



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **SABİT SICAKLIKLI ISIL TEPKİ TESTLERİ İÇİN YENİ BİR UYGULAMA METODU**

**MURAT AYDIN  
ALTUĞ ŞİŞMAN  
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**MUSTAFA ONUR  
TULSA ÜNİVERSİTESİ**

# SABİT SICAKLIKLI ISIL TEPKİ TESTLERİ İÇİN YENİ BİR UYGULAMA METODU

*A New Application Method for Constant Temperature Thermal Response Tests*

**Murat AYDIN**  
**Mustafa ONUR**  
**Altuğ ŞİŞMAN**

## ÖZET

Toprak kaynaklı ısı pompası uygulamalarında toprağın ısı özelliklerinin bilinmesi, gerçekçi bir sistem tasarımı ve uzun süreli performans öngörülerini için kritik bir önem taşımaktadır. Bu amaçla sabit ısı akısı ya da sabit sıcaklıklı Isıl Tepki Testleri (ITT) uygulanmaktadır. Öte yandan sabit sıcaklıklı ITT, ısı akısı test yöntemine göre daha yüksek doğrulukta öngörü, görece kısa test süresi ve ısı pompası performans testleri ile uyumluluk gibi bazı avantajlara sahiptir. Bu çalışmada, toprağın ısı özelliklerini öngörmek amacıyla sabit sıcaklıklı ITT'i için analitik bir yöntem geliştirilmiştir. Bir ısı kuyusu için ısı denkleminin Laplace dönüşümü yardımıyla analitik çözümü yapılarak ısı kuyusunun birim uzunluğu başına ısı geçiş gücü (W/m) analitik olarak belirlenmiştir. Birim ısı geçiş gücünün tersinin (m/W) logaritmik zaman değeri ile değişimi için elde edilen analitik ifade, toprağın ısı iletkenlik ve difüzyon katsayısı değerlerinin öngörülmesi için deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin avantajı; toprağın ısı kapasitesi için bir ön tahminde bulunmayı gerektirmeksizin birim ısı geçiş gücünün tersi ile zamanın logaritması arasındaki doğrusal ilişkinin eğiminden hareketle doğrudan toprağın ısı iletkenlik katsayısının hesaplanabilmesine olanak vermesidir. Bu sayede, ısı kapasitesi ile ilgili yanlış ön tahminlerden kaynaklanan hataları ortadan kaldırmaktadır. Bu yöntem, farklı test sıcaklıklarında elde edilmiş farklı deneysel verilere uygulanmış ve sonuçlar diğer yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum görülmüştür. Geliştirilen bu yöntem, ısı kuyularının yüksek doğrulukta ve uzun süreli ısı performans tahminleri için kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Isıl Tepki Testi, Toprak kaynaklı ısı pompası, Isıtma kuyuları.

## ABSTRACT

In ground source heat pump (GSHP) applications, determination of thermal properties such as thermal conductivity and diffusivity of ground is essential to make a reliable long term performance predictions of boreholes and system design. Constant heat-flux or constant-temperature thermal response tests (TRT) is used to determine ground's thermal properties. Constant-temperature TRT has some advantages over the constant heat-flux TRT due to its more accurate prediction, shorter test duration and compatibility with heat pump performance tests. In this study, an analytical method is developed for analyzing constant-temperature TRTs to estimate thermal properties of a ground system of interest. Analytical solution of heat equation for a borehole is obtained based on Laplace transformation, and heat transfer rate per unit borehole length (unit HTR) is analytically determined. Analytical expression for the variation of inverse unit HTR value with logarithm of time is fitted to experimental data to estimate thermal conductivity and diffusivity of ground. The advantage of this method is to allow for determining thermal conductivity directly from the slope of logarithmic time dependency of inverse unit HTR value without making an estimation for heat capacity. Therefore, errors based on incorrect estimation of heat capacity can be eliminated. The method is applied for different experimental data based on different test temperatures, and the results are compared with those of other methods. A very good agreement between the results is obtained. The method can be used to make more precise long term thermal performance predictions of boreholes.

**Key Words:** Thermal response test; Ground source heat pumps, Borehole heat exchangers.

## 1. GİRİŞ

Ülkemiz toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmı ısıtma ve soğutma için kullanılmaktadır. Ülkemizde yaygın olarak çoğu ithal kaynaklara dayalı fosil yakıtlı ısıtma sistemleri ve dış hava ile ısı alışverişi yaparak elektrik tahrikli kompresörle çalışan soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Ülkemizin yüksek enerji ithalatı nedeniyle verimi yüksek ısıtma soğutma sistemlerine ihtiyacı oldukça fazladır. Yukarıda belirtilen geleneksel ısıtma soğutma sistemlerine alternatif olarak aynı sistemle hem ısıtma hem de soğutma yapabilen ve ısı alışverişini toprakla yapan toprak kaynaklı ısı pompaları en önemli alternatif sistemlerden biridir. Bu sistemlerin en yakın rakibi olan hava kaynaklı ısı pompalarından ısıtma ve soğutma da sırasıyla %43 ve %37 daha verimlidir [1]. Enerji Bakanlığı raporuna göre ısıtma amaçlı açılan kuyuların sayısı son on yılda üç katı artmış [2] ve önceki yıllarda fizibilitesinin düşüklüğünden dolayı uygulama alanının dar olan bu sistemlerin kullanım sayıları, sondaj teknolojilerinin gelişmesi ve cihaz fiyatlarının yerli olarak da üretiminin gündeme gelmesi nedeniyle artışa geçmiştir.

Toprak kaynaklı ısı pompalarının performansını belirleyen en kritik bileşeni ısı alışverişinin yapıldığı toprak altı kuyulardır. Kuyuların iyi planlanmaması ileride kapasite yetersizliği veya ilk yatırımda yüksek maliyet gibi durumlara yol açabilmektedir. Bu amaçla uygulama öncesi kuyularda Isıl Tepki Testleri (ITT) yapılmaktadır. ITT'lerin kapasiteyi doğru verebilecek şekilde yapılması ve sonuçların iyi yorumlanması oldukça önemlidir.

Geleneksel olarak 20 yıldan uzun süredir yapılan bu testlerde kuyu içerisine sabit bir ısı akısı uygulanarak kuyu içerisindeki gidiş dönüş borularının sıcaklıklarının değerlerine göre toprağın ısı iletkenlik değeri bulunur. Bu yöntem Lord Kelvin'in [3] çizgi kaynak yöntemine göre yapılmaktadır.

Çizgi kaynak yöntemine ek olarak Ingersoll [4] tarafından önerilen ve Kavanaugh & Rafferty [5] tarafından kuyular için kullanılan silindirik kaynak yöntemi ve bunlara ilave olarak Yavuztürk [6], Signorelli 2007 [7], Özüdoğru 2014, [8] tarafından geliştirilen sayısal yöntemler vardır. Gehlin [2003] [9] silindirik kaynak metodunun daha yüksek ısı iletkenlik sonuçları verdiğini belirtse de daha sonra Philippe [2009] [10] silindirik ve çizgi kaynak metodları arasında bir uyum olduğunu göstermiştir. Fakat sonraki yıllarda [2013] [11] farklı bir çalışmada silindirik kaynak metodu ile daha yüksek sonuçlar elde etmiştir. Sonuçların farklılık göstermesi kuyu çaplarına test sürelerine vb. bağlı olarak değişmektedir. Geniş kuyularda silindirik kaynak metodunun daha iyi sonuç vermesi daha dar kuyularda uzun süreli testlerde çizgi kaynak metodunun doğru sonuçlar vermesi beklenen sonuçlardır.

Sabit ısı akısına ilişkin testler ile ilgili geniş bilgi [12-16] kaynaklarından bulunabilir. Bu güne kadar binlerce test yapılmış ve yapılan testlerde ısı akısının sabit tutulamaması vb. problemlerle karşılaşmıştır. Bu yöntemin tahminlerinin uzun süreli analizlerini yapan bir çalışma ile de henüz karşılaşılmamıştır. Bu gibi problemler ve eksiklikler nedeniyle yeni test metodları araştırmaları devam etmektedir.

Isı akısının yerine gidiş suyu sıcaklığının sabit tutulması daha kolay olmakta (ısı akısı testi sırasında debi, gidiş ve dönüş sıcaklık değerleri sabit tutulur) ve sabit sıcaklıkla yapılan testler ısı pompası testleri ile uyumlu olmaktadır.

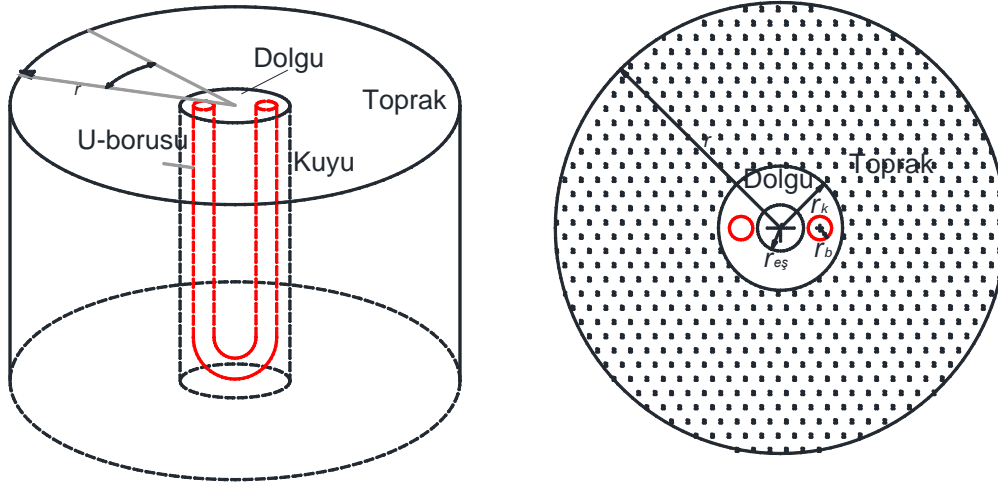
Sabit sıcaklıkta ITT ilk olarak Wang [17] tarafından denenmiş daha sonra Aydın [18] tarafından geliştirilmiştir. Sabit sıcaklıkta su gönderilen bir kuyuda belli bir süre sonra eşdeğer boru bölgesinde ve bir süre sonra da kuyu çeperindeki sıcaklık değişimleri çok azalmakta sensörlerin ölçüm hassasiyetlerinin altına düşmekte ve sabit kabul edilebilecek duruma gelmektedir. Kuyunun (veya eşdeğer borunun) silindirik bir kaynak olarak düşünülerek sıcaklık dağılımı veren denklemler ilk olarak Carslaw & Jeager [19] tarafından verilmiştir. Laplace dönüşümü ile çözüm çalışmaları ise Bandyopadhyay [20] [2008] ve Beier [2014] [21] tarafından denenmiştir.

Çözümlemede kullanılan modeller ancak belli şartlar altında doğru sonuç verebilmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompalarında çok farklı kuyu uygulamaları ile karşılaşılabilir. Kuyu içerisinde tek U'dan çift U'ya hatta üç U [22] uygulamalarının yanında eş-eksenli [23] karmaşık eş-eksenli [24], temel kazık uygulamalarında daha sığ daha geniş kuyular kullanılmaktadır. Çok U'lu kuyular ve temel kazık uygulamaları genel olarak geniş çaplı olmakta ve çizgi kaynak için uygun olmamaktadır. Yerine silindirik kaynak metodu daha iyi sonuçlar verebilmektedir [25]. Ayrıca kuyunun derinliği arttıkça başlangıçta kabul edilen doğal toprak sıcaklığı eksen boyunca değişmekte ve sonuçlardaki farklılığın artması beklenmektedir.

Bu çalışmada; sabit sıcaklıklı silindirik kaynak olarak temsil edilen kuyuların ısı iletimi probleminin analitik çözümünde Laplace metodunu takiben ters Laplace dönüşümünde yaklaşık metodlar kullanılarak sabit sıcaklıkta yapılan ısıl tepki testleri için bir uygulama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde sıcaklık sabit tutularak yapılan test boyunca gerçekleşen birim uzunluktaki ısı geçişinin tersinin logaritmik zamandaki değişiminin eğimi kullanılarak ısıl iletkenlik değeri ve bu doğrusal değişimin  $t=1$  anındaki (birimden bağımsız olarak) değeri yardımıyla ısıl difüzyon katsayısı bulunabilmektedir. Geliştirilen bu metod farklı tipteki kuyularda denenerek elde edilen sonuçlar sayısal metod ve geleneksel ısı akısı metodları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. SABİT SICAKLIKTAKI İTT İÇİN ANALİTİK MODEL

Şekil 1'de gösterildiği gibi eşdeğer yarıçapı  $r_e$  olan bir kuyu içerisine sabit sıcaklıkta akışkan gönderildiğinde Başlangıç Sınır Değer Problemi (BSDP) şu şekilde olacaktır:



Şekil 1: Örnek bir ısıtma kuyusu.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

$$T(r, t = 0) = T_{\infty}, \quad (2)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T(r, t) = T_{\infty}, \quad (3)$$

ve

$$T(r = r_e, t) = \bar{T}_{wf} = \text{sabit}, \quad (4)$$

BSDP'nin çözümünü basitleştirmek için aşağıda verilen boyutsuz değişkenleri kullanabiliriz:

$$\theta(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_{wf} - T_\infty}, \quad (5)$$

$$\tilde{r} = \frac{r}{r_e}, \quad (6)$$

$$\tilde{t} = \alpha \frac{t}{(r_e)^2}, \quad (7)$$

Burada kullanılan boyutsuz ifadelerle denklem takımı homojen başlangıç koşuluna sahip olur. Böylece homojen başlangıç koşulunda Laplace dönüşümü ile çözüm elde etmek kolaylaşır.

Denklem 5-7'deki boyutsuz ifadeleri Denklem 1-4'te kullanırsak BSDP şu hâle gelir:

$$\frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left( \tilde{r} \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{t}}, \quad (8)$$

$$\theta(\tilde{r}, \tilde{t} = 0) = 0, \quad (9)$$

$$\lim_{\tilde{r} \rightarrow \infty} \theta(\tilde{r}, \tilde{t}) = 0, \quad (10)$$

ve

$$\theta(\tilde{r} = 1, \tilde{t}) = 1, \quad (11)$$

BSDP'nin çözümü için Laplace dönüşümünü uygulayabiliriz. Denklem 8'in Laplace dönüşümünü alıp Denklem 9'da verilen başlangıç koşulunu uygularsak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{1}{\tilde{r}} \frac{d}{d\tilde{r}} \left( \tilde{r} \frac{d\hat{\theta}}{d\tilde{r}} \right) - s\hat{\theta} = 0, \quad (12)$$

Burada  $\hat{\theta}$ ,  $\theta(\tilde{r}, \tilde{t})$ 'nin Laplace dönüşümü olup bilindiği üzere şu şekilde tanımlanır:

$$\hat{\theta}(\tilde{r}, s) = \int_0^\infty e^{-s\tilde{t}} \theta(\tilde{r}, \tilde{t}) d\tilde{t}, \quad (13)$$

Burada s Laplace dönüşüm değişkenidir. Denklem 12, sıfırinci derece değiştirilmiş Bessel denklemidir ve genel çözümü:

$$\hat{\theta}(\tilde{r}, s) = AK_0(\sqrt{s}\tilde{r}) + BI_0(\sqrt{s}\tilde{r}), \quad (14)$$

şeklinde verilebilir. Denklem 10'da verilen sınır koşulu Laplace dönüşümü alınarak kullanılırsa Denklem 14'in sabitlerinden biri elde edilebilir:

$$\lim_{\tilde{r} \rightarrow \infty} \hat{\theta}(\tilde{r}, \tilde{t}) = A \lim_{\tilde{r} \rightarrow \infty} K_0(\sqrt{s}\tilde{r}) + B \lim_{\tilde{r} \rightarrow \infty} I_0(\sqrt{s}\tilde{r}) = 0, \quad (15)$$

$\tilde{r}$  sonsuza yaklaşırken  $K_0$  sıfıra,  $I_0$  ise sonsuza yaklaşır. Buradan kolayca  $B=0$  olduğu bulunur. Bu durumda Denklem 14 şu şekilde kısaltılabilir:

$$\hat{\theta}(\tilde{r}, \tilde{t}) = AK_0(\sqrt{s}\tilde{r}), \quad (16)$$

Denklem 16'daki A sabitini bulmak için ise Denklem 11'deki sınır koşulu Laplace dönüşümü alındıktan sonra kullanılır:

$$\hat{\theta}(\tilde{r} = 1, \tilde{t}) = AK_0(\sqrt{s}) = \frac{1}{s}, \quad (17)$$

A için çözüm:

$$A = \frac{1}{sK_0(\sqrt{s})}, \quad (18)$$

Denklem 18, Denklem 16'da kullanılırsa:

$$\hat{\theta}(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{K_0(\sqrt{s}\tilde{r})}{sK_0(\sqrt{s})}, \quad (19)$$

Denklem 19'da verilen ifadenin ters Laplace'ı tablolarda bulunmayabilir, fakat kompleks hat boyunca integralinin alındığı kompleks ters integral formülü ile bulunabilir [26]. Buradan Denklem 19'un tersi

$$\theta(\tilde{r}, \tilde{t}) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \exp(-u^2 \tilde{t}) \frac{J_0(\tilde{r}u)Y_0(u) - Y_0(\tilde{r}u)J_0(u)}{u[J_0^2(u) + Y_0^2(u)]} \right\} du, \quad (20)$$

olarak elde edilir. Birim kuyu boyunca ısı geçiş oranı ise şu şekilde verilir:

$$q'(t) = -2\pi k \left( r \frac{dT}{dr} \right)_{r=r_e}. \quad (21)$$

Isı geçişi boyutsuz formda aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\tilde{q}'(\tilde{t}) = \frac{q'(t)}{2\pi k(\bar{T}_{wf} - T_{\infty})}. \quad (22)$$

Boyutsuz sıcaklık (Denk. 5), radyal uzaklık (Denk. 6) ve Denk. 22, Denklem 21'de kullanılırsa:

$$2\pi k(\bar{T}_{wf} - T_{\infty})\tilde{q}'(\tilde{t}) = -2\pi k(\bar{T}_{wf} - T_{\infty}) \left( \tilde{r} \frac{d\theta}{d\tilde{r}} \right)_{\tilde{r}=1}, \quad (23)$$

veya

$$\tilde{q}'(\tilde{t}) = \frac{q'(\tilde{t})}{2\pi k(\bar{T}_{wf} - T_{\infty})} = - \left( \tilde{r} \frac{d\theta}{d\tilde{r}} \right)_{\tilde{r}=1}, \quad (24)$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Denklem 24'in Laplace dönüşümü alınır:

$$\hat{\tilde{q}}'(s) = - \left( \tilde{r} \frac{d\hat{\theta}}{d\tilde{r}} \right)_{\tilde{r}=1}, \quad (25)$$

elde edilir. Denklem 19'un  $\tilde{r}$ 'ya göre türevi alınır:

$$\frac{d\hat{\theta}}{d\tilde{r}}(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{-\sqrt{s}K_1(\sqrt{s}\tilde{r})}{sK_0(\sqrt{s})}, \quad (26)$$

bulunur. Denklem 26'yı Denklem 25 içerisinde kullanırsak:

$$\hat{\tilde{q}}'(s) = \frac{\sqrt{s}K_1(\sqrt{s})}{sK_0(\sqrt{s})}, \quad (27)$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Denklem 27'nin uzun zamanlı yaklaşımı bulunmak istenirse s'nin küçük değerleri için birinci ve sıfırıncı derece değiştirilmiş Bessel fonksiyonlarının asimptotik yaklaşımı ile aşağıdaki ifadeler bulunabilir:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \sqrt{s}K_1(\sqrt{s}) = 1, \quad (28)$$

ve

$$K_0(\sqrt{s}) \approx -\ln\left(\frac{e^{\gamma}\sqrt{s}}{2}\right). \quad (29)$$

Denklem 28 ve 29'u Denklem 27 içerisinde kullanırsak s'nin küçük değerleri için:

$$\hat{\tilde{q}}'(s) \approx -\frac{1}{s \ln\left(\frac{e^{\gamma}\sqrt{s}}{2}\right)} \quad (30)$$

elde edilir. Denklem 30'un tersini Schapery yaklaşımı ile bulabiliriz:

$$f(t) \approx [sf(s)]_{s=1/2t}, \quad (31)$$

Najurieta [27] Denklem 31'i logaritmik fonksiyonlar için daha iyi sonuç verebilecek şekilde biraz modifiye etmiştir:

$$f(t) \approx [sf(s)]_{s=1/e^{\gamma}t}, \quad (32)$$

burada  $\gamma=0.5772$  EulerGama sayısıdır. Buradan, Denklem 30'un tersi şu şekilde verilebilir:

$$\tilde{q}'(\tilde{t}) = L^{-1}[\hat{\tilde{q}}'(s)] = -\frac{1}{\ln\left(\frac{e^{\gamma}\sqrt{1/e^{\gamma}\tilde{t}}}{2}\right)} = -\frac{1}{\ln\left(\frac{\sqrt{e^{\gamma}/\tilde{t}}}{2}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{2}\ln\left(\frac{4\tilde{t}}{e^{\gamma}}\right)}, \quad (33)$$

Denklem 33'te verilen uzun zamanlı yaklaşımı gözönüne alırsak aşağıdaki ifadeye ulaşırız:

$$\tilde{q}'(\tilde{t}) = \frac{1}{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{4\tilde{t}}{e^\gamma}\right)}, \quad (34)$$

Denklem 34'ün tersini alırsak:

$$\frac{1}{\tilde{q}'(\tilde{t})} = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4\tilde{t}}{e^\gamma}\right), \quad (35)$$

elde ederiz. Denklem 7 ve 22'de verilen  $\tilde{t}$  ve  $\tilde{q}'(\tilde{t})$  boyutsuz tanımları Denklem 35'te kullanılarak Denklem 33'ün boyutlu halini elde ederiz:

$$\frac{2\pi k(\bar{T}_{wf} - T_\infty)}{q'(t)} = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4\alpha t}{e^\gamma (r_e)^2}\right), \quad (36)$$

Bu ifade  $t > t_c = e^\gamma r_e^2 / 4\alpha$  koşulu için geçerli olup şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$\frac{1}{q'(t)} = \frac{1}{4\pi k(\bar{T}_{wf} - T_\infty)} \left[ \ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{e^\gamma (r_e)^2}\right) \right], \quad (37)$$

Bu denklem,  $1/q'(t) - \ln(t)$  grafiğinin eğimi  $m$  olan doğrusal bir çizgi oluşturacağını gösterir:

$$m = \frac{1}{4\pi k(\bar{T}_{wf} - T_\infty)}, \quad (38)$$

Buradan  $k$  çekilerek ısı iletkenlik değeri bulunur:

$$k = \frac{1}{4\pi m(\bar{T}_{wf} - T_\infty)} \quad (39)$$

veya 10 tabanına göre logaritmik eksende çizdirilirse Denklem 37 şu şekilde olacaktır:

$$\frac{1}{q'(t)} = \frac{2.303}{4\pi k(\bar{T}_{wf} - T_\infty)} \left[ \log(t) + \log\left(\frac{4\alpha}{e^\gamma (r_e)^2}\right) \right], \quad (40)$$

Isıl iletkenlik ise:

$$k = \frac{2.303}{4\pi m(\bar{T}_{wf} - T_\infty)} \quad (41)$$

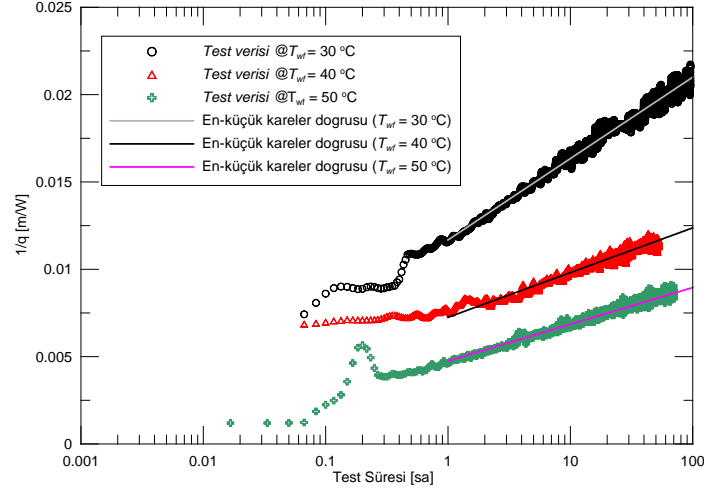
şekilde elde edilir.  $t=1$  anındaki (birimi önemli değil) değeri ise şu şekildedir:

$$a = \left[ \frac{1}{q'(t)} \right]_{t=1} = m \log\left(\frac{4\alpha}{e^\gamma (r_e)^2}\right) \quad (42)$$

Buradan  $\alpha$  kolaylıkla aşağıdaki gibi  $t=1$  anının birimi (sn, dk, sa, g) cinsinden bulunabilir:

$$\alpha = \frac{e^\gamma (r_e)^2 10^{a/m}}{4} \quad (43)$$

Örnek olarak değişik sıcaklıklarda yapılmış üç ayrı testi Denklem 40'a uygularsak Şekil 2'deki gibi bir grafik elde ederiz.



**Şekil 2.** Örnek bir kuyuda  $1/q'$  değerinin ortalama su sıcaklığının sabit kaldığı farklı sıcaklık değerleri için gözlenen ısı geçişi tersinin logaritmik zamandaki değişimleri ve bu değişimlere uzun test zamanlarında en iyi uyan (en-küçük kareler) doğrularını.

Düşey eksen kuyuda gerçekleşen birim ısı geçişinin tersini, yatay eksen ise 10 tabanına göre logaritmik zamanı göstermektedir. Her test için en düşük kareler yöntemi uygulanarak en iyi uyan doğru elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 1'de özet olarak gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Örnek kuyudaki test verilerinin Denklem 40'a uygulanması ile elde edilen sonuçlar.

Test No	Gidiş Su Sıcaklığı	Ortalama Sıcaklık $\bar{T}_{wf}$	Eğim m	Efektif ısı iletkenlik (Denklem 41'den)	Regresyon katsayısı $R^2$
	[°C]	[°C]	[m/W]	[W/(mK)]	
1	30	28.7	$4.66 \times 10^{-3}$	3.096	0.963
2	40	37.7	$2.56 \times 10^{-3}$	3.297	0.894
3	50	46.6	$2.13 \times 10^{-3}$	2.808	0.971

### 3. FARKLI TİP KUYULARDA SONUÇLARIN İNCELENMESİ

Deneysel sonuçların verildiği Aydın'ın doktora çalışmasında [18] verilen farklı kuyulara bu yöntem uygulanırsa Tablo 2'de verilen sonuçlar elde edilir. Tablodaki efektif iletkenlik değerlerinin elde edilmesinde doğal toprak sıcaklığı  $16^\circ\text{C}$  olarak girilmiştir.

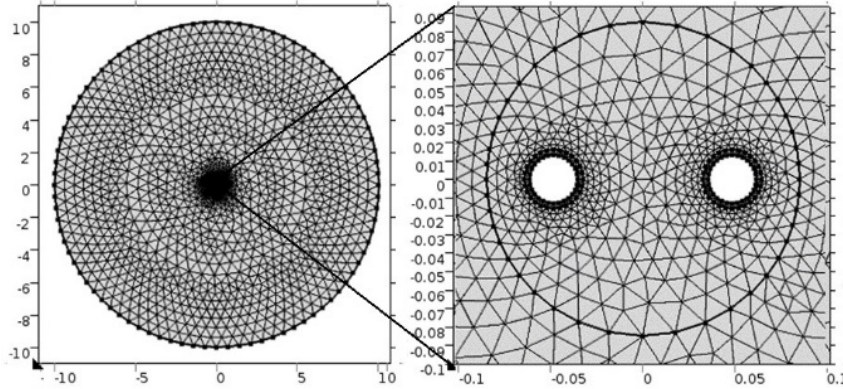
**Tablo 2.** Örnek kuyudaki test verilerinin Denklem 40'a uygulanması ile elde edilen sonuçlar.

Kuyu No	U Borusu Sayısı	Kuyu Derinliği	Kuyu Çapı	U Boru Çapı	Kullanılan Test Süresi	Test Su Sıcaklığı $T_g$	Ortalama Sıcaklık $\bar{T}_{wf}$	Efektif İletkenlik (Denklem 41)
		[m]	[cm]	[mm]	[sa]	[°C]	[°C]	[W/(mK)]
1	1	50	17	32	75	40	37.7	3.3
2	1	50	17	32	236	40	38.7	2.9
3	2	50	17	32	75	40	38.9	3.2
4	1	100	17	32	75	40	36.0	4.1
5	1	50	20	40	75	40	37.4	3.1
6	3	50	20	32	70	40	37.9	3.3



#### 4. SAYISAL DOĞRULAMA

Sonuçları sayısal modelle doğrulamak için Şekil 3’de görüldüğü gibi 2 boyutlu bir model COMSOL ortamında kurulmuştur. COMSOL sonlu elemanlar yöntemine göre mühendislik ve temel bilim problemlerinin denklem takımlarını çözen bir profesyonel yazılımdır, [28]. Dış alan sınırı, sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyeceği kadar büyük seçilmiştir. Toplanmış tüm deney sıcaklık verileri modele zamana bağlı sınır koşulu olarak aktarılmış ve problem sayısal ortamda çözümlenerek elde edilen birim kuyu derinliği başına ısı transfer değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Modelleme işleminde, boru ve dolgu özellikleri modele girilmiş ve en iyi çakıştırmayı elde etmek için toprağın iletkenliği iteratif olarak değiştirilmiştir.



Şekil 3. Sayısal modelde kuyu çevresi ve kuyu detayı.

Kullanılan çözüm alanlarının özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Modelde kuyu çapı ( $r_k$ ) 0.085m, boru dış çapı ( $r_b$ ) 0.016m boru iç çapı 0.0131 m olarak toprak bölgesi çapı ise 10m olarak, boru eksenleri arası 0.097m olarak gerçek kuyuyu temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Tablo 3: Çözüm alanlarının özellikleri

		Toprak	Dolgu	Boru
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup>	2130	1760	959
Isı Kapasitesi	J/kgK	920	900	1900
Isıl İletkenlik	W/mK	-	1.7(Kuyu 3 ve 6 da 0.9)	0.38

#### 5. DİĞER METOTLARLA KARŞILAŞTIRMA

Bu çalışmada Laplace dönüşümü ile elde edilen Onur yönteminin sonuçları, Comsol sayısal yönteminin sonuçları ve Aydın [18] tarafından önerilen yöntemin sonuçlarının yanı sıra sabit ısı akısı geleneksel test uygulamasının sonuçları ile Tablo 4’de karşılaştırılmıştır. Aydın yönteminde kullanılan  $r_{eş}$  (bu yazı da  $r_e$ ) yaklaşımı sadece 1U için olduğu için Tabloda 2U ve 3U sonuçları verilmemiştir. Benzer şekilde sabit ısı akısı testi uygulamadaki bazı problemler nedeni ile sadece Kuyu 1, 4 ve 5’e uygulanabilmiştir.

Comsol modellemesinde bazı modellemelerde borunun ısıl iletkenliği ihmal edilirken bazı modellerde borunun ısıl iletkenliği de hesaba katılmıştır. Tablo 4 üçüncü sütunda verilen ilk değerler borunun ihmal edildiği, parantez içerisindeki ikinci değerler ise borunun ısıl iletkenliğinin de hesaba katıldığı modellerden elde edilen sonuçları ifade etmektedir.

**Tablo 4:** Farklı metotlarla toprağa ait elde edilen ısı iletim katsayısının karşılaştırması.

Kuyu No	Elde Edilen Isıl İletkenlik			
	Sabit Sıcaklık Testi			Sabit Isı Akısı Testi
	Onur Yöntemi (Denklemler 41)	Comsol ile Sayısal Modelleme $k_{dolgu+boru}=1 \text{ W/mK}$ ( $k_{dolgu}=1.7 \text{ W/mK}$ , $k_{boru}=0.38 \text{ W/mK}$ )	Aydın Yöntemi [18] (Multipole $r_{eş}$ ifadesi kullanılarak)	Aynı kuyuda Sabit Isı Akısı Testi ve Çizgi Kaynak Metodu kullanılarak (60W/m ısı akısı ile)
	[W/(mK)]			
1	3.3	3.0 (2.3)	2.3	2.3
2	2.9	3.0 (2.2)	2.2	-
3	3.2	3.1	-	-
4	4.1	3.2 (2.5)	2.5	3.0
5	3.1	3.0 (2.4)	2.4	2.5
6	3.3	3.2	-	-

Sayısal Comsol ortamında elde edilen sonuçları modelin analitik yöntemlere göre daha kapsamlı bir model içermesi nedeniyle yeterli doğrulukta kabul edersek Onur yönteminin Kuyu 4 ve Kuyu 1 haricinde oldukça yakın sonuçlar verdiği söylenebilir. Yakın sonuçlar elde edilen kuyular 2U ve 3U içeren kuyulardır. Bu tip kuyularda kuyu içerisindeki boru adedi fazla olduğu için kuyu içerisinde daha uniform bir sıcaklık dağılımı gözlenir. Uniform sıcaklık dağılımı kuyu kesitinde açılacak daha simetrik bir görüntü verecek sabit sıcaklık yaklaşımına daha çok uyacaktır. Ayrıca yakın sonuç elde edilen Kuyu 2'deki test 236 saatlik testtir. Buradan çok U'lu kuyularda yöntemin çok iyi olduğu ve 1U'lu kuyularda test süresinin uzun tutulması gerektiği söylenebilir. Test süreleri ile ilgili inceleme ayrı bir çalışmanın konusudur. Derin kuyularda  $T_{\infty}$  değerinin kuyu boyunca değişkenliği fazla olacağı için bu değer derinliğe göre yaklaşık doğrusal değişiminin göz önüne alınarak türetimlerin yeniden yapılması gerekir. Buradaki sonuçlardan toprağın ısı yayılım katsayısı da bulunabilir. Fakat öncesinde kuyuda boru, dolgu, kuyu özelliklerine bağlı olarak eşdeğer çapın hesaplanması gerekir. Bu da sonraki bir araştırma konusudur. Eşdeğer çap ile ilgili detaylı bilgi çeşitli kaynaklardan[29-33] bulunabilir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada sabit sıcaklıkta ısı tepki testleri için silindirik kaynak varsayımına dayalı ısı iletim denkleminin Laplace dönüşümü yöntemi ile çözümleri kullanılarak sabit sıcaklıklı ısı tepki testleri için bir model geliştirilmiştir. Geleneksel olarak yapılan testlere benzer şekilde sabit sıcaklıkta yapılan ısı tepki testleri için uygulamada oldukça basit olan önerilmiş bu modelle kuyu içerisinde gerçekleşen birim ısı geçişinin tersinin logaritmik zaman eksenindeki dağılımının doğrusal bir davranış gösterdiği görülmüştür. Bu doğrunun eğimi kullanılarak test yapılan kuyunun çevresindeki toprak yapısının ısı iletim katsayısı elde edilebilmektedir. Logaritmik ekseninde elde edilen doğrunun  $t=1$  anındaki değeri kullanılarak da yapının ısı yayılım katsayısı bulunabilmektedir. Bu yöntemin avantajı ısı iletim katsayısını bulmak için önceden hayali bir eşdeğer çap ve ısı kapasitesi tahmininde bulunmayı gerektirmemesidir. Geliştirilen model farklı modeller ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumluluğu gösterilmiştir.

**KAYNAKLAR**

- [1] Urchueguia, J.F., Zacaes, M., Corberan, J.M., Montero, A., Martos, J., Witte, H. (2008). Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast, *Energy Conversion and Management*, 49, 2917-2923.
- [2] T.C. Enerji Bakanlığı Mavi Kitap, 2015.
- [3] Thomson, W. (Lord Kelvin). (1884). *Mathematical and Physical Papers*, vol. 2. Cambridge University Press, London, UK, pp. 41–60.
- [4] Ingersoll, L.R., Zobel, O.J., Ingersoll, A.C. (1954). *Heat Conduction with Engineering Geological and other Applications*. McGraw-Hill, New York, NY, USA, pp. 325.
- [5] Kavanaugh, S. P. ve Rafferty, K. (1997). *Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- [6] Yavuztürk, C. (1999) Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems. (Doktora Tezi), Oklahoma State University.
- [7] Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., Kohl, T. (2007). Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36,141-166.
- [8] Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., Senol, A. (2014). 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers, *Geothermics*, 51, 312-324.
- [9] S Gehlin, G Hellström, B Nordell, (2003). Comparison of four models for thermal response test evaluation, *ASHRAE transactions* 109 (1), 131-142.
- [10] Philippe, M., Bernier, M., Marchio, D. (2009). Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes, *Geothermics*, 38, 407-413.
- [11] Yu, X., Zhang, Y., Deng, N., Wang, J., Zhang, D., Wang, J. (2013). Thermal response test and numerical analysis based on two models for ground-source heat pump system, *Energy and Buildings*, 66, 657-666.
- [12] *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, Chapter 4, Editor: Simon Rees, Woodhead Publishing 2016.
- [13] *Geothermal Heating and Cooling Design of Ground-Source Heat Pump Systems*, Chapter 3, Steve Kavanaugh, Kevin Rafferty, Ashrae, 2014.
- [14] J.D. Spitler, S.E.A. Gehlin, (2015). Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 1125-1137.
- [15] B Sanner, G Hellström, J.D. Spitler, S. Gehlin (2013). More than 15 years of mobile Thermal Response Test—a summary of experiences and prospects, Proceedings of the European Geothermal Congress.
- [16] Changxing Zhang, Zhanjun Guo, Yufeng Liu, Xiaochun Cong, Donggen Peng, (2014). A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 40, Pages 851-867.
- [17] Wang, H., Qi, C., Du, H., Gu, J. (2010). Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system, *Renewable Energy*, 35, 727–733.
- [18] Aydın, M. Toprak Isı Değiştiricilerinde Yeni Bir Isıl Tepki Yöntemi Ve Performansın Parametrik İncelenmesi, Doktora Tezi, 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [19] Carslaw H. S., ve Jaeger J. C. (1959). *Conduction of Heat in solids*. Clarendon Press, Oxford, UK, (Chapter XIII).
- [20] Bandyopadhyay, G., Gosnold, W., Mann, M. (2008). Analytical and semi-analytical solutions for short-time transient response of ground heat exchangers, *Energy and Buildings*, 40, 1816-1824.
- [21] Beier, R. A. (2014). Transient heat transfer in a U-tube borehole heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, 62, 256-266.
- [22] Aydın, M. ve Sisman, A. (2015). Experimental and computational investigation of multi U-tube boreholes, *Applied Energy*, 145, 163-171.
- [23] Acuña, J. ve Palm, B. (2013). Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers, *Applied Energy*, 109, 312-320.
- [24] Jalaluddin ve Miyara A. (2012). Thermal performance investigation of several types of vertical ground heat exchangers with different operation mode, *Applied Thermal Engineering*, 33-34, 167-174.

- [25] Min, L. ve Lai, A. C. K. (2012). New temperature response functions ( $G$  functions) for pile and borehole ground heat exchangers based on composite-medium line-source theory, *Energy*, Volume 38, Issue 1, February 2012, Pages 255-263
- [26] Churchill, R. V. *Operational Mathematics*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1958.
- [27] Najurieta, L.H. A Theory of Pressure Transient Analysis in Naturally Fractured Reservoirs, *Journal of Petroleum Technology*, Vo. 32, issue 7, 1241-1250, 1980
- [28] COMSOL AB, (2013). COMSOL Version 4.2, COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [29] Bose, J. E. ve Smith, M. D. (1992). Performance of new ground heat exchanger configurations for heat pump, *Solar Engineering* 1.
- [30] Kavanaugh, S. P. ve Rafferty, K. (1997). Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*.
- [31] Hellström, G. (1991). Ground heat storage, *Thermal Analyses of Duct Storage Systems* (Doktora Tezi). Lund: LTH, İsveç.  
Sharqawy, M.H., Mokheimer, E.M., Badr, H.M. (2009). Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers, *Geothermics*, 38, 271–277.
- [32] Lamarche, L. Kaji, Beauchamp B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems, *Geothermics*, 39, 187–200.
- [33] Bennet J, Claesson J, Hellstrom G. (1987). Multipole Method to Compute the Conductive Heat Transfer to and between Pipes in a Composite Cylinder. Notes on Heat Transfer 3-1987. Department of Building Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden: 1987.

## SEMBOLLER

$a$	$m/W$	$m$ eğimli doğrunun $t=1$ [sn] anına denk gelen düşey eksenindeki değeri
$k$	$W/(mK)$	Isıl iletim katsayısı
$m$	-	$1/q' - \log(t[sn])$ grafiğinden elde edilen doğrusal değişimin eğimi
$r$	[m]	Çap
$r_e=r_{eş}$	[m]	Kuyudaki tüm boruların tek bir boruya indirgenebildiği hayali eşdeğer yarıçap
$r_k$	[m]	Kuyu çapı
$r_b$	[m]	Boru çapı
$\tilde{r}$	-	Boyutsuz radyal uzaklık
$s$	-	Laplace dönüşüm değişkeni
$t$	[sn]	Zaman
$\tilde{t}$	-	Boyutsuz zaman
$T$	[°C]	Sıcaklık
$T_\infty$	[°C]	Doğal toprak sıcaklığı
$\bar{T}_{wf}$	[°C]	Kuyuya gidiş ve dönüş sıcaklıklarının ortalaması
$T_g$	[°C]	Kuyuya su gidiş sıcaklığı
$q'$	$W/m$	Birim derinlikteki kuyuda gerçekleşen ısı geçişi
$\tilde{q}'$	-	Boyutsuz birim ısı geçişi
$\hat{q}'$	-	Boyutsuz birim ısı geçişinin Laplace dönüşümü
$\alpha$	[ $m^2/s$ ]	Isıl yayılım katsayısı
$\gamma$	-	Euler Gama sabiti 0.5772..
$\theta$	-	Boyutsuz sıcaklık
$\hat{\theta}$	-	Boyutsuz sıcaklığın Laplace dönüşümü

## 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 2011-2016 Yılları arasında Endüstri Destekli Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. Isıl tepki testleri, ısı pompası, ısıtma kuyuları ve ısı geçişi konularında çalışmaktadır.

### **Mustafa ONUR**

Tulsa Üniversitesi McDougall Petrol Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi ve bölüm başkanı olarak görev yapan Mustafa Onur 1960 yılı Diyarbakır doğumludur. Uzmanlık ve araştırma alanları arasında kuyu basınç testleri tasarımı, modellemesi ve analizi, rezervuar tanımlaması ve sayısal rezervuar simülasyonu, jeotermal rezervuar mühendisliği ve doğrusal olmayan parametre tahmini yer almaktadır. İTÜ, Suudi Arabistan King Saud Üniversitesi, Malezya'daki Universiti Teknologi Petronas üniversitelerinde öğretim üyesi olarak görev yapmış olan Prof. Dr. Onur, Lisans derecesini 1982'de ODTÜ'den, Master derecesini 1985'te, Doktora derecesini 1989'da ABD Tulsa Üniversitesi'nden aldı. Tüm dereceleri Petrol Mühendisliği alanındadır. 2004' te Society of Petroleum Engineers (SPE)' den "Outstanding Technical Editor", 2010' da "Formation Evaluation", 2015'te "Distinguished Member" ödüllerini alan ve TMMOB' nin Onur Kurulu üyesi olan Dr. Onur bugüne kadar uluslararası ve ulusal toplam 60 adet makale ile 150'nin üzerinde bildiri yayınlamıştır. Google Scholar' a göre, bugüne kadar yayınlarına aldığı atıf sayısı 1000'e yakındır; son beş yılda aldığı atıf sayısı 420'dir, h-indeksi ise 16' dır.

### **Altuğ ŞİŞMAN**

1967 yılı Üsküdar doğumludur. 1988 yılında İTÜ makina mühendisliği bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversitenin Nükleer Enerji Enstitüsünden 1991 yılında yüksek mühendis, 1998 yılında doktor unvanını almıştır. 1990-1998 yılları arasında İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsünde araştırma görevlisi olarak görev yapmıştır. Yine aynı üniversitede 1998 yılında yrd. doç., 2002 yılında doçent ve 2009 yılında ise profesör olarak öğretim üyeliği hayatını sürdürmüştür. 2002-2004 yılları arasında Berlin Teknik Üniversitesi Termodinamik Enstitüsünde nano termodinamik üzerine ziyaretçi araştırmacı olarak çalışmalar yapmıştır. 2009 yılından günümüze ise İTÜ Enerji Enstitüsü müdürlüğü görevini yürütmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompaları konusu, farklı çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır. Uluslararası SCI dergilerinde yayınlanmış 34 adet makale ve uluslararası konferanslarda sunulmuş 54 adet bildirisi olup yayınlarına olan atıflar 554, h-indeksi ise 13 dür.