

ISI İLETKENLİK DENKLEMİNİN ÇÖZÜMÜNE BAĞLI OLARAK TOPRAKTAKİ ISI TAŞINIMINA ETKİ YAPAN BAZI PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

İmanverdi EKBERLİ

O.M.Ü. Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü, Samsun

Geliş Tarihi: 20.12.2005

ÖZET: Bu araştırmada gözenekli ortamda sıcaklık alanının oluşumu ve ısı taşınımı teorik olarak incelenmiştir. Deneysel değerlere ve toprağın ısı iletkenlik denkleminin çözümüne göre, toprakta sıcaklık dalgalarının profil boyunca değişiminde i) toprak yüzeyindeki maksimum veya minimum sıcaklığın belirli bir derinlikte gecikme zamanı, ii) sıcaklığın topraktaki sönme (ilerleme) derinliği ve iii) toprak yüzeyinde ve belirli bir derinlikteki sıcaklık amplitütüne bağlı olarak toprağın ısısal yayılım katsayısı ve rutubetin bu parametrelere etkisi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toprak rutubeti, sıcaklık alanı, ısı iletkenliği, gecikme zamanı, sönme derinliği, ısısal yayılım

ANALYSIS OF SOME PARAMETERS EFFECTING HEAT DIFFUSIVITY IN SOIL BASED ON SOLUTION OF HEAT CONDUCTIVITY EQUATION

ABSTRACT: In this research, formation of thermal area and heat transfer in porous soil environment have been theoretically studied. By referring to the values obtained from experiment and solution of soil's heat diffusivity equation, soil's heat distribution coefficient based on i) diffusivity delay of maximum or minimum temperature in certain depth of soil ii) depth of heat advance in soil, iii) heat amplitude in soil surface and in certain soil depth and effect of moisture on these parameters in variation of heat waves along soil profile have been determined.

Key Words: Soil moisture, thermal area, heat diffusivity, diffusivity delay, advancement depth, heat distribution

1.GİRİŞ

Ekosistemin bileşenleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için matematiksel modellerin yapılması gerekmektedir. Bu ise farklı matematiksel ifadelerin kullanılmasıyla mümkündür. Ekosisteme ait modellerin oluşturulmasında, basit diferansiyel, cebirsel ve kısmi türevli diferansiyel denklemlerden yararlanılmaktadır.

Ekosisteme ait basit diferansiyel denklemlerle yapılmış modeller, sistemin değişimini ifade etmeyip, sadece onun kısa süreli dinamiğini belirtir. Buna göre, ekosistemdeki değişimi ve onun parametreleri arasındaki ilişkileri ifade eden genel teorik temelin oluşması için, matematik, fizik ve termodinamik yöntemlerinin uygulanması sonucunda oluşan matematiksel modellerin yapılması gerekmektedir. Genelde topraktaki fiziki süreçlerin incelenmesi uygulamalı matematik, dolayısıyla matematiksel fizik modellerin yapılması ile yakından ilişkilidir.

Cisimlerde ısı akımını ifade eden ısı transferi denklemleri, matematiksel fizik modellerden biri olup, onun incelenmesi sadece teorik temelin gelişiminde değil, aynı zamanda çağdaş pratik problemlerin çözümünde, hesaplama ve tahmindeki hassaslıkta, gözlemlerin geliştirilmesinde ve denemelerin planlanmasında da önem taşımaktadır (Adjali ve ark., 2000 a,b; Rees ve ark., 2000; Diao ve Fang, 2004). Matematiksel fizik modellerin bahsedilen özellikleri, toprak-bitki-atmosfer sisteminde (ısı, su, tuz taşınımı vb.) ve diğer alanlarda onun uygulamasına imkan vermektedir.

Toprak yüzeyindeki ve havadaki sıcaklığın, çeşitli örtülerin (yaprak, atıklar vb.), yüzeyin fiziksel yapısının, topraktaki fiziksel ve kimyasal süreçlerin vb. ısı akımına önemli etki yapmasından dolayı, ısı transferinin farklı modellerinin yapılmasında bu

faktörlerin göz önüne alınması gerekmektedir (Kartı ve Choi, 1998; Wang ve Bras, 1999; Kang ve ark., 2000; Santander ve Budnovich, 2002). Toprak tarafından absorbe edilen enerji ısıya dönüşmekte, bunun bir kısmı ise alt toprak katlarına doğru hareket ederek ısı akımı oluşturmaktadır. Pratik olarak tek boyutlu kabul edilen bu süreç, topraktaki sıcaklığa ve sıcaklık değişimine bağlı olmaktadır. Toprak profili boyunca sıcaklığın değişimi önemli fiziki süreçlerden biri olup, toprağın termo-fiziksel (ısı iletkenliği, ısısal yayılım, ısı kapasitesi) özelliklerinin etkisi altındadır.

Toprak sıcaklığı tohumun çimlenmesinden başlayarak bitki gelişimine, bitki gelişimi sırasında meydana gelen özümleme, solunum, terleme, fotosentez olaylarına, mikroorganizmaların aktivitelerini etkilemek yoluyla nitrifikasyon, organik maddenin ayrışması vb. gibi mikrobiyolojik işlevlerin oranına önemli etki yapmaktadır (Özkan, 1985; Özdemir, 1998). Toprak sıcaklığı toprakların ısı ilişkilerine (radyasyon, ısı kapasitesi, ısı iletkenliği vb.) bağlıdır. Isı ilişkileri, toprakta ısı iletimi ile atmosfer ve toprak arasındaki ısı alış-verişinin sebep olduğu sıcaklık değişimlerini içerir. Sıcaklık değişimleri zamana ve toprak derinliğine bağlı olarak değişmektedir (Yeşilsoy, 1995).

Toprak araştırmalarında bazı parametrelerin belirlenmesinin zor olması nedeniyle toprakta ısı taşınımının matematiksel tanımlanmasında homojen ve izotropik katılardaki ısı iletimi süreci uygulanmaktadır (Özkan, 1985). Toprak sıcaklığının kontrolü, toprak yüzeyine gelen ve giden radyasyon düzenlenmesi ile beraber ısı taşınımının temel oluşum faktörleri olan toprağın ısısal özelliklerinin belirlenmesi ve tarım koşullarına uygun olarak değiştirilmesi ile mümkündür.

Bu çalışmanın amacı, ısı iletkenlik denkleminin

başlangıç koşulsuz çözümüne göre, topraktaki ısı taşınımına etki yapan bazı sıcaklık parametrelerinin (toprakta sıcaklık dalgalarının profil boyunca değişiminde, toprak yüzeyindeki maksimum veya minimum sıcaklığın belirli bir derinlikte gecikme zamanı; sıcaklığın sönme derinliği ve sıcaklık dalgalarının farklı değişim periyotlarında sönme derinlikleri arasındaki ilişki; toprak yüzeyinde ve belirli bir derinlikteki sıcaklık amplitütüne bağlı olarak toprağın ısısal yayılım katsayısı) incelenmesidir.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kampus Yerleşim sahası Ziraat Fakültesinin deneme alanında, 2x3m parselde 12.04-17.06.2005 tarihleri arasında yapılmıştır. Deneme alanı 41° 21.86' Kuzey, 36°11.41' Doğu koordinatlarında, deniz seviyesinden 187 m yükseklikte yer almaktadır.

Toprak sıcaklığı her gün 9⁰⁰, 11⁰⁰, 13⁰⁰, 15⁰⁰, 17⁰⁰, 19⁰⁰ saatlerinde cıvalı cam termometre ile (Sterling and Jaskson, 1986) , toprak nemliliği ise 3 günde bir 60 cm derinliğe kadar her 10 cm' den alınan örneklerde gravimetrik olarak belirlenmiştir. Toprakların kil, silt ve kum içerikleri hidrometre yöntemine göre (Demiralay, 1993), organik madde (OM) kapsamları modifiye Walkley-Black yaş yakma yöntemine göre saptanmıştır (Kacar, 1994). Toprakların elektriksel iletkenlik değerleri (EC_{25,4°C}) 1:1 toprak:su süspansiyonunda, CaCO₃ miktarı "Scheibler Kalsimetresi" kullanılarak hacim esasına göre belirlenmiştir (Hızalan ve Ünal, 1966).

2.1. Sıcaklık Alanı

Cismin zerreciklerinin veya farklı sıcaklığa sahip cisimlerin bir-birine dokunmasında meydana çıkan enerjinin yayılması ısı taşınımı sürecini oluşturmaktadır. Isı taşınımı cisimlerdeki mikro zerreciklerinin hareketine bağlı olmaktadır. Gazlarda enerjinin taşınımı molekül ve atomların difüzyonu, sıvı ve katı cisimlerde ise esnek (elastik) dalgaların yer değişimi sonucunda oluşmaktadır (Luikov ve Mikhailov, 1965; Luikov, 1967; Kane ve ark.,2001). Sıvı ve gazlarda ısı konveksiyasının ihmal edilmesi durumunda tam ısı akımı mümkün olmaktadır.

Genel olarak tüm fiziki süreçler bu süreçlere önemli etki yapan fiziki parametrelerin mekan ve zamana göre değişimi sonucunda oluşmaktadır. Isı taşınımı süreci başka ısı değişimi çeşitleri gibi cismin farklı sıcaklığa sahip noktaları arasında olabilmektedir.

Isı taşınımının analitik incelenmesi sıcaklığın mekan (x,y,z uzay koordinatlarına) ve zamana (t) göre değişiminin belirlenmesine bağlı olup,

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

denkleminin yapılmasını gerektirmektedir.

(1) denklemi incelenen sistemin tüm noktalarında ve her bir zaman anında (aralığında) sıcaklık değerlerinin toplamını gösteren sıcaklık alanının matematiksel ifadesi olmaktadır.

Sıcaklığın zamana bağlı olan değerlerine uygun olarak sabit ve değişken sıcaklık alanı tespit edilmektedir. Cismin farklı noktalarında her hangi zaman aralığında sıcaklığın değişmesi durumunda, (1) denklemi sıcaklık alanının genel ifadesini göstermektedir. Bu durumda ısı taşınımının dinamiği değişken olup, değişken sıcaklık alanı söz konusu olmaktadır.

Cismin her bir noktasında her bir zaman aralığında sıcaklığın aynı olması durumunda sabit sıcaklık alanı oluşmaktadır. Bu durumda sıcaklık ancak koordinatların fonksiyonu olarak, üç boyutlu (uzay) sıcaklık alanını ifade etmektedir: $T = f_1(x, y, z)$;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 . \text{ Sıcaklık iki veya bir koordinatın fonksiyonu}$$

ise, uygun olarak 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.

Bir boyutlu sabit sıcaklık alanının denklemi daha basit

$$\text{olup, } T = f_4(x); \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ gibi}$$

ifade edilir.

2.2. Toprağın Isı İletkenliği Denkleminin dahil edilmesi

Her hangi ortamda (toprakta) fiziki süreçlerin etkilerinin araştırılması, bu süreçleri ifade edebilen parametreler arasındaki ilişkilerin belirlenmesine bağlıdır. Karmaşık süreçlerde parametrelerin zamana ve mekana göre önemli derecede değişime uğrama ihtimali daha fazladır. Bu ise parametreler arasındaki ilişkilerin belirlenmesini çok zorlaştırmaktadır. Bu durumda parametrelerin değiştiği zaman aralıklarının sınırlandırılması, değişme mekanının ise elementer hacim gibi kabul edilmesi gerekir. Bu ise süreci ifade eden bazı parametrelerin elementer hacim ve küçük zaman aralığında değişiminin korunmasına ve ilişkilerin sadeleştirilmesine imkan sağlamaktadır. Böylece, fiziki sürecin seçilen elementer $d\mathcal{V}$ hacim ve elementer dt zaman aralığı sınırlarında incelenmesi gerekmektedir. Bu aralıklar matematiksel olarak sonsuz küçük, fiziksel olarak ise yeterli derecede büyük olduğundan dolayı, araştırma ortamının (toprak profilinin) kesikli yapısının kesiksiz olduğunun kabul edilmesi gerekmektedir. Bu durumda elde edilen fonksiyonel ilişki söz konusu sürecin genel diferansiyel denklemini ifade etmektedir. Elde edilen diferansiyel denklemin integrasyonu sonucunda, tüm integrasyon ve zaman aralığında süreci ifade eden parametreler arasındaki analitik ilişkilerin belirlenmesi mümkündür.

Toprak profili boyunca sıcaklık alanının değerlendirilmesi için ısı taşınımının diferansiyel

denkleminin oluşturulması (dahil edilmesi) gerekmektedir. Bu ise aşağıdaki sadeleştirmelerin yapılması sonucunda mümkündür:

- toprak profili homojen ve izotrop (ısı iletimi yöne bağlı olmamaktadır)
- toprağın termo-fiziksel parametreleri sabittir
- ortamın sıcaklık değişimi incelenen kısmının deforme olması, genel ortamla karşılaştırıldığında çok azdır
- ısı akımı genel olarak $q_g = f(x, y, z, t)$

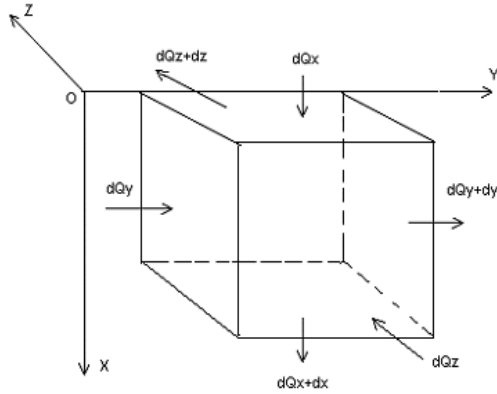
(q_g - watt/m³) gibi ifade edilen dahili ısı kaynağından, ısının dağılımı eşit olmaktadır.

Toprak ve başka ortamlarda sıcaklık değişimini değerlendirmek için dahil edilen ısı iletkenliğinin diferansiyel denkleminin yapılmasının teorik temelini enerjinin korunması kuralı oluşturmaktadır. Böyle ki, ortamın $d\vartheta$ hacminde ve dt zamanında ısı iletkenliğinin ve dahili ısı kaynağının etkisi sonucunda oluşan dQ ısı miktarı, dahili enerjinin $d\vartheta$ hacmindeki değişimine eşit olup, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (2)$$

Burada, dQ_1 - ısı iletkenliği sonucunda $d\vartheta$ hacminde dt zamanında oluşan ısı miktarı, Joule; dQ_2 - dahili kaynağın etkisi ile dt zamanında $d\vartheta$ hacminden ayrılan ısı miktarı; dQ - elementer $d\vartheta$ hacminde dt zamanında dahili enerjinin değişimidir.

(2) denkleminde dahil olan parametrelerin belirlenmesi için ortamda (toprak kesiminde) tarafları dx, dy, dz ve yüzeyleri uygun koordinat yüzeylerine paralel olan dik dörtgen prizma oluşturulması gerekmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Isı taşınımının diferansiyel denkleminin ifade edilmesinin şeması (Küçük hacimden ısı akımı)

Oluşturulan küçük hacmin yüzeylerinden dt zamanında Ox, Oy, Oz eksenleri yönünde geçen ısı miktarları sırasıyla dQ_x, dQ_y, dQ_z ; karşı yüzeylerden aynı yönde çıkan ısı miktarları ise uygun olarak $dQ_{x+dx}, dQ_{y+dy}, dQ_{z+dz}$ olsun. Her hangi alandan geçen ısı miktarı ısı akımı yoğunluğu (birim alandan geçen ısı miktarı), zaman ve alanla doğrusal orantılı olmasından dolayı, $dydz$ yüzeyinden Ox

ekseni yönünde dt zamanında geçen ısı miktarı

$dQ_x = q_x dydz dt$ (burada, q_x - ısı akımı yoğunluğunun $dydz$ yüzeyindeki değişiminin iz düşümüdür) gibi ifade olunmaktadır. Yapılan küçük hacimli dik dörtgen prizmanın karşı yüzeyinden Ox eksen yönünde çıkan ısı miktarı $dQ_{x+dx} = q_{x+dx} dydz dt$ olur. Bu durumda Ox eksen yönünde dt zamanında giren ve çıkan ısı miktarlarının farkı aşağıdaki gibi ifade edilerek, küçük hacimdeki ısı miktarını göstermektedir:

$$dQ_{x1} = dQ_x - dQ_{x+dx} \text{ veya}$$

$$dQ_{x1} = q_x dydz dt - q_{x+dx} dydz dt \quad (3)$$

q_{x+dx} fonksiyonu dx aralığında sürekli olduğu için Taylor serisine ayrılması mümkün olmaktadır:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \frac{(dx)^2}{2!} +$$

$$\frac{\partial^3 q_x}{\partial x^3} \frac{(dx)^3}{3!} + \dots \text{ Serinin ikinci terimden sonraki}$$

terimlerin çok küçük değerlere yaklaştığını göz önüne alarak, onu ilk iki terimle sınırlandırarak

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \text{ elde edilir. Bu durumda (3)}$$

ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{aligned} dQ_{x1} &= q_x dydz dt - (q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx) dydz dt = \\ &= -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dydz dt = -\frac{\partial q_x}{\partial x} d\vartheta dt \end{aligned} \quad (4)$$

Benzer olarak, Oy ve Oz eksenleri yönündeki küçük hacimlerde oluşan ısı miktarları aşağıdaki gibi olur:

$$dQ_{y1} = -\frac{\partial q_y}{\partial y} d\vartheta dt \quad (5) \quad dQ_{z1} = -\frac{\partial q_z}{\partial z} d\vartheta dt \quad (6)$$

(4) - (6) ifadeleri göz önüne alındığında tüm eksenler yönünde ısı iletkenliği sonucunda oluşan dQ_1 ısı miktarı

$$\begin{aligned} dQ_1 &= -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz dt = \\ &= -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) d\vartheta dt \quad (7) \text{ olur.} \end{aligned}$$

dQ_2 ısı miktarı, dahili kaynağın etkisi ile birim hacimden birim zamanda ayrılan ve kaynağın ısı gücünü ifade eden q_g (watt/m³) ısı akımı ile doğrusal orantılı olduğundan $dQ_2 = q_g d\vartheta dt$ (8) gibi ifade edilir.

(2) ifadesindeki dQ ısı miktarı ortamdaki sıcaklık değişiminin termodinamik özelliğine bağlı olmaktadır.

Sabit küçük hacime iletilen ısı miktarı ($V = \text{const}$, izohor proses) bu hacimdeki cismin iç enerjisinin (U) değişimine (dU) sarf olmaktadır ($dQ = dU$). Birim hacimdeki $u = u(T, \vartheta)$ iç enerjinin ortamın sıcaklığına bağlı olduğu göz önüne alınırsa, onda ortamın dU iç enerji değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$dU = C_g \frac{\partial T}{\partial t} dt d\vartheta = c_g \rho \frac{\partial T}{\partial t} dt d\vartheta \quad (9)$$

Burada, C_g - hacimsel ısı kapasitesi (birim hacimdeki izohor ısı kapasitesi), Joule/m³.K; c_g - özgül ısı kapasitesi, Joule/kg.K ; ρ -hacim ağırlığı, kg/m³ olmaktadır.

(7)-(9) ifadeleri (2)' de yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$c_g \rho \frac{\partial T}{\partial t} dt d\vartheta = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz dt + q_g d\vartheta dt \quad \text{veya}$$

$$c_g \rho \frac{\partial T}{\partial t} dt d\vartheta = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) d\vartheta dt + q_g d\vartheta dt \quad \text{veya}$$

$$c_g \rho \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q_g \quad (10)$$

(10) ifadesi sabit hacimde ısı taşınımı için enerjinin diferansiyel denklemi olmaktadır.

Katı cisimlerde (toprakta) ısı akımı yoğunluğu

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\lambda\text{-ısı iletkenliği, Joule/m.sn.K}) \text{ Fourier}$$

denklemi ile ifade olduğundan, Ox, Oy, Oz eksenleri üzerindeki iz düşümü $q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$;

$$q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \text{ olur. Sonuncu ifadeler}$$

(10)'da yerine konursa, aşağıdaki (11) ifadesi elde edilir:

$$c_g \rho \frac{\partial T}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + q_g$$

veya

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_g \rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_g}{c_g \rho}$$

(11) ifadesi cisimlerdeki ısı taşınım sürecinde cismin her hangi noktasında zamana ve mekana bağlı olarak sıcaklık değişimleri arasındaki ilişkini ifade eden ısı taşınımının diferansiyel denklemi olmaktadır

λ, c_g, ρ termo-fiziksel parametreleri değişken

olarak, yani $\lambda(x, y, z, t)$, $c_g(x, y, z, t)$, $\rho(x, y, z, t)$ gibi kabul edilirse, (11) ifadesi ısı taşınımının kısmi türevli genel diferansiyel denklemi olur. Bu ise cisimlerdeki ısı taşınımı sürecinde cismin her hangi noktasında zamana ve mekana bağlı olan sıcaklık değişimleri ile beraber sıcaklık değerlerini de kapsamaktadır. Bu denklem pratik önem taşıyan birçok ısı taşınımı (kurutma teorisi; gaz, sıvı ve katı cisimlerde ısı taşınımı) problemlerini de ifade etmek de olup, termo-fiziksel parametreler sabit kabul edildiğinde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_g \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_g}{c_g \rho} \quad \text{veya}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_g}{c_g \rho} \quad (12)$$

Burada, a (m²/san) orantı katsayısı cismin termo-fiziksel parametresi olup, sıcaklık iletkenliği (difüzyivite) veya ısıl yayınımdır.

Sıcaklık iletkenlik katsayısı sabit olmayan ısı süreçlerinde sıcaklık değişiminin hızını ifade etmektedir. Cismin ısı geçirme özelliğini ifade eden sıcaklık iletkenliği katsayısından (λ) farklı olarak, ısıl yayınım katsayısı cismin "ısı ataleti" özelliğini göstermektedir. (12) denkleminde görüldüğü gibi, cismin her hangi noktasındaki sıcaklığın zamana göre $\partial T / \partial t$ değişimi a katsayısı ile orantılıdır. Isıl yayım katsayısı yüksek olan cisimlerin her hangi bir noktasındaki sıcaklık değişiminin hızı yüksek olmaktadır. Bu nedenle, aynı koşullarda olan farklı cisimlerin tüm noktalarında sıcaklığın eşit paylaşılması, yüksek ısıl yayınım katsayısına sahip olan cisimde daha çabuk olmaktadır. Sıcaklık iletkenlik katsayısı, cisimlerin özelliklerine bağlıdır. Sıvı ve gazlarda "ısı ataleti" büyük, sıcaklık iletkenlik katsayısı ise düşüktür. Katı cisimler ise düşük "ısı ataleti"ne, yüksek sıcaklık iletkenlik katsayısına sahiptir.

Ortamda dahili ısı kaynağı olmadığında ($q_g \approx 0$) (12) denklemi Fourier denklemi şeklinde olur:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

Sabit sıcaklık alanı ($T = f_1(x, y, z)$; $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$) ve

dahili ısı kaynağı olması durumunda (12) denklemi, yapıların pasif ısınma ve soğumalarında önemli sayısal ve deneysel uygulamaları olan (Adjali ve ark., 2000 a,b; Rees ve ark., 2000)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{\lambda} = 0 \text{ Poisson denkleminde;}$$

$$\text{ısı kaynağı olmadığında ise } \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

Laplace denkleminde dönüşmektedir.

Toprakta değişken sıcaklık alanı söz konusu

olduğundan, homojen toprak profili boyunca sıcaklığın Ox eksenini yönünde yayılması gibi sadeleştirme kabul edilirse, (13) ifadesinden toprakta ısı taşınımı denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (0 \leq x < \infty, t \geq 0) \quad (14)$$

Burada, $T(x, t) - x$ mesafesinde belirli bir t anındaki toprağın sıcaklığı, a -sıcaklık iletkenlik katsayısı (difüzyon) veya ısısal yayınımdır, m^2/sn .

2.3. Sınır Koşulları

Cismin özelliklerine göre ısı iletkenlik denkleminin uygulanması, hesaplama başlangıcında ve cismin sınırında sıcaklığın dağılımını ifade eden başlangıç ve çeşitli sınır koşullarına bağlıdır (De Luca ve Ruocco, 2000; Gülser ve Ekberli, 2002; 2004; Cichota ve ark., 2004). Bütün diferansiyel denklemlerin çözümünde olduğu gibi toprağın ısı iletkenliği denkleminin çözümü için de sınır koşullarının belirlenmesi ve bunları sağlayan çözümün araştırılması gerekmektedir.

Isı iletkenliği denkleminin başlangıç koşulu ancak $T(x, t)$ fonksiyonunun t_0 başlangıç zaman anındaki değeri ile ifade olunmaktadır. Sınır koşulu ise cismin sınırındaki sıcaklık değişimine bağlı olarak çeşitli olmaktadır. $x = 0$ ve $x = l$ olduğunda çeşitli sınır koşullarının yapılması mümkündür. $\mu_1(t)$

$T_t = aT_{xx}$ ($0 < x < l$, $0 < t \leq t_1$) ısı iletkenliği denkleminin $T = T(x, t)$ çözümünün,

$$\begin{cases} T(x, 0) = \varphi(x), & 0 \leq x \leq l \\ T(0, t) = \mu_1(t), & T(l, t) = \mu_2(t), & 0 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (15)$$

koşulları altında bulunması, birinci başlangıç ve sınır problemini oluşturmaktadır. Burada, t_1 -sürecin incelendiği zaman, $\varphi(x)$, $\mu_1(t)$, $\mu_2(t)$ - belirli fonksiyonlardır.

(15)'in aşağıdaki özel durumları mümkündür:

a) Toprakta ve diğer tekdüze katı cisimlerde, geniş olmayan zaman aralığında, onun sınırını oluşturan uç noktalarındaki sıcaklık rejimi merkez kısmına çok az etki yapmaktadır. Sıcaklığın bu merkezdeki değerleri esasen başlangıç sıcaklık dağılımına göre belirlenmektedir. Bu durumda cismin tam olarak uzunluğunun bilinmesi önemli değildir. Çünkü cismin uzunluğundaki değişim söz konusu merkez noktadaki sıcaklık üzerine önemli bir etki yapmamaktadır. Genel olarak, bu tür problemlerde katı cisimlerin uzunluğunun sonsuz olduğu kabul edilir. Bu durumda sıcaklığın sonsuz doğru üzerinde yayılımı, başlangıç koşullu Cauchy problemi ile ifade edilir. Yani, ısı iletkenliği denkleminin $-\infty < x < +\infty$ ve $t \geq t_0$

olduğu zaman, $u(x, t_0) = \varphi(x)$ başlangıç koşulunu sağlayan çözümün bulunması gerekmektedir. Burada, $u(x, t_0)$ - başlangıç sıcaklık; x -mesafe; t -zaman;

t -zaman; $\varphi(x)$ - belirli bir fonksiyon olmaktadır.

b) Benzer olarak, toprağın veya cismin sıcaklığının belirleneceği nokta, bir ucuna yakın ve diğer ucuna uzak ise, bu durumda sıcaklık pratik olarak yakın uçtaki sıcaklık rejimine ve başlangıç koşuluna göre belirlenir. Bu tür problemlerde genel olarak cismin yarısız olduğu kabul edilir, cismin başlangıcından sonuna doğru olan koordinat, $0 \leq x \leq \infty$ aralığında değişir. Yarısız çubuğa benzer cisim için, $0 < x < \infty$ ve $t \geq t_0$ aralıklarında söz konusu sınır problemi aşağıdaki gibi ifade edilir

$$\begin{cases} T(x, t_0) = \varphi(x) & (0 < x < \infty, t = t_0) \\ T(0, t) = \mu(t) & (x = 0, t \geq t_0) \end{cases} \quad (16)$$

başlangıç ve sınır koşullar için çözümlenmelidir. Burada, $T(x, t)$ -sınırdaki sıcaklık, $\varphi(x)$ ve $\mu(t)$ - belirli fonksiyonlardır.

c) Yukarıda belirtilen (15), (16) problemlerinde, $T(x, t_0) = \varphi(x)$ ihmal edilirse, ısı iletkenliği denkleminin sıcaklıkla ilişkili olan başlangıç koşulsuz sınır problemi elde edilmektedir. Sıcaklığın toprak veya çubuğa benzer cisim boyunca yayılması anında, başlangıç koşulunun etkisi zamanla azalmaktadır. Toprak yüzeyinde sıcaklık günlük ve yıllık olarak periyodik değişime sahip olduğundan, toprağın herhangi bir derinliğindeki sıcaklığın nicel olarak değerlendirmesine imkan veren ısı iletkenliği denkleminin çözümünün belirlenmesi, yarı sonsuz ($0 \leq l \leq \infty$) tekdüze çubuğa ait başlangıç koşulsuz sınır probleminin çözümüne benzerdir. Yani, ısı iletkenlik denkleminin $0 < x < \infty$ ve $t > 0$ için $T(0, t) = \mu(t)$ koşulunu sağlayan çözümünün yapılması gerekir. Burada, $\mu(t)$ - toprak sıcaklığının sınır rejimini ifade eden, zamana bağlı bir fonksiyondur. Toprak yüzeyinde sıcaklık değişimini ifade eden $\mu(t)$ fonksiyonunun, sinüoit, kosinüoit, doğrusal (küçük zaman aralığında) kuralına göre değişmesi mümkündür.

Toprağın ısı iletkenlik denkleminin başlangıç koşulsuz sınır problemine bağlı olan çözümü, toprak sıcaklığının profil boyunca değişimine etki yapan toprak yüzeyindeki maksimum veya minimum sıcaklığın belirli bir derinlikte gecikme zamanı, sıcaklığın toprağa nüfuz etme derinliği, toprağın ısısal yayınımlı katsayısı gibi faktörlerin incelenmesine imkan vermektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Araştırmada kullanılan toprağın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Araştırma toprağının 0-20 cm katmanı killi (C), 20-60 cm katmanı ise kumlu-tınlı (SL) olup, tuzluluk problemi bulunmamaktadır. Organik madde içeriği ise iyi (0-20 cm) ile çok az (20-60 cm) arasında değişmektedir. Toprakta $CaCO_3$ miktarı az olup, ancak 40-50 cm katında birikme gözükmektedir.

Çizelge 1. Araştırma toprağına ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler

Derinlik, cm	Kil, %	Silt, %	Kum, %	OM, %	EC _{25,4°C} , dS m ⁻¹	CaCO ₃ , %
0-10	52.58	21.78	25.64	3.55	0.35	0.34
10-20	53.75	19.10	27.15	2.39	1.07	0.19
20-30	41.60	14.92	43.48	0.77	0.40	0.16
30-40	19.58	18.65	61.77	0.33	0.20	0.18
40-50	18.37	16.12	65.51	0.16	0.25	2.96
50-60	18.68	19.17	62.15	0.18	0.25	0.18

3.1. Toprak Sıcaklığı Parametrelerinin Teorik İncelenmesi

Toprak yüzeyinde sıcaklık değişimini ifade eden $\mu(t)$ fonksiyonunun, belirli zaman aralığında sinüsoid kuralı üzere değişmesi durumunda sınır koşulu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$T(0,t) = T_0 + A \sin \omega t \quad (17)$$

Burada, T_0 -toprak yüzeyinin ortalama sıcaklığı, °C;

A-toprak yüzeyindeki maksimum veya minimum sıcaklık değeri ile ortalama yüzey sıcaklığı arasındaki farkı ifade eden "amplitüt", $\omega = 2\pi / P$ - sıcaklık dalgalarının frekans sayısı (döngüdeki değişimin sıklığı) ve P -periyot, yani dalganın bir döngüsünü tamamlaması için gerekli olan zamanı göstermektedir. (14) ısı iletkenliği denkleminin (17) sınır koşuluna bağlı çözümü aşağıdaki gibi ifade edilir:

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

$$T(x,t) = T_0 + \frac{A}{e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{2a}{\omega}}}}} \sin\left(-\frac{x}{\sqrt{\frac{2a}{\omega}}} + \omega t\right) \quad (18)$$

Elde edilen (18) çözümüne göre (Hillel, 1982; Nerpın ve Chudnovski, 1984; Gülser ve Ekberli, 2002; 2004; Cichota ve ark., 2004) toprakta periyodik sıcaklık dalgalarının yayılması süreçlerinin aşağıdaki özelliklerini belirlemek mümkündür. Eğer toprak yüzeyinde sıcaklık uzun süre periyodik olarak değişirse ve toprakta sıcaklık dalgalarının değişmesi aynı periyotla tespit edilirse, bu durumda:

I. (17) sınır koşulundaki sıcaklık dalgalarının değişim amplitütü (A), (18) çözümünde $A(x) = \frac{A}{e^{x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}}}$ (19)

gibi olup, toprak derinliği boyunca eksponiyonal olarak azalır. Eğer derinlik aritmetik olarak artarsa, amplitüt geometrik olarak azalmaktadır.

II. Toprakta sıcaklık dalgaları, sıcaklığın maksimum (minimum) olmasına etki yapan faz yer değişimi ile oluşmaktadır. Sıcaklığın toprak yüzeyinde sinüsoid veya kosinüsoid kuralı üzere değişiminde

$$\sin\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \omega t\right)$$

olduğundan, sıcaklığın maksimum (minimum) olması

$$(18) \text{ ifadesinde } -x\sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \omega t = 0 \quad (20)$$

koşulunu sağlar. Toprak yüzeyinde herhangi bir anda sıcaklığın maksimum (minimum) değerinin toprak profili boyunca gecikme zamanı derinlikle orantılı olup, (20) ifadesi t 'ye göre çözümlenirse

$$\left(\omega t = x\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \text{ ve } t = \frac{x}{\omega}\sqrt{\frac{\omega}{2a}} = x\sqrt{\frac{1}{2a\omega}}\right)$$

aşağıdaki ifade elde edilir:

$$t = x\sqrt{\frac{1}{2a\omega}} \quad (21)$$

III. (18) çözümden görüldüğü gibi, $x \geq \sqrt{2a/\omega}$

oldukta $A/e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{2a}{\omega}}}}$ ifadesinin, dolayısıyla amplitüt (A) değerlerinin azalması prosesi başlamaktadır.

$x = \sqrt{2a/\omega}$ derinliğinde sıcaklık amplitütü, toprak yüzeyinin amplitütünün $1/e = 1/2.718 = 0.37$ 'i kadar azalmaktadır.

$S_d = \sqrt{2\lambda/c_g\rho\omega} = \sqrt{2\lambda/C_g\omega} = \sqrt{2a/\omega}$ (22) sıcaklık dalgalarının sönme derinliği (ilerleme derinliği) olup, toprağın ısıl yayılım katsayısına ve sıcaklık dalgasının frekans sayısına bağlı olmaktadır. (22) ifadesi göz önüne alınırsa, (18) çözümü aşağıdaki gibi olur:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{A}{e^{x/S_d}} \sin\left(-\frac{x}{S_d} + \omega t\right) \quad (23)$$

Sıcaklığın toprakta ilerleme derinliği, toprak yüzeyindeki sıcaklık dalgalarının periyoduna bağlı olmaktadır. (19) ifadesine göre, sıcaklık amplitütünün başlangıç değerine bağlı olarak nispi değişimi aşağıdaki şekilde olur:

$$\frac{A(x)}{A} = e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \text{ veya } \frac{A(x)}{A} = \frac{1}{e^{x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}}} \quad (24)$$

$\omega = 2\pi / P$ ifadesi (24)'de yerine konulursa,

$$\frac{A(x)}{A} = \frac{1}{e^{x\sqrt{\frac{\pi}{aP}}}} \text{ elde edilir. Sonuncu ifadeye göre,}$$

sıcaklık periyodu (P) azaldıkça, sıcaklık amplitütünün nispi değişimi ve buna bağlı olarak sıcaklığın sönme (ilerleme) derinliği de azalmaktadır. Periyotları sırasıyla P_1 ve P_2 olan sıcaklık dalgalarının x_1 ve x_2 derinliklerinde sönmeleri arasındaki ilişki, sıcaklık amplitütlerinin nispi değişimlerinin aynı olması durumunda

$$e^{-x_1 \sqrt{\frac{\pi}{aP_1}}} = e^{-x_2 \sqrt{\frac{\pi}{aP_2}}}, \quad \frac{x_1^2}{P_1} = \frac{x_2^2}{P_2}$$

$$x_2 = x_1 \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \text{ gibi ifade edilebilir. Bu ifadeye göre,}$$

sıcaklık dalgalarının günlük (P_1) ve yıllık (P_2) değişim periyotları karşılaştırıldığında, x_1 ve x_2 sönme (ilerleme) derinlikleri arasında aşağıdaki ilişki elde edilir:

$$(P_2 = 365P_1 \text{ ve } x_2 = x_1 \sqrt{\frac{365P_1}{P_1}} = x_1 \sqrt{365} \approx 19.1 x_1)$$

$$x_2 \approx 19.1 x_1 \quad (25)$$

IV. Toprak yüzeyinde ve herhangi bir derinlikte sıcaklık amplitütünün değerleri belli olduğunda, (11) ifadesine göre, toprağın ısısal yayılım katsayısının (a) belirlenmesine imkan veren aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\ln \frac{A(x)}{A} = -x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}, \quad a = \frac{\omega x^2}{2 \ln^2 \frac{A(x)}{A}} \quad (26)$$

3.2. Toprak Sıcaklığı Parametrelerinin Deneysel Olarak Değerlendirilmesi

Araştırma döneminde toprak profili boyunca ölçülen sıcaklıklara göre belirlenmiş ortalama ve maksimum sıcaklık değerleri Çizelge 2-4'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, toprakların 0-20 cm katmanında sıcaklık değerleri ve değişimi aşağı katmanlarla (30-60 cm) karşılaştırıldığında daha fazla olmaktadır. Killi ve kumlu-tınlı tekstüre sahip olan araştırma toprağının alt katmanlarına doğru rutubet değerlerinin (Çizelge 5) artması (çoğunlukla tarla kapasitesinden yüksek) (Gülser ve ark., 2003), sıcaklığın aşağı katmanlardaki değişiminin az olmasına sebep olan faktörlerden biridir. Toprak katmanlarının pratik olarak homojen olmaması, aşağı katmanlara gelen sıcaklık miktarının azlığı, gözenekliliğin fazla olmaması vb. aşağı katmanlarda sıcaklık değerlerinin düşük seviyede olmasına etki yapan faktörlerdendir.

Toprak profili boyunca amplitüt ve ısısal yayılım katsayısı, uygun olarak $A = T_m - T$ ve (26) ifadelerinden kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 6'da verilmiştir. Toprak yüzeyinde amplitüt değerleri 4.0-16.6 °C, ≥ 10 cm derinlikte ise 0.6-4.9°C aralığında değişmektedir. Aşağı katmanlarda ortalama

sıcaklık değerlerinin düşük, toprak rutubetinin yüksek olması amplitüt azalmasına önemli etki yapmaktadır.

Deneme toprağının 10 cm derinliğinde ısısal yayılım katsayısı 0.79×10^{-4} - 4.20×10^{-4} $\text{cm}^2 \text{san}^{-1}$, 60cm derinliğinde ise artış göstererek 1.17×10^{-3} - 9.98×10^{-3} $\text{cm}^2 \text{san}^{-1}$ aralığında değişmektedir. Toprak yüzeyinde sıcaklığın yüksek olması genellikle 10cm, 20cm, 30cm derinliklerinde kuvvetli sıcaklık gradientlerinin oluşumunu engellemekte, dolayısıyla ısısal yayılım katsayısının azalmasına sebep olmaktadır. Aşağı katmanlarda (>30 cm) kuvvetli sıcaklık gradientlerinin oluşumu, toprak rutubetinin yüksek olması sıcaklık yayılım katsayısının artmasına imkan vermektedir (Özbek ve ark., 2001).

(22) ve (21) ifadelerine bağlı olarak, sırasıyla toprak profili boyunca sönme derinliği ve maksimum (minimum) sıcaklığın gecikme zamanı belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7'de sunulmuştur. Sönme derinliği sıcaklık dalgalarının amplitütüne ve derinliğe; gecikme zamanı ise amplitüt ve zamana bağlı olarak aşağı katmanlara doğru genellikle artmaktadır. Toprağın aşağı katmanlarına doğru gözenekliliğin azalması sonucunda ısı iletkenliği (λ) ve ısısal yayılım katsayısı geniş bir aralıkta artmakta ve bunlara bağlı olarak da derinlik arttıkça sıcaklığın sönme derinliği artış göstermektedir. Sıcaklık amplitütlerinin aşağı katmanlara doğru azalmasına bağlı olarak maksimum (minimum) sıcaklık değerleri derinliğin artmasıyla geç ortaya çıktığından, gecikme zamanı alt katmanlara doğru geniş olmayan aralıkta artmaktadır.

Toprak katmanlarının farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri, iklim koşullarının değişimi ile beraber ısı taşınımı parametrelerindeki orantılı değişimin olmamasına sebep olan önemli faktörlerdendir.

4. SONUÇ

Toprağın ısı iletkenliği denkleminin (18) veya (23) çözümünden görüldüğü gibi, toprağın aşağı katmanlarında sıcaklık dalgalarının maksimumunun gecikme zamanında, yani dalgaların x/S_d kadar faz yer değişiminde herhangi x derinliğinde amplitüt e^{x/S_d} katsayısı kadar azalmaktadır. Toprak derinliği boyunca sıcaklığın azalması ve faz gecikiminin artması sıcaklık dalgalarının özgür özelliği olmaktadır (Hillel, 1982; Gülser ve Ekberli, 2004).

(25) ifadesinden görüldüğü gibi, toprak yüzeyindeki aynı amplitüta sahip sıcaklık dalgasının yıllık değişiminin sönme (ilerleme) derinliği, günlük değişiminin sönme derinliğinin 19.1 katı olmaktadır.

Toprak gözeneklerinin su ile doymuş duruma yaklaşması, ısısal yayılım katsayısının artmasına, dolayısıyla toprakta ısı kaybına sebep olmaktadır. Toprakların sıcaklık rejiminin düzenlenmesinde ısı taşınımı parametrelerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Toprak gözenekliliğinin artması, ısısal yayılımın azalmasına, dolayısıyla sıcaklığın artışına

Çizelge 2. Toprak Profili Boyunca Ortalama (T) ve Maksimum (T_m) Sıcaklık (°C) Değerleri (12.04.-30.04.2005)

Derinlik, cm	Zaman, saat											
	9:00		11:00		13:00		15:00		17:00		19:00	
	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m
0	22.9 ± 1.550	30.8	26.5 ± 1.460	38.2	28.9 ± 1.920	45.5	26.4 ± 2.190	43.0	22.2 ± 1.270	32.0	16.1 ± 0.690	21.5
10	15.2 ± 0.567	19.0	16.5 ± 0.503	20.2	16.8 ± 0.464	21.0	16.8 ± 0.565	22.0	16.7 ± 0.421	21.5	15.4 ± 0.391	19.0
20	14.8 ± 0.542	19.0	15.2 ± 0.582	19.0	15.2 ± 0.399	19.0	15.5 ± 0.361	18.0	15.2 ± 0.288	17.5	14.7 ± 0.331	18.0
30	14.6 ± 0.437	18.0	15.2 ± 0.574	18.0	15.3 ± 0.398	19.0	15.2 ± 0.345	18.0	14.8 ± 0.311	17.0	14.2 ± 0.343	16.8
40	14.3 ± 0.484	18.0	15.0 ± 0.601	19.0	14.9 ± 0.437	19.0	14.8 ± 0.406	17.3	14.2 ± 0.331	17.0	13.6 ± 0.408	16.8
50	13.9 ± 0.499	17.2	14.5 ± 0.581	18.0	14.6 ± 0.408	18.2	14.5 ± 0.408	17.3	13.7 ± 0.328	15.5	13.1 ± 0.389	16.0
60	13.4 ± 0.459	16.0	14.2 ± 0.564	17.5	13.9 ± 0.355	16.5	14.0 ± 0.377	16.0	13.3 ± 0.326	15.5	12.7 ± 0.347	15.0
Ortalama standart sapma (σ)	2.130		2.671		2.656		2.663		1.961		1.707	
Varyans katsayısı (V), %	12.909		15.474		13.893		14.133		11.400		11.871	
Hata (P), %	3.939		4.136		3.275		3.523		2.723		2.889	

Çizelge 3. Toprak Profili Boyunca Ortalama (T) ve Maksimum (T_m) Sıcaklık (°C) Değerleri (01.05.-31.05.2005)

Derinlik, cm	Zaman, saat											
	9:00		11:00		13:00		15:00		17:00		19:00	
	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m
0	24.5 ± 0.954	33.2	30.3 ± 1.499	44.5	33.4 ± 1.650	47.4	32.6 ± 1.689	45.8	26.3 ± 1.120	34.5	20.9 ± 0.739	24.9
10	18.8 ± 0.679	23.7	19.9 ± 0.615	24.0	20.3 ± 0.616	25.2	20.8 ± 0.648	25.5	20.9 ± 0.643	24.2	20.5 ± 0.621	23.7
20	18.3 ± 0.604	22.8	18.7 ± 0.539	22.5	18.7 ± 0.534	23.1	19.4 ± 0.570	23.0	19.5 ± 0.574	23.0	19.5 ± 0.592	23.2
30	18.0 ± 0.555	22.2	18.5 ± 0.502	21.8	18.5 ± 0.518	20.0	18.6 ± 0.553	22.0	18.2 ± 0.581	21.9	18.0 ± 0.579	21.7
40	17.5 ± 0.508	20.8	18.0 ± 0.473	21.4	18.1 ± 0.478	21.6	18.1 ± 0.568	21.5	17.8 ± 0.544	20.8	17.4 ± 0.551	20.5
50	17.0 ± 0.454	20.2	17.5 ± 0.435	20.4	17.6 ± 0.443	20.5	17.5 ± 0.516	21.2	17.1 ± 0.508	20.1	16.8 ± 0.544	19.9
60	16.7 ± 0.435	19.8	17.1 ± 0.408	19.5	17.0 ± 0.399	19.8	16.9 ± 0.473	20.5	16.6 ± 0.462	19.1	16.3 ± 0.478	19.0
Ortalama standart sapma (σ)	3.040		3.450		3.665		3.650		3.201		2.909	
Varyans katsayısı (V), %	16.010		14.972		16.667		16.722		16.028		15.637	
Hata (P), %	3.153		2.782		3.019		3.299		3.183		3.186	

Çizelge 4. Toprak Profili Boyunca Ortalama (T) ve Maksimum (T_m) Sıcaklık (°C) Değerleri (01.06.-17.06.2005)

Derinlik, cm	Zaman, saat											
	9:00		11:00		13:00		15:00		17:00		19:00	
	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m	T	T _m
0	31.1 ± 1.264	38.2	37.3 ± 1.685	48.6	41.9 ± 1.708	49.2	38.6 ± 2.248	46.4	32.0 ± 1.832	40.3	24.3 ± 1.316	36.8
10	22.2 ± 0.397	24.8	23.2 ± 0.297	26.2	23.7 ± 0.401	27.2	23.8 ± 0.424	26.3	23.8 ± 0.490	26.5	23.8 ± 0.559	26.8
20	22.1 ± 0.343	24.2	22.5 ± 0.205	24.0	22.8 ± 0.289	25.0	22.5 ± 0.298	24.5	22.6 ± 0.363	24.8	22.8 ± 0.384	25.4
30	22.0 ± 0.258	23.6	22.4 ± 0.212	23.7	22.1 ± 0.206	23.2	22.2 ± 0.231	23.6	22.0 ± 0.271	24.0	21.6 ± 0.312	23.5
40	21.4 ± 0.289	22.9	21.6 ± 0.202	22.8	21.7 ± 0.145	22.3	21.7 ± 0.215	22.8	21.5 ± 0.218	22.7	21.0 ± 0.239	22.5
50	20.8 ± 0.261	22.3	21.0 ± 0.241	22.4	21.1 ± 0.171	21.3	21.0 ± 0.226	22.4	20.8 ± 0.231	22.0	20.5 ± 0.255	22.0
60	19.4 ± 0.239	20.0	19.6 ± 0.170	20.4	19.6 ± 0.216	20.8	19.7 ± 0.164	20.5	19.5 ± 0.225	20.5	19.5 ± 0.249	20.7
Ortalama standart sapma (σ)	1.584		1.710		1.643		2.014		2.004		1.909	
Varyans katsayısı (V), %	6.409		5.940		5.477		6.782		7.653		8.361	
Hata (P), %	1.773		1.515		1.507		1.837		1.985		2.078	

Çizelge 5. Toprak profili boyunca rutubet (%) değişimi

Zaman (gün, ay, 2005)	Derinlik, cm											
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60						
12.04	36.9	36.6	37.3	38.2	37.3	34.3						
15.04	32.8	33.8	35.2	36.3	33.7	31.5						
17.04	29.6	31.6	34.6	34.6	34.5	28.7						
19.04	28.8	32.0	35.3	36.8	29.6	32.0						
22.04	25.4	31.4	33.9	39.3	36.6	29.5						
25.04	38.8	34.9	36.7	38.4	38.1	35.7						
28.04	39.0	32.7	35.1	33.6	32.5	34.1						
02.05	40.8	36.4	36.4	37.0	38.6	34.5						
05.05	30.3	32.4	31.8	30.9	33.4	33.0						
09.05	25.6	28.2	33.3	32.9	34.1	32.1						
12.05	24.8	33.2	35.3	27.9	24.4	29.3						
16.05	24.7	31.8	33.7	34.5	30.9	33.1						
19.05	29.5	32.2	35.0	39.1	36.1	29.3						
23.05	28.8	32.0	36.8	38.7	39.3	33.5						
26.05	30.4	34.7	34.9	29.3	35.8	36.8						
30.05	28.2	33.6	35.3	31.7	25.3	23.3						
03.06	28.2	33.9	36.6	33.3	29.8	23.7						
06.06	29.5	32.4	35.2	32.4	29.9	26.6						
10.06	26.8	34.5	34.3	33.7	27.8	21.1						
13.06	31.0	32.0	30.3	25.9	24.5	28.4						
17.06	25.2	32.6	34.5	24.0	33.2	29.5						

Çizelge 6. Toprak profili boyunca amplitütün (A , °C) ve ısısal yayılım katsayısının (a , $\text{cm}^2\text{san}^{-1}$) değişimi

Derinlik, cm	12.04-30.04.2005											
	Zaman, saat											
	9-00		11-00		13-00		15-00		17-00		19-00	
	A	a	A	a	A	A	A	a	A	a	A	a
0	7.9	0.00	11.7	0.00	16.6	0.00	16.6	0.00	9.8	0.00	5.4	0.00
10	3.8	3.77×10^{-4}	3.7	1.52×10^{-4}	4.2	1.07×10^{-4}	5.2	1.50×10^{-4}	4.8	3.96×10^{-4}	3.6	1.23×10^{-3}
20	4.2	2.02×10^{-3}	3.8	6.39×10^{-4}	3.8	3.72×10^{-4}	2.5	2.25×10^{-4}	2.3	3.84×10^{-4}	3.3	3.33×10^{-3}
30	3.4	2.56×10^{-3}	2.8	8.89×10^{-4}	3.7	8.07×10^{-4}	2.8	5.74×10^{-4}	2.2	8.14×10^{-4}	2.6	3.40×10^{-3}
40	3.7	5.62×10^{-3}	4.0	2.80×10^{-3}	4.1	1.65×10^{-3}	2.5	9.01×10^{-4}	2.8	2.06×10^{-3}	3.2	11.80×10^{-3}
50	3.3	6.62×10^{-3}	3.5	3.47×10^{-3}	3.6	2.16×10^{-3}	2.8	1.59×10^{-3}	1.8	1.76×10^{-3}	2.9	13.06×10^{-3}
60	2.6	5.89×10^{-3}	3.3	4.54×10^{-3}	2.6	2.12×10^{-3}	2.0	1.62×10^{-3}	2.2	3.26×10^{-3}	2.3	9.98×10^{-3}
01.05-31.05.2005												
0	8.7	0.00	14.2	0.00	14.0	0.00	13.2	0.00	8.2	0.00	4.0	0.00
10	4.9	3.68×10^{-4}	4.1	0.79×10^{-4}	4.9	1.10×10^{-4}	4.7	1.14×10^{-4}	3.3	1.46×10^{-4}	3.2	3.07×10^{-4}
20	4.5	1.12×10^{-3}	3.8	2.79×10^{-4}	4.4	3.62×10^{-4}	3.6	2.87×10^{-4}	3.5	6.67×10^{-4}	3.7	2.07×10^{-3}
30	4.2	2.06×10^{-3}	3.3	5.12×10^{-4}	3.5	5.67×10^{-4}	3.4	5.93×10^{-4}	3.7	1.72×10^{-3}	3.7	4.67×10^{-3}
40	3.3	2.06×10^{-3}	3.4	9.49×10^{-4}	3.5	1.01×10^{-3}	3.4	1.05×10^{-3}	3.0	1.92×10^{-3}	3.1	8.29×10^{-3}
50	3.2	3.03×10^{-3}	2.9	1.20×10^{-3}	2.9	1.22×10^{-3}	3.7	1.87×10^{-3}	3.0	3.00×10^{-3}	3.1	6.95×10^{-3}
60	3.1	4.10×10^{-3}	2.4	1.38×10^{-3}	2.8	1.68×10^{-3}	3.6	2.58×10^{-3}	2.5	3.09×10^{-3}	2.7	6.84×10^{-3}
01.06-17.06.2005												
0	7.1	0.00	11.3	0.00	7.3	0.00	7.8	0.00	8.3	0.00	12.5	0.00
10	2.6	2.25×10^{-4}	3.0	1.29×10^{-4}	3.5	4.20×10^{-4}	2.5	1.75×10^{-4}	2.7	1.80×10^{-4}	3.0	1.12×10^{-4}
20	2.1	6.12×10^{-4}	1.5	2.23×10^{-4}	2.2	6.32×10^{-4}	2.0	4.91×10^{-4}	2.2	5.15×10^{-4}	2.6	3.69×10^{-4}
30	1.6	9.21×10^{-4}	1.3	4.37×10^{-4}	1.1	5.71×10^{-4}	1.4	6.93×10^{-4}	2.0	1.01×10^{-3}	1.9	5.76×10^{-4}
40	1.5	1.50×10^{-3}	1.2	7.23×10^{-4}	0.6	5.82×10^{-4}	1.1	9.47×10^{-4}	1.2	9.72×10^{-4}	1.5	1.24×10^{-3}
50	1.5	2.35×10^{-3}	1.4	1.30×10^{-3}	0.7	1.03×10^{-3}	1.4	1.93×10^{-3}	1.2	1.52×10^{-3}	1.5	1.94×10^{-3}
60	0.6	1.34×10^{-3}	0.8	1.17×10^{-3}	1.2	2.51×10^{-3}	0.8	1.58×10^{-3}	1.0	1.83×10^{-3}	1.2	2.17×10^{-3}

Çizelge 7. Toprak profili boyunca sönme derinliği (S_d , cm) ve maksimum (minimum) sıcaklığın gecikme zamanının (t , gün) değerleri

Derinlik, cm	12.04-30.04.2005											
	Zaman, saat											
	9-00		11-00		13-00		15-00		17-00		19-00	
	S_d	t	S_d	t	S_d	t	S_d	t	S_d	t	S_d	t
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	13.67	2.10	8.68	3.30	7.28	3.94	8.62	3.33	14.01	2.05	24.68	1.16
20	31.63	1.81	17.79	3.22	13.57	4.22	10.56	5.43	13.79	4.16	40.61	1.41
30	35.61	2.42	20.98	4.10	19.99	4.30	16.86	5.10	20.08	4.28	41.04	2.10
40	52.67	2.17	37.24	3.08	28.59	4.01	21.13	5.43	31.94	3.59	76.45	1.50
50	57.26	2.50	41.46	3.46	32.71	4.38	28.06	5.11	29.53	4.85	80.43	1.78
60	54.01	3.18	47.42	3.63	32.40	5.31	28.33	6.07	40.18	4.28	70.30	2.45
01.05-31.05.2005												
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	17.42	2.74	8.05	5.93	9.52	5.02	9.68	4.93	10.99	4.35	15.91	3.00
20	30.34	3.15	15.17	6.30	17.28	5.53	15.39	6.21	23.49	4.07	41.38	2.31
30	41.20	3.48	20.56	6.97	21.64	10.67	22.12	6.48	37.70	3.80	62.06	2.31
40	41.27	4.63	27.98	6.83	28.86	6.62	29.50	6.48	39.78	4.80	82.74	2.31
50	49.99	4.78	31.47	7.59	31.76	7.52	39.31	6.08	49.72	4.80	75.71	3.16
60	58.15	4.93	33.75	8.49	37.28	7.69	46.18	6.21	50.51	5.67	75.14	3.81
01.06-17.06.2005												
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	9.96	2.56	7.54	3.38	13.60	1.87	8.79	2.90	8.90	2.86	7.01	3.64
20	16.42	3.10	9.90	5.15	16.68	3.06	14.70	3.47	15.06	3.38	12.74	4.00
30	20.13	3.80	13.87	5.51	15.85	4.82	17.47	4.38	21.08	3.63	15.92	4.80
40	25.73	3.96	17.84	5.71	16.01	6.37	20.42	4.99	20.68	4.93	23.38	4.36
50	32.17	3.96	23.94	5.32	21.33	5.97	29.11	4.38	25.85	4.93	29.22	4.36
60	24.28	6.30	22.66	6.75	33.23	4.60	26.36	5.80	28.35	5.39	31.02	4.93

sebepler olduğundan, toprakların yukarı katmanlarının düzenli olarak işlenmesi gerekmektedir. Sıcaklık kaybının önlenmesi için, sönme derinliğinin artırılması önem taşımaktadır.

Bu çalışma, kuru veya kuruya yakın toprakta, ana materyal veya kayada sıcaklığın yayılmasına yöneliktir. Toprakta rutubet bulunması durumunda sıcaklık süreçlerinin zorlaşması, donma zamanı toprakta gizli ısının ayrılması nedenleriyle bu teorik incelemenin uygulanmasını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, konuyla ilgili olarak değişik rutubet ve toprak özelliklerinde yapılacak arazi çalışmaları ile teorik çözümün daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Adjali, M. H., Davies, M., Ni Riain, C. and Littler, J. G., 2000 a. In situ measurements and numerical simulation of heat transfer beneath a heated ground floor slab. *Energy and Buildings*. 33: 75-83.
- Adjali, M. H., Davies, M., Rees, S.W. and Littler, J.G., 2000 b. Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three-dimensional numerical simulations and comparison with experimental data. *Building and Environment*. 35: 655-662.
- Choi, S. and Krarti, M., 1998. Heat transfer for slab-on-grade floor with stepped ground. *Energy Convers, Mgmt*. 39 (7): 691-701.
- Cichota, R., Elias, E. A. and van Lier, Q. J., 2004. Testing a finite-difference model for soil heat transfer by comparing numerical and analytical solutions. *Environmental Modelling & Software*. 19: 495-506.
- De Luca, V. and Ruocco, G., 2000. A Transient-spectral Thermal Model of Soil under Radiative-interfering Cover. *J. Agric. Engng Res*. 77 (1): 93-102.
- Demiralay, İ., 1993. Toprak fiziksel analiz yöntemleri. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Erzurum, 111-120.
- Diao, N., Li, Q. and Fang, Z., 2004. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*. 43: 1203-1211.
- Gülser, C. and Ekberli, İ., 2004. A comparison of estimated and measured diurnal soil temperature through a clay soil depth. *Journal of Applied Sciences*. 4 (3): 418-423.
- Gülser, C. ve Ekberli, İ., 2002. Toprak sıcaklığının profil boyunca değişimi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 17 (3): 43-47.
- Gülser, C., Aşkın, T., Özdemir, N., 2003. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kampus Topraklarının Erozyona Duyarlılıklarının Değerlendirilmesi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 18 (1): 1- 6.
- Hızalan, E. ve Ünal, H., 1966. Toprakta önemli kimyasal analizler. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 278s.
- Hillel, D., 1982. *Introduction to soil physics*. Academic Press, Inc. San Dieoga, California, USA, 364 p.
- Kacar, B., 1994. Bitki ve toprağın kimyasal analizleri:III. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Eğitim, Araştırma ve Geliştirme Vakfı Yayınları. No:3, 89-98.
- Kane, D. L., Hinkel, K. M., Goering, D. J., Hinzman, L. D. and Outcalt, S. İ., 2001. Non-conductive heat transfer associated with frozen soils. *Global and Planetary Change*. 29: 275-292.
- Kang, S., Kim, S., Oh, S. and Lee, D., 2000. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. *Forest Ecology and Management*. 136: 173-184.
- Luikov, A. V. and Mikhaïkov, Y. A., 1965. *Theory of energy and mass transfers*. Oxford, UK: Pergamon Pres.
- Luikov, A. V., 1967. *Teoriya teploprovodnosti. Vişşaya şkola (Isı transferi teorisi, Ali mektep yayını evi)*, Moskova, 599 s.
- Nerpin, S.V. and Chudnovskii, A. F., 1984. *Heat and mass transfer in the plant-soil-air system*. Translated from Russian. Published for USDA and National Sci. Found., Washington, D.S., by Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, India, 355 p.
- Özbek, H., Kaya, Z., Gök, M., Kaptan, H., 2001. *Toprak Bilimi*. Ç.Ü. Ziraat Fakültesi Genel Yayın No: 73, Ders Kitapları Yayın No: A-16, 816 s.
- Özdemir, N., 1998. *Toprak Fiziği*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi. Ders Kitabı No:30, 209 s.
- Özkan, A. İ., 1985. *Toprak Fiziği*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 946. Ders Kitabı No: 270, 171 s.
- Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z and Davies, M. and Thomas, H. R., 2000. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.4: 213-265.
- Santander, R. E. and Bubnovich V., 2002. Assessment of mass and heat transfer mechanisms in unsaturated soil. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 29 (4): 531-545.
- 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.
- Yeşilsoy, M. Ş. ve Aydın, M., 1995. *Toprak Fiziği*. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi. Ders Kitabı No: 124, 228 s.
- Wang, J. and Bras, R. L., 1999. Ground heat flux estimated from surface soil temperature. *Journal of Hydrology*. 216: 214-226.