



DERİN KUYULARA UYGULANABİLECEK YENİ BİR ISIL CEVAP TESTİ (TRT) METODU

A Thermal Response Test Method That Can Be Used In Deeper Boreholes

Murat AYDIN

ÖZET

Dünyanın çoğu bölgesinde olduğu gibi Türkiye’de de fosil yakıtların yan etkileri görülmekte ve bu yakıtların yakılması ile sera etkisi ve hava kirliliği gün geçtikçe daha belirgin olarak hissedilmektedir. Fosil yakıtlar, çoğunlukla ısıtma amaçlı geleneksel ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu geleneksel ısıtma sistemlerine en önemli alternatif olarak Toprak kaynaklı ısı pompaları gösterilmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompaları doğrudan herhangi bir salınımına sebep olmadan, yeraltı ısını kullanarak ısıtma ve soğutma yapabilme kapasitesine sahiptir. Toprak kaynaklı ısıtma ve soğutma sistemleri %40’a varan daha ekonomik ve verimli ısıtma-soğutma yapabilmektedir. Bu nedenle Dünya üzerindeki kullanımı son on yılda dört kat artmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompalarında genelde 200 m den daha sığ kuyular kullanılmakta ve bu kuyuların ısı özelliklerinin belirlenmesinde Isıl Tepki Testi (ITT) kullanılmaktadır.

Son yıllarda, gelişen teknoloji ve artan ihtiyaç ile kuyu derinlikleri de artmaya başlamıştır. Fakat geleneksel ITT metodu kullanımında kuyu derinliği arttıkça hata oranı da artmaktadır. Orta derinlikteki kuyularda ($400 < x < 1000$) geleneksel test metodu yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmada derin kuyularda da kullanılabilecek alternatif bir ITT metodu tanıtılmaktadır. Sabit ısı akısı uygulanarak yapılan geleneksel ITT metodunun aksine bu metotta test için sabit sıcaklık kullanılmaktadır. İçi sıvı dolu olan bir kuyunun veya borunun içine daldırılabilir, ısıtıcı elemanlar ve sıcaklık algılayıcılarından oluşan bir test sondası ile kuyu boyunca veya belirli bir bölge boyunca sıvı sıcaklığı sabit tutulur. Sıvı sıcaklığını sabit tutabilmek için, ısıtıcı elemana karşılık gelen toprak tabakasına bağlı olarak farklı ısı enerjisi uygulamak gerekir ve bu ısı enerjisi yüzeyde bulunan kontrol sistemi ile ölçülür. Sıcaklığın sabit tutulması sıcaklık algılayıcılarının istenen sıcaklığa bağlı olarak ısıtıcı elemanları devreye sokup çıkarması ile gerçekleştirilir. Test süresince uygulanan ısı enerjisi değerinin logaritmik zaman ekseninde değişiminin eğimi kullanılarak, verilen ısıya karşılık gelen katmanın ısı iletim katsayısı elde edilebilmektedir. Bu şekilde her katman için ayrı bir grafik elde edilir ve bu grafiklerden her katmana karşılık gelen ısı iletim katsayısı elde edilmiş olur.

Bu model analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. COMSOL programı yardımı ile sanal ortamda çeşitli parametreler kullanılarak modellemeler yapılmış, metodun doğru çalıştığı gösterilmiştir. En iyi sonucu verebilecek geometrik ve test parametreleri de araştırılmıştır. Metot şu an deneysel doğrulama aşamasındadır. Bu metot, gelecekte derin kuyular kullanan toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin ısı performans hesaplamalarında araştırmacılara, uygulayıcılara ve mühendislere gereken bilgiyi sağlayabilecek kapasitedir.

Anahtar Kelimeler: Toprak Kaynaklı Isı Pompası, Isıl tepki testi, Derin kuyular.

ABSTRACT

For designing of Ground Source Heating Systems (GSHS), Thermal Response Tests (TRT) have been used for a long time. TRTs generally provide a profound basis for the final implementation of a GSHS. With a TRT, the effective thermal conductivity and thermal resistance of a borehole can be obtained. Until today, several TRT types have been introduced as Enhanced GRT, Constant Heat Flux

TRT, Constant temperature TRT, Enhanced GRT and more. These TRT types mainly focus on closed heat exchangers in shallow boreholes. However, recent developments in medium depth drilling technologies make deeper boreholes more economic. Furthermore, methods for obtaining thermal conductivities in deep and open boreholes are progressing. In this study, we introduce a new simple thermal conductivity obtaining method that can be used for deep and open boreholes.

Generally, TRTs are applied with the circulation of water inside pipes or immersing probes in water. In case of water circulation in deep boreholes, different heat flux values will be attributed to different layers. Moreover, by introducing a constant heat flux similar to conventional TRT into water-filled boreholes or water-filled pipes, convective movements of water will occur and thermal conductivities cannot be obtained. However, using immersed probes as a heat source to keep the temperature constant might prevent water convection cells inside a pipe or borehole. In order to keep the water temperature constant along the borehole, application of discrete heat fluxes will be required for different layers. These heat flux values mainly depend on the thermal conductivity values of the layers. Therefore, the thermal conductivity of each layer can be approximated by using the heat flux values obtained from the test. This is investigated in this study and it is shown that thermal conductivities of layers can be obtained by applying a constant temperature test.

Key Words: Ground source heat pump, thermal response test, deep boreholes.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların geleneksel kullanımlarının yol açtığı çevre problemlerinin farkındalığının artması yenilenebilir ısıtma ve soğutma sistemlerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Alan ısıtmalarında en verimli sistemlerden birisi Toprak Kaynaklı Isı Pompaları (TOKIP) olarak gösterilmektedir [1]. Bu nedenle geleneksel ısıtma sistemlerinin dönüşümlerinde en önemli alternatif olarak TOKIP gösterilmektedir. Toprağı kaynak olarak kullanan TOKIP uygulamalarının çeşitli tipleri vardır. Örnek olarak düşey kuyular, yatay toprak ısı değiştiricileri, içi su dolu olan ve su ile ısı alışverişi yapılan kuyular, bina zemininde kullanılan temel kazık ısı değiştiriciler v.b. verilebilir. Bunlar arasında en çok kullanılan ve yaygın olanı düşey kuyulardır. Bu tasarımda bir kapalı boru çevrimi, açılmış bir kuyu içine yerleştirilir, suyun kapalı çevrim içerisinde dolaştırılmasıyla yeraltında depolanmış ısı enerjisi binaya pompalanabilir. Bu sistemler düşey Toprak Kaynaklı Isı Pompası olarak isimlendirilir. Bu tip TOKIP uygulamalarında kuyu derinlikleri 50 ile 200 m arasında değişmektedir [2].

TOKIP'lerde toprakla olan ısı transferi ağırlıklı olarak iletim (conduction) yolu ile gerçekleşir. Fourier'in ısı iletimi denkleminde görülebileceği gibi; $q_n = -k.A.(\partial T/\partial n)$, q_n : ısı akısı, n : ısı transferi yönü, k : ısı iletim katsayısı, A : ısı transferi yönündeki alan, T : sıcaklık; toprakla gerçekleşen ısı transferinin büyüklüğü direkt olarak toprağın ısı iletim katsayısına bağlıdır. Bu nedenle ısı iletim katsayısı, bir kuyudaki ısı transferi için ve güvenilir bir sistem tasarımı için çok önemlidir ve kuyuların ısı iletim katsayılarının tespit edilmesi için birçok metot geliştirilmiştir.

En sık kullanılan metot Isıl Tepki Testidir (ITT) [3, 4, 5]. Bir ITT'de sabit miktarda bir ısı kuyuya belirli bir süre için basılır ve test sonuçlarından kuyunun ısı iletim katsayısı ve ısıl direnci elde edilebilir. Alternatif olarak ısıl özellikler, kuyudaki sıcaklığı sabit tutmak için verilmesi gereken ısı enerjisinin değişiminden de bulunabilir [6, 7].

Fiber optik kabloların kullanılması ısı iletim katsayısının tespit edilmesinde kullanılan diğer bir çözümdür [8], bu metot bazı bölgelerde EGRT (Enhanced Geothermal Response Test) olarak da isimlendirilmektedir. Bu metotta bir fiber optik kablo ve bir bakır kablo kuyu içine monte edilir, sabit ısı enerjisi bakır kablo üzerinden uygulanır. Katmanların ısı iletim katsayıları algılayıcılardan ölçülen sıcaklık değişimleri ile elde edilebilir. Fakat bu metodun uygulaması biraz pahalıdır, fiber optik kablolar geri alınamaz, güç ve derinlikle ilgili sınırlar vardır. Buna rağmen katmanlı ısı iletim katsayısı bilgisi sağlanması fiber optik temelli metotların önemli bir avantajıdır.

Bazı durumlarda, bir gözlem noktasındaki verileri kullanarak ısı iletkenliği belirlemek yeterli olmayabilir. Katmanlı çözüm metodunda diğer katmanların etkisinin alınması gerektiği önceki bir çalışmada gösterilmiştir [9]. Bu grup çalışmasında bir kuyunun katmanlı profili için bir analitik metod önermiştir. Daha sonra bu çözüme başka bir grup yeraltı su etkilerini de eklemiştir [10].

Bunların yanında sondalı bazı çalışmalar da gösterilmiştir. Burkhardt ve diğ. [11] bir sonda ve ölçüm sondasının altına ve üstüne yerleştirilen şişebilir iki merkezleyici kullanılan bir metod göstermişlerdir. Sonda kuyu içerisine yerleştirildiğinde merkezleyiciler şişerek kuyunun çeperlerine dokunmaktadır. Ek olarak yüksek akma dirençli özel sıvılar kullanarak taşınımsal (konvektif) ısı akışları önlenmeye çalışılmıştır. Bu metotta sabit ısı akısı sonda boyunca uygulanır ve ısı iletkenlikleri sıcaklıktaki değişimden ve verilen ısı enerjisinden tespit edilebilir. Bu metod, yüksek akma dirençli özel sıvılar gerektirmesi nedeniyle pahalıdır ve merkezleyiciler nedeniyle yüksek teknolojiye ihtiyaç duyar. Raymond ve Lamarche [12] ise düşük güçlü sonda metodu önermişlerdir. Bu metod kuyuların katmanlı ısı iletkenlik profilini verebilir. Bu metotta suyun konvektif hareketlerini önlemek için delikli diskler kullanılmıştır. Delikler kurulum sırasında sondanın batmasına izin verir fakat suyun konvektif hareketlerine izin vermez. Fakat bu metodun kuyulara uygulanması zor bir iştir. Son zamanlarda “Thermal Scanning Method” (TCM) [13] kuyular için de uygulanabilecek şekilde geliştirilmiştir [14]. Kuyunun yerinde ısı iletkenlik profilini elde etmek için bir sonda geliştirmişlerdir fakat metod çok sığ kuyularda iyi çalışmaktadır fakat normal ve derin kuyular için teknolojik gelişime ihtiyacı vardır.

Son teknolojik gelişmeler TOKIP uygulamalarında kullanılan boruların derinliklerini sürekli olarak arttırmaktadır [15]. Orta derinlikteki kuyular sığ kuyulara kıyasla ısıtmada daha iyi verim ve daha az alan ihtiyacı gibi bazı avantajlara sahiptir. Fakat bu tip derin kuyuların ısı özelliklerinin belirlenmesindeki metodlar yetersizdir. Eğer geleneksel ITT, derin kuyuya suyun boru içerisinde çevrimi şeklinde uygulanırsa kuyu boyunca doğal toprak sıcaklığının farklı olması nedeniyle farklı ısı akısı değerleri ortaya çıkacaktır.

Birkaç çalışma orta derinlikteki kuyular için farklı ısı iletkenlik ölçme metodu tanıtmıştır. İki metod Somerton [16] tarafından verilmiştir. İlk metod ısı iletkenlik değişimini bulmak için jeofiziksel kayıt verilerini kullanır, ikinci metod ise sıcak suyun kuyuya basılması ve ısı yenilenme süresince sıcaklık değerlerinin yorumlanmasına dayanır. Fakat yeraltındaki su akıntıları sonuçları bozabilir ve pratik örneklerine şu anki bilgimize göre karşılaşılmamıştır. Diğer bir metod ise jeotermal ısı akısını kullanır ve katmanlardaki sıcaklık değerlerinden ısı iletkenliğini tahmin etmeye çalışır. Bu metod ayrıca “thermostratigraphic” metod olarak da adlandırılır [17]. Fakat bu metod jeotermal ısı akısının detaylı olarak haritalandığı bölgelerde kullanılabilir ve hata oranı yüksektir.

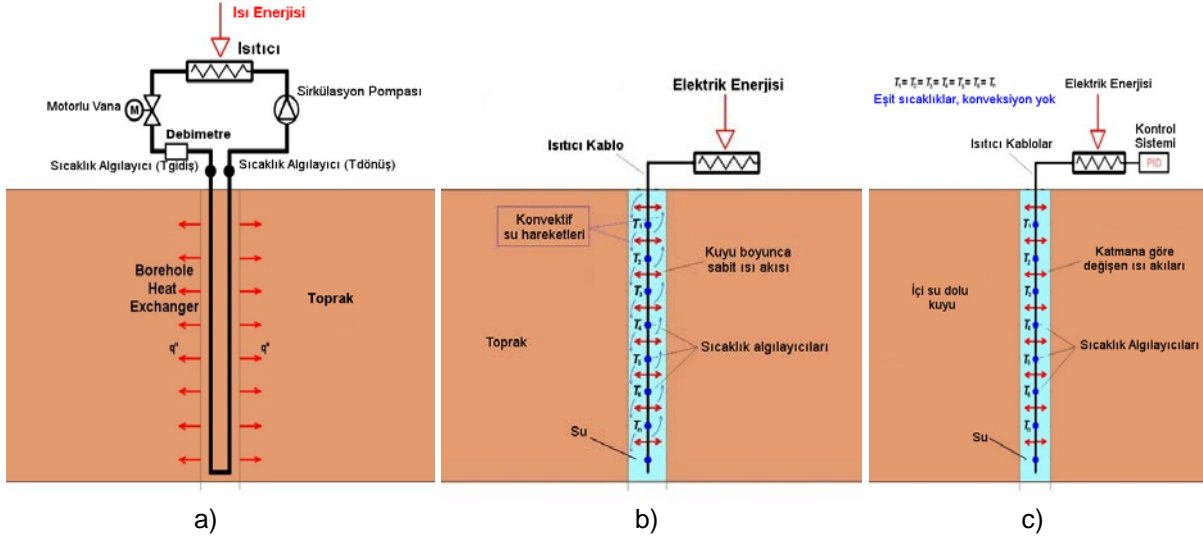
Yukarıda değinilmiş çalışmalar, sonda metodunun ve katmanlı çözümün uygulamasının kolay olduğunu ve kuyu hakkında geleneksel ITT’e göre daha fazla bilgi verdiğini göstermektedir. Ek olarak bir kuyunun uygulama öncesi ısı iletkenlik profilini elde etmek daha ekonomik ve pratiktir. Kuyuların çoğu durgun su içerir veya bir su ile doldurulabilir. Ayrıca, sonda metodunun uygulanmasında en önemli problem, kuyunun içerisindeki konvektif su akışlarıdır. Eğer sabit ısı akısı uygulanırsa farklı katmanlarda farklı sıcaklıklar görülecektir, buradan farklı sıcaklıklar suda konvektif ve kondüktif ısı akışlarına yol açacaktır.

Eğer sonda metodu ile sabit sıcaklık uygulanırsa, kuyu boyunca veya test bölümü boyunca, farklı katmanlara farklı ısı akıları verilmesi gerekecektir. Sabit sıcaklık uygulanınca konvektif su hareketleri görülmeyecektir ve ısı akısı değerlerinden katmanların ısı akıları bulunabilecektir.

Bu çalışmada sabit sıcaklık ITT metodunun yeni bir yaklaşımı tanıtılmıştır. Bu metod sonda metoduna ve katmanlı çözüme benzerdir. Fakat sabit ısı akısı uygulamak yerine bu çalışmada sabit sıcaklık kullanılmıştır. Bu sabit sıcaklık test metodu daha önce kullanılmıştı, fakat önceki metotta sığ kuyularda su çevrimi ile uygulanmıştı. Sabit sıcaklık uygulaması kuyu veya boru içerisinde farklı yerlere yerleştirilmiş basit ısıtıcı elemanlar ve sıcaklık sensörleri ile gerçekleştirilebilir. Burada metodun teorik prensibi ve sayısal doğrulaması verilmiştir. Bu ısı iletkenlik elde etme metodu sığ ve orta derinlikteki kuyularda kullanılabilir.

2. METOT

Geleneksel ITT'lerinin arkasındaki ana fikir belirli bir miktardaki ısının belirli bir süre boyunca kuyuya basılmasıdır. Bu ısı basma işlemi genelde kuyu içerisinde bulunan suyun sirkülasyonu ile sağlanmaktadır (Şekil 1a).



Şekil 1. a) Geleneksel ITT, b) sabit ısı akısı uygulayarak sonda yöntemi ile ısı iletkenlik bulma metodu, c) daldırılabilir sonda ile sabit sıcaklık test metodu.

Sonda metodunda ısıtıcı kablolar sabit ısı enerjisinin verilmesini sağlar. Katmanlardaki sıcaklıktaki değişimleri algılayıcılar vasıtasıyla ısı basma sırasında ve toprağın ısı yenilenmesi süresince kaydedilir. Bu metod kullanılarak farklı katmanların ısı iletkenlik değerleri bulunabilir. Fakat sabit ısı akısı uygulandığında farklı katmanların farklı ısı özellikleri farklı sıcaklıkların oluşmasına yol açacaktır. Su sütunu boyunca görülen bu sıcaklık farklılıkları konvektif su hareketlerine neden olacak bu da sonuçları doğruluğunu bozacaktır. Bu su hareketlerinin önlenmesi için bazı önleyiciler kullanılmıştır. Fakat bunların uygulanması oldukça zordur.

Bu çalışmanın da temelini oluşturan test, sonda ile sabit sıcaklığın uygulanmasıdır (Şekil 1c). Eğer sabit sıcaklık ısıtıcı kablolar ve sıcaklık algılayıcıları ile uygulanırsa konvektif su hareketleri meydana gelmeyecektir. Fakat su sıcaklığını kuyu boyunca sabit tutabilmek için ısı iletkenlik katsayılarına bağlı olarak farklı ısı akıları vermek gerekecektir. Sonda ve kuyu çeperi arasındaki boşluk küçük olacağı için sonda üzerindeki sıcaklık ile kuyu çeperindeki sıcaklık eşit kabul edilebilir. Sıcaklıklardaki bu eşitlik durumunda konvektif su hareketleri olmayacak ve Nusselt sayısı (Nu=1) olacaktır. Yani sonda ile toprak tabakası arasındaki ısı iletimi sadece iletim (konduksiyon) ile gerçekleşecektir. Böylece analiz dolgu basılmış kuyular ile aynı olacaktır [18]. Genel dolgu basılmış kuyularda ısı iletimi ısıtıcı eleman ile kuyu çeperi arasında sadece iletim (konduksiyon) ile gerçekleşmektedir.

Isı denkleminde görülebileceği gibi ısı akısının büyüklüğü ile ısı iletim katsayısı arasında doğrudan bir bağlantı mevcuttur.

$$q'(t) = -2\pi k \left(r \frac{dT}{dr} \right) \quad (1)$$

Burada, T: sıcaklık (K), r: radyal uzaklık, q': birim ısı akısı (W/m), k: ısı iletim katsayısı (W/(m.K)). İç sıcaklığının sabit tutulması durumunda, dairesel bir silindirin etrafındaki bölgede gerçekleşen ısı transferinin ifadesi Carslaw ve Jaeger [19] tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\theta(r, Fo) = \frac{T(r, Fo = \alpha t / r_b^2) - T_\infty}{T_w - T_\infty} = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left\{ e^{-u^2(Fo)} \frac{J_0(r, u) Y_0(u) - Y_0(r, u) J_0(u)}{u(J_0^2(u) + Y_0^2(u))} \right\} du \quad (2)$$

burada α : ısı yayılım katsayısı (m^2/s), t : zaman (s), r_b : kuyu yarıçapı, T_w : akışkan sıcaklığı (K), T_∞ : doğal toprak sıcaklığı, J_0 ve Y_0 sıfırinci derece birinci ve ikinci çeşit Bessel fonksiyonları, u : integrasyon sabitidir. Kuyudaki ısı akısı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir [7]:

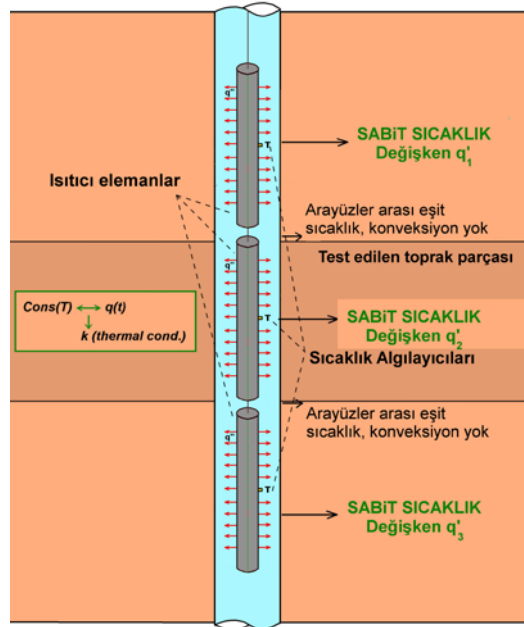
$$\frac{1}{q'(t)} = \frac{1}{4\pi k(T_w - T_\infty)} \left[\ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{e^\gamma r_e^2}\right) \right] \quad (3)$$

burada, γ Euler sabiti, r_e eşdeğer yarıçap ki burada ısı enerjisi verdiği için sondanın yarıçapıdır. Sıcaklığı sabit tutmak için gereken ısı akısını kullanarak katmanın ısı iletim katsayısı bulunabilir. Aynı zamanda denklem 3'ten görülebileceği gibi köşeli parantezin önündeki ifade, logaritmik zaman ölçeğindeki sıcaklık değişimlerinin eğimini göstermektedir. Buradan katmanın ısı iletim katsayısı aşağıdaki gibi de ifade edilebilir:

$$k = \frac{1}{4m\pi(T_w - T_\infty)} \quad (4)$$

burada m eğimi göstermektedir. Bu eğim değeri ısı akısının tersinin logaritmik zaman ölçeğinde değişiminden elde edilebilir. Bir önceki çalışmada [7] bu metot geleneksel su dolaştırılan ITT'leri için kuyunun ortalama ısı iletkenliğinin elde edilebileceği deneysel ve sayısal olarak gösterilmiştir. Buna ilave olarak bu metot ile kuyunun ısı iletkenlik profilinin de elde edilebileceği görülmektedir.

Derin kuyularda, sudaki sıcaklığı sabit tutabilmek için, büyük miktarda ısı enerjisi uygulanması gerekir. Bu nedenle, Burkhardt ve diğ. [11] yaptığına benzer şekilde bölgesel test gerçekleştirilebilir. Şekil 2'de görüldüğü gibi kuyu bir test bölgesi ve alt ve üst bölgelere ayrılmıştır.

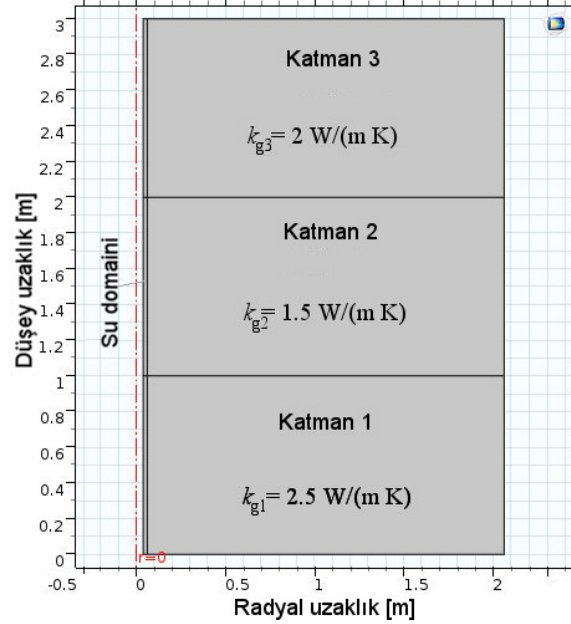


Şekil 2. Daldırılabilir test sondası ile kısmi test.

Her bölge kendi ısıtıcı elemanlarına ve sıcaklık algılayıcılarına sahiptir. Raymond ve Lamarche'in [12] yaklaşımında alt ve üst bölgeleri ayırmak için diskler kullanılmıştır. Burada da benzer şekilde üst ve alt ısıtıcı bölgeler konvektif ısı akışlarını önlemek için kullanılmıştır. Bu nedenle üst ve alt ısı akıları hesaplama işlemlerinde kullanılmayacaktır.

3. SAYISAL MODEL İLE DOĞRULAMA

Modelin doğrulanması için COMSOL Multiphysics [20] sonlu elemanlar modelleme yazılımı kullanılmıştır. Silindirik kuyunun açısız yönünde bir değişim olmadığından 2 Boyutlu aksel simetrik geometri seçilmiştir. İlk durum için domain yüksek derecede farklı ısı özelliklerine sahip üç parçaya bölünmüştür (Şekil 3).



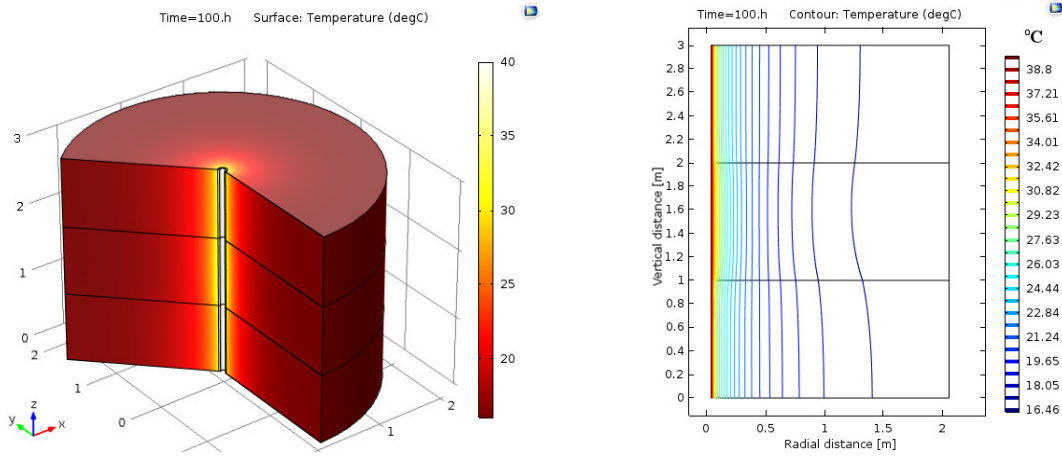
Şekil 3. Doğrulamada kullanılan sayısal modelin 2B aksel görüntüsü. Modelde farklı katmanlar için farklı ısı iletim katsayıları girilmiştir.

Sabit bir sıcaklık sınır koşulu domainin iç kısmında test süresi periyodunca (100 saat) uygulanmıştır. Kullanılan kuyu özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Modelin geometrik ve ısı özellikleri.

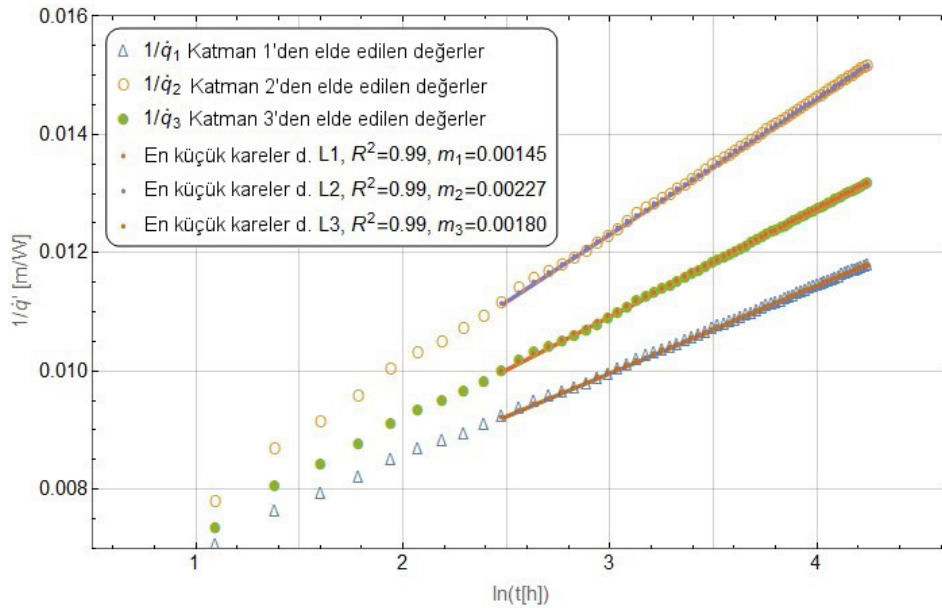
Toprağın ısı özellikleri		Birim
Yoğunluk	ρ_g	2500 kg m ⁻³
Toprağın özel ısı kapasitesi	C_{pg}	900 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Doğal toprak sıcaklığı, ilk sıcaklık	$T_0=T_\infty$	16 °C
Geometrik özellikler		
Kuyu yarıçapı	r_b	0.062 m
Sonda yarıçapı	r_p	0.040 m
Modelin dış yarıçapı	r_{out}	2 m
Kuyunun derinliği	H_{BH}	450 m
Diğer		
Şekil 3 için test sıcaklığı	T_w	40 °C

Sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesi için modelin dış çapı yeterli genişlikte tutulmuştur. 100 saatlik test için 2 m çapındaki bir toprak domaini yeterli olduğu görülmüştür. Modelde katmanların kalınlığı 1 m olarak seçilmiştir. Bütün domainler için dörtgen ağı yapısı seçilmiştir. Model, 1.5 milyon serbestlik derecesine sahiptir ve çözümler normal bir bilgisayar ile (Intel i7 4510 CPU 2.00 GHz 8 GB) yaklaşık 7200 sn de tamamlanmıştır. Hesaplamalar tamamlandıktan sonra elde edilen sıcaklık dağılımı ve sıcaklık konturları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. İç çeperden 100 saat sabit sıcaklık uygulandığında elde edilen sıcaklık dağılımı 3B görünümü. Yüzey sıcaklık konturlarının 2B-eksenel simetrik görünümü.

Sıcaklığı sabit tutabilmek için iç sınırlardan verilmesi gereken ısı akıları Denklem 1 ve COMSOL içerisindeki “heatfluxmagnitudo” ile hesaplanabilir. Modelde her katman kendi özel ısıl özelliklerine sahip olduğu için her katmanın ısı akısı iç sınırdaki ortalama değerden hesaplanabilir. Elde edilen ısı akılarının tersleri Şekil 5’te logaritmik zaman ekseninde gösterilmiştir. Modelden elde edilen ısı akısı değerleri en iyi karşılık gelen doğrular şeklinde görülebilir. En iyi karşılık gelen doğruları bulma işlemi geleneksel ITT’de olduğu gibi 12 saatten sonraki verileri kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bütün katmanlardan görülebileceği gibi zaman arttıkça sonuçlar arasında daha iyi uyum gözükmemektedir.



Şekil 5. Logaritmik zaman ekseninde $1/q_n$ dağılımları ve en iyi karşılık gelen doğrular.

Sayısal çözümden ve en iyi karşılık gelen doğruları bulma işleminde elde edilen değerler kullanılarak her katmanın ısıl iletkenlik katsayısı bulunabilir. Hesaplanan değerler girilen ısıl iletkenlik değerleri Tablo 2’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Sayısal modelde kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar.

Katman	T_w	T_∞	m	$k_{girilen}$	$k_{sonuç}$	% fark
	°C	°C		$Wm^{-1}K^{-1}$	$Wm^{-1}K^{-1}$	
1	40	16	0.00145	2.50	2.29	8.5
2	“	“	0.00227	1.50	1.46	2.6
3	“	“	0.00180	2.00	1.84	7.9

Girilen ısı iletkenlik değerleri ile sonuç olarak elde edilen değerler arasında farklılık %3-8.5 arasındadır. Bu farklılık incelenen katmanın alt ve üstünde bulunan komşu katmanların etkisinden kaynaklanmaktadır. Katmanların farklı ısı iletkenlik değerleri farklı sıcaklık değerlerinin oluşmasına yol açmakta bu sıcaklık farklılıkları da katmanlar arasında ısı geçişine neden olmaktadır. Kuyu ısı iletkenlik profilinde bu kadar farklılaşma nadir olarak görüldüğü ve katman boyunun büyütülmesi ile bu olay azalacağı için elde edilen sonuçlar test işlemlerinde kullanılabilirliği söylenebilir.

SONUÇ

Geleneksel ITT'de kuyuya verilen ısı akısı test boyunca sabit tutulur sıcaklık değişir, fakat sabit sıcaklık testinde sıcaklık sabit tutulur ve ısı akısı değişir. Diğerlerine ilave olarak sabit sıcaklık testinin önemli bir diğer avantajı da durgun suya sabit sıcaklık uygulandığında konvektif su hareketleri görülmemesidir. Bu metot sığ kuyulara olduğu gibi derin kuyulara da uygulanabilir. Ayrıca kuyunun tamamı test edilebileceği gibi kuyunun bir bölümü de test edilebilir. Test işleminde ayrıca kuyunun doğal sıcaklık profili de önemlidir ve test sondası indirildikten hemen sonra ölçme işlemi başlatılır. Test süresince ve test sonrası ısı yenilenme süresince veriler kaydedilir.

Test metodu kuyu veya boru boyunca su sıcaklığının sabit tutulmasına dayanır. Bu işlem katmanlara karşılık gelen farklı ısı akılarının uygulanması ile gerçekleştirilebilir. Bu metot burada sayısal modelleme ile doğrulaması yapılmıştır. Bir toprak parçası üç katmana ayrılmış farklı ısı iletkenlik değerleri verilmiş daha sonra iç sınırdan sabit sıcaklık koşulu ile test simüle edilmiştir. Sıcaklığı sabit tutmak için verilmesi gereken ısı akılarından tekrar ısı iletkenlik değerleri hesaplatılmıştır. Elde edilen sonuçlar ilk sonuçlarla karşılaştırılmış ve yeterli doğrulukta olduğu bulunmuştur.

Bu metot içi su dolu kuyu veya borulara uygulanabilir, kuyunun veya borunun genişliğine göre istenilen miktarda kablo ve katmana bölünebilir. Ayrıca U-borular ve eş-eksenli borular için de kullanılabilir.

Sonuç olarak burada teorik ve sayısal olarak sabit sıcaklık testi ile kuyu profilinin çıkartılabileceği gösterilmiştir. Devam eden bu çalışmanın ileriki aşamalarında, kuyu çapı, katman yüksekliği, sonda ölçülerin vb. sonuçlara etkilerini gösteren hassasiyet analizi yapılacak ve deneysel doğrulama aşamasına geçilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] USEPA: Energy Star Program, United States Environmental Protection Agency. Heating and cooling geothermal heat pumps, <http://www.energystar.gov> , 2008.
- [2] Sapinska-Sliwa, A., Rosen, M.A., Gonet, A., and Sliwa, T.: Deep Borehole Heat Exchangers - A Conceptual and Comparative Review, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 24, 1, 1630001, 2016.
- [3] Mogensen P.: Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages, in: Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Stockholm, Sweden, 652–657, 1983.

- [4] Gehlin S.: Thermal Response Test: Method Development and Evaluation, Ph.D. thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2002.
- [5] Witte, H.J.L.: In situ estimation of ground thermal properties, in: Advances in ground-source heat pump systems, Editor: Simon J. Rees, Woodhead Publishing, Cambridge, 97-116, 2016.
- [6] Wang, H., Qi, C., Du, H., and Gu, J.: Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system, Renewable Energy, 35, 727-733, 2010.
- [7] M. Aydin, M. Onur and A. Sisman, "A new method for analysis of constant temperature thermal response tests" Geothermics, 78, pp.1-8, 2019.
- [8] Fujii, H., Okubo, H., Nishi, K., Itoi, R., Ohya, K., and Shibata, K.: An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. Geothermics 38, 399-406, 2009.
- [9] Abdelaziz, S. L., Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., and Martin II, J. R.: Multilayer finite line source model for vertical heat exchangers, Geothermics 51, 406-416, 2014.
- [10] Erol, S. and François, B.: Multilayer analytical model for vertical ground heat exchanger with groundwater flow, Geothermics, 71, 294-305, 2018.
- [11] Burkhardt, H., Honarmand, H., and Pribnow, D.: Test measurements with a new thermal conductivity borehole tool, Tectonophysics, 244, 161-165, 1995.
- [12] Raymond, J. and Lamarche, L.: Development and numerical validation of a novel thermal response test with a low power source, Geothermics, 51, 434-444, 2014.
- [13] Popov, Yu A., 1997. Optical scanning technology for nondestructive contactless measurements of thermal conductivity and diffusivity of solid matters. In: Giot, M., Mayinger, M., Celata, G.P. (Eds.), Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Edizioni ETC, Brussels, pp. 109-116.
- [14] Sauer, D., Wagner, S., Amro, M., Popov, Y., Rose, F., Schramm, A., Börner, E., Wünsch, T., Redondo-Robles, H., Hesse, G., Pfeiffer, J.: Development of a new borehole probe for thermal conductivity scanning, Geothermics, 67, 95-101, 2017.
- [15] Gehlin S. and Andersson, O.: State of the Art: Sweden, Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems, Sweden, 2018.
- [16] Somerton, W.H.: Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems, Elsevier, New York, USA, 1992.
- [17] Beck, A.E., 1976. The use of thermal resistivity logs in stratigraphic correlation. Geophysics 41, 300-309.
- [18] Javed S. and Spitler J.D.: Calculation of borehole thermal resistance, in: Advances in ground-source heat pump systems, Editor: Simon J. Rees, Woodhead Publishing, Cambridge, 63-96, 2016.
- [19] Carslaw H. S., and Jaeger J. C. (2.Ed): Conduction of Heat in solids. Clarendon Press, Oxford, UK, 1959.
- [20] COMSOL AB, COMSOL Version 5.2a, COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Murat AYDIN

1979 yılı İstanbul doğumludur. 2002 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsünden 2007 yılında yüksek mühendis ve 2015 yılında Doktor unvanını almıştır. Aynı üniversitede 2011-2017 Yılları arasında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. Şu an Bochum Üniversitesi Uygulamalı Bilimler'e bağlı Uluslararası Jeotermal Merkezi'nde (GZB) doktora sonrası araştırmasına devam etmektedir. Isıl tepki testleri, ısı pompası, ısıtma kuyuları ve ısı geçişi konularında çalışmaktadır.