

بررسی رابطه‌ی دمای سطح زمین با اعماق خاک (مطالعه‌ی موردی: استان کرمانشاه)

فیروز مجرد* - استادیار گروه جغرافیا، دانشکده‌ی ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی کرمانشاه
حدیث صادقی - کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی کرمانشاه

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۱۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۱۱/۲۹

چکیده

مطالعه‌ی دمای اعماق خاک از نظر هواشناسی، اقلیم‌شناسی، کشاورزی، صنعت و دیگر فعالیت‌های زیستی اهمیت فراوانی دارد. در این پژوهش، روابط دمای سطح زمین با دماهای اعماق ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری خاک بررسی شد. این بررسی در پنج ایستگاه سینوپتیک استان کرمانشاه با بهره‌گیری از آمار ساعات ۶/۳۰ صبح و ۶/۳۰ بعدازظهر در یک دوره‌ی ۱۴ ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۳) و با استفاده از روش‌های آماری انجام گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش ژرفای خاک، دامنه‌ی نوسان سالانه‌ی دما و به‌ویژه دامنه‌ی شبانه‌روزی دما کاهش می‌یابد تا اینکه در عمق ۵/۰ متری، کمابیش اختلاف شبانه‌روزی دما از بین می‌رود. همچنین نوسان‌های شبانه‌روزی دمای هر عمق، در تابستان بیشتر از فصول دیگر است. اختلاف سالانه‌ی دما بین سطح زمین و اعماق، تا عمق ۵۰ سانتی‌متری افزایش پیدا می‌کند؛ ولی از آن به بعد کمابیش به حالت ثبات می‌رسد. آزمون t با نمونه‌های وابسته نشان داد که میانگین ارقام سالانه‌ی دما در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری و نیز، اختلاف شبانه‌روزی دما بین این دو عمق، اختلاف معناداری را نشان نمی‌دهد. تشابه رفتار منحنی‌های دمایی در اعماق خاک حاکی از آن است که جنس خاک، صرف‌نظر از اختلاف‌هایی که در اثر تفاوت‌های آب‌وهوایی پدید می‌آید، تأثیر چندانی در ترتیب توزیع ارتفاعی (عمقی) دما ندارد. در فصل زمستان، پایین‌ترین دماهای حداقل در اعماق ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری خاک، نسبت به پایین‌ترین دماهای سطح زمین، به‌طور میانگین به ترتیب ۳، ۱۳ و ۳۳ روز تأخیر نشان می‌دهد. این تأخیر برای بالاترین دماهای حداقل در فصل تابستان چند روز بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در کل پایین‌ترین دماها، زودتر از بالاترین دماها به عمق معینی می‌رسند. دماهای اعماق خاک در ایستگاه‌ها با استفاده از یک مدل وایزی چندگانه و بر مبنای سه متغیر دمای سطح خاک، شماره‌ی روز سال و عمق موردنظر با دقت خوب برآورد شد.

کلیدواژه‌ها: دما، عمق خاک، اختلاف شبانه‌روزی، برآورد، استان کرمانشاه.

مقدمه

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 که میزان و جهت تمام فرایندهای فیزیکی خاک به صورت مستقیم یا غیر مستقیم وابسته به دماست (نجفی و همکاران، ۱۳۸۷: ۴۵۶). توزیع عمقی دما در زمین به عوامل زیر بستگی دارد:

- ۱- ساختار و خواص فیزیکی زمین و ویژگی‌های حرارتی آن (ظرفیت گرمایی، ضریب انتقال حرارتی و گرمای ویژه)؛
- ۲- پوشش سطح زمین (زمین لخت، چمنزار، برف و غیره)؛
- ۳- تأثیر عناصر اقلیمی مانند دما، بارش، باد، تابش خورشیدی و رطوبت هوا.

اطلاع دقیق از نیمرخ دمای اعماق زمین برای تعیین اثر متقابل حرارتی ساختمان و سیستم‌های مهندسی با زمین (چاو و همکاران^۱، ۲۰۱۱: ۳۵۶۸)، احداث ساختمان‌های زیرزمینی، طراحی تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، تبادلات گرمایی بین لایه‌های زمین، فرایندهای تجزیه‌ی مواد آلی (پاپیل و همکاران^۲، ۲۰۰۱: ۳۰۱) و احداث بزرگراه‌ها و خطوط آهن در مناطق سردسیر، به‌ویژه در عرض‌های جغرافیایی بالا، اهمیت فراوانی دارد. چنانچه پرمافروست واقع در زیر خاکریزهای بزرگراه‌ها و پشته‌های راه‌ها در معرض انجماد و ذوب متوالی قرار گیرد، خسارت‌های زیادی به خطوط ارتباطی و اماکن وارد خواهد شد (کین و هیلر^۳، ۲۰۱۱: ۴۲۹). همین‌طور اجرای برخی از پروژه‌های صنعتی، مانند احداث لوله‌های انتقال آب زیرزمینی، فعالیت‌های کشاورزی و زیست میکروارگانیسم‌های خاک، وابستگی زیادی به دماهای اعماق خاک دارد. رشد بخش هوایی گیاه، وابستگی نزدیکتری به دمای خاک دارد تا دمای هوا. بدیهی است دماهای حدی تأثیر مخربی بر حیات گیاه دارد. بنابراین آگاهی از نوسان‌های دمایی خاک در امور کشاورزی، از خسارت‌های احتمالی جلوگیری کرده و موجب افزایش بازدهی محصول می‌شود (مزیدی و فلاح زاده، ۱۳۹۰: ۴۰). با مطالعه‌ی تغییرات دمای خاک می‌توان تاریخ تقریبی کشت محصولات را تعیین کرد. همچنین اطلاعات دمای خاک در کوتاه‌مدت از نظر تعیین تبادل انرژی سطح زمین، پیش‌بینی عمق یخبندان و... می‌تواند مفید باشد (بهیار و کمالی، ۱۳۸۶: ۸۱). به‌خصوص دمای خاک روی رشد گیاه، جوانه‌زنی و ظهور گیاهچه در سطح خاک، سبز کردن پیازها و غده‌ها، رشد ریشه‌ها و شاخه‌ها تأثیر اساسی دارد (کمالی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۰۹).

از دیدگاه توزیع عمقی دما، سه منطقه در زیر زمین قابل تشخیص است:

- ۱- منطقه‌ی سطحی تا عمق یک متری که به شرایط جوئی کوتاه‌مدت بسیار حساس است؛
- ۲- منطقه‌ی کم‌عمق با عمق ۱ الی ۸ متر (برای خاک‌های خشک سبک) و ۱ الی ۲۰ متر (برای خاک‌های ماسه‌ای سنگین مرطوب) که در این منطقه، دما کمابیش ثابت و نزدیک به دمای میانگین سالانه‌ی هواست و توزیع عمقی آن به‌طور عمده به شرایط جوئی فصلی بستگی دارد.

۳- عمق بیشتر از ۸ متر (یا ۲۰ متر) که دمای زمین در عمل ثابت است یا در اثر شیب زمین گرمایی^۱ بسیار آهسته افزایش پیدا می‌کند (پاپیل و همکاران، ۲۰۰۱: ۳۰۱).

از آنجاکه لایه‌ی سطحی خاک، محل بزرگترین جذب انرژی در روز و اتلاف آن در شب است، بزرگترین واکنش‌های حرارتی روی آن انجام می‌گیرد. اثر مزبور با فاصله از سطح به سوی پایین و درون زمین تعدیل می‌یابد. تراز انرژی سطحی و موج دما، گرادیان دما را تثبیت می‌کند و جریان گرمای خاک را در روز و فصول و ماه‌های گرم به سمت پایین و در شب و فصول و ماه‌های سرد به سمت بالا هدایت می‌کند (کاپیانی، ۱۳۸۹: ۵۴-۴۸).

در زمینه‌ی دمای خاک، مطالعاتی در سطح جهان و ایران انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. پاپیل و همکاران (۲۰۰۱) توزیع دمای اعماق زمین را در شهر پُرنان لهستان در دو کاربری متفاوت مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات کوتاه‌مدت (شبانه‌روزی) دما تا عمق یک متری ادامه دارد و در عمق بیشتر از ۱/۵ متر این نوسان‌ها به سختی تشخیص داده می‌شود. بلترامی^۲ (۲۰۰۱) در نوا اسکاتیای کانادا با بررسی دماهای زمین تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری، به این نتیجه رسید که دماهای خاک در فصول بهار، تابستان و پاییز، با در نظر گرفتن تأخیرهای ناشی از انتقال حرارت، کمابیش از دماهای سطح زمین پیروی می‌کنند. بلترامی و کلمن^۳ (۲۰۰۳) در نوا اسکاتیای کانادا با استفاده از یک مدل عددی چند لایه‌ی انتقال حرارتی^۴ و بر مبنای آمار دمای زمین تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری در دو ایستگاه هواشناسی با کاربری زمین متفاوت، به این نتیجه رسیدند که می‌توان رژیم حرارتی خاک جنگل را بر مبنای دمای هوا مدل‌بندی کرد. اوگونللا^۵ (۲۰۰۳) در نیجریه با بررسی آمار دمای خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری به این نتیجه رسید که عمق میرش در چرخه‌های سالانه، شبانه‌روزی و ساعتی دما، به ترتیب ۲۲۴، ۱۲ و ۲ سانتی‌متری خاک است. تیبیا و راکوئل^۶ (۲۰۰۶) در سائو مانوئل^۷ برزیل، دمای عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک را با استفاده از یک مدل ساده بر مبنای سه متغیر تابش خورشیدی، دمای حداکثر هوا و همچنین نوسان روزانه‌ی دما برآورد کردند.

گائو و همکاران^۸ (۲۰۰۷) روشی عددی را برای برآورد دمای خاک بر مبنای تأثیر همرفت حرارتی خاک ارائه کردند که به نتایج خوبی منتهی شد. هریس^۹ (۲۰۰۷) با مقایسه‌ی دماهای سطح زمین و نیمرخ اعماق زمین، به منظور پیش‌بینی بینی دماهای اعماق خاک در نیمکره‌ی شمالی، از مدل POM-SAT^{۱۰} استفاده کرد و نتیجه گرفت که مدل یاد شده، وسیله‌ی خوبی برای بازسازی آب‌وهوا در دوره‌های معین است. پکلانیکوا و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۸) در ایستگاه پوهورلیس جمهوری چک به این نتیجه رسیدند که میانگین دمای سالانه‌ی خاک، از ۱۰ درجه‌ی سلسیوس در عمق ۲۰ سانتی‌متری

1. Geothermal Gradient
2. Beltrami
3. Beltrami & Kellman
4. Multilayer numerical model of heat conduction
5. Ogunlela.
6. Tiba & Raquel.
7. Sao manuel.
8. Gao et al.
9. Harris.
10. Pre-Observational Mean. Surface Air Temperature.
11. Pokladnikova et al.

تا ۱۰/۴ درجه‌ی سلسیوس در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری متغیر است. درولیا و همکاران^۱ (۲۰۰۹) در یک مزرعه‌ی آزمایشی در دانشگاه کشاورزی آتن، دماهای ساعتی را در اعماق مختلف با استفاده از یک مدل تحلیلی و دو مدل نیمه‌تجربی برآورد کردند. هری هاران و همکاران^۲ (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای در ناحیه‌ی ترومبی^۳ برای تخمین اختلاف‌های شبانه‌روزی دماهای اعماق خاک، از روش موجک‌ها^۴ استفاده کردند. موجک‌ها سری خاصی از توابع ریاضی است که اولین بار توسط آلفرد هار ریاضیدان مجاری در سال ۱۹۰۹ برای تجزیه‌ی سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های تناوبی آن به کار برده شد. کین و هیلر (۲۰۱۱) در فلات کینگای - تبت^۵ با استفاده از دامنه‌ی شبانه‌روزی و فصلی دمای سطح زمین و نیز، داده‌های های مربوط به گرمایش جهانی، از یک مدل عددی یک بُعدی انتقال گرما^۶ برای شبیه‌سازی رژیم دما در لایه‌ی پرفاوست واقع در زیر خاکریزهای بزرگراه‌ها، به منظور کاربرد در احداث بزرگراه و خط‌آهن استفاده کردند. پلابورگ^۷ (۲۰۰۲) در دانمارک معادله‌ای ارائه کرد که پیش‌بینی دمای خاک را در عمق ۱۰ سانتی‌متری امکان‌پذیر نمود. بیر^۸ (۲۰۱۱) از یک مدل تحلیلی برای برآورد قابلیت هدایت گرمایی عمودی خاک استفاده کرد. چاو و همکاران (۲۰۱۱) با یک مدل وایازی چندگانه‌ی غیرخطی، دماهای اعماق خاک را تا ۳ متری در دو ایستگاه کشور هنگ‌کنگ پیش‌بینی کردند. ورودی‌های مدل شامل شماره‌ی روز سال، عمق خاک و دمای هوا بودند. به نظر آنان مدل وایازی به کار رفته، یک مدل سریع و دقیق برای برآورد دماها در اعماق زمین است.

در ایران، الیاسی (۱۳۸۲) با تجزیه و تحلیل آماری دمای اعماق خاک در ایستگاه کرج براساس تجزیه و تحلیل فوریه، نتیجه گرفت که امکان روندیابی تغییرات شبانه‌روزی دما در سطح و اعماق خاک با استفاده از داده‌های دمای هوای داخل پناهگاه وجود دارد. بهیار و کمالی (۱۳۸۶) در شهرستان بروجن با استفاده از روش‌های آماری دریافتند که رابطه‌ی بین دمای حداقل سطح خاک و هوا، از نوع خطی و دامنه‌ی تغییرات دمای خاک به صورت موجی است و از سطح به عمق کم می‌شود. کمالی و همکاران (۱۳۸۷) در زرقان فارس به این نتیجه رسیدند که تأثیر همزمان دمای هوا و رطوبت خاک، می‌تواند در برآورد دمای خاک مؤثر باشد. سبزی پرور و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای در هشت ایستگاه واقع در چهار اقلیم متفاوت ایران، بر مبنای برخی از عناصر جوی، روابط تجربی خوبی را برای تخمین دماهای روزانه‌ی خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری ارائه کردند. مزیدی و فلاح زاده (۱۳۹۰) در بررسی روند دمای سالانه‌ی خاک در ایستگاه یزد به این نتیجه رسیدند که موج گرمایی حداکثر روزانه، دیرتر از موج گرمایی حداقل روزانه به ژرفایی معین می‌رسد. به‌طور کلی اغلب مطالعات فوق، ضمن تأکید بر اهمیت مطالعه‌ی تغییرات و روندهای شبانه‌روزی و سالانه‌ی دما و ارتباط بین دمای سطح و اعماق خاک (به‌طور عمده تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری)، کارآمدی مدل‌های ریاضی و روش‌های آماری، از جمله معادلات وایازی را در برآورد دمای خاک به اثبات می‌رسانند. بررسی طیف روش‌های به کار گرفته شده در

1. Droulia et al.
2. Hariharan et al.
3. Trombay.
4. Haar wavelet
5. Qinghai-Tibet Plateau
6. One-dimentional heat conduction model
7. Plauborg
8. Bier

زمینه‌ی مدل‌سازی جبری و عددی، هم از دید نحوه‌ی کاربرد و هم از دید نتایج، نشان می‌دهد که این مدل‌ها کارایی لازم را برای شبیه‌سازی دمایی ندارند. حتی برخی از این پژوهش‌ها، خود به عدم کارآمدی روش‌های به‌کار گرفته شده اذعان کرده‌اند. با توجه به مطالب بیان‌شده، اهداف پژوهش پیش رو را می‌توان بررسی روابط دماهای حداقل سطح و اعماق خاک، تعیین عمق میرش دماهای شبانه‌روزی، مطالعه‌ی تغییرات و اختلاف‌های دمایی در سطوح مختلف خاک و نیز، برآورد دماهای اعماق خاک ذکر کرد.

مواد و روش‌ها

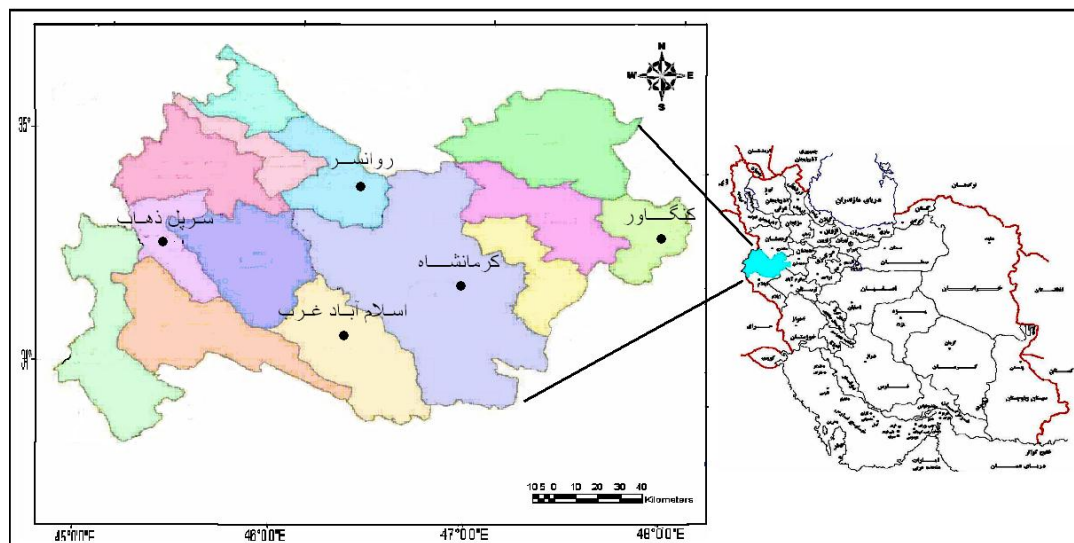
اندازه‌گیری واقعی شار گرمای زمین^۱ کار بسیار مشکلی است. اغلب روش‌های موجود، شار گرمای خاک را با اندازه‌گیری‌های دمای خاک در اعماق مختلف به انجام می‌رسانند (وانگ و براس^۲، ۱۹۹۹). از آنجا که اندازه‌گیری دما در اعماق زمین همیشه ساده نیست، بنابراین مدل‌سازی می‌تواند ابزار مناسبی برای برآورد تغییرات دماهای شبانه‌روزی و سالانه در اعماق زمین باشد. این مدل‌ها در کل شامل مدل‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی، عددی، عددی اصلاح شده، تجربی، مدل‌های مبتنی بر روش فوریه^۳ و روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی می‌شوند (درولیا و همکاران، ۲۰۰۹). از بین روش‌های فوق، نتایج شبیه‌سازی عددی توزیع گرما در زمین چندان قابل اطمینان نیست؛ چراکه تعیین دقیق خصوصیت‌های فیزیکی زمین و نحوه‌ی تأثیر عناصر اقلیمی کار مشکلی است. از این رو، استفاده از روابط نیمه‌تجربی مانند رابطه‌ای که باگز^۴ برای شرایط اقلیمی استرالیا به‌کار برده است، ارجحیت دارد (پاپیل و همکاران، ۲۰۰۱). اما استفاده از مدل‌های آماری نیز می‌تواند جایگزین سریع و مناسبی باشد (چاو و همکاران، ۲۰۱۱). با تحلیل آماری داده‌های موجود، می‌توان با داشتن برخی فراسنج‌های معین، دمای اعماق خاک را برآورد کرد (کمالی و همکاران، ۱۳۸۷).

برای مطالعه‌ی روابط دماهای سطح زمین و اعماق خاک (۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری) در استان کرمانشاه با استفاده از روش‌های آماری از آمار پنج ایستگاه سینوپتیک استان استفاده شد. مشخصه‌های ایستگاه‌ها در جدول شماره‌ی ۱ و موقعیت آنها در استان، در شکل شماره‌ی ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصه‌های جغرافیایی و آماری ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه

نام ایستگاه	مختصات جغرافیایی ایستگاه		ارتفاع (متر)	سال تأسیس	نقص آماری
	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی			
اسلام‌آباد غرب	۳۴°۰۷'	۴۶°۲۸'	۱۳۴۹	۱۹۸۷	۱۹۹۳ (۲ ماه) - ۱۹۹۶ (۱ ماه) - ۱۹۹۸ (۲ ماه) ۱۹۹۹ (۵ ماه) - ۲۰۰۲ (۳ ماه) - ۲۰۰۶ (۱ ماه)
روانسر	۳۴°۴۳'	۴۶°۳۹'	۱۳۸۰	۱۹۸۸	---
سرپل‌ذهاب	۳۴°۲۷'	۴۵°۵۲'	۵۴۵	۱۹۸۶	۱۹۹۶ (۱ ماه) - ۱۹۹۷ (۲ ماه) - ۲۰۰۳ (۳ ماه) - ۲۰۰۵ (۲ ماه)
کرمانشاه	۳۴°۲۱'	۴۷°۰۹'	۱۳۱۸	۱۹۵۱	---
کنگاور	۳۴°۳۰'	۴۷°۵۹'	۱۴۶۸	۱۹۸۷	---

1. Ground Heat Flux
2. Wang & Bras
3. Fourier technique
4. Baggis



شکل ۱. نقشه‌ی موقعیت استان کرمانشاه در ایران به همراه ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب

داده‌های روزانه‌ی دمای حداقل هوا (محفظه‌ی هواشناسی) و دمای حداقل سطح زمین و نیز داده‌های دمای خاک در اعماق ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری در ساعات ۶/۳۰ صبح و ۶/۳۰ بعدازظهر به وقت ایران، در یک دوره‌ی ۱۴ ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۳) از مرکز اطلاعات و آمار اداره‌ی کل هواشناسی استان کرمانشاه دریافت شد و نقص‌های آماری به شرح جدول شماره‌ی ۱ با استفاده از روش تفاضل‌ها بازسازی شد. شایان ذکر است با توجه به اینکه در بررسی‌های میکروکلیمایی، موقعیت هر محل از نظر ویژگی‌های فیزیکی و میکروکلیمایی با موقعیت محل دیگر متفاوت است، برای بازسازی و تخمین داده‌های مفقود در هریک از ایستگاه‌ها، از داده‌های خود آن ایستگاه استفاده شد. با توجه به اینکه دماهای حداقل سطح زمین، در یک نوبت، یعنی ساعت ۶/۳۰ صبح دیده‌بانی می‌شود، برای مطالعه‌ی رابطه‌ی دماهای سطح خاک و اعماق مختلف، به‌ناچار از داده‌های مربوط به ساعت ۶/۳۰ صبح و در بقیه‌ی موارد، از داده‌های هر دو زمان روز استفاده شد. برای آزمون همگنی داده‌ها از آزمون ناپارامتری RUNS در نرم‌افزار SPSS استفاده شد که بر آن اساس، داده‌های تمام سری‌ها در سطح ۰/۰۵ همگن بودند. برای سنجش معناداری میانگین اختلاف دماها از آزمون t با نمونه‌های وابسته استفاده شد. همچنین مشابه کاری که چاو و همکاران (۲۰۱۱) در هنگ‌کنگ انجام داده‌اند، برای برآورد دماهای اعماق خاک (۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری)، از یک مدل وایازی خطی چندگانه به شرح زیر استفاده شد:

$$T_d = a + b_1 T_s + b_2 D + b_3 N \pm e \quad (۱) \text{ رابطه‌ی } (۱)$$

که در آن، T_d : دمای حداقل عمق معین خاک بر حسب درجه‌ی سلسیوس (متغیر وابسته)، T_s : دمای حداقل سطح زمین بر حسب درجه‌ی سلسیوس؛ D : عمق مورد نظر خاک بر حسب سانتی‌متر و N : شماره‌ی روز مورد نظر در سال از اول ژانویه (در مجموع سه متغیر مستقل)؛ a ، b_1 ، b_2 و b_3 : ثوابت معادله و e : مقدار خطای برآورد معادله هستند. معادله‌های هر ایستگاه با استفاده از فایل‌هایی مشتمل بر ۱۵۳۳۰ ردیف (۱۴ سال \times ۳۶۵ روز \times ۳ عمق) به‌دست آمد. تمام محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

یافته‌های پژوهش

تحلیل دماهای حداقل سطح خاک و اعماق

با حرکت از سطح زمین به طرف اعماق خاک در ایستگاه‌ها، به دلیل انتقال منظم حرارتی، بر میانگین حداقل سالانه‌ی دما افزوده می‌شود تا اینکه در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری به حداکثر خود می‌رسد (شکل شماره ۲). سرعت این افزایش در ابتدا بالاست؛ اما همان‌گونه که از مقایسه‌ی ستون‌های شکل شماره ۲ مشخص است، به دلیل آرام‌تر شدن سرعت انتقال دما و ذخیره‌شدن گرما در اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، دماها در این دو عمق خیلی به هم نزدیک هستند. در تأیید این مطلب، آزمون t با نمونه‌های وابسته بر روی سری‌های زمانی دما انجام شد و نتیجه‌ی آزمون نشان داد که بین میانگین دماهای حداقل سالانه در اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، اختلاف معناداری وجود ندارد. علت استفاده از آزمون t با نمونه‌های وابسته، به جای آزمون t با نمونه‌های مستقل، این بود که با توجه به نمونه‌ی خروجی SPSS برای ایستگاه کرمانشاه (جدول شماره ۲)، همبستگی بین سری‌های زمانی سالانه در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، بسیار بالا ($r=0/904$) و همچنین معنادار بود ($sig=0/000$). سطح معناداری $0/530$ در این جدول به معنای عدم اختلاف معنادار دماهای حداقل سالانه‌ی این ایستگاه در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری است. در چهار ایستگاه دیگر نیز اوضاع به همین گونه بود.

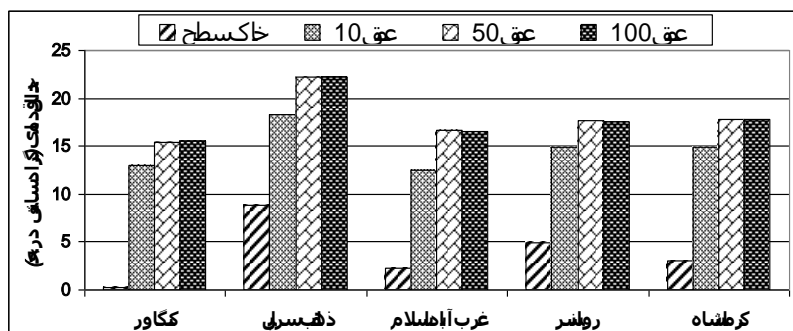
جدول ۲. نمونه‌ی خروجی SPSS مربوط به آزمون t با نمونه‌های وابسته برای میانگین‌های دماهای حداقل سالانه در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری در ایستگاه کرمانشاه

همبستگی نمونه‌های وابسته

سطح معناداری	همبستگی	تعداد	
۰/۰۰۰	۰/۹۰۴	۱۴	زوج ۱ (میانگین‌های دماهای حداقل سالانه در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری)

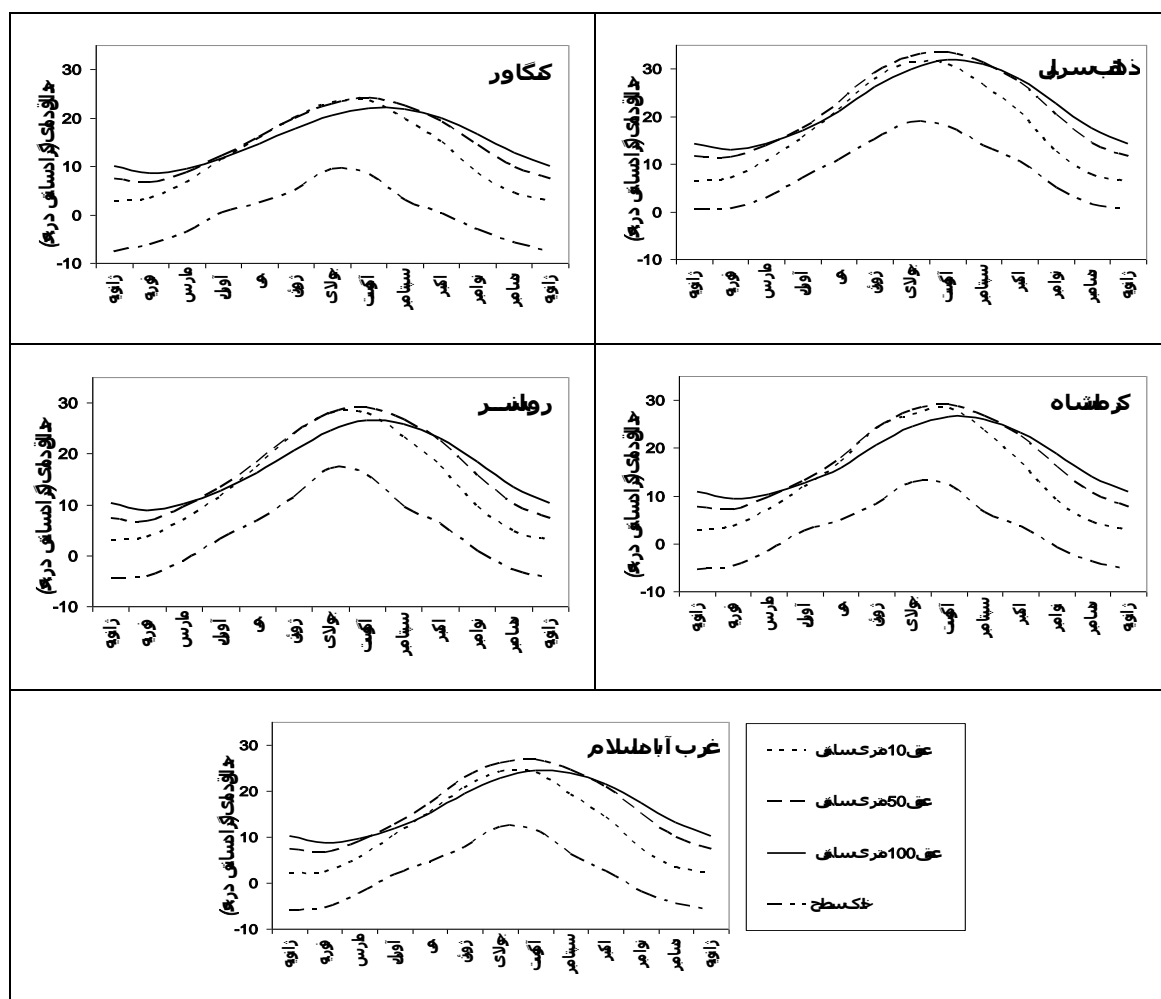
آزمون نمونه‌های وابسته

سطح معناداری (دو طرفه)	درجه‌ی آزادی	t	اختلاف‌های زوج			
			خطای معیار میانگین	انحراف معیار	میانگین	
۰/۵۳۰	۱۳	۰/۶۴۵	۰/۰۷۲۸۰	۰/۲۷۲۳۹	۰/۰۴۶۹۷	زوج ۱ (میانگین‌های دماهای حداقل سالانه در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری)



شکل ۲. نمودار میانگین دماهای حداقل سالانه‌ی سطح خاک و اعماق در ساعت ۶/۳۰ صبح برای ایستگاه‌ها (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

نظم در افزایش دما از سطح به عمق، در تمام ماه‌های سال مشاهده نمی‌شود؛ بلکه بر خلاف ماه‌ها و روزهای دوره‌ی سرد سال (شکل‌های شماره‌ی ۳ و ۴، دو طرف منحنی‌ها) که چینش منحنی‌ها منظم و دماها رو به عمق، افزایشی است، در ماه‌های دوره‌ی گرم سال (وسط منحنی‌ها)، گرمایش بیش از حد لایه‌های نزدیک به سطح زمین باعث شده است تا دماها به جای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری، در اعماق ۱۰ و ۵۰ سانتی‌متری بیشتر باشد. به همین دلیل می‌توان این‌گونه برداشت کرد که هرچه بر عمق خاک افزوده می‌شود، دامنه‌ی تغییرات سالانه‌ی دما کاهش می‌یابد. این امر از کاهش نوسان منحنی‌های عمق ۱۰۰ سانتی‌متری در شکل‌های شماره‌ی ۳ و ۴ به خوبی مشهود است. این نمودارها همچنین نشان می‌دهند که در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، طبق انتظار، بالاترین میانگین دمای حداقل سطح خاک، در ماه جولای (تیر) و پایین‌ترین آن در ماه ژانویه (دی) رخ می‌دهد. در عمق ۱۰ سانتی‌متری، این الگو دچار تغییر چندانی نمی‌شود. اما در اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، زمان وقوع پایین‌ترین و بالاترین دماهای حداقل، در حدود یک ماه به تأخیر می‌افتد؛ به طوری که پایین‌ترین دماها، در ماه فوریه و بالاترین آنها در ماه آگوست مشاهده می‌شود. مطالعه‌ی مزیدی و فلاح زاده (۱۳۹۰) در ایستگاه یزد نیز همین تأخیر تقریبی یک ماهه را بین دماهای حداقل سطح زمین و عمق ۱۰۰ سانتی‌متری به اثبات می‌رساند.

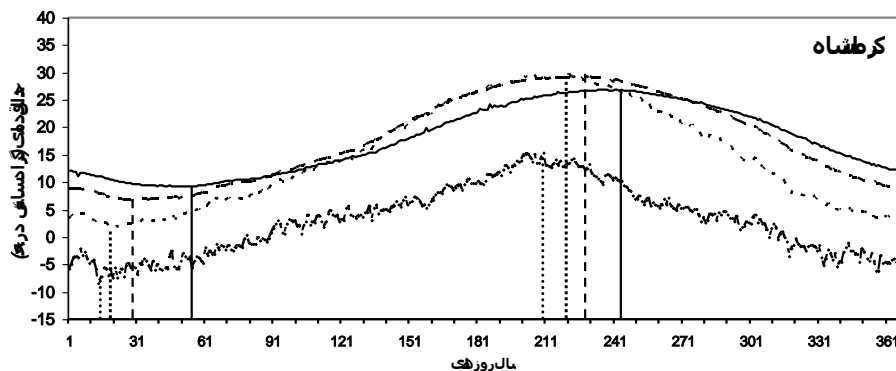
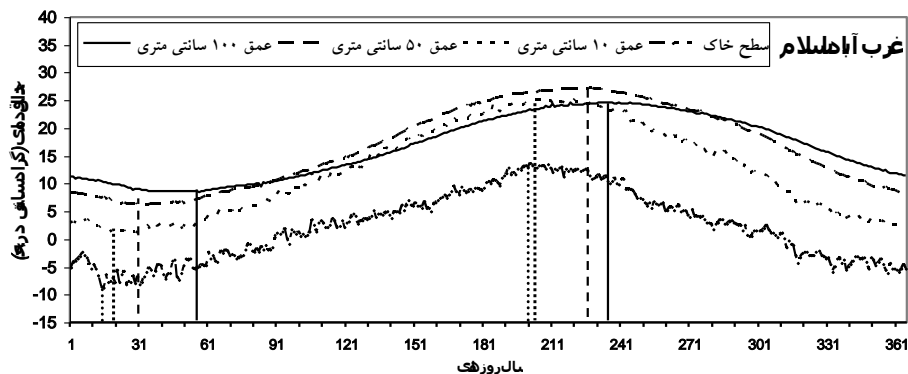


شکل ۳. نمودارهای تغییرات ماهانه‌ی حداقل خاک در ساعت ۶/۳۰ صبح در ایستگاه‌ها (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

بررسی دقیق‌تر بر روی آمار روزانه‌ی ایستگاه‌ها (جدول شماره‌ی ۳ و شکل شماره‌ی ۴)، افزون‌بر تأیید مطالب فوق، معلوم می‌دارد که در فصل زمستان، پایین‌ترین دماهای حداقل در اعماق ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری خاک، نسبت به پایین‌ترین دماهای سطح زمین، به‌طور میانگین به‌ترتیب ۳، ۱۳ و ۳۳ روز تأخیر نشان می‌دهد. درحالی‌که این تأخیر برای بالاترین دماهای حداقل در تابستان، اندکی بیشتر و به‌ترتیب در حدود ۴، ۲۲ و ۳۰ روز است (خطوط عمودی در نمودارهای نمونه‌ی شکل شماره‌ی ۴). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در کل پایین‌ترین دماها، زودتر از بالاترین دماها، به عمق معینی می‌رسند. اطلاعات دقیق‌تر در جدول شماره‌ی ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. تأخیرهای زمانی دماهای حداقل اعماق خاک نسبت به سطح زمین در ایستگاه‌ها (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

ایستگاه	پایین‌ترین دماهای حداقل (زمستان)			بالاترین دماهای حداقل (تابستان)		
	تأخیر زمانی نسبت به سطح زمین			تأخیر زمانی نسبت به سطح زمین		
	روز وقوع حداقل دما در سطح زمین	عمق ۱۰	عمق ۵۰	عمق ۱۰	عمق ۵۰	عمق ۱۰۰
کرمانشاه	۱۵ ژانویه (دی ۲۵)	روز ۵	روز ۱۴	روز ۴۰	روز ۱۱	روز ۱۸
اسلام آباد	۱۵ ژانویه (دی ۲۵)	روز ۵	روز ۱۶	روز ۴۲	روز ۲	روز ۲۶
روانسر	۲۲ ژانویه (۲ بهمن)	روز ۰	روز ۱۰	روز ۳۳	روز ۷	روز ۲۴
سرپل ذهاب	۲۲ ژانویه (۲ بهمن)	روز ۰	روز ۷	روز ۲۰	روز ۱	روز ۱۹
کنگاور	۱۵ ژانویه (دی ۲۵)	روز ۵	روز ۱۷	روز ۳۱	روز ۰	روز ۲۲
میانگین	۱۸ ژانویه (دی ۲۸)	روز ۳	روز ۱۳	روز ۳۳	روز ۴	روز ۲۲



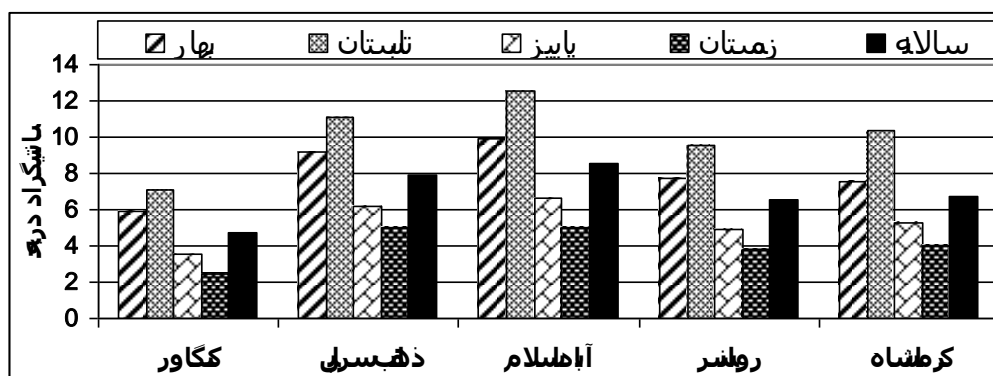
شکل ۴. نمودارهای تغییرات روزانه‌ی دماهای حداقل سطح خاک در ساعت ۶/۳۰ صبح در دو ایستگاه منتخب (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

تشابه رفتار منحنی‌های دمایی در هر پنج ایستگاه (شکل‌های شماره ۳ و ۴) نشان می‌دهد که جنس خاک، صرف‌نظر از اختلاف‌هایی که در اثر تفاوت‌های آب‌وهوایی پدید می‌آید، تأثیر چندانی در ترتیب توزیع ارتفاعی (عمقی) دما ندارد. در کل، هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه، به‌طور میانگین در هیچ روز و ماهی از سال و در هیچ عمقی، دمایی صفر و پایین‌تر از آن مشاهده نشده است که شاید این امر به‌لحاظ کاربردی حائز اهمیت باشد.

در سطح خاک و نیز در عمق ۱۰ سانتی‌متری، تغییرات سالانه‌ی میانگین دماهای حداقل بین ایستگاه‌ها (شکل شماره ۲) و تغییرات روزانه‌ی دماها در هر ایستگاه (شکل شماره ۴)، به مراتب بیشتر از اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری است. پاسخ سریع خاک و اعماق نزدیک آن به بازتابش شبانه‌ی سطح زمین و هدررفت آسان‌تر گرما از اعماق نزدیک به سطح زمین، از جمله دلایل این تغییرات زیاد به‌شمار می‌روند. در نمودارهای دمایی (شکل‌های شماره ۲ و ۳)، تفاوت بین ایستگاه سرپل‌ذهاب که دارای ارتفاع کمتر و آب‌وهوای گرم‌تر و ایستگاه کنگاور که دارای ارتفاع بیشتر و آب‌وهوای سردتر است، کاملاً مشهود است.

اختلاف شبانه‌روزی دما

با توجه به تأثیرپذیری زیاد اعماق سطحی خاک از نوسان‌های تابشی سطح زمین، به‌خصوص در روزهای گرم، بیشترین اختلاف شبانه‌روزی دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه در عمق ۱۰ سانتی‌متری (با میانگین سالانه ۶/۸۷ درجه) و در ماه‌های دوره‌ی گرم سال مشاهده می‌شود (جدول شماره ۴ و شکل شماره ۵). با حرکت به طرف اعماق، به‌سرعت از اختلاف‌ها کم می‌شود تا اینکه در عمق ۵۰ سانتی‌متری، میانگین اختلاف به ۰/۰۵ درجه‌ی سلسیوس و در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری به ۰/۰۲ درجه‌ی سلسیوس می‌رسد. از این رو می‌توان گفت که در عمق ۰/۵ متری، در عمل اختلاف شبانه‌روزی دما از بین می‌رود. در تأیید این مطلب، آزمون t با نمونه‌های وابسته که با استفاده از تمام روزهای دوره‌ی آماری، یعنی ۵۱۱۰ روز انجام شد، نشان داد که بین میانگین‌های روزانه‌ی نوسان شبانه‌روزی دما در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری اختلاف معناداری وجود ندارد (جدول شماره ۵). اختلاف‌های شبانه‌روزی در ایستگاه اسلام‌آباد غرب بیشتر از ایستگاه‌های دیگر است (شکل شماره ۵) که احتمالاً مربوط به بافت سطحی سنگین خاک (silty clay loam) است.



شکل ۵. اختلاف‌های شبانه‌روزی دما در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

جدول ۴. میانگین اختلاف‌های شبانه‌روزی دما در اعماق مختلف برحسب درجه‌ی سلسیوس (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

میانگین	کنگاور	کرمانشاه	سرپل ذهاب	روانسر	اسلام آباد	عمق	سری زمانی	فصلی
۶/۸۷	۴/۷۷	۶/۷	۷/۸۸	۶/۵۱	۸/۵۲	۱۰	سالانه	
-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۸	۵۰		
-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۲	۱۰۰		
۸/۰۵	۵/۹۳	۷/۵۳	۹/۱۸	۷/۷۴	۹/۸۷	۱۰	بهار	
-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۱۰	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۶	۵۰		
-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۱۰	-۰/۱۲	-۰/۰۸	-۰/۰۶	۱۰۰		
۱۰/۱۱	۷/۰۵	۱۰/۳۸	۱۱/۰۷	۹/۵۳	۱۲/۵۳	۱۰	تابستان	
-۰/۰۹	-۰/۰۶	-۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۰۹	-۰/۱۳	۵۰		
-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۴	-۰/۰۷	-۰/۰۶	۱۰۰		
۵/۳۱	۳/۵۷	۵/۲۹	۶/۲۱	۴/۹۲	۶/۶	۱۰	پاییز	
-۰/۱۲	-۰/۰۹	-۰/۱۱	-۰/۱۳	-۰/۱۴	-۰/۱۵	۵۰		
-۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۱۰	-۰/۱۰	-۰/۰۸	-۰/۰۷	۱۰۰		
۴/۰۵	۲/۵	۳/۹۷	۵/۰۱	۳/۷۸	۴/۹۹	۱۰	زمستان	
-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۰۳	۵۰		
-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۰۳	-۰/۰۲	۱۰۰		

جدول ۵. نمونه‌ی خروجی SPSS مربوط به آزمون t با نمونه‌های وابسته برای میانگین‌های اختلاف شبانه‌روزی دماهای حداقل روزانه در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری در ایستگاه کرمانشاه

همبستگی نمونه‌های وابسته

سطح معناداری	همبستگی	تعداد	زوج ۱ (میانگین‌های اختلاف شبانه‌روزی دماهای حداقل روزانه در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری)
-۰/۰۰۰	-۰/۱۴۰	۵۱۱۰	

آزمون نمونه‌های وابسته

سطح معناداری (دو طرفه)	درجه‌ی آزادی	t	اختلاف‌های زوج		
			خطای معیار میانگین	انحراف معیار	میانگین
-۰/۸۴۴	۵۱۰۹	-۰/۱۹۷	-۰/۰۱۳۳۰	-۰/۸۷۹۵۱	-۰/۰۰۲۴۳

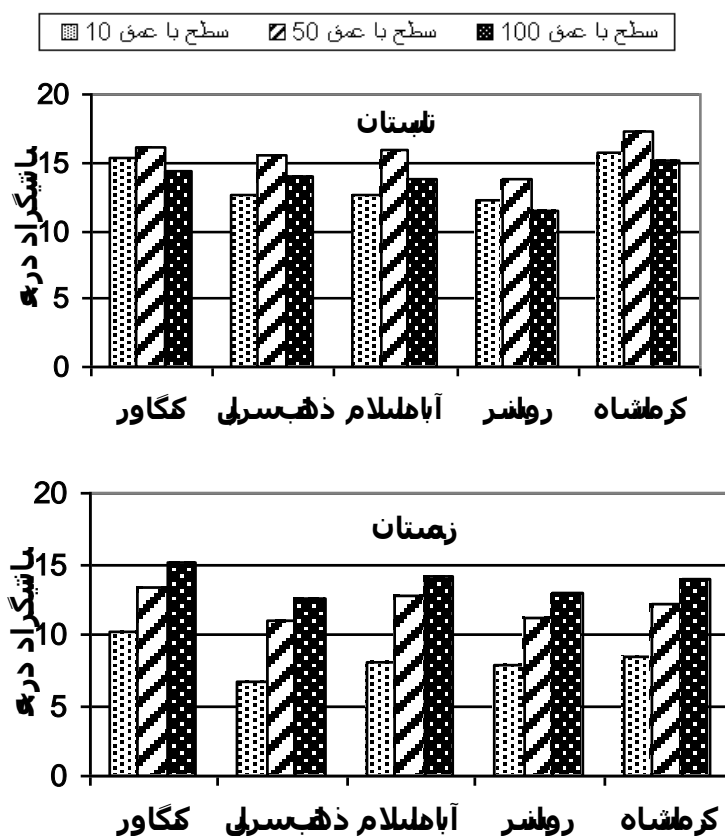
اختلاف دماهای حداقل سطح با اعماق خاک

از آنجاکه تغییرات دمای اعماق نزدیک به سطح زمین با تغییرات انرژی تابشی خورشید هماهنگی دارد، بنابراین کمترین اختلاف دما با سطح زمین، در عمق ۱۰ سانتی‌متری با میانگین ۱۰/۸ درجه‌ی سلسیوس مشاهده می‌شود. بدیهی است با حرکت به طرف اعماق پایین‌تر، بر میزان اختلاف‌ها افزوده می‌شود. به‌طور کلی اختلاف سالانه‌ی دمای سطح و عمق، تا عمق ۵۰ سانتی‌متری افزایش پیدا می‌یابد (تا حدود ۱۴/۱ درجه‌ی سلسیوس)؛ ولی از آن به بعد کمابیش به حالت ثبات درمی‌آید (جدول شماره‌ی ۶، ردیف سالانه). همچنین این اختلاف در تابستان‌ها و ماه‌های دوره‌ی گرم سال، بیشتر است

(شکل شماره ۶ و جدول شماره ۶) که دلایل آن پیش‌تر توضیح داده شد. شاید بافت سنگین‌تر خاک در ایستگاه کنگاور سبب می‌شود تا انتقال حرارتی در این ایستگاه آرام‌تر انجام گیرد و به‌اختلاف سطح و عمق افزوده شود.

جدول ۶. اختلاف دماهای حداقل سطح خاک و اعماق برحسب درجه‌ی سلسیوس (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

میانگین	کنگاور	کرمانشاه	سرپل‌ذهاب	روانسر	اسلام‌آباد	اختلاف	سری زمانی		
۱۰/۸	۱۲/۷	۱۱/۹	۹/۵	۹/۹	۱۰/۲	سطح با ۱۰	سالانه		
۱۴/۱	۱۵/۱	۱۴/۹	۱۳/۴	۱۲/۸	۱۴/۴	سطح با ۵۰			
۱۴/۱	۱۵/۲	۱۴/۸	۱۳/۴	۱۲/۷	۱۴/۳	سطح با ۱۰۰			
۱۳/۷	۱۵/۳	۱۵/۷	۱۲/۷	۱۲/۲	۱۲/۶	سطح با ۱۰	تابستان	فصلی	
۱۵/۸	۱۶/۲	۱۷/۴	۱۵/۶	۱۳/۸	۱۵/۹	سطح با ۵۰			
۱۳/۷	۱۴/۵	۱۵/۱	۱۴	۱۱/۵	۱۳/۷	سطح با ۱۰۰			
۸/۲	۱۰/۱	۸/۴	۶/۷	۷/۸	۸	سطح با ۱۰	زمستان		
۱۲	۱۳/۴	۱۲/۱	۱۱	۱۱/۲	۱۲/۳	سطح با ۵۰			
۱۳/۷	۱۵/۱	۱۴	۱۲/۵	۱۳	۱۴/۱	سطح با ۱۰۰			



شکل ۶. نمودارهای اختلاف دماهای حداقل سطح خاک و اعماق در ایستگاه‌ها در تابستان و زمستان (۲۰۰۶-۱۹۹۳)

برآورد دمای اعماق خاک

همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، برای برآورد دماهای اعماق خاک، مشابه کاری که چاو و همکاران (۲۰۱۱) در هنگ کنگ انجام داده‌اند، از یک مدل وایازی چندگانه استفاده شد. معادله‌های فصلی مربوط به این مدل برای ایستگاه‌ها در جدول شماره ۷ ذکر شده است. برای استفاده از این معادله‌ها، کافی است تا دمای سطح خاک بر حسب درجه‌ی سلسیوس (T_s)، عمق مورد نظر تا ۱۰۰ سانتی‌متری بر حسب سانتی‌متر (D) و شماره‌ی روز مورد نظر از اول ژانویه (N) به مدل وارد شود تا دمای عمق مورد نظر خاک در یک روز مشخص بر حسب درجه‌ی سلسیوس (T_d) برآورد شود. در بدو امر برای تنظیم این معادله‌ها، علاوه بر متغیرهای مستقل یادشده، از دماهای محفظه‌ی هواشناسی نیز استفاده شد؛ اما به دلیل آنکه مقادیر ضرایب همبستگی و درنهایت ضرایب تعیین مدل، پایین‌تر آمدند، از مدل حذف شدند. مقادیر ضریب همبستگی (r) تمام معادله‌ها، به‌خصوص در دو فصل بهار و پاییز، بالا و خطای معیار برآورد، به نسبت کم بود. همچنین با توجه به سطوح معناداری، تمام مدل‌ها در دو سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۵ معنادار بودند، بنابراین برای برآورد مناسب تشخیص داده شدند. معادله‌های مربوط به فصل تابستان، به دلیل آنکه ضرایب تعیین کمتر از ۰/۲۶ داشتند، از جدول حذف شدند.

جدول ۷. معادله‌های وایازی چندگانه برای برآورد دمای اعماق خاک در ایستگاه‌های استان کرمانشاه

فصل	ایستگاه	مدل وایازی $T_d = a + b_1 T_s + b_2 D + b_3 N \pm e$	r	سطح معناداری	خطای معیار برآورد SE
بهار	اسلام آباد غرب	$T_d = -3/355 + 0/135 T_s - 0/001 D + 0/14 N$	۰/۹۱۳	۰/۰۰۰	۱/۸۲
	کنگاور	$T_d = 0/139 + 0/072 T_s - 0/013 D + 0/117 N$	۰/۹۴۵	۰/۰۰۰	۱/۱۴
	کرمانشاه	$T_d = -3/706 + 0/120 T_s - 0/017 D + 0/158 N$	۰/۹۳۱	۰/۰۰۰	۱/۷۸
	روانسر	$T_d = -2/629 + 0/157 T_s - 0/013 D + 0/145 N$	۰/۹۳۱	۰/۰۰۰	۱/۷۶
	سرپل ذهاب	$T_d = -0/772 + 0/177 T_s - 0/004 D + 0/155 N$	۰/۹۴۴	۰/۰۰۰	۱/۶۶
تابستان	اسلام آباد غرب	$T_d = 54/75 + 0/154 T_s + 0/097 D - 0/144 N$	۰/۹۳۰	۰/۰۰۰	۲/۲۱
	کنگاور	$T_d = 52/656 + 0/107 T_s + 0/078 D - 0/135 N$	۰/۹۳۱	۰/۰۰۰	۱/۸۹
	کرمانشاه	$T_d = 62/914 + 0/134 T_s + 0/093 D - 0/165 N$	۰/۹۴۸	۰/۰۰۰	۱/۹۸
	روانسر	$T_d = 61/662 + 0/167 T_s + 0/084 D - 0/161 N$	۰/۹۵۶	۰/۰۰۰	۱/۷۹
	سرپل ذهاب	$T_d = 64/357 + 0/230 T_s + 0/097 D - 0/162 N$	۰/۹۴۷	۰/۰۰۰	۲/۱۴
زمستان	اسلام آباد غرب	$T_d = 3/434 + 0/168 T_s + 0/066 D + 0/015 N$	۰/۸۲۳	۰/۰۰۰	۱/۸۲
	کنگاور	$T_d = 3/599 + 0/097 T_s + 0/054 D + 0/019 N$	۰/۸۰۰	۰/۰۰۰	۱/۶۳
	کرمانشاه	$T_d = 4/016 + 0/151 T_s + 0/061 D + 0/022 N$	۰/۸۰۲	۰/۰۰۰	۱/۸۶
	روانسر	$T_d = 4/050 + 0/186 T_s + 0/057 D + 0/021 N$	۰/۸۰۴	۰/۰۰۰	۱/۷۶
	سرپل ذهاب	$T_d = 6/565 + 0/245 T_s + 0/063 D + 0/025 N$	۰/۸۲۶	۰/۰۰۰	۱/۸۱

T_d دمای عمق معین خاک، T_s دمای سطح خاک، D عمق مورد نظر به سانتی‌متر، N شماره‌ی روز مورد نظر از اول ژانویه

جدول شماره ۸ دماهای مشاهداتی و برآورد شده‌ی ایستگاه‌ها را در سه عمق منتخب برای چند روز از سال‌های مختلف نشان می‌دهد. این دماها با استفاده از معادله‌های جدول شماره ۷ محاسبه شده‌اند. مقادیر خطا در این جدول در همان حدود مقادیر خطای معیار جدول شماره ۷ (یعنی ۱ الی ۱/۵ درجه‌ی سلسیوس) است. بدیهی است با تکرار محاسبات و استخراج مقادیر خطا برای سایر موارد (در حدود ۳۷۸۰ مورد برای هر ایستگاه در هر فصل، یعنی ۹۰ روز \times ۱۴ سال \times ۳ عمق)، میانگین مقادیر خطای به دست آمده، به طور دقیق با مقادیر خطای معیار جدول شماره ۷ (انحراف معیار ۳۷۸۰ خطای یادشده) برابر خواهد شد. این مورد برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه و قطعیت آن اثبات شد.

جدول ۸. دماهای مشاهداتی و برآورد شده‌ی ایستگاه‌ها در سه عمق منتخب برای چند روز از سال‌های مختلف

ایستگاه	بهار						پاییز					
	عمق ۱۰۰		عمق ۵۰		عمق ۱۰		عمق ۱۰۰		عمق ۵۰		عمق ۱۰	
	مشاهده	برآورد	مشاهده	برآورد	مشاهده	برآورد	مشاهده	برآورد	مشاهده	برآورد	مشاهده	برآورد
اسلام آباد	روز ۱۱۶ (۲۵ آوریل) سال ۲۰۰۴						روز ۳۶۲ (۲۷ دسامبر) سال ۲۰۰۴					
	۱۲	۱۲/۹	۱۳/۲	۱۲/۹	۱۳	۱۲/۸	۱۲	۱۲/۹	۱۳	۱۲/۸	۱۱	۱۰/۸
کنگاور	روز ۱۱۲ (۲۱ آوریل) سال ۱۹۹۹						روز ۳۱۵ (۱۰ نوامبر) سال ۱۹۹۹					
	۱۳/۸	۱۳/۳	۱۳/۷	۱۲/۸	۱۳	۱۲/۲	۱۱	۱۰/۶	۱۱	۱۰/۶	۱۵/۳	۱۴/۲
کرمانشاه	روز ۱۳۰ (۹ مه) سال ۲۰۰۳						روز ۳۵۰ (۱۵ دسامبر) سال ۲۰۰۳					
	۱۴	۱۶/۴	۱۵/۵	۱۵/۷	۱۴/۳	۱۴/۹	۱۴	۱۴/۳	۱۴	۱۴/۳	۹/۴	۱۰
روانسر	روز ۱۶۵ (۱۳ ژوئن) سال ۱۹۹۶						روز ۳۲۱ (۱۶ نوامبر) سال ۱۹۹۶					
	۲۲/۸	۲۲/۶	۲۳/۱	۲۲/۱	۲۰	۲۱/۴	۲۲/۸	۲۲/۶	۲۳/۱	۲۲/۱	۱۶/۳	۱۵/۷
سرپل ذهاب	روز ۱۴۸ (۲۷ مه) سال ۲۰۰۶						روز ۳۵۰ (۱۵ دسامبر) سال ۲۰۰۶					
	۲۴/۶	۲۴/۸	۲۵/۴	۲۴/۶	۲۲/۸	۲۴/۴	۲۴/۶	۲۴/۸	۲۵/۴	۲۴/۶	۱۳	۱۶/۸

نتیجه‌گیری

دمای خاک یکی از ویژگی‌های بسیار مهم به‌شمار می‌رود که طیف وسیعی از فعالیت‌های مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات و روابط دماهای حداقل سطح خاک و اعماق ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری و همچنین ارائه‌ی مدلی برای برآورد دماهای اعماق خاک در پنج ایستگاه استان کرمانشاه است. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش ژرفای خاک، دامنه‌ی نوسان سالانه‌ی دما، به‌خصوص دامنه‌ی شبانه‌روزی دما کاهش می‌یابد تا اینکه کمابیش اختلاف شبانه‌روزی دما در عمق ۰/۵ متری از بین می‌رود. عمق میرش شبانه‌روزی دما در مطالعه‌ی پاییل و

همکاران (۲۰۰۱) در شهر پُرنان لهستان ۱ متر، در مطالعه‌ی اوگونلا (۲۰۰۳) در نیجریه ۱۲ سانتی‌متر و در مطالعه‌ی مزیدی و فلاح‌زاده (۱۳۹۰) در ایستگاه یزد، حدود ۰/۵ متر گزارش شده است. علیجانی و کاویانی (۱۳۹۱) نیز به‌طور عمومی به عمق ۰/۵ متر، به‌عنوان عمق میرش اعتقاد دارند. طبیعی است که خواص فیزیکی خاک، پوشش سطح زمین و تأثیر عناصر اقلیمی، مانند طول مدّت تابش خورشیدی، رطوبت هوا و بارش که خود تابعی از عوامل مختلف، به‌خصوص عرض جغرافیایی است، سبب سیر متفاوت دما و ایجاد اعماق متفاوت برای میرش دما می‌شود. اختلاف‌های شبانه‌روزی در تابستان بسیار بیشتر از سایر فصول است. مشابه همین مسئله، اختلاف سالانه‌ی دماهای سطح با اعماق، تا عمق ۵۰ سانتی‌متری افزایش پیدا می‌کند؛ ولی از آن به بعد کمابیش به حالت ثبات می‌رسد. بین بالاترین و پایین‌ترین دماهای حداقل سطح زمین و اعماق، از چند روز تا حدود یک ماه تأخیر وجود دارد. از آن بین اغلب پایین‌ترین دماهای حداقل، زودتر از بالاترین دماهای حداقل به عمق معینی می‌رسند.

دماها در دوره‌ی سرد سال، به‌دلیل انتقال آرام و منظم حرارتی خاک با نظم خاصی از سطح به عمق افزایش پیدا می‌کنند؛ اما در دوره‌ی گرم، به‌دلیل گرمایش بیش از حد لایه‌های نزدیک به سطح زمین، اعماق ۱۰ و ۵۰ سانتی‌متری از عمق ۱۰۰ سانتی‌متری گرم‌تر است. تشابه رفتار منحنی‌های دمایی در هر پنج ایستگاه، نشانگر آن است که جنس خاک، صرف‌نظر از اختلاف‌هایی که در اثر تفاوت‌های آب‌وهوایی پدید می‌آید، تأثیر چندانی در ترتیب توزیع ارتفاعی (عمقی) دما ندارد. همچنین تشابه تأخیر یک ماهه‌ی بین حداکثرهای دمایی سطح زمین و اعماق در این پژوهش و نیز، در پژوهش مزیدی و فلاح‌زاده (۱۳۹۰) در ایستگاه یزد، به نوعی نشان‌دهنده‌ی نقش فرعی جنس خاک در مدّت زمان تأخیر حرارتی است. در هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌طور میانگین در هیچ روز و ماهی از سال و در هیچ عمقی، دمای صفر درجه و پایین‌تر از آن مشاهده نشده است که شاید این امر به‌لحاظ کاربردی حائز اهمیت باشد.

با توجه به سختی دخالت دادن همه‌ی عوامل اثرگذار در مدل‌ها، به‌دلیل نبود آمار (جعفری و همکاران، ۱۳۸۶) و عدم کارایی لازم مدل‌های عددی در شبیه‌سازی توزیع گرما در زمین (پاپیل و همکاران، ۲۰۰۱)، استفاده از روابط نیمه‌تجربی و مدل‌های آماری، می‌تواند ابزار مناسبی برای برآورد دمای اعماق خاک باشد (چاو و همکاران، ۲۰۱۱). مدل وایازی مورد استفاده در این پژوهش، به‌عنوان ابزاری سریع و مناسب، دماهای اعماق خاک را، به‌ویژه در دو فصل بهار و پاییز با دقت خوبی برآورد کرد. در تمام مطالعات مربوط به دماهای اعماق زمین، به‌خصوص اگر کاربرد در پروژه‌ها مد نظر باشد، کسب اطلاع از وضعیت لایه‌های خاک، همچون خصوصیت‌های فیزیکی، بافت، قابلیت انتقال حرارتی، رطوبت و غیره، از ضرورت‌های اساسی به‌شمار می‌رود و هیچ مدلی اعم از ریاضی، آماری و تجربی، به‌همان صورت و بدون آنکه بر اساس شرایط محلی زینه‌بندی شود، قابل کاربرد در نقاط دیگر نیست. پیشنهاد می‌شود برای برآورد دمای اعماق خاک در مطالعات بعدی، از مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی استفاده و با نتایج پیش‌بینی‌های وایازی مقایسه شود. سنجش کارآمدی یا ناکارآمدی مدل‌های جبری، عددی و تحلیلی هم بخش دیگر پیشنهادها را شامل می‌شود.

منابع

- الیاسی، غلامحسین. ۱۳۸۲. بررسی روابط بین رژیم دمایی اعماق و سطح خاک با دمای هوای داخل پناهگاه، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، استاد راهنما: علی خلیلی، گروه آبیاری، دانشگاه تهران.
- بهیار، محمد باقر و کمالی غلامعلی. ۱۳۸۶. رابطه‌ی دمای هوا با دمای سطح و اعماق مختلف خاک، فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، شماره‌ی ۸۶، صص. ۱۰۲-۸۱.
- جعفری گلستان، محسن؛ رائینی سرجاز، محمود و ضیاء تبار احمدی، میرخالق. ۱۳۸۶. برآورد دمای ژرفای خاک با بهره‌گیری از روش تجزیه‌ی منحنی و همبستگی‌های رگرسیونی برای شهرستان ساری، مجله‌ی علوم کشاورزی و منابع طبیعی، سال چهاردهم، شماره‌ی ۶۱ صص. ۱۲۲-۱۱۲.
- سبزی پرور، علی اکبر؛ طبری، حسین و آیینی، علی. ۱۳۸۹. برآورد میانگین روزانه‌ی دمای خاک در چند نمونه‌ی اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های هواشناسی، فصلنامه‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال چهاردهم، شماره‌ی ۵۲، صص. ۱۳۸-۱۲۵.
- علیجانی، بهلول. ۱۳۹۱. مبانی آب و هواشناسی، چاپ هفدهم، انتشارات سمت، تهران.
- کاویانی، محمدرضا. ۱۳۸۹. میکروکلیماتولوژی، چاپ چهارم، انتشارات سمت، تهران.
- کمالی، غلامعلی؛ حجام، سهراب؛ رنجبر، سعید؛ هدایتی دزفولی، اکرم؛ کمالی، مریم و بهیار، محمد باقر. ۱۳۸۷. بررسی رابطه‌ی دمای پناهگاه هواشناسی بادمای عمق خاک در سطوح مختلف رطوبتی (مطالعه‌ی موردی: زرقان فارس)، فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، سال بیست و سوم، شماره‌ی ۹۰، صص. ۱۲۶-۱۰۹.
- مزیدی، احمد و فلاح زاده، فاطمه. ۱۳۹۰. روند دمای سالانه‌ی خاک در ایستگاه یزد، جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۲۴، صص. ۵۰-۳۹.
- نجفی مود، محمد حسین؛ علیزاده، امین؛ محمدیان، آزاده و موسوی، جواد. ۱۳۸۷. بررسی رابطه‌ی دمای هوا و دمای اعماق مختلف خاک و برآورد عمق یخبندان (مطالعه‌ی موردی: استان خراسان رضوی)، آب و خاک، جلد ۲۲، شماره‌ی ۲، صص. ۴۶۵-۴۵۶.
- Alijani, B., Kavyani, M. R., 2012, **the Foundations of Climatology**, 17th Edn., Samt Publication, Tehran.
- Behyar, M. B., Kamali, G. A., 2007, **the Relationship between Air Temperature and Surface and Various Soil Depth Temperatures**, Geographical Researches Quarterly, No. 86, PP. 81-102.
- Beltrami, H., 2001, **on the Relationship between Ground Temperature Histories and Meteorological Records: A Report on the Pomquet Station**, Global and Planetary Change, No. 29, PP. 327-348.
- Beltrami, H., Kellman, L., 2003, **An Examination of Short- and Long-Term Air-Ground Temperature Coupling**, Global and Planetary Change, No. 38, PP. 291-303.
- Bier, R. A., 2011, **Vertical Temperature Profile in Ground Heat Exchanger During in-situ Test**, Renewable Energy, No. 36, PP. 1578-1587.
- Chow, T. T., Long, H., Mok, H. Y., Li, K. W., 2011, **Estimation of Soil Temperature Profile in Hong Kong from Climatic Variables**, Energy and Buildings, No. 43, PP. 3568-3575.

- Droulia, L., Lykoudis, S., Tsiros, I., Alvertos, N., Akylas, E., Garofalakis, I., 2009, **Ground Temperature Estimations Using Simplified Analytical and Semi-Empirical Approaches**, Solar Energy, No. 83, PP. 211–219.
- Elyasi, G. H., 2003, **Study of Relationships between Soil Surface and Depths' Thermal Regimes with Screen Temperatures**, M. Sc. Thesis, Supervisor: Khalili, A., Irrigation Engineering Dep., University of Tehran.
- Gao, Z., Bian, L., Hu, Y., Wang, L., Fan, J., 2007, **Determination of Soil Temperature in An Arid Region**, Journal of Arid Environments, No. 71, PP. 157–168.
- Hariharan, G., Kannan, K., Sharma, K., 2009, **Haar Wavelet in Estimating Depth Profile of Soil Temperature**, Applied Mathematics and Computation, No. 210, PP. 119-125.
- Harris, R. N., 2007, **Variations in Air and Ground Temperature and the POM-SAT Model: Result from the Northern Hemisphere**, Climate of the Past, No. 3, PP. 611- 621.
- Jaffari Golestan, M., Raeini-Sarjaz, M., Ahmadi, M. Z., 2007, **Estimation of Soil Depth Temperatures Using Curve Analysis and Regression Models for City of Sari (Iran)**, J. Agric. Sci. Natur. Resour., Vol. 14, No. 61, PP. 112-122.
- Kamali, G. A., Hajjam, S., Ranjbar, S., Hedayati Dezfooli, A., Kamali, M., Behyar M. B., 2008, **The Relationship between Meteorological Screen Temperatures and Soil Depth Temperatures in Various Humidity levels (Case Study: Zarghan of Fars Province)**, Geographical Researches Quarterly, No. 90, PP. 109-126.
- Kaviani, M. R., 2010, **Microclimatology**, 4th Edition, Samt Press, Tehran.
- Mazidi, A., Fallah Zadeh, F., 2011, **Study the Process of Annual Soil Temperature in Yazd Station**, Geography and Development, No. 24, PP. 39-50.
- Najafi-Mood, M. H., Alizadeh, A., Mohamadian, A., Mousavi, J., 2009, **Investigation of Relationship between Air and Soil Temperature at Different Depths and Estimation of the Freezing Depth (Case Study: Khorasan Razavi)**, Journal of Water and Soil, Vol. 22, No. 2, PP. 456-465.
- Ogunlela, A. O., 2003, **Modeling Soil Temperature Variations**, Journal of Agricultural Research and Development, No. 2, PP. 100-109.
- Plauborg, F., 2002, **Simple Model for 10 cm Soil Temperature in Different Soils with Short Grass**, European Journal of Agronomy, No. 17, PP. 173- 179.
- Pokladnikova, H., Roznovsky, J., Streda, T., 2008, **Evaluation of Soil Temperatures at Agroclimatological Station Pohorelice**, Soil & Water Res., No. 4, PP. 223- 230.
- Popiel, C.O., Wojtkowiak, J., Biernacka, B., 2001, **Measurement of Temperature Distribution in Ground**, Experimental Thermal and Fluid Science, No. 25, PP. 301-309.
- Qin, Y., Hiller, J. E., 2011, **Impacts of Diurnal Temperature Cycles on the Geothermal Regime on Qinghai-Tibet Plateau**, Cold Regions Science and Technology, No. 65, PP. 429-436.
- Sabziparvar, A. A., Tabari, H., Aeini, A., 2010, **Estimation of Mean Daily Soil Temperature by Means of Meteorological Data in Some Selected Climates of Iran**, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science, Vol. 14, No. 52, PP. 125-138.

Tiba, C. H., Raquel, G., 2006, **Numerical Procedure for Estimating Temperature in Solarized Soils**, Resq. Agropec. Bras, No. 3, PP. 533 - 537.

Wang, J., Bras, R.L., 1999, **Ground Heat Flux Estimated from Surface Soil Temperature**, Journal of Hydrology, No. 216, PP. 214-226.

*Assessing the Relationship between Ground and Soil Temperature at
Different Depths: A Case Study of Kermanshah Province*

Mojarrad F.*

Assistant Prof., Dept. of Geography, Razi University, Kermanshah, Iran

Sadeghi H.

M.Sc. in Climatology, Dep. of Geography, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 02/09/2012

Accepted: 17/02/2013

Extended Abstract

Introduction

The study of soil temperatures at different depths is significant from various perspectives, including meteorology, climatology, agriculture, industry, and other related bio - activities.

Vertical distribution of temperature in soil depends upon three factors, namely:

- 1) the structure and physical characteristics of soil and its thermal properties;
- 2) land cover (bare, grass, snow, etc.);
- 3) the effect of climatologic factors including temperature, precipitation, wind, solar radiation, and humidity.

This paper reports the results of a statistical study on the relationship between ground and soil temperature at different depths (10, 50, and 100 cm) in five synoptic stations in Kermanshah province.

Methodology

Exact measurement of ground heat flux is a formidable task. Most techniques measure the ground heat flux by measuring the soil temperature at different depths. Given the difficulty of such measurements, it seems that developing the statistical modeling's could be useful. Data were collected for daily minimum air temperatures (meteorological screen) and daily minimum ground temperatures, in addition to soil temperatures at 10, 50, and 100 cm depths at 6:30 am

*E-mail: f_mojarrad@yahoo.com

and 6:30 pm local time within a 14-years period (1993 to 2006), adopted from the Kermanshah Regional Meteorological Office. The data were then used to study the relationship between the ground and soil temperature at different depths. The paired-samples t-test was employed to analyze the data. In addition, a multivariate regression model was employed to estimate temperatures at various soil depths (10, 50, 100 cm) based upon variables including ground temperature, Julian day, and depth.

Results and Discussion

As we go down the soil profile in the stations, the mean annual minimum temperature increases and reaches its peak at a depth of 100 cm, mainly due to regular thermal conduction. However, during the warm periods of the year, temperatures are higher at depths of 10 and 50 cm compared to the other depths, due to extra heating of layers close to the surface. The mean minimum temperatures are very similar at 50 and 100 cm depths. The paired-samples t-test indicated no statistically significant difference between the mean minimum annual temperatures at these two depths. Increase in the depth of the soil leads to a lesser annual temperature range, specifically the diurnal temperature range. The diurnal range almost disappears at the depth of 50 cm. It was also found that the diurnal temperature range at each depth was at its maximum during the summer. The annual temperature difference between ground and various depths increases up to 50 cm, but it levels at lower depths. The paired-samples t-test showed no significant difference between diurnal temperature ranges at 50 and 100 cm.

The similar behavior of temperature curves at different depths indicates that soil type does not have a significant role in distribution of temperature at various soil depths, regardless of climatic differences. In winter, the lowest minimum temperatures at 10, 50, and 100 cm depths, were delayed for 3, 13, and 33 days respectively compared with the lowest temperatures of the ground. This delay for the highest minimum temperatures was a few days longer in the summer

Conclusion

Soil temperature is an important feature that affects various activities. The results of the present study indicate that temperature irregularities are more frequent at ground, with such irregularities decreasing at lower depths. The similarity of results of the present study with previous researches regarding the one month delay of ground and soil depth temperatures indicates that soil type play a secondary role in thermal delay.

Given the difficulty of including various influencing factors in the models due to lack of sufficient data on the one hand, and relative inefficiency of numerical models in simulation of thermal distribution in soil on the other hand, it seems that employing empirical, semi – empirical and statistical models are useful measures to estimate temperatures at various soil depths. The multivariate regression model used in the present study efficiently estimated soil depth temperatures, specifically during spring and autumn. It should be noted that in all studies on the estimation of temperatures at various soil depths, it would be necessary to have a good understanding of soil layers properties, including physical characteristics, structure, thermal

conductivity, etc. It should further be understood that no mathematical, statistical or empirical model can be used in different locations unless calibrated according to local conditions. We suggest that empirical, semi-empirical, deterministic and analytic models be employed to estimate soil depth temperatures, and the results be then compared with regression forecasting.

It could then be concluded that lowest temperatures reach more quickly than highest temperatures to a certain depth. The temperatures of various soil depths were estimated by employing a multivariate regression model with good accuracy at the stations for spring, autumn, and winter.

Keywords: Temperature, Soil Depth, Diurnal Range, Kermanshah Province.