

Araştırma/Research

Anadolu Tarım Bilim. Derg./Anadolu J Agr Sci, 33 (2018)
ISSN: 1308-8750 (Print) 1308-8769 (Online)
doi: 10.7161/omuanajas.371463

Faz değişimine bağlı olarak ısı iletkenliği denkleminin incelenmesi ve toprak neminin ısısal yayınıma etkisi

Coşkun Gülser^a, İmanverdi Ekberli^{a*}, Amrakh Mamedov^b Nutullah Özdemir^a

^aOndokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Atakum/ Samsun

^bArid Land Research Center, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, Japan

*Sorumlu yazar/corresponding author: iman@omu.edu.tr

Geliş/Received 26/12/2017

Kabul/Accepted 06/08/2018

ÖZET

Isı iletkenlik denkleminin farklı toprak katmanlarına uygulanmasında, toprak sıcaklığındaki faz değişiminin dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada, farklı toprak katmanları için ısı iletkenlik denkleminin çözümünde faz değişimi dikkate alınarak, çözümün günlük toprak sıcaklık değişiminin tahmininde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Toprağın 10, 20 ve 50 cm derinliklerinde, ısı iletkenlik denkleminin çözümü ile hesaplanan ve ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki hata kareler ortalamasının karekökü, mutlak hata, maksimum nispi hata, ortalama yanılğı hatası, uygunluk indeksi ve modelin etkinliği hesaplanmıştır. İstatistiksel değerlendirmeler, ısı iletkenlik denkleminin faz değişimini içeren sınır koşulundaki çözümünün, toprak derinliği boyunca günlük sıcaklık değişiminin tahmininde kullanılabilirliğini göstermektedir. Toprağın ısısal yayınıma katsayısı artan toprak nemine bağlı olarak azalan artış göstermekte, ısısal yayınıma ve nem arasındaki ilişkinin ise parabolik fonksiyonla ifadesi mümkün gözükmemektedir.

Anahtar Sözcükler:
Toprak sıcaklığı
Isı iletkenlik denklemi
Isısal yayınıma
Nem

Investigating of heat conductivity equation with consideration of phase change and effect of soil moisture on heat diffusivity

ABSTRACT

Phase change in soil temperature should be taken into account in application of heat conductivity equation to different soil layers. In this study, applicability of the solution in daily soil temperature change was provided with consideration of phase change in the heat conductivity equation. Root mean square error, absolute error, maximum relative error, mean bias error, and conformity index between measured and estimated temperature values of the solution of heat conductivity equation, and efficiency of the model were calculated at 10, 20 and 50 cm depths of soil. Results of statistical evaluations showed that solution of heat conductivity equation within the given boundary condition, including phase change, can be used for the prediction of daily temperature change along with soil depth. Soil heat diffusivity showed declining increase with increasing in soil moisture content, and the relationship between heat diffusivity and moisture can be expressed by the parabolic function.

Keywords:
Soil temperature
Heat conductivity
Heat diffusivity
Moisture

© OMU ANAJAS 2018

1. Giriş

Toprak sıcaklığının optimum düzeyde olması, toprak verimliliğinin artırılması, bitki gelişimi, ekim zamanının belirlenmesi vb. için önemlidir. Sürekli olarak atmosfer olayları etkisinde olan toprakta sıcaklığın değişimi, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine etki yapmaktadır. İklim koşullarının değişimine bağlı olarak, toprak yüzeyinde ve dolayısıyla aşağı katmanlarında sıcaklığın değişimi farklılık göstermektedir. Toprak profili boyunca sıcaklık

değerlerinin farklı olması, toprakta ısı iletkenliğine neden olmaktadır. Sıcaklık dağılımının katmanlar için nicel olarak değerlendirilmesi toprağın ısı iletkenliği denklemleri ile mümkün olabilmektedir.

Toprak sıcaklığı, arazi ile atmosfer arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan önemli bir faktördür. Temel olarak, toprağın fiziksel süreçleri, atmosfer ile olan kitle alışverişinin hızlarını ve yönlerini belirler. Davidson ve Janssens (2006), Chen ve ark. (2013), Rafique ve ark. (2014) ve Yvon-Durocher ve ark. (2014), toprak sıcaklığının toprağın

biyojeokimyasal süreçlerine ve karbon dioksit salınımına da etki ettiğini göstermişlerdir. Toprakta sıcaklık değişiminin tahmini ve ısı iletiminin değerlendirilmesi, ısı iletenliği denkleminin uygulanması ile mümkün olup, çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır (Chacko ve Renuka, 2002; Elias ve ark., 2004; Gulser ve Ekberli 2004; Ekberli ve Sarılar, 2014; Lei ve ark., 2011; Liang, 2017; Knight ve ark., 2018). Chacko ve Renuka (2002), ısı iletenlik modelini toprağın farklı derinliklerinde 36 saatlik sıcaklık tahmininde kullanmışlardır.

Toprak yüzeyi ve derinliği boyunca toprak özelliklerinin değişiminin araştırılmasında, toprak sıcaklığının değerlendirilmesi önemlidir. Sıcaklığın tahmini için modellerin kullanılmasında ise, toprağın diğer ısıl parametreleri ile beraber ısıl yayılım katsayısının belirlenmesi de gereklidir (Van Wijk, 1963; Farouki, 1981; Camillo ve ark., 1983; Novak ve Black, 1985; Milly, 1986; Passerat de Silans ve ark., 1989; Braud ve ark., 1995; Ekberli ve ark., 2015a; Ekberli ve Gülser, 2015; Ekberli ve Sarılar, 2015b). Isıl yayılım katsayısının belirlenmesinde teorik ve ampirik modellerden kullanılmaktadır (Lettau, 1954; de Vries, 1963; Johansen, 1975; Passerat de Silans ve ark., 1996). Isı iletenliği ve ısı yayılımı hacimsel ısı kapasitesi ile ilişkili olduğundan, yalnızca birinin belirlenmesi mümkündür. Isıl yayılım ısı iletimi sürecini daha iyi açıkladığından, genellikle ısıl yayılımın belirlenmesi tercih edilmektedir.

Toprakların ısıl özellikleri, dolayısıyla ısıl yayılım katsayısı; deneysel, laboratuvar yöntemleri ile ve matematiksel modellerle belirlenebilmektedir. Deneysel ve laboratuvar yöntemleri zaman alıcı, zahmetli ve büyük ölçekli uygulamalar için zordur. Bazı araştırmalarda ise, ısıl yayım ile toprağın tekstür, hacim ağırlığı, su içeriği, organik madde, toprak sıcaklığı vb. gibi kolay belirlenebilen özellikleriyle oluşturulan pedotransfer fonksiyonlar kullanılmıştır (Tombul ve ark., 2004; Dashtaki ve ark., 2010; Guber ve Pachepsky, 2010; Vereecken ve ark., 2010; Ekberli ve ark., 2017; Mengistu ve ark., 2017; Zhang, 2017).

Toprağın ısı yayılımı karmaşık bir süreç olup, ısı yayılımına diğer toprak özellikleriyle beraber nem miktarı da önemli düzeyde etki yapmaktadır (Smits et al., 2009; Oladunjoye ve Sanuade, 2012; Oladunjoye ve ark., 2013; Rubio, 2013; Busby, 2015; Ekberli ve Gülser, 2016; Rozanski ve Stefaniuk, 2016). Mengistu ve ark. (2017) tarafından, toprağın ısı özelliklerine toprak nemi ve sıcaklığın etkisine ait yapılan bir araştırmada, toprak neminin artışına bağlı olarak, ısıl yayılımın azalan artış gösterdiği saptanmıştır.

Bu çalışmanın başlıca amaçları; i) temel ısı iletenliği denkleminin, toprak yüzeyinde ve herhangi bir derinliğindeki sıcaklık değişimleri arasındaki faz değişimini de içeren sınır koşuluna göre irdelenmesi, ii) denklemin çözümü ile hesaplanan ve ölçülen sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması ve iii) toprağın nem içeriği ve ısıl yayılım katsayısı arasındaki ilişkinin araştırılmasıdır.

2. Materyal ve Yöntem

Toprak sıcaklığı ölçümleri Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kampus Yerleşim sahası Ziraat Fakültesinin deneme alanında, 2mx3m parsel büyüklüğünde 12.04-17.06.2005 tarihleri arasında yapılmıştır. Deneme alanı 41° 21.86' Kuzey, 36°11.41' Doğu koordinatlarında, deniz seviyesinden 187 m yükseklikte yer almaktadır.

Toprak sıcaklığı 9⁰⁰, 11⁰⁰, 13⁰⁰, 15⁰⁰, 17⁰⁰, 19⁰⁰ saatlerinde cıvalı cam termometre ile (Sterling and Jaskson, 1986) 10; 20, 50 cm toprak derinliğinde, toprak nemliliği ise 3 günde bir aynı derinliklerden alınan örneklerde gravimetrik olarak belirlenmiştir. Toprakların kil, silt ve kum içerikleri hidrometre yöntemine göre (Demiralay, 1993), organik madde (OM) kapsamı modifiye Walkley-Black yaş yakma yöntemine göre saptanmıştır (Kacar, 1994). Toprakların elektriksel iletkenlik değerleri (EC_{25,4°C}) 1:1 toprak:su süspansiyonunda, CaCO₃ miktarı "Scheibler Kalsimetresi" kullanılarak hacim esasına göre belirlenmiştir (Hızalan ve Ünal, 1966).

Sıcaklık dalgalarının toprak derinliği boyunca dağılımının teorik belirlenmesinde ise, temel ısı taşınım denkleminin; $\cos \omega t$, $\sin \omega t$ (burada, $\omega = 2\pi/P$ - açısal frekans, s^{-1} ; t-zaman, sn; P -periyottur) fonksiyonları ile ifade olunan, toprak yüzeyinde ve x derinliğindeki sıcaklık değişimleri arasındaki faz değişimini de içeren sınır koşuluna göre elde edilen çözümü kullanılmıştır.

2.1. İstatistiksel analizler

Standart sapma (σ), değişim veya varyasyon katsayısı (VK) sırasıyla aşağıdaki (1) ve (2) ifadeleri ile belirlenmiştir:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$VK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\bar{X}}} \quad (2)$$

(burada, X_i - ölçülen veya tahmin edilen değerler;

\bar{X} - ölçülen veya tahmin edilen değerlerin ortalaması; n - ölçülen veya tahmin edilen değerlerin sayıdır). Genel olarak, standart sapmanın küçük olması ortalamadan sapmaların ve riskin az, büyük olması ise ortalamadan sapmaların ve riskin çok olduğunun göstergesidir. Varyasyon veya değişim katsayıları karşılaştırıldığında, değişim katsayısı küçük olan verilerde dağılımın aritmetik ortalama etrafında daha yoğun dağıldığı anlaşılır.

Hata kareler ortalamasının karekökü (HKOK veya RMSE), mutlak hata (MH veya MAE), maksimum nispi

hata (MNH veya MRE), ortalama aritmetik hata (OAH ve ya MBE), uygunluk indeksi (d), modelin etkinliği (ME) sırasıyla aşağıdaki (3)-(8) ifadeleri kullanılarak hesaplanmıştır:

$$HKOK = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

(burada, n - verilerin sayı ve $n < 30$ ise $m = n - 1$, $n > 30$ ise $m = n$; x_i - hesaplanan; y_i - ölçülen değerlerdir)

$$MH = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (4)$$

$$MNH = \max_{i=1,2,3,\dots,n} \left(\frac{|x_i - y_i|}{y_i} \right) \quad (5)$$

$$OAH = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i}{n} \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \quad (7)$$

(burada \bar{x} ve \bar{y} sırasıyla hesaplanan ve ölçülen değerlerin ortalamasıdır)

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Hata kareler ortalamasının karekökü (HKOK), tahmin hatalarının standart sapmasını ifade etmektedir. MH ve MNH değerlerinin sıfıra yakın olması tercih edilmektedir. OAH'nın sıfıra yakın olması, tahmin ve gerçek değerler arasındaki farkın az olduğunu göstermektedir. Pozitif veya negatif bir değer ise, sırasıyla aşırı tahmin veya düşük tahminin bir göstergesidir.

Uygunluk indeksi (d) modelin geçerliliğinin bir göstergesi olup, d 'nin 1'e yakın olması modelin uygulanabilirliğini göstermektedir. Krause ve ark. (2005) tarafından, deneysel hidrolojik modele yönelik bir araştırmada, ME değerlerinin 1 (mükemmel uyum) ile $-\infty$ arasında değiştiği gösterilmiş; ME'nin sıfırdan küçük olması durumunda ise ölçülen ortalama değer, hesaplanan değerden daha etkin olduğu belirtilmiştir. d ve ME'nin analitik ifadelerinin karşılaştırılmasından da görüldüğü gibi, genel olarak d değeri ME'den büyük olmaktadır (Willmott, 1981; Willmott ve

Matsuura, 2005; Krause ve ark., 2005; Willmott ve ark., 2012; Banimahd ve Zand-Parsa, 2013; Usowicz ve ark., 2013; Kumar ve ark., 2015; Wang ve ark., 2016).

3. Bulgular ve Tartışma

Araştırmada kullanılan toprağın 0-20 cm katmanı killi (C), 20-50 cm katmanı ise kumlu-tınlı (SL) olup, tuzluluk problemi bulunmamaktadır. Organik madde içeriği ise orta (0-20 cm katmanında) ile çok az (20-50 cm katmanda) arasında değişmektedir. Toprakta CaCO_3 miktarı az olup, ancak 40-50 cm katmanında çok az birikme gözükmemektedir.

3.1. Toprak katmanında sıcaklık değişiminin teorik olarak belirlenmesi

Toprağın yüzey sıcaklığı periyodik olarak sürekli değişmekte ve aşağı toprak katmanlarındaki sıcaklık dağılımına etki yapmaktadır. Toprak sıcaklığı zamanın ve derinliğin bir fonksiyonu olup, toprağın ısı iletkenliğinin kısmi türevli diferansiyel denklemi ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (0 \leq x < \infty, t > -\infty) \quad (9)$$

[burada, $T(x, t)$ - toprak sıcaklığı, t - zaman, sn; a - ısıl yayılım katsayısı, $\text{cm}^2 \text{sn}^{-1}$; x - mesafe, cm].

Yarı sonsuz toprak ortamının ($x \geq 0$) sınırında ($x = 0$) sıcaklığın (T_y) periyodik değişimi (sınır koşulu) zamanın fonksiyonu olarak, $T_y(0, t) = T_0 + A \cos \omega t$ (10) (burada, T_0 - toprak yüzeyinin ortalama sıcaklığı, $^\circ\text{C}$; A - amplitüt, $^\circ\text{C}$; $\omega = 2\pi/P$ - açısal frekans, sn^{-1} ; P - periyottur) biçimindedir. İkinci sınır koşulu olarak, $T \rightarrow T_0, x \rightarrow \infty$ (11), yani büyük toprak derinliğinde sıcaklığın ortalama yüzey sıcaklığına yaklaştığı kabul edilir.

(9) denklemi, (10) ve (11) sınır koşullarına göre, değişkenlerine ayırma yöntemiyle çözülür:

$$T(x, t) = T_0 + X(x)T'(t) \quad (12)$$

$T'(t)$ geçici değişkeninin ancak $\cos \omega t$ 'ye eşit olması varsayımında, yüzey altı topraktaki sıcaklık değişimiyle yüzey sıcaklık değişimi aynı olur. Yani $T'(t) = \cos \omega t$ durumunda, sıcaklığın maksimum ve minimum değerleri tüm derinliklerde aynı zamanda gerçekleşmektedir. Pratikte ise, farklı derinliklerde sıcaklık dağılımı faz değişimi ile oluşmaktadır. Böyle ki, herhangi bir toprak derinliğinde sıcaklık dalgalarının periyoduna uygun olan maksimum sıcaklık, yüzey sıcaklığı ile karşılaştırıldığında, gecikmekte ve belirli bir zamandan sonra gerçekleşmektedir. Toprak yüzeyinde ve x derinliğindeki sıcaklık değişimleri arasındaki faz değişiminin göz önüne alınması için,

$T'(t)$ değişkeninin $\cos \omega t$ ve $\sin \omega t$ fonksiyonları ile ifade edilmesi gerekmektedir. Bu durumda, (12) ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$T(x, t) = T_0 + X_1(x) \cos \omega t + X_2(x) \sin \omega t \quad (13)$$

(13)'den elde edilen

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\omega X_1(x) \sin \omega t + \omega X_2(x) \cos \omega t ;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dX_1}{dx} \cos \omega t + \frac{dX_2}{dx} \sin \omega t \text{ ve}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{d^2 X_1}{dx^2} \cos \omega t + \frac{d^2 X_2}{dx^2} \sin \omega t \text{ ifadeleri (9)' da}$$

yerine konursa, X_1 ve X_2 ' yi belirlemek için aşağıdaki basit diferansiyel denklemler sistemi elde edilir:

$$\begin{cases} -\omega X_1 = a \frac{d^2 X_2}{dx^2} \\ \omega X_2 = a \frac{d^2 X_1}{dx^2} \end{cases} \quad (14)$$

(14) sisteminden $X_1 = -\frac{a}{\omega} \frac{d^2 X_2}{dx^2}$ olarak,

$$\frac{d^4 X_2}{dx^4} + \frac{\omega^2}{a^2} X_2 = 0 \quad (15) \text{ elde edilir. Benzer biçimde,}$$

X_1 'de dördüncü dereceden (15) sabit katsayılı diferansiyel denklemini sağlamaktadır. (15) diferansiyel denkleminin $\alpha^4 + \frac{\omega^2}{a^2} = 0$ karakteristik denkleminin

kökleri $\sqrt{\frac{\omega}{2a}}(1 \pm i)$ ve $-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}(1 \pm i)(i^2 = -1)$ olarak, genel çözümü aşağıdaki gibi olur:

$$X_2 = c_1 e^{\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x + c_2 e^{\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x + c_3 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x + c_4 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \quad (16)$$

Toprak derinliği boyunca sıcaklığın sönme durumuna yaklaşması ($x \rightarrow \infty$ ise $T \rightarrow 0$) koşulundan $c_1 = c_2 = 0$ olarak,

$$X_2 = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \left(c_3 \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x + c_4 \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \right) \quad (17) \text{ elde edilir.}$$

X_1 'de benzer biçimde ifade edilerek,

$$X_1 = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \left(c_5 \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x + c_6 \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \right) \quad (18) \text{ bulunur.}$$

(17) ve (18) ifadeleri (14)'de yerine konursa $c_3 = -c_6$ ve $c_4 = c_5$ olur ve

$$X_2 = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \left(c_3 \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x + c_5 \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \right) \quad (19)$$

$$X_1 = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \left(c_5 \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x - c_3 \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \right) \quad (20) \text{ elde edilir.}$$

(19) ve (20) ifadeleri (13)'de göz önüne alınırsa,

$$T(x, t) = T_0 + e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \left[\left(c_5 \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x - c_3 \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \right) \cos \omega t + \left(c_3 \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x + c_5 \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \right) \sin \omega t \right] \quad (21) \text{ olur.}$$

(21) ifadesi (10) sınır koşulu ile karşılaştırıldığında $c_3 = 0$ ve $c_5 = A$. Bu durumda, (21) çözümü

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

veya

$$T(x, t) = T_0 + A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \cos \left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x \right) \quad (22) \text{ olarak}$$

bulunur ve (11) sınır koşulunu sağlamaktadır.

Sıcaklık dalgalarının değişim amplitütü (22)

çözümünde $A(x) = \frac{A}{e^{x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}}}$ (23) gibi olup, toprak derinliği

boyunca ekspansiyonel olarak azalır. (23) ifadesinden

$$\ln \frac{A(x)}{A} = -x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \text{ olarak, ısısal yayılım katsayısının}$$

belirlenmesi için $a = \frac{\omega x^2}{2 \ln^2 \frac{A(x)}{A}}$ (24) elde edilir

(Gülser ve Ekberli, 2002; Ekberli, 2006; Trombotto ve Borzotta, 2009; Correia ve ark., 2012; Ekberli ve Gülser, 2014; Ekberli ve ark., 2015b; Arias-Penas ve ark., 2015; Ekberli ve Sarılar, 2015a; Ekberli ve Dengiz, 2016; Dengiz ve Ekberli, 2017).

3.2. Toprakta ısı oluşumuna etki yapan bazı parametrelerin değişimi

Araştırma döneminde toprağın 10 cm katmanında günlük sıcaklık, günlük ortalama sıcaklık ve günlük maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 12.5-26.8°C; 13.66-24.85°C ve 14.0-26.8°C arasında değişmektedir. Genel ortalama sıcaklık (T_0) ve genel maksimum

sıcaklık (T_{mak}) ise sırasıyla 19.73°C ve 21.69°C olarak saptanmıştır. $A = T_{mak} - T_0$ ifadesiyle hesaplanan günlük amplitütler 0.34-2.73°C arasında değişmekte ve 1.96°C genel ortalama değerine sahip olmaktadır. (24) ifadesiyle hesaplanan günlük ısısal yayılım katsayıları (a) $0.61 \cdot 10^{-7} - 5.68 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$ arasında olup, $2.97 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$ ortalama değere sahiptir. Ölçülen sıcaklık dağılımının standart sapması 3.57, değişim katsayısı ise 0.18 olup, sıcaklık dağılımının homojen olduğu gözükmektedir. Toprak nemi ise % 24.7-40.8 arasında değişmektedir.

Toprağın 20 cm katmanında günlük sıcaklık, günlük ortalama sıcaklık ve günlük maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 12.0-25.4°C; 13.36-24.25°C ve 14.0-25.4°C arasında; T_0 ve T_{mak} değerleri ise sırasıyla 18.42°C ve 19.61°C olarak belirlenmiştir. Günlük ve ortalama amplitüt değerleri; günlük ısısal yayılım katsayıları ve ortalaması sırasıyla 0.45-2.75°C; 1.19°C; $0.31 \cdot 10^{-6} - 9.29 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$; $4.02 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık dağılımının standart sapması 3.48, değişim katsayısı ise 0.19 olup, sıcaklık dağılımı homojen olmaktadır. Topraktaki nem miktarı ise % 28.2-36.6 arasında saptanmıştır.

Araştırma toprağının 50 cm'lik katmanında günlük sıcaklık 10.5-22.4°C; günlük ortalama sıcaklık 11.47-21.77°C; günlük maksimum sıcaklık ise 12.4-22.4 °C arasında değişmektedir. T_0 ve T_{mak} değerleri ise sırasıyla 17.0°C ve 17.9°C olarak saptanmıştır. Günlük amplitütler 0.15-2.05°C arasında değişmekte, ortalama değer ise 0.9°C olmaktadır. Günlük ısısal yayılım katsayıları $3.43 \cdot 10^{-7} - 9.49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$, ortalaması ise $2.51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sn}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık dağılımının standart sapması 3.11, değişim katsayısı ise 0.18 olup, sıcaklık dağılımı homojendir. Toprak nemi % 24.4-39.3 arasında belirlenmiştir.

Toprağın 10 ve 20 cm katmanları ile karşılaştırıldığında, 50 cm katmanda sıcaklık değişimi az olduğu için, ortalama amplitüt değeri düşük; ısısal yayılım katsayısı ise büyük olmaktadır. Genel olarak, ısısal parametrelerin değişimine iklim faktörü önemli düzeyde etki yapmakta ve sıcaklığın tahminini zorlaştırmaktadır. Araştırma toprağı katmanlarında, sıcaklık dağılımlarının homojen olması, amplitüt değerlerinin yüksek farklılık göstermemesine neden olan faktörlerdendir.

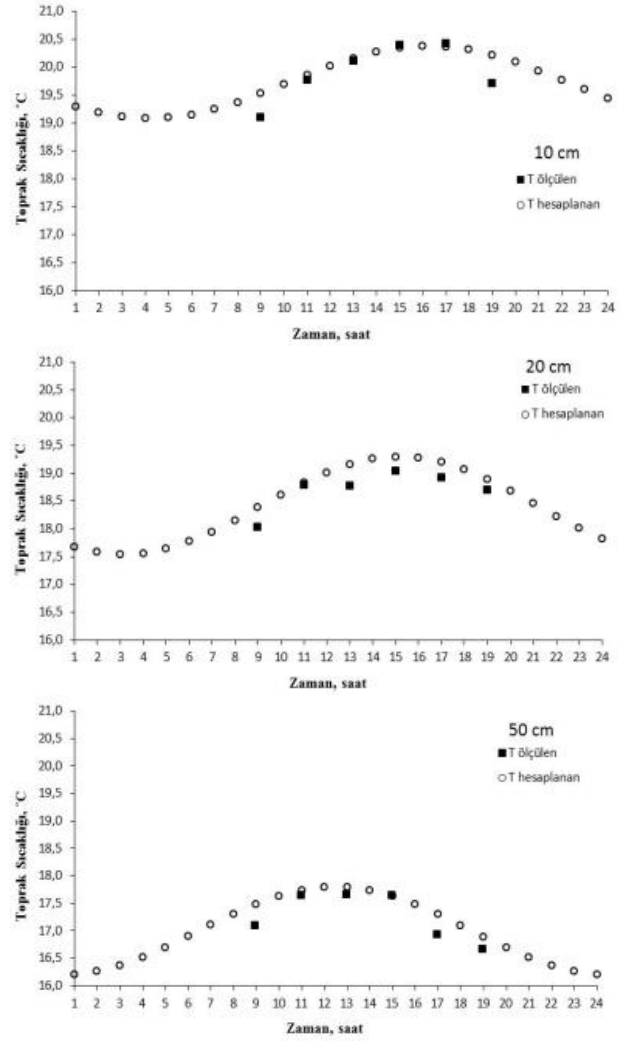
3.3. Deneysel ve ısı iletkenliği denkleminin çözümüne bağlı olarak belirlenen toprak sıcaklıklarının karşılaştırılması

Toprak katmanının deneysel olarak belirlenen ortalama sıcaklığı (T_0), amplitütü (A) ve (24) ifadesine göre

$$\omega = 2\pi/P = \frac{6.28}{86400\text{sn}} \approx 0.0000727\text{sn}^{-1} \text{ olarak}$$

hesaplanan ısısal yayılım (a) katsayısı göz önüne

alınarak, (22) çözümü ile 10 cm, 20 cm ve 50 cm katmanları için elde edilen teorik toprak sıcaklıklarının ve ölçülen toprak sıcaklıklarının dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Toprağın 10 cm, 20 cm ve 50 cm derinliklerinde hesaplanan ve ölçülen sıcaklık değerleri

Şekil 1'den görüldüğü gibi, sıcaklık değişimi 10 cm ve 20 cm katmanlarında, 50 cm katmanından daha fazla olmaktadır. 50 cm katmanında ortalama yüzey katman sıcaklığının ve amplitüt değerlerinin düşük, ısısal yayılım katsayısının ise yüksek olması, diğer toprak özellikleriyle beraber, sıcaklık değişiminin az olmasına etki yapan önemli faktörlerdir.

Toprağın ısı iletkenliği denkleminin (22) çözümünün uygulanabilirliğinin kontrolü için, hesaplanan ve ölçülen toprak sıcaklıklarının karşılaştırılmasına ait istatistiksel göstergeler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Modelin geçerliliğine ait istatistiksel göstergiler

Derinlik, cm	σ , °C		VK		HKOK, °C	MH, °C	MNH	OAH, °C	d	ME
	*Ölçülen değerlere göre	Hesaplanan değerlere göre	*Ölçülen değerlere göre	Hesaplanan değerlere göre						
10	0.500	0.327	0.025	0.016	0.286	0.200	0.027	0.180	0.868	0.607
20	0.352	0.337	0.019	0.018	0.291	0.268	0.022	0.268	0.816	0.181
50	0.434	0.334	0.025	0.019	0.246	0.205	0.023	0.198	0.889	0.617

*Karşılaştırılmada kullanılan ölçülen değerler

Çizelge 1'den görüldüğü gibi, toprağın 10, 20 ve 50 cm katmanlarında, modelin geçerliliğinin kontrol edilmesinde kullanılan ölçülen ve hesaplanan değerlerin standart sapması küçük, dolayısıyla riskin derecesi az olmaktadır. Her üç katmanda da, değişim katsayılarının değerleri küçük (% 1.6-2.5) olup, ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri ortalama etrafında daha yoğun dağılıma sahiptir. Tahmin hatalarının standart sapması, mutlak hata, maksimum nispi hata, ortalama aritmetik hata değerleri düşük olup, tahmin ve gerçek değerler arasındaki farkın az, dolayısıyla toprak sıcaklığının günlük değişiminde modelin güvenilirlik derecesinin yüksek olduğunu göstermektedir. d ve ME değerleri de uygulanabilirlik sınırları dahilinde olmaktadır. Toprağın 10 cm ve 50 cm derinliklerindeki ME değerleri ile karşılaştırıldığında, 20 cm toprak derinliğindeki değerler fazla düşük olması $x_i - y_i$ ve $y_i - \bar{y}$ değerlerinin farklılık $\left[(x_i - y_i) \gg (y_i - \bar{y}) \right]$ göstermesinden kaynaklanabilir.

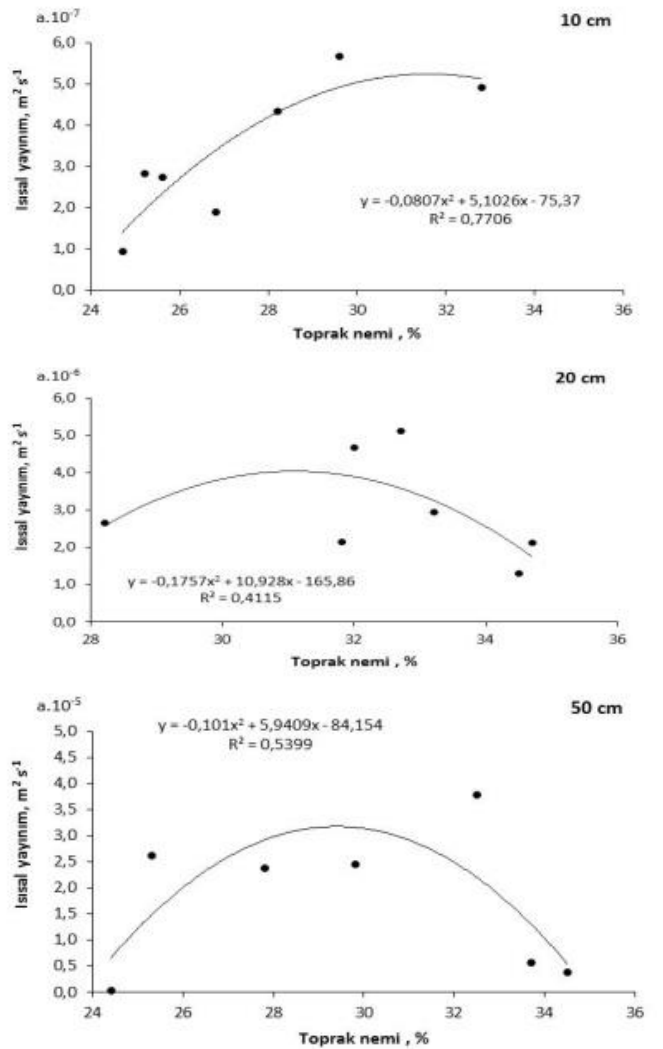
3.3. Toprak neminin ısısal yayılım katsayısına etkisi

Toprağın 10, 20 ve 50 cm katmanlarında nemin ısısal yayılım katsayısının değişimine etkisi Şekil 2'de verilmiştir.

Her üç katmanda nemin artışı ile beraber, ısısal yayılım katsayısı da artış göstermekte, nemin sonraki artışında ($W > \approx \%30-32$) ise ısısal yayılımın azalma süreci başlamaktadır. Değişim süreci düzenli olmamakta, nem ve ısısal yayılım ilişkisi yaklaşık parabolik biçimde gerçekleşmektedir. Toprağın 10, 20, 50 cm derinliklerinde, nem miktarı ile ısısal yayılım ilişkilerinin belirleme katsayısı sırasıyla 0.77; 0.41 ve 0.54 olarak belirlenmiştir. Toprağın 10 ve 50 cm derinliklerinde, 20 cm derinlikle karşılaştırıldığında, sıcaklığın amplitüt değişimlerinin daha çabuk sabitleşmesi belirleme katsayılarının yüksek olmasına neden olabilir.

Toprakların ısısal yayılım katsayısı, ısı iletkenliği ile doğrusal, ısı kapasitesi ile ters orantılı, ısı iletkenliği ve ısı kapasitesine etki yapan faktörlere bağlı olmakla beraber kendine özgü bir özelliğe sahiptir. Çudnovski (1976) tarafından yapılan bir araştırmada, topraktaki nemin değişimine uygun olarak ısısal yayılımın da maksimum kuralı ile değişmekte olduğu gösterilmiştir.

Kurtener ve Çudnovski (1979) ve Voronin (1986)'e göre ise, ısısal yayılım toprağın pulluk tabakası dışındaki diğer horizonlarda nem içeriği tarla kapasitesindeyken maksimum değerler almakta, doygunluk noktasında ise daha düşük değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 2. Isısal yayılım katsayısının toprak nemine bağlı olarak değişimi

4. Sonuç ve Öneriler

Toprak yüzeyinde ve aşağı katmanlarda sıcaklık dalgalarının maksimum veya minimum değer alması, zamana bağlı olarak sıcaklık amplitütünün değişimi, maksimum veya minimum sıcaklığın aşağı katmanlardaki sönme derinliği ve gecikme zamanı, sıcaklık dalgalarının faz değişimine önemli düzeyde bağlı olmaktadır. Bu nedenle, toprağın temel ısı iletkenliği denkleminin, toprak yüzeyinde ve herhangi bir derinlikteki sıcaklık değişimleri arasındaki faz değişimini de içeren sınır koşuluna göre çözümün incelenmesi gerekmektedir. Isı iletkenliği denkleminin çözümüne bağlı olarak hesaplanan ve ölçülen günlük sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması, denklemin

çözümünün günlük sıcaklık değişimini iyi tahmin ettiğini göstermektedir. Dolayısıyla, ısı iletkenliği denkleminin çözümünün günlük sıcaklık değişiminin tahmininde kullanılması gerekmektedir.

İklim koşullarının, toprak yüzeyinde ve aşağı katmanlarda ortalama sıcaklığın, amplitütünün değişimi nedeniyle, denklemin çözümünün birbirini takip eden birden fazla günler için uygulanabilirliğini ifade etmek zordur. Tahmin sürecine önemli düzeyde etki yapan ısısal yayılım katsayısı, toprağın aşağı derinliklerinde artmakta, neme bağlı olarak ise azalan artış göstermektedir. Isısal yayılım ve nem arasındaki ilişkinin parabolik fonksiyonla ifadesi mümkün gözükmemektedir.

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 subsoil temperatures. Preliminary results of an experimental geothermal borehole study Q-THERMIE-UNIOVI. *Geothermics*, 54: 35–42.
- Banimahd, S.A., Zand-Parsa, Sh., 2013. Simulation of evaporation, coupled liquid water, water vapor and heat transport through the soil medium. *Agricultural Water Management*, 130: 168–177.
- Braud, I., Dantas-Antonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L., Ruelle, P., 1995. A simple soil plant atmosphere transfer model (SiSPAT). Development and field verification. *Journal of Hydrology*, 166 (3-4): 213-250.
- Busby, J., 2015. Determination of thermal properties for horizontal ground collector loops. *British Geological Survey, Nottingham, UK*.
- Camillo, P.J., Gurney, R.J., Schmugge, T.J., 1983. A soil and atmospheric boundary layer model for evapotranspiration and soil moisture studies. *Water Resources Research*, 19: 371-380.
- Chacko, P.T., Renuka, G., 2002. Temperature mapping, thermal diffusivity and subsoil heat flux at Kariavattom of Kerala. *Proceedings of the Indian Academy Science (Journal of Earth System Science)*, 111(1): 79–85.
- Chen, S.T., Huang, Y., Zou, J.W., Shi, Y.S., 2013. Mean residence time of global topsoil organic carbon depends on temperature, precipitation and soil nitrogen. *Global and Planetary Change*, 100: 99–108.
- Chudnovskii, A.F., 1976. *Thermophysics of soils (in Russian)*. Press Nauka, Moscow, 352 p.
- 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.
- Dashtaki, S.G., Homaeae, M., Khodaverdiloo, H., 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26 (1): 68–74.
- Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440: 165–173.
- Demiralay, İ., 1993. Toprak fiziksel analiz yöntemleri. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Erzurum, 111-120.
- Dengiz, O., Ekberli, İ., 2017. Bazı vertisol alt grup topraklarının fizikokimyasal ve ısısal özelliklerinin incelenmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 6(1): 45-52.
- de Vries, D.A., 1963. Thermal properties of soils. In: W.R. van Wijk (Editor), *Physics of Plant Environment*. North Holland, Amsterdam, pp. 210-235.
- Ekberli, I., 2006. Determination of initial unconditional solution of heat conductivity equation for evaluation of temperature variance in finite soil layer. *Journal of Applied Sciences*, 6(7): 1520-1526.
- Ekberli, İ., Dengiz, O., 2016. Bazı inceptisol ve entisol alt grup topraklarının fizikokimyasal özellikleriyle ısısal yayılım katsayısı arasındaki regresyon ilişkilerinin belirlenmesi. *Toprak Su Dergisi*, 5(2): 1-10.
- Ekberli, İ., Gülser, C., 2014. Estimation of soil temperature by heat conductivity equation. *Vestnik Bashkir State Agrarian University (Вестник Башкирского Государственного Аграрного Университета)*, 2 (30): 12-15.
- Ekberli, İ., Gülser, C., 2015. İki boyutlu ısı iletkenliği denkleminin bağlı olarak toprak sıcaklığının matematiksel modellenmesi *Anadolu Tarım Bilim. Dergisi*, 30 (3): 287-291.
- Ekberli, İ., Gülser C., 2016. Toprağın ısısal yayılımının fonksiyonel değişimi ve toprak sıcaklığına etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 31 (2): 294-300.
- Ekberli, İ., Gülser, C., Mamedov, A., 2015a. 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., 2015b. Toprakta ısı

- iletkenliğine etki yapan ısısal parametrelerin teorik incelemesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(3): 300-306.
- Ekberli, İ., Gülser, C., Özdemir, N., 2017. Farklı toprak derinliklerindeki sıcaklığın tahmininde parabolik fonksiyonun kullanımı. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 5(1): 34- 38.
- Ekberli, İ., Sarılar, Y., 2014. Investigating soil temperature variability and thermal diffusivity in grass covered and shaded areas by trees. *Pochvovedeniye i Agrohimiya, Almatı (Почвоведение и агрохимия, Алматы, № 4, 2014)*, 4: 17-30.
- 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 Fakültesinin Dergisi*, 52 (2): 219-225.
- Elias, E.A, Cichota, R., Torriani, H.H., De Jong van Lier, Q., (2004). Analytical soil-temperature model correction for temporal variation of daily amplitude. *Soil Science Society America Journal*, 68: 784-788.
- Farouki, O.T., 1981. The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 5(1), 67-75.
- Guber, A.K., Pachepsky, Y.A., 2010. Multimodeling with pedotransfer functions: documentation and user manual for PTF calculator (CalcPTF), Version 2.0., USDA-ARS, USA.
- Gülser, C., Ekberli, I., 2004. A comparison of estimated and measured diurnal soil temperature through a clay soil depth. *Journal of Applied Sciences*, 4(3): 418-423.
- Gülser, C., Ekberli, İ., 2002. Toprak sıcaklığının profil boyunca değişimi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesinin Dergisi*, 17(3): 43-47.
- Hızalan, E. ve Ünal, H., 1966. Toprakta önemli kimyasal analizler. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, 278s.
- Johansen, D., 1975. Thermal property of soils. Ph.D. Thesis, Trondheim University.
- Kacar, B., 1994. Bitki ve toprağın kimyasal analizleri.III. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Eğitim, Araştırma ve Geliştirme Vakfı Yayınları*. No:3, 89-98.
- Knight, J.H., Minasny, B., McBratney, A.B., Koen, T.B., Murphy, B.W., 2018. Soil temperature increase in eastern Australia for the past 50 years. *Geoderma*, 313: 241-249.
- Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D.K., Parihar, S.S., Sahoo, R.N., 2015. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. *Agricultural Water Management*, 148: 72-83.
- Krause, P., Boyle, D.P., Base, F.B., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89-97.
- Kurtener, D.A., Chudnovskii, A.F., 1979. Agrometeorological basics of the thermal amelioration of soils (in Russian). Press *Gidrometeoizdat, Leningrad*, 231 p.
- Lei, S., Daniels, J.L., Bian, Z., Wainaina, N., 2011. Improved soil temperature modeling *Environmental Earth Sciences*, 62:1123-1130.
- Lettau, H.H. 1954. Improved models of thermal diffusion in the soil. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35: 121-132.
- Liang, H., Hu, K., Qin, W., Zuo, Q., Zhang, Y., 2017. Modelling the effect of mulching on soil heat transfer, water movement and crop growth for ground cover rice production system. *Field Crops Research*, 201: 97-107.
- Mengistu, A.G., van Rensburg, I.D., Mavimbela, S.S.W., 2017. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa. *Catena*, 158: 184-193.
- Milly, P.C.D., 1986. An event-based simulation model of moisture and energy fluxes at a bare soil surface. *Water Resources Research*, 22(12): 1680-1692.
- Novak, M.D. and Black, T.A., 1985. Theoretical Determination of the surface energy balance and thermal regimes of bare soils. *Boundary-Layer Meteorology*, 33(4): 313-333.
- Oladunjoye, M.A., Sanuade, O.A., 2012. Thermal diffusivity, thermal effusivity and specific heat of soils in Olorunsogo Powerplant, southwestern Nigeria. *IJRRAS.*, 13 (2): 502-521.
- Oladunjoye, M.A., Sanuade, O.A., Oloajo, A.A., 2013. Variability of soil thermal properties of a seasonally cultivated agricultural teaching and research farm, university of Ibadan, south-western Nigeria. *GJSFR-D.*, 13 (8): 41-64.
- Passerat de Silans, A.M.B., Bruckler, L., Thony, J.L., Vanclin, M., 1989. Numerical modeling of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparison with field observations. *Journal of Hydrology*, 105: 109-138.
- Passerat de Silans, A.M. B., Monteny, B.A., Lhomme, J.P., 1996. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX-Sahel experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81: 201-216.
- Rafique, R., Kumar, S., Luo, Y.Q., Xu, X.L., Li, D.J., Zhang, W., Asam, Z.U., 2014. Estimation of greenhouse gases (N₂O, CH₄ and CO₂) from no-till cropland under increased temperature and altered precipitation regime: a DAYCENT model approach. *Global and Planetary Change*, 118: 106-114.
- Rozanski, A., Stefaniuk, D., 2016. Prediction of soil solid thermal conductivity from soil separates and organic matter content: computational micromechanics approach. *European Journal of Soil Science*, 67 (5): 551-563.
- Rubio, C.M., 2013. A laboratory procedure to determine the thermal properties of silt loam soils based on

- ASTM D 5334. AEES., 1 (4): 45–48.
- Smits, K.M., Sakaki, T., Limsuwat, A., Illangsekare, T.H., 2009. Determination of the thermal conductivity of sands under varying moisture, drainage/wetting, and porosity conditions-applications in near-surface soil moisture distribution analysis. In: AGU Hydrology Days 2009, Goldon, USA, pp. 57–65.
- Sterling, A.T. and R.D. Jackson, 1986. Temperature. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No. 9, ASA, SSSA, Madison WI.
- Tombul, M., Akyürek, Z., Sorman, A.Ü., 2004. Research note: determination of soil hydraulic properties using pedotransfer functions in a semi-arid basin. Turkey. *Hydrology Earth System Sciences*, 8 (6): 1200–1209.
- 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.
- Usowicz, B., Lipiec, J., Usowicz, J.B., Marczewski, W., 2013. Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: Comparison of measured and model-predicted data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57: 536–541.
- Van Wijk, W.R. (Editor), 1963. *Physics of Plant Environment*. First edition. North Holland, Amsterdam.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., van Genuchten, M.T., 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone Journal*, 9(4): 795–820.
- Voronin, A.D., 1986. *Fundamentals of soil physics* (in Russian). Press Moscow State University, Moscow, 244 p.
- Wang, L., Li, X., Chen, Y., Yang, K., Chen, D., Zhou, J., Liu, W., Qi, J., Huang, J., 2016. Validation of the global land data assimilation system based on measurements of soil temperature profiles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218–219: 288–297.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2: 184–194.
- Willmott, C.J., Matsuura, K., 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research* 30: 79–82.
- Willmott, C. J., Robeson, S.M., Matsuura, K., 2012. Short Communication. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32: 2088-2094.
- Yvon-Durocher, G., Allen, A.P., Bastviken, D., Conrad, R., Gudas, C., St-Pierre, A., Thanh-Duc, N., del Giorgio, P.A., 2014. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 507 (7493): 488–495.
- Zhang, T., Cai, G., Liu, S., Puppala, A.J., 2017. Investigation on thermal characteristics and prediction models of soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106: 1074–1086.