

# Toprakların Isısal Özellikleri ile Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri Arasında Regresyon Modellerin Belirlenmesi

İmanverdi EKBERLİ

Coşkun GÜLSER\*

Orhan DENGİZ

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

\*Sorumlu yazar e-mail (Corresponding author e-mail): cgulser@omu.edu.tr

Geliş tarihi (Received) : 23.02.2021

Kabul tarihi (Accepted): 22.03.2021

DOI:10.21657/topraksu.885688

## Öz

Toprakta sıcaklık alanının oluşumu ve ısı transferinin gerçekleşmesi toprakların ısısal özelliklerinin değişimi ile ilişkili olmaktadır. Isısal özellikler iklim faktörlerine ve toprak özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada topraklarının hacimsel ısı kapasitesi, ısısal yayılım ve ısı iletkenliği katsayıları gibi ısısal özellikleri ile deneysel olarak daha kolay belirlenebilen bazı fiziksel ve kimyasal toprak özellikleri (EC, OM, Kil, Silt, Kum, HA,  $\theta$ ) arasında regresyon modeller oluşturulmuştur. Toprakların hacimsel ısı kapasitesiyle EC, OM, kil, silt, kum ve HA özellikleri arasında yapılan regresyon modelinin istatistiksel anlamlılık düzeyi ( $p=0.001$ ) ve regresyon katsayısı ( $R^2=0.76$ ) yüksek olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlere hacimsel nem içeriğinin ( $\theta$ ) eklenmesi modellerin performansını ( $R^2=0.77-0.99$ ) yükseltmiş;  $\theta$ , EC, OM, Kil, Silt, Kum, HA özelliklerini kapsayan regresyon modelinin istatistiksel anlamlılık düzeyi ( $p=0.000$ ) ve regresyon katsayısı çok yüksek olarak saptanmıştır. Toprakların ısısal yayılım katsayısı ile EC, OM, Kil, Kum, Silt, HA,  $\theta$  özellikleri arasındaki regresyon modelleri için  $R^2=0.76$  ve  $0.79$  ( $p=0.000$  ve  $0.002$ ) olarak saptanmıştır. Regresyon modellerinin toprak özelliklerinin karesi, karekökü ve çarpımını kapsayan polinomlarla ifadesi modellerin performansını yükseltmiş; Kil,  $\theta$ ,  $Kil^2$ ,  $\theta^2$ ,  $\sqrt{OM}$  (EC·HA),  $\sqrt{Kil}$ , OM,  $OM^2$ , HA toprak özelliklerini içeren model yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık ( $p=0.001$ ) göstermiş ve daha yüksek regresyon katsayısı ( $R^2=0.90$ ) ile karakterize edilmiştir. Isı iletkenliği katsayısı ile Kil, Silt, Kum, HA,  $\theta$  toprak özellikleri arasındaki regresyon modelinin performansı yüksek ( $R^2=0.71$ ;  $p=0.001$ );  $\theta$ , Kum, Kil, Silt, HA,  $EC^2$ ,  $OM^2$ ,  $HA^2$ ,  $\theta$ , EC,  $\sqrt{OM}$ , parametreleri arasındaki modelin performansı ise çok yüksek ( $R^2=0.91$ ;  $p=0.012$ ) olarak belirlenmiştir. Elde edilen regresyon modellerin, toprakların ısısal özelliklerinin tahmin edilmesinde uygulanabilirliği mümkün gözükmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Hacimsel ısı kapasitesi, ısısal yayılım katsayısı, ısı iletkenliği katsayısı, toprak özellikleri, regresyon modeli

## Determination of Regression Models Between Thermal Properties of Soils and Some Physical and Chemical Properties

### Abstract

The formation of the temperature field in the soil and the realization of heat transfer are related to the change of the thermal properties of the soils. Thermal properties vary depending on climate factors and soil properties. In this study, regression models were created between the thermal properties of soils such as volumetric heat capacity, thermal diffusivity and thermal conductivity coefficients and some physical and chemical soil properties (EC, OM, Clay, Silt, Sand, Db,  $\theta$ ) that could be determined more easily experimentally. The statistical significance level ( $p = 0.001$ ) and regression coefficient ( $R^2 = 0.76$ ) of the regression model made between the volumetric heat capacity of soils and the properties of EC, OM, Clay, Silt, Sand and Db were determined to be high. Adding volumetric moisture content

( $\theta$ ) to independent variables increased the performance of the models ( $R^2 = 0.77-0.99$ ); the statistical significance level ( $p = 0.000$ ) and the regression coefficient of the regression model including  $\theta$ , EC, OM, Clay, Silt, Sand, Db properties were found to be very high. The thermal diffusion coefficient of soils and the regression models between EC, OM, Clay, Sand, Silt, Db,  $\theta$  properties were determined as  $R^2 = 0.76$  and  $0.79$  ( $p = 0.000$  and  $0.002$ ). The expression of regression models with polynomials including the square, square root and product of soil properties increased the performance of the models; the model including Clay,  $\theta$ ,  $\text{Clay}^2$ ,  $\theta$ ,  $\sqrt{\text{OM}}$ , (EC-Db),  $\sqrt{\text{Clay}}$ , OM,  $\text{OM}^2$ , Db soil properties showed high level of statistical significance ( $p = 0.001$ ) and was characterized by a higher regression coefficient ( $R^2 = 0.90$ ). The performance of the regression model between the thermal conductivity coefficient and Clay, Silt, Sand, Db,  $\theta$  soil properties is high ( $R^2 = 0.71$ ;  $p = 0.001$ ); the performance of the model among the parameters  $\theta$ , Sand, Clay, Silt, Db,  $\text{EC}^2$ ,  $\text{OM}^2$ ,  $\text{Db}^2$ ,  $\theta^2$ , EC,  $\sqrt{\text{OM}}$ , was determined to be very high ( $R^2 = 0.91$ ;  $p = 0.012$ ). It seems possible that the regression models obtained can be applied in estimating the thermal properties of soils.

**Keywords:** Volumetric heat capacity, Thermal diffusion coefficient, Thermal conductivity coefficient, Soil properties, Regression model

## GİRİŞ

Toprak yüzeyinde ve alt katmanlarındaki sıcaklığın günlük ve yıllık değişimi, toprak özellikleri ile birlikte toprakların ısısal özelliklerine (ısı kapasitesi, ısısal yayılım, ısı iletkenliği) bağlıdır. Isısal özellikler toprak sıcaklığının zamana bağlı olarak değişim süreçlerinin belirlenmesinde ve düzenlenmesinde, toprağın temel ısı taşınımı denkleminin analitik çözümünün uygulanmasında temel faktörlerdir. Toprak yüzeyinde ve alt katmanlarda enerjinin dağılımı, dolayısıyla sıcaklık alanının ve toprak mikro iklimasının oluşumu süreçleri de toprakların ısısal özelliklerinin değişimine bağlı olmaktadır. Isısal özellikler toprağın temel ısı taşınım denkleminin çözümüne bağlı olarak toprak sıcaklığının tahmin edilmesinde, biyosistem ve jeosistem çalışmalarının çeşitli alanlarında (toprak - hava arasındaki enerji bilançosunun ve yeraltı ısı depolamasının değerlendirilmesi, jeotermal sistemlerin oluşturulması, topraktaki birleştirilmiş su ve ısı transferinin modellenmesi vb.) gerekli parametrelerdir. Topraktaki ısı taşınımı, toprak özelliklerinin (tuz, organik madde miktarı, bünye, hacim ağırlığı, nem, gözeneklilik vb.) yanı sıra ısısal özelliklerle de önemli düzeyde ilişkilidir.

Toprakların ısısal özellikleri teorik ve deneysel olarak farklı ortam ve toprak tiplerinde çeşitli yöntemlerle belirlenmektedir (Bristow vd., 2001; Gülser ve Ekberli, 2002; Binxiang vd., 2004; Correia vd., 2012; Ekberli ve Gülser, 2014; Ekberli vd., 2015; Ekberli ve Sarılar, 2015; Liu vd., 2018; Lu vd., 2018; 2019; Zhang vd., 2018; Bayat vd., 2019; Gamage vd., 2019; Gülser vd., 2019; Zhao vd., 2019; Zhou vd., 2019; Usowicz vd., 2020). Toprağın özgül ısısının belirlenmesine ait bir çalışmada, farklı tekstüre sahip topraklarda

toprağın hacimsel ısı kapasitesiyle hacimsel nem içeriği arasında yüksek ve çok yüksek korelasyonların ( $r=0.8767-0.9946$ ) olduğu gösterilmiş, aralarında artan doğrusal fonksiyonel ilişki olduğu vurgulanmıştır (Moreno vd., 2019).

Toprakların ısısal yayılım katsayısının zamansal değişimi, toprak neminin doğal zamansal değişimiyle ilişkilidir (Roxy vd., 2010, 2014; Sugathan vd., 2014). Mekânsal değişimi ise toprak neminin mekânsal değişimiyle tam olarak açıklanamamakta, genel olarak temel faktörler bünye, hacim ağırlığı ve organik madde olmaktadır (Arhangelskaya, 2004). Barry-Macaulay vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, toprakların ısısal özelliklerine ait bazı mevcut modeller tartışılmış; çoğu araştırmacılar ise modellerin oluşturulmasında bünye, hacim ağırlığı, organik madde, nem verilerinden kullanmışlardır (Rozanski ve Stefaniuk, 2016; Tian vd., 2016). Yapılan bazı modellerin doğruluğu yüksek olmamaktadır. Tian vd.(2016) ve Farouki (1981, 1982) tarafından, ısı iletkenliğine ait yapılan modellerin belirleme katsayıları ( $R^2$ ) sırasıyla 0.79 ve 0.69 olarak saptanmıştır. Arkhangelskaya ve Lukyashchenko (2018), genellikle toprak araştırmalarında gerekli değerlendirmelerin yapılması için deneysel olarak belirlenmesi kolay olan az sayıda verilerin elde edilmesi mümkünüyünü vurgulamış, ısısal yayılım katsayısına ait regresyon modellerin oluşturulmasında 77 bozulmamış farklı toprak örneğinin bünye, hacim ağırlığı, organik karbon içeriğine ait verilerden kullanmışlardır. Bazı araştırmalarda ısı iletkenliği, toprağın su içeriği, kütle yoğunluğu ve penetrasyon direncine bağlı olarak belirlenmektedir (Abu-Hamdeh ve Reeder,

2000; Tarnawski ve Leong, 2000; Lipiec ve Hatano, 2003; Kohout ve ark., 2004). Usowicz ve ark.(2008) tarafından yapılan bir araştırmada, ısı iletkenliğinin tahmin edilmesi için, gözeneklilik, penetrasyon direnci, kum içeriği gibi kolaylıkla ölçülebilir deneysel toprak özelliklerini kapsayan regresyon denklemler yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, toprakların deneysel değerlere bağlı olarak belirlenen hacimsel ısı kapasitesi, ısıl yayılım ve ısı iletkenliği ile toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında regresyon modellerin yapılmasıdır.

### MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırmada Samsun'un Çarşamba ilçesinde 305500-311000 D ve 4555500-4558500 K (UTM, m) koordinatları arasında yer alan Vertisol (Profil 1-3), Inceptisol (Profil 4-5) ve Entisol (Profil 6-8) alt grup topraklarının yerleştiği arazilerden alınan örneklerden kullanılmıştır. Arazide her profile ait horizonlarda cıvalı cam termometre ile (Sterling ve Jackson, 1986) toprak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Alınan toprak örneklerinde elektriksel iletkenlik (EC), 1:1 oranında hazırlanan toprak-su süspansiyonunda elektriksel kondaktivite aleti ile (Richards, 1954); organik madde (OM), Walkley-Black yaş yakma yönteminin Jackson tarafından modifiye edilmiş şekli ile (Jackson, 1958); tekstür hidrometre yöntemiyle (Bouyoucos, 1951); hacim ağırlığı (HA) bozulmamış toprak örneklerinde (Blake ve Hartge, 1986); hacimsel nem içeriği ( ) gravimetrik yöntemle belirlenmiştir. Ölçülen sıcaklık değerlerinden kullanılarak, toprağın katmanındaki ısıl yayılım katsayısının hesaplanmasında

$$a = \frac{\pi}{P} \left( \frac{\Delta_x}{\ln(A_i / A_{i+1})} \right)^2 \quad 1$$

(burada; ve uygun olarak toprağın ve horizonlarına ait sıcaklık dalgalarının amplitütü; - periyot, yani sıcaklık dalgasının bir döngüsünü tamamlaması için gerekli olan zamandır) ifadesinden kullanılmıştır (Trombotto ve Borzotta, 2009; Correia vd., 2012; Ekberli ve Gülser, 2014; Arias-Penas vd., 2015; Gülser vd., 2018; Gülser ve Ekberli, 2019).

Kuru toprağın hacimsel ısı kapasitesi ( $C_{h,t}$  cal  $cm^3$   $^{\circ}C^{-1}$  veya  $Jm^3$   $^{\circ}C^{-1}$ ) ise

$$C_{h,t} = C_{\theta,t} \rho + C_{h,s} \theta \quad 2$$

[burada,  $\rho$ - toprağın hacim ağırlığı, gr  $cm^{-3}$   $C_{\theta,t}$  -kuru toprağın özgül ısı kapasitesi (cal  $gr^{-1}$   $^{\circ}C^{-1}$  veya  $Jkg^{-1}$   $^{\circ}C^{-1}$ );  $C_{h,s}$ =1.00 cal  $cm^{-3}$   $^{\circ}C^{-1}$  -suyun hacimsel ısı kapasitesi;  $\theta$ - toprağın hacimsel nem ( $cm^3$   $cm^{-3}$ ) içeriğidir] formülüne göre hesaplanmıştır (Hanks ve Ashcroft, 1980; Hilel, 2004). Her bir profil horizonundaki ısı iletkenliği aşağıdaki ifadeye göre belirlenmiştir:

$$\lambda = a C_{h,t} \quad 3$$

İstatistik hesaplamalar için MINİTAB-19 paket programından yararlanılmıştır.

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### Araştırma Topraklarının Bazı Fiziksel, Kimyasal ve Isıl Özellikleri

Araştırma topraklarının ısıl parametrelerine önemli düzeyde etki yapan bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelgen 1'den gözüktüğü gibi, araştırma topraklarında EC miktarı 0.01-0.19 dSm<sup>-1</sup> aralığında değişmekte, dolayısıyla tuzluluk problemi bulunmamaktadır. Toprakların organik madde miktarları yüzey ve yüzeye yakın horizonlarda yüksek olup, alt horizonlarda ise azalma göstermektedir. Araştırma topraklarının genetik horizonları genel olarak ağır (Profil 1-5) ve hafif (Profil 6-8) bünyeye sahip olmaktadır. Profillerde hacim ağırlığı 1.19-1.56 gr  $cm^{-3}$  arasında değişmektedir. Toprağın hacimsel ısı kapasitesi ile doğrusal ilişki gösteren hacimsel nem içeriği ise 0.10  $cm^3$   $cm^{-3}$  ile 0.31  $cm^3$   $cm^{-3}$  arasında değişim göstermektedir. Araştırma topraklarının bazı horizonlarında kum içeriğinin yüksek oluşu hacim ağırlığının yüksek, buna karşın hacimsel nem içeriğinin düşük olmasına neden olabilir. (Ekberli ve Dengiz, 2016; Dengiz ve Ekberli, 2017)

Toprak yüzeyinde ve aşağı horizonlardaki sıcaklık alanının oluşumu, toprak özellikleri ile birlikte toprakların ısıl yayılım, hacimsel ısı kapasitesi, ısı iletkenliği vb. gibi ısıl özelliklerine önemli düzeyde bağlı olmaktadır. Sıcaklık alanı oluşumu sonucunda ortaya çıkan ısı taşınımı süreçleri ise, ısıl yayılım ve ısı iletkenliği katsayılarının toprak özellikleriyle olan karşılıklı etkileşimi ile ilişkili olmaktadır. Araştırma topraklarının ölçülen (minimum, maksimum, ortalama) sıcaklık değerlerine bağlı olarak (1) ifadesiyle hesaplanan ısıl yayılım katsayısı; kuru toprağın özgül ısı kapasitesi, hacim ağırlığı ve hacimsel nem içeriğine göre (2) ifadesiyle belirlenen hacimsel ısı kapasitesi ve (3) ifadesiyle hesaplanan ısı iletkenliği katsayısı değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Araştırma toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri**Table 1.** Some physical and chemical properties of research soils

Derinlik, Cm	EC, dSm <sup>-1</sup>	OM, %	Kil, %	Silt, %	Kum, %	HA, gr cm <sup>-3</sup>	$\theta$ , (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
Profil 1							
0-27	0.07	4.87	56.8	22.5	20.6	1.28	0.30
27-65	0.15	4.58	63.9	17.4	18.7	1.27	0.31
65-110	0.01	2.30	56.0	15.2	28.8	1.33	0.29
110+	0.06	1.15	67.3	15.3	17.5	1.23	0.30
Profil 2							
0-33	0.06	5.35	75.9	13.6	10.5	1.22	0.29
33-78	0.07	2.89	72.0	17.7	10.2	1.21	0.31
78-116	0.06	1.99	57.2	28.5	14.3	1.25	0.29
116+	0.10	1.05	11.6	31.0	57.3	1.56	0.12
Profil 3							
0-22	0.07	5.38	61.3	20.9	17.7	1.28	0.31
22-73	0.08	4.54	68.3	17.6	14.1	1.24	0.30
73-107	0.02	2.20	66.8	22.3	10.9	1.21	0.30
107+	0.13	1.38	73.3	17.9	8.8	1.19	0.30
Profil 4							
0-23	0.06	3.93	69.3	19.5	11.2	1.22	0.29
23-58	0.08	2.49	64.5	28.0	7.5	1.19	0.30
58-90	0.04	1.65	39.0	36.2	24.8	1.39	0.26
90+	0.11	1.01	21.8	31.3	46.9	1.55	0.26
Profil 5							
0-30	0.01	3.15	40.9	29.6	29.5	1.35	0.27
30-64	0.01	3.08	67.1	22.5	10.4	1.22	0.29
64-107	0.07	1.38	71.8	19.6	8.6	1.20	0.30
107+	0.03	0.35	64.8	23.9	11.2	1.21	0.30
Profil 6							
0-18	0.08	3.96	21.6	45.5	32.8	1.31	0.22
18-37	0.11	2.47	17.7	37.4	44.9	1.44	0.26
37+	0.13	1.01	7.1	10.6	82.3	1.52	0.10
Profil 7							
0-21	0.11	4.17	19.8	21.1	59.1	1.38	0.19
21-55	0.06	2.85	43.9	42.6	13.5	1.27	0.26
Profil 8							
0-15	0.03	5.20	26.0	37.7	36.3	1.25	0.22
15-47	0.19	1.47	21.8	43.4	34.8	1.49	0.20

EC-elektiriksel iletkenlik; OM-organik madde; HA-hacim ağırlığı, -hacimsel nem içeriği

Çizelge 2'den görüldüğü gibi, araştırma toprakları horizonlarında ısısal yayılım katsayısı geniş aralıkta ( $1.50 \cdot 10^{-6}$  -  $9.50 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup> sn<sup>-1</sup>) değişmektedir. Isısal yayılım katsayısı hacimsel nem içeriği, hacim ağırlığı, organik madde miktarı, toprak bünyesi (kil, silt, kum), EC gibi faktörlere önemli düzeyde bağlı olmaktadır. Organik madde miktarının yüksek olması, bazı horizonlarda ısısal yayılımın az olmasına neden olan faktörlerden biri olarak düşünülmektedir. Kil miktarı yüksek

olan horizonlarda ısısal yayımda genel olarak yüksek olmaktadır. Hacim ağırlığı arttıkça ısısal yayılım katsayısı da arttığından, horizonlarda hacim ağırlığının düşük düzeyde değişimi ısısal yayıma da düşük düzeyde etki yapmaktadır. Araştırma toprakları horizonlarında tuz miktarı az, değişimi ise dar aralıkta gerçekleştiği için, tuz miktarına bağlı olarak ısısal yayımda düzenli artış izlenmemektedir. Horizonlarda hacimsel nem içeriğinin artışı, ısısal yayımda orantılı olmayan

**Çizelge 2.** Araştırma topraklarının bazı ısıl özellikleri  
**Table 2.** Some thermal properties of research soils

Derinlik, Cm	Sıcaklık (°C)			$\alpha$ , m <sup>2</sup> sn <sup>-1</sup>	$C_{h,t}$ , Jm <sup>-3</sup> °C <sup>-1</sup>	$\lambda$ , watt m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
	Minimum	Maksimum	Ortalama			
Profil 1						
0	16.5	30.0	21.4	-	-	-
0-27	14.3	22.5	18.2	5.51·10 <sup>-6</sup>	2.265·10 <sup>6</sup>	12.480
27-65	12.5	18.9	16.9	8.96·10 <sup>-6</sup>	2.299·10 <sup>6</sup>	20.599
65-110	11.2	15.7	14.9	8.77·10 <sup>-6</sup>	2.261·10 <sup>6</sup>	19.829
Profil 2						
0	15.6	30.7	21.8	-	-	-
0-33	13.2	21.1	17.0	6.59·10 <sup>-6</sup>	2.173·10 <sup>6</sup>	14.320
33-78	12.5	17.7	16.0	9.50·10 <sup>-6</sup>	2.253·10 <sup>6</sup>	21.404
78-116	11.3	15.9	15.2	6.67·10 <sup>-6</sup>	2.198·10 <sup>6</sup>	14.661
Profil 3						
0	20.3	31.1	24.9	-	-	-
0-22	14.6	21.3	17.8	5.38·10 <sup>-6</sup>	2.307·10 <sup>6</sup>	12.412
22-73	12.5	18.0	16.8	8.25·10 <sup>-6</sup>	2.232·10 <sup>6</sup>	18.414
73-107	11.0	15.6	15.0	8.74·10 <sup>-6</sup>	2.211·10 <sup>6</sup>	19.324
Profil 4						
0	20.5	35.9	26.7	-	-	-
0-23	12.3	20.4	15.3	5.52·10 <sup>-6</sup>	2.175·10 <sup>6</sup>	12.006
23-58	12.0	19.7	17.2	8.76·10 <sup>-6</sup>	2.193·10 <sup>6</sup>	19.211
58-90	11.4	16.5	15.3	6.91·10 <sup>-6</sup>	2.183·10 <sup>6</sup>	15.085
Profil 5						
0	18.4	29.7	23.9	-	-	-
0-30	14.1	20.0	17.2	6.17·10 <sup>-6</sup>	2.193·10 <sup>6</sup>	13.531
30-64	12.8	17.0	15.6	8.74·10 <sup>-6</sup>	2.175·10 <sup>6</sup>	19.010
64-107	10.7	14.4	13.8	9.36·10 <sup>-6</sup>	2.201·10 <sup>6</sup>	20.601
Profil 6						
0	19.5	32.6	24.8	-	-	-
0-18	13.0	20.4	17.0	1.71·10 <sup>-6</sup>	1.952·10 <sup>6</sup>	3.338
18-37	12.5	18.6	17.1	1.96·10 <sup>-6</sup>	2.222·10 <sup>6</sup>	4.355
Profil 7						
0	24.5	37.0	28.8	-	-	-
0-21	13.7	20.6	16.1	4.45·10 <sup>-6</sup>	1.882·10 <sup>6</sup>	8.375
21-55	13.9	18.8	16.6	8.20·10 <sup>-6</sup>	2.088·10 <sup>6</sup>	17.122
Profil 8						
0	20.1	33.4	26.7	-	-	-
0-15	14.8	21.2	18.0	1.50·10 <sup>-6</sup>	1.905·10 <sup>6</sup>	2.858
15-47	13.5	18.9	17.4	6.48·10 <sup>-6</sup>	2.094·10 <sup>6</sup>	13.569

$\alpha$ - ısısal yayılım katsayısı;  $C_{h,t}$ - hacimsel ısı kapasitesi;  $\lambda$ - ısı iletkenliği katsayısı

artışına neden olmaktadır. Hacimsel ısı kapasitesiyle hacimsel nem içeriği arasında doğrusal ilişki olmakta ve horizonlardaki hacimsel ısı kapasitesi  $1.882 \cdot 10^6$ - $2.307 \cdot 10^6$  Jm<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup> dar aralığında değişmektedir. Toprağın ısı iletkenliği katsayısı, toprağın ısı geçirme özelliğini ve moleküler düzeyde enerji taşınımı karakterize etmekte, araştırma toprakları horizonlarında 2.858-21.404 watt m<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup> arasında değişmektedir (Ekberli ve Dengiz, 2016; Dengiz

ve Ekberli, 2017; Ekberli vd., 2020; 2021). Isı iletkenliği katsayısı ile toprağın hacimsel ısı kapasitesi arasında doğrusal ilişki olduğundan, hacimsel ısı kapasitesinin, dolayısıyla toprağın nem içeriğinin değişimi ısı iletkenliğine önemli düzeyde etki yapmaktadır. Araştırmacılar tarafından toprağın ısı iletkenliğiyle nem içeriği arasında ilişki olduğu vurgulanmış, matematiksel olarak ifade edilen bu ilişkinin toprağın sıcaklık rejiminin

modellenmesinde kullanılmasının mümkünlüğü gösterilmiştir (Kurtener ve Chudnovskii, 1979; Poluektov, 1991). Genel olarak ısı iletkenliği katsayısı deneysel olarak belirlenmekte; Ortamın (toprağın) ısı iletkenliği katsayısının değeri, ortamın fiziksel özelliklerine ve sıcaklığına bağlı olup; genel olarak deneysel yöntemlerle belirlenmektedir.

### Toprakların Bazı Isısal Özellikleriyle Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri Arasındaki Korelasyon İlişkiler

Toprakta ısı taşınımı, iklim faktörleriyle beraber toprak süreçlerinin (ısısal, fiziksel, kimyasal ve biyolojik) karşılıklı etkisi sonucunda oluşmaktadır. Toprağın temel ısı taşınım parametrelerinden olan ve toprağın ısısal özelliğini karakterize eden ısı iletkenliği katsayısı, toprak özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Toprak özelliklerine ait Çizelge 1 ve 2’de verilmiş değerlerden kullanarak, ısı iletkenliği katsayısının; ısısal yayılım, hacimsel ısı kapasitesi ve bazı toprak özellikleri arasında belirlenen Pearson çift yönlü korelasyon değerleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Araştırma topraklarının hacimsel ısı kapasitesiyle EC, OM özellikleri arasında çok zayıf ( $r < 0.2$ ), HA arasında ise zayıf negatif ilişkiler belirlenmiştir. EC değerlerinin düşük ve dar aralıkta değişimi, OM değerlerinin alt katmanlarda azalış göstermesi, HA’nın bazı horizonlarda yüksek ( $> 1.40 \text{ gr cm}^{-3}$ ) ve dar aralıkta değişimi korelasyon katsayılarının zayıf ve çok zayıf olmasına neden olabilir. Hacimsel ısı kapasitesi ile kil miktarı arasında yüksek ( $0.6 < r < 0.8$ ) ve 0.01 düzeyinde anlamlı; kum miktarı arasında ise orta şiddetli ilişki ( $r = -0.596^{**}$ ) saptanmıştır. Silt miktarıyla ise orta şiddetli anlamsız ilişki bulunmuştur. En yüksek korelasyon ilişki ( $r = 0.880^{**}$ ) hacimsel nem içeriği miktarıyla elde edilmiştir. Gülser vd.

(2019) tarafından, toprak sıcaklığının yüzey ısı akışına bağlı olarak değişimine ait bir çalışmada, toprağın hacimsel nem içeriğini miktarının artması durumunda, hacimsel ısı kapasitesinin de doğrusal olarak artış gösterdiği vurgulanmıştır. Toprakların ısısal yayılım katsayısı ile EC, OM, HA değerleri arasında sırasıyla anlamsız düzeyde çok zayıf, zayıf ve orta şiddette negatif; hacimsel nem içeriği ve kil miktarlarıyla ise anlamlı düzeyde yüksek şiddette pozitif korelasyonlar belirlenmiştir. Isısal yayılım katsayısıyla, kum ve silt değerleri arasında ise anlamlı düzeyde sırasıyla yüksek ve orta şiddette negatif korelasyonlar bulunmuştur. Farklı nem içeriklerine sahip toprakların ısısal yayılım katsayısının belirlenmesine ait bir araştırmada, toprak tekstürü, hacim ağırlığı ve organik karbon değerlerinin ısısal yayıma etkisi belirlenmiş, bu parametreler arasında regresyon ilişkiler yapılmış, ısısal yayılımın değişiminde toprak tekstürünün ve hacimsel nem miktarının daha etkili olduğu gösterilmiştir (Arkhangelskaya ve Lukyashchenko, 2018).

Araştırma topraklarının ısı iletkenlik katsayısı ile EC ve OM değerleri arasında önemsiz düzeyde sırasıyla çok zayıf ( $r = -0.122$ ) ve zayıf ( $r = -0.355$ ) negatif ilişkiler belirlenmiştir. Topraklarda tuz miktarının az olması temas aralıklarının az olmasına, dolayısıyla ısı iletkenliğinin düzensiz değişimine; OM miktarının artması ise ısı iletkenliğinin azalmasına neden olduğundan, korelasyon ilişkilerin çok zayıf ve zayıf düzeyde negatif olarak gerçekleşmesi mümkün gözükmemektedir. Hacim ağırlığıyla anlamlı düzeyde orta şiddette negatif korelasyon ilişkisi saptanmıştır. Toprakların ısı iletkenliği kil miktarıyla anlamlı düzeyde pozitif yüksek korelasyon ilişkisi ( $r = 0.762^{**}$ ); silt ve kum miktarıyla ise anlamlı düzeyde sırasıyla orta şiddette

**Çizelge 3.** Toprakların bazı ısısal, fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin korelasyon değerleri matrisi

**Table 3.** Correlation values matrix for some thermal, physical and chemical properties of soils

	$\lambda$	$C_{h,t}$	A	$\theta$	EC	OM	Kil	Silt	Kum	HA
$\lambda$	1									
$C_{h,t}$	0.634**	1								
A	0.996**	0.577**	1							
$\theta$	0.679**	0.880**	0.627**	1						
EC	-0.122	-0.085	-0.115	-0.386*	1					
OM	-0.355	-0.113	-0.379	0.232	-0.125	1				
Kil	0.762**	0.674**	0.736**	0.876**	-0.380	0.191	1			
Silt	-0.555**	-0.523	-0.527*	-0.264	0.092	-0.066	-0.522**	1		
Kum	-0.700**	-0.596**	-0.682**	-0.887**	0.397*	-0.182	-0.917**	0.141	1	
HA	-0.445*	-0.235	-0.432	-0.764**	0.464*	-0.330	-0.870**	0.330	0.862**	1

\*\* Korelasyon 0.01 düzeyinde anlamlı; \*Korelasyon 0.05 düzeyinde anlamlı

**Çizelge 4.** Toprakların ısısal parametreleriyle bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri arasındaki regresyon modeller  
**Table 4.** Regression models between thermal parameters of soils and some physical and chemical properties

Hacimsel ısı kapasitesine ait modeller	R <sup>2</sup>	p
1. $C_{h,t} = 50.6 - 0.210 EC - 0.0017 OM - 0.498 Kil - 0.505 Silt - 0.508 Kum + 1.401 HA$	0.76	0.001
2. $C_{h,t} = 1.3895 + 2.827 \theta$	0.77	0.000
3. $C_{h,t} = 1.4296 + 2.85 \theta - 0.01406 OM$	0.80	0.000
4. $C_{h,t} = 1.080 + 4.345 \theta - 0.00252 Kil + 0.00106 Kum$	0.84	0.000
5. $C_{h,t} = 3.64 + 3.722 \theta + 0.1288 EC - 0.00039 OM - 0.0370 Kil - 0.0376 Silt - 0.0386 Kum + 0.9697 HA$	0.99	0.000
Isısal yayılım katsayısına ait modeller		
1. $a = (-5.99 - 0.820 OM + 0.131 Kil + 0.0197 Kum + 6.32 HA) \cdot 10^{-6}$	0.76	0.000
2. $a = (-352 + 4.78 EC - 0.792 OM + 3.64 Kil + 3.49 Silt + 3.51 Kum + 5.92 HA - 13.2 \theta) \cdot 10^{-6}$	0.79	0.002
3. $a = (38.1 + 0.342 Kil - 312 - 0.169 OM^2 - 0.00238 Kil^2 + 577 \theta^2 + 0.84) \cdot 10^{-6}$	0.85	0.000
4. $a = [20.9 + 0.409 Kil - 199 \theta - 0.205 OM^2 - 0.00288 Kil^2 + 345 \theta^2 + 1.93 \sqrt{OM} + 7.76 (EC \cdot HA)] \cdot 10^{-6}$	0.87	0.000
5. $a = (-57.6 - 2.76 Kil - 306 \theta + 0.00926 Kil^2 + 584 \theta^2 + 31.1 \sqrt{OM} + 6.92(EC \cdot HA) + 26.6 \sqrt{Kil} - 11.6 OM + 0.30 OM^2 + 7.04 HA) \cdot 10^{-6}$	0.90	0.001
Isı iletkenliği katsayısına ait modeller		
1. $\lambda = -2424 + 24.1 Kil + 23.9 Silt + 23.7 Kum + 35.0 HA - 10.1 \theta$	0.71	0.001
2. $\lambda = -617 + 11.3 EC - 1.718 OM + 6.4 Kil + 6.0 Silt + 6.1 Kum + 14.3 HA - 10.1 \theta$	0.80	0.001
3. $\lambda = -3854 + 35.2 Kil + 35.1 Silt + 34.8 Kum + 733 HA - 1119 + 17 EC^2 - 0.2792 OM^2 - 267 HA^2 + 2203 \theta^2$	0.90	0.000
4. $\lambda = -3609 - 37.4 EC + 1.84 OM + 33.2 Kil + 33.1 Silt + 32.8 Kum + 667 HA - 1155 \theta + 207 EC^2 - 0.518 OM^2 - 242 HA^2 + 2287 \theta^2$	0.91	0.002
5. $\lambda = -2483 - 838 \theta + 22.1 Kum + 22.0 Kil + 22.3 Silt + 470 HA + 207 EC^2 + 0.54 OM^2 - 171 HA^2 + 1629 \theta^2 - 20.9 EC - 18.8 OM + 48 \sqrt{OM} + 6.2 \sqrt{Kil}$	0.91	0.015

ve yüksek negatif korelasyon ilişkileri ( $r = -0.555^{**}$  ve  $0.700^{**}$ ) göstermiştir. Toprağın katı fazının içerdiği toprak zerreciklerinin ve diğer katı madde bileşenlerinin temas aralıklarındaki ısı iletkenliği, toprak havası ortamında gerçekleşmekte; toprak bünyesine bağlı olarak oluşum ortamının değişimi ise korelasyon ilişkilerin yönüne etki yapan faktörlerden biri olmaktadır. (2) ve (3) ifadesinden de görüldüğü gibi, toprağın hacimsel ısı kapasitesi ve hacimsel nem içeriği; ısı iletkenliği katsayısıyla ısısal yayılım katsayısı ve hacimsel ısı kapasitesi arasında, bu parametrelerin değişim aralığında, artan fonksiyonel ilişki mevcuttur. Benzer biçimde, araştırma topraklarının ısı iletkenliği katsayısıyla hacimsel ısı kapasitesi, ısısal yayılım ve hacimsel nem içeriği arasında anlamlı düzeyde yüksek ve çok yüksek pozitif korelasyon ilişkiler saptanmıştır. Kurtener ve Chudnovskii (1979) tarafından yapılan bir çalışmada, toprağın ısı iletkenliği katsayısı [ $\lambda(w)$ ] ile özgül ısı kapasitesi [ $c(w)$ ], nem ( $w$ ) ve hacim ağırlığı ( $\rho_c$ ) arasında  $\lambda(w) = c(w)[\lambda_1(w - \lambda_4)^2 + \lambda_2 \rho_c + \lambda_3]$  (burada,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ , farklı toprak tiplerinde ısı iletkenliğinin neme bağlılığını ifade eden deneysel katsayılar) biçiminde fonksiyonel ilişkinin olduğu belirlenmiştir.

### Toprakların Isısal Özellikleriyle Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri Arasındaki Regresyon Modelleri

Regresyon modellerinin; çeşitli bilim dallarında olduğu gibi, tarım alanlarında da geniş uygulamaları vardır. Toprak ekosisteminde regresyon modellerin yapılması ve kullanılması; basit diferansiyel, cebirsel ve kısmi türevli diferansiyel denklemlerle ifade edilen teorik modellerden daha kolay ve pratik olmaktadır. Teorik modellerde olduğu gibi, regresyon (deneysel, pedotransfer) modellerin yapılmasında da birçok varsayımlar kabul edilmektedir. Regresyon modellerin yapılmasında; bağımsız parametreler olarak, deneysel olarak daha kolay belirlenebilen fiziksel ve kimyasal toprak özellikleri tercih edilmektedir (Ekberli ve Dengiz, 2016; 2017; Kars ve Ekberli, 2019). Toprakların ısısal özelliklerinin değişiminde iklim faktörü ile beraber toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri de etkili olmaktadır (Çizelge 3). Araştırma topraklarının hacimsel ısı kapasitesi, ısısal yayılım ve ısı iletkenliği katsayıları ile deneysel olarak daha kolay belirlenebilen fiziksel ve kimyasal toprak özellikleri (EC, OM, kil, silt, kum, HA,  $\theta$ ) arasında oluşturulmuş doğrusal regresyon modeller Çizelge 4'te verilmiştir.

Hacimsel ısı kapasitesiyle toprak özellikleri arasındaki regresyon modelleri yüksek ( $0.001 \leq p < 0.01$ ) ve çok yüksek ( $p < 0.001$ ) düzeyde istatistiksel anlamlı olup, regresyon katsayıları ( $R^2$ ) 0.76-0.99 arasında değişmektedir. Toprakların EC, OM, kil, silt, kum ve HA özelliklerini esas alan 1 nolu model diğerleri ile karşılaştırıldığında daha düşük regresyon katsayısı vermiştir. Hacimsel nem içeriğinin ( $\theta$ ) kullanılması modellerin performansını artırmıştır.  $\theta$ ,  $\theta$  ve OM; , kil ve kum özelliklerini sırasıyla esas alan 2, 3 ve 4 nolu modellerde belirleme katsayıları sırasıyla 0.77; 0.80 ve 0.84 olarak saptanmıştır.  $\theta$ , EC, OM, kil, silt, kum, HA özellikleriyle ifade edilen 5 nolu regresyon modeli en yüksek regresyon katsayısı ( $R^2=0.99$ ) ile karakterize edilmiştir. Toprak neminin artması durumunda, hacimsel ısı kapasitesi doğrusal olarak artmakta (Hanks ve Ashcroft, 1980; Hilel, 2004), dolayısıyla hacimsel ısı kapasitesi değerlerinin tahmininde kullanılan modellerde EC, OM, kil, silt, kum, HA gibi özelliklerin yanı sıra hacimsel nem içeriği değerlerinin de kullanılması bu tür modellerin performansını artırmıştır.

Araştırma topraklarının ısısal yayılım katsayısı ile toprak özellikleri arasındaki regresyon modelleri de yüksek ve çok yüksek düzeyde istatistiksel anlamlı olup, OM, Kil, Kum, HA özellikleriyle oluşturulan 1 nolu model en düşük regresyon katsayısına ( $R^2=0.76$ ) sahiptir. OM, kil, kum, HA özellikleriyle EC, Silt, özelliklerinin birlikte kullanılması ile elde edilen 2 nolu modelde regresyon katsayısı ( $R^2=0.79$ ) fazla artış göstermemektedir. Yapılan 3-5 nolu regresyon modellerinin toprak özelliklerinin karesi, karekökü ve çarpımını kapsayan polinomlarla ifadesi, regresyon katsayıları değerlerini ( $R^2=0.85-0.90$ ), dolayısıyla tahminin önem düzeyini yükseltmiştir. Arkhangelskaya ve Lukyashchenko (2018), toprakların farklı nem düzeylerinde ısısal yayılım katsayısının değerlendirilmesine ait bir araştırmada, ısısal yayılım ile toprakların kolay belirlenebilen kil, silt, kum, hacim ağırlığı, organik karbon özellikleri arasında regresyon modeller oluşturmuşlardır.

Toprakların ısı iletkenliği katsayısıyla kil, silt, kum, HA ve hacimsel nem içeriği özellikleri arasındaki 1 nolu regresyon model yüksek düzeyde istatistiksel anlamlı olup, diğer modellere göre düşük regresyon katsayısına sahiptir. 1 nolu regresyon modelinin bağımsız değişkenlerini oluşturan kil, silt, kum, HA ve hacimsel nem içeriği özelliklerine EC ve OM özelliklerini eklemekle elde edilen 2

nolu modelin performansı fazla yükselmemiştir ( $R^2=0.80$ ). Toprak özelliklerinden  $EC^2$ ,  $OM^2$ ,  $HA^2$ ,  $\sqrt{OM}$ ,  $\sqrt{Kil}$  parametrelerinin de kullanılmasıyla oluşturulan 3, 4 ve 5 nolu modellerde ısı iletkenliği katsayısının tahminindeki belirleme katsayıları artmıştır. Yapılan 3-5 nolu regresyon modellerinin toprak özelliklerinin karesi, karekökü ve çarpımını kapsayan polinomlarla ifadesi, regresyon katsayıları değerlerini ( $R^2=0.85-0.90$ ), dolayısıyla tahminin önem düzeyini yükseltmiştir. Usowicz vd. (2006; 2008), toprakların ısı iletkenliğinin tahmini için yapılan regresyon modellerinde hacimsel nem içeriği, kum, gözeneklilik, penetrasyon direnci gibi toprak özelliklerinden ve bu özelliklerin karesini, karekökünü kapsayan terimlerden kullanmışlardır.

## SONUÇ

Toprakların ısısal özellikleri (hacimsel ısı kapasitesi, ısısal yayılım ve ısı iletkenliği) ile deneysel olarak daha kolay belirlenebilen bazı fiziksel ve kimyasal toprak özellikleri (EC, OM, Kil, Silt, Kum, HA,  $\theta$ ) arasında regresyon modeller oluşturulmuştur. Belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ve anlamlılık düzeyi ( $p$ ) değerlerinden görüldüğü gibi, elde edilen regresyon modellerin toprakların ısısal özelliklerinin tahmini için kullanılması mümkündür. Ayrıca, ısısal özellikler için oluşturulan tüm regresyon modellerden 5 nolu modellerin performansı daha yüksek bulunmuştur. Isısal özelliklerin tahmin edilmesi için oluşturulan regresyon modellerde, toprakların EC, OM, Kil, Silt, Kum, HA,  $\theta$  özelliklerinin ve bu parametrelerin karesini, karekökünü ve çarpımını içeren terimlerin birlikte kullanılması önemlidir. İklim koşullarının, toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin mekana ve zamana bağlı olarak düzensiz değişimi, ısısal özelliklere ait regresyon modellerin performansına etki yapmaktadır. İklim ve toprak özelliklerine ait verilerin yeterli düzeyde oluşumu, regresyon modellerin oluşturulmasının ve uygulanmasının kolaylığı dikkate alınarak, yerel ve bölgesel düzeyde ısısal özelliklere ait regresyon modellerin yapılması mümkün gözükmektedir. Yerel ve bölgesel düzeyde toprak bilgi sistemlerinin geliştirilmesi, ısısal özelliklere ait çeşitli regresyon modellerin yapılmasıyla da ilişkilidir.

## 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.



- Arias-Penas D, Castro-Garcia MP, Rey-Ronco MA, 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.
- Arhangelskaya TA (2004). Thermal diffusivity of gray forest soils in the Vladimir Opol'e region. *Eurasian Soil Science*, 37(3): 285-294.
- 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.
- Barry-Macaulay D, Bouazza A, Wang B, Singh RM (2015). Evaluation of soil thermal conductivity models. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(11): 1892-1900.
- Bayat H, Mazaheri B, Mohanty BP (2019). Estimating soil water characteristic curve using landscape features and soil thermal properties. *Soil & Tillage Research*, 189: 1-14.
- Binxiang S, Xuezu X, Yuanming L, Dongqing L, Shuangjie W, Jinzhao Z (2004). Experimental researches of thermal diffusivity and conductivity in embankment ballast under periodically fluctuating temperature. *Cold Regions Science and Technology*, 38: 219-227.
- Blake GR, Hartge KH (1986). Bulk density and particle density. In: *Methods of soil analysis, Part I, Physical and mineralogical methods*. ASA and SSSA Agronomy Monograph No: 9 (2nd ed.), Madison, pp. 363-381.
- Bouyoucos GJ (1951). A Recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Agronomy Journal*, 43: 434-438.
- Bristow KI, Kluitenberg GJ, Goding CJ, Fitzgerald TS (2001). A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31: 265-280.
- 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.
- Dengiz O, Ekberli İ (2017). Bazı vertisol alt grup topraklarının fizikokimyasal ve ısıl özelliklerinin incelenmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 6(1): 45-52.
- Ekberli İ, Dengiz O (2017). Bazalt ana materyali ve farklı topografik pozisyonlar üzerinde oluşmuş toprakların bazı topografik ve fiziko-kimyasal özellikleri arasındaki doğrusal regresyon modellerinin belirlenmesi. *Toprak Su Dergisi*, 6(1): 15-27.
- Ekberli İ, Dengiz O (2016). Bazı inceptisol ve entisol alt grup topraklarının fizikokimyasal özellikleriyle ısıl 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, 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 (2020). Yarı humid ekolojik koşullar altında oluşmuş bazı vertisol alt grup toprakların profillerinde ısı akışının belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 35(2): 198-207.
- Ekberli İ, Gülser C, Özdemir N (2015). Toprakta ısı iletkenliğine etki yapan ısıl parametrelerin teorik incelenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(3): 300-306.
- Ekberli İ, Sarılar Y (2015). Toprak sıcaklığının profil boyunca sönmeye derinliğinin ve gecikme zamanının belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesinin Dergisi*, 52(2): 219-225.
- Farouki OT (1982). Evaluation of methods for calculating soil thermal conductivity (CRREL Report No: 82-88). Hanover, NH: Trans Tech Publications.
- Farouki OT (1981). The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 5: 67-75.
- Gamage DNV, Biswas A, Strachan IB (2019). Spatial variability of soil thermal properties and their relationships with physical properties at field scale. *Soil & Tillage Research*, 193: 50-58.
- Gülser C, Ekberli İ (2002). Toprak sıcaklığının profil boyunca değişimi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17(3): 43-47.
- Gülser C, Ekberli İ (2019). Toprak sıcaklığının tahmininde ısı taşınım denklemi ve pedotransfer fonksiyonunun karşılaştırılması. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 7(2): 158-166.
- Gülser C, Ekberli İ, Mamedov A, Özdemir N (2018). Faz değişimine bağlı olarak ısı iletkenliği denkleminin incelenmesi ve toprak neminin ısıl yayıma etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 33(3): 261-269.
- 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.
- Hanks RJ, Ashcroft GJ (1980). Applied soil physics. Soil water and temperature applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 125-144.
- Hillel D (2004). Introduction to environmental soil physics. Elsevier Academic Press, USA, pp. 215-233.
- Jackson ML (1958). Soil chemical analysis. Verlag: Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Kars N, Ekberli İ (2019). Buğday bitkisinin verim parametreleri ile bazı toprak özellikleri arasındaki pedotransfer modellerinin uygulanabilirliği. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 6(2): 153-164.
- Kohout M, Collier AP, Stepanek F (2004). Effective thermal conductivity of wet particle assemblies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(25): 5565-5574.
- Kurtener DA, Chudnovskii AF (1979). Agrometeorological basics of the thermal amelioration of soils (in Russian). Press *Gidrometeoizdat, Leningrad*, p. 231.
- Lipiec J, Hatano R (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116: 107-136.
- Liu Z, Xu J, Li X, Wang J (2018). Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in South China. *Geoderma*, 323: 41-51.

- Lu S, Lu Y, Peng W, Ju Z, Ren T (2019). A generalized relationship between thermal conductivity and matric suction of soils. *Geoderma*, 337: 491-497.
- Lu Y, Yu W, Hu D, Liu W (2018). Experimental study on the thermal conductivity of aeolian sand from the Tibetan Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 146: 1-8.
- Moreno RO, Armindo RA, Moreno RL (2019). Development of a low-cost automated calorimeter for determining soil specific heat. *Computers and Electronics in Agriculture* 162: 348–356.
- Poluektov RA, 1991. *Agroecosystem dynamics simulation* (in Russian). Press Gidrometeoizdat, Leningrad, pp. 61-69.
- Richards LA (Editor) (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils*. United States Salinity Laboratory Staff. United States Department of Agriculture, Handbook No: 60, p. 160.
- Roxy MS, Sumithranand VB, Renuka G (2014). Estimation of soil moisture and its effect on soil thermal characteristics at Astronomical Observatory, Thiruvananthapuram, South Kerala. *Journal of Earth System Science*, 123(8): 1793-1807.
- Roxy MS, Sumithranand VB, Renuka G (2010). Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal diffusivity at Astronomical Observatory, Thiruvananthapuram, South Kerala. *Journal of Earth System Science*, 119(4): 507-517.
- Rozanski A, Stefaniuk D (2016). Prediction of solid thermal conductivity from soil separates and organic matter content: Computational micromechanics approach. *European Journal of Soil Science*, 67: 551-563.
- Sterling AT, Jackson RD (1986). Temperature. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No: 9, ASA, SSSA, Madison WI.
- Sugathan N, Biju V, Renuka G (2014). Influence of soil moisture content on surface albedo and soil thermal parameters at a tropical station. *Journal of Earth System Science*, 125(5): 1115-1128.
- Tarnawski VR, Leong WH (2000). Thermal conductivity of soils at very low moisture content and moderate temperatures, *Transport in Porous Media*, 41(2): 137-147.
- Tian Z, Lu Y, Horton R, Ren T (2016). A simplified de Vriesbased model to estimate thermal conductivity of unfrozen and frozen soil. *European Journal of Soil Science*, 67(5): 564-572.
- 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.
- Usovicz B, Lipiec J, Ferrero A (2006). Prediction of soil thermal conductivity based on penetration resistance and water content or air-filled porosity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 5010-5017.
- Usovicz B, Lipiec J, Łukowski M, Bis Z, Usovicz J, Latawiec AE (2020). Impact of biochar addition on soil thermal properties: Modelling approach. *Geoderma*, 376: 114574.
- Usovicz B, Lipiec J, Usovicz JB (2008). Thermal conductivity in relation to porosity and hardness of terrestrial porous media. *Planetary and Space Science*, 56: 438-447.
- Zhang M, Bi J, Chen W, Zhang X, Lu J (2018). Evaluation of calculation models for the thermal conductivity of soils. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 94: 14-23.
- Zhao Y, Si B, Zhang Z, Li M, He H, Hill RL (2019). A new thermal conductivity model for sandy and peat soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 274: 95-105.
- Zhou Y, Yan C, Tang AM, Duan C, Dong S (2019). Mesoscopic prediction on the effective thermal conductivity of unsaturated clayey soils with double porosity system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130: 747-756.