

## رفتارسنجی الگوی تغییرات دمای ژرفای خاک و ارایه مدل عددی برآورد آن (مطالعه موردی: تهران)

علی اکبر شمسی پور: استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران\*  
قاسم عزیزی: دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
مصطفی کریمی احمد آباد: استادیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
معصومه مقبل: استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۱/۶/۴ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۲۳، صص ۲۸-۱۷

### چکیده

دمای خاک در اعماق مختلف مهمترین برهمکنش جو با سطح زمین است. با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های ثبت دمای ژرفای خاک، از معادلات تجربی برای محاسبه دمای ژرفاهای مختلف خاک با توجه به ویژگی‌های تابش ورودی و خصوصیات فیزیکی و گرمایی انواع خاک‌ها، استفاده می‌گردد. در این پژوهش تلاش گردید تا علاوه بر تعیین الگوی تغییرات دمای اعماق خاک بر پایه داده‌های واقعی، کارآیی یک مدل تجربی سینوسی در تخمین دما مورد آزمون قرار گیرد. بنابراین، ابتدا داده‌های ماهانه و سالانه دمای ژرفاهای ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری در ایستگاه همدید مهرآباد برای سه ساعت ۶:۳۰، ۱۲:۳۰ و ۱۸:۳۰ سال ۲۰۰۸ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. برای محاسبه و تخمین دما در اعماق مختلف دمای ۵ سانتیمتری سطح بعنوان دمای مبنا در نظر گرفته شد و با بکارگیری معادلات سینوسی، دمای خاک برای سایر ژرفاها برآورد شد. برای واسنجی دماهای برآورد شده از داده‌های واقعی ثبت شده با روش‌های آماری ضریب همبستگی و ضریب کارآیی ناش - ساتکلیف استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که الگوی دمای ماهانه‌ی تمامی ژرفاها از روند مشابهی برخوردار بوده و بیک دمایی در تمامی ژرفاها مربوط به دوره گرم سال است. همچنین، دمای محاسبه برای ژرفاهای مختلف نشان‌دهنده کارآیی قابل قبول مدل مورد استفاده در تخمین دمای خاک است، بطوریکه ضریب همبستگی حاصل از دماهای واقعی و دماهای برآورد شده برای تمامی ژرفاها در سطح ۰/۱ خطا معنادار بود. علاوه بر این، نتایج بدست آمده از ضریب کارآیی ناش - ساتکلیف نیز نشان‌دهنده کارآیی مناسب مدل مورد استفاده در تخمین دمای اعماق مختلف خاک است.

واژه‌های کلیدی: روند تغییرات دمایی، اعماق خاک، معادله سینوسی، تهران.

### مقدمه

عبارت دیگر، دمای خاک و چگونگی تغییرات آن نسبت به زمان و مکان یکی از مهمترین عواملی است که نه تنها تبادل ماده و انرژی را در خاک تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه می‌توان گفت میزان و جهت کلیه فرآیندهای فیزیکی خاک به صورت مستقیم یا غیر

دمای خاک یکی از متغیرهای مهم در مطالعات بیلان انرژی سطحی، هیدرولوژی، هواشناسی کشاورزی و اقلیم‌شناسی است (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۸). به

دماسنج‌های معمولی صورت می‌گیرد که پرهزینه بوده و به پایش مداوم نیاز دارد.

روش‌های آماری و تجربی که قادر به ارایه نتایج قابل قبول در برآورد دمای خاک باشد، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای برآورد این متغیر در نقاط فاقد اندازه‌گیری باشد. اهمیت دمای خاک در علوم کشاورزی و هیدرولوژی از یک سو و وجود مشکلات فراوان در ثبت این فراسنج حیاتی، پژوهشگران را بر آن داشته تا به دنبال یافتن رابطه‌ای بین دمای خاک و فراسنج‌های دیگر باشند تا بتوانند دمای خاک را با دقت مطلوب برآورد کنند (پارسا و همکاران، ۱۳۹۰). از این‌رو، تاکنون مطالعات گسترده‌ای در جهان در زمینه دمای اعماق خاک و تلاش برای برآورد آن صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به لو و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۲) که به شبیه‌سازی تغییرات دمای اعماق خاک با استفاده از معادله انتقال گرمای فوریه پرداخته، اشاره کرد. نتایج پژوهش آنها نشان داد که رطوبت سطح خاک به شدت انتقال گرما در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. کنگ و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) به پیش‌بینی الگوی زمانی و فضایی دمای خاک در رابطه با توپوگرافی، پوشش سطحی و دمای هوا پرداخته و نشان دادند که تغییرات دوره‌ای دمای خاک در شیب‌های جنوبی بیشتر از شیب‌های شمالی است. ناراپوتتی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۵) دمای اعماق خاک را مدلسازی نموده نشان دادند که اختلاف بین داده‌های برآورد شده و داده‌های واقعی با افزایش عمق بیشتر می‌شود. احمد و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۸) به برآورد دمای

مستقیم وابسته به دماست (علیزاده، ۱۳۸۳). دما و الگوهای رفتاری آن در سامانه‌های زیستی (رشد و نمو گیاه، جانوران)، فیزیکی (تخریب و فرسایش) و شیمیایی همراه با رطوبت (کریوکلاستی، تبخیر و تعرق) بویژه در شرایط جوی خشک بسیار مهم است (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۸). سطوح امواج الکترومغناطیسی خورشید را جذب، منعکس، و یا گسیل می‌دهند (جاهدی و فرخی، ۱۳۷۵). ویژگی‌های فیزیکی و گرمایی سطوح و برهمکنش بین سطح و امواج ورودی تعیین کننده میزان کسب یا دفع انرژی هستند (علیجانی و کاویانی، ۱۳۷۱؛ علوی‌پناه و همکاران، ۱۳۸۲، ۱۳۸۴). الگوی انتقال گرما در خاک و دمای اعماق مختلف خاک ناشی از آن، به ویژگی‌های بافت، ساختمان، تخلخل، محتوای رطوبت یا هوای خاک و ویژگی‌های تابش ورودی همانند شدت، مدت و زاویه تابش بستگی دارد (نجفی مود و همکاران، ۱۳۸۷). دمای خاک بسته به ساعات روز، ماه، فصل و سال تغییرات دوره‌ای نشان می‌دهد و این تغییرات از یک رابطه سینوسی پیروی می‌کند (بای بوردی، ۱۳۷۲). در مطالعه دمای سطوح خاکی ویژگی‌های گرمایی بسیار مهم است و در واقع مبین تغییرات گرما با زمان است (کاویانی، ۱۳۸۰). ارزیابی دما در ژرفاهای مختلف خاک نیازمند آگاهی از ویژگی‌های حرارتی و فیزیکی آن است. در صورتی‌که فراسنج‌های مورد نیاز این معادله فراهم نباشد، دستیابی به پراکنش قائم دما در نیمرخ خاک ناممکن است و نیاز به روش‌های ساده‌تری است (جعفری گلستان و همکاران، ۱۳۸۶). معمولاً، اندازه‌گیری دمای خاک در ایستگاه‌های همدید با انواع مختلف حسگر و یا

<sup>۱</sup> -Luo et al.

<sup>۲</sup> -Kang et al.

<sup>۳</sup> -Narapusetty et al.

<sup>۴</sup> -Ahmad et al.

همکاران (۱۳۸۸) در مطالعه خود نشان دادند که دقت پیش‌بینی دمای خاک در لایه‌های کم‌عمق، ۱۰٪ بیشتر از لایه‌های عمیق است. پارسافر و معروفی (۱۳۹۰) به برآورد دمای اعماق خاک پرداخته و نشان دادند که مطلوب‌ترین و نامناسب‌ترین برآورد بین دمای هوا و دمای خاک بترتیب در عمق ۵ و ۱۰۰ سانتیمتری است. مزیدی و همکاران (۱۳۹۰) به مطالعه روند دمای سالانه خاک پرداخته و نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین دامنه نوسان دمای روزانه در لایه‌های نزدیک به سطح زمین رخ می‌دهد. قائمی نیا و همکاران (۱۳۹۰) تغییرات دمای اعماق مختلف خاک را شبیه‌سازی کرده و نشان دادند که معادلات سینوسی قابلیت و بازدهی مناسبی در پیشگویی تغییرات دمایی اعماق مختلف خاک دارند. بنابراین، با توجه به اهمیت برآورد دمای ژرفای خاک در زمینه‌هایی همچون کشاورزی و مهندسی و ... هدف اصلی این پژوهش ارایه یک مدل عددی مناسب جهت تخمین دمای اعماق مختلف خاک است که برای کالیبره کردن نتایج حاصل از مدل و تعیین میزان دقت و کارایی آن نیز از روش‌های آماری استفاده گردیده است.

#### مواد و روش‌ها

داده‌های ساعتی دمای اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری خاک از ایستگاه همدید مهرآباد برای ساعت‌های ۶:۳۰، ۱۲:۳۰ و ۱۸:۳۰ به وقت تهران در سال ۲۰۰۸ بعنوان داده‌های اندازه‌گیری شده مورد استفاده قرار گرفتند. با ترسیم نمودار روند ماهانه و سالانه دمای اعماق مختلف خاک در ساعت‌های مختلف شبانه روز مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با استفاده از معادله‌های تجربی دمای ژرفاهای مختلف خاک، در رابطه با دمای سطحی محاسبه شده و با

خاک بر اساس دمای هوا پرداخته و نشان دادند که ضریب همبستگی بین دمای هوا و خاک در فصول مختلف سال متغیر بوده و بیشترین مقدار آن مربوط به فصل بهار است. به بررسی روش‌های مختلف محاسبه ضریب پخشیدگی خاک در جهت برآورد آهنگ تغییرات دمای اعماق خاک پرداخت. همچنین می‌توان به اسمیت و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۷۷)، زنگ و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۳)، گلیچینسکی و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۸)، چاکو هو همکاران (۲۰۰۲) ملاندر و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۵)، گناتویسکی<sup>۵</sup> (۲۰۰۹)، کاهیمبا و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۷)، لی و همکاران (۲۰۰۷)، ماکینده و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۹)، زو و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۰۹)، دوآن<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد که در رابطه با محاسبه دمای خاک پژوهش‌هایی داشته‌اند.

در زمینه الگوی دمای اعماق خاک از مطالعات انجام گرفته در ایران می‌توان به ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۶) بر روی رژیم دمایی اعماق خاک و تعیین توابع نوسانات ادواری آن اشاره نمود. نتایج آنها نشان داد که بیشینه و کمینه دامنه تغییرات دمایی در طول شبانه روز و سال بترتیب در اعماق ۵ و ۱۰۰ سانتیمتری رخ می‌دهد. مطالعات جعفری گلستان و همکاران (۱۳۸۶) در برآورد دمای ژرفای خاک نشان داد که ارتباط معناداری بین دمای هوا و دمای اعماق ۷ و ۲۰ سانتیمتری خاک وجود دارد. سبزی‌پرور و

1 -Smith et al.

2 -Zheng et al.

3 -Gilichinsky et al.

4 -Mellander at al.

5 -Gnatowski.

6 -Kahimba et al.

7 -Makinde et al.

8 -Zhou et al.

9 -Duan et al.

شایان توجه است که تابع سینوسی بر حسب رادیان توصیف می‌شود نه بر حسب درجه. مثلاً مقدار  $\omega t$  در زمان‌های صفر، ۱۲ و ۲۴ بترتیب  $0$ ،  $\pi$  رادیان و  $2\pi$  رادیان است که سینوس همگی صفر بوده و لذا  $T_{(0,0)} = T_{avg}$  است.

اما اگر محاسبه دمای خاک در هر لحظه از شبانه روز در عمق  $Z$  مدنظر باشد باید از معادله (۳) استفاده کرد (علیزاده، ۱۳۸۳):

معادله (۳):

$$T_{(z,t)} = T_{avg} + A_0 \left[ \sin \left( \omega t - \frac{z}{d} \right) \right] e^{-z/d}$$

که  $Z =$  عمق خاک،  $d =$  عمق میرایی<sup>۱</sup> (در اینجا  $0/1$  متر)

عمق میرایی عمقی است که در آن تغییرات دما طی شبانه روز  $0/37$  تغییرات دما در سطح خاک است. مثلاً اگر تغییرات دما در سطح خاک طی شبانه روز  $24$  درجه است، در عمق میرا این تغییرات  $8/8 = 0/37 \times 24$  درجه است. عدد  $0/37$  از تقسیم یک بر  $e$  (پایه لگاریتم نپرین) به دست آمده است. به عبارت دیگر، در عمق میرا دامنه نوسان دما  $0/37$  از مقدار  $A_0$  است.

معادله (۴):

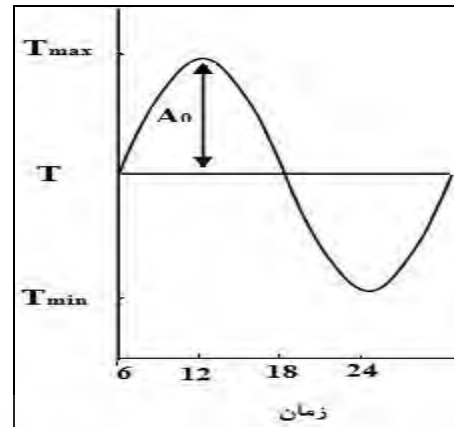
$$\frac{1}{e} = \frac{1}{2.718} = 0.37$$

عمق میرا در خاک بستگی به خصوصیات گرمایی خاک و فرکانس نوسانات دما دارد و از معادله (۵) قابل دستیابی است (علیزاده، ۱۳۸۳):

معادله (۵):

$$d = \left[ \frac{2k}{C_p(\omega)} \right]^{0.5} = \left( \frac{2D_h}{\omega} \right)^{0.5}$$

داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه مهرآباد مورد واسنجی قرار گرفتند. معادلات تجربی مورد استفاده در ادامه به تفصیل معرفی می‌شوند:



شکل (۱) نوسانات آرمانی دما در خاک

مطابق شکل (۱)، معادله سینوسی حاکم بر تغییرات دمای خاک در طول شبانه روز را می‌توان به صورت معادله (۱) ارایه نمود:

معادله (۱):

$$T_{(0,t)} = T_{avg} + A_0 \sin(\omega t)$$

که  $T_{(0,t)}$  = دمای خاک بعنوان تابعی از زمان،  $T_{avg}$  میانگین دمای خاک،  $A_0 =$  دامنه موج تغییرات دما

$t = (t_n - t_0)$ ،  $t =$  تاخیر زمانی<sup>۱</sup> که در

این پژوهش زمان‌های مورد نظر بترتیب عبارتند از:  $t_0 = 6:30$ ،  $t_1 = 12:30$ ،  $t_2 = 18:30$  فرکانس  $\omega$  نوسانات دما در طول شبانه روز و بر حسب زمان است که مقدار آن  $2\pi$  برابر فرکانس واقعی است.

یعنی:

معادله (۲):

$$\omega = \frac{2\pi}{24h} = \frac{2\pi}{86400s} = 7.27 \times 10^{-5} / sec$$

<sup>۱</sup>-Damping depth.

<sup>۱</sup>-Time Lag.

که  $O_i$  = مقدار واقعی دما،  $P_i$  = مقدار برآورد شده دما،  
 $O_{avg}$  = میانگین مقدار مشاهده شده است.  
 ضریب کارایی ناش - ساتکلیف از  $-\infty$  تا ۱ متغیر  
 است. بطوریکه هرچه به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده  
 این است که مدلسازی با کارایی (بازدهی) بیشتری  
 انجام شده است (قائمى نیا و همکاران، ۱۳۹۰).

معادله (۷):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

در این رابطه،  $Y_i$  و  $X_i$  به ترتیب  $i$  امین داده واقعی و  
 برآورد شده و  $n$  تعداد کل نمونه های ارزیابی شده  
 هستند.

#### یافته‌های پژوهش

#### الگوی دمای ماهانه و سالانه اعماق مختلف بر اساس داده‌های واقعی

مطابق شکل (۲) دمای تمامی اعماق اندازه‌گیری شده  
 از الگوی ماهانه مشابهی برخوردار هستند، بطوریکه  
 ماه‌های ژوئیه و اوت بیشینه دما و ماه‌های ژانویه،  
 فوریه و دسامبر کمینه دما را در تمامی اعماق نمایش  
 می‌دهند که بخوبی نشان دهنده تبعیت دمای خاک و  
 اعماق آن از تغییرات دمای هوا در ماه‌های مختلف  
 سال است. بررسی ساعتی دمای اعماق مختلف خاک  
 نشان می‌دهد که در اعماق نزدیک به سطح (۵  
 سانتیمتری) بیشینه دمای خاک مربوط به ساعات میانی  
 روز (۱۲:۳۰) و کمینه دما مربوط به ساعات اولیه پس  
 از طلوع آفتاب (۶:۳۰) است. در عمق ۱۰ سانتیمتری  
 ناشی از تاخیر زمانی انتقال دما از سطح به عمق،  
 بیشینه دما مربوط به ساعت ۱۸:۳۰ است. بنابراین، در  
 نوع خاک محدوده ایستگاه مهرآباد گرمای بیشینه دمای  
 ساعت ۱۲:۳۰ با ۶ ساعت تاخیر، به عمق ۱۰

که  $D_h$  = ضریب پخشیدگی گرما که برای انواع مختلف  
 خاک بین ۰/۰۷ تا ۰/۱۲ متغیر است،  $k$  = ضریب  
 هدایت گرما،

$C_v$  = گرمای ویژه حجمی و  $\omega$  = فرکانس نوسانات  
 دما: ( $\omega = \frac{2\pi}{24h}$ ) برای نوسانات روزانه و یا  
 ( $\omega = \frac{2\pi}{365}$ ) برای نوسانات سالانه.

بنابراین، با توجه به مجموعه معادلات نامبرده، با  
 داشتن دمای سطح یا یکی از اعماق خاک می‌توان با  
 در نظر گرفتن عمق میرایی و ویژگی‌های گرمایی  
 خاک همانند هدایت گرمایی، ظرفیت گرمای ویژه و  
 ضریب پخشیدگی، دمای سایر اعماق را نیز محاسبه  
 نمود. در این پژوهش با توجه به اینکه دمای سطح  
 خاک در دسترس نبود، دمای عمق ۵ سانتیمتری بعنوان  
 دمای پایه در نظر گرفته شد و دمای سایر اعماق بر  
 اساس آن و با استفاده از روابط تجربی بالا برای سه  
 ساعت از روز ( $t_0=6:30$ ,  $t_1=12:30$ ,  $t_2=18:30$ ) و برای  
 ۳۶۵ روز سال ۲۰۰۸ محاسبه گردید. پس از آن،  
 میانگین دمای روزانه برآورد شده برای هر عمق (۱۰،  
 ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری) با میانگین دمای روزانه  
 داده‌های واقعی در طول سال آماری مورد مطالعه،  
 همبستگی گرفته شد تا میزان معناداری و دقت مدل  
 عددی بالا، مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر ضریب  
 همبستگی، برای تعیین کارایی مدل عددی ارایه شده،  
 از ضریب کارایی ناش - ساتکلیف<sup>۱</sup> ( $R_{NS}$ ) و جذر  
 میانگین مربع خطا (RMES) نیز استفاده شد که به  
 شرح معادله (۶) و (۷) هستند:

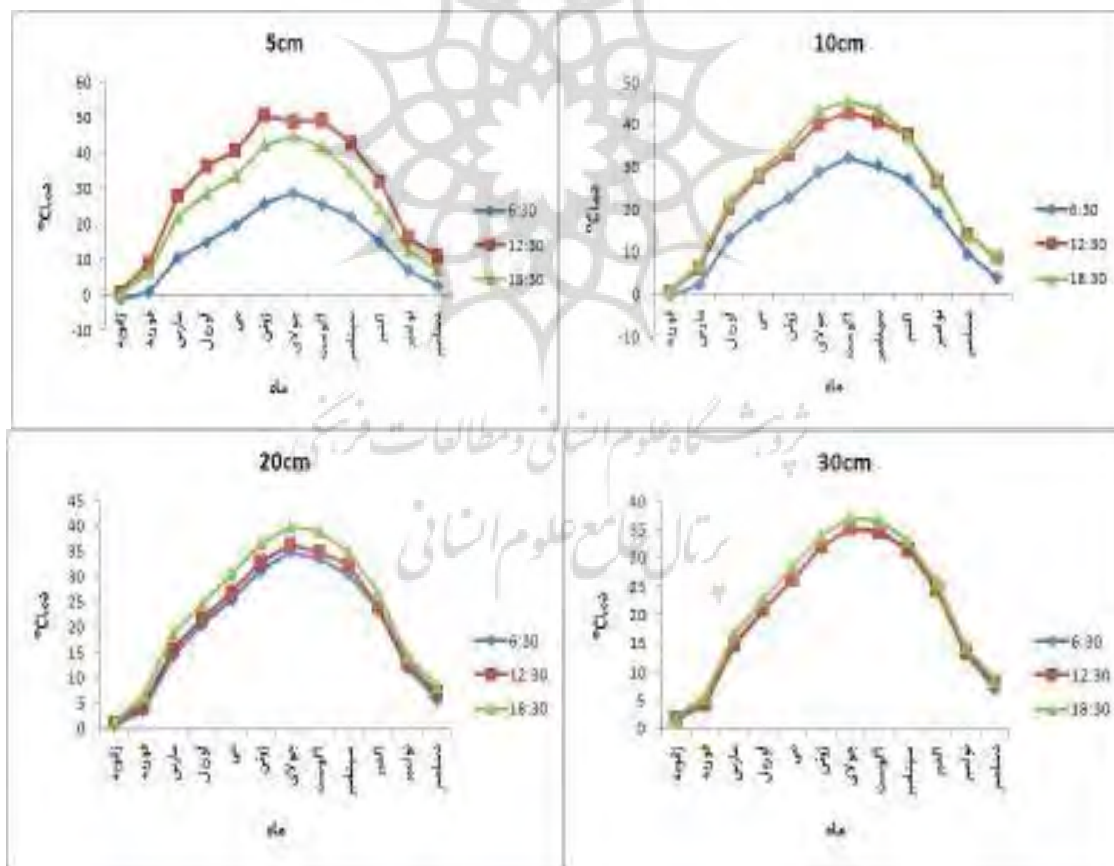
معادله (۶):

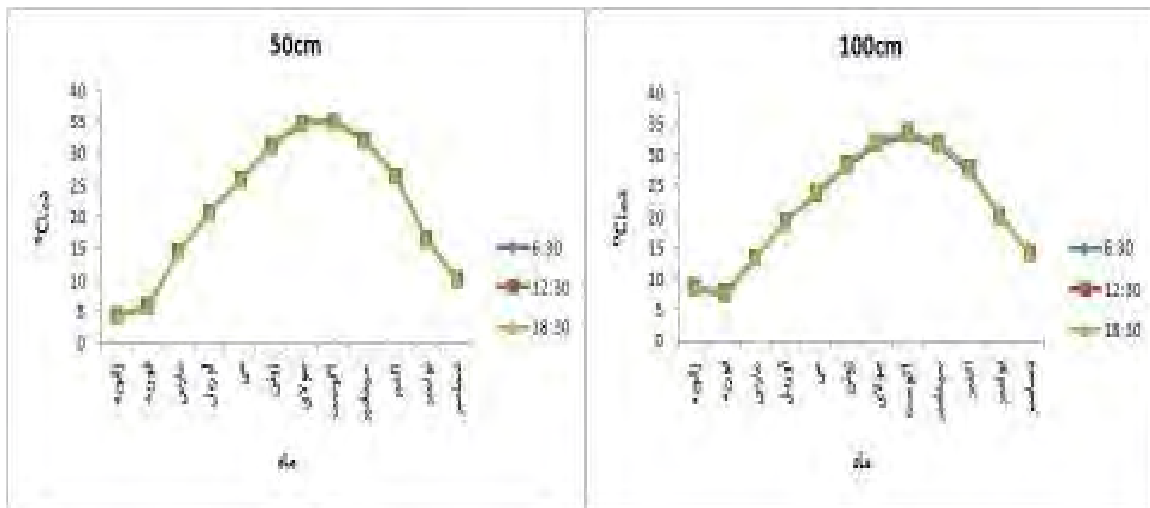
$$R_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - o_{avg})^2}$$

<sup>۱</sup> -Nash-Sutcliffe.

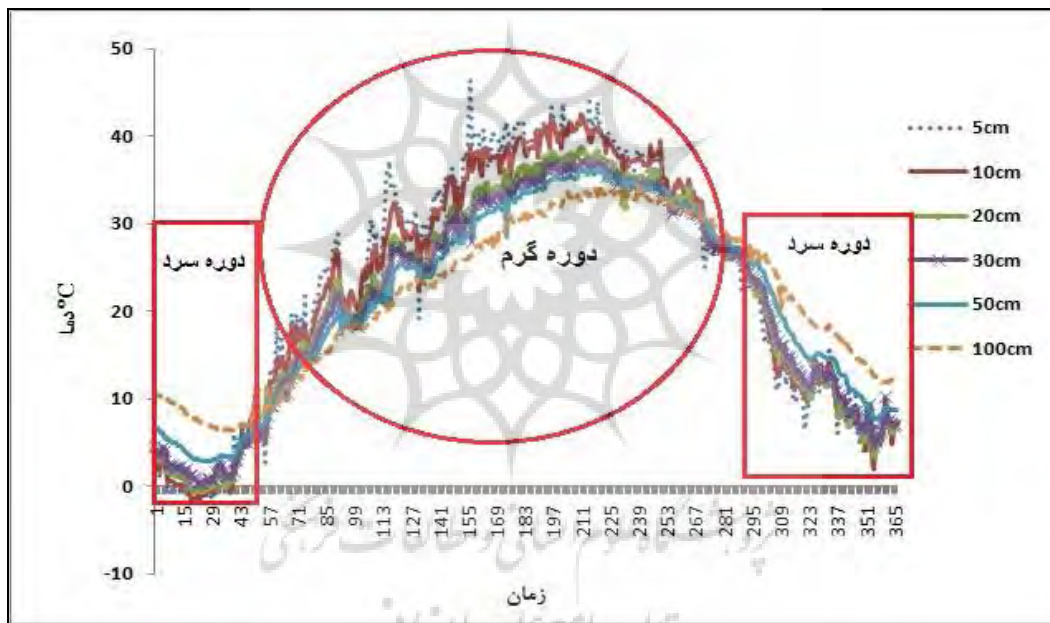
مربوط به ماه اوت است، در حالیکه در همان ماه و در عمق ۱۰۰ سانتیمتری بیشینه دما به  $35^{\circ}\text{C}$  کاهش یافته است. مطابق شکل (۳)، رفتار دمایی اعماق مختلف در طول سال از ۲ الگوی متفاوت برخوردار است، در دوره گرم سال، کاهش دما از سطح به عمق بطوریکه بیشینه دما در ۵ سانتیمتری، و کمینه دما در عمق ۱۰۰ سانتیمتری از سطح خاک ثبت شده است. در دوره سرد سال روند تغییرات دما کاملاً وارون بوده و دما از سطح به عمق افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده تعدیل دما به سمت ژرفای بیشتر خاک است.

سانتیمتری می‌رسد. همچنین از سطح به اعماق پایینتر دامنه تغییرات دما در طول ساعات روزانه کاهش می‌یابد. به طوری که از عمق ۵۰ سانتیمتر به بعد منحنی‌های دمایی ساعات مختلف کاملاً بر هم منطبق بوده و دمای مشابهی را نشان می‌دهند. علت آنرا می‌توان افزایش عمق میرایی دما در اعماق پایین‌تر دانست. یعنی با افزایش عمق خاک میزان انتقال گرما از سطح به عمق کاهش یافته و از عمق ۵۰ سانتیمتر به بعد تقریباً ثابت است. به طوری که، کاهش دما از سطح به عمق کاملاً مشهود است. بعنوان نمونه بیشینه دمای خاک در عمق ۵ سانتیمتری حدود  $50^{\circ}\text{C}$  و





شکل ۲) الگوی رفتار ماهانه دمای اعماق مختلف خاک



شکل ۳) روند روزانه میانگین دمای اعماق مختلف خاک در طول سال (از ۱ ژانویه تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۸)

سانتیمتری) است. اما با افزایش عمق خاک میزان اختلاف دمای برآورد شده با دمای واقعی ثبت شده افزایش می‌یابد. به طوریکه بیشترین ضریب همبستگی محاسبه شده بین دمای برآورد شده و دمای واقعی مربوط به عمق ۱۰ سانتیمتری است ( $r=0/99$ ). و با افزایش عمق از میزان ضریب همبستگی کاسته می‌شود، بطوریکه در اعماق ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰

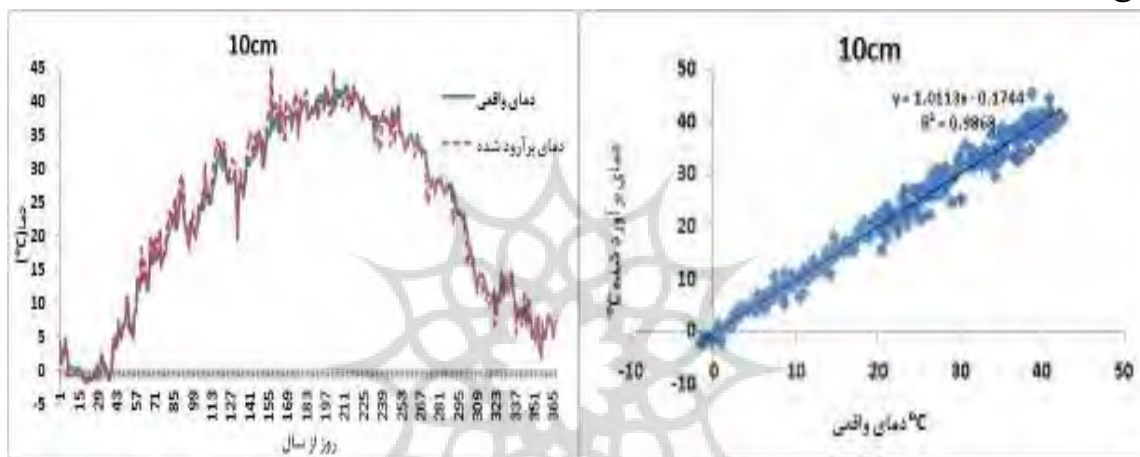
مقایسه میانگین دمای روزانه برآورد شده و واقعی اعماق مختلف خاک

مطابق شکل‌های ۴ تا ۸، مقایسه میانگین دمای روزانه برآورد شده و داده‌های واقعی ثبت شده در ایستگاه همدید مهرآباد گویای میزان اختلاف ناچیز بین دمای برآورد شده با معادله‌های تجربی و دمای ثبت شده ایستگاهی بویژه در ژرفاهای نزدیک به سطح مبنا (۵)

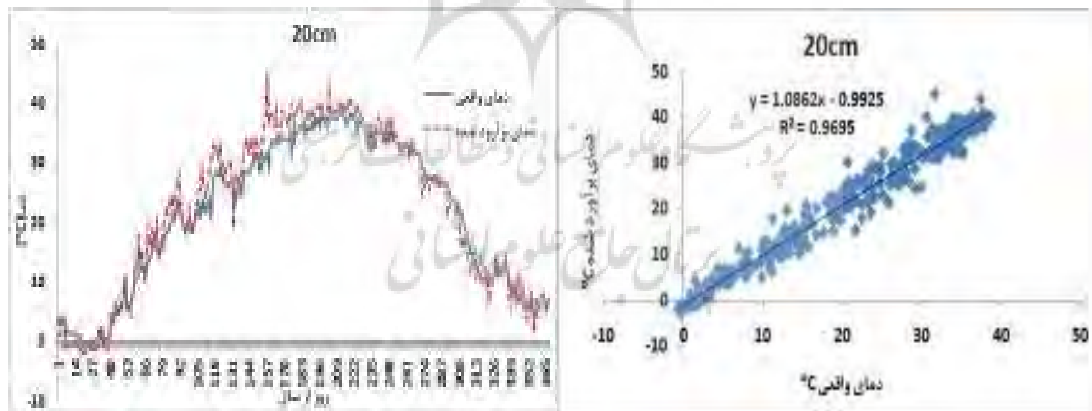


دمای اعماق خاک بر پایه شکل‌های زیر، در تمامی اعماق (به جز عمق ۱۰ سانتیمتری) دماهای برآورد شده توسط مدل در تمامی روزهای سال و برای تمامی اعماق (به جز عمق ۱۰ سانتیمتری) حدود چند درجه بیشتر از مقدار دمای ثبت شده در ایستگاه است، اما با توجه به ضریب همبستگی معنادار بین دمای برآورد شده و دمای واقعی این میزان اختلاف قابل قبول است.

سانتیمتری این ضریب بترتیب به ۰/۹۵، ۰/۹۷، ۰/۹۸ و ۰/۸۹ می‌رسد. البته با وجود اینکه با افزایش عمق میزان ضریب همبستگی بین دمای برآورد شده و دمای واقعی کاهش می‌یابد اما در تمامی اعماق این ضریب از معناداری قابل توجهی برخوردار است و در تمام اعماق، ضریب همبستگی بدست آمده در سطح ۹۹٪ اطمینان معنادار است. همچنین باید اشاره نمود که نتایج حاصل از مدل سینوسی مورد استفاده در برآورد

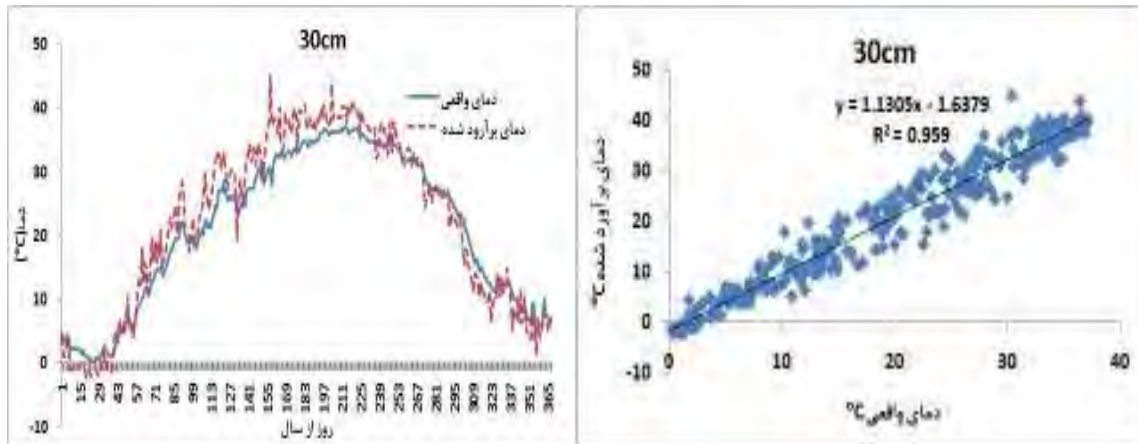


شکل ۴- الف) میانگین دمای روزانه برآورد شده و واقعی ب) همبستگی بین آنها در عمق ۱۰ سانتیمتری

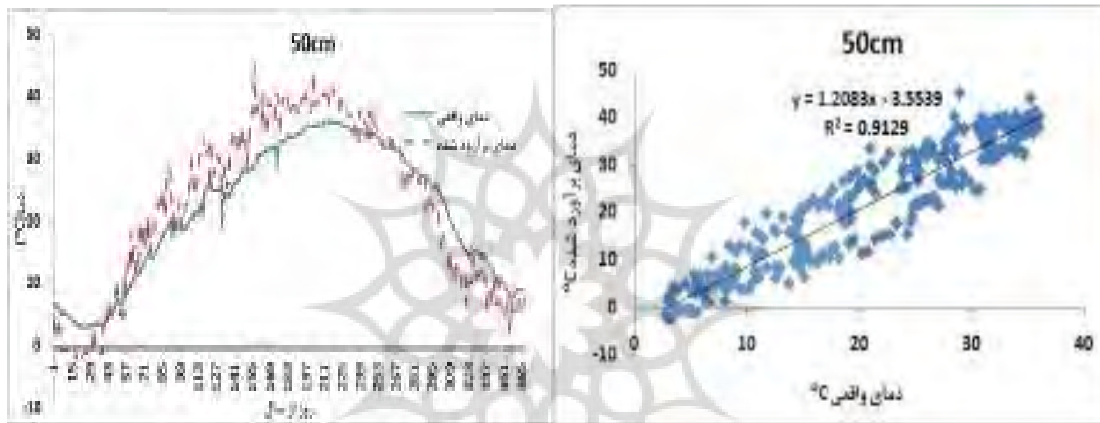


شکل ۵- الف) میانگین دمای روزانه برآورد شده و واقعی ب) همبستگی بین آنها در عمق ۲۰ سانتیمتری

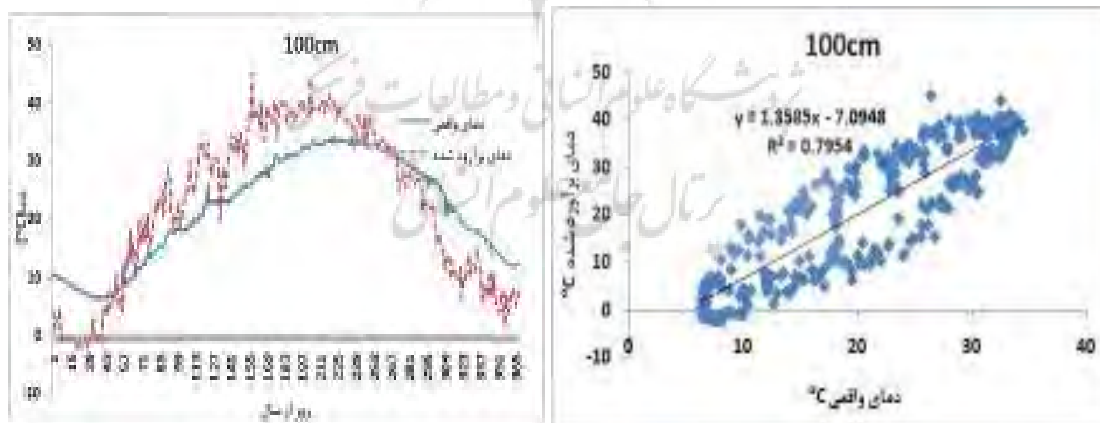




شکل ۶- الف) میانگین دمای روزانه برآورد شده و واقعی ب) همبستگی بین آنها در عمق ۳۰ سانتیمتری



شکل ۷- الف) میانگین دمای روزانه برآورد شده و واقعی ب) همبستگی بین آنها در عمق ۵۰ سانتیمتری



شکل ۸- الف) میانگین دمای روزانه برآورد شده و واقعی ب) همبستگی بین آنها در عمق ۱۰۰ سانتیمتری

کارایی ناش - ساتکلیف نیز استفاده شد که نتایج آن در جدول (۱) ارایه شده است. بر اساس نتایج حاصل

برای ارزیابی میزان کارایی مدل سینوسی مورد استفاده علاوه بر روش آماری ضریب همبستگی از ضریب

هدف این پژوهش آزمون مدل تجربی تخمین دمای اعماق مختلف خاک در محدوده ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران است. بررسی ساعتی دمای اعماق مختلف خاک بر اساس داده‌های ثبت شده نشان داد که انتقال گرما در درون خاک از یک تاخیر زمانی برخوردار است. به عنوان مثال ساعت اوج دمایی در عمق ۵ سانتیمتری از سطح زمین ۱۲:۳۰ (ظهر) است اما در عمق ۱۰ سانتیمتری بیشینه دمایی در ساعت ۱۸:۳۰ رخ می‌دهد. علاوه بر این، مطالعه روند دمای اعماق خاک در دوره های گرم و سرد سال نشان داد که در دوره سرد سال روند تغییرات دما عکس دوره گرم سال بوده و دما از سطح به عمق افزایش پیدا می‌کند. همچنین، نتایج حاصل از کاربرد مدل سینوسی نشان داد که در میان اعماق مختلف خاک، در عمق ۱۰ سانتیمتری به دلیل نزدیکتر بودن به عمق مینا (۵ سانتیمتری) میزان اختلاف دمای برآورد شده و دمای ثبت شده کمتر از سایر عمق هاست. علاوه بر این، دماهای برآورد شده توسط مدل سینوسی، نسبت به دماهای ثبت شده حالت فرین دارند و این حالت با افزایش عمق بیشتر می‌شود. در نهایت، نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج حاصل از تحقیقات سایر پژوهش‌گران (ناراپوتی و همکاران (۲۰۰۵)، سبزی-پرور و همکاران (۱۳۸۸) و پارسافر و همکاران (۱۳۹۰)) مطابقت داشته و نشان داد که دقت پیش‌بینی دمای خاک در لایه‌های کم عمق، بیشتر از لایه‌های عمیق است. از طرف دیگر، با توجه به اینکه معادله سینوسی مورد استفاده در محاسبات خود پارامترهایی همچون تاخیر زمانی، عمق میرایی، و بزرگی‌های گرمایی خاک و ... را در نظر می‌گیرد، از کاربرد مناسبی در جهت تخمین دمای اعماق مختلف خاک برخوردار بوده و بنابراین در مناطق فاقد ایستگاههای

از ضریب ناش-ساتکلیف که بین  $\infty$  تا ۱ متغیر است و هرچقدر به ۱ نزدیکتر باشد نشان دهنده کارایی بیشتر مدل است، بنابراین، مطابق جدول (۱) ضریب ناش - ساتکلیف بدست آمده برای تمامی اعماق نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در تخمین دمای اعماق خاک است. همانند نتایج حاصل از ضریب همبستگی، نتایج حاصل از ضریب کارایی ناش - ساتکلیف نیز نشان داد که بیشترین ضریب کارایی مدل در عمق ۱۰ سانتیمتری است و به سمت اعماق پایین‌تر از کارایی آن اندکی کاسته می‌شود. اما در تمامی اعماق از ضریب کارایی قابل قبولی برخوردار است، به طوری که ضریب کارایی بدست آمده برای اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری به ترتیب ۰/۹۹۶۳، ۰/۹۸۷۷، ۰/۹۸۰۹، ۰/۹۶۱۸ و ۰/۹۱۱۴ است که همگی به یک نزدیک بوده و نشان دهنده کارایی مدل در تخمین دمای اعماق مختلف خاک است.

#### جدول ۱- ضریب کارایی محاسبه شده ناش - ساتکلیف و جذر میانگین مربع خطا برای اعماق مختلف خاک

| عمق (cm) | RMSE | RNS    |
|----------|------|--------|
| ۱۰       | ۱/۶  | ۰/۹۹۶۳ |
| ۲۰       | ۲/۷  | ۰/۹۸۷۷ |
| ۳۰       | ۳/۳۵ | ۰/۹۸۰۹ |
| ۵۰       | ۴/۷  | ۰/۹۶۱۸ |
| ۱۰۰      | ۷/۰۳ | ۰/۹۱۱۴ |

#### نتیجه گیری

از آنجاییکه دمای اعماق مختلف خاک تنها در برخی ایستگاه‌های همدید هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند و با مشکلاتی همچون هزینه و پایش مداوم مواجه هستند، و با توجه به اهمیت اندازه‌گیری دمای اعماق مختلف خاک در زمینه‌هایی همانند کشاورزی، مهندسی، زیرساخت‌های شهری، علوم خاک و ...،

زده در شرایط رطوبتی متفاوت، مجله فیزیک زمین و فضا، ۱، ۹۹-۸۹.

سبزی پرور علی اکبر، زارع ابیانه حمید، بیات ورکشی مریم (۱۳۸۸)، مقایسه یافته‌های مدل شبکه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی با مدل‌های رگرسیونی به منظور برآورد دمای خاک در سه اقلیم متفاوت، نشریه آب و خاک، ۲۴(۲)، ۲۸۵-۲۷۴.

سبزی پرور، علی اکبر، طبری حسین، آیینی علی (۱۳۸۸)، برآورد میانگین روزانه دمای خاک در چند نمونه اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های هواشناسی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۲، ۱۳۷-۱۲۵.

علوی پناه سید کاظم، (۱۳۸۲). کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک)، انتشارات دانشگاه تهران

علوی پناه سید کاظم، شمسی پور علی اکبر و جعفر بیگلر منصور، (۱۳۸۴)، الگوی رفتاری دمای سطوح مختلف در بیابان لوت، بیابان، مرکز تحقیقات بین‌المللی همزیستی با کویر - ۱۱(۱)، ۱۴۲-۱۲۵.

علیچانی بهلول و کاویانی محمدرضا، (۱۳۷۱)، مبانی آب و هواشناسی، سمت، تهران.

علیزاده امین (۱۳۸۳)، فیزیک خاک، انتشارات دانشگاه امام رضا، موسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی.

قائم‌نیا علی محمد، عظیم‌زاده حمیدرضا، مبین محمد- حسین (۱۳۹۰)، شبیه‌سازی تغییرات دمای اعماق مختلف خاک و بررسی برخی عامل‌های جوی تاثیرگذار بر آن (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک یزد)، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۸(۱)، ۵۷-۴۲.

اندازه‌گیری دمای اعماق خاک و تنها با داشتن دمای سطح و یا یکی از عمق‌ها می‌توان دمای سایر اعماق را محاسبه کرد.

## منابع

بایوردی محمد، (۱۳۷۲)، فیزیک خاک، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

پارسا فر نصرالدین، معروفی صفر (۱۳۹۰)، برآورد دمای عمق‌های مختلف خاک از دمای هوا با بکارگیری روابط رگرسیونی، شبکه عصبی و شبکه عصبی-فازی (مطالعه موردی: منطقه کرمانشاه)، نشریه دانش آب و خاک، ۳(۲۱)، ۱۵۲-۱۳۹.

ثنائی نژاد حسین، ادیب‌عباسی محمد، موسوی بایگی محمد، حیدری گندمان محمد طالب (۱۳۸۶)، بررسی رژیم دمایی هوا و اعماق خاک و تعیین توابع نوسانات ادواری آنها در ایستگاه‌های استان کردستان، مجله علوم و صنایع کشاورزی، ویژه آب و خاک، ۲۲(۱)، ۳۳-۲۵.

جاهدی فرشید، فرخی شاهرخ، (مترجمان) (۱۳۷۵)، مبادی سنجش از دور، مرکز سنجش از دور ایران، تهران.

جعفری گلستان محسن، رائینی سرجاز محمود، ضیاءتبار احمدی میرخالق (۱۳۸۶)، برآورد دمای ژرفای خاک با بهره‌گیری از روش تجزیه منحنی و همبستگی‌های رگرسیونی برای شهرستان ساری، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۵)، ۱۲۳-۱۱۲.

خوشخو یونس، خلیلی علی، رحیمی حسن، ایران نژاد پرویز (۱۳۸۷)، شبیه‌سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی ضریب پخشیدگی گرمایی خاک یخ

- Kerr, A, B.J. Smith, B. whally, J.P. Mc Greevy 1984, Rock Temperatures from southeast Morocco and their significance from experimental rock weathering studies. *Geology* 12,306-9.
- Li, H., S. H. Futch, et al. (2007). "Cross-correlation patterns of air and soil temperatures, rainfall and *Diaprepes abbreviatus* root weevil in citrus." *Pest management science* 63(11): 1116-1123.
- Luo, Y., R.Loomis, et al. (1992). "Simulation of soil temperature in crops." *Agricultural and forest meteorology* 61(1-2): 23-38.
- Makinde, A., N. Bello, et al. (2009). "Hydrothermal effects on the performance of maize and cucumber intercrop in a tropical wet and dry climate in Nigeria." *African Journal of Agricultural Research* 4(3): 225-235.
- Mellander, P. E., H. Laudon, et al. (2005). "Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands." *Agricultural and forest meteorology* 133(1): 109-118.
- Narapusetty, B. and N. Mölders (2005). "Evaluation of snow depth and soil temperatures predicted by the hydro-thermodynamic soil-vegetation scheme coupled with the fifth-generation Pennsylvania State University-NCAR mesoscale model." *Journal of applied meteorology* 44(12): 1827-1843.
- Smith, B.J. 1977, Rock temperature measurements from northwest Sahara and their implications for rock weathering, *catena* 4, 41 – 63.
- Tessy Chacko, P. and G. Renuka (2002). "Temperature mapping, thermal diffusivity and subsoil heat flux at Kariavattom of Kerala." *Journal of Earth System Science* 111(1): 79-85.
- Zheng, D., E. R. Hunt Jr, et al. (1993). "A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications." *Clim. Res* 2: 183-191.
- Zhou, T., P. Shi, et al. (2009). "Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q10) and its implications for carbon-climate feedback." *J. Geophys. Res* 114(G02016): G02016.
- کاویانی محمدرضا، (۱۳۸۰)، میکروکلیماتولوژی، سمت، تهران.
- مزیدی احمد، فلاح‌زاده فاطمه (۱۳۸۹)، روند دمای سالانه خاک در ایستگاه یزد، مجله جغرافیا و توسعه، ۲۴، ۳۹-۵۰.
- نجفی‌مود محمدحسین، علیزاده امین، محمدیان آزاده، موسوی جواد (۱۳۸۷)، بررسی رابطه دمای هوا و دمای اعماق مختلف خاک و برآورد عمق یخبندان (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۲(۲)، ۴۶۶-۴۵۶.
- Ahmad, M. F. and G. Rasul (2008). "Prediction of soil temperature by air temperature ; A case study for Faisalabad." *Pakistan Journal of Meteorology* Vol 5(9).
- DuanA, W. and L. ChenA (2010). "Spatiotemporal distribution pattern of soil temperature in forest gap in *Pinus koraiensis*-dominated broadleaved mixed forest in Xiao Xing'an Mountains, China".
- Gilichinsky, D., R. G. Barry, et al. (1998). A century of temperature observations of soil climate: Methods of analysis and long-term trends.
- Gnatowski, T.(2009). "Analysis of thermal diffusivity data determined for selected organic topsoil layer." *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation* 41(2): 95-107.
- Kahimba, F. and R. S. Ranjan (2007). "Soil temperature correction of field TDR readings obtained under near freezing conditions." *Canadian Biosystems Engineering* 49: 1.
- Kang, S., S. Kim, et al. (2000). "Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature." *Forest Ecology and Management* 136(1-3): 173-184.