



TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME DERGİSİ

<http://dergi.toprak.org.tr>



Toprağın bazı ısı parametrelerinin maksimum toprak sıcaklığıyla ilişkisi

İmanverdi EKBERLİ*, Coşkun GÜLSER

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Samsun

Özet

Toprak özelliklerinin değişimi, bitki gelişimi için optimum toprak ortamının oluşturulması, toprak oluşum süreçlerinin açıklanması vb. topraktaki maksimum sıcaklıkla ilişkili olup, topraktaki maksimum sıcaklığın teorik ve deneysel olarak belirlenmesi gereklidir. Bu çalışmada, toprağın ısı iletkenliği denkleminin çözümünden elde edilen maksimum toprak sıcaklığının analitik ifadesinin uygulanabilirliği incelenmiştir. Teorik olarak maksimum toprak sıcaklığının, toprak derinliğinin ortalama sıcaklığının, birim alandan geçen ısı miktarının, kütle yoğunluğunun, özgül ısı kapasitesinin ve derinliğin bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Toprağın 0-50 cm derinliğinde ölçülen ve hesaplanan maksimum sıcaklıklar sırasıyla 16.6-35.8 °C ve 16.4-38.4 °C aralıklarında; birim alandan geçen ısı miktarı $3.716 \cdot 10^6$ - $17.857 \cdot 10^6$ J m⁻² aralığında; özgül ısı kapasitesi ise 950.404 J kg⁻¹ °C⁻¹ olarak saptanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan maksimum toprak sıcaklıkları arasındaki ilişki yüksek ($R^2=0.9106$) bulunmuştur. Ayrıca, nispi hatanın 0.012-0.148 aralığında; ortalama nispi hata ise 0.086 olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toprağın ısı iletkenliği denklemi, ısı miktarı, özgül ısı kapasitesi

The relationship of some heat parameters of the soil with the maximum soil temperature

Abstract

Change of soil properties, creation of optimum soil environment for plant growth, explanation of soil formation processes etc. It is related to the maximum temperature in the soil and it is necessary to determine the maximum temperature in the soil theoretically and experimentally. In this study, the applicability of the analytical expression of the maximum soil temperature obtained from the solution of the thermal conductivity equation of the soil was investigated. Theoretically, it has been shown that the maximum soil temperature is a function of the average temperature of the soil depth, the amount of heat passing through a unit area, mass density, specific heat capacity, and depth. The maximum temperatures measured and calculated at 0-50 cm depth of the soil are in the ranges of 16.6-35.8°C and 16.4-38.4°C, respectively; the amount of heat passing through the unit area is in the range of $3.716 \cdot 10^6$ - $17.857 \cdot 10^6$ J m⁻²; the specific heat capacity was determined as 950.404 J kg⁻¹ °C⁻¹. The correlation between the measured and calculated maximum soil temperatures was found to be high ($R^2=0.9106$). Also, the relative error is in the range of 0.012-0.148; mean relative error was determined as 0.086.

Keywords: Equation of thermal conductivity of soil, amount of heat, specific heat capacity

© 2022 Türkiye Toprak Bilimi Derneği. Her Hakkı Saklıdır

Giriş

Toprak sıcaklığı; toprak oluşum süreçlerini ve bitki büyümesini kontrol eden önemli toprak özelliklerinden biridir. Ayrıca, toprak üstü ve toprak altı çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri etkileyen toprak sıcaklığı, enerji akışı, su akışı, besin döngüsü ve ekolojik kararlılık arasındaki denge değişikliklerini etkileyen temel bir parametredir (Maryanaji ve ark., 2017; Savva ve ark., 2010; Shiwei ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2022). Farklı derinliklerde toprağın maksimum ve minimum sıcaklıklarının teorik ve deneysel olarak belirlenmesi, hem topraktaki enerji süreçlerinin hem de bölgesel çevre ve iklim koşullarının tanımlanmasında, aynı zamanda tarım yöntemlerinin ve stratejilerinin geliştirilmesinde de önemlidir. Toprak-bitki-su ilişkisinin incelenmesi (Ruiz-Machuca, 2015; Salau, 2015; Yadav ve ark., 2020), toprak verimliliğinin ve sürdürülebilirliğinin korunması için çeşitli yöntemlerin uygulanması (Deguchi, 2009, Liu ve

* Sorumlu yazar:

Tel. : 0 (362) 312-1919
E-posta : iman@omu.edu.tr

Makale Türü: ARAŞTIRMA MAKALESİ

Geliş Tarihi : 18 Nisan 2022
Kabul Tarihi : 06 Haziran 2022

e-ISSN : 2146-8141

DOI : 10.33409/tbbbd.1105351

ark., 2018; Maslov ve ark., 2022), toprağın sıcaklık rejiminin düzenlenmesi (Luz ve ark., 2015; Chen ve ark., 2021; Li ve ark., 2021) vb. toprakların maksimum ve minimum sıcaklıklarının değerlendirilmesi ile ilişkili olmaktadır.

Toprak sıcaklığının değişimi toprakların ısısal özelliklerini etkilemekte, ısısal özelliklerin ve ısı iletkenliği denkleminin sınır koşullarının detaylı olarak değerlendirilmesi ise ısı iletkenliği denkleminin çözümünün uygulanabilirlik performansını yükseltmektedir. Lu ve ark. (2020), çeşitli su içerikleri ve sıcaklıklarda toprakların ısı iletkenliği bileşenlerinin tahmin edilmesine ait bir araştırmada, kumlu tınlı ve siltli killi topraklar için çeşitli sıcaklık ve su içeriklerinde ısı iletkenliği belirlenmiş ve sıcaklığın ısı iletkenliğini önemli düzeyde etkilediği gösterilmiştir. Toprak sıcaklığı, yüzey enerji dağılımı değişimini, ısının mekânsal-zamansal dinamiklerini, toprak mikro iklimini, su rejimini ve gizli ısı alışverişini etkilemektedir (Ghauman ve Lal, 1985; Chung ve Horton, 1987; Heitman vd., 2008; Xiao vd., 2011). Sıcaklığın etkisi sonucunda oluşan toprak mikro iklimi ise, bitki büyümesi (tohum çimlenmesi, fide oluşumu vb.), toprağın kimyasal ve biyolojik süreçleri, mikrobiyal aktivitesi (organik maddenin mineralizasyonu, solunum hızı) üzerinde önemli etkiye sahiptir (Abu-Hamdeh ve Reeder, 2000; Mellander ve ark., 2004; Karhu ve ark., 2010; Xu ve ark., 2012; Wu ve ark., 2012). Toprakta maksimum ve minimum sıcaklıkların, ısısal özelliklerin detaylı olarak belirlenmesi, toprağın fiziksel süreçlerinin modellenmesi, tarım yönetimi, meteorolojik ve endüstriyel uygulamalar gibi birçok alanlarda önemlidir (Ochsner ve ark., 2001; Usowicz ve ark., 2013). Toprak sıcaklığını tahmin etmek için ısı iletkenliği denkleminin dayanan analitik modeller, toprak özelliklerine ve sıcaklıklarına ait veri tabanları (her bir araştırma bölgesi için ampirik katsayıların geliştirilmesi gereken) kullanılarak oluşturulan ampirik denklemler, benzerlik teorisi ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılmaktadır (Plauborg, 2002; Gülser ve Ekberli, 2004; 2019; Ekberli, 2006; Gao ve ark., 2007; Bilgili, 2010; Graham ve ark., 2010; Ozturk ve ark., 2011; Ekberli ve Gülser, 2015; Ekberli ve ark., 2016; 2017; 2021; Gülser ve ark., 2018; 2019; Kara ve Cemek, 2019; Kassaye ve ark., 2021; Mondal ve ark., 2022). Toprak sıcaklığının teorik (matematiksel) modellerinin oluşturulmasında, temel ısı iletimi denkleminin farklı sınır ve başlangıç koşullarına bağlı, çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Passerat de Silans ve ark. (1996) tarafından yapılan bir araştırmada, ısı iletkenliği denkleminin harmonik, Laplace dönüşümü, düzeltilmiş Laplace dönüşümü ve homojen olmayan toprak sisteminde Lettau yöntemi (Lettau, 1954) ile elde edilen toprak sıcaklığı modellerinden yararlanılmıştır. Antonopoulos (2006), bitki örtüsü altındaki toprakta su ve ısı iletiminin modellenmesi araştırmasında, başlangıç ve sınır koşulu olarak sıcaklığın kosinüsoidal değişiminden ve maksimum ve minimum değerlerinden faydalanmıştır. Evett ve ark. (2012) ise, zamana bağlı olarak toprak yüzeyinde sıcaklık değişiminin modellenmesinde Fourier serisini uygulamışlardır. Bazı araştırmacılar (Samanta ve Guha, 2012; Ekberli ve ark., 2015; Xu ve ark., 2015; Qi ve ark., 2019) ise toprak sıcaklığının modellenmesinde, toprağın ısı bilançosu denklemini ve benzerlik teorisini kullanmışlardır.

Bu çalışmanın amacı, toprağın ısı iletkenliği denkleminin çözümünden elde edilen ve toprağın birim alandan geçen ısı miktarına, kütle yoğunluğuna, katı kısmının özgül ısı kapasitesine ve derinliğine bağlı olan sıcaklık modelinin maksimum sıcaklık tahminine uygulanabilirliğinin incelenmesidir.

Materyal ve Yöntem

Isısal parametrelerin ve maksimum sıcaklık değerlerinin belirlenmesinde, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kampus Yerleşim sahası Ziraat Fakültesinin deneme alanı (41°21.86' Kuzey, 36°11.41' Doğu koordinatlarında, deniz seviyesinden 190 m yükseklikte) toprağında yapılan sıcaklık ölçümlerinden yararlanılmıştır. Günlük toprak sıcaklığı değerleri 9⁰⁰, 11⁰⁰, 13⁰⁰, 15⁰⁰, 17⁰⁰, 19⁰⁰ saatlerinde civalı cam termometre ile (Sterling and Jaskson, 1986) 0; 10; 20; 50 cm toprak derinliklerinde belirlenmiştir (Ekberli ve Gülser, 2020).

Toprağın birim alandan geçen ısı miktarı ($J m^{-2}$)

$$Q = C_H V (T_i - T_{i+1}) = C_H V \Delta T \quad (i = \overline{1,3})$$

(burada, C_H - toprağın hacimsel ısı kapasitesi, $cal cm^{-3} °C^{-1}$ veya $J m^{-3} °C^{-1}$; V - birim hacim, cm^3 veya m^3 ; ΔT - toprağın x_i ve x_{i+1} derinliklerindeki ortalama sıcaklık farkıdır, $°C$) ifadesine göre belirlenmiştir.

Toprağın katı kısmının özgül ısı kapasitesinin (C_g , $cal gr^{-1} °C^{-1}$ veya $J kg^{-1} °C^{-1}$) belirlenmesinde

$$C_g = C_{org} \frac{m_{org}}{m} + C_{min} \left(1 - \frac{m_{org}}{m} \right)$$

[burada, C_{org} ve C_{min} - sırasıyla topraktaki organik maddenin ve mineral maddenin özgül ısı kapasitesi ($cal\ gr^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ veya $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$); $\frac{m_{org}}{m}$ - topraktaki organik madde miktarı ($gr\ gr^{-1}$ veya %) olmaktadır] ifadesi kullanılmış ve toprakta $C_{org} = 0.46\ cal\ gr^{-1}\ ^\circ C^{-1}$; $\frac{m_{org}}{m} = 0.0283\ gr\ gr^{-1}$; $C_{min} = 0.22\ cal\ gr^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ olduğunu göz önüne alarak, $C_g = 0.227\ cal\ gr^{-1}\ ^\circ C^{-1} = 950.404\ J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ bulunmuştur.

Toprağın hacimsel ısı kapasitesi ($J\ m^{-3}\ ^\circ C^{-1}$ veya $cal\ cm^{-3}\ ^\circ C^{-1}$)

$$C_H = C_g \rho_v + C_s W_\theta$$

[burada, $\rho_v = 1.12\ gr\ cm^{-3}$ olup, toprağın hacim ağırlığı; $C_s = 1.00\ cal\ cm^{-3}\ ^\circ C^{-1}$ - suyun hacimsel ısı kapasitesi; W_θ - toprağın hacimsel nem ($cm^3\ cm^{-3}$) içeriğidir] olarak,

$$C_H = 0.227\ cal\ gr^{-1}\ ^\circ C^{-1} \cdot 1.12\ gr\ cm^{-3} + 1.00\ cal\ cm^{-3}\ ^\circ C^{-1} W_\theta \text{ veya}$$

$$C_H = (0.254 + W_\theta)\ cal\ cm^{-3}\ ^\circ C^{-1}$$

ifadesine göre değerlendirilmiştir. Sıcaklık fonksiyonunun maksimumunun belirlenmesinde, fonksiyona ait ekstrem noktaların belirlenmesi kuralı uygulanmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Maksimum toprak sıcaklığının modellenmesi

Toprakta sıcaklık değişiminin incelenmesinde, ısı iletkenlik denkleminin çeşitli özel çözümleri kullanılmaktadır. Toprağın

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (0 \leq x < \infty, -\infty < t), \quad a = \frac{\lambda}{C_H} \quad (1)$$

Burada, T - toprak katmanının sıcaklığı, $^\circ C$; t - zaman, sn; a - ısıl yayılım katsayısı, $m^2\ sn^{-1}$; λ - ısı iletkenliği katsayısı, $J\ m^{-1}\ sn^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ veya $watt\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$; x - mesafe, cm.

Yukarıdaki biçimde ifade olunan ısı iletkenliği denkleminin, toprak katmanlarında sıcaklık değişimi sonucunda oluşan ve birim alandan geçen ısı miktarına (Q , $J\ m^{-2}$) bağlı özel çözümü ise

$$T = T_0 + \frac{Q}{2\rho C_g \sqrt{\pi a t}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad (2)$$

olarak belirlenmektedir (burada, T_0 - toprak yüzeyinin veya herhangi bir katmanın ortalama sıcaklığı, $^\circ C$; Q - birim alandan geçen ısı miktarı, $J\ m^{-2}$; $\rho = 2650\ kg\ m^{-3}$ - toprağın özgül ağırlığı; C_g - toprağın katı kısmının özgül ısı kapasitesi, $cal\ gr^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ veya $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) (Luikov, 1967; Turcotte ve Schubert, 1985; Ekberli ve Gülser, 2020).

Maksimum toprak sıcaklığının teorik ifadesinin belirlenmesi için, (2) ifadesine fonksiyonun ekstrem noktalarının belirlenmesi kuralı uygulanır.

$$\text{Yukarıda verilen (2) ifadesinden } \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q}{2\rho C_g \sqrt{\pi a}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \left(-\frac{1}{2t\sqrt{t}} + \frac{x^2}{4at^2\sqrt{t}} \right) = 0 \Rightarrow -1 + \frac{x^2}{2at} = 0 \Rightarrow t = \frac{x^2}{2a}$$

elde edilir. $\left. \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right|_{t=\frac{x^2}{2a}} < 0$ olduğundan, sıcaklığın maksimum değeri $t = \frac{x^2}{2a}$ zamanında gerçekleşmektedir.

Sıcaklığın maksimum değerini veren yukarıdaki zaman ifadesi (2)'de yerine konursa aşağıdaki (3) ifadesi elde edilir:

$$T_{maksimum} = T_0 + \frac{Q}{\rho C_g x \sqrt{2\pi e}} \quad (3)$$

Modelin girdi parametrelerinin incelenmesi

Toprak sıcaklığının maksimum değerini gösteren (3) ifadesinin uygulanabilirliğinin belirlenmesi için, ölçülen toprak sıcaklıklarına bağlı olarak ilgili parametrelerinin (toprak katmanının ortalama sıcaklığı, toprağın katı kısmının özgül ısı kapasitesi, birim alandan geçen ısı miktarı) değerlendirilmesi gerekir. Deneme alanından farklı tarih ve saatlerde yapılan toprak sıcaklığı ölçümleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Toprağın farklı tarih ve zaman diliminde ölçülen sıcaklık (°C) değerleri

Tarih	Derinlik, cm	Zaman, saat						Ortalama sıcaklık, °C
		09 ⁰⁰	11 ⁰⁰	13 ⁰⁰	15 ⁰⁰	17 ⁰⁰	19 ⁰⁰	
19.04.2005	0-20	17.5	20.2	27.9	22.2	18.2	15.8	20.3
	20-50	14.7	16.0	18.6	16.2	15.3	15.6	16.0
05.05.2005	0-20	20.2	26.0	30.0	27.2	21.7	18.9	24.0
	20-50	13.8	14.7	16.6	14.4	14.7	14.6	14.8
14.06.2005	0-20	27.0	30.7	35.8	32.6	30.1	24.3	30.1
	20-50	18.7	19.4	21.5	19.1	19.2	19.4	19.6

Çizelge 1’den de görüldüğü gibi, ölçüm zamanına bağlı olarak toprak sıcaklıkları geniş aralıkta değişim göstermekte, 20-50 cm katmanında toprak sıcaklığının değişimi sabitleşme sürecine yaklaşmaktadır. Tüm ölçüm zamanlarında maksimum toprak sıcaklığı aynı zamanda (13:00) gerçekleşmiş ve 0-20 cm yüzey katmanında daha yüksek değerlere sahip olmuştur.

Toprağın birim alandan geçen ısı miktarı ve özgül ısı kapasitesi değerleri modelin temel girdi parametrelerini oluşturmaktadır. Modelin girdi parametrelerine ait ortalama değerleri belirlenmiş (Ekberli ve Gülser, 2020) ve Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Modelin girdi parametre değerleri

Tarih	Derinlik, cm	C_g , $J kg^{-1} °C^{-1}$	Q , $J m^{-2}$
19.04.2005	0-20	950.404	$8.219 \cdot 10^6$ *
	20-50		$3.716 \cdot 10^6$
05.05.2005	0-20	950.404	$17.857 \cdot 10^6$ *
	20-50		$4.877 \cdot 10^6$
14.06.2005	0-20	950.404	$17.288 \cdot 10^6$ *
	20-50		$15.570 \cdot 10^6$

*0-10 cm ve 10-20 cm katmanlarının birim alanından geçen ısı miktarı değerlerinin ortalaması

Toprağın katı kısmının özgül ısı kapasitesi toprak sıcaklığı değişimlerini kontrol eden önemli termal özelliklerden biri olup, toprağın mineralojik ve organik madde bileşimine, yoğunluğuna, gözenekliliğine ve su içeriğine bağlı olmaktadır. Araştırma toprağının katı kısmının özgül ısı kapasitesinin belirlenmesinde tüm katmanlar için $\frac{m_{org}}{m} = 0.0283 \text{ gr gr}^{-1}$ ortalama değeri kullanıldığından dolayı, sabit değerler elde edilmiştir.

Jananee ve ark. (2021), üç farklı topografyayı temsil eden toprakların termal ve spektroskopik yöntemle incelenmesine ait bir çalışmada, tarım, orman ve yol kenarındaki toprakların özgül ısı kapasitelerinin sırasıyla $570-780 \text{ J kg}^{-1} °C^{-1}$; $910-1140 \text{ J kg}^{-1} °C^{-1}$; $780-920 \text{ J kg}^{-1} °C^{-1}$ aralıklarında değiştiğini, ortalama değerlerin ise sırasıyla $690 \text{ J kg}^{-1} °C^{-1}$; $1010 \text{ J kg}^{-1} °C^{-1}$; $850 \text{ J kg}^{-1} °C^{-1}$ olduğunu saptamışlardır. Ju ve Hu (2018), yapay ısıtmanın kışlık buğday tarlasında toprağın hidrotermal özelliklerine etkisini inceledikleri bir çalışmada, toprakların hacimsel ısı kapasitesi, ısı iletkenliği ve ısı akışı gibi ısıl özelliklerinin belirlenmesinde, toprağın katı kısmının özgül ısı kapasitesini $0.85 \text{ kJ kg}^{-1} K^{-1}$ ($\frac{m_{org}}{m} = 0.0139 \text{ gr gr}^{-1}$) olarak

kabul etmişlerdir. Ren ve ark. (2003) farklı çalışmalarda çeşitli bünyeye sahip toprakların özgül ısı kapasitelerine ait değerleri özetlemişlerdir. Termal ataletle ilgili olarak toprağın su içeriğini tahmin edilmesine ait diğer çalışmada ise, toprağın özgül ısı kapasitesi $800 \text{ J kg}^{-1} K^{-1}$ olarak kullanılmıştır (Lu ve ark., 2009).

Toprağın ısı miktarı, topraktaki sıcaklık değişimine ve hacimsel ısı kapasitesine bağlı olup, araştırma döneminde $3.716 \cdot 10^6 - 17.857 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-2}$ aralığında değişmekte, aşağı derinliklerde genel olarak azalma eğilimi göstermektedir. Toprağın 0-10 cm ve 10-20 cm derinliklerindeki ortalama sıcaklık farkı yüksek olduğundan, 0-20 cm derinlikteki birim alandan geçen ısı miktarı da yüksek olmaktadır. Ayrıca, iklim koşullarının değişimi, net radyasyon, gizli ısı akışı, evapotranspirasyon gibi faktörlerde birim alandan geçen

ısı miktarını önemli düzeyde etkilemektedir. [Heitman ve ark. \(2010\)](#), toprakta ısı akışı ölçümlerinde gizli ısının etkisine ait araştırmalarında, toprağın 1 cm ve 3 cm derinliklerindeki taşınan ısı miktarını sırasıyla 7.2-12.5 MJ m⁻² ve 11.2-12.5 MJ m⁻² aralıklarında tahmin ederek, ısı taşınımında net radyasyonun etkili faktör olduğunu vurgulamışlardır. Toprakta depolanan ısı miktarının yenilenebilir bir termal kaynak olarak kullanılmasına ait on yıl boyunca (Ağustos 2007 - Temmuz 2017) yapılan diğer bir araştırmada ([Brys, 2020](#)), yüzey, 5 cm ve 10 cm toprak derinliklerindeki sıcaklık değerlerini kullanılmış; denemede çıplak ve çimen örtülü toprakların 0-8 cm katmanında yıllık ortalama pozitif ısı akışı toplamının sırasıyla 331.8 MJ m⁻² (92.2 kW saat m⁻²) ve 179.0 MJ m⁻² (49.7 kW saat m⁻²); negatif ısı akışı toplamının ise 330.3 MJ m⁻² (91.8 kW saat m⁻²) ve 170.6 MJ m⁻² (47.4 kW saat m⁻²) olduğunu saptamıştır.

Aluviyal depositler üzerinde oluşmuş genç ve gelişmekte olan toprakların ısı akışı ve ısı miktarının incelenmesi konulu bir çalışmada, Entisol ordusuna ait topraklarda (Typic Ustifluent, Mollic Ustifluent-1, Mollic Ustifluent-2) ısı miktarının 1.548·10⁶-5.927·10⁶ J m⁻² aralığında değiştiği tespit edilmiştir ([Ekberli ve ark., 2021](#)).

Maksimum toprak sıcaklığını teorik belirlenmesi ve ölçülen maksimum sıcaklıklarla karşılaştırılması

Toprağın katı kısmının özgül ısı kapasitesi ($C_g = 950.404 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) ve özgül ağırlığı

($\rho = 2650 \text{ kg m}^{-3}$) değerlerini göz önüne alarak, (3) ifadesi

$$T_{maksimum} = T_0 + \frac{Q}{2650 \text{ kg m}^{-3} \cdot 950.404 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot x \sqrt{2 \cdot 3.1416 \cdot 2.7183}} =$$

$$= T_0 + 0.96 \cdot 10^{-7} \text{ J}^{-1} \text{ m}^3 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \frac{Q}{x}$$

olarak, aşağıdaki biçimde sadeleştirilir:

$$T_{maksimum} = T_0 + 0.96 \cdot 10^{-7} \text{ J}^{-1} \text{ m}^3 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \frac{Q}{x} \quad (4)$$

Örneğin, araştırma toprağının 0-20 cm katmanı için

$$T_{maksimum} = 20.3 + 0.96 \cdot 10^{-7} \text{ J}^{-1} \text{ m}^3 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \frac{8.219 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-2}}{0.2 \text{ m}} = 24.3^\circ\text{C} \text{ bulunur.}$$

Modelin girdi parametre değerleri (Çizelge 2) kullanılarak (4) ifadesine göre diğer katmanlar için hesaplanan maksimum toprak sıcaklıkları ve $NH = \frac{|T_0 - T_H|}{|T_H|}$ (burada, T_0 ve T_H sırasıyla ölçülen ve hesaplanan

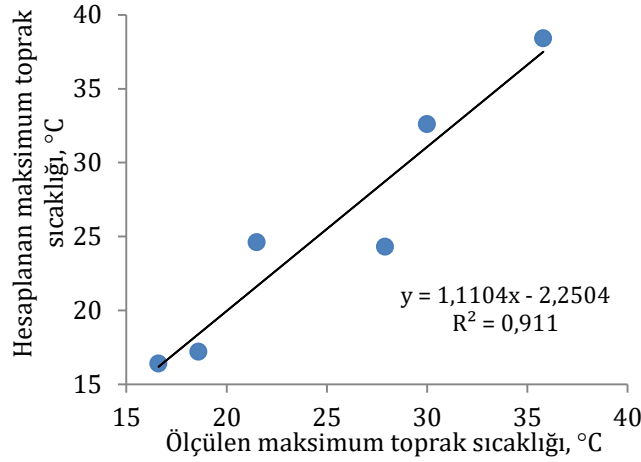
maksimum toprak sıcaklıklarıdır) ifadesine göre ölçülen ve hesaplanan maksimum toprak sıcaklıkları arasındaki nispi hata değerleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Toprağın (4) ifadesine göre hesaplanan maksimum sıcaklık değerleri

Tarih	Derinlik, cm	Ortalama sıcaklık, °C	Ölçülen maksimum sıcaklık (T_0), °C	Hesaplanan maksimum sıcaklık (T_H), °C	Nispi hata (NH)
19.04.2005	0-20	20.3	27.9	24.3	0.148
	20-50	16.0	18.6	17.2	0.081
05.05.2005	0-20	24.0	30.0	32.6	0.080
	20-50	14.8	16.6	16.4	0.012
14.06.2005	0-20	30.1	35.8	38.4	0.068
	20-50	19.6	21.5	24.6	0.126

Ölçülen ve hesaplanan maksimum toprak sıcaklıkları arasındaki nispi hata değerleri 0.012-0.148 aralığında değişmektedir. Ortalama nispi hata değeri ise 0.086 olarak saptanmıştır. Toprak yüzeyinde toprak sıcaklığının tamponlanmasında etkili olan nem, organik madde, gözeneklilik vb. bazı toprak özelliklerindeki değişimlerin farklılık göstermesi, yani alt katmanlara göre daha heterojen bir yapıda olması; ısınma ve soğuma olaylarının yüzey katmanında gerçekleşmesi nedeniyle bu katmandaki sıcaklık değerleri daha geniş aralıkta değişmekte, dolayısıyla nispi hatanın yüksek olmasına neden olmaktadır. Toprak sıcaklığının farklı yöntemlerle modellenmesi ve bazı ısısal parametrelerin belirlenmesine ait literatür kaynaklarında ([Mihalakakou, 2002](#); [Kisi ve ark., 2017](#); [Chen ve ark., 2018](#); [Wan ve ark., 2021](#); [Du ve ark., 2022](#)) nispi hata değerleri %(-14.5) ile %22.0 arasında saptanmıştır. Ölçülen (T_0) ve hesaplanan (T_H) maksimum toprak sıcaklık değerleri arasındaki ilişki yüksek ($R^2=0.911$) olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Toprak sıcaklığı ve

onun mekansal ve zamansal değişimi; toprak özelliklerinin değişimi, tohum çimlenmesi, kök gelişimi, buharlaşma, suyun depolanması ve hareketi, besin döngüsü vb. toprakta meydana gelen birçok dinamik süreçlerin kapsamını ve yönünü doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir (Qian ve ark, 2011; Citakoglu, 2017; Mehdizadeh ve ark., 2018). Bu nedenle, farklı toprak derinliklerinde sıcaklığın tahmin edilmesine imkan sağlayan modellerin belirlenmesi, tarımsal araştırmalar bakımından önemlidir (Shamshirband ve ark., 2020).



Şekil 1. Ölçülen maksimum toprak sıcaklık değerleri (T₀) ile (3) ifadesinden hesaplanan maksimum toprak sıcaklık değerleri (T_H) arasındaki ilişki

Sonuç

Maksimum toprak sıcaklığının modellenmesinde toprağın ısı iletkenlik denkleminin, toprak katmanlarında sıcaklık değişimi sonucunda oluşan ve birim alandan geçen ısı miktarına bağlı olan özel çözümü kullanılmıştır. Fonksiyonun eksterm noktalarının belirlenmesi kuralına dayanarak, maksimum toprak sıcaklığının analitik ifadesi belirlenmiştir. Maksimum toprak sıcaklığının tahmininde, toprak derinliğindeki ortalama sıcaklığın etkileyici faktör olduğu gözükmektedir. Maksimum toprak sıcaklığı, birim alandan geçen ısı miktarının artışıyla artarken; toprağın katı kısmının özgül ısı kapasitesi ve toprak derinliğindeki artışla azalmaktadır. Toprağın organik madde miktarı özgül ısı kapasitesini etkilediğinden, maksimum toprak sıcaklığının da değişimine neden olmaktadır. Maksimum toprak sıcaklığının tahmin edilmesinde kullanılan bu modelin performansının daha da yükseltilmesi, girdi parametrelerinin detaylı olarak belirlenmesine bağlı olup, bu parametrelerin farklı toprak ve iklim koşullarında değerlendirilmesi gerekir.

EK: $\left. \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right|_{t=\frac{x^2}{2a}} < 0$ koşulunun detaylı açıklaması

(3) ifadesine göre,

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(T_0 + \frac{Q}{2\rho C_g \sqrt{\pi a}} \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \right) = \frac{Q}{2\rho C_g \sqrt{\pi a}} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \right) = \\ &= \frac{Q}{2\rho C_g \sqrt{\pi a}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \left(\frac{x^2}{4at^2 \sqrt{t}} - \frac{1}{2t\sqrt{t}} \right) \end{aligned} \quad (\text{E1) elde edilir.}$$

(E1) ifadesinden ise

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{Q}{2\rho C_g \sqrt{\pi a}} \frac{\partial}{\partial t} \left[e^{-\frac{x^2}{4at}} \left(\frac{x^2}{4at^2 \sqrt{t}} - \frac{1}{2t\sqrt{t}} \right) \right] =$$

$$= \frac{Q}{2\rho C_g \sqrt{\pi a}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \left(\frac{x^4 + 12a^2 t^2 - 12atx^2}{16a^2 t^4 \sqrt{t}} \right) \quad (E2) \text{ bulunur.}$$

$t = \frac{x^2}{2a}$ olduğunda,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \Big|_{t=\frac{x^2}{2a}} = -\frac{\sqrt{2} Q a^2}{\rho C_g \sqrt{\pi} e x^5} < 0 \quad (E3) \text{ olarak belirlenmektedir.}$$

Kaynaklar

- Abu-Hamdeh NH, Reeder RC, 2000. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1285-1290.
- Antonopoulos VZ, 2006). Water movement and heat transfer simulations in a soil under ryegrass. *Biosystems Engineering*, 95 (1): 127-138.
- Bilgili M, 2010. Prediction of soil temperature using regression and artificial neural network models. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 110: 59-70.
- Brys K, Brys T, Sayegh MA, Ojrzynska H, 2020. Characteristics of heat fluxes in subsurface shallow depth soil layer as a renewable thermal source for ground coupled heat pump. *Renewable Energy*, 146: 1846-1866.
- Chen H, Chu S, Luan D, Li Q, Zhang L, Zhai H, 2018. Performance study on heat and moisture transfer in soil heat charging. *International Journal of Sustainable Energy*, 37(7): 669-683.
- Chen N, Li X, Simůnek J, Shi H, Hu Q, Zhang Y, 2021. Evaluating the effects of biodegradable and plastic film mulching on soil temperature in a drip-irrigated field. *Soil & Tillage Research*, 213: 105116.
- Chung SO, Horton R, 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resources Research*, 23(12): 2175-2186.
- Citakoglu H, 2017. Comparison of artificial intelligence techniques for prediction of soil temperatures in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1-2): 545-556.
- Deguchi S, Kawamoto H, Tanaka O, Fushimi A, Uozumi S, 2009. Compost application increases the soil temperature on bare Andosol in a cool climate region. *Soil Science and Plant Nutrition*, 55(6): 778-782.
- Du Y, Li R, Wu T, Yang C, Zhao L, Hu G, Xiao Y, Yang S, Ni J, Ma J, Shi J, Qiao Y, 2022. A new model for predicting soil thermal conductivity for dry soils. *International Journal of Thermal Sciences*, 176: 107487.
- 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, Gülser C, Özdemir N, 2016. Benzerlik teorisinin toprak sıcaklığına uygulanabilirliği. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 4 (2): 63-68.
- Ekberli İ, Gülser C, 2015. İki boyutlu ısı iletkenliği denkleminin bağılı olarak toprak sıcaklığının matematiksel modellenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(3): 287-291.
- Ekberli İ, Gülser C, 2020. Toprak sıcaklığının ısı miktarına bağılı olarak değişiminin matematiksel modellenmesi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 24(2): 229-240.
- 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, Gülser C, Dengiz O, 2021. Toprağın zamana bağılı olmayan bir boyutlu ısı iletkenliğinin incelenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 36(2): 212-220.
- Ekberli İ, Gülser C, Mamedov A, 2015. 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, 2017. Farklı toprak derinliklerindeki sıcaklığın tahmininde parabolik fonksiyonun kullanımı. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 5 (1): 34- 38.
- Evelt SR, Agam N, Kustas WK, Colaizzi PD, Schwartz, RC, 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.
- Gao Z, Bian L, Hu Y, Wang L, Fan J, 2007. Determination of soil temperature in an arid region. *Journal of Arid Environments*, 71: 157-168.
- Ghauman BS, Lal R, 1985. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of soil Nigerian soils. *Soil Science*, 139: 74-80.
- Graham EA, Lam Y, Yuen EM, 2010. Forest understory soil temperatures and heat flux calculated using a Fourier model and scaled using a digital camera. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 640-649.

- Gülser C, Ekberli I, 2004. A Comparison of estimated and measured diurnal soil temperature through a clay soil depth. *Journal of Applied Science*, 4(3): 418-423.
- 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 yayınıma etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 33(3): 261-269.
- Heitman, JL, Horton R, Ren T, Nassar IN, Davis DD, 2008. A test of coupled soil heat and water transfer prediction under transient boundary temperatures. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 1197-1207.
- Heitman JL, Horton, R, Sauer TJ, Ren TS, Xiao X, 2010. Latent heat in soil heat flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 1147-1153.
- Jananee B, Thangam V, Rajalakshmi A, 2021. Investigation of soils by thermal and spectroscopic analysis. *Chemical Engineering Communications*, 208(6): 812-821.
- Ju Z, Hu C, 2018. Experimental warming alters soil hydrothermal properties and heat flux in a winter wheat field. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(5): 718-730.
- Kara F, Cemek B, 2019. Orta Karadeniz Bölgesi illerine ait toprak sıcaklıklarının yapay sinir ağları yöntemi ile tahmin edilmesi. *Derim*, 36(2): 192-198.
- Karhu K, Fritze H, Tuomi M, Vanhala P, Spetz P, Kitunen V, Liski J, 2010. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreal forest soil profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 72-82.
- Kassaye KT, Boulange J, Tu LH, Saito H, Watanabe H, 2021. Soil water content and soil temperature modeling in a vadose zone of Andosol under temperate monsoon climate. *Geoderma*, 384: 114797.
- Kisi O, Sanikhani H, Cobaner M, 2017. Soil temperature modeling at different depths using neuro-fuzzy, neural network, and genetic programming techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, 129: 833-848.
- Lettau HH, 1954. Improved models of thermal diffusion in the soil. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35(1): 121-132.
- Li Y, Chai S, Chai Y, Li R, Lan X, Ma J, Cheng H, Chang L, 2021. Effects of mulching on soil temperature and yield of winter wheat in the semiarid rainfed area. *Field Crops Research*, 271: 108244.
- Liu Z, Xu, J, Li, X, Wang J, 2018. Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in South China. *Geoderma*, 323: 41-54.
- Lu S, Ju Z, Ren T, Horton R, 2009. A general approach to estimate soil water content from thermal inertia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 1693-1698.
- 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.
- Luikov AV, 1967. Theory of thermal conductivity (in Russian). *Vyshshaya Shkola Press, Moscow*, pp. 45-69.
- Maryanaji Z, Merrikhpour H., Abbasi H., 2017. Predicting soil temperature by applying atmosphere general circulation data in west Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 8 (2): 203-218.
- Maslov MN, Maslova OA, 2022. Soil nitrogen mineralization and its sensitivity to temperature and moisture in temperate peatlands under different land-use management practices. *Catena*, 210: 105922.
- Mehdizadeh M, Behmanesh J, Khalili K, 2018. Comprehensive modeling of monthly mean soil temperature using multivariate adaptive regression splines and support vector machine. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3-4): 911-924.
- Mellander PE, Bishop K, Lundmark T, 2004. The influence of soil temperature on transpiration: a plot scale manipulation in a young scots pine stand. *Forest Ecology and Management*, 195: 15-28.
- Mihalakakou G, 2002. On estimating soil surface temperature profiles. *Energy and Buildings*, 34: 215-259.
- Mondal, S, Singh DN, Tang AM, Pereira JM, 2022. A finite difference model for undefined end boundary to analyse the heat transfer in dry sands. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(2): 256-262.
- Ochsner TE, Horton R, Ren T, 2001. A new perspective on soil thermal properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1641-1647.
- Ozturk M, Salman O, Koc M, 2011. Artificial neural network model for estimating the soil temperature. *Canadian Journal of Soil Science*, 91: 551-562.
- 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.
- Plauborg F, 2002. Simple model for 10 cm soil temperature in different soils with short grass. *European Journal of Agronomy*, 17: 173-179.
- Qi J, Zhang X, Cosh MH, 2019. Modeling soil temperature in a temperate region: A comparison between empirical and physically based methods in SWAT. *Ecological Engineering*, 129: 134-143.
- Qian B, Gregorich EG, Gameda S, Hopkins DW, Wang XL, 2011. Observed soil temperature trends associated with climate change in Canada. *Journal of Geophysical Research*, 116(D2): 1-16.
- Ren T, Ochsner TE, Horton R, Ju Z, 2003. Heat-pulse method for soil water content measurement: Influence of the specific heat of the soil solids. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6): 1631-1634.

- Ruiz-Machuca LM, Ibarra-Jiménez L, Valdez-Aguilar LA, Robledo-Torres V, Benavides-Mendoza A, Cabrera-De La Fuente M, 2015. Cultivation of potato – use of plastic mulch and row covers on soil temperature, growth, nutrient status, and yield, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 65(1): 30-35.
- Salau AW, Olasantan FO, Bodunde JG, Makinde EA, 2015. Soil temperature and moisture content changes with growth and yield of cassava/vegetable intercrops. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(4): 447-460.
- Samanta S, Guha A, 2012. A similarity theory for natural convection from a horizontal plate for prescribed heat flux or wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55: 3857-3868.
- Savva Y, Szlavecz K, Pouyat RV, Groffman PM, Heisler G, 2010. Effects of land use and vegetation cover on soil temperature in an urban ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 74 (2): 469-480.
- Shamshirband S, Esmailbeiki F, Zarehaghi D, Neyshabouri M, Samadianfard S, Ghorbani MA, Amir Mosavi A, Nabipour N, Chau KW, 2020. Comparative analysis of hybrid models of firefly optimization algorithm with support vector machines and multilayer perceptron for predicting soil temperature at different depths. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1): 939-953.
- Shiwei G, Tao Z, Jixun G, 2019. Warming and nitrogen addition change the soil and soil microbial biomass C:N: P stoichiometry of a meadow steppe. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(15): 2705.
- 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.
- Turcotte DL, Schubert G, 1985. *Geodynamics. Applications of continuum physics to geological problems (Volume 1)*. Mir Press, Moscow (in Russian), 376 p.
- Usovich B, Lipiec J, Usovich JB, 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.
- Wan X, Zhong C, Mohamed HS, Qiu E, Qu M, Nkiegaing FJ, 2021. Study on the thermal conductivity model of sodium sulfate soils. *Experimental Heat Transfer*, 34(3): 217-239.
- Wu SH, Jansson PE, Kolari P, 2012. The role of air and soil temperature in the seasonality of photosynthesis and transpiration in a boreal Scots pine ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156: 85-103.
- Xiao X, Horton R, Sauer TJ, Heitman JL, Ren T, 2011. Cumulative soil water evaporation as a function of depth and time. *Vadose Zone Journal*, 10: 1016-1022.
- Xu G, Li Y, Deng H, Li H, Yu X, 2015. The application of similarity theory for heat transfer investigation in rotational internal cooling channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85: 98-109.
- Xu X, Luo Y, Zhou, J, 2012. Carbon quality and the temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 50: 142-148.
- Yadav B, Krishnan P, Shafeeq PM, Parihar CM, Aggarwal P, 2020. Modelling soil thermal regime in wheat using HYDRUS-2D under diversified maize-wheat-mungbean cropping system. *Catena*, 194: 104765.
- Zhang T, Huang J-C, Lei Q, Liang X, Lindsey S, Luo J, Zhu A-X, Bao W, Liu H, 2022. Empirical estimation of soil temperature and its controlling factors in Australia: Implication for interaction between geographic setting and air temperature. *Catena*, 208: 105696.