



**Araştırma/Research**

Anadolu Tarım Bilim. Derg./Anadolu J Agr Sci, 31 (2016)  
ISSN: 1308-8750 (Print) 1308-8769 (Online)  
doi: 10.7161/omuanajas.260987



## Toprağın ısısal yayınının fonksiyonel değişimi ve toprak sıcaklığına etkisi

İmanverdi Ekberli\*, Coşkun Gülser

*\*Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Atakum, Samsun*  
\*Sorumlu yazar/corresponding author: iman@omu.edu.tr

Geliş/Received 12/02/2016 Kabul/Accepted 24/05/2016

### ÖZET

Toprak sıcaklığının izlenmesinde ısısal yayının önemli bir parametredir. Bu çalışmada, ısısal yayının katsayısının deneysel ve fonksiyonel ilişkilere göre elde edilen değerlerine bağlı olarak derinlik boyunca toprak sıcaklıkları belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Samsun İli Bafra Meteoroloji İstasyonunun Mayıs-Temmuz 2012 aylarındaki ortalama günlük toprak sıcaklık değerleri için 5-10; 10-20; 20-50; 50-100 cm toprak katmanlarının ortalama ısısal yayının katsayıları  $3.65 \cdot 10^{-6}$ ;  $7.27 \cdot 10^{-6}$ ;  $12.82 \cdot 10^{-6}$ ;  $16.68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır. Isısal yayının ile toprak derinliği arasındaki ilişki doğrusal, eksponansiyel, üstel ve parabolik fonksiyonlar ile ifade edilmiştir. Isısal yayınına ait deneysel (meteorolojik) veriler ile fonksiyonlardan hesaplanan değerler arasındaki ortalama nispi hataların %7.79 ve %18.64 arasında değiştiği ve parabolik fonksiyonla yapılan hesaplamada nispi hatanın en düşük olduğu bulunmuştur. Fonksiyonlara bağlı olarak bulunan ısısal yayının katsayılarına göre hesaplanan sıcaklık değerleri ile deneysel sıcaklık değerleri arasındaki nispi hatalar ise %2.50 ve %2.83 arasında değişim göstermiştir. Parabolik fonksiyon ile belirlenen ısısal yayının katsayısının kullanılmasıyla hesaplanan toprak sıcaklık değerleri en düşük nispi hatayı vermiştir.

**Anahtar Sözcükler:**  
Fonksiyonel ilişkiler  
Isısal yayının  
Meteoroloji  
Toprak sıcaklığı

### Functional changes of soil heat diffusivity and effect on soil temperature

#### ABSTRACT

Heat diffusivity is an important parameter for monitoring soil temperature. In this study, soil temperatures throughout to soil depth were determined with respect to the heat diffusivity coefficient values measured and obtained with functional relations, and compared each other. Mean heat diffusivity values for 5-10; 10-20; 20-50; 50-100 cm soil layers were estimated as  $3.65 \cdot 10^{-6}$ ;  $7.27 \cdot 10^{-6}$ ;  $12.82 \cdot 10^{-6}$ ;  $16.68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  according to mean daily soil temperature values of Bafra Meteorology Station in Samsun between May-July 2012, respectively. Relationships between heat diffusivity and soil depth were explained with linear, exponential, power and parabolic functions. Mean relative errors between heat diffusivity values estimated from experimental (meteorological) data and functions varied between 7.79% and 18.64%; and it was found that the relative error estimated using parabolic function was the lowest. Mean relative errors between experimental temperature values and temperature values estimated using heat diffusivity values of functions varied between 2.50% and 2.83%. The lowest relative error was found in soil temperatures estimated using the heat diffusivity values of parabolic function.

**Keywords:**  
Functional relationships  
Heat diffusivity  
Meteorology  
Soil temperature

© OMU ANAJAS 2016

### 1. Giriş

Toprakta sıcaklık alanının pratik ve teorik olarak incelenmesinde, toprağın termal rejiminin kontrolünde ısısal yayının katsayısının değerlendirilmesi önemlidir. Toprağın yapısına, iklim koşullarına, bitki örtüsüne vb. bağlı olarak, toprak profili boyunca ısısal yayının farklılık göstermektedir. Isısal yayının katsayısı ile ısı iletkenliği ve toprağın ısı kapasitesi arasındaki fonksiyonel ilişki önemli olup, toprak sıcaklığının

modellenmesi ve tahmin edilmesinde ısısal yayının katsayısının belirlenmesi gereklidir. Topraktaki nem miktarı ısısal yayınına önemli düzeyde etki yapmaktadır. Isısal yayınının değişimi farklı toprak süreçlerini de etkilemektedir.

Gözenekli ortamda ısı taşınımı süreçleri ısı iletkenliği, ısı kapasitesi, ısısal yayının gibi termal özellikler tarafından gerçekleştirilmektedir. Isı taşınımının tahmini amacıyla yapılan modellemelerde ortamın, mineralojik bileşimi, hacim ağırlığı, su içeriği gibi

fiziksel özellikleri ile beraber ısısal yayınımları da temel parametre olarak kabul edilmektedir (de Vries, 1963; Kasubuchi, 1984; Cote ve Konard, 2005; Lu ve ark., 2007). Saito ve ark. (2014) tarafından yapılan bir araştırmada, ısı iletkenliği ve ısısal yayınıma ait tahmin modelleri bölge koşullarına uygun olarak geliştirilmiştir. Genel olarak, herhangi bir ortamın ısısal özelliklerinin belirlenmesinde, ısı iletkenliğinin ve ısısal yayınının incelenmesi önemli olmaktadır. Faitli ve ark. (2015), belediye katı atıklarının ısısal özelliklerini belirlemek üzere yaptıkları bir çalışmada, atıklarda ısısal yayınının  $2.07 \cdot 10^{-7} - 9.66 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Huang ve ark. (2014) yaptıkları araştırmada, toprağın termal alanının incelenmesinde iki farklı derinlikteki toprak sıcaklık ölçümlerinden faydalanmışlardır. Araştırmacılar seçilen zaman aralığında ısısal yayınının, toprak sıcaklığının anlık değişimine, yağış ve sulama gibi faktörlere göre günlük olarak düzensiz farklılıklar gösterdiğini, yıllık olarak ısısal yayınının  $2.57 \cdot 10^{-7} - 5.40 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$ ; 08 Ocak - 08 Mart; 01 Mayıs-30 Haziran; 01 Ekim-30 Kasım dönemlerinde ise sırasıyla  $4.47 \cdot 10^{-7} - 4.94 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$ ;  $3.57 \cdot 10^{-7} - 4.69 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$ ;  $4.46 \cdot 10^{-7} - 5.71 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  olduğunu saptamışlardır. Russell ve ark. (2015), toprakta yüzey enerji dengesinin hesaplanması yöntemlerine ısı akımının etkisini belirlemek üzere yaptıkları araştırmada, toprağın hacim ağırlığının, özgül ısı kapasitesinin, özgül ağırlığının, ısı iletkenliğinin, ısısal yayınının sırasıyla  $1.53 \text{ g m}^{-3}$ ;  $870 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $2.65 \text{ g m}^{-3}$ ;  $0.854 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ve  $2.947 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  olduğunu belirterek, deneysel sıcaklık değerlerine göre ısısal yayınımlarını hesaplamışlardır. Toprağın aşağı katmanlarında ısısal yayınının değişimi fazla olmamaktadır. Zhang ve ark. (2014) tarafından, 11 farklı noktadan alınan 337 toprak örneğini kullanarak yapılan bir araştırmada, 150 m derinlikte ısısal yayınımlarının 1.270-1.804  $\cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  arasında, 110 m derinlikte ise  $0.915-1.801 \cdot 10^{-6}$  aralığında olduğu gösterilmiştir. Hu ve ark. (2016), toprak sıcaklığının değerlendirilmesi için yaptıkları araştırmada, Fourier serisine dayanarak ısı iletkenliği denklemin yeni bir analitik çözümünü elde ederek, çözümün uygulanmasında gerekli olan ısısal yayınımlarını farklı yöntemlerle belirlemiş ve elde edilen değerlerin literatür (Liu, 2004; Tu ve Dai, 2008) bilgilerine yakın olduğunu ifade etmişlerdir. Zambra ve Moraga (2013), iki boyutlu enerji ve kütle difüzyonunu ifade eden matematiksel modelin uygulanmasında, ıslak ve kuru kum içeren topraklarda ısısal yayınımlarını sırasıyla  $4.944 \cdot 10^{-7}$  ve  $2.022 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  olduğunu belirlemişlerdir. Toprağın ısı enerjisinin kullanılmasına ait bazı mühendislik projelerindeki enerji tasarrufu, kirliliğin önlenmesi, düşük bakım maliyeti gibi faktörlerin incelenmesinde, termal mühendislik sistemlerinin tasarımında ısı kapasitesinin, ısı iletkenliğinin ve ısısal yayınının değerlendirilmesi

önemlidir (Esen ve Inalli, 2009; Bozzoli ve ark., 2011; Hu ve ark., 2012; Zheng ve ark., 2013; Stylianou ve ark., 2016). Wang (2012), tek bir derinlikten (8 cm) sıcaklık ölçümleri olarak toprağın termal alanının incelenmesinde, hacimsel ısı kapasitesini  $1.5 \cdot 10^6 \text{ Joule/m}^3 \text{ K}$ ; ısı iletkenliğini  $1.2 \text{ Watt/m K}$ ; ısısal yayınımlarını ise  $8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$  olarak belirlemiştir. Nkongolo ve ark. (2010) tarafından mera koşullarında yapılan bir araştırmada, topraktaki sera gazları ( $\text{CO}_2$ ;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ) ile termal özellikler (sıcaklık, ısı iletkenliği, termal direnç, ısısal yayınımların) birlikte değerlendirilmiştir. ısı iletkenliğiyle toprağın gözeneklilik, penetrasyon direnci, kum içeriği gibi kolaylıkla ölçülebilir parametreleri arasında da önemli fonksiyonel ilişkilerin yapılması mümkündür (Usovicz ve ark., 2008). Toprağın ısı iletkenliği, ısısal yayınımlarını, ısı kapasitesi gibi termal özellikleri sıcaklık dağılımının, toprakta profil boyunca sıcaklığın sönme derinliğinin ve gecikme zamanının, bir ve iki boyutlu ısı taşınımının teorik ve pratik olarak incelenmesinde de önemli olmaktadır (Chung ve Horton, 1987; Ekberli ve ark., 2015a,b; Ekberli ve Sarılar, 2015b; Sesveren ve ark., 2015).

Genel olarak, ısısal yayınımlarını katsayısı toprağın termal özelliklerine, iklim koşullarına, toprağın su içeriğine ve sıkışmasına, bitki örtüsüne, sıcaklığın toprak profili boyunca harmonik değişimine vb. faktörlere önemli düzeyde bağlı olup, deneysel ve teorik olarak belirlenmektedir (Zhang ve Osterkamp, 1995; McInnes ve ark., 1996; Hinkel, 1997; Rees ve ark., 2000; Tonietto ve Carbonneau, 2004; Sun ve ark., 2004; Lipiec ve ark., 2007; Ekberli ve Sarılar, 2015a).

Bu çalışmanın amacı, toprağın ısısal yayınımlarını katsayısının i) deneysel ve ii) doğrusal, üstel, eksponansiyel, parabolik fonksiyonlara göre hesaplanması; elde edilen sonuçlara göre derinlik boyunca toprak sıcaklık dağılımının belirlenmesi ve karşılaştırılmasıdır.

## 2. Materyal ve Yöntem.

Araştırmada, Samsun iline bağlı Bafra Meteoroloji İstasyonunda, 1 Mayıs 2012-31 Temmuz 2012 tarihleri arasında ölçülen 92 güne ait 460 adet klima rasadı değerinden faydalanılmıştır. Dünya Meteoroloji Teşkilatının koyduğu uluslararası standartlarda ve yüksek hassasiyete sahip alet ve cihazlarla yapılan bu rasatlarda günlük olarak ölçümü yapılan, 5; 10; 20; 50; 100 cm derinliğe ait toprak sıcaklık değerleri, çalışmada materyal olarak kullanılmıştır.

Sıcaklık dalgalarının toprak profili boyunca dağılımının belirlenmesinde, temel ısı taşınım

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (0 \leq x < \infty, t > -\infty) \quad (1) \text{ denkleminin;}$$

$\cos \omega t$ ,  $\sin \omega t$  fonksiyonları ile ifade olunan, toprak yüzeyinde ve  $x$  derinliğindeki sıcaklık değişimleri arasındaki faz değişimini de içeren sınır koşuluna göre

$$T(x, t) = T_0 + A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x} \cos\left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \omega t\right) \quad (2)$$

(burada,  $T_0$  -toprak yüzeyinin ortalama sıcaklığı, °C; A- amplitüt, °C;  $\omega = 2\pi / P$  -açısal frekans,  $\text{san}^{-1}$ ; a -ısısal yayınım katsayısı,  $\text{m}^2\text{sn}^{-1}$ ; x-toprak derinliği, cm; t-zaman, san; P-periyottur) çözümü kullanılmıştır (Nerpin ve Chudnovski, 1984; Monteith ve Unsworth, 1990; Hillel, 1998; Cichota ve ark., 2004; Gülser ve Ekberli, 2004; Ekberli, 2006; Gao ve ark., 2007; Lei ve ark., 2011; Evett ve ark., 2012; Arkhangelskaya, 2014; Arias-Penas ve ark., 2015; Hu ve ark., 2016; Badache ve ark., 2016).

Meteorolojik veriler kullanılarak, toprağın  $x_i - x_{i+1}$  katmanındaki ısısal yayınım katsayısı

$$a = \frac{\omega(x_i - x_{i+1})^2}{2(\ln(A_i / A_{i+1}))^2} \quad (i = 1, n) \quad (3)$$

(burada,  $A_i$  ve  $A_{i+1}$  uygun olarak toprağın  $x_i$  ve  $x_{i+1}$  derinliklerine ait sıcaklık amplitütüdür, °C) ifadesine göre hesaplanmıştır (Nerpin ve Chudnovski,

1984; Gülser ve Ekberli, 2004; Ekberli, 2006; Trombotto ve Borzotta, 2009; Correia ve ark., 2012; Ekberli ve Sarılar, 2015a; Arias-Penas ve ark., 2015). Ortalama ısısal yayınım ise, Mayıs-Temmuz, 2012 dönemlerinde elde edilen değerlere göre hesaplanmıştır.

Toprağın ısısal yayınımla ile derinlik arasındaki fonksiyonel ifadelerin belirlenmesinde, doğrusal ( $a(x) = bx + c$ ), eksponansiyel ( $a(x) = b \exp(cx)$ ), üstel ( $a(x) = bx^d$ ) ve parabolik ( $a(x) = bx^2 + cx + d$ ) ilişkilerden kullanılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Toprak sıcaklıklarının değerlendirilmesi

Samsun iline bağlı Bafra Meteoroloji İstasyonunda, 1 Mayıs 2012-31 Temmuz 2012 tarihleri arasında rasadı yapılan ve çalışma için kullanılan 92 güne ait 5, 10, 20, 50 ve 100 cm derinliklerindeki ortalama günlük sıcaklık değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Farklı toprak derinliklerindeki sıcaklık (°C) değerleri (01.05-31.07.2012)

Derinlik (cm)	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
5	18.1	33.4	24.77	4.09	16.51
10	18.5	31.5	24.10	3.68	15.32
20	18.1	29.8	23.88	3.48	14.84
50	16.2	25.5	21.93	3.13	14.42
100	14.1	22.3	20.59	2.73	14.24

Araştırma döneminde beş farklı toprak derinliğinde ölçülen en düşük (14.1 °C) toprak sıcaklığı 100 cm'de ve en yüksek (33.4 °C) toprak sıcaklığı ise 5cm'de belirlenmiştir. Toprak yüzeyinden daha derinlere doğru inildikçe minimum sıcaklıkta değişim azalmaktadır. Maksimum sıcaklıkta ise düşüş eğilimi görülmektedir. Minimum sıcaklıkta en düşük değer (14.1 °C) 100cm toprak derinliğinde gerçekleşmektedir. Toprakta ölçülen en yüksek ortalama toprak sıcaklığı (24.77 °C) 5 cm derinlikte, en düşük ortalama toprak sıcaklığı ise (20.59 °C) 100 cm derinlikte belirlenmiştir. Toprak yüzeyinden daha derinliklere doğru inildikçe ortalama sıcaklığın da azaldığı görülmektedir. Genel olarak, toprağın 50-100 cm katmanında sıcaklığın değişimi düşük düzeyde gerçekleşmektedir.

Toprak sıcaklığına ait standart sapma ve varyasyon katsayısı değerlerinin aşağı katmanlara inildikçe azalma eğilimi içerisinde olduğu görülmektedir. Toprak sıcaklığına ait standart sapma ve varyasyon katsayısı değerlerinin, 5 cm toprak derinliğinde en yüksek (sırasıyla 4.09 °C ve %16.51), 100 cm toprak derinliğinde ise en düşük değerlere ulaştığı (sırasıyla 2.73 °C ve %14.24) belirlenmiştir. Bu ise aşağı

katmanlara inildikçe günlük sıcaklık değişiminin azaldığını göstermektedir.

#### 3.2. Toprağın ısısal yayınımla deneysel ve fonksiyonel olarak değerlendirilmesi

Toprakta ısı taşınımını ifade eden (1) denkleminin, uygun sınır koşullarına bağlı olarak elde edilen (2) çözümünden bulunan (3) ifadesine göre, meteorolojik veriler kullanılarak hesaplanan ısısal yayınım katsayıları ( $a$ ) Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'den görüldüğü gibi, dört farklı toprak katmanında hesaplanan en düşük ısısal yayınım ( $1.98 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{sn}^{-1}$ ) toprağın 5-10 cm katmanında belirlenmiştir. Genel olarak, toprağın 20-50 cm ve 50-100 cm katmanlarında ise ısısal yayınım daha yüksek olmaktadır. Toprak yüzeyinden aşağı katmanlara inildikçe ısısal yayınım değerlerinde artış eğilimi görülmekte ve değişim aralığı daha fazla olmaktadır.

Araştırma döneminde, toprağın 50-100 cm katmanında ise, ısısal yayınımdaki değişim ( $14.51 \cdot 10^{-6} - 18.91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{sn}^{-1}$ ) sabitleşme eğilimindedir.

Çizelge 2. Farklı toprak derinliklerindeki amplitüt (°C) ve ısısal yayınım (m<sup>2</sup> sn<sup>-1</sup>) değerleri

Derinlik, cm	01.05-31.05.2012		01.06-30.06.2012		01.07.-31.07.2012		Ortalama
	$A_i/A_{i+1}$	$a$	$A_i/A_{i+1}$	$a$	$A_i/A_{i+1}$	$a$	
5-10	2.9/2.5	$4.13 \cdot 10^{-6}$	3.9/3.4	$4.83 \cdot 10^{-6}$	5.7/4.6	$1.98 \cdot 10^{-6}$	$3.65 \cdot 10^{-6}$
10-20	2.5/2.0	$7.30 \cdot 10^{-6}$	3.4/2.8	$9.64 \cdot 10^{-6}$	4.6/3.5	$4.87 \cdot 10^{-6}$	$7.27 \cdot 10^{-6}$
20-50	2.0/1.1	$9.15 \cdot 10^{-6}$	2.8/1.8	$16.76 \cdot 10^{-6}$	3.5/2.1	$12.54 \cdot 10^{-6}$	$12.82 \cdot 10^{-6}$
50-100	1.1/0.5	$14.62 \cdot 10^{-6}$	1.8/0.9	$18.91 \cdot 10^{-6}$	2.1/1.0	$16.51 \cdot 10^{-6}$	$16.68 \cdot 10^{-6}$

$A_i/A_{i+1}$ 'de  $A_i$  -  $x_i$  derinlikteki,  $A_{i+1}$  ise  $x_{i+1}$  derinlikteki amplitütlerdir (°C)

Toprağın yukarı katmanlarında sıcaklığın yüksek olması (toprağın ısı kapasitesine yakın) ısısal yayınının düşük olmasına neden olan faktörlerdendir. Aşağı katmanlarda sıcaklık değerleri düşük, dolayısıyla ısı akımı sanki sürekli olduğundan, ısısal yayınım daha yüksek olmaktadır. Toprakta ısısal yayınının değişimi, katman kalınlığına, katman yüzeyindeki amplitüt değerlerine,  $A_i/A_{i+1}$  oranına da önemli düzeyde bağlı olmaktadır. Araştırma dönemindeki iklim koşullarının değişimi, katmanların farklı toprak özelliklerine sahip olması, ısısal yayınım katsayılarının değişimine etki yapmaktadır.

Isısal yayınının zamana göre değişiminin belirlenmesi karmaşık bir süreçtir. Toprakta sıcaklık değişiminin ve ısı taşınımı denkleminin çözümüne bağlı olarak tahmininin incelenmesinde, ısısal yayınım zamana göre genel olarak sabit kabul edilmektedir (Arkhangelskaya, 2014; Arias-Penas ve ark., 2015; Ekberli ve Sarılar, 2015a). Toprağın aşağı katmanlarına doğru inildikçe, toprağın fiziksel özellikleri farklılık göstermekte ve ısısal yayınının değişimine önemli düzeyde etki yapmaktadır. Bu nedenle, ısısal yayınının değerlendirilmesinde toprak derinliklerinin göz önüne alınması gerekir.

Isısal yayınım pulluk tabakası dışındaki toprağın diğer horizonlarında nem içeriği tarla kapasitesindeyken başlangıçta hızlı bir artış (doğrusala çok yakın) göstererek maksimum değerler almakta, doygunluk noktasında ise daha düşük değerlere ulaşmaktadır. Toprak nem içeriğinin azalması ile ısısal yayınının da azaldığı bilinmektedir (Şapovalov, 1962; Kurtener, Çudnovski, 1979; Voronin, 1986; Özdemir, 1998; Ekberli ve ark., 2005c). Isısal yayınının toprak derinliklerine doğru değişiminin farklılık göstermesi, bu değişimin doğrusal, eksponansiyel, üstel veya parabolik ilişkilerle ifade edilmesine olanak sağlayabilir.

Toprağın 50 cm derinliğine doğru ısısal yayınım hızlı olarak artmakta, sonra ise bu artış azalarak, yaklaşık sabitleşme sürecine geçmektedir. Bu nedenle, toprak derinliği (0.05-0.50 m) ve ısısal yayınım katsayısı arasındaki ilişkiler doğrusal (4), eksponansiyel (5), üstel (6) ve parabolik (7) fonksiyonlar biçiminde aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$a(x) \cdot 10^6 = 18.132x + 4.099 \quad (R^2 = 0.90) \quad (4)$$

$$a(x) \cdot 10^6 = 4.548e^{1.951x} \quad (R^2 = 0.77) \quad (5)$$

$$a(x) \cdot 10^6 = 22.638x^{0.658} \quad (R^2 = 0.96) \quad (6)$$

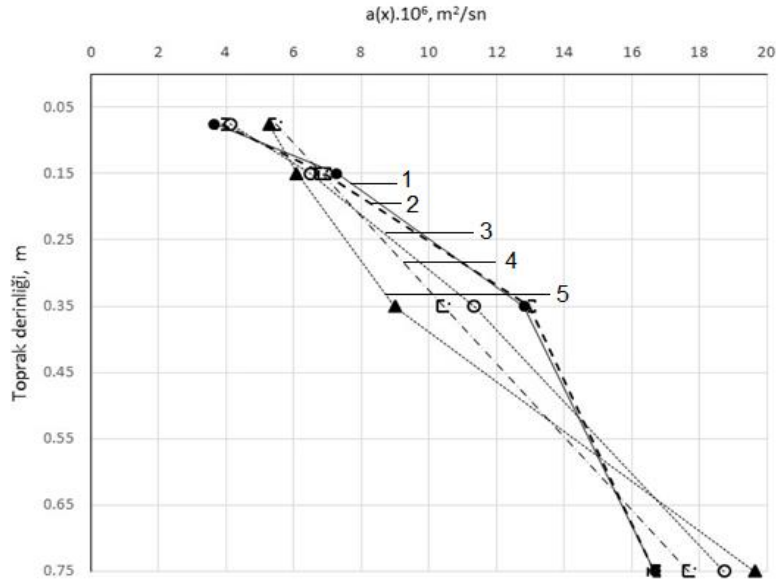
$$a(x) \cdot 10^6 = -35.269x^2 + 48.013x + 0.489 \quad (R^2 = 0.99) \quad (7)$$

Isısal yayınımına ait deneysel (meteorolojik) değerler ( $a_d$ ) ile doğrusal (4), eksponansiyel (5), üstel (6) fonksiyonlarla hesaplanan ( $a_h$ ) değerler arasındaki ortalama nispi hatalar  $\left(\frac{|a_d - a_h|}{a_h} \cdot 100\right)$  çok yüksek, parabolik (7) fonksiyonla hesaplanan değerler arasındaki nispi hata ise düşük olup, sırasıyla %18.64; %31.06; %14.71 ve %7.79 olarak bulunmuştur.

Toprak yüzeyi yakınlığında ısısal yayınımındaki artışın toprak derinlikleri ile karşılaştırıldığında daha fazla değişim göstermesi, parabolik fonksiyon dışındaki fonksiyonlar ile sürecin ifadesinde daha yüksek nispi hataların bulunmasına neden olmuştur. Isısal yayınının toprak ve iklim koşullarına bağlı olan toprak derinliği boyunca değişiminin karakteristik özelliği parabolik fonksiyon ile daha iyi ifade edilmiştir. Kısa zaman aralıklarında ve sıcaklığın günlük değişiminde de ısısal yayınının parabolik fonksiyonla daha iyi ifade edildiği belirlenmiştir.

Isısal yayınının (4) - (7) fonksiyonlarına göre elde edilen değerleri (Şekil 1) göz önüne alınarak, (2) çözümüne göre hesaplanan ortalama toprak sıcaklık değerleri ise Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3'de görüldüğü gibi, (4) - (7) fonksiyonlarından hesaplanan ısısal yayınım değerleri için belirlenen toprak sıcaklık değerleri ile deneysel sıcaklık değerleri arasındaki nispi hata çok düşük olup, %2.50 - %2.83 arasında değişmektedir. Parabolik fonksiyonla belirlenen topraktaki ısısal yayınım katsayıları deneysel veriler ile en düşük nispi hatayı vermesinin rağmen, diğer fonksiyonlar ile belirlenen ısısal yayınım katsayılarının kullanılması ile hesaplanan ortalama toprak sıcaklık değerleri de meteorolojik değerlere çok yakın sonuçlar vermiştir. Bu durum toprak sıcaklığı değerlerinin teorik olarak belirlenmesinde sadece ısısal yayınım katsayısının etkili olmadığını, ortalama toprak sıcaklığı ve amplitüt gibi termal özelliklerinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. Isısal yayınının ( $a(x) \cdot 10^6, m^2/sn$ ) toprak derinliğine bağlı olarak değişimi  
1-Deneysel; 2-Parabolik, 3-Üstel, 4-Doğrusal, 5- Eksponansiyel

Çizelge 3. Doğrusal, eksponansiyel, üstel ve parabolik fonksiyonlara göre belirlenen ısısal yayınının ( $a$ ) katsayıları ile hesaplanan ortalama toprak sıcaklık değerleri

Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)				
	Deneysel (meteorolojik)	Doğrusal	Eksponansiyel	Üstel	Parabolik
0.05	24.77	25.13	25.13	24.77	25.11
0.10	24.10	24.37	24.37	24.36	24.36
0.20	23.88	24.05	24.04	24.05	24.05
0.50	21.93	21.98	21.97	21.98	21.98
1.00	20.59	20.60	20.60	20.60	20.59

#### 4. Sonuç

Toprak ve iklim koşullarına bağlı olarak, ısısal yayının toprak profili boyunca hızlı değişim gösterdiğinden, ısısal yayının katsayısının (3) teorik ifadesinin yanı sıra doğrusal, eksponansiyel, üstel veya parabolik fonksiyonlarla da belirlenmesi mümkün gözükmektedir. Toprak katmanlarındaki ortalama sıcaklık ve amplitüt ısısal yayınının ve sıcaklık değişiminin belirlenmesinde gerekli termal parametrelerdir. Isısal yayını ifade eden fonksiyonlar arasındaki farklılıklara rağmen, sıcaklığın dağılımında ortalama katman sıcaklığı daha etkili olduğundan, deneysel ve hesaplanan sıcaklık değerleri önemli düzeyde yakın olmaktadır. Toprak sıcaklığının teorik olarak ifade edilmesinde parabolik fonksiyonun kullanılması ile elde edilen ısısal yayının katsayısı, farklı toprak katmanları için deneysel verilerle elde edilen değerlere çok yakın bulunmuş ve en düşük nispi hatayı vermiştir. Bölge topraklarında sıcaklık değişiminin tahmininde, ısı taşınımı denkleminin uygulanmasında gerekli olan ısısal yayınının

hesaplanması için farklı fonksiyonel ilişkilerin kullanılması mümkün gözükmektedir.

#### Kaynaklar

- Arias-Penas, D., Castro-Garcia, M.P., Rey-Ronco, M.A., Alonso-Sanchez, T., 2015. Determining the thermal diffusivity of the ground based on subsoiltemperatures. Preliminary results of an experimental geothermalborehole study Q-THERMIE-UNIOVI. *Geothermics*, 54: 35-42.
- Arkhangelskaya, T.A., 2014. Diversity of thermal conditions within the paleocryogenic soil complexes of the East European Plain: The discussion of key factors and mathematical modeling. *Geoderma*, 213: 608-616.
- Badache, M., Eslami-Nejad, P., Ouzane, M., Aidoun, Z., Lamarche, L., 2016. A new modeling approach for improved ground temperature profile determination. *Renewable Energy*, 85: 436-444.
- Bozzoli, F., Pagliarini, G., Rainieri, S., Schiavi, L., 2011. Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP (two-step parameter estimation procedure) applied to TRT (thermal response test) data. *Energy*, 36(2): 839-846.

- Chung, S.O., Horton, R., 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.*, 23(12): 2175-2186.
- Cichota, R., Elias, E.A., de Jong van Lier, Q., 2004. Testing a finitedifference model for soil heat transfer by comparing numerical and analytical solutions. *Environmental Modelling & Software*, 19: 495-506.
- Correia, A., Vieira, G., Ramos, M., 2012. Thermal conductivity and thermal diffusivity of cores from a 26 meter deep borehole drilled in Livingston Island, Maritime Antarctic, *Geomorphology*, 155-156: 7-11.
- Cote, J., Konard, J.M., 2005. Thermal conductivity of base-course materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42: 61-78.
- de Vries, D.A., 1963. Thermal properties of soils. In: van Wijk, W. R. (Ed.), *Physics of Plant Environment* North Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands, pp. 210-235.
- Ekberli, İ., 2006. Isı iletkenlik denkleminin çözümüne bağlı olarak topraktaki ısı taşınımına etki yapan bazı parametrelerin incelenmesi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(2): 179-189.
- Ekberli, İ., Gülser, C., Mamedov, A., 2015b. Toprakta bir boyutlu ısı iletkenlik denkleminin incelenmesinde benzerlik teorisinin uygulanması. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 10(2): 69-79.
- Ekberli, İ., Gülser, C., Özdemir, N., 2015a. Toprakta ısı iletkenliğine etki yapan ısısal parametrelerin teorik incelemesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(3): 300-306.
- Ekberli, İ., Gülser, C., Özdemir, N., 2005c. Toprakların termofiziksel özellikleri ve ısısal yayılım katsayısının değerlendirilmesi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(2): 85-91.
- Ekberli, İ., Sarılar, Y., 2015a. Toprak sıcaklığı ve ısısal yayılımının belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(1): 74-85.
- Ekberli, İ., Sarılar, Y., 2015b. Toprak sıcaklığının profil boyunca sönme derinliğinin ve gecikme zamanının belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 52(2):219-225.
- Esen, H., Inalli, M., 2009. In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ, Turkey. *Energy and Buildings*, 41(4): 395-401.
- Evelt, S.R., Agam, N., Kustas, W.P., Colaizzi, P.D., Schwartz, R.C., 2012. Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux: Comparison to soil heat flux plates. *Advances in Water Resources*, 50: 41-54.
- Faitli, J., Magyar, T., Erdelyi, A., Muranyi, A., 2015. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 36: 213-221.
- Gao, Z., Bian, L., Hu, Y., Wan, L., Fan, J., 2007. Determination of soil temperature in an arid region. *Journal of Arid Environments*, 71: 57-168.
- Gülser, C., Ekberli, İ., 2004. A comparison of estimated and measured diurnal soil temperature through a clay soil depth. *Journal of Applied Sciences*, 4(3): 418-423.
- Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, New York, 771 pp.
- Hinkel, K.M. 1997. Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. *Cold Reg. Sci. Technol.* 26: 1-15.
- Huang, F., Zhan, W., Ju, W., Wang, Z., 2014. Improved reconstruction of soil thermal field using two-depth measurements of soil temperature. *Journal of Hydrology*, 519: 711-719.
- Hu, G., Zhao, L., Wu, X., Li, R., Wu, T., Xie, C., Qiao, Y., Shi, J., Li, W., Cheng, G., 2016. New Fourier-series-based analytical solution to the conduction-convection equation to calculate soil temperature, determine soil thermal properties, or estimate water flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95: 815-823.
- Hu, P.F., Meng, Q.F., Sun, Q.M., Zhu, N., Guan, C.S., 2012. A method and case study of thermal response test with unstable heat rate. *Energy and Buildings*, 48: 199-205.
- Kasubuchi, T., 1984. Heat conduction model of saturated soil and estimation of thermal conductivity of soil solid phase. *Soil Science*, 138: 240-247.
- Kurtener D.A., Çudnovski A.F., 1979. *Agrometeorologičeskiye osnovı teplovoy meliorasii poçv*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 231s.
- Lei, S., Daniels, J. L., Bian, Z., Wainaina, N., 2011. Improved soil temperature modeling. *Environmental Earth Sciences*, 62(6): 1123-1130.
- Lipiec, J., Usowicz, B., Ferrero, A., 2007. Impact of soil compaction and wetness on thermal properties of sloping vineyard soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50: 3837-3847.
- Liu, S., 2004. *Environmental Physics*, Chemical Industry Press, Beijing.
- Lu, S., Ren, T., Gong, Y., Horton, R., 2007. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 71: 8-14.
- McInnes, K.J., Heilman, J.L., Lascano, R.J., 1996. Aerodynamic conductances at the soil surface in a vineyard, *Agric. For. Meteorol.*, 79: 29-37.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 1990. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 291 pp.
- Nerpin, S.V., Chudnovskii, A.F., 1984. *Heat and Mass Transfer in the Plant-Soil-Air System*. Translated from Russian. Published for USDA and National Sci. Found., Washington. D.S., by Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, India, 355 pp.
- Nkongolo, N.V., Johnson, S., Schmidt, K., Eivazi, F., 2010. Greenhouse gases fluxes and soil thermal properties in a pasture in central Missouri. *Journal of Environmental Sciences*, 22(7): 1029-1039.
- Özdemir, N., 1998. *Toprak fizikiği*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Ders Kitabı No: 30, s: 191-209.
- Rees, S.W., Adjali, M.H., Zhou, Z., 2000. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 4: 213-265.
- Russell, E.S., Liu, H., Gao, Z., Finn, D., Lamb, B., 2015. Impacts of soil heat flux calculation methods on the surface energy balance closure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215: 189-200.
- Saito, T., Hamamoto, S., Mon, E.E., Takemura, T., Saito, H., Komatsu, T., Moldrup, P., 2014. Thermal properties of boring core samples from the Kanto area, Japan: Development of predictive models for thermal conductivity and diffusivity. *Soils and Foundations*, 54(2): 116-125.
- Sesveren, S., Sariyev, A., Tulun, Y., 2015. Amplitude and damping depth in soil solarization under different applications. *International soil science congress on "Soil*

- science in international year of soils 2015". 19-23 October 2015 Sochi, Russia. Article book, pp. 378-381.
- Stylianou, I.I., Tassou, S., Christodoulides, P., Panayides, I., Florides, G., 2016. Measurement and analysis of thermal properties of rocks for the compilation of geothermal maps of Cyprus. *Renewable Energy*, 88: 418-429.
- Sun, B., Xu, X., Lai, Y., Li, D., Wang, S., Zhang, J., 2004. Experimental researches of thermal diffusivity and conductivity in embankment ballast under periodically fluctuating temperature. *Cold Regions Science and Technology*, 38: 219-227.
- Şapovalov, V.V., 1962. Vliyaniye peremennogo haraktera koeffitsienta temperaturoprovodnosti počvi na ee temperaturu. *İnjenerno-fiziceskiy jurnal*, 5(1):64-71.
- Tonietto, J., Carbonneau, A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide, *Agric. For. Meteorol.*, 124: 81-97.
- Trombotto, D., Borzotta, E., 2009. Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rockglacier, Central Andes of Mendoza, Argentina. *Cold Regions Science and Technology*, 55: 321-330.
- Tu, X., Dai, F., 2008. Analytical solution for one-dimensional heat transfer equation of soil and, evaluation for thermal diffusivity, *Chin. J. Geotech. Eng.*, 30(5): 652-657.
- Usovich, B., Lipiec, J., Usovich, J.B., 2008. Thermal conductivity in relation to porosity and hardness of terrestrial porous media. *Planetary and Space Science*, 56: 438-447.
- Voronin, A.D., 1986. *Basic Physics of Soils* (Mosk. Gos. Univ., Moscow), 246 p. (in Russian)
- Wang, Z.H., 2012. Reconstruction of soil thermal field from a single depth measurement. *Journal of Hydrology*, 464-465: 541-549.
- Zambra, C.E., Moraga, N.O., 2013. Heat and mass transfer in landfills: Simulation of the pile self-heating and of the soil contamination. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66: 324-333.
- Zhang, T., Osterkamp, T.E., 1995. Considerations in determining thermal diffusivity from temperature time series using finite difference methods. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 23: 333-341.
- Zhang, Y., Gao, P., Yu, Z., Fang, J., Li, C., 2014. Characteristics of ground thermal properties in Harbin, China. *Energy and Buildings*, 69: 251-259.
- Zheng, X., Zhang, L., Ren, Q., Qian, H., 2013. A thermal response method of calculating a soil's thermal properties when backfill material information is unavailable. *Energy and Buildings*, 56: 146-149.