



Araştırma/Research

Anadolu Tarım Bilim. Derg./Anadolu J Agr Sci, 36 (2021)
ISSN: 1308-8750 (Print) 1308-8769 (Online)
doi: 10.7161/omuanajas.828364

Toprağın zamana bağlı olmayan bir boyutlu ısı iletkenliğinin incelenmesi

İmanverdi EKBERLİ^{a,*}, Coşkun GÜLSER^a, Orhan DENGİZ^a

^aOndokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilim ve Bitki Besleme Bölümü, Samsun, Türkiye

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

Geliş/Received 19/11/2020 Kabul/Accepted 28/04/2021

ÖZET

Toprakların bazı ısasal özelliklerine bağlı olarak zamana bağlı olmayan sıcaklık alanının belirlenmesi, toprak verimliliğinin iyileştirilmesi ve korunmasında, bitki gelişimi için optimum koşulların oluşturulmasında gereklidir. Bu çalışmada İnseptisol ve Entisol toprakların bazı ısasal özelliklerini göz önüne alarak, zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin analitik çözümünün sıcaklık değişiminin tahmininde uygulanabilirliği incelenmiştir. Çözümün açıklanmasında herhangi toprak katmanı yüzeyinde ısı akışını ve ortalama toprak sıcaklığını içeren sınır koşulları kullanılmıştır. Analitik çözüme göre hesaplanan toprak sıcaklıkları ile ölçülen sıcaklıklar arasındaki HKOK, NHKOK, DI ve d istatistiksel göstergeler İnseptisol toprakta sırasıyla 1.339, 0.077, 0.576, 0.023; Entisol toprakta ise 0.654, 0.034, 0.067, 0.005 olarak saptanmıştır. İstatistiksel göstergelerin güvenilirlik sınırları dahilindeki değişimi, çözümün uygulanabilirliğinin mümkünlüğünü göstermektedir.

Anahtar Sözcükler:

Toprak sıcaklığı
Toprağın ısasal özellikleri
Sabit ısı iletkenliği denklemleri
Matematiksel modelleme

Investigation of the time-independent one-dimensional thermal conductivity of the soil

ABSTRACT

Depending on some thermal properties of soils, determining the time-independent temperature range is necessary for improving and preserving soil fertility, and creating optimum conditions for plant growth. Heat at the surface of any soil layer for explaining the solution was used from boundary conditions including flow and mean soil temperature. The statistical indicators of RMSE, NRMSE, DI and d between the measured soil temperatures according to the analytical solution were 1.339, 0.077, 0.576, 0.023 in Inseptisol soil, respectively; in Entisol soil was determined as 0.654, 0.034, 0.067, 0.005. The change of statistical indicators within the limits of reliability shows the feasibility of the solution.

Keywords:

Soil temperature
Thermal properties of soil
Constant thermal conductivity equation
Mathematical modeling

© OMU ANAJAS 2021

1. Giriş

Toprak ekosisteminde zamana bağlı veya sürekli (zamana bağlı olmayan) ısı iletkenliği ısı rejimini oluşturmada, dolayısıyla toprak süreçlerine ve bitki gelişimi için optimum ortamın oluşumuna önemli düzeyde etki etmektedir. Herhangi bir ortamda (toprakta) ısı iletkenliğinin özel matematiksel ifadesinin oluşturulması için, ısı taşınımının genel diferansiyel denklemleriyle birlikte, ortamın geometrik (sürecin gerçekleştiği ortamın düzlemsel veya uzaysal olması, ölçütleri) ve fiziksel (ısı iletkenliği katsayısı, ısı kapasitesi, özgül ağırlık vb.) özelliklerinin; başlangıç (başlangıç zamanda sıcaklığın miktarı) ve sınır koşullarının (ortamın aşağı veya yukarı sınırında sıcaklığın değişimi) göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Toprak sıcaklığının değerlendirilmesi ve tahmin edilmesinde, sıcaklığın

zamana bağlı veya sürekli (zamana bağlı olmayan) değişimi durumunda oluşturulan ısı iletkenliği denkleminin çözümü kullanılmaktadır.

Zamana bağlı veya zamana bağlı olmayan (sabit) sıcaklık değişimleri, çeşitli toprakların özelliklerine farklı olarak etki yapmaktadır. Zhu ve Cheng (2011), farklı iki toprakta yapılan 120 günlük inkubasyon deneyinde, sabit ve günlük olarak değişen toprak sıcaklığı rejimlerinin toprak organik karbon ayrışmasına etkisini incelemiştir. Rajeev ve Kodikar (2016) tarafından yapılan bir çalışmada ise, zamana bağlı deneysel sıcaklık verileri kullanılarak, bir boyutlu ısı iletkenliği denkleminin çözümünden elde edilen farklı dört yöntemle toprağın ısısal özellikleri (ısı kapasitesi, ısı iletkenliği, ısısal yayılım) belirlenmiştir. Wang ve Bou-Zeid (2012), toprakta ısı akışının belirlenmesine ait yapılan yeni bir matematiksel yaklaşımda, toprağın zamana bağlı bir boyutlu ısı iletkenliği denklemini kullanmışlardır. Ortamdaki (topraktaki) sabit ısı iletkenliğinde, sıcaklık alanı zamana bağlı olarak değişmemektedir ($\partial T / \partial t = 0$). Bazı araştırmacılar zamana bağlı olmayan ısı iletkenliğini farklı ortamlarda çeşitli sınır koşullarına bağlı olarak teorik olarak incelemiştir (İsachenko 1981; Kreith ve Black, 1983). Sabit ısı iletkenliğinde, sıcaklık alanı zamana bağlı olarak değişmemektedir ($\partial T / \partial t = 0$). Herhangi bir biçimdeki ortamdan (toprak katmanından) geçen ısı akışı da sabit rejimde zamana göre değişmemekte; ortam koordinatlarına bağlı olmamakta ($q \neq f(x, t)$), dolayısıyla ortamın tüm noktalarında sabit ($q = \text{sabit}$) olmaktadır.

Lu ve ark. (2020), kumlu tınlı ve siltli killi toprakların çeşitli su içeriklerinde ve sıcaklıklarında ısı iletkenliği bileşenlerinin ve değerinin belirlenmesinde zamana bağlı ısı taşınımı denklemini kullanmışlardır. Toprak ısı iletkenliği hakkında bilginin, toprak ısı taşınımı mekanizmalarını doğru bir şekilde anlamak için önemli olduğu vurgulanmıştır. Hedayati-Dezfooli ve Leong (2019) tarafından, yüksek sıcaklık koşullarında (10-90°C) ısı ve nem taşınımının deneysel incelenmesine ait yapılan bir çalışmada, sıcaklık değişiminin ve doyunluk derecesinin, toprağın termo-fiziksel özellikleriyle beraber ısı akışına, dolayısıyla ısı miktarına önemli düzeyde etki yaptığı bildirilmiştir. Wu ve ark. (2020), yüzeye yakın toprağın hidrotermodinamiğine dayanarak, toprağın ısı akışının tahmininde zamana bağlı ısı iletkenliği denklemini kullanmış; aynı zamanda ısı akışının tahmininde toprağın ısı iletkenliğinin dikey değişiminin ve su buharı katkısının dikkate alındığını vurgulamışlardır. Toprağın ısı iletkenliğinin incelenmesi ve ısı taşınımı denkleminin güvenilir düzeyde toprak sıcaklığının tahmin edilmesinde kullanılması, toprağın ısısal özelliklerinin (ısı kapasitesi, ısısal yayılım, ısı iletkenliği katsayısı ve ısı akışı) detayı olarak belirlenmesini gerektirmektedir (Evet ve ark., 2012; Usowicz ve ark., 2013; Ekberli ve Gülser, 2014; 2015; Ekberli ve Sarılar, 2015; Arkhangelskaya ve Lukyashchenko, 2018; Gülser ve ark., 2018; Gülser ve Ekberli, 2019; Xie ve ark., 2019; Yadav ve ark., 2020; Bayat, 2021).

Bu araştırmanın amacı, toprağın zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin analitik olarak irdelenmesi ve elde edilen çözüme göre toprak sıcaklığının derinlik boyunca değerlendirilmesidir.

2. Materyal ve Yöntem

Ortamda (toprakta) enerjinin korunumu yasasının matematiksel ifadesini ve hacimsel ısı kaybını göz önüne alarak oluşturulan toprağın zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denklemi, yüzey toprak sıcaklığı ve ısı akışı ile ifade olunan sınır koşulu ile birlikte çalışmanın temel materyalini oluşturmaktadır. Toprak sıcaklığı ölçümleri Samsun'un Çarşamba ilçesine bağlı Sefalı, Bölmepınar ve Yenikışla köylerinin yer aldığı ve Yeşilirmak nehrinin getirmiş olduğu aluviyal depositler üzerinde oluşmuş Entisol ve Inceptisol topraklarda yerleşen; Çarşamba ilçesine yaklaşık 5 km ve Samsun iline ise 44 km mesafede bulunmakta olan çalışma alanında yapılmıştır.

Toprağın zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin çözümü, matematiksel model oluşturmının metodolojik temelini oluşturan sistemli yaklaşım yöntemine (modelin yapılması ve çözümlenmesi, kontrol edilmesi, incelenmesi ve model sonuçlarının yorumlanması) uygun olarak, sınır koşuluna göre analitik yöntemle yapılmıştır.

Modelin güvenilirliğini değerlendirmek için, aşağıdaki gibi ifade edilen hata kareler ortalamasının karekökü (HKOK veya RMSE) ve ondan türetilen diğer istatistiksel hata göstergelerinden [(normalleştirilmiş hata kareler ortalaması karekökü (NHKOK veya NRMSE); dağılım indeksi (Dİ veya Sİ) ve uygunluk indeksi (d)] kullanılmıştır.

$$HKOK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{ih} - T_{i\bar{o}})^2}{m}}$$

(burada, n -verilerin sayısı ve $n < 30$ ise $m = n - 1$, $n > 30$ ise $m = n$; T_{ih} - hesaplanan; $T_{i\bar{o}}$ -ölçülen toprak sıcaklığı değerleridir)

$$NHKOK = \frac{HKOK}{\overline{T_{\delta}}}$$

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_{ih} - \overline{T_h}) - (T_{i\delta} - \overline{T_{\delta}})]^2}{\overline{T_{\delta}}}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_{ih} - T_{i\delta})^2}{\sum_{i=1}^n (|T_{ih} - \overline{T_h}| + |T_{i\delta} - \overline{T_{\delta}}|)^2}$$

(burada $\overline{T_h}$ ve $\overline{T_{\delta}}$ sırasıyla hesaplanan ve ölçülen toprak sıcaklığı değerlerinin ortalamasıdır)

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Teoriksel yaklaşım

Herhangi bir ortamda (toprakta) ısı iletkenliğinin analitik incelenmesi sıcaklığın x, y, z uzaysal koordinatlarına ve zamana (t) göre değişiminin belirlenmesine bağlı olup,

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

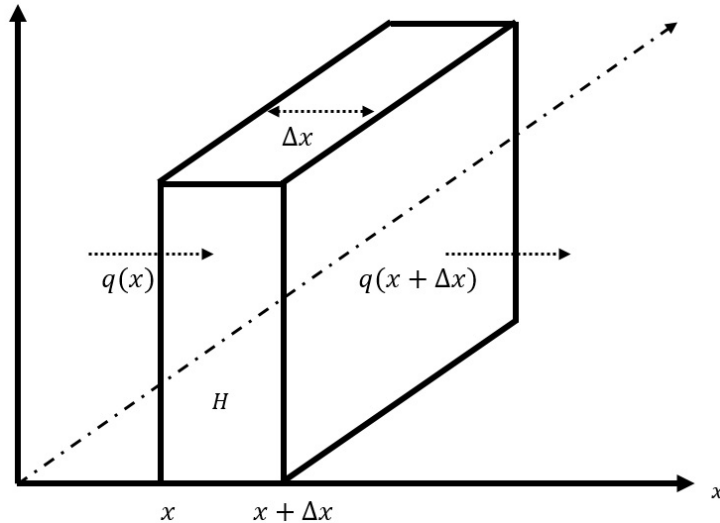
denkleminin yapılmasını ve çözülmesini gerektirmektedir. (1) denklemi sıcaklık alanının (ısı taşınımının) genel ifadesi olup, incelenen ortamın tüm noktalarında ve her bir zaman anında (veya aralığında) sıcaklık değerlerinin toplamını gösteren sıcaklık alanının matematiksel ifadesi olmaktadır. Bu durumda sıcaklık değerleri ve ısı akışı değişken olup, farklı sıcaklık alanı söz konusu olmaktadır. Ortamın herhangi bir noktasında her bir zaman aralığında sıcaklığın aynı olması durumunda sabit sıcaklık alanı oluşmaktadır. Bu durumda sıcaklık sadece koordinatların fonksiyonu olarak, üç boyutlu (uzay) sıcaklık değişimini ifade etmektedir: $T = f_1(x, y, z)$; $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$.

Sıcaklık iki veya bir koordinatın fonksiyonu ise, sırasıyla iki ($T = f_2(x, y, t)$; $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$) veya bir

($T = f_3(x, t)$; $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$) boyutlu sıcaklık alanı oluşmaktadır. Sıcaklık ve ısı akışının dağılımı zamana bağlı

olmadığında, bir boyutlu sabit ısı iletkenliği oluşmaktadır ($T = f_4(x)$; $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$; $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$).

Ortamdaki (topraktaki) hacimsel ısı kaybını göz önüne alarak, bir boyutlu sabit ısı iletkenliği denkleminin oluşturulması, enerjinin korunumu yasasının matematiksel ifadesiyle mümkün olmaktadır. Buna göre, yüzlerinin koordinatları x ve $x + \Delta x$ olan sonsuz ince ortam kısmında dikey ısı akışına bakılmaktadır (Şekil 1)



Şekil 1. Ortamın (toprağın) ısı dağılımının gerçekleştiği sonsuz küçük Δx kalınlığı

H - toprağın birim kütesinden ayrılan ısı miktarı, $q(x)$ ve $q(x + \Delta x)$ sırasıyla giren ve çıkan ısı akışı

Figure 1. The infinitesimal thickness of the medium (soil) where heat dissipation takes Δx place

H - the amount of heat separated from the unit mass of the medium, $q(x)$ ve $q(x + \Delta x)$ incoming and outgoing heat flow respectively

Yüzeylerden geçen ısı akışı sırasıyla $q(x)$ ve $q(x + \Delta x)$ olduğunda, ortam kısmının birim yüzey alanından birim zamanda oluşan enerji miktarı $q(x + \Delta x) - q(x)$ olur. $q(x + \Delta x)$ fonksiyonu küçük Δx aralığında sürekli olduğu için Taylor serisine ayrılması mümkün olmaktadır:

$$q(x + \Delta x) = q(x) + \frac{dq}{dx} \Delta x + \frac{d^2q}{dx^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \frac{d^3q}{dx^3} \frac{(\Delta x)^3}{3!} + \dots \quad (2)$$

Serinin ikinci terimden sonraki terimlerinin çok küçük değerlere yaklaştığını göz önüne alarak, onu ilk iki terimle sınırlandırarak,

$$q(x + \Delta x) - q(x) = \frac{dq}{dx} \Delta x \quad (3)$$

olur (Luikov, 1967; İsaçenko ve ark., 1981; Turcotte ve Schubert, 1982; Ekberli, 2006). Isı iletkenliğinin Fourier yasasının (Fourier 1822) $q = -\lambda \frac{dT}{dx}$ [burada, q ($watt\ m^{-2}$ veya $J\ m^{-2}\ sn^{-1}$) -ısı akışı;

λ ($watt\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ veya $J\ m^{-1}\ sn^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)-sabit ısı iletkenliği katsayısı; $x(m)$ - uzunluk veya derinliktir; $\frac{dT}{dx}$ ($^\circ C\ m^{-1}$)-sıcaklık eğimi olup, denklemdaki negatif işaret, ortamda (toprakta) sıcaklığın eğim doğrultusunda

yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa taşınımını ifade etmektedir. $\frac{dT}{dx} > 0$ ise, sıcaklık pozitif, ısı akışı ise negatif yönde yer değiştirmektedir] analitik ifadesi (3)'de yerine konursa, aşağıdaki eşitlik elde edilir

$$q(x + \Delta x) - q(x) = \frac{d}{dx} \left(-\lambda \frac{dT}{dx} \right) \Delta x = -\lambda \frac{d^2T}{dx^2} \Delta x \quad (4)$$

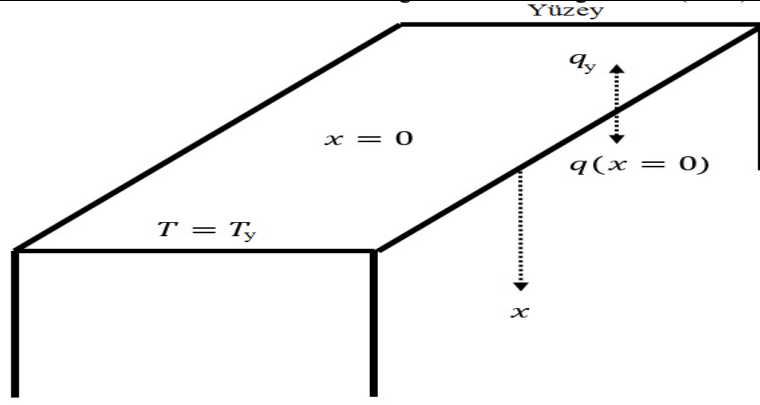
(4) eşitliği, ortamın sonsuz ince kısmının birim yüzeyinde birim zamanda oluşan enerji miktarını göstermekte, sadece sıcaklık dağılımının eğrisel olması durumunda $\left(\frac{d^2T}{dx^2} \neq 0 \right)$ sıfırdan farklı olmaktadır. Ortamın sonsuz ince kısmındaki (4) ısı akışı, sabit durumda (sıcaklık ve ısı akışı değişiminin zamana bağlı olmaması) ortamın dahili

enerjisini oluşturmaktadır. Eğer ortamın birim kütesinden ayrılan ısı miktarı $H = \frac{q}{m}$ (Turcotte ve Schuber, 1982)

ise, birim alanlı tabana sahip hacimdeki ısı miktarı $q(x + \Delta x) - q(x) = \rho H \Delta x$ [burada, q ($watt\ m^{-3}$) -birim hacimdeki ısı miktarı; $m(kg)$ -birim hacimdeki kütle; $\rho(kg\ m^{-3})$ - ortamın hacim ağırlığıdır] (5) gibi ifade edilir. (4) ve (5) ifadeleri eşitlenirse, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} + \rho H = 0 \quad (6)$$

(6) denkleminin integrasyonu, x 'in değişim aralığının uç noktasında uygun sınır koşulunun verilmesi durumunda, T sıcaklığını x koordinantının fonksiyonu olarak tanımlamaktadır. Ortam yüzeyi ($x=0$) ile sınırlanan ve derinliği x olan ortamın yarı uzaysal ($x \geq 0$) olduğunu varsayalım (Şekil 2).



Şekil 2. (6) denkleminin sınır koşulu ve integrallama bölgesi
Figure 2. Boundary condition and integration region of equation (6)

Bu durumda (6) denklemini için, ortamın $x = 0$ yüzeyinde sıcaklık ve ısı akışı ile ifade olunan sınır koşulları

$$\begin{aligned} T(x = 0) &= T_y \\ q(x = 0) &= -q_y \end{aligned} \quad (7)$$

olarak kabul edilir. Sınır koşulundaki “negatif” işareti, ısı akışı yönünün ortamdan dışı doğru olduğunu göstermektedir. Deneysel olarak yapılan araştırmalarda da, toprak katmanları arasındaki sıcaklık değerleri farkına bağlı olarak, ısı akışı hesaplama katmanından aşağıya (pozitif) veya yukarıya (negatif) doğru gerçekleşmektedir (Peng ve ark., 2015; Li ve ark., 2018; Gülser ve ark., 2019). Ortamın (toprağın) birim kütesinden ayrılan ısı miktarı (H) ise, etkili ısı depolama bileşeni olan toprak ısı depolamasına bağlı olup, toprak sıcaklığının değişimiyle ilişkilidir. Oncley ve ark. (2007) yaptıkları bir araştırmada, toplam ısı miktarından ayrılan toprak ısı miktarının 10 watt m^{-2} olduğunu göstermiş, genel olarak ısı depolamasının (ısı miktarının) gün ortasında ve akşamın erken saatlerinde daha fazla meydana geldiğini vurgulamışlardır.

(6) denkleminin $[0, x]$ aralığında integrasyonu yapılırsa,

$$\rho H x = -\lambda \frac{dT}{dx} + C_1 = q + C_1 \quad (C_1 \text{ -integral sabitidir}) \quad (8)$$

elde edilir. (7) sınır koşulu göz önüne alınırsa, $C_1 = q_y$ olarak,

$$\rho H x = -\lambda \frac{dT}{dx} + q_y \quad (9)$$

bulunur.

(9) denkleminin de $[0, x]$ aralığında integrasyonu yapılırsa,

$$\frac{\rho H x^2}{2} = -\lambda T + q_y x + C_2 \quad (C_2 \text{ -ikinci integral sabitidir}) \quad (10)$$

olur. $T(0) = T_y$ sınır koşuluna göre, $C_2 = \lambda T_y$ olarak, aşağıdaki çözüm elde edilir:

$$T(x) = T_y + \frac{q_y x}{\lambda} - \frac{\rho H x^2}{2\lambda} \quad (11)$$

Topraktaki sıcaklık ve ısı akışının dağılımı zamana bağlı olmadığında, (11) ifadesi toprak derinliği boyunca sıcaklık değişiminin belirlenmesine imkan sağlamaktadır.

Zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin (11) çözümünden görüldüğü gibi, toprak sıcaklığının derinlik boyunca değişimi, diğer toprak özellikleriyle birlikte ısı akışı, ısı iletkenliği katsayısı, ısı miktarı gibi ısısal özelliklere ve mesafeye bağlı olmaktadır. Bu durumda, teorik olarak ısı iletkenliği katsayısı sıcaklık değişimine etki yapan temel parametre gibi gözükmemektedir. Genel olarak, ısı akışı ve ısı iletkenliği katsayısı, toprakta sıcaklık alanının oluşumunda etkili olan diğer faktörleri de kapsamaktadır.

Samsun'un Çarşamba ilçesine bağlı Sefalı, Bölmepınar ve Yenikışla köylerinin yer aldığı ve Yeşilirmak nehrinin getirmiş olduğu aluviyal depositler üzerinde oluşmuş Entisol ve Inceptisol topraklarda yerleşen; Çarşamba ilçesine yaklaşık 5 km ve Samsun iline ise 44 km mesafede bulunmakta olan çalışma alanında ölçülen toprak sıcaklığı değerlerine (Dengiz ve Efendiler, 2016) bağlı olarak ısısal özellikler belirlenmiştir. ısısal özellik değerlerinden (Ekberli ve ark., 2021) kullanılarak zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin (11) çözümüne göre, Inceptisol ve Entisol toprakların horizonlarının hesaplanan sıcaklık değerleri Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Inceptisol toprakların horizonlarındaki ısısal özellikler ve zamana bağlı olmayarak hesaplanan sıcaklık değerleri

Table 1. Thermal properties in horizons of Inceptisol soils and temperature values calculated regardless of time

Horizon	Derinlik, cm	λ , $watt\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	q , $watt\ m^{-3}$	ρ , $gr\ cm^{-3}$	H , $watt\ kg^{-1}$	T_y , $^\circ C$	T_h , $^\circ C$
Vertic Haplustept							
	0					26.7	27.6
Ap	0-23	12.006	50.035	1.22	0.041	15.3	16.2
Bw1	23-58	19.211	31.154	1.19	0.026	17.2	15.8
Bw2	58-90	15.085	13.221	1.39	0.010	15.3	17.4
C1	90+			1.55		15.1	15.3
Typic Haplustept							
	0					23.9	24.5
Ap	0-30	13.531	29.284	1.35	0.022	17.2	17.8
Bw1	30-64	19.010	17.284	1.22	0.014	15.6	17.5
Bw2	64-107	20.601	7.757	1.20	0.007	13.8	15.7
C	107+			1.21		13.4	13.5

λ -ısı iletkenliği katsayısı; q -ısı akışı; Q -ısı miktarı; H -birim toprak kütlesinden ayrılan ısı miktarı;

T_y -horizonun ortalama yüzey sıcaklığı; T_h - horizonun hesaplanan yüzey sıcaklığı

Çizelge 1 ve 2'den görüldüğü gibi, Inceptisol ve Entisol ordo topraklarının profillerindeki üst horizonlarda ısı akışı yüksek olmasına karşın alt horizonlarda azalma eğilimi gözükmemekte; araştırma döneminde ısı akışı pozitif yönde gerçekleşmektedir. Toprağın ısısal yayılım ve hacimsel ısı kapasitesi ile doğrusal ilişkide olan ısı iletkenliği katsayısı ise, her iki ordo topraklarının profillerinin alt horizonlarında artış göstermektedir.

Toprak horizonlarındaki ısı akışı ve hacim ağırlığı ile ilişkili olarak ayrılan ısı miktarı aşağı horizonlarda azalmaktadır. Horizonlardaki sıcaklık değerlerinin değişim, ısısal özellikleri etkileyen temel faktörlerdendir. Genel olarak, Inceptisol ordosuna ait toprak horizonlarındaki ısısal özelliklerin değerleri, Entisol toprak horizonlarındakinden daha yüksek olmaktadır. Teorik ifadeler kullanılarak toprak profillerinde sıcaklığın tahmin edilmesinde, ısısal özelliklerin detaylı olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Inceptisol ve Entisol toprakların horizonlarında ölçülen toprak sıcaklıkları ile toprağın zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin (11) çözümüyle hesaplanan sıcaklık değerlerini karşılaştırmak için belirlenen istatistiksel göstergeler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. Entisol toprakların horizonlarındaki ısısal özellikler ve zamana bağlı olmayarak hesaplanan sıcaklık değerleri
Table 2. Thermal properties in horizons of Entisol soils and temperature values calculated independently of time

Horizon	Derinlik, cm	λ , $watt\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	q , $watt\ m^{-2}$	ρ , $gr\ cm^{-3}$	H , $watt\ kg^{-1}$	T_y , $^\circ C$	T_h , $^\circ C$
Typic Ustifluent							
	0					24.8	25.6
Ap	0-18	3.338	16.663	1.31	0.013	17.0	17.8
A2	18-37	4.355	8.958	1.44	0.006	17.1	17.4
C	37+			1.52		16.8	17.2
Mollic Ustifluent-1							
	0					28.8	29.6
Ap	0-21	8.375	34.300	1.38	0.025	16.1	16.9
A2	21-55	17.122	25.255	1.27	0.020	16.6	16.5
C	55+					16.1	16.1
Mollic Ustifluent-2							
	0					26.7	27.4
A	0-15	2.858	14.337	1.25	0.012	18.0	18.7
C1	15-47	13.569	15.351	1.49	0.010	17.4	18.3
C2	47+					16.5	16.8

Çizelge 3. (11) ifadesine ait istatistiksel göstergeler
Table 3. Statistical indicators for the expression (11)

Topraklar	HKOK	NHKOK	Dİ	d
Inceptisol	1.339	0.077	0.576	0.023
Entisol	0.654	0.034	0.067	0.005

HKOK-hata kareler ortalamasının kare kökü; NHKOK-normalleştirilmiş hata kareler ortalaması karekökü; Dİ-dağılım indeksi; d-uygunluk indeksi

HKOK, NHKOK ve Dİ değerlerinin küçük olması tercih edilmektedir. Uygunluk indeksi (d) modelin geçerliliğinin bir göstergesi olup, d 'nin 1'e yakın olması modelin uygulanabilirliğini göstermektedir (Willmott ve Matsuura, 2005; Krause ve ark., 2005; Wang ve ark., 2016). Entisol toprak horizonlarında ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerlerine ait istatistiksel hata göstergeleri daha küçük değerlere sahip olup, her iki toprak sıcaklıkları için istatistiksel göstergeler geçerlilik sınırları dahilindedir. Dolayısıyla (11) çözümünün performansının iyi eğiliminde olduğu gözükmektedir.

4. Sonuç

Toprakta moleküler düzeyde gerçekleşen ısı iletkenliği (ısı taşınımı), toprağın uzaysal sıcaklık eğimine (sıcaklığın x, y, z koordinatları boyunca değişimine) bağlı olup, toprağın ısı iletkenliği katsayısıyla doğrusal orantılı olmaktadır. Zamana bağlı olmayan toprak sıcaklığının teoriksel değişimi; herhangi toprak katmanının ortalama sıcaklığının, ısı akışı, mesafe, ısı iletkenliği katsayısı, hacim ağırlığı ve toprağın birim kütesinden ayrılan ısı miktarının fonksiyonu olmaktadır. Diğer ısısal özelliklerle karşılaştırıldığında, toprağın birim kütesinden ayrılan ısı miktarı düşük olup, sıcaklık değişimini negatif yönde etkilemektedir. Zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin çözümüne göre hesaplanan ve ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki istatistiksel göstergeler, çözümün uygulanabilirliğinin mümkün olduğunu göstermektedir. Daha fazla termofiziksel özelliklerin göz önüne alınması, sınır koşullarının detaylı olarak belirlenmesi, zamana bağlı olmayan ısı iletkenliği denkleminin çözümünün daha da geliştirilmesine imkan sağlayabilir.

Teşekkür

Şekillerin düzenlenmesindeki katkılarından dolayı Ziraat Yüksek Mühendisi Dr. Fikret SAYGI'na teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Arkhangelskaya, T., Lukyashchenko, K., 2018. Estimating soil thermal diffusivity at different water contents from easily available data on soil texture, bulk density, and organic carbon content. *Biosystems Engineering*, 168: 83-95.
- Bayat, H., Ebrahimzadeh, G., Mohanty, B.P., 2021. Investigating the capability of estimating soil thermal conductivity using topographical attributes for the Southern Great Plains, USA. *Soil & Tillage Research*, 206: 104811.
- Dengiz, O., Efendiler, A., 2016. Farklı iki fizyografik ünite üzerinde oluşmuş toprakların karakteristiklerinin belirlenmesi ve dağılım haritalarının oluşturulması. *Uluslararası Coğrafya Sempozyumu, TÜCAUM*, 13-14 Ekim, Ankara, s.156-168.
- Ekberli, İ., 2006. Isı iletkenlik denkleminin çözümüne bağlı olarak topraktaki ısı taşınımına etki yapan bazı parametrelerin incelenmesi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesinin Dergisi*, 21(2): 179-189.
- 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 denklemine bağlı olarak toprak sıcaklığının matematiksel modellenmesi *Anadolu Tarım Bilim. Dergisi*, 30 (3): 287-291.
- Ekberli, İ., Gülser C., Dengiz O., 2021. Aluviyal depositler üzerinde oluşmuş genç ve gelişmekte olan toprakların ısı akışı ve ısı miktarının incelenmesi. *Toprak Su Dergisi*, 10 (1): 1-12.
- Ekberli, İ., Sarılar, Y., 2015. Toprak sıcaklığının profil boyunca sönme derinliğinin ve gecikme zamanının belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesinin Dergisi*, 52(2): 219-225.
- Evelt, S.R., Agam, N., Kustas, W.K., 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.
- Fourier, J.B.J., 1822. *Théorie analytique de la chaleur (The Analytical Theory of Heat)*. Paris, 676 p.
- Gülser, C., Ekberli, İ., 2019. Toprak sıcaklığının tahmininde ısı taşınım denklemi ve pedotransfer fonksiyonun karşılaştırılması. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 7(2): 158-166.
- Gülser, C., Ekberli, İ., Mamedov, A., 2019. Toprak sıcaklığının yüzey ısı akışına bağlı olarak değişimi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 29(1): 1-9.
- Gülser C, Ekberli İ, Mamedov A, Özdemir N, 2018. Faz değişimine bağlı olarak ısı iletkenliği denkleminin incelenmesi ve toprak neminin ısısal yayımına etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 33(3): 261-269.
- Hedayati-Dezfooli, M., Leong, W.H., 2019. An experimental study of coupled heat and moisture transfer in soils at high temperature conditions for a medium coarse soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137: 372-389.
- İsachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S., 1981. *Heat transfer (in Russian)*. Energoizdat Press, Moscow, 417 p.
- Krause, P., Boyle, D.P., Base, F.B., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89-97.
- Kreith, F., Black, W.Z., 1983. *Basic heat transfer (in Russian)*. Mir Press, Moscow, pp. 47-128.
- Li, Y., Kustas, W.P., Huang, C., Kool, D., Haghghi, E., 2018. Evaluation of soil resistance formulations for estimates of sensible heat flux in a desert vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261: 255-261.
- Luikov, A.V., 1967. *Theory of thermal conductivity (in Russian)*. Vysshaya Shkola Press, Moscow, 599 p.
- Lu, S., Ren, T., Horton, R., 2020. Estimating the components of apparent thermal conductivity of soils at various water contents and temperatures. *Geoderma*, 376: 114530.
- Oncley, S.P., Foken, T., Vogt, R., Kohsiek, W., DeBruin, H.A.R., Bernhofer, C., Christen, A., van Gorsel, E., Grantz, D., Feigenwinter, C., Lehner, I., Liebenthal, C., Liu, H., Mauder, M., Pitacco, A., Ribeiro, L., Weidinger, T., 2007. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. *Boundary-Layer Meteorology*, 123: 1-28.
- Peng, X., Heitman, J., Horton, R., Ren, T., 2015. Field evaluation and improvement of the plate method for measuring soil heat flux density. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215: 341-349.
- Rajeev, P., Kodikara, J., 2016. Estimating apparent thermal diffusivity of soil using field temperature time series. *Geomechanics and Geoengeering: An International Journal*, 11(1): 28-46.

- Turcotte, D.L., Schubert, G., 1982. *Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems*. John Wiley and Sons, New York, 450 p.
- Usovich, B., Lipiec, J., Usovich, 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.
- 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.
- Wang, Z-H., Bou-Zeid, E., 2012. A novel approach for the estimation of soil ground heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154-155: 214-221.
- 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.
- Wu, B., Oncley, S.P., Yuan, H., Chen, F., 2020. Ground heat flux determination based on near-surface soil hydrothermodynamics. *Journal of Hydrology*, 591: 125578.
- Xie, X., Lu, Y., Ren, T., Horton, R., 2019. Soil temperature estimation with the harmonic method is affected by thermal diffusivity parameterization. *Geoderma*, 353: 97-103.
- Yadav, B., Krishnan, P., Shafeeq, P.M., Parihar, C.M., Aggarwal, P., 2020. Modelling soil thermal regime in wheat using HYDRUS-2D under diversified maize-wheat-mungbean cropping system. *Catena*, 194: 104765.
- Zhu, B., Cheng, W., 2011. Constant and diurnally-varying temperature regimes lead to different temperature sensitivities of soil organic carbon decomposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 43: 866-869.