



EKSERJİ-AKILCI EN UYGUN JEOTERMAL KUYU DERİNLİĞİNİ ÇÖZÜMLEME MODELİ

Exergy-Rational Analysis Model For Optimum Geothermal Well Depth

Nil Özsancak
Biol Kılış

ÖZET

Bu çalışmada CO₂ salımlarının ekserji tabanında incelendiği, iç içe geçmiş iki eniyileme döngüsünden oluşan en uygun kuyu derinliği hesap modeli geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak kuyunun derinliğine bağlı kuyu açma, bakım ve onarım faaliyetlerinin tümünün bugünkü gömülü CO₂ değerleri (CO₂ yatırımı) ile işletme sırasında kuyu derinleştirildikçe sağlanan jeotermal akışkan sıcaklık farkından doğan ekserji kazancından artan pompa gücü ekserji giderinden arta kalan, yıllara sâri CO₂ salım tasarrufunun (CO₂ geliri) karşılaştırmasından en uygun kuyu derinliği hesaplanabilmektedir. Bu hesabın kuyu derinliğine bağlı iki amacı sırası ile, CO₂ salımlarında en hızlı geri dönüş süresi (yıl olarak) ve en az karbon ayak izidir. Bu model çerçevesinde salt ekonomik öngörüler yerine özellikle Ülkemiz açısından düşük entalpili jeotermal kaynaklarımızın en akılcı biçimde değerlendirilmesinde termodinamiğin 2. yasasının ön plana çıkarılmasının gereği tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Enerji, Organik Rankin Çevrimi, CO₂ Salımları, Jeotermal Bölge Isıtması, Ekserji Tabanlı Model, En Uygun Kuyu Derinliği.

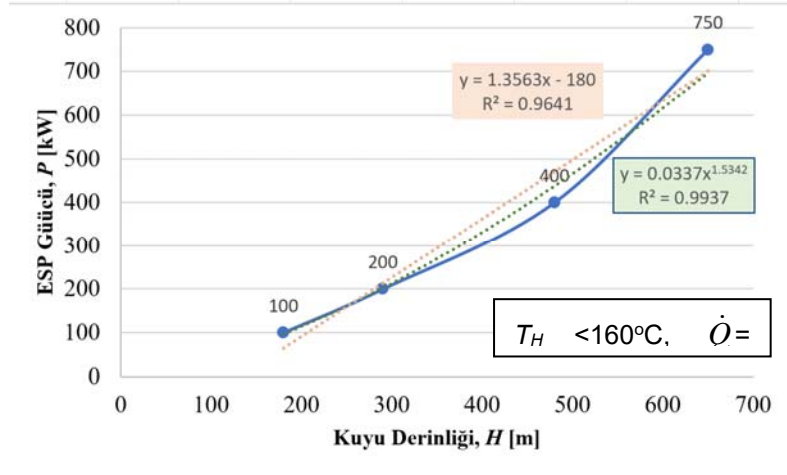
ABSTRACT

In this study, the most exergy-rational geothermal well depth calculation model has been developed. This model is composed of two nested optimization loops, with the objective of minimizing CO₂ emissions based on exergy mismatches and destructions in processes. Using this model, CO₂ embodiments (CO₂ investment) regarding well drilling, maintenance, and repair activities depending on the depth of the well are compared with the corresponding CO₂ savings from thermal exergy gain during operation due to geothermal fluid temperature increase with the geothermal well depth, subtracted by the increase of the ESP pump electrical exergy demand. CO₂ emission savings (CO₂ emissions savings in years). The optimal well depth can therefore be determined by comparing CO₂ cost and savings. The dual objective is to minimize the return of the CO₂ costs and the least amount of CO₂ emissions during operation. Within the framework of this model, the essence of bringing the 2nd Law of thermodynamics to the forefront is discussed for targeting the most rational and environmentally safe utilization of low-enthalpy geothermal resources, rather than purely economic expectations.

Keywords: Geothermal Energy, Organic Rankine Cycle, CO₂ Emissions, Geothermal District Heating, Exergy-Based Modeling, Optimum Well Depth.

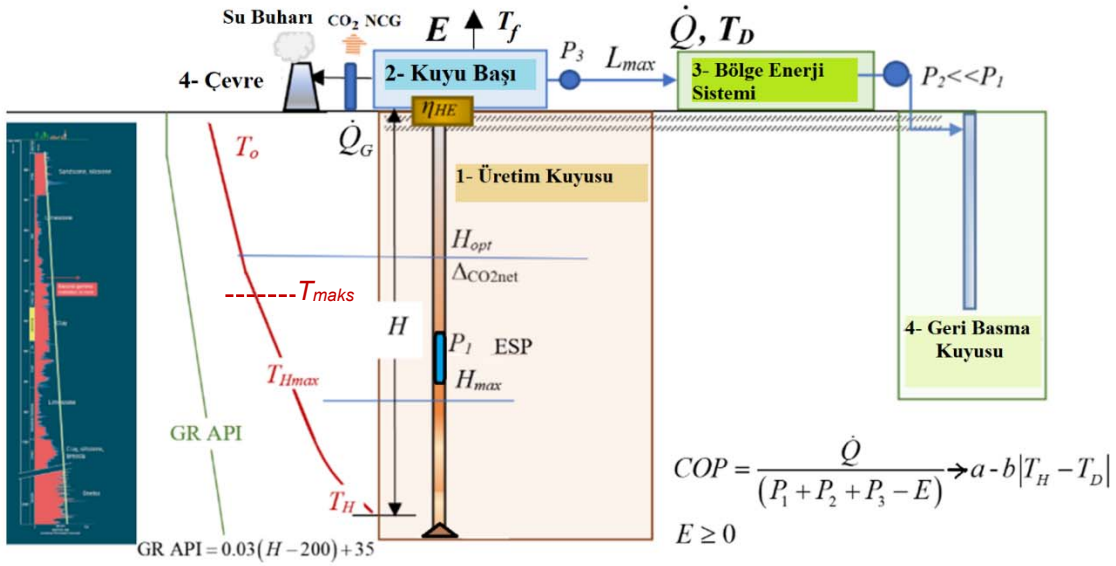
1. GİRİŞ

Günümüzün iklimsel acil durumu karşısında ülkeler bir yandan doğada bol miktarda bulunan fakat entalpileri düşük oldukları için bugüne değin yeterince değerlendiremedikleri düşük sıcaklıklardaki jeotermal enerji kaynaklarını ve atık ısıları, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik gücü ile çalıştırılan ısı pompaları kullanarak tam elektrifikasyona yönelirken bir yandan da çok düşük sıcaklıkta (35°C) bölge ısıtması ve alışıldan oldukça yüksek sıcaklıkta (19°C) bölge soğutmasına öncelik vermektedirler. Bunun ana nedeni ısı pompalarının küçük sıcaklık yükseltmelerinde (Isıtmada) veya düşürmelerinde (Soğutmada) performans katsayılarının daha yüksek olması ve bu nedenle de daha az elektrik enerjisi tüketmeleridir. Bu yaklaşım ancak düşük ekserjili binalarla mümkündür (EBC, 2018; Tanay, 2019; Kılış, Ş. 2011). Çözümün bu yönü başka bir makaleye atfedildiğinde (Kilkis, 20121) Ülkemizde çok yaygın ve bol miktarlarda bulunan düşük entalpili jeotermal enerji kaynaklarımızın potansiyel katkıları gündeme gelmektedir. Düşük entalpili jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminde ORC teknolojisi olası bir seçenektir ve atık ısıları da düşük sıcaklık-bölge ısıtmasına tamamen uygun olsa da verimliliği ve ekserji akılcılığını arttıracak kaynak sıcaklığını yükseltecek en uygun kuyu derinliklerinin hesaplanması önem kazanmıştır. Bu bağlamda, Avrupa Birliğinin iklimsel acil duruma karşı yapıllı çevrenin karbonsuzlaştırılması için toptan elektrifikasyon gibi yönelimlerinin sonucunda önceden pek ekonomik görülmeeyen derin jeotermal kuyulara ilgi artmış ve Avrupa Birliği bünyesinde 2016 yılında *Deep Geothermal European Technology and Innovation Platform* (ETIP-DG, 2016) kurulmuştur. Ayrıca üretim kuyularında seviye azalması da bu yönelimi tetiklemektedir. Kuyular derinleştikçe (H) yer kabuğu ve jeotermal kaynak sıcaklığı (T_H) artmakta, dolayısı ile düşük ve çok düşük entalpili jeotermal kuyular veya yeni kuyular derinleştirilerek kısmen de olsa ORC teknolojisi ile elektrik üretimi mümkün olmaktadır. Ancak kuyu derinliği arttıkça ESP pompa güç talebi de (P) artmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. ESP Pompanın Kuyu Derinliğine Bağlı Örnek Eğrisi. Dik, Sabit Çaplı Düz Kuyu

Bu güç talebi işletme maliyetlerinden de daha önemlisi olarak yüksek kaliteli enerji (Elektrik) kullanmakta, buna karşın her bir metre daha derin kuyu için elde edilecek sıcaklık artışının potansiyel katma değeri (Birim Ekserji) elektrik gücüne oranla (0.95 kW/kW) çok daha az olacaktır. Örneğin jeotermal akışkanın sıcaklığı 2°C artarsa birim ekserji kazancı sadece 0.006 kW/kW olur. Görüldüğü üzere, bu fark ancak ekserji (Termodinamiğin 2. Yasası) ile incelenebilir. Salt ekonomik analizler bu nedenle çoğu kez yanıltıcı olabilmektedir ve artık günümüzde çevresel karbon ayak izi çözümlenmeleri ekonomik çözümlenmelerin önüne geçmiş bulunmaktadır. Amaç, sektörü ve yapıllı çevreyi karbonsuzlaştırma ve küresel ısınmayı azaltma ise, amaç fonksiyonu da en az CO_2 salımına eşlenik optimum kuyu derinliği H_{opt} olmalıdır sorusunu cevaplamalıdır. Cevabın ekserjiye dayalı ve çevre bağlantılı dört çelişkisi Şekil 2 de gösterilmektedir. H_{max} değeri sınır derinliktir ve CO_2 salımında sıfır azaltımı gösterir. Daha derin kuyularda CO_2 salımları artar ve mevcut kuyu pompaları belirli bir sıcaklık üzerinde (T_{maks}) kısa sürede arıza yapmaktadır. Örneğin, 180°C giriş sıcaklığında arızasız çalışma süresi genelde 1500 saati geçmez. Bu nedenle, optimizasyonda $T_{op} < T_{maks}$ kısıtı geçerlidir.

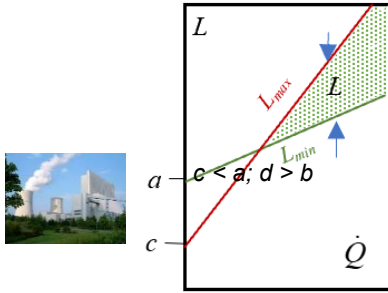


Şekil 2. Derin Jeotermal Kuyuların Dört Çelişki Boyutu © 2019 B. Kılış

1- Üretim Kuyusu: Kuyu derinliği arttıkça ısıl güç ekserji (Sıcaklık) kazanır fakat gerekli pompa gücü dolayısı ile elektrik güç ekserji talebi de artar. Her ikisi de kuyu derinliğine bağlıdır.

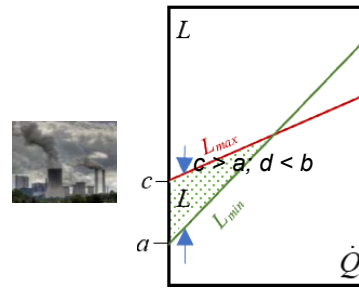
2- Kuyu Başı Tesis: Kuyu derinliği arttıkça kuyu başında en uygun ısı ve veya ısı ve güç ekserjilerinin arz potansiyeli artar. Örneğin, ORC tesisi kurulacaksa ısı ve elektrik çıktıları artar (Verim ve çevre).

3- Bölgede Değerlendirme: Jeotermal kaynaklı ısının ve veya ORC atık ısısının yakın çevrede değerlendirilmesinde kuyu başında elde edilen ekserjinin en akılcı ve sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesi gerekir. Bu sırada ısının götürüleceği en uzak mesafe, L_{max} için termo-mekanik kısıtlar göz önünde tutulmalıdır. Jeotermal işletme ne kadar çevreci olursa L_{max} o denli uzar ve pazar payı o oranda değerlendirilir ve artar. Çevreye saygı göstermenin önemli bir özendirici boyutu da bu doğrusal ilişkidir. Bir jeotermal işletme çevreyi çok kirletiyorsa L_{max} o denli kısalmış olur (Şekil 3 ve 4).


 Şekil 3. Çevre Duyarlı Tesiste L_{max} ve L_{min}

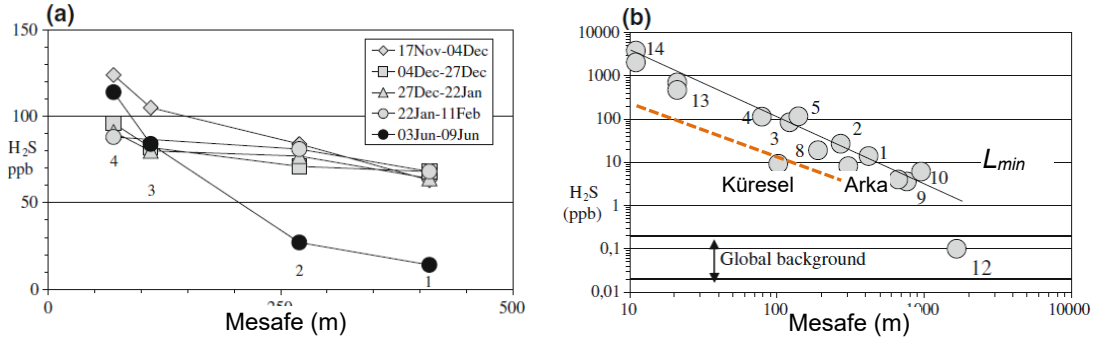
$$L_{min} \geq a + b\dot{Q}$$

$$L_{max} \leq c + d\dot{Q}$$

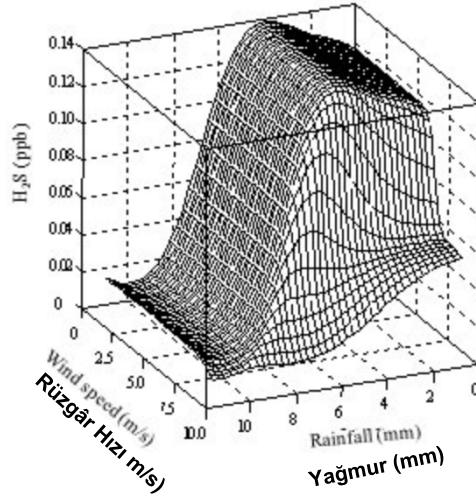

 Şekil 4. Çevre Duyarsız Tesiste L_{max} ve L_{min}

4- Çevre: Tüm sistem tamamen kapalı tutulsa bile kuyu derinliği arttıkça değişik zararlı parçacıklar ve radyoaktif elementler (Gama ışınım eşdeğeri) dışarı hiç sızmadığı kabul edilse bile daha sık açılacak bir geri basma kuyusunda bu maddeler yüzeye daha yakın bir seviyeye taşınmış olacak ve uzun vadede yüzeye doğal erişimleri daha yaygın ve hızlı olacaktır. Ayrıca yoğunlaştırılmayan zararlı gazlar eğer tekno-ekonomik biçimde değerlendirilmez ve tutulup ekolojik biçimde depolanmazsa bu çevre zararları önemli boyutlara ulaşır ve jeotermal tesislerin çok yakınında yaşamsal, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin asla kurulamamasına ve değerli arazi kaybına neden olur. Minimum emniyetli mesafe, L_{min} mevsime, havanın bağıl nemine, ortam sıcaklığına, basıncına, rüzgâr şiddetine, kuyu derinliğine ve anlık üretim kapasitesine bağlı şekilde değişebilmektedir (Örnekler: Şekil 5 ve 6). Diğer bir olumsuzluk da yukarıdaki şekillerde gösterildiği üzere atık ısının değerlendirilmesinde L_{max} değerinin çok kısa olması sonucu çevre ve katma değer kısıt ve beklentilerinde önemli bir ikilem ortaya çıkarmasıdır. Ayrıca çevresel ayak izinde soğutma kulelerinde atılan su buharının sera etkisi, soğutmada kullanılan fanların çektiği elektrik gücünün sağlandığı santrallerdeki CO₂ salımlarının

sorumluluğu yoğunlaşmayan gazlar ve diğer parçacıklar yanı sıra radyoaktif maddeler önemli sorunlardır. Jeotermal santral merkezinden belirli bir emniyet çemberi ile tarif edilen bir sahayı boş bırakmak gerekir. Çember yarıçapı, L_{min} zararlı gaz ve parçacıkların etkin tutumu, depolanması ve değerlendirilmesi ile kısıtlanabilir. Örneğin, H_2S gazından hidrojen gazı ve sanayide talebi olan sülfür ayrıştırılarak değerlendirilebilir. Şekil 5a, H_2S gaz atımının yoğunluğuna bağlı olarak merkezden olan mesafeye bağlı değişimini farklı gün ve mevsimlerde göstermektedir. Şekil 5b ise küresel arka plan yoğunluğunun altına inilebilecek L_{min} değerinin en az 4000 m olabileceği görülmektedir. Bu alanda tarım ve yerleşimin olabilmesi için H_2S gazının tamamına yakınını tutulması gerekmektedir (Kesikli çizgi, L_{min} : 300 m). Şekil 6 da ise H_2S gazının çevreye yayılımının bahar aylarında yağmur yağışına ve rüzgâr hızına olan bağı görülmektedir. Dolayısı ile, herhangi bir yörede zararlı gaz ölçümleri yapılarak veya modellenerek yıl boyu değişimlerinin ağırlıklı ortalamasına göre L_{min} tespit edilmelidir.



Şekil 5. H_2S Yoğunluğunun Değişik Mevsim ve Günlerde Mesafeye Göre Örnek Değişimi (D'Alessandro, W., Brusca, K., 2009)

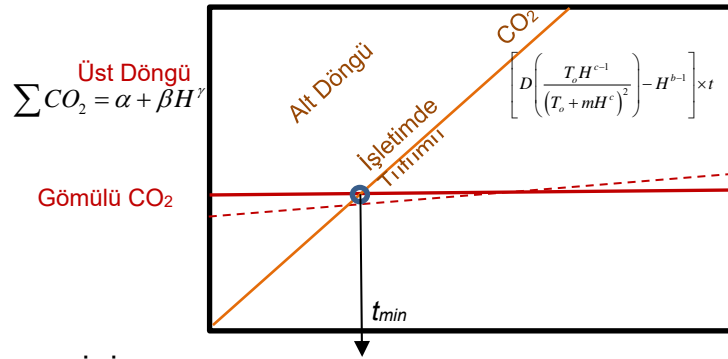


Şekil 6. Bahar Aylarında H_2S Gazının Çevreye Yayılımının Yağışa ve Rüzgâr Hızına Bağı (Olafsdottir, S., and Gardarsson, S., 2013.)

2. EN UYGUN KUYU DERİNLİĞİ HESAP MODELİ

2.1. Üst Döngü: Gömülü CO₂ Eniyilemesi

Bu döngüde H derinliği ne kadar kısa olursa gömülü CO₂ salım sorumlulukları o denli azalır ancak bu kez kaynak sıcaklığı azalacağından kuyunun yararlı iş potansiyeli azalır ve bu arada EPS pompa gideri de azalır. Bu üç değişken H değerine bağlıdır. Alt döngüde (Şekil 1) H eniyilenirken (H_{opt}) üst döngüde de en iyi H değeri gömülü değerlerle düzeltilir.



Şekil 7. CO₂ Tabanlı, İç İçe Eniyileme Döngülerinde Ekserji Çözümü

Aslen kuyu derinliğine bağlı olarak zamanla az da olsa artan (bakım, onarım) gömülü CO₂ salım sorumlulukları (noktalı çizgi) şekil 7'de sabit kabul edildiğinde, CO₂ geri dönüş süresi, t_{min} işletim sırasındaki salım potansiyelinin değişimi göz önünde bulundurularak Eşitlik 1 aracılığı ile çözülebilir. Eşitliğin payında gömülü CO₂ değerinin H ile ilişkisi, paydasında ise kuyunun en uygunu H_{opt} değerinin alt döngü ile bulunmasını simgeler (Eşitlikler 2'den 7'ye kadar). Diğer bir deyişle, paydanın maksimum olması (alt döngü) payın ise minimum olması (üst döngü) amaçlanmaktadır.

$$t_{min} = \frac{(\alpha + \beta H_{opt}^{\gamma})_{min}}{\left[D \left(\frac{T_o H_{opt}^{c-1}}{(T_o + m H_{opt}^c)^2} \right) - H_{opt}^{b-1} \right]_{max}} \quad (1)$$

2.2. Alt Döngü: İşletimsel Eniyileme

$$T_H(H) = T_o + mH^c \quad ; \quad \Delta T(H) = T_H(H) - T_o = mH^c \quad (2)$$

Kuyu derinleştikçe artan jeotermal akışkan sıcaklığının (Eşitlik 2) doğal gazlı bir kazandan tasarruf edeceği ve kuyu derinliğine bağlı salım sorumluluğu, $\Delta CO_{2G}(H)$ Eşitlik 3'de verilmiştir:

$$\Delta CO_{2G}(H) = -0.63 \times \left(1 - \frac{T_o}{T_o + mH^c} \right) \quad (3)$$

Buna karşın kuyu derinleştikçe ESP pompanın elektrik güç talebi de artacaktır. Artan güç talebinin yerinde kurulu dökme doğal gazlı bir jeneratörden karşılandığı kabul edildiğinde oluşan $\Delta CO_{2P}(H)$ bu tasarruftan çıkarılmalıdır.

$$\Delta CO_{2P}(H) = +(0.27 \times 0.95) P_1 + |2.3 - R_{CO_2}| \{ \text{Pompa elektriğine bağlı salım} \} \quad (4)$$

P1'e, a ve b'nin ESP özelliklerini temsil ettiği aHb adlı bir güç fonksiyonu ile yaklaşılmaktadır. P1 değeri, daha az pompa işletme ve CO₂ maliyeti bileşenleri göz önüne alındığında, sondaj kuyu çapının artırılması pahasına arttırılabilir. ΔCO 'deki net azalma, yani ESP'nin her kW'ı için ΔCO_{2net} , Denklem 9-b ve 10 arasındaki farktır ve maksimize edilmelidir.

$$D \left(\frac{T_o H_{opt}^{c-1}}{(T_o + m H_{opt}^c)^2} \right) = H_{opt}^{b-1} \quad \{ R_{CO_2} = \dot{Q} / \Delta P = 2.3 \text{ için} \} \quad (5)$$

$$D \left(\frac{T_o}{(T_o + mH_{opt})^2} \right) = H_{opt}^{b-1} \{ \text{Doğrusal Profil, } c = 1 \} \quad (6)$$

$$D = \frac{0.63c \times m}{(0.26 \times a \times b)} = \frac{2.42c \times m}{a \times b}; R_{CO_2} = 0.2 \left(\frac{1}{0.35} - \frac{1}{0.85} \frac{\dot{Q}}{P_1} \right) \quad (7)$$

$\Delta CO_{2net} = 0$ koşulunda ise müsaade edilebilen fazla kuyu derinliği Eşitlik 8 aracılığı ile sınama yanılma yöntemi ile bulunabilir.

$$\Delta CO_{2net} = 0 = 0.26aH_{max}^b - 0.63 \left(1 - \frac{T_o}{T_o + mH_{max}^c} \right) \{ H_{max} > H_{opt} \} \quad (8)$$

(Kilkis, B., 2020-d; Kentli, K., Kentli; B. ve Kilkis, B., 2021). Bir ORC sistemi önce güç üretip sonra da atık ısısını yararlı bir işe sağlayabilir. Ancak iyi bir ORC işletme sıcaklığına ulaşmak için kuyu derinliğinin artırılması gerekiyorsa ve sadece ısıdan-ısıya bir işletme öngörülüyorsa T_o sıcaklığını piklemek üzere bir ısı pompası kuyu derinliğini arttırmaya gerek olmaksızın ısıtma veya soğutma amaçlarında yeterli olabilir. Ancak bunun ekserji tabanlı koşulları (Eşitlik 9 ve 10) sağlanmalıdır.

$$COP = d + e\Delta T_{max} = d + mH_{max}^c \quad (9)$$

$$0.95aH_{max}^b - emH_{max}^c > d \quad (10)$$

Sığ jeotermal kuyularda pompa sarfiyatının azaltılmasının yanı sıra, radyoaktif elementlerin yoğunluğu azalır ve aynı zamanda derin kuyuların gömülü CO_2 salım sorumlulukları ve enerji maliyetleri de büyük ölçüde bertaraf edilmiş olur. Bunun yerine kullanılacak olan ısı pompalarının ise soğutucu akışkan sızıntıları nedeni ile ozon katmanına zararı vardır ve kendileri elektrik tükettiklerinden işletme sırasında CO_2 salım sorumlulukları da vardır. Toplam ısı pompası COP değerini yükseltmek üzere iki adet daha küçük ve ardışık ısı pompası kullanılarak her ısı pompasının sıcaklık pikleme kademesinin azaltılması daha akılcıdır (Kilkis, B., 2021). Özellikle derin kuyulardan lityumun daha temiz ve ekonomik olarak teminine başlandığı da hatırdan çıkarılmamalıdır (İngiltere, Fransa, ABD). Bu bağlamda, en çok Li_2CO_3 derinliğine ulaşacak kuyu derinliği de ek bir alt eniyileme girdisi olmalıdır (EGEC, 2021).

2.3. ORC Teknolojisinde Ekserji Kısıtları

CO_2 salımlarının gömülü ve işletimsel boyutlarda en aza indirmesi ile bulunan H_{opt} değeri bize aynı zamanda jeotermalden elde edilebilecek en yüksek jeotermal kaynak sıcaklığı T_f değerini de verir (Eşitlik 2). Bu sıcaklık yukarıdaki bölümde tespit edildiğine göre ikinci tasarım aşaması bu sıcaklıktaki kaynağın ne tür bir üretimde yararlı işe dönüştürülmesinin eniyilemesini kapsar. Örneğin, bu sıcaklıkta ORC sistemi ile önce elektrik gücü üretilip atık ısının değerlendirilmesi mi yoksa elektrik üretmeyip ısının doğrudan ısı olarak kullanılması mı daha ekserji- akılcıdır. Bu noktanın titizlikle belirlenmesi gerekir ki bu ancak 2. Yasa ile mümkündür. Eşitlik 11` de bir ORC verim eşitliği doğrusal biçimde verilmiştir.

$$\eta_{ORC} = a + bT_f, \quad (11)$$

Eşitlik 12`de ise ısıyı ısı olarak kullanmak karşısında ısıyı öncelikle elektrik üretiminde kullanmanın gene CO_2 salım sorumluluğu tabanında özdeş noktası verilmiştir. Bu eşitliğin sol tarafında ısının sadece ısı olarak değerlendirilmesi yer almaktadır. Bu seçenekte elektrik gücü üretilmediğinden dolayı CO_2 salım sorumluluğu vardır. ORC ile elektrik gücü üretiminde ise bu kez ısının önemli bölümü değerlendirilmemekte ve gene bu orantıda CO_2 salım sorumluluğu bulunmaktadır (Cologne ve Polar)

$$\Delta CO_2 = 0.63 \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_E} \right) = 0.27 \left[\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f} \right) - 0.95 \left(\eta_{ORC} - \frac{P+F}{E} \right) \right] \quad (12)$$

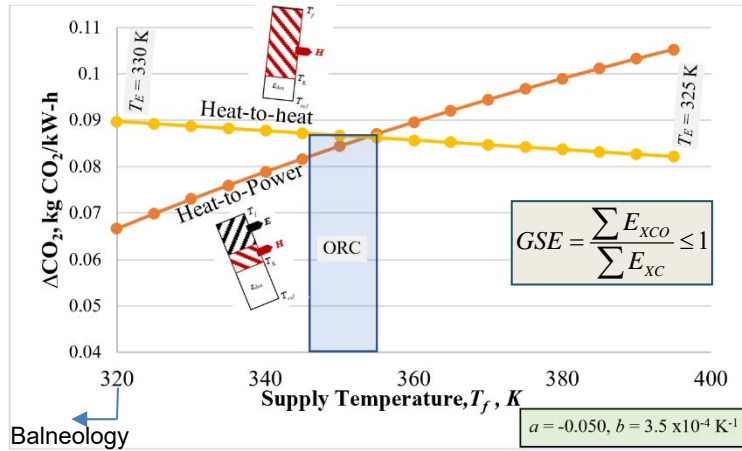
Şekil 8`de, özellikle düşük sıcaklıklarda ORC teknolojisinin ne kadar küçük bir alanda akılcı olabildiği görülmektedir. Bu örnek çözümde üst sınır 355 K, (82°C), alt sınır 345 K (72°C) değerlerindedir. Bu sınır ise bugünün ORC teknolojisini tekno-ekonomik yönlerden oldukça sınırlamaktadır. Bu tür ısıdan

güç üretiminde ekserji tabanlı COP değerinin (COP_{EX}) 1`den fazla olması olağandır. Halbuki güçten ısıya sistemlerde (Isı pompası) COP_{EX} değeri her zaman 1`den azdır. Bu olgu da ORC hanesine ek bir avantaj olarak yazılmalıdır. Sonuç olarak ORC uygulamasında COP_{EX} katsayısını en az 1 olması gerektiğinden T_f değeri için burada da bir kısıt ortaya çıkmaktadır.

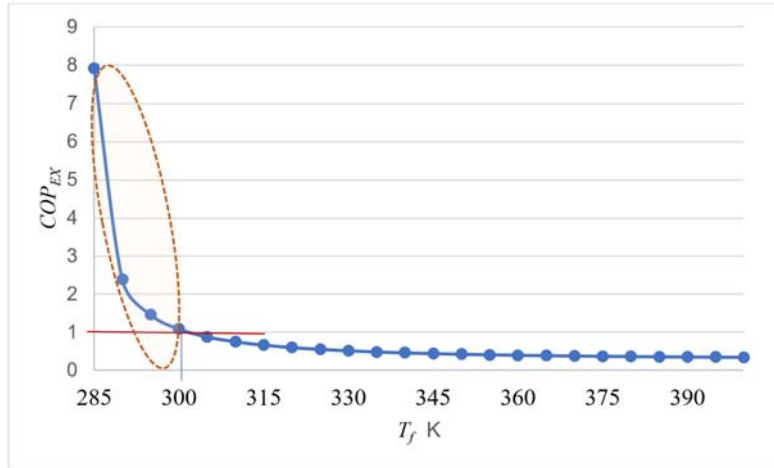
$$COP_{EX} = 1 = \frac{(a + bT_f)0.95\dot{Q}_G}{\eta_{IHE}\dot{Q}_G \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f}\right)} \quad \{T_f > T_{ref} > -a/b\} \quad (13)$$

Diğer yandan, T_f değeri bölge enerji sistemi için arttırıldıkça Şekil 2`de gösterilen 4 konumundaki ısı uygulamasında cihaz büyümeye sistem değiştirmeye pek gerek kalmaz. Bu değerlendirme, GSE tanımı ile yapılmıştır (Kilkis, I. B. 1996). GSE , T_f sıcaklığı optimum değerinden uzaklaştırılmadan, bölgedeki cihazlar büyütülmeden ve sıcaklık piklemesi yapılmadan jeotermal enerjinin beslediği bölge enerji sisteminde oluşabilecek toplam talep kapasitesinin (E_{XCO}) aynı jeotermal enerji koşullarında fakat bu kez cihaz büyütmesi ve sıcaklık piklemesi yapılarak arttırılan talep kapasitesine (E_{XC}) oranıdır. İdeal çözüm GSE ölçütünün 1 olmasıdır. Mutlaka sıcaklık piklemesi gerekiyorsa bu kez ısı pompası performansının da eniyileme algoritmasına dahil edilmesi gerekir. Eşitlik 14, Eşitlik 13 ün gösterdiği COP_{EX} değerinin 1 olması koşulundaki T_f çözümüdür. Bu eşitlikte ORC seçeneğinde güç üretimin ardından atık ısının da değerlendirildiği varsayılmıştır.

$$bT_f^2 + (a - \frac{\eta_{IHE}}{0.95})T_f + (\frac{\eta_{IH}}{0.95})T_{ref} = 0 \quad \{COP_{EX} = 1\} \quad (14)$$



Şekil 8. Isıdan-Isıya ve Isıdan-Güce Seçeneklerinde ΔCO_2 ve T_f Seçenekleri



Şekil 9. COP_{EX} Değerinin T_f ile Değişimi.

Eğer $a = -0.050$, $b = 3.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $T_{ref} = 283 \text{ K}$ ve $\eta_{IHE} = 0.85$ ise bu eşitliğin T_H için çözüm kökleri 303 K ve 2506 K dir. 2506 K gerçekçi bir çözüm değildir. İlk kök ise oldukça düşük bir sıcaklıktır ve bu sıcaklıkta ORC verimi sadece 0.056 olup ekonomik değildir. Bu nedenle her ne kadar ısıdan güce öncelikli bir uygulamada COP_{EX} , $T_{ref} < T_f < 303 \text{ K}$ aralığında birden fazla bile olsa bu aralık eksergo-ekonomik anlamda uygun değildir ve COP_{EX} her zaman bir değerinden az olacaktır (Şekil 9).

2.4. Ekserji Tabanlı Isı Pompası Kısıtları

Jeotermal tesiste mutlaka bir sıcaklık pikleme ısı pompası gerekiyorsa performans ölçütü için HPF tanımı geliştirilmiştir. (Kilkis, B. 2021).

$$HPF = \frac{COP \cdot \varepsilon_{dem}}{0.95} = \left(\frac{d + e|T_f - T_{sup}|}{0.95} \right) (1 - X_{HP}) \quad \{\text{Maksimum, } HPF \geq 1\} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{dem} = \left(1 - \frac{T_{ret}}{T_{sup}} \right) = (1 - X_{HP}) \quad \{0 < X_{HP} < 1\} \quad (16)$$

Belli bir jeotermal kaynak sıcaklığında (T_f) için of minimum X_{HP} , (T_{ret}/T_{sup}) oranı, Eşitlik 17'de $HPF = 1$ koşulunda verilmiş olup ayrıca Eşitlik 18 koşuna tabidir. Örnek sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.

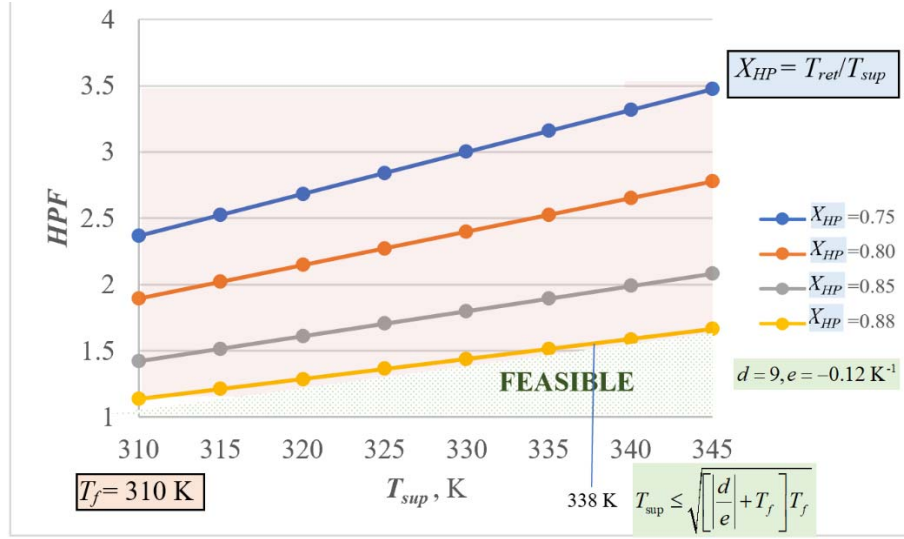
$$X_{HP} \geq 1 - \frac{1 \times 0.95}{\left(\frac{d + e|T_f - T_{sup}|}{0.95} \right)} \quad \{COP = d + e|T_f - T_{sup}|\} \quad (17)$$

$$T_{supmax} \leq \sqrt{\left[\frac{d}{e} + T_f \right] T_f} \quad \{\text{En az } \Delta CO_2 \text{ için}\} \quad (18)$$

$$\Delta CO_2 = 0.63(0.95 - [1 - X_{HP}]) < 0.63X_{HP} - 0.0315 \quad \{\text{Minimum}\} \quad (19)$$

X_{HP} bir olduğu zaman ekserji yıkımlarının neden olduğu ΔCO_2 en fazladır. Eşitlik 19'a göre ise ideal olarak ΔCO_2 $X_{HP} = 0.05$ koşulunda sıfırdır. Ancak bu değer uygulanabilir değildir. Bunun nedenleri ya ekserji talebi çok düşüktür ya da akışkan debisi çok fazladır. Dolayısı ile X_{HP} için de çok dar bir uygulanabilir alan kalmaktadır ($X_{HP} \geq 0.88$ ve $HPF \leq 1.5$, $T_f = 338 \text{ K}$). Bu koşullarda ısı pompası COP değerinin de en az 8.3 olması gerekir ki bu değer de çok pratik değildir.

$$X_{HP} = 1 - \frac{\Delta T}{T_{sup}} \geq 1 - \frac{10}{T_{sup}} \quad (20)$$



Şekil 10. HPF Değerinin T_{sup} ile Değişimi. $T_f = 310$ K. En fazla T_{sup} 345 K dir

2.5. Ekserji Tabanlı Bölge Enerji Sistem Kısıtları

Bir jeotermal tesisten T_{sup} sıcaklığında çıkan ısı gücü \dot{Q} 'nin [kW] taşınabileceği en uzak mesafe, L_{max} için Eşitlik 21 geliştirilmiştir (Kılış, Şiir ve Kılış, B., 2019). Bu eşitlik bölge soğutma sistemi için de geçerli olmakla birlikte ΔT daha küçük ve eksi değerdedir. Eşitlik 21'de ΔT teriminin karesi alındığı için sorun yoktur. Bu eşitliğin ilk örnekleri Denizli kentinin Kızıldere santral atık ısısından (750 ton/saat, 147°C) yararlanma projesinde kullanılmıştır (Kilkis, I. B., 1996; Kilkis, I. B., 2000).

$$L_{max} \leq w \left(\frac{ID}{V^2} \right) \left(\frac{\Delta T^2}{T_{sup}} \right) \quad [m] \quad \{COP_{EX} = 1\} \quad (21)$$

$$V = \frac{4\dot{Q}}{\pi \rho C_p \Delta T \times ID^2} \quad [ms^{-1}] \quad (22)$$

$$w = \left(\frac{2\rho C_p \eta_p \eta_m}{0.95} \right) \cdot \left(\frac{1}{f} \right) \quad [kJm^{-3}K^{-1}] \quad \{f(Re)\} \quad (23)$$

Isıtma rejiminde en uygun ΔT Eşitlik 24 de verilmiştir (Kilkis, 2020-c): $330 K < T_f < 360 K$.

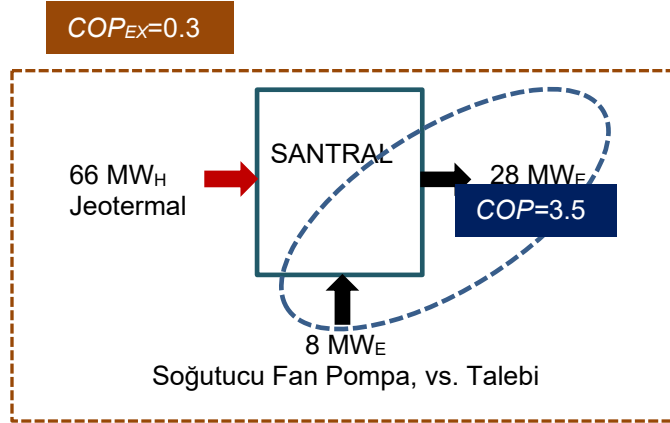
$$\Delta T = 0.273T_{sup} - 79 K \quad (24)$$

Örneğin, borularda çalkantılı akışı sürdürmek üzere V hızının en az $2 m s^{-1}$ ve boru iç çapı ID 'nin de $0.1 m$ olduğu koşulda $1000 kW$ ısının $345 K$ sıcaklıkta taşınabileceği en uzak mesafe $6 km$ 'dir. $ID=0.125 m$ ise bu mesafe $4 km$ kadardır ve boru çapının bu karmaşık ilişkiler arasında arttırılmasının en uzak mesafeye olumlu etkisinin olmayabileceği görülmektedir. Daha büyük boru çaplarına ise gerek kalmamaktadır ve en uzak mesafe, L_{min} değerinin altına inmektedir (Şekil 3). Halbuki, yanıtıcı biçimde sadece 1. Yasa uygulansa idi en uzak mesafe $ID = 0.10 m$ koşulunda $14 km$ olarak bulunacak ve COP değeri de oldukça yüksek (3) gözükcekti. Halbuki bu durumda COP_{EX} değeri sadece 0.03 olup yüklü bir ΔCO_2 sorumluluğu olacaktır.

3. SONUÇ ve TARTIŞMA

Son yıllarda tümüden elektrik gücüne geçiş planlamaları başta olmak üzere, Ülkemizde de yenilenebilir ve atık enerji kaynaklarından elektrik gücü üretimine büyük ve belki de yersiz öncelik verilmektedir. Ancak bu tekil yaklaşımda atık ısının da değerlendirilmesi kaçınılmazdır ve örneğin ORC sistemlerinin kullanılmasında karar vericilerin önüne hiçte azımsanmayacak boyut ve çeşitte ekserji-tabanlı kısıtlar ve koşullar çıkmaktadır. Bu olgular göz ardı edildiği sürece Paris antlaşmasında olduğu gibi CO₂ salımlarını azaltma yükümlülüklerimizi yerine getirmemiz mümkün olmayacaktır. YEKDEM kapsamında ise jeotermal enerjiden elektrik gücü üretimine tek bir kaleme tek bir satın alım fiyatı verilmiştir. Demek oluyor ki çevreye saygı gösteren, atık ısısının en akılcı biçimde L_{min} ve L_{max} sınırları içerisinde kalmak kaydı ile çevresinde değerlendirilmesini gerçekleştiren, sistemi her yönü ile eniyileyen ve sifıra yakın CO₂ salım sorumluluğu olan, kuyusunu bu makalede gösterildiği gibi en akılcı derinlikte açan ve işleten bir jeotermal tesisle çevresini hiç umursamayan, atık ısısını değerlendirmeyip havaya atan bir de bunun için elektrik enerjisi harcayan bir tesisin ürettiği elektriğe aynı birim fiyat uygulanacaktır. Bu çevreye, doğaya ve topluma tam bir haksızlıktır. Halbuki bu tekil fiyatın çevre, enerjinin akılcı değerlendirilmesi, CO₂ salım sorumlulukları, en uygun kuyu derinliğinin hesap edilmiş olup olmadığı, elektrik üretiminde akılcılık ve verim, elektrik gücünün nerede ve nasıl kullandırıldığına göre fiyat puanlama kırımları olmalıdır. Bu noktada EPIAŞ'ın da gün öncesi fiyatlandırma yönteminin devreye sokularak bu açılardan da revize edilip yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirme kırımları ile çeşitlendirilmesi ve revize edilmesi gerekmektedir. Şekil 11 de olası bir jeotermal santralin ekserji giriş ve çıkışları özetlenmiştir. Eğer 90°C (363 K), T_f sıcaklığındaki jeotermal akışkanın sağlayacağı 66 MW_H ısı gücü ekserjisi ($T_{ref} = 283$ K) kullanılarak 28 MW_E güç ekserjisi elde ediliyor ise ve fan ve pompaların güç talebi de ayrıca 8 MW_E ise, COP_{EX} değeri sadece $28/(66+8) = 0.38$ eder. Bunun ekserji yıkımları karşılığında CO₂ salım sorumluluğu da saatte 26 ton olur. Bu değere, elektrik güç talebini jeotermal santralden karşılanırsa da veya şebekeden sağlanırsa da fark etmez, şebekedeki doğrudan salım sorumlulukları dahil edilmemiştir.

$$\Delta CO_2 = 0.63 \times \dot{Q} \left(1 - \frac{283 \text{ K}}{363 \text{ K}} \right) (1 - COP_{EX}) = 0.63 \times 66000 \text{ kW} \times (1 - 0.38) = 26 \text{ ton CO}_2/\text{h}$$



Şekil 11. Örnek bir Jeotermal Santralin Ekserji Dengesindeki COP ve COP_{EX} tanımları

Bu tür bir hesap yapılmaksızın sadece COP değerine önem verilse idi, $COP=28/8= 3.5$ (Elektrikten-elektriğe) değerine bakılarak, 1.Yasa uyarınca bu sistem sıfır karbon salımlı ve oldukça verimli bir

sistem olarak kabul edilecekti. Bu olumsuzluğun bir diğer nedeni ise ısı piyasasının hala yasallaşamamasıdır. Ancak bu piyasa açılrsa bile yeterli olmayacaktır. Gene bu makalede gösterildiği gibi, jeotermal enerjinin hangi güç ve ısı oranında değerlendirilmesinin projeye özel olmak üzere uygun bir değeri bulunmaktadır ve bu konu sorgulanmadığı sürece sonuçlar tatminkâr ve çevreci olmayacaktır. Herhangi bir tesis bu oranın ne kadar yakınında veya uzağında ise bunun da sorgulanması ve bu bağlamda ayrı ayrı ısı ve elektrik piyasası mevzuatları yerine ortak bir *Berberer Isı ve Güç Piyasa Yönetmeliği* (BIG) çıkarılmalıdır. Tüm bu tartışmaların ışığı altında bu makalede yer alan bilgilerin bir an önce uygulamaya sokularak akılcı projelerin geliştirilmesi kaçınılmaz gözükmektedir.

01/07/2021 TARİHİNDEN 31/12/2025 TARİHİNE KADAR İŞLETMEYE GİRECEK YEK BELGELİ ÜRETİM TESİSLERİ İÇİN GÜNCELLEMeye ESAS YEK DESTEKLEME MEKANİZMASI İLE YERLİ KATKI FİYATLARI VE UYGULAMA SÜRELERİ

Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi		YEK Destekleme Mekanizması Fiyatı (Türk Lirası kuruş/kWh)	YEK Destekleme Mekanizması Fiyatı Uygulama Süresi (yıl)	Yerli Katkı Fiyatı (Türk Lirası kuruş/kWh)	Yerli Katkı Fiyatı Uygulama Süresi (yıl)
a. Hidroelektrik üretim tesisi		40,00	10	8,00	5
b. Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi		32,00	10	8,00	5
c. Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi		54,00	10	8,00	5
d. Biyokütleyle dayalı üretim tesisi	Çöp Gazı / Atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynaklar	32,00	10	8,00	5
	Biyometanizasyon	54,00	10	8,00	5
	Termal Bertaraf (Belediye atıkları, bitkisel yağ atıkları, gıda ve yem değeri olmayan tarımsal atıklar, endüstriyel odun dışındaki orman ürünleri, sanayi atık çamurları ile arıtma çamurları)	50,00	10	8,00	5
e. Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi		32,00	10	8,00	5

Şekil 12. YEKDEM Jeotermal Üretimi Elektrik Enerjisi Alım Fiyatı (54 Türk Lirası kuruş/kW-h)

4. KAYNAKÇA

- EBC. 2018. EBC ANNEX 64 LowEx Communities-Optimized Performance of Energy Supply Systems with Exergy Principles, Completed in 2018, Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology Kassel, <<https://iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=64>>
- EGEC. 2021. Time to Invest in Clean Geothermal Lithium Made in Europe, Published May 12, 2020. <<https://www.egec.org/time-to-invest-in-clean-geothermal-lithium-made-in-europe/>>
- ETIP-DG. 2016. Accelerating The Development of Deep Geothermal Technology In Europe <<https://www.egec.org/deep-geothermal-etip/>>
- Kentli, K., Kentli, B., and Kilkis, B. 2021. Exergy-Rationality of Cogeneration with Renewable Energy Sources, Polar Technology, 61 pages, Ankara, Turkey.
- Kilkis, B. 2021. Metrics of Exergetic Sustainability for Renewable Energy-to-Heat in District Energy Systems, *Energy J.*, Under Review, Manuscript No: EGY-D-20-10362.
- Kilkis, I. B. 1996. Closed-Loop Versus Open-Loop Geothermal Energy System, a Techno-Economical Assessment, Geothermal Development in the Pacific Rim, Transactions, Vol. 20, pp:95-102, GRC 1996 Annual Meeting, 29 September, 2 October, 1996, Portland, OR.
- Kilkis, I. B. 2000. Rationalization and Optimization of Heating Systems Coupled to Ground Source Heat Pumps, *ASHRAE Transactions*, Vol. 106, Pt. 2, pp: 817-822, 2000, MN-00-13-1.
- Kılış, Şiir. 2011. A Rational Exergy Management Model to Curb CO₂ Emissions in the Exergy Aware Built Environments of the Future, Doctoral Thesis, Division of Building Technology School of Architecture and the Built Environment KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Kılış, Şiir, and Kılış, B. 2019. An Urbanization Algorithm for Districts with Minimized Emissions Based on Urban Planning and Embodied Energy Towards Net-Zero Exergy Targets, *Energy*, 179 (2019) 392-406.
- Olafsdottir, S., and Gardarsson, S. 2013. Impacts of Meteorological Factors on Hydrogen Sulfide Concentration Downwind of Geothermal Power Plants, October 2013, Atmospheric Environment 77, pp:185-192.
- Tanay, S. U. (Ed). 2019 Accelerating the Transition to a 100% Renewable Energy Era, Lecture Notes on Energy, Vol. 74, Springer. <<https://doi.org/10.1007/978-3-030-40738-4>>



W. D'Alessandro, L. Brusca, K. 2009. Hydrogen Sulphide As A Natural Air Contaminant in Volcanic/Geothermal Areas: The Case of Sousaki, Corinthia (Greece), Environ Geol. 57, pp:1723–1728, DOI 10.1007/s00254-008-1453-3.

5. SİMGELER

a, b, c, d	L_{max} ve L_{min} eşitlikleri için katsayılar (Şekil 3 ve 4) Ayrıca, a ve b : Pompa gücü katsayıları (Eşitlik 4)
C_p	Özgül Isı, kJ/kgK
COP	Isı Pompasının Tesir Katsayısı
d, e	Isı Pompası Performans Katsayıları (Eşitlik 9)
E	Jeotermal Enerjiden Üretilen Elektrik Gücü, kW
E_{XCO}	Bölgede Sıcaklık Piklemesi ve Cihaz Büyütmesi Olmadan Jeotermal Ekserji Talebi, kW
E_{XC}	Bölgede Sıcaklık Piklemesi ve Cihaz Büyütmesi Yapılarak Arttırılabilen Jeotermal Ekserji Talebi, kW
f	Boru Pürüzlülük Katsayısı
GSE	Jeotermal Kaynak Etkinliği
HPF	Sıcaklık Pikleyen Isı Pompasının Performans Ölçütü (Eşitlik 15)
H	Jeotermal Kuyu Derinliği, m
ID	Kuyu İç Çapı, m
L	Jeotermal Tesis ile Isının Değerlendirildiği Yer Arasındaki Mesafe, m
m, c	Kuyu Derinliğine Bağlı Sıcaklık Eğrisinin Katsayıları (Eşitlik 2)
P	Pompa (Fan) Gücü, kW
\dot{Q}	Jeotermal Isıl Gücü, kW
T	Sıcaklık, K
t	Zaman Ekseni (Şekil 7), yıl
T_o	Sığ Jeotermal Kuyudaki Sıcaklık, K
V	Akışkan Hızı, m/s
w	Boruda Basınç Kayıp Katsayısı (Eşitlik 23), $\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$
X_{HP}	Dönüş ve Gidiş Su Sıcaklık Oranı
<u>Yunan Simgeleri</u>	
α, β, γ	Gömülü CO ₂ Katsayıları (Şekil 7)
η	1. Yasa Verimi
ρ	Akışkan Yoğunluğu, kg/m^3
Δ	Fark
<u>Alt Simgeler</u>	
D	Bölge Enerji Sistemi (District)
E	Elektrik Gücü
EX	Ekserji
f	Santral Çıkışı
H	Isıl Güç
HE	Isı Değiştirici
m	Motor
max	En Fazla
min	En Az
net	Net
opt	Optimum (En iyi) Değer
orc	Organik Rankin Çevrimi
p	Pompa
ref	Referans Çevre
sup	Arz Edilen Isı Sıcaklığı, K
<u>Kısaltmalar</u>	
API	American Petroleum Institute



BIG	Beraber Isı ve Güç Piyasa Yönetmeliği
ESP	Electric Submersible Pump
EPİAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
ETIP-DG	European Technology and Innovation Platform-Deep Geothermal
GR	Gama Işını
LowEx	Düşük Ekserjili (Bina)
NCG	Yoğuşturulamayan Gaz
ORC	Organik Rankin Çevrimi

ÖZGEÇMİŞLER

Nil ÖZSANCAK

1982 yılında Ankara da doğdu. Ankara Üniversitesi Jeoloji Müh. Bölümünden 2006 yılında mezun oldu. 2006-2015 yılları arasında Gürış İnşaat ve Mühendislik A.Ş. bünyesinde yenilenebilir enerji tesisleri ile ilgili jeotermal, rüzgar ve hidroelektrik enerji üretim tesislerinin teknik, finansal ve izinlendirme süreçlerinin koordinasyonunda görev aldı. Bu süre içerisinde Anadolu Üniversitesi İşletme Lisans eğitimini tamamladı. Başkent Üniversitesi Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programında eğitim almış olup jeotermal enerjinin etkin kullanımı üzerine lisansüstü çalışmalarına devam etmektedir. 2016 yılından bu yana Zorlu Holding çatısı altındaki Zorlu Enerji bünyesinde yer alan enerji projelerinde kıdemli yönetici olarak görevini sürdürmektedir. Uzmanlık konuları yenilenir enerji projelerinde lisans ve izinlendirme süreçleri ile proje finansmanı için teknik danışmanlık konuları olup son dönemlerde ağırlıklı olarak yenilenebilir enerji tesislerinin çevresel etkileri ve emisyon azaltım konularında çalışmaktadır. Women in Geothermal (WING) ve Jeoloji Mühendisleri Odası üyesidir.

Birol KILKIŞ

1949 yılında Ankara da doğdu. ODTÜ Makina Müh. Bölümünden 1970 yılında Yüksek Şeref derecesi ile mezun oldu. 1971-1972 yıllarında TÜBİTAK bursu ile Brüksel von Karman Enstitüsünde akışkanlar mekaniği ve aerodinamik konularında çalışarak şeref derecesi ile mezun oldu. 1973 yılında Y. Lisans ve 1979 yılında Doktora derecelerini aldı. 1981 yılı TÜBİTAK Teşvik Ödülü sahibi Kılış, 1999 da ODTÜ Makine Müh. Bölümü Profesör kadrosundan emekli oldu. 1980'li yıllarda altı adet Isı Pompası TSE Standardı hazırlamıştır. ASHRAE'nin değişik teknik komitelerinde görevlidir. 2003 yılında uluslararası başarılarından dolayı ASHRAE Fellow üyeliğine yükseltilen Kılış 2004 yılında da Distinguished Lecturer seçilmiş, 2008 yılında *Distinguished Service* ve *Exceptional Service* ödülleri almıştır. Green Energy Council üyesi, *Int. Journal of Green Energy* ve *Exergy* Dergilerinin Editörler Kurulu üyesi ve IEA Heat Pump Programı gözlemci üyeliğinde bulunmuştur. Ayrıca ASHRAE El Kitaplarının revizörlüğü yapmaktadır. Yeşil ve sürdürülebilir binalar, karbon dioksit salımları, enerji performansı, ekserji akılcılığı ve bölge enerji sistemleri üzerinde ekserji tabanlı çözümlerini bulunmaktadır. Yeni Nesil Melez Güneş Enerjisi Sistemleri ve Isı Pompaları üzerinde patentleri mevcuttur. Avrupa Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Isıtma ve Soğutma Kurulu (RHC) alt komite ikinci Başkanı olup AB Başkanlığına karbon dioksit azaltımı konusunda raporlar hazırlamaktadır. Türkiye'nin ilk LEED Platin Binasının Mekanik Tasarım Danışmanlığını gerçekleştirmiş olan Kılış, Türk Tesisat Mühendisleri Derneğinin 13. Dönem Yönetim Kurulu Başkanlığında da bulunmuştur.