKIP sistemi ile DG-S (TR) sisteminin maliyetleri 11. yılda eşitlenmesine karşın, birim fiyattaki doğalgaz avantajı sonraki süreçte DG-S (TR) sisteminin tekrar avantajlı duruma geçmesine neden olmuştur. DG-S (EU) sistemi ile TKIP sisteminin maliyetleri ise 10,5 yılda eşitlenmiştir. Fakat burada doğalgaz fiyatındaki artış farkı ilerleyen yıllarda TKIP sisteminin işletme maliyetlerinin daha düşük seviyelerde kalmasına olanak tanımıştır. Diğer taraftan TSM değerlerinin eşitlenmesi 20 yıllık süre zarfında mümkün değildir.



Şekil 7. TKIP ve DG-S'nin işletme maliyetleri

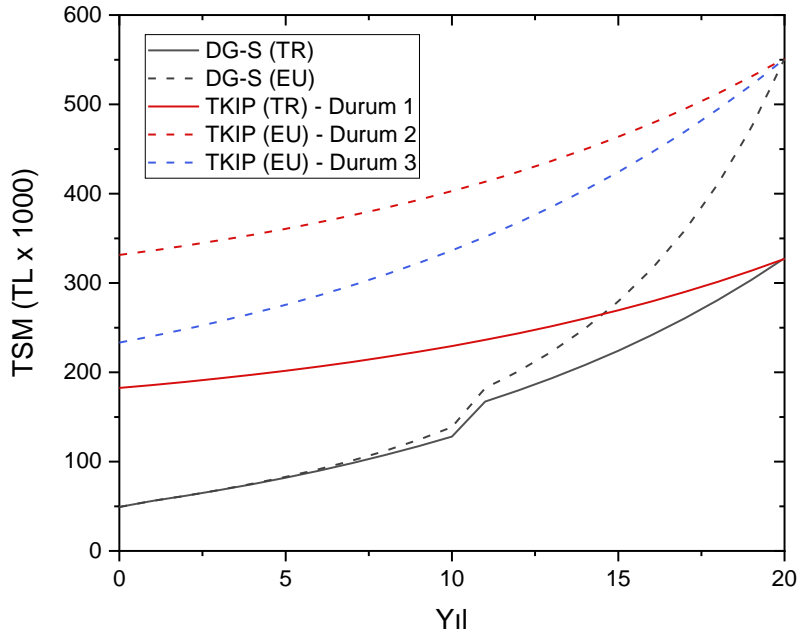
Şekil 8'de TSM değerlerinin yıllık değişimleri verilmiştir. Her ne kadar 11. yıldan sonra TSM değeri DG-S (EU) için ciddi bir artış gösterse de daha önce de değinildiği üzere tasarım ömrü süresince maliyetlerinin eşitlenmesi mümkün değildir. DG-S (EU) ve TKIP sisteminin maliyetlerinin eşitlenme süresi (DPP) 23,3 yıl olarak hesaplanmıştır.



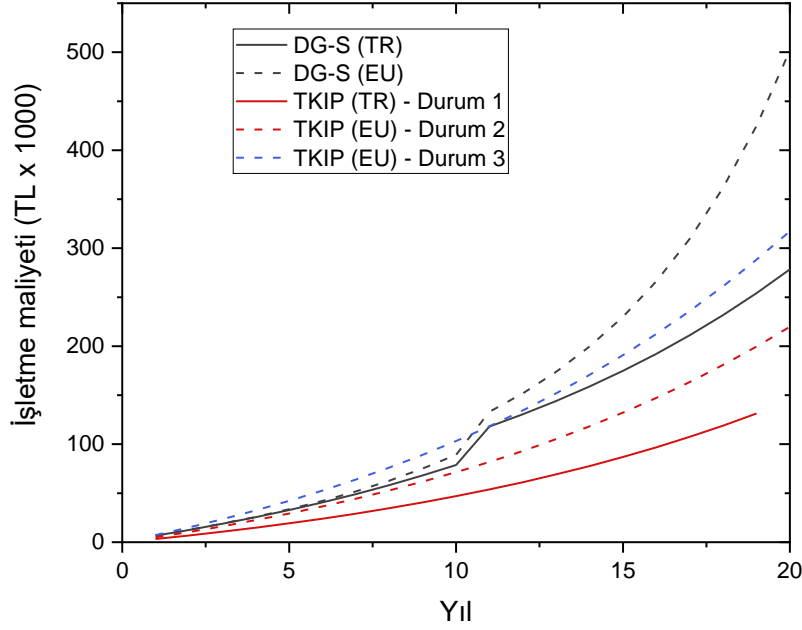
Şekil 8. TSM değerlerinin yıllık değişim değerleri

TKIP sistemi NG-S'ye kıyasla enerji açısından verimli olarak uygulanabilir olsa da yüksek başlangıç maliyetleri, daha geniş çapta benimsenmesini engellemektedir. Diğer taraftan çeşitli Avrupa ülkeleri ve ABD, TKIP sistemlerinin kullanımını desteklemek için çeşitli teşvik politikaları uygulamaktadır (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), 2020; Nordgård-Hansen ve ark., 2022). Buna benzer teşvik politikalarının Türkiye'de uygulanması pek tabii mümkündür. Bu kapsamda TKIP sisteminin DG-S'ye alternatif olarak ele alınabilmesi için öncelikle tasarım ömrü

süresi içerisinde TSM değerlerinin eşitlenmesi gerekir. Şekil 9’da TKIP sisteminin DG-S (TR) ve DG-S (EU)’ya alternatif olabilmesi için gerekli olan optimum teşvik miktarlarına bağlı yıllık TSM değerlerinin değişimi verilmiştir. TKIP sisteminin DG-S (TR) için devlet tarafından yapılması gereken optimum teşvik miktarı %65,2’dir (durum 1). Fakat DG-S işletme maliyetlerinin Avrupa bölgesi ile benzer bir artış göstermesi durumunda bu teşvik oranı %36,8’e düşmektedir (durum 2). Bu değerlerin hesaplanması, ilk kurulum ve elektrik birim maliyeti üzerinden belirtilen oranlarda teşvik miktarlarının uygulanması ile elde edilmiştir. Bakımlar hesaplamalar dahil edilmemiştir. Diğer taraftan elektrik birim maliyetinde hiçbir teşvik uygulamadan sadece bileşen maliyetlerinde bir teşvik uygulanması durumunda mevcut verilerle TKIP sisteminin tamamına yakınının (%98) (bakım ücretleri hariç) devlet tarafından karşılanması gerekmektedir. DG-S (EU) sistemi ele alındığında ise bu oran %55,5 olarak hesaplanmıştır (durum 3). Diğer taraftan bu durum senaryoları referans alınarak hesaplanmış işletme maliyetleri Şekil 10’da verilmiştir. Beklendiği üzere TKIP sisteminin işletme maliyetleri oldukça düşmüştür. Fakat tüm durum senaryolarında elektrik birim maliyeti doğalgaz birim maliyetinden yüksektir. Her ne kadar mevcut durumda elektrik fiyatlarında azalış öngörülmesi de nükleer enerji gibi farklı enerji kaynaklarının işletmeye alınması durumunda elektrik birim maliyetinde gerçekleşebilecek düşüşler ile TKIP sistemlerinin daha cazip hala gelmesine mümkündür. DG-S (TR) için 1. durum senaryosu referans alındığında elektrik birim maliyetine kıyasla doğalgaz birim maliyeti %53.8 daha düşüktür. Bu değer halihazırda nükleer enerjiye sahip ülkelerdeki maliyetlere oldukça yakındır (Biglarian ve ark., 2019). Nükleer enerji kaynaklarının işletmeye alınması halinde sadece kurulum maliyetinde yapılacak teşvikler ile TKIP sistemleri uygulanabilir bir sistem olarak kullanılabilceği öngörülebilir.



Şekil 9. Farklı durum senaryolarına göre TSM değerleri



Şekil 10. Farklı durum senaryolarına göre işletme maliyetlerinin yıllık değişim oranları

4. SONUÇ

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı bir TKIP sisteminin ısıtma uygulamalarında Türkiye’de yaygın olarak kullanılan DG-S’ye göre ekonomik olarak karşılaştırılması ele alınmıştır. Elde edilen veriler ile de DG-S’ye alternatif olarak değerlendirilebilmesi için gerekli optimum teşvik miktarları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen önemli bulgular şu şekilde özetlenebilir.

- TKIP sistemi enerji tasarrufu konusunda DG-S’ye kıyasla 4 kata varan avantaj sağlar. Maliyet olgusu bir kenara bırakıldığında bu durum kaynakların verimli kullanılması açısından oldukça önemlidir.
- Türkiye’de TKIP sistem bileşenlerinin ithal yollardan temin edilmesi nedeniyle ciddi ilk kurulum maliyetine sahiptir. TKIP sisteminin ilk kurulum maliyeti DG-S’ye kıyasla on kattan fazladır.
- Mevcut koşullar altında elektrik birim maliyetinin doğalgaz birim maliyetinden oldukça fazla olması nedeniyle sadece ısıtma uygulamalarında TKIP sistemi DG-S’ye alternatif olarak değerlendirilmemektedir. Bu durum ısı pompaları ve toprakaltı ısı değiştirgeçlerinin yerli üretiminin sağlanması ve teşvik edilmesi ile aşılabılır.
- Yalnızca ısıtma uygulamalarının gerçekleştirildiği bölgelerde TKIP sisteminin alternatif olarak değerlendirilebilmesi için hem elektrik birim fiyatı hem de ilk kurulum maliyetinde devlet tarafından %65,2 teşvik sağlanması gerekmektedir. Fakat halihazırda Avrupa bölgesine kıyasla fiyat artışı sınırlı olan Türkiye’nin, Avrupa’ya eşdeğer şekilde doğalgaz fiyatlarındaki artışa maruz kalması durumunda bu teşvik miktarı %36,8 kadar düşmektedir. Türkiye’nin mevcut konumu göz önüne alındığında benzer artış oranlarının görülmesi mümkündür.
- Sadece bileşen maliyetlerinde teşvik uygulanması durumunda mevcut durum senaryosuna göre ilk kurulum bedelinin tamamına yakınının devlet tarafından sağlanması

gerekmektedir. Fakat Avrupa'daki doğalgaz artış oranları göz önüne alındığında bu oran %55 kadar düşmektedir.

- Halihazırda TKIP sistemlerine birçok ülke benzer teşvikleri uygulamaktadır. Türkiye'de de bu teşviklerin uygulanması mümkün olup TKIP sistemlerinin yaygınlaşmasında önemli katkı sağlayacağı açıktır.

5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

6. YAZAR KATKISI

Çalışmanın tüm süreçleri yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

7. KAYNAKLAR

- Bck Doğalgaz, Mekanik Tesisat, Sivas, 2021.
- Bertsch, S. S., Groll, E. A. Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U.S. climates. *International Journal of Refrigeration*, 31(7), 1282-1292, 2008.
- Biglarian, H., Saidi, M. H., Abbaspour, M., Economic and environmental assessment of a solar-assisted ground source heat pump system in a heating-dominated climate. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(7), 3091-3098, 2019.
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Eligibility requirements. https://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Foerdervoraussetzungen/foerdervoraussetzungen_node.html, 2020.
- Ekberli, İ., Gülser, Ç., Özdemir N., Toprakların Termo-Fiziksel Özellikleri ve Isısal Yayımlı Katsayısının Değerlendirilmesi. *OMÜ Zir. Fak. Dergisi*, 20(2), 85-91, 2005.
- Environmental Protection Agency (EPA), GHG Reduction Programs Strategies. <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-reduction-programs-strategies>, 2022.
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M., A techno-economic comparison of ground-coupled and air-coupled heat pump system for space cooling. *Building and Environment*, 42(5), 1955-1965, 2007.
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M., Pihtili, K., Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers. *Building and Environment*, 42(10), 3606-3615, 2007.
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M., Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey. *Energy Conversion and Management*, 47(9-10), 1281-1297, 2006.
- EurObserv'ER, Heat pumps barometer 2021. <https://www.eurobserv-er.org/heat-pumps-barometer-2021/>, 2022.
- European Heat Pump Association (EHPA), The European Heat Pump Market and Statistics Report. <https://www.ehpa.org/market-data/market-report-2021/>, 2021.
- Eurostat, Electricity prices for household consumers-bi-annual data. *Statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204/default/table?lang=en, 2022a.

- Eurostat, Gas prices for household consumers-bi-annual data. Statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_202__custom_3678447/default/line?lang=en, 2022b.
- Guoyuan, M., Qinhu, C., Yi, J., Experimental investigation of air-source heat pump for cold regions. *International Journal of Refrigeration*, 26(1), 12-18, 2003.
- Habibi, M., Hakkaki-Fard, A., Evaluation and improvement of the thermal performance of different types of horizontal ground heat exchangers based on techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 171, 1177-1192, 2018.
- Han, J., Cui, M., Chen, J., Lv, W., Analysis of thermal performance and economy of ground source heat pump system: a case study of the large building. *Geothermics*, 89, 101929, 2021.
- HeatCAD, ASHRAE 2021 Climate Data (22.0.0080), 2022.
- Hepbasli, A., Akdemir, O., Hancioglu, E., Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 44(4), 527-548, 2003.
- Hepbasli, A., Kalinci, Y., A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1211-1229, 2009.
- <https://www.eia.gov/analysis/studies/buildings/equipcosts/pdf/full.pdf>, 2018.
- International Energy Agency (IEA), *Global Status Report for Buildings and Construction*, 2019.
- Kapıcıoğlu, A., Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system with a slinky ground heat exchanger supported by nanofluid. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(2), 1455-1468, 2022.
- Kapıcıoğlu, A., Esen, H., Economic and environmental assessment of ground source heat pump system: The case of Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(Part B), 2022.
- Kavanaugh, S., Rafferty, K., *Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems*. ASHRAE, 2014.
- Lei, Y., Tan, H., Li, Y., Technical-economic evaluation of ground source heat pump for office buildings in China. *Energy Procedia*, 152, 1069-1078, 2018.
- Nguyen, H. V., Law, Y. L. E., Alavy, M., Walsh, P. R., Leong, W. H., Dworkin, S. B., An analysis of the factors affecting hybrid ground-source heat pump installation potential in North America. *Applied Energy*, 125, 28-38, 2014.
- Nordgård-Hansen, E., Kishor, N., Midttømme, K., Risinggård, V. K., Kocbach, J., Case study on optimal design and operation of detached house energy system: Solar, battery, and ground source heat pump. *Applied Energy*, 308, 118370, 2022.
- Orta Anadolu Kalkınma Ajansı, *Sivas Tarım Hayvancılık ve Gıda Sektörel Çalışma Grubu Raporu*, 2011.
- Özbek Mühendislik, <https://www.ozbek.com.tr/>, 2022.
- Petit, P. J., Meyer, J. P., Economic potential of vertical ground-source heat pumps compared to air-source air conditioners in South Africa. *Energy*, 23(2), 137-143, 1998.
- Raugeo Sysyem Technology, *Innovative Heating, Cooling and Storage Using Ground-Source Energy Technical Information 827600/1EN*. www.rehau.co.uk, 2012.
- REHAU, <https://www.rehau.com/tr-tr>, 2021.
- Shen, P., Lukes, J. R., Impact of global warming on performance of ground source heat pumps in US climate zones. *Energy Conversion and Management*, 101, 632-643, 2015.
- Statista, *Turkey - Inflation rate 2027*. <https://www.statista.com/statistics/277044/inflation-rate-in-turkey/>, 2022.

- Su, C. W., Khan, K., Umar, M., Chang, T., Renewable energy in prism of technological innovation and economic uncertainty. *Renewable Energy*, 189, 467-478, 2022.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik Yatırım Rehberi, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-yatirim-destekleri-elektrik-yatirim-rehberi>, 2022.
- TCMB, Reeskont ve Avans Faiz Oranları, <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Temel+Faaliyetler/Para+Politikasi/Reeskont+ve+Avans+Faiz+Oranlari>, 2022.
- U.S. Energy Information Administration (EIA), Updated Buildings Sector Appliance and Equipment Costs and Efficiency
- Viessmann, VITOCAL brine/water and water/water heat pump technical guide, 2019.
- Viessmann, Vitodens product data, 2021.
- Wang, S., Liu, X., Gates, S., An introduction of new features for conventional and hybrid GSHP simulations in eQUEST 3.7. *Energy and Buildings*, 105, 368-376, 2015.
- Xing, J., Ren, P., Ling, J., Analysis of energy efficiency retrofit scheme for hotel buildings using eQuest software: A case study from Tianjin, China. *Energy and Buildings*, 87, 14-24, 2015a.
- Xing, J., Ren, P., Ling, J., Analysis of energy efficiency retrofit scheme for hotel buildings using eQuest software: A case study from Tianjin, China. *Energy and Buildings*, 87, 14-24, 2015b.
- Yang, L., Zhou, X., Feng, X., Renewable energy led Economic Growth Hypothesis: Evidence from novel panel methods for N-11 economies. *Renewable Energy*, 197, 790-797, 2022.
- You, T., Wu, W., Shi, W., Wang, B., Li, X., An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions. *Applied Energy*, 177, 515-536, 2016.
- Zhou, K., Mao, J., Li, Y., Zhang, H., Performance assessment and techno-economic optimization of ground source heat pump for residential heating and cooling: A case study of Nanjing, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100782, 2020.