

# Toprak Kaynaklı Isı Pompalarında Isıl Cevap Testi ve Kuyu Performansının Analitik Öngörüsü

Murat Aydın\*, Altuğ Şişman\*, Şükrü Dinçer\*, Can Erdoğan\*, Ahmet Gültekin\*

\*İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, 34469 Maslak, İstanbul.

\*Baymak Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş., Orhanlı beldesi, Orta mah. Akdeniz sk., No:8, Tepeören mevki, Orhanlı, Tuzla, 34959 İstanbul.

## Özet

Toprak kaynaklı ısı pompaları; geleneksel ısı pompalarında hava ile ısı alış-verişinde bulunan dış ünitenin yerine, havaya kıyasla kışın daha ılık ve yazın daha serin olan toprağı kullanan ve böylece enerji açısından daha yüksek verimlilikle çalışan cihazlardır. Isı pompasının toprakla ısı alış-verişi yapması için toprak içerisine açılan kuyulara ya da toprak yüzeyine yakın bir tabakaya borulama yapılmaktadır. Isı pompasının kendisi ne kadar yüksek verime sahip olursa olsun ısı pompasının toplam verimliliği, toprak içerisinde yapılan uygulamaya şiddetle bağımlı olmaktadır. Toprak kısmında açılacak kuyuların derinliğinin, sayılarının, kuyular arası mesafelerin ve serme uygulamalarında da benzer birçok parametrenin doğru belirlenebilmesi, uygulamanın yapılacağı toprağın ısı iletim ve ısı difüzyon katsayılarının değerlerinin sağlıklı bilinmesine bağlıdır. Bu değerlerin doğru bilinmesi boyutlandırılmanın ve dolayısıyla uygulamanın doğru yapılabilmesi ve nihayetinde ısı pompasından verim alınabilmesi için hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada; İTÜ Enerji Enstitüsü arazisinde sabit sıcaklık metodu esas alınarak yapılan ısı cevap testlerinden elde edilen deneysel verilerin analitik modelle örtüştürülmesi yoluyla toprağın ısı iletim ve ısı difüzyon elde edilmiştir. Böylece deneysel olarak belirlenen parametrelerin analitik modelde kullanılmasıyla topraktan birim kuyu uzunluğu başına çekilebilecek ısının zamanla değişiminin, deneysel olarak pratik olamayacak kadar uzun bir zaman aralığı için modelle öngörülebilmesi mümkün hale gelmiştir. Burada sunulan yöntemle uzun süreli çalışmalarda birim kuyu uzunluğu ve akışkan ile toprak sıcaklığı arasındaki fark başına kuyu ile toprak arasında yapılabilecek gerçekçi ısı alış-verişi ile bu değerlerin zamanla evrimi hesaplanabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Toprak kaynaklı ısı pompası, ısı cevap testi, toprağın ısı iletkenlik ve difüzyon ölçümü.

## Abstract

Ground Source Heat Pumps ( TOKIP ) use ground as a heat source instead of air which used in convential heat pumps outdoor unit. The ground is warmer in winter and colder in summer than air. So ground source heat pumps more efficient than conventional heat pumps. In TOKIP application; to transfer heat from earth, there is need to drill boreholes or the pipes could be placed horizontaly to the ground with a shallow depth. A TOKIP application's succeed strictly depends on application in the ground. Depth of boreholes, number of boreholes, distance between boreholes and many other parameters in horizontal closed loop applications depend on thermal conductivity and thermal diffusivity of soil. Knowing well this parameters is so important for sizing and installing of ground application and for using efficiently heat pump. In this study, thermal conductivity and thermal diffusivity of soil in the field of ITU Energy Institute are determined by fitting the analytical model used here to the experimental data of constant heat temperature test. Then by using experimental parameters in analytical model, evaluation of borehole performance (heat transfer rate per unit borehole length) with time is examined for long time periods that could not be suitable for any experimental study. Also a thermal response test system is built in laboratory and studies of producing a mobil test system have been come an certain level.

**Key Words:** Ground source heat pump, thermal response test, thermal conductivity and diffusivity of soil.

## 1.Giriş

Toprak Kaynaklı Isı Pompası (TOKIP), ısıtma/soğutma amacıyla yaygın kullanılan klimalardan farklı olarak ısı kaynağı/kuyusu için hava yerine toprağı kullanan cihazlardır. Hava kaynaklı ısı pompaları olan geleneksel klimaların enerji etkinlik katsayıları (COP- Coefficient of Performance), yazın sıcak olan havaya ısı atımı, kışın ise soğuk olan havadan ısı alımı güçleştiği için standart koşullarda (örn:10/45) 3.0~3.5 değerlerini geçememektedir. Öte yandan toprak sıcaklığı yazın hava sıcaklığına göre daha düşük, kışın ise daha yüksek olduğundan toprak kaynaklı ısı pompalarında bu değer 4.5~5.0 değerlerine ulaşmaktadır. Böylece toprak kaynaklı ısı pompaları, elektrikle çalışmalarına rağmen kışın doğal gazla ısınmadan dahi daha ekonomik bir ısınma imkanı sağlarken yazın da geleneksel klimalarla yapılan soğutmadan çok daha verimli bir soğutma imkanını sunmaktadır. Bu nedenle TOKIP uygulaması; enerji verimliliği, emisyon azaltımı, ülkemizin doğalgaza olan dış bağımlılığının azaltılması ve son kullanıcının ısıtma/soğutma ihtiyacının ekonomik bir şekilde karşılanması açısından çok önemli avantajlar sağlamaktadır.

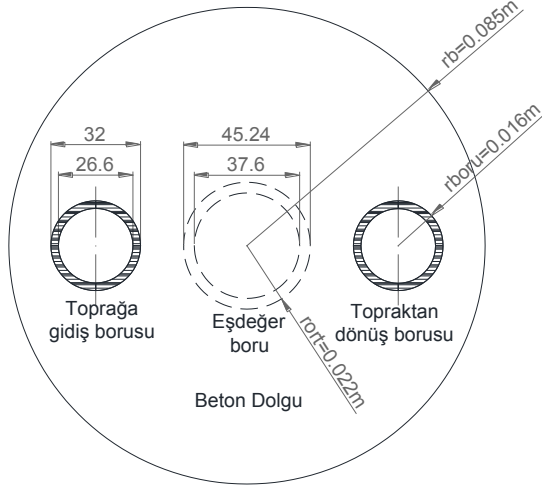
Bu teknoloji son yıllarda yurtdışında büyük bir yayılım göstermekte ve kullanım oranları hızla artmaktadır. Bu cihazların tamamının yurtdışından yüksek bedellerle ülkemize ithal edilmesi ve ülkemiz koşullarında toprak altı uygulama tekniklerinin henüz yeterince araştırılmamış ve bilinmiyor olmasına bağlı yapılan yanlış uygulamalar ve hatalar sonucunda ülkemizde bu teknoloji ve uygulamaları yaygınlaşmamaktadır.

TOKIP uygulamasında; ısı pompasının toprakla ısı alış-verişini sağlamak üzere toprakta kuyular açılarak içerisine U-boruları yerleştirilmekte ve boru ile toprak arası, iletkenlik değeri yüksek bir dolgu malzemesi ile doldurulmaktadır. Bu borular içerisinde antifrizli su dolaştırılarak ısı pompası ile toprak arasında ısı transferi sağlanmaktadır. Serme uygulaması olarak adlandırılan bir diğer yöntemde ise kuyu açmak yerine toprak yüzeyinden belirli bir derinlikte (2-5 m) yatay yönde boru döşemesi yapılarak üzeri tekrar toprakla örtülmektedir. Her iki uygulamada da birim boru uzunluğu başına akışkanın toprakla olan ısı alış-veriş miktarı (W/m) birçok parametreye bağlı olup ayrıca hem konuma hem de zamana bağlı bir problem oluşturmaktadır. Örneğin toprakla ısı transferi boru çaplarına, gidiş-dönüş boruları arasındaki mesafeye, borular arası dolgu malzemesine, boru geometrisine (tek U, çift U veya helix), akışkan hızına, kuyu uygulamalarında kuyu derinliğine ve kuyular arası mesafeye, serme uygulamalarında ise serme derinliğine bağlıdır. Böylece toprakla ısı alış-verişinin maksimize edilmesi için bu parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu konuda literatürde deneysel olarak oldukça az sayıda çalışma mevcut olup, araştırmaya oldukça açık bir konuyu oluşturmaktadır. Toprakla olan ısı alış-verişini iyileştirecek optimizasyonlar yapılmadan gerçekleşecek bir TOKIP uygulaması, ısı pompası ne kadar iyi ve kaliteli olursa olsun düşük performansla sonuçlanacak ve başarısız olacaktır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında; toprak altı ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalara temel teşkil edecek şekilde toprağın ısı iletim ve difüzyon katsayılarının deneysel ölçümü için sabit sıcaklıklı ısı cevap testi yapılmış ve uzun süreli kuyu performansı öngörülerini için bir alt yapı oluşturulmuştur.

## 2. Kuyuya Isı Transferinin Analitik Modelinin Kurulması

Toprağı açılmış ve içerisine borular yerleştirilmiş olan kuyu kesiti Şekil 1’de gösterilmiştir. Gidiş ve dönüş sıcaklıklarının ortalamasını alarak ısı transfer modelinde boruları tek bir boru olarak kabul edebiliriz [1]. Bu durumda kesit alanı her iki borunun kesit alanlarının toplamına eşit olan eşdeğer borunun iç kısmındaki sıcaklık, test yöntemimize göre sabit tutulmaktadır ( $\bar{T}$ ). Gerçekte kuyuya giden (40 °C) ve dönen (38 °C) akışkan sıcaklığında sadece 1-2 °C sıcaklık değişim olmasına müsaade edildiğinden (debiyi ayarlayarak) ve toprakla akışkan ortalama sıcaklıkları arasındaki fark 25 °C civarında olduğundan bu yaklaşım oldukça gerçekçi bir yaklaşımdır. Toprağın test öncesi başlangıçtaki sıcaklık dağılımı sabit olup sıcaklık değeri  $T_{\infty}$  ile verilmiştir. Toprağın izotropik ve homojen olduğu kabulü ile problemin açısal bağımlılığı ihmal edilirken kuyu boyunca akışkan sıcaklığının sabit olduğu göz önüne alınarak da eksenel yöndeki sıcaklık değişimleri ihmal edilebilir [1]. Böylece problem, kuyunun etrafındaki toprak sıcaklığının radyal koordinata ve zamana bağlı olarak hesaplanması problemine dönüşür.



Kuyuya giden akışkan sıcaklığı :  $T_g$

Kuyudan dönen akışkan sıcaklığı :  $T_d$

Ortalama akışkan sıcaklığı :  $\bar{T} = \frac{T_g + T_d}{2}$

Eşdeğer boru çapı :  $r_e = \sqrt{2}r_{boru}$

**Şekil 1:** Kuyu ve gidiş dönüş boruları ile eşdeğer boru görünümü.

Eşdeğer borudaki sıcaklık  $\bar{T}$  deneysel olarak ölçüldüğü için beton dolgunun dışındaki sıcaklık  $T_0$  değeri hesaplanabilir. Bunun için beton dolgunun çapının  $r_b$ , ısıнын yayılmaya devam ettiği toprak ortama kıyasla çok daha küçük olması, ısı iletim ve difüzyon katsayılarının yine toprağa kıyasla oldukça yüksek olması gözönüne alınarak sürekli rejim yaklaşımı yardımıyla  $\bar{T}$  ve kuyunun birim uzunluğu başına ısı transferi  $\dot{q}'$  cinsinden aşağıdaki denklemle bulunur:

$$T_0 = \bar{T} - \frac{\dot{q}' \ln(r_b/r_e)}{2\pi_b k_d} \quad (1)$$

burada  $k_d$  dolgu betonunun ısı iletim katsayısıdır. Toprak içersindeki sıcaklığın radyal koordinata ve zamana bağlı değişimlerini bulmak için ise ısı iletim katsayısı ile yoğunluğun ve ısı kapasitesinin sabit olduğu ve sıcaklığın açısal ve eksenel bağımlılıklarının ihmal edilebildiği bir ortamda aşağıdaki denklemin çözülmesi gerekir [2].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Burada  $\alpha$  ısı difüzyon katsayısı olup toprağın sırasıyla ısı iletim katsayısı  $k$ , yoğunluğu  $\rho$  ve ısı kapasitesi  $c$  cinsinden  $\alpha = k/\rho c$  şeklinde tanımlanır. Problemin sınır ve başlangıç koşulları ise sırasıyla

$$T(r_b, t) = T_0$$

$$T(r, 0) = T_\infty$$

olarak verilir. Denklem (2) aşağıdaki gibi boyutsuzlaştırma yapılarak basitleştirilir.

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}; \quad \tilde{r} = \frac{r}{r_b}; \quad \tilde{t} = \frac{\alpha t}{r_b^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \tilde{r}^2} + \frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} = \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{t}} \quad (4)$$

Boyutsuz büyüklükler cinsinden sınır ve başlangıç koşulları da

$$\theta(1, \tilde{t}) = 0 \quad (5a)$$

$$\theta(\tilde{r}, 0) = 1 \quad (5b)$$

şeklini alır. Denklem (4), (5a) ve (5b) koşulları ile çözüldüğünde;

$$\theta(\tilde{r}, \tilde{t}) = \int_{\beta=0}^{\infty} \frac{\beta e^{-\beta^2 \tilde{t}} [J_0(\beta \tilde{r}) Y_0(\beta) - Y_0(\beta \tilde{r}) J_0(\beta)]}{J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)} d\beta \cdot \int_{r'=1}^{\infty} r' [J_0(\beta r') Y_0(\beta) - Y_0(\beta r') J_0(\beta)] dr' \quad (6)$$

elde edilir [2]. Eşitliğin sağındaki ikinci integralin analitik çözümü yapılabildiğinden (6) ifadesi

$$\theta(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{-2}{\pi} \int_{\beta=0}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 \tilde{t}} [J_0(\beta \tilde{r}) Y_0(\beta) - Y_0(\beta \tilde{r}) J_0(\beta)]}{\beta [J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)]} d\beta \quad (7)$$

şekilde en basit halini alır.

## 2.1. Birim kuyu uzunluğu başına ısı transferinin zamana bağlı analitik ifadesi

Birim kuyu uzunluğu başına ısı transferi için aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\dot{q}' = -2\pi r_b \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_b} \quad (8)$$

Denklem (8), denklem (3) de verilen boyutsuz büyüklükler cinsinden ise aşağıdaki formu alır.

$$\dot{q}' = -2\pi k (T_\infty - T_0) \left. \frac{d\theta}{d\tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} \quad (9)$$

Birim kuyu uzunluğu başına ısı transferini boyutsuz olarak

$$\tilde{q}' = \frac{\dot{q}'}{2\pi k (T_0 - T_\infty)} = \left. \frac{d\theta}{d\tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} \quad (10)$$

Şeklinde yazmak mümkündür. Denklem (7) denklem (10)'da kullanılarak birim kuyu uzunluğu başına boyutsuz ısı transferi ifadesi

$$\tilde{q}'(\tilde{t}) = \frac{\dot{q}'}{2\pi k (T_0 - T_\infty)} = \frac{2}{\pi} \int_{\beta=0}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 \tilde{t}} [Y_0(\beta) J_1(\beta) - J_0(\beta) Y_1(\beta)]}{\beta [J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)]} d\beta \quad (11)$$

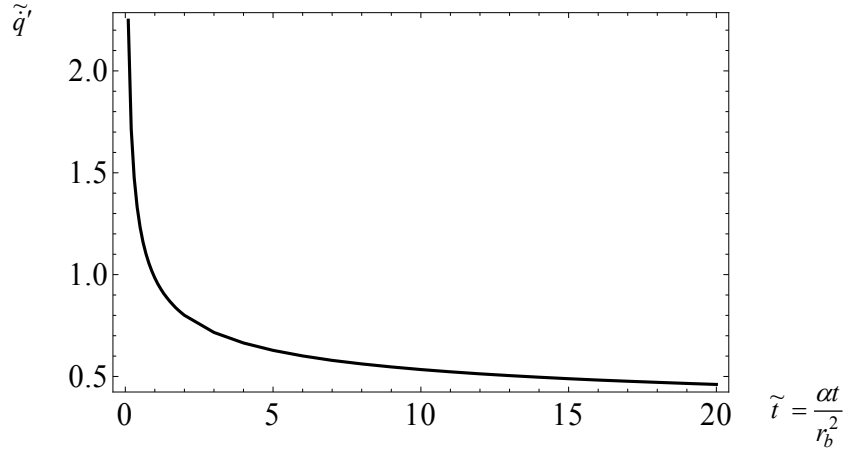
şeklinde bulunur.

Bu ifadedeki  $\beta$ 'ya bağlı integralin analitik çözümü olmadığından sayısal çözüm yapılarak verilen bir  $\tilde{t}$  anındaki birim uzunluk başına boyutsuz ısı transferi bulunabilir. Deneyden elde edilen sonuçların (11) numaralı denkleme karşılaştırılması ile de toprak için ısı iletkenlik  $k$  ve ısı difüzyon katsayısı  $\alpha$  bulunur. Bu karşılaştırma işlemi sırasında aşağıdaki denklemde sol taraftaki terim (11) numaralı denklemin sonucunu temsil ederken sağ taraftaki terim ise deneysel olarak elde edilen  $\dot{q}'$ ,  $T_0$  ve  $T_\infty$  verilerini içermektedir.

$$\tilde{q}'\left(\frac{t\alpha}{r_b^2}\right) = \frac{\dot{q}'(t)}{2\pi k(T_0 - T_\infty)} \quad (12)$$

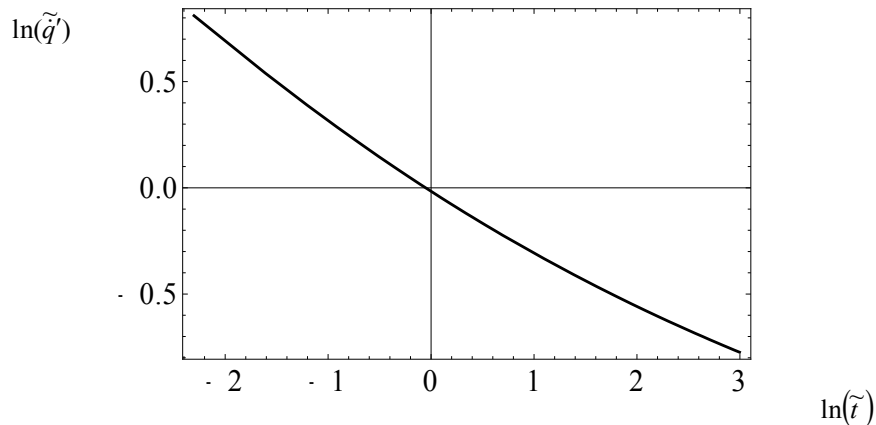
## 2.2. Sayısal Integralin Sonuçlarına Analitik Bir İfade Yaklaşımı

Denklem (11) ile temsil edilen  $\tilde{q}'$  terimi, Bessel fonksiyonlarını içeren bir integrantın sonsuz integralinden oluştuğu için Bessel fonksiyonlarının salınımlı doğası nedeniyle integralin sayısal hesaplaması oldukça uzun sürmekte ve veri karşılaştırma yönteminden sonuç almak da oldukça güç olmaktadır. Bununla birlikte  $\tilde{q}'$  ifadesinin  $\tilde{t}$  ya olan bağımlılığı Şekil.2'de verilmektedir.



**Şekil 2:** Boyutsuz çizgisel ısı akısının boyutsuz zamanla değişimi.

Bu grafiğin logaritmik eksenlerdeki formu ise Şekil 3'de sunulmuştur.



**Şekil 3:**  $\ln(\tilde{q}') - \ln(\tilde{t})$  grafiği.

Şekil 3'den görüldüğü gibi logatirmik skalada doğrusala çok yakın bir ilişki elde edilmektedir. Bu durumda fonksiyonun logaritmik ölçekteki davranışına bir polinom çakıştırılırsa

$$\ln(\tilde{q}') = 0.0199 \ln(\tilde{t})^2 - 0.3122 \ln(\tilde{t}) - 0.01557 \quad (13)$$

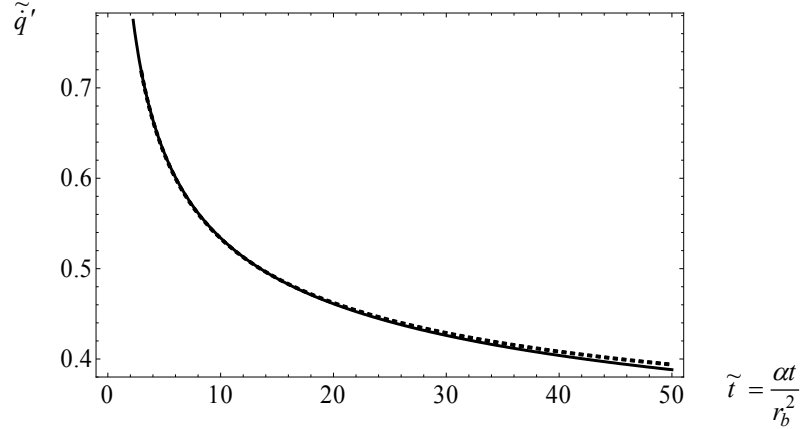
ifadesi elde edilir. Böylece denklem (11) için yüksek bir doğrulukla aşağıdaki denklik elde edilir.

$$\tilde{q}' = \exp[0.0199 \ln(\tilde{t})^2 - 0.3122 \ln(\tilde{t}) - 0.01557] \quad (14)$$

buradaki  $\tilde{t}$  ifadesi açık olarak yazılırsa;

$$\tilde{q}' = \exp[0.0199 \ln(t\alpha/r_b^2)^2 - 0.3122 \ln(t\alpha/r_b^2) - 0.01557] \quad (15)$$

şeklinde bir ifade bulunur. Bu ifadenin grafiği ile denklem (11)'in çözümü Şekil 4'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4'den anlaşılacağı üzere denklem (15) (kesikli çizgi) yüksek bir doğrulukla denklem (11)'in sonuçlarını (düz çizgi) geniş bir  $\tilde{t}$  aralığında temsil edebilmektedir. Böylece denklem (12) deki çakıştırma işlemi sırasında hesaplamaların hızlı olabilmesi için denklem (11) yerine denklem (15) rahatlıkla kullanılabilir.



**Şekil 4:** Denklem (11) ve (15)'in sonuçlarının karşılaştırması.

### 3.Toprak Altı Kuyularının Testi

Toprak altı kuyularının testleri için yaygın olarak kullanılan iki yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi toprağa sabit olarak ısı transfer edilerek toprağın ısı kapasitesinin ölçüldüğü sabit ısı akısı yöntemidir (constant heat flux method-CHFM). Diğer bir yöntem ise toprak altına belli bir sıcaklıktaki suyun sürekli olarak gönderildiği ve toprağın bu işleme cevabının izlendiği sabit sıcaklık yöntemidir (constant heat temperature method-CHTM). İki yöntemin bir karşılaştırması Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1:** Sabit Isı Akısı Metodu ile Sabit Sıcaklık Metodunun Karşılaştırılması [3].

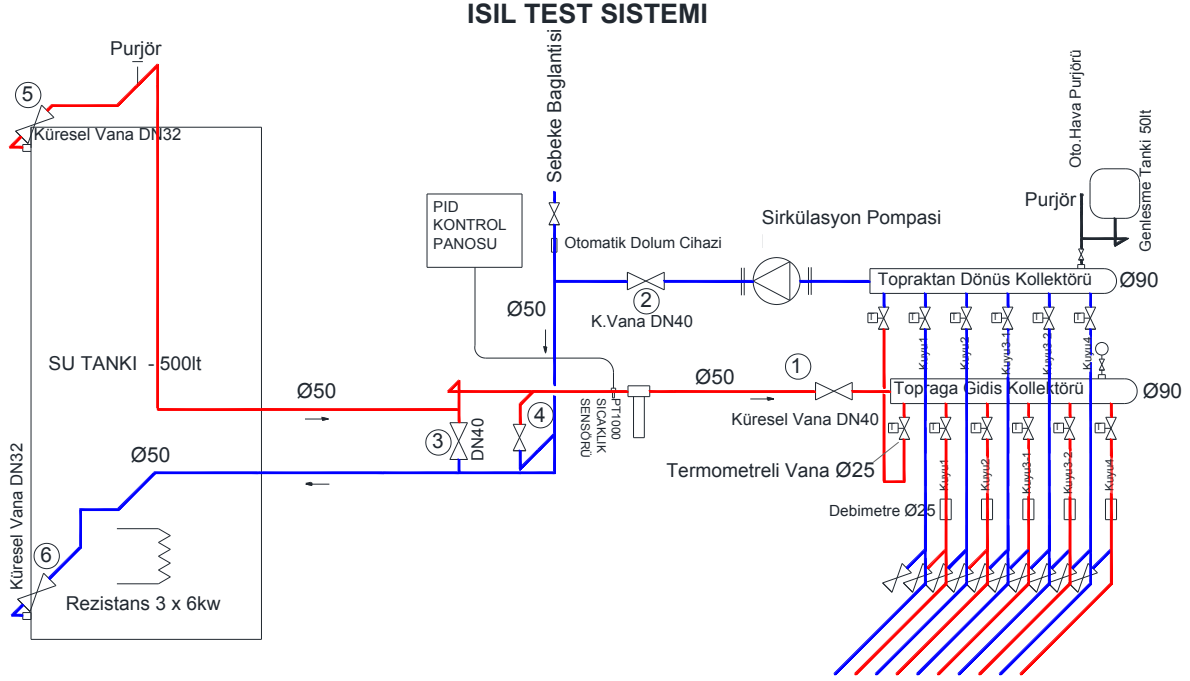
| No | Karşılaştırılan Parametre             | Sabit Isı Akısı Yöntem                     | Sabit Sıcaklık Yöntem                      |
|----|---------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1  | Çalışma Modu                          | Isı verme                                  | Isı verme ve ısı çekme                     |
| 2  | Test akışkan sıcaklık aralığı         | Oda sıcaklığı ile 40°C arası               | 5-40 °C                                    |
| 3  | Çalışma kontrolü                      | Sabit                                      | Değişken                                   |
| 4  | Çalışma dayanıklılığı                 | İyi                                        | Daha İyi                                   |
| 5  | Sürekli rejime geçiş süresi           | 40-50 saat                                 | 24-30 saat                                 |
| 6  | Test Doğruluğu                        | Yeterli                                    | Daha İyi                                   |
| 7  | Veri Değerlendirme Modeli             | Çizgi kaynak, Silindirik ve diğer metotlar | Silindirik metot ve diğer nümerik modeller |
| 8  | Kontrol sistemi için donanım ihtiyacı | Az                                         | Yüksek                                     |
| 9  | Donanım maliyeti                      | Az                                         | Yüksek                                     |

Tablo 1’den de görülebileceği gibi sabit sıcaklık ile ısı cevap testi bazı üstün özelliklere sahip olmaktadır. Bu çalışmada sabit sıcaklıkla ısı cevap yöntemi kullanılmıştır. Kurulan test sisteminin şematik bir çizimi Şekil 5’de gösterilmiştir.

#### 3.1. Isıl Test Sisteminin Çalıştırılması

Isıl test sisteminde sabit sıcaklıkta teste başlamadan önce test edilecek kuyunun doğal (etkilenmemiş) sıcaklığının ( $T_{\infty}$ ) tespiti için kuyu borusundaki su, tankdan bağımsız olarak 15 dk süre ile kapalı bir çevrimde dolaştırılır. Pompa çalışır vaziyette olarak 1, 2 ve 4 no. lu vanalar ile test edilecek kuyunun gidiş dönüş vanalarının açık olması ve diğer vanaların kapalı olması test için yeterlidir. Kuyunun bu şekilde boşta çalıştırılması 15 dakikayı geçmemelidir. Aksi durumunda akışkan sıcaklığı pompanın ısı gücünden de etkilenmeye başlamaktadır.

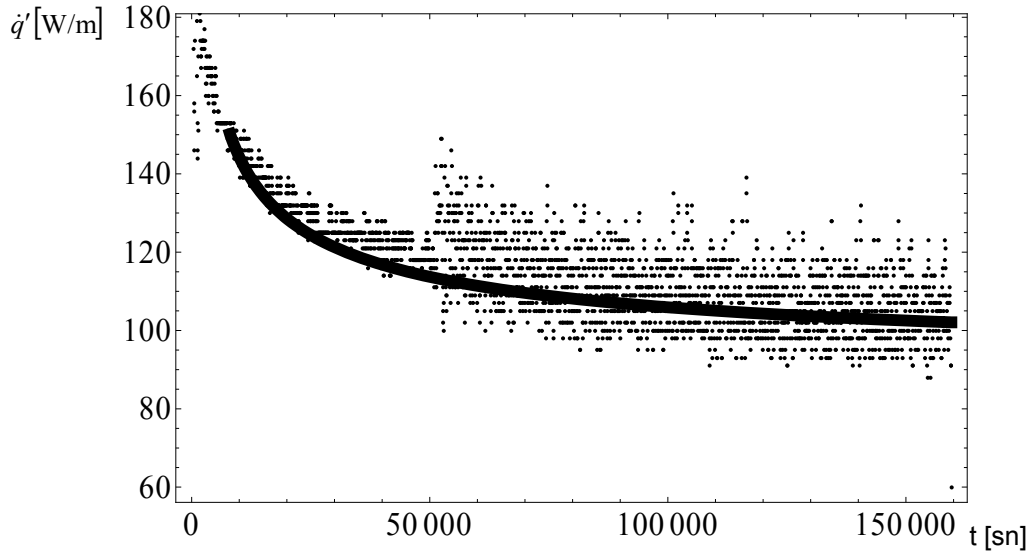
Toprağın doğal sıcaklığı tespit edildikten sonra rezistanslar devreye alınarak su tankı içerisindeki suyun istenen sıcaklığa getirilmesi sağlanır. Bunun için 1, 2, 5 ve 6 no.’lu ve kollektör üzerindeki bypass vanalarının açık olması yeterlidir. Su tankı içerisinde de sabit sıcaklık sağlandıktan sonra test sistemi çalıştırılır ve gidiş, dönüş suyu sıcaklıkları Pt1000 sensörlerle, debi değeri ise debimetre ile ölçülerek bilgisayara gerçek zamanlı olarak kaydedilir.



**Şekil 5:** Toprak altı kuyuları ısıl performans ölçüm sistemi.

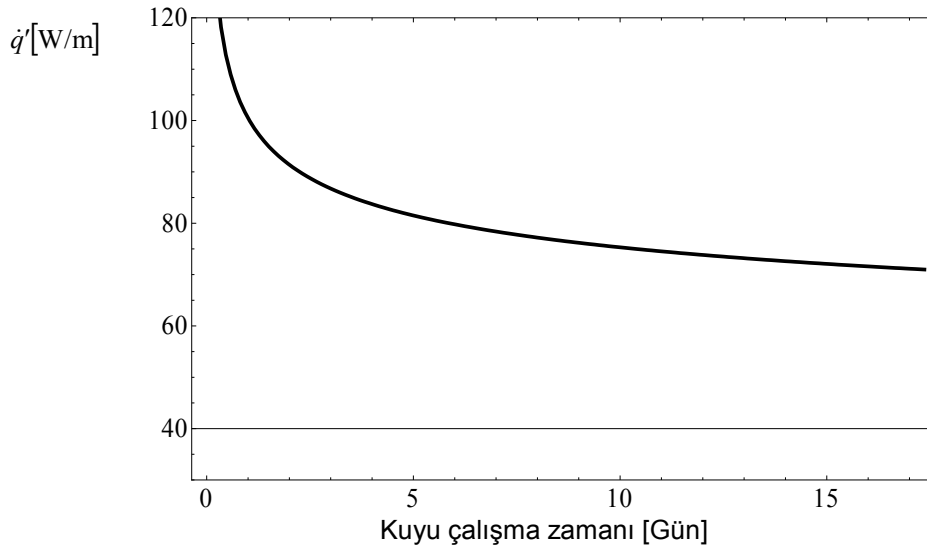
### 3.2. Test Sonuçları ve Veri Çakıştırma

Araştırma amacıyla açılan kuyular arasından 50 m'lik olan kuyu ile yapılan testin verileri (noktalar) ile denklem (12)'nin çakıştırılması sonucu elde edilen eğrinin karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir.



**Şekil 6:** Birim kuyu uzunluğu başına ısı transferinin zamanla değişiminin deneysel değerleri (noktalar) ile bu değerlerin analitik modele çakıştırılması sonucu elde edilen k ve  $\alpha$  değerleri kullanılarak çizdirilen analitik grafiğin (siyah eğri) karşılaştırması.

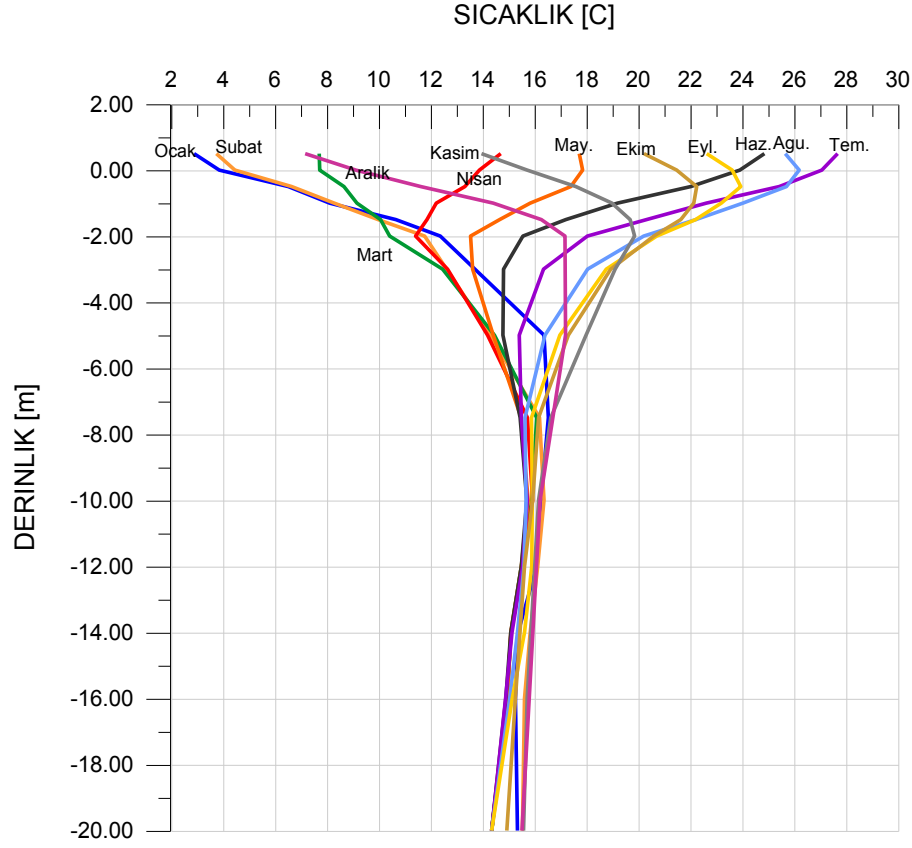
Bu çakıştırma işlemi sonucunda test yapılan arazi için toprağın ısı iletkenlik değeri  $k=2.4 \text{ W/mK}$  ve ısı difüzyon değeri ise  $\alpha=2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak elde edilir. Şekil 6'dan anlaşılacağı üzere deney süresi yaklaşık 44 saat sürmüştür. Bunun sonucunda elde edilen  $k$  ve  $\alpha$  değerlerinin denklem (11)'de kullanılması ile deney süresinden çok daha uzun süreler için birim kuyu uzunluğu başına ısı transferi olan kuyu performansının zamanla değişiminin analitik öngörüsünün yapılması mümkündür. Böylelikle deneysel olarak ölçümü mümkün olamayacak kadar uzun sürelerde kuyu performansının nasıl değişeceği hakkında güvenilir bir bilginin üretilmesi ve buna bağlı olarak kurulacak olan sistemin uzun süreli (mevsimsel) performansı için gerekli olan kuyu derinliklerinin ve sayısının gerçekçi biçimde öngörülebilmesi mümkün olabilecektir. Bu sayede uygulama eksikliklerine bağlı problemlerin yaşanmasının önüne geçilmiş olacaktır. Şekil 7'de yukarıda 2 günlük veriler kullanılarak elde edilen toprak parametrelerinin denklem (11)'de kullanılması yardımıyla elde edilen 18 günlük kuyu performans öngörü eğrisi görülmektedir.



Şekil 7: 18 günlük kuyu performans öngörüsü

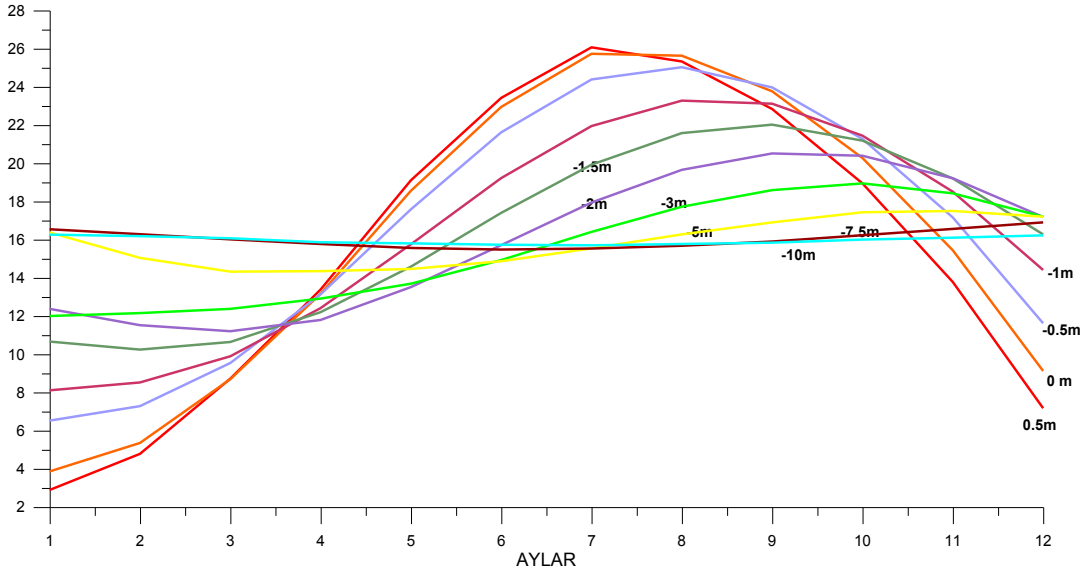
#### 4.Toprak Altı Sıcaklık Ölçümü (TASO):

Toprak altı sıcaklığının derinliğe göre mevsimsel değişimi için şu an birçok kaynakta kullanılan çeşitli grafikler mevcuttur. Bununla birlikte bu grafiklerin nasıl elde edildiği, hangi ülkenin hangi bölgesine ve hangi toprak yapısına ait oldukları belirtilmemektedir. Öte yandan toprak altı sıcaklığı ve bu sıcaklığın derinliğe ve mevsime bağlı değişimleri; jeotermal ısı akısına ve meteorolojik özelliklere göre de değişebilmektedir. Bu çalışma çerçevesinde ayrıca yeraltı ısı pompaları uygulamalarının doğru yapılabilmesi için oldukça önemli olan bu grafiğin İstanbul/Maslak test sahasında yapılan gerçek zamanlı ölçüm sonuçlarına dayalı değerleri Şekil 8'de sunulmuştur. 2012 yılı boyunca çeşitli derinliklerdeki toprak altı sıcaklık değerleri her 5 dakikada bir ölçülerek kaydedilmiş ve günlük, aylık ve yıllık sıcaklık-derinlik grafikleri çıkartılmıştır.



**Şekil 8:** İstanbul/Maslak 2012 yılı toprak altı sıcaklıklarının derinlikle değişimi.

Şekil (8)'de görüldüğü gibi havayla temas halinde olan yüzey nedeniyle 6 m derinliğe kadar toprak sıcaklığı aylara bağlı olarak daha çok etkilenmektedir. Ancak daha derinlere inildikçe bu etkilenme azalmakta ve 8 m gibi bir derinlikten sonra toprak sıcaklığı hava sıcaklığı değişiminden pratik olarak etkilenmemektedir. Bu değişim, sıcaklık-zaman grafiğinde daha detaylı olarak Şekil 9'da görülmektedir.



**Şekil 9:** İstanbul/Maslak 2012 yılı toprak altı sıcaklıklarının zamanla değişimi.

## 5. Isı Pompasının Sürekli Isıtma Amaçlı Kullanılması Durumunda Toprak Altı Sıcaklığın Düşüşü

Isı pompası kışın topraktan çekilen ısıyı bina içerisinde kullanırken, yazın ise iç ortamdan çektiği ısıyı toprağa gönderir. Bu şekilde ısı pompası hem ısıtma hem de soğutma amaçlı olarak dönüşümsel biçimde kullanıldığında toprak bir nevi ısı deposu görevini görür ve yazın toprak altına gönderilen ısı kışın geri alınıp kullanılır. Ancak, ısı pompasının örneğin sadece ısıtma amaçlı çalıştırılması durumunda uzun vadede toprak altı sıcaklığı, jeotermal ısı akısının topraktan alınan ısıyı karşılayamaması halinde sürekli düşme eğilimi gösterir. Jeotermal ısı akısı dışında toprak yüzeyi tarafından yutulan güneş ışıınımı da toprak içersine bir miktar ısı transferi sağlasa da gerek yükselen yüzey sıcaklığı nedeniyle havaya olan ısı kayıplar ve gerekse de toprağın ısı direnci nedeniyle bu etkinin ancak sınırlı bir derinliğe kadar etki edebilmesi sonucunda kuyu uygulamalarına pratik olarak güneş ışıınımına bağlı ısı transferinin hemen hemen hiçbir önemi yoktur. Şekil 8 de bu durumu açıkça ortaya koymaktadır. Bu durumda ısı pompasının sadece ısınma amaçlı kullanımlarında kuyu performansı da zamanla azalır ve uzun vadede ciddi yetersizlik problemleri ile karşılaşılır. Bu durumu önleyebilmek için ya kuyular arasındaki mesafeyi, topraktan çekilen ısıyı jeotermal ısının karşılayabileceği şekilde ayarlamak ya da yazın da soğutma amaçlı kullanımla toprağa ısı vermek gerekmektedir.

Toprağa yüzeyden güneş ışıınımına bağlı ısı transferinin ihmal edilmesi ve kuyular arası mesafenin uygulamada sıklıkla tercih edildiği gibi  $2r=10$  m olması durumunda;  $h=50$  m derinliğinde bir kuyudan birim uzunluk başına çekilen ısının da ortalama  $\dot{q}''=75 \text{ W/m}$  olduğu göz önüne alınarak toprak sıcaklığının zamanla değişimi için kaba ancak basit bir hesaplama

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{q}_{ort}''\pi r^2 - \dot{q}'h}{\rho c V} = -0.48 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C/s} \quad (16)$$

elde ederiz. Burada ortalama jeotermal ısı akısı  $\dot{q}_{ort}''=87 \text{ mW/m}^2$  [3], toprağın hacimsel ısı kapasitesi,  $\rho c=2000 \text{ kJ/m}^3\text{K}$  olarak alınmıştır. Denklem (16)'ya göre kuyunun günde 10 saat çalıştırılması durumunda toprak sıcaklığı 1 ay da  $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  düşecektir. Bu durumda genel olarak jeotermal ısı akısının  $\dot{q}''=30-200 \text{ mW/m}^2$  [1] aralığında olduğunu göz önünde bulundurarak toprak altı sıcaklığında zamana bağlı bir değişimin olmaması için maksimum, ortalama ve minimum kuyular arası mesafe için aşağıdaki ifade yardımıyla

$$r = \sqrt{\frac{\dot{q}'h}{\dot{q}''\pi}} \quad (17)$$

sırasıyla  $2r_{\max}=400$  m,  $2r_{ort}=235$  m ve  $2r_{\min}=155$  m değerleri elde edilir. Bu değerler pratik uygulamalar için büyük bir kısıtlama getirdiğinden kuyular arasında bu tür mesafeler bırakılamamaktadır. En yaygın kullanılan kuyular arası mesafe 10 m ile bu değerler kıyaslanacak olursa jeotermal ısı akısının bir ısı kuyusundan çekilen enerjiyi karşılayabilmesi de mümkün olamamaktadır. Bu nedenle pratik olarak toprağı sadece bir ısı deposu olarak düşünmek ve işletim planlamasını bu şekilde yapmak genel olarak daha güvenli olacaktır.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada temel olarak toprak kaynaklı ısı pompalarında kullanılan kuyuların performans öngörüsünde önemli olan toprak özelliklerinin tespiti için analitik bir kuyu modeli kurularak sabit sıcaklıklı bir ısı cevap testinin verileri ile karşılaştırma yaparak toprağın ısı iletim ve difüzyon katsayıları deneysel olarak bulunmuş ve kuyunun birim uzunluğu başına ısı transferi için uzun süreli kestirim yapılmıştır. Ayrıca toprak kaynaklı ısı pompalarında en uygun serme derinliklerini tespit etmek ve topraktaki sıcaklık değişimlerini izlemek amacıyla 20 metreye kadar belirli derinliklerde gerçek zamanlı sıcaklıkların yıllık kayıtlarına dayalı toprak sıcaklığı-derinlik grafikleri aylık olarak verilmiştir. Kuyu sıcaklıklarının zaman içerisinde düşerek kuyu performansını olumsuz etkilememesi için olması gereken kuyular arası mesafelerin pratikte uygulanamayacak kadar büyük olması gerektiği ve bu nedenle de toprak kaynaklı ısı

pompaları uygulamasında toprağın pratikte bir ısı deposu olarak kullanıldığına vurgu yapılmıştır. Buna göre daha uzun kuyu ömrü için toprak kaynaklı ısı pompalarının sadece ısıtmada kullanılması yerine ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılması gerektiği ifade edilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan ve sunulan yöntemle; deneysel olarak ölçümü mümkün olamayacak kadar uzun sürelerde kuyu performansının nasıl değişeceği hakkında güvenilir bir bilginin üretilmesi ve buna bağlı olarak kurulacak olan sistemin uzun süreli (mevsimsel) performansı için gerekli olan kuyu derinliklerinin ve sayısının gerçekçi biçimde öngörülebilmesi mümkün olabilecektir. Bu sayede uygulama eksikliklerine bağlı problemlerin yaşanmasının önüne geçilmiş olacaktır.

## KAYNAKLAR

[1] ESKILSON, P., "Thermal analysis of heat extraction boreholes". Doktora Tezi, Lund University; 1987.

[2] ÖZİŞİK,N., "Heat Conduction Second Edition", John Wiley & Sons. Inc.,1993

[3] WANG, H.,ve diğ., "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.

[4] BANKS, D., "An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling", Blackwell Publishing, 2008

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma Baymak Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Bilim ve Teknoloji Genel Müdürlüğü tarafından 01276.STZ-2012-1 numaralı Santez projesi kapsamında desteklenmiştir. Bu destek için yazarlar Baymak Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na teşekkür ederler.

## ÖZGEÇMİŞ

### Murat AYDIN

1979 yılında İstanbul'da doğmuş olan Murat Aydın, Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Mühendisliği lisans eğitimini Şubat 2002'de tamamlamıştır. 2007 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nde Enerji Bilim ve Teknoloji programında eğitimini tamamlamıştır. Aynı yıl doktora eğitimine başlamış ve halen devam etmektedir. 2001-2011 yılları arası imalat, HVAC, toprak kaynaklı ısı pompaları, doğalgaz vb. çeşitli mühendislik sektörlerinde çalışmıştır.

### Altuğ ŞİŞMAN

1998 yılında doktorasını İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsünde tamamlamış, 1999 yılında aynı birimde yrd. doç. olarak görevine devam etmiş olan yazar 2002-2004 yılları arasında Berlin Teknik Üniversitesi, Termodinamik Enstitüsünde misafir araştırmacı olarak çalışmış, 2009 yılından itibaren profesör olarak İTÜ Enerji Enstitüsünde Enstitü müdürlüğü görevini sürdürmektedir. Başlıca araştırma konuları; nano ölçekte termodinamik ve transport, termoelektrik sistemler, batarya yönetim sistemleri ve toprak kaynaklı ısı pompaları olarak sıralanabilir.

### Şükrü DİNÇER

1958 yılında Karaman' da doğdu, 1980 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Bugüne kadar Gemi Makinalarında İşletme Mühendisliği, çeşitli firmalarda

kurucu, işletmeci, yönetici ve ar-ge mühendisi olarak çalıştı. Halen ısı pompaları, ısı istasyonları, pprc kaynak makinaları imalatı vb. alanlarda çalışmaktadır.

**Can ERDOĞAN**

1981 yılında İstanbul'da doğdu. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2008 yılında Maltepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi MBA programını bitirdi. 2007 yılında bugüne kadar çeşitli firmalarda üretim, üretim planlama, şantiye ve ar-ge mühendisi olarak çalışmıştır.

**Ahmet GÜLTEKİN**

1988 yılı Siirt doğumludur. 2010 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nde Enerji Bilim ve Teknoloji programında yüksek lisans yapmaktadır. Aynı üniversitede 2012 yılından beri Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.