

برآورد میانگین روزانه دمای خاک در چند نمونه اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های هواشناسی

علی اکبر سبزی پرور*، حسین طبری و علی آیینی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۱/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۱۲)

چکیده

دمای خاک یکی از متغیرهای مهم در مطالعات هیدرولوژی، هواشناسی کشاورزی و اقلیم‌شناسی می‌باشد. با توجه به این که دمای خاک فقط در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور اندازه‌گیری می‌گردد، کمبود آن در نقاط فاقد ایستگاه یکی از چالش‌های بزرگ در بسیاری از مطالعات مرتبط با علوم کشاورزی است. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های یک دوره ۱۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۹۶) دمای هوا، تابش خورشیدی، بارندگی، رطوبت نسبی هوا، فشار بخار آب، سرعت باد و فشار هوا در هشت ایستگاه منتخب هواشناسی (ساری، رشت، تبریز، ارومیه، اصفهان، شیراز، زاهدان و یزد)، روابط تجربی جهت تخمین دمای روزانه خاک در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری برای چهار اقلیم متفاوت، پیشنهاد شده است. روابط تجربی با استفاده از رگرسیون‌های چند متغیره بین دمای خاک به‌عنوان متغیر وابسته و بقیه متغیرهای روزانه هواشناسی (به‌عنوان متغیرهای مستقل) استخراج و بر حسب معیارهای آماری دسته‌بندی شدند. نتایج تحقیق نشان داد که روابط پیشنهادی در سطح معنی‌داری جهت تخمین دمای خاک در عمق‌ها و اقلیم‌های مورد نظر قابل اعتماد می‌باشند (برای لایه‌های سطحی خاک با $R^2 > 0/94$ و برای لایه‌های عمیق با $R^2 > 0/69$). هم‌چنین نشان داده شد که اهمیت تأثیر متغیرهای هواشناسی بر دمای خاک در اقلیم‌های مختلف، یکسان نمی‌باشد. از بین متغیرهای مورد مطالعه، میانگین روزانه دمای هوا در هر چهار اقلیم، بیشترین هم‌بستگی معنی‌دار را با دمای خاک نشان داد (به طور متوسط با $R^2 > 0/91$ برای اقلیم گرم نیمه خشک، الی $R^2 > 0/85$ برای اقلیم مرطوب). نتایج هم‌چنین نشان داد که با افزایش عمق خاک، ضرایب تعیین به طور قابل ملاحظه (تا حد ۳۶ درصد) کاهش می‌یابند. در این تحقیق رفتار آماره‌های اعتبار سنجی روابط پیشنهادی در عمق‌های مختلف و در هر یک از اقلیم‌های مورد مطالعه نیز بحث می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: دمای خاک، متغیرهای هواشناسی، هم‌بستگی‌های خطی چند متغیره

مقدمه

خاک، جذب عناصر مهم مانند فسفر و پتاسیم و دیگر فعالیت‌های بیولوژیکی درون خاک تأثیر بسزایی دارد (۱۴). دمای خاک در عمق‌های مختلف، دارای رفتار زمانی و مکانی متفاوتی می‌باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته، جریان

دمای خاک یکی از متغیرهای مهم در مطالعات هیدرولوژی، هواشناسی کشاورزی و اقلیم‌شناسی می‌باشد (۱۰). از سوی دیگر، رفتار حرارت در خاک بر فعالیت میکرو ارگانیسم‌ها در

۱. به ترتیب دانشیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: swsabzi@basu.ac.ir

(۱۲) در یک منطقه نیمه‌خشک در هند، جهت برآورد دمای خاک از شبکه عصبی مصنوعی (Artificial neural network: ANN) استفاده نمود. او در تحقیق خود دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد را به‌عنوان متغیرهای ورودی و دمای خاک در صبح و بعد از ظهر را به عنوان متغیرهای خروجی به کار برد. پلابوگ (۱۶) مطالعه‌ای را جهت ارائه روابط ساده و تجربی برای برآورد دمای خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متری در دانمارک انجام داد. میهالاکاکو (۱۵) در آتن و دوبلین، برای برآورد تغییرات دمای خاک از تابع تشخیص (Deterministic function) و شبکه عصبی مصنوعی با دمای هوا، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی به‌عنوان متغیرهای ورودی استفاده نمود. ورونز و همکاران (۱۸) در یک منطقه شهری در برزیل، با استفاده از طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع و به کارگیری شبکه عصبی مصنوعی دمای سطحی خاک (Soil surface temperature: SST) را برآورد نمودند.

متأسفانه، علی‌رغم اهمیت دسترسی به داده‌های دمای خاک، تاکنون مطالعات اندکی در خصوص برآورد دمای خاک در کشور صورت گرفته است. ابراهیمی (۱) با استفاده از روش‌های آماری به مطالعه دمای خاک در اعماق مختلف در تهران و همدان پرداخت. مهدویان (۸) جهت پیش‌بینی دمای خاک در منطقه کرج از شبکه عصبی مصنوعی و روابط تجربی برانت استفاده نمود. دانش کار آراسته و همکاران (۵) نیز با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA، اقدام به تخمین دمای سطح خاک در سیستان نمودند. در تحقیق دیگری، رحیمی خوب و همکاران (۶) با به کارگیری تصاویر ماهواره NOAA، دمای سطح خاک را در حوضه آبریز دریاچه ارومیه برآورد نمودند. جعفری گلستانی و همکاران (۳) با استفاده از روابط رگرسیونی، معادلات تجربی را جهت تخمین دمای خاک شهر ساری در عمق‌های ۷ و ۲۰ سانتی متری پیشنهاد نمودند. بهیار و کمالی (۲) رابطه دمای هوا و دمای خاک را در اعماق مختلف در منطقه بروجن مورد ارزیابی قرار دادند. نجفی مود و همکاران (۹) به‌منظور برآورد عمق یخبندان خاک و ارایه یک رابطه ساده

حرارتی درون خاک متأثر از متغیرهای مختلفی نظیر: دمای هوا، تابش خورشیدی، سرعت باد، فصل و خصوصیات فیزیکی خاک است. به‌همین دلیل، برآورد دمای خاک به ویژه در نزدیکی سطح زمین که نوسانات آن بیشتر است، تا حدودی مشکل می‌باشد (۱۵).

اندازه‌گیری دمای خاک در ایستگاه‌های سینوپتیک با انواع مختلف حسگر (Sensor) و یا دماسنج‌های معمولی صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری دمای خاک با حسگر هزینه‌بر بوده و به نیروی انسانی و ماهر و پایش مداوم نیاز دارد. برای تعیین تغییرات مکانی دمای خاک در اعماق مختلف، چندین حسگر و یا دماسنج مختلف مورد نیاز است. بنابراین، ارائه روش‌های آماری و تجربی که قادر به ارائه نتایج قابل قبول در برآورد دمای خاک باشد، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای برآورد این متغیر در نقاط فاقد اندازه‌گیری باشد (۱۶).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه برآورد دمای خاک صورت گرفته است. گومان و لال (۱۱) دمای خاک منطقه استوا را با استفاده از تحلیل فوریه (Fourier analysis) مورد ارزیابی قرار داده و نتایج آن را با دمای مشاهده‌ای مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از دقت بالای آنالیز فوریه در این زمینه می‌باشد. ژنگ و همکاران (۱۹) با استفاده از دمای هوا و بکارگیری رگرسیون خطی، دمای خاک را در عمق ۱۰ سانتی‌متری در ۶ نمونه اقلیمی در آمریکا برآورد نمودند. اوزووچ و والزاک (۱۷) یک مدل ریاضی جریان حرارتی در خاک را برای پیش‌بینی دمای خاک ارائه دادند. این مدل شامل معادله و مدل فیزیکی-آماری برای ارزیابی خصوصیات گرمایی به‌عنوان تابعی از رطوبت و چگالی حجمی بود، که از مدل تفاضل‌های محدود (Finite differences) برای حل معادله انتقال حرارت استفاده می‌نمود. نتایج آنها نشان داد که مقادیر برآورد شده دمای خاک توسط مدل ارائه شده، از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. هیوزینکولد و همکاران (۱۳) با استفاده از آنالیز هارمونیک و بررسی هدایت گرمایی خاک، دمای خاک را در یک خاک شنی در منطقه‌ای بیابانی در شمال اسرائیل برآورد نمودند. جورج

وابسته در دوره اقلیمی ده ساله ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ میلادی که از مرکز اطلاعات و آمار سازمان هواشناسی کشور اخذ شده است، مورد تحلیل قرار گرفتند. داده‌های دمای خاک در ۶ عمق (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری) و در سه زمان در طول روز (ساعت ۶:۳۰ صبح، ۱۲:۳۰ بعدازظهر و ۱۸:۳۰ بعدازظهر) به وقت استاندارد ایران) در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌گردد که میانگین این سه مقدار به عنوان میانگین روزانه مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که تعداد کل روزهای مورد مطالعه در دوره اقلیمی مذکور جهت ارزیابی داده‌های هواشناسی و دمای خاک جمعاً ۳۶۵۳ روز (تعداد روزهای ۱۰ سال) می باشد. در جدول ۲، میانگین دمای خاک اندازه‌گیری شده در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری در ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است.

روش تحقیق

با توجه به این که متغیرهای هواشناسی بسیاری بر دمای خاک در اقلیم‌های مختلف، تأثیر گذارند، در این تحقیق، ابتدا هم‌بستگی بین متغیرهای هواشناسی و دمای خاک در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری بر اساس ضریب تعیین (رابطه ۱) در چهار اقلیم مورد مطالعه تعیین شد. سپس با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره تحت نرم افزار SPSS روابط تجربی برای هر اقلیم و هم‌چنین هر عمق به صورت جداگانه ارائه شد. جهت تعیین هم‌بستگی بین دمای خاک و دیگر متغیرهای هواشناسی، معادله هم‌بستگی خطی چند متغیره زیر بین متغیر وابسته (Y) و متغیرهای مستقل جوی (X) در نظر گرفته شد:

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n \quad [1]$$

که در آن Y متغیر پیش‌بینی شونده، x_1, x_2, x_3, x_n متغیرهای پیش‌بینی کننده و a_1, a_2, a_3, a_4 ضرایب ثابت هم‌بستگی اند. برای ارزیابی دقت روابط تجربی ارائه شده، مقادیر میانگین روزانه دمای خاک برآورد شده با هر یک از روابط با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. اعتبار سنجی روابط تجربی

بین درجه حرارت هوا و دمای خاک و اعماق مختلف آن، مطالعه‌ای را در شهرستان‌های استان خراسان رضوی انجام دادند. در تحقیق دیگری، چایچی و همکاران (۴) با بکارگیری تصاویر ماهواره NOAA، دمای سطح خاک را در مقیاس ماهانه در استان تهران برآورد نمودند.

با توجه به این که دمای خاک فقط در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور اندازه‌گیری می‌گردد و در پاره ای از موارد نیز دارای خلأهای آماری است، تعیین آن در نقاط فاقد ایستگاه در بسیاری از مطالعات از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق، بر اساس داده‌های روزانه موجود در ایستگاه‌های ساری، رشت، تبریز، ارومیه، اصفهان، شیراز، زاهدان و یزد (۷)، در یک دوره ده ساله، (۲۰۰۵-۱۹۹۶)، روابط تجربی جهت برآورد دمای روزانه خاک در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری برای چهار اقلیم گرم و خشک (Warm Arid) : گرم و نیمه‌خشک (WA : Warm Semi-Arid)، سرد نیمه‌خشک (CSA : Cold Semi-Arid) و مرطوب (H : Humid) در هشت ایستگاه کشور ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

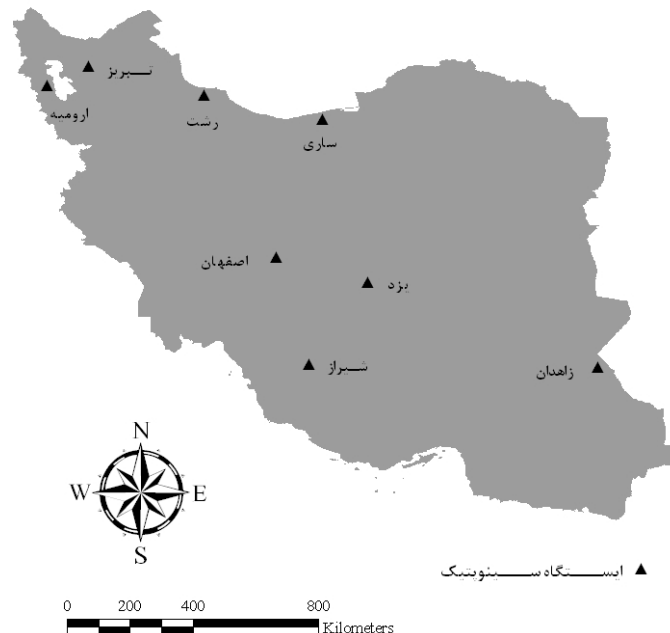
منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

در تحقیق حاضر، دمای خاک در چهار اقلیم متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که دو ایستگاه سینوپتیک تبریز و ارومیه به‌عنوان نماینده اقلیم سرد نیمه‌خشک، ایستگاه‌های اصفهان و شیراز به‌عنوان اقلیم گرم و نیمه‌خشک، ایستگاه‌های یزد و زاهدان به‌عنوان اقلیم گرم و خشک و ایستگاه‌های ساری و رشت تحت اقلیم مرطوب (با استفاده از طبقه‌بندی اقلیمی کوپن)، مورد مطالعه قرار گرفتند (جدول ۱). موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. در این تحقیق، داده‌های روزانه دمای هوا (T_{avg})، رطوبت نسبی (RH)، فشار هوا (P)، فشار بخار آب (e_a)، تابش خورشیدی (R_s)، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (U_{10}) و بارندگی (R) به عنوان متغیرهای مستقل، و دمای خاک (T_{soil}) به عنوان متغیر

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و میانگین‌های سالانه اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	U_{10} (m.s ⁻¹)	e_a (kpa)	P (kpa)	RH (%)	R (mm year ⁻¹)	R_s (Mj/m ²)	T (°C)	ارتفاع از سطح دریا (m)	عرض جغرافیایی (N)	طول جغرافیایی (E)	نوع اقلیم (Köppen)
ساری	۱/۹۲	۱/۶	۱۰۱/۴	۷۸	۷۹۳/۱	۱۶/۲۳	۱۷/۹	۲۳	۳۶-۳۳	۵۳-۰۰	مرطوب
رشت	۱/۰۹	۱/۶	۱۰۱/۴	۸۳	۱۳۱۸/۲	۱۶/۶۲	۱۶/۶	۳۷	۳۷-۱۲	۳۹-۴۹	مرطوب
تبریز	۳/۴۵	۰/۷۴	۸۶/۴	۵۰	۲۸۸/۹	۱۲/۶۸	۱۳/۷	۱۳۶۱	۳۸-۰۵	۴۶-۱۷	سرد نیمه‌خشک
ارومیه	۲/۰۱	۰/۸	۸۶/۷	۵۸	۲۴۹/۶	۱۳/۳۴	۱۲	۱۳۱۶	۳۷-۳۲	۴۵-۰۵	سرد نیمه‌خشک
اصفهان	۱/۵۶	۰/۶	۸۴/۴	۳۶	۱۲۲/۸	۱۶/۸۰	۱۶/۸	۱۵۵۰	۳۲-۳۷	۵۱-۴۰	گرم نیمه‌خشک
شیراز	۲/۱۷	۰/۷۲	۸۵/۱۱	۳۸	۳۴۶/۱	۱۸/۲۶	۱۸/۹	۱۴۸۴	۲۹-۳۲	۵۲-۴۶	گرم نیمه‌خشک
یزد	۲/۹۲	۰/۵۶	۸۷/۷۰	۲۸	۶۰/۸	۲۲/۱۶	۲۰/۲	۱۲۳۷	۳۱-۵۴	۵۴-۱۷	گرم خشک
زاهدان	۳/۳۴	۰/۵۵	۸۶/۲۲	۲۸	۹۰/۶	۲۱/۰۳	۱۹/۲	۱۳۷۰	۲۹-۲۸	۶۰-۵۴	گرم خشک

T: دمای هوا، R_s : تابش خورشیدی، R: بارندگی، RH: رطوبت نسبی، P: فشار هوا، e_a : فشار بخار هوا و U_{10} : سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad [3]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad [4]$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad [5]$$

به‌دست آمده، با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین انحراف خطا (MBE) انجام گرفت (روابط ۲ الی ۵).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad [2]$$

جدول ۲. میانگین روزانه دمای اعماق خاک (°C) در ایستگاه‌های مطالعاتی در دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۶

عمق خاک (سانتی متر)						
۱۰۰	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰	۵	
۲۰/۳۷	۲۰/۱۶	۲۰	۱۹/۷۴	۲۰/۰۳	۲۰/۰۶	ساری
۱۸/۱۷	۱۷/۹۵	۱۷	۱۷/۵۴	۱۸/۰۶	۱۷/۷۱	رشت
۱۶/۵۲	۱۵/۴۹	۱۵	۱۵/۲۰	۱۵/۶۹	۱۶/۰۲	تبریز
۱۵/۲۲	۱۵/۰۶	۱۴	۱۴/۵۱	۱۴/۹۳	۱۵/۱۱	ارومیه
۲۱/۰۹	۲۰/۷۱	۲۰	۱۹/۷۱	۲۰/۳۲	۲۰/۵۱	اصفهان
۲۳/۲۳	۲۲/۴۷	۲۱	۲۱/۱۱	۲۱/۳۷	۲۱/۳۹	شیراز
۲۵/۵۱	۲۵/۰۳	۲۴	۲۴/۰۴	۲۴/۵۱	۲۴/۵۱	یزد
۲۴/۷۲	۲۴/۰۳	۲۳	۲۳/۲۴	۲۳/۷۲	۲۳/۴۰	زاهدان

تأخیر یک ماهه بین زمان وقوع بیشینه دمای خاک در اقلیم خشک و اقلیم مرطوب را می‌توان به رطوبت بیشتر موجود در جو و در خاک در اقلیم مرطوب نسبت داد. حضور بخار آب بیشتر، سرعت انتقال و توزیع انرژی حرارتی را در خاک کند می‌نماید. بیشینه دمای خاک در تحقیق بهیار و کمالی (۲) در منطقه بروجن، در نیمه دوم مرداد به دست آمد. در اقلیم گرم و خشک، حداکثر مقدار دمای ماهانه خاک در همه اعماق به‌غیر از عمق ۱۰۰ سانتی‌متری در ماه جولای (تیر) به‌وقوع پیوسته است. حداقل مقدار دمای ماهانه خاک در این اقلیم در همه اعماق به‌غیر از عمق ۱۰۰ سانتی‌متری در ماه ژانویه (دی) و در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری با یک ماه تأخیر در ماه فوریه (بهمن) می‌باشد. بهیار و کمالی (۲) در تحقیق خود نتیجه گرفتند که دمای بیشینه در اعماق پایین‌تر با تأخیر زمانی رخ می‌دهد. مقایسه مقادیر ماهانه دمای خاک در چهار اقلیم مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر دمای خاک به‌ترتیب در اقلیم‌های گرم و خشک، گرم و نیمه‌خشک و کمترین مقدار به‌ترتیب در اقلیم‌های سرد نیمه‌خشک و مرطوب می‌باشد.

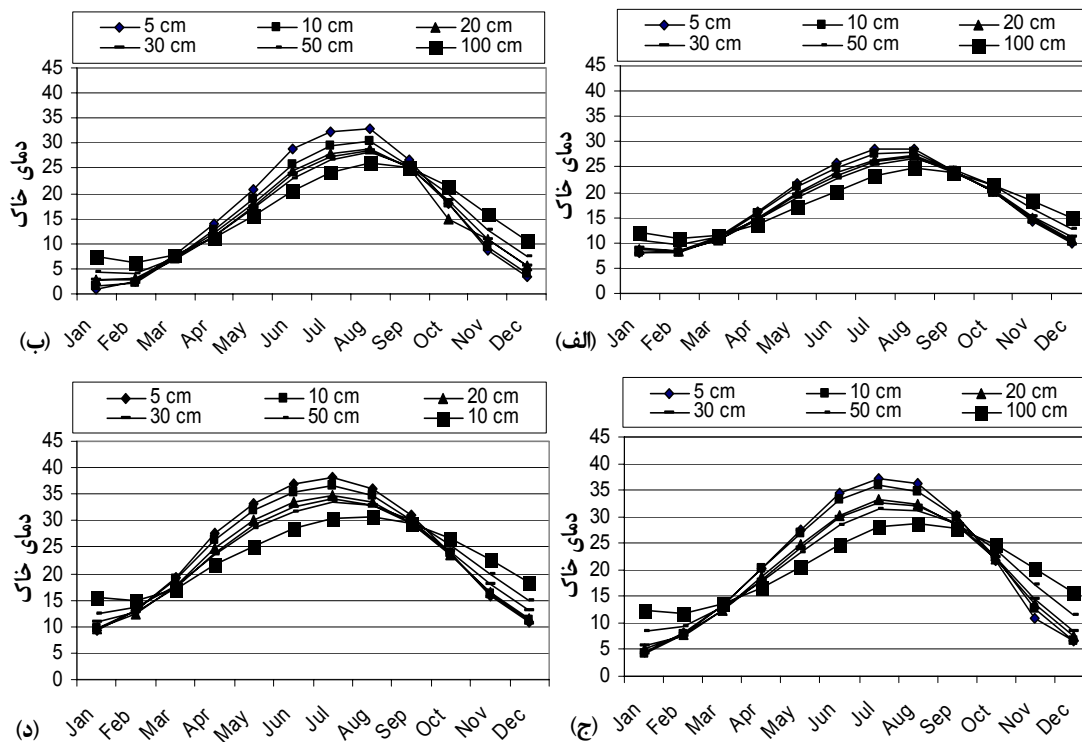
در شکل ۳، تغییرات سالانه دمای خاک در کل دوره آماری در چهار اقلیم مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، مقادیر میانگین سالانه دمای خاک در طول دوره

در این روابط، X_i و Y_i به‌ترتیب i امین داده واقعی (اندازه‌گیری شده) و برآورد شده، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در کل جامعه آماری و n تعداد کل نمونه‌های ارزیابی شده می‌باشند.

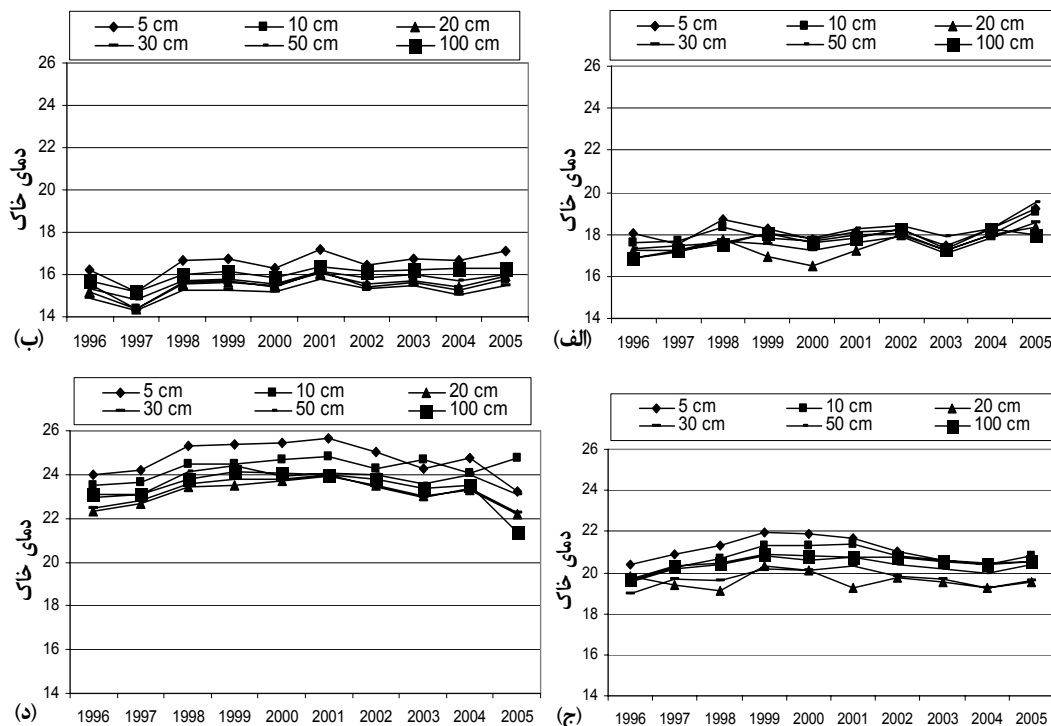
نتایج و بحث

آنالیز مقادیر ماهانه و سالانه دمای خاک

شکل ۲ تغییرات میانگین ماهانه دمای واقعی خاک در کل دوره آماری در چهار اقلیم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در اقلیم مرطوب حداکثر مقدار دمای ماهانه خاک در همه اعماق در ماه اگوست (مرداد) اتفاق افتاده است. حداقل مقدار آن در اعماق کم (۵ و ۱۰ سانتی‌متری) در ماه ژانویه (دی) و در بقیه اعماق در ماه فوریه (بهمن) می‌باشد. در اقلیم سرد نیمه‌خشک نیز، حداکثر مقدار دمای ماهانه خاک در همه اعماق در ماه اگوست (مرداد) رخ داده است. حداقل مقدار دمای خاک نیز در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری در ماه ژانویه (دی) و در بقیه اعماق در ماه فوریه (بهمن) می‌باشد. در اقلیم گرم نیمه‌خشک، حداکثر مقدار دمای ماهانه خاک در همه اعماق یک ماه زودتر یعنی در ماه جولای (تیر) و حداقل مقدار آن در ماه ژانویه (دی) اتفاق افتاده است. به‌طور مشابه، علت



شکل ۲. تغییرات ماهانه دمای خاک (بر حسب سانتی گراد) در کل دوره آماری (۱۹۹۶-۲۰۰۵) در اقلیم‌های مورد مطالعه: (الف) اقلیم مرطوب، (ب) اقلیم سرد نیمه‌خشک، (ج) اقلیم گرم و نیمه‌خشک، (د) اقلیم گرم و خشک



شکل ۳. تغییرات سالانه دمای خاک (بر حسب سانتی گراد) در کل دوره آماری (۱۹۹۶-۲۰۰۵) در اقلیم‌های مورد مطالعه: (الف) اقلیم مرطوب، (ب) اقلیم سرد نیمه‌خشک، (ج) اقلیم گرم و نیمه‌خشک، (د) اقلیم گرم و خشک

هم‌بستگی آماری می‌باشند. نتایج جدول ۳ نیز نشان می‌دهد که هم‌بستگی بین میانگین تابش خورشیدی و دمای خاک در اقلیم سرد نیمه‌خشک بیشترین مقدار را داراست. این در حالی است که دمای خاک با فشار هوا در همه اقلیم‌ها و در همه اعماق هم‌بستگی معنی‌داری را نشان نمی‌دهد.

تحلیل روابط تجربی

با توجه به نتایج هم‌بستگی به دست آمده بین متغیرهای هواشناسی و دمای خاک در اعماق مختلف در دوره آماری مورد مطالعه (جدول ۳)، با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره، روابط تجربی در اعماق مختلف و برای اقلیم‌های مورد مطالعه به صورت مجزا ارائه گردید.

لازم به ذکر است که با توجه به تأثیر نوع اقلیم بر هم‌بستگی هر یک از متغیرها، پارامترهای ورودی متفاوتی در روابط هم‌بستگی به کار برده شد.

روابط هم‌بستگی در اقلیم مرطوب

با به کارگیری داده‌های روزانه ذکر شده در جدول ۳، روابط هم‌بستگی خطی چند متغیره در ایستگاه‌های اقلیم مرطوب بطور مجزا در عمق‌های مورد مطالعه استخراج گردید (روابط ۶ الی ۱۱).

$$T_{5-H} = 0.732T_{avg} + 4.183e_a + 0.614P - 62.938 \quad [6]$$

$$T_{10-H} = 0.626T_{avg} + 4.822e_a + 0.832P - 84.771 \quad [7]$$

$$T_{20-H} = 0.498T_{avg} + 5.529e_a + 1.026P - 103.802 \quad [8]$$

$$T_{30-H} = 0.461T_{avg} + 5.652e_a + 1.029P - 121.948 \quad [9]$$

$$T_{50-H} = 0.383T_{avg} + 5.584e_a + 1.587P - 158.222 \quad [10]$$

$$T_{100-H} = 0.226T_{avg} + 5.269e_a + 1.679P + 164.879 \quad [11]$$

در این روابط، T_{5-H} ، T_{10-H} ، T_{20-H} ، T_{30-H} ، T_{50-H} و T_{100-H} به ترتیب میانگین روزانه برآورد شده دمای خاک ($^{\circ}C$) در اقلیم مرطوب در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، T_{avg} میانگین دمای هوا ($^{\circ}C$)، e_a فشار بخار آب (kPa) و P فشار هوا

مورد مطالعه دارای نوساناتی است که این امر ناشی از تأثیر دیگر متغیرهای جوی مانند: تابش خورشیدی، ابرناکی، ساعات آفتابی، رطوبت هوا، بارش و ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد.

روش بررسی هم‌بستگی متغیرهای هواشناسی با دمای خاک

در جدول ۳، ضرایب تعیین بین متغیرهای هواشناسی و دمای خاک در اعماق مختلف برای چهار اقلیم مورد مطالعه در دوره آماری ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش عمق، میزان تأثیرگذاری متغیرهای هواشناسی بر دمای خاک در هر چهار اقلیم مورد مطالعه کاهش می‌یابد. کاهش میزان تأثیرگذاری متغیرهای هواشناسی بر دمای خاک با افزایش عمق آن، یکسان نمی‌باشد. به طور مثال در اقلیم مرطوب، بیشترین کاهش تأثیرگذاری در متغیرهای بارش و رطوبت نسبی و کمترین آن در متغیرهای سرعت باد و فشار بخار هوا مشاهده شده است. هم‌چنین، میزان تأثیر متغیرهای هواشناسی بر دمای خاک در اقلیم‌های مختلف، یکسان نمی‌باشد. از بین عوامل بکار رفته، میانگین روزانه دمای هوای بیشترین هم‌بستگی را با دمای خاک نشان می‌دهد (جدول ۳).

نتایج تحقیق جعفری گلستانی و همکاران (۳) در منطقه ساری نیز نشان‌دهنده هم‌بستگی نسبتاً بالای دمای هوا و خاک می‌باشد. در تحقیق دیگری، ژنگ و همکاران (۱۹) به ضرایب تعیینی بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۶ بین دمای هوا و خاک دست یافتند. میانگین روزانه بارش و سرعت باد در همه اقلیم‌ها رابطه معنی‌داری با دمای خاک نشان نمی‌دهد. نتایج نیز نشان می‌دهند که در همه اقلیم‌های مورد مطالعه، به غیر از اقلیم مرطوب، میانگین روزانه رطوبت نسبی هوا دارای هم‌بستگی بالایی با دمای خاک می‌باشد. این امر ناشی از وابستگی شدید رطوبت نسبی هوا به دمای هوا در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. با خشک شدن اقلیم، میزان هم‌بستگی بین فشار بخار آب و دمای خاک به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در اقلیم مرطوب و اقلیم گرم و خشک، فشار بخار آب با دمای خاک به ترتیب دارای بیشترین و کمترین

جدول ۳. ضرایب تعیین (R^2) رابطه بین دمای خاک و دیگر متغیرهای هواشناسی در چهار اقلیم مورد مطالعه در دوره آماری ۱۰ ساله (۱۹۹۶-۲۰۰۵)

e_a	P	R	RH	U_2	R_S	T_{avg}	عمق خاک (cm)	نوع اقلیم
۰/۹۰۸۲	۰/۳۸۱۴	۰/۰۲۲۸	۰/۰۵۲۴	۰/۰۳۲۶	۰/۱۲۶۴	۰/۹۳۶۷	۵	مرطوب
۰/۹۲۰۹	۰/۳۶۰۳	۰/۰۱۴۳	۰/۰۳۶۲	۰/۰۳۱۵	۰/۱۰۷۸	۰/۹۲۸۳	۱۰	
۰/۹۲۱۸	۰/۳۲۶۶	۰/۰۰۶۲	۰/۰۴۹۳	۰/۰۳۲۵	۰/۰۹۵۸	۰/۹۰۱۱	۲۰	
۰/۹۱۹۳	۰/۳۰۸۴	۰/۰۰۴۲	۰/۰۱۷۰	۰/۰۳۱۰	۰/۰۸۵۲	۰/۸۸۸۴	۳۰	
۰/۸۸۲۶	۰/۲۵۵۱	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۱۰	۰/۰۲۹۰	۰/۰۶۳۵	۰/۸۳۳۲	۵۰	
۰/۷۸۸۵	۰/۱۷۶۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۳۰۶	۰/۰۳۹۶	۰/۷۰۸۳	۱۰۰	
۰/۸۹۰۲	۰/۳۰۱۴	۰/۰۰۸۳	۰/۰۲۲۹	۰/۰۳۱۲	۰/۰۸۶۴	۰/۸۶۶۰	R^2	میانگین همه عمق‌ها
۰/۶۷۷۲	۰/۱۳۵۸	۰/۰۱۵۰	۰/۵۸۹۳	۰/۱۴۵۳	۰/۴۵۰۲	۰/۹۵۹۴	۵	سرد نیمه‌خشک
۰/۶۸۱۴	۰/۱۲۰۶	۰/۰۱۱۷	۰/۵۷۳۲	۰/۱۳۹۶	۰/۴۲۶۵	۰/۹۵۳۴	۱۰	
۰/۶۷۶۰	۰/۱۰۵۰	۰/۰۱۰۳	۰/۵۵۰۲	۰/۱۲۹۸	۰/۳۹۷۸	۰/۹۳۲۳	۲۰	
۰/۶۷۱۷	۰/۰۹۹۷	۰/۰۱۰۱	۰/۵۳۹۸	۰/۱۲۵۵	۰/۳۸۳۳	۰/۹۲۲۱	۳۰	
۰/۶۴۹۲	۰/۰۷۹۳	۰/۰۱۰۷	۰/۵۱۴۴	۰/۱۰۷۸	۰/۳۴۸۶	۰/۸۸۵۶	۵۰	
۰/۵۷۱۳	۰/۰۳۵۵	۰/۰۱۳۵	۰/۴۳۴۱	۰/۰۶۳۰	۰/۲۵۴۴	۰/۷۷۱۳	۱۰۰	
۰/۶۵۴۵	۰/۰۹۶	۰/۰۱۱۹	۰/۵۳۳۵	۰/۱۱۸۵	۰/۳۷۶۸	۰/۹۰۴۰	R^2	میانگین همه عمق‌ها
۰/۳۶۳۸	۰/۲۵۳۶	۰/۰۲۸۳	۰/۵۴۸۵	۰/۰۱۲۳	۰/۳۳۰۷	۰/۹۶۶۰	۵	گرم نیمه‌خشک
۰/۳۶۱۳	۰/۲۴۵۸	۰/۰۲۷۱	۰/۵۵۰۷	۰/۰۱۲۴	۰/۳۲۵۵	۰/۹۷۱۵	۱۰	
۰/۳۷۶۰	۰/۲۲۶۲	۰/۰۲۳۱	۰/۵۱۱۷	۰/۰۰۶۶	۰/۳۰۰۲	۰/۹۵۹۸	۲۰	
۰/۳۸۴۹	۰/۲۰۷۴	۰/۰۲۳۶	۰/۵۰۰۳	۰/۰۰۴۹	۰/۲۸۸۷	۰/۹۴۴۶	۳۰	
۰/۳۸۶۵	۰/۱۶۷۵	۰/۰۲۴۸	۰/۴۵۵۴	۰/۰۰۰۴	۰/۲۵۳۳	۰/۹۰۰۵	۵۰	
۰/۳۴۸۷	۰/۰۸۴۳	۰/۰۲۶۱	۰/۳۳۹۸	۰/۰۰۷۳	۰/۱۶۵۲	۰/۷۴۶۵	۱۰۰	
۰/۳۷۰۲	۰/۱۹۷۵	۰/۰۲۵۵	۰/۴۸۴۴	۰/۰۰۷۳	۰/۲۷۷۳	۰/۹۱۴۸	R^2	میانگین همه عمق‌ها
۰/۰۷۸۲	۰/۵۵۴۱	۰/۰۲۰۱	۰/۴۶۵۹	۰/۰۰۵۳	۰/۱۰۸۱	۰/۹۳۶۹	۵	گرم و خشک
۰/۰۸۰۴	۰/۵۴۸۲	۰/۰۱۸۶	۰/۴۶۱۹	۰/۰۰۴۸	۰/۱۰۹۱	۰/۹۳۶۲	۱۰	
۰/۰۷۵۳	۰/۵۲۹۲	۰/۰۱۷۲	۰/۴۶۳۷	۰/۰۰۳۱	۰/۱۰۴۳	۰/۹۲۲۴	۲۰	
۰/۰۶۲۷	۰/۴۹۹۷	۰/۰۱۶۶	۰/۴۷۰۱	۰/۰۰۰۵	۰/۱۰۰۵	۰/۸۹۰۵	۳۰	
۰/۰۴۶۷	۰/۴۵۷۶	۰/۰۱۶۸	۰/۴۷۸۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۹۵۳	۰/۸۴۴۴	۵۰	
۰/۰۲۰۲	۰/۳۱۲۴	۰/۰۱۸۷	۰/۴۳۵۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۸۱۵	۰/۶۶۸۵	۱۰۰	
۰/۰۶۰۶	۰/۴۸۳۵	۰/۰۱۸۰	۰/۴۶۲۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۹۹۸	۰/۸۶۶۵	R^2	میانگین همه عمق‌ها

T_{avg} : دمای هوا، R_S : تابش خورشیدی، U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، R : بارندگی، RH : رطوبت نسبی، P : فشار هوا و e_a : فشار بخار هوا

$$T_{r0-CSA} = 0/715T_{avg} + 5/295e_a - 5/054RH + 0/005R_S + 3/982 \quad [15]$$

$$T_{50-CSA} = 0/639T_{avg} + 5/430e_a - 5/50RH - 0/017R_S + 5/957 \quad [16]$$

$$T_{100-CSA} = 0/497T_{avg} + 5/136e_a - 4/241RH - 0/076R_S + 8/639 \quad [17]$$

در روابط فوق، T_{50-CSA} ، T_{30-CSA} ، T_{20-CSA} ، T_{10-CSA} ، T_{5-CSA} و $T_{100-CSA}$ میانگین روزانه دمای خاک ($^{\circ}C$) در اقلیم سرد نیمه خشک به ترتیب در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متری، T_{avg} میانگین دمای هوا ($^{\circ}C$)، e_a فشار بخار آب (kPa)، R_S تابش خورشیدی ($MJ m^{-2} day^{-1}$) و RH رطوبت نسبی هوا (درصد) می باشند.

در جدول ۵، آماره های خطاسنجی روابط تجربی برای ایستگاه های موجود در اقلیم سرد نیمه خشک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، مشابه اقلیم مرطوب، در این اقلیم نیز روابط تجربی در اعماق ۱۰ و ۵ سانتی متری به ترتیب دارای بیشترین ضریب تعیین و کمترین خطا و برای عمق ۱۰۰ سانتی متری دارای ضعیف ترین هم بستگی و بیشترین خطا می باشند. لذا در این اقلیم نیز تأثیر پذیری لایه های سطحی خاک از متغیرهای برون جوی بیشتر از لایه های عمیق است.

مقایسه نتایج جدول ۴ و ۵ نشان می دهد که بر خلاف اقلیم مرطوب، در اقلیم سرد نیمه خشک مقدار دمای خاک بیش از مقدار واقعی ($Overestimation$) تخمین زده می شود. هم چنین، مقادیر خطاهای MAE و $RMSE$ نیز بیش از اقلیم مرطوب است.

اقلیم گرم و نیمه خشک

همان طور که در جدول ۳ ملاحظه می شود، در اقلیم گرم نیمه خشک، تأثیر رطوبت نسبی بیش از فشار بخار آب می باشد. لذا در روابط استخراج شده در این اقلیم، بعد از دمای هوا به ترتیب رطوبت نسبی و سپس فشار بخار آب تأثیر بیشتری بر دمای خاک در عمق های مختلف دارند. معادلات هم بستگی

(kPa) می باشند.

نتایج آماری اعتبار سنجی روابط تجربی ارائه شده برای اقلیم مرطوب در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، روابط تجربی در اعماق ۵ و ۱۰ سانتی متری به ترتیب دارای بیشترین ضریب تعیین و کمترین خطا می باشند. روابط به دست آمده نشان می دهند که با افزایش عمق خاک هم بستگی ها ضعیف تر شده به طوری که برای عمق ۱۰۰ سانتی متری دارای کمترین ضریب تعیین و بیشترین خطا می باشد. بالا بودن دقت روابط در لایه های سطحی خاک به واسطه تأثیر پذیری بیشتر دمای خاک از عوامل جوی و تأخیر زمانی ($Time lag$) کمتر جهت انتقال حرارت از سطح به لایه های ۵ و ۱۰ سانتی متری است.

مقادیر منفی خطای MBE در جدول ۴ (اقلیم مرطوب) در اغلب عمق ها، حاکی از فرو برآورد ($Underestimation$) دمای خاک توسط روابط اقلیم مرطوب می باشد.

اقلیم سرد نیمه خشک

در این اقلیم با توجه به ضرایب هم بستگی نسبتاً قابل قبول متغیرهای رطوبت نسبی و تابش نسبت به سایر متغیرهای هواشناسی (با ضرایب تعیینی به ترتیب برابر با ۰/۵۳ و ۰/۳۸)، علاوه بر دمای هوا و فشار بخار آب، این متغیرها نیز در روابط هم بستگی چند متغیره تأثیر داده شد. همانطور که در روابط ۱۲ الی ۱۷ ملاحظه می گردد، در مقایسه با اقلیم مرطوب، در این اقلیم متغیرهای تابش و رطوبت نسبی هوا تأثیر بیشتری بر دمای خاک دارند.

$$T_{50-CSA} = 0/806T_{avg} + 6/881e_a - 9/489RH + 0/090R_S + 3/952 \quad [12]$$

$$T_{100-CSA} = 0/768T_{avg} + 5/741e_a - 6/973RH + 0/049R_S + 3/501 \quad [13]$$

$$T_{r0-CSA} = 0/716T_{avg} + 5/373e_a - 5/501RH + 0/019R_S + 4/247 \quad [14]$$

دمای خاک در اقلیم گرم و نیمه‌خشک در روابط ۱۸ الی ۲۳ نشان داده شده است.

جدول ۴. آماره‌های واسنجی روابط تجربی برای اقلیم مرطوب

رابطه	R ²	RMSE	MAE	MBE	n
T _{5-H}	۰/۹۵۹	۱/۳۱۷	۰/۹۷۰	۰/۰۴۳	۳۶۱۹
T _{10-H}	۰/۹۶۱	۱/۲۲۶	۰/۸۹۴	-۰/۰۰۱	۳۶۳۴
T _{20-H}	۰/۹۵۱	۲/۱۳۰	۱/۰۸۹	-۰/۱۴۷	۳۶۰۹
T _{30-H}	۰/۹۴۶	۱/۲۵۷	۰/۹۸	۰/۰۳۴	۳۶۳۴
T _{50-H}	۰/۹۱۱	۱/۵۱۵	۱/۱۸۶	-۰/۰۴۶	۳۶۲۳
T _{100-H}	۰/۸۲۰	۲/۰۶۹	۱/۴۳۷	-۰/۰۷۵	۳۶۱۹

n: تعداد داده‌ها

جدول ۵. آماره‌های واسنجی روابط تجربی برای اقلیم سرد نیمه‌خشک

رابطه	R ²	RMSE	MAE	MBE	n
T _{5-H}	۰/۹۵۹	۱/۷۳۸	۲/۵۰۱	۰/۰۲۴	۳۴۶۴
T _{10-H}	۰/۹۵۹	۴/۸۰۲	۲/۲۶۵	۱/۲۵۷	۳۴۶۴
T _{20-H}	۰/۹۴۳	۴/۸۲۷	۲/۴۵۵	۱/۲۵۹	۳۴۶۴
T _{30-H}	۰/۹۳۶	۴/۸۵۸	۲/۵۳۲	۱/۲۷۲	۳۴۶۴
T _{50-H}	۰/۹۰۹	۴/۹۹۸	۳/۰۷۰	۱/۲۸۶	۳۴۶۴
T _{100-H}	۰/۷۹۸	۵/۳۵۹	۳/۴۶۳	۱/۴۱۴	۳۴۶۴

n: تعداد داده‌ها

نیمه‌خشک به‌ترتیب در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، میانگین دمای هوا (°C)، فشار بخار آب e_a (kPa)، تابش کل خورشیدی (MJ m⁻² day⁻¹) و RH رطوبت نسبی (درصد) می‌باشند.

نتایج آماری روابط تجربی ارائه شده برای اقلیم گرم و نیمه‌خشک در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در این اقلیم نیز روابط تجربی در اعماق ۱۰ و ۵ سانتی‌متری به‌ترتیب دارای بیشترین ضریب تعیین و کمترین معیارهای خطا هستند و رابطه تجربی ارائه شده برای عمق ۱۰۰ سانتی‌متری دارای کمترین ضریب تعیین و بیشترین خطاست.

$$T_{0-WSA} = 1/127T_{avg} - 1/46 \cdot RH - 1/57 \cdot e_a + 0/36R_S + 2/20 \quad [18]$$

$$T_{10-WSA} = 1/95T_{avg} - 2/563RH - 0/084e_a + 0/26R_S + 2/141 \quad [19]$$

$$T_{20-WSA} = 0/971T_{avg} - 1/496RH + 0/891e_a + 0/008R_S + 2/636 \quad [20]$$

$$T_{30-WSA} = 0/957T_{avg} + 0/328RH + 0/351e_a + 0/001R_S + 2/808 \quad [21]$$

$$T_{50-WSA} = 0/849T_{avg} + 2/659RH - 0/354e_a - 0/23R_S + 5/321 \quad [22]$$

$$T_{100-WSA} = 0/661T_{avg} + 5/55 \cdot RH - 1/287e_a - 0/53R_S + 8/966 \quad [23]$$

در این روابط، T_{5-WSA}، T_{10-WSA}، T_{20-WSA}، T_{30-WSA}، T_{50-WSA} و T_{100-WSA} میانگین روزانه دمای خاک (°C) در اقلیم گرم و

معیارهای ارزیابی روابط تجربی ارائه شده برای اقلیم گرم و خشک در جدول ۷ آورده شده است. همانطور که مشاهده می-شود نتایج حاصل از ارزیابی روابط تجربی ارائه شده در این

جدول ۶. آماره‌های واسنجی روابط تجربی برای اقلیم گرم و نیمه‌خشک

رابطه	R ²	RMSE	MAE	MBE	n
T _{5-H}	۰/۹۳۹	۱/۷۷۴	۲/۰۶۲	۰/۰۶۱	۳۵۱۶
T _{10-H}	۰/۹۴۱	۱/۵۳۲	۱/۲۱۸	۰/۴۲۱	۳۵۱۶
T _{20-H}	۰/۹۳۷	۱/۶۳۴	۳/۱۶۶	۰/۳۰۰	۳۴۱۶
T _{30-H}	۰/۹۰۸	۱/۸۳۰	۲/۱۱۴	۰/۲۴۶	۳۵۱۶
T _{50-H}	۰/۸۶۶	۲/۱۱۰	۲/۳۸۲	۰/۲۳۵	۳۵۱۶
T _{100-H}	۰/۷۳۳	۲/۴۴۶	۲/۷۵۲	۰/۱۱۱	۳۵۱۶

n: تعداد داده‌ها

جدول ۷. آماره‌های واسنجی روابط تجربی برای اقلیم گرم و خشک

رابطه	R ²	RMSE	MAE	MBE	n
T _{5-H}	۰/۹۴۴	۲/۰۱۶	۱/۵۸۷	-۰/۰۳۳	۳۶۵۳
T _{10-H}	۰/۹۴۲	۱/۹۰۹	۱/۴۹۹	-۰/۰۱۹	۳۶۵۳
T _{20-H}	۰/۹۲۹	۱/۹۷۴	۱/۵۳۴	-۰/۰۱۶	۳۶۵۳
T _{30-H}	۰/۸۹۹	۲/۱۴۶	۱/۶۷۱	-۰/۰۲۴	۳۶۵۳
T _{50-H}	۰/۸۵۹	۲/۳۰۳	۱/۸۰۸	-۰/۰۲۲	۳۶۵۳
T _{100-H}	۰/۶۹۸	۲/۸۳۳	۲/۱۵۸	-۰/۰۵۴	۳۶۵۳

n: تعداد داده‌ها

شده توسط آنها، بیشترین ضریب تعیین در عمق ۱۰ سانتی متری خاک به دست آمده است که با نتایج این تحقیق همخوانی مطلوبی دارد. به طور کلی در تمامی اقلیم‌های مطالعاتی، با افزایش عمق و کاهش تأثیر متغیرهای هواشناسی، میزان خطای روابط تجربی ارائه شده افزایش می‌یابد. این بخش از نتایج نیز با نتایج به دست آمده توسط نجفی مود و همکاران (۹) مطابقت دارد.

لازم به ذکر است که در ایستگاه‌های کشور دمای خاک در طول شب که انرژی خورشید حذف می‌شود، اندازه‌گیری نمی‌گردد. لذا به نظر می‌رسد که میانگین واقعی روزانه دمای خاک کمتر از مقدار به کار رفته در این تحقیق باشد. این امر تا

اقلیم مشابه اقلیم مرطوب نشان می‌دهد که روابط تجربی تمایل به برآورد کمتر (MBE های منفی) از واقعیت دارند.

روابط تجربی ارائه شده در تمامی اعماق خاک در اقلیم مرطوب بهترین نتایج را ارائه داده‌اند. این در حالی است که این روابط در بیشتر اعماق (خصوصاً اعماق کمتر) در اقلیم گرم نیمه‌خشک دارای بیشترین خطا و کمترین ضریب تعیین بوده‌اند.

در اقلیم‌های مورد بررسی، روابط تجربی ارائه شده در عمق ۱۰ سانتی متری نسبت به بقیه اعماق بیشترین ضریب تعیین و کمترین خطا را داشته است. نجفی مود و همکاران (۹) بر اساس رابطه درجه حرارت هوا و دمای خاک در اعماق مختلف، روابطی تجربی را ارائه نمودند. بر اساس روابط ارائه

حدودی دقت روابط هم‌بستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. توسعه شبکه ایستگاه‌های اتوماتیک (Data Loggers) در آینده می‌تواند این نقصان را بر طرف نماید.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، دمای خاک در چهار اقلیم گرم و خشک، گرم و نیمه‌خشک، سرد نیمه‌خشک و مرطوب مورد بررسی قرار گرفت و پس از تعیین متغیرهای مؤثر بر آن، در هر چهار اقلیم مورد مطالعه، روابط تجربی برای برآورد دمای خاک با استفاده از متغیرهای هواشناسی ارائه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین مقادیر دمای خاک به ترتیب مربوط به اقلیم‌های گرم و خشک و گرم و نیمه‌خشک و کمترین مقدار به ترتیب مربوط به اقلیم‌های سرد نیمه‌خشک و مرطوب می‌باشند. تغییرات سالانه دمای خاک روند مشخصی نشان نداد و مقادیر بیشینه و کمینه دمای سالانه خاک در دوره آماری مورد مطالعه در اعماق مختلف، متفاوت بود. همچنین میزان تأثیر متغیرهای هواشناسی بر دمای خاک در اقلیم‌های مختلف مقادیر کاملاً متفاوتی را نشان دادند. از بین عوامل به کار رفته، در همه اقلیم‌ها، میانگین دمای هوای روزانه دارای بیشترین هم‌بستگی و بارش روزانه و سرعت باد کمترین هم‌بستگی را با دمای خاک در اقلیم‌های مورد مطالعه نشان داد. بررسی آماره‌های واسنجی نشان داد که با افزایش عمق، میزان تأثیر متغیرهای هواشناسی بر دمای خاک در هر چهار اقلیم مورد مطالعه کاهش می‌یابد. روابط تجربی ارائه شده در اعماق ۱۰ و ۵ سانتی‌متری بیشترین هم‌بستگی و در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری کمترین هم‌بستگی را با متغیرهای هواشناسی ارائه نمودند.

منابع مورد استفاده

نتایج تحقیق نشان داد که دامنه حساسیت دمای خاک به هر یک از متغیرهای هواشناسی تابع اقلیم منطقه است، به طوری که روابط هم‌بستگی چندگانه به دست آمده این موضوع را تأیید می‌کند.

در این تحقیق، انتظار می‌رفت که برخی از متغیرهای مؤثر بر دمای خاک مانند بارندگی در اقلیم مرطوب تفاوت قابل ملاحظه‌ای را با متغیرهای متناظر در اقلیم‌های گرم نیمه‌خشک و خشک نشان دهند. ولی نتایج حاصل از هم‌بستگی‌های چندگانه این موضوع را تأیید نکرد. این مورد ممکن است به دلیل عدم تشابه بافت خاک در اقلیم‌های مورد بحث باشد. با توجه به این که ویژگی‌های فیزیکی بافت خاک‌ها در چهار اقلیم مورد نظر یکسان نمی‌باشد، ضروری است، روابط هم‌بستگی نیز با خاک‌های مشابه ولی در اقلیم‌های متفاوت، در تحقیق مجزایی مورد ارزیابی قرار گیرند. گرچه در پژوهش انجام شده، اثر عواملی نظیر: فصل، عرض جغرافیایی، آلیدوی سطحی و تعداد روزهای بارش در سال بر دمای خاک بررسی نگردید، ارزیابی تأثیر متغیرهای فوق‌الذکر در روابط پیش‌بینی دمای خاک ممکن است دقت روابط پیش‌بینی را افزایش دهد. لازم بذکر است که در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور دمای خاک در زمین بدون پوشش گیاهی اندازه‌گیری می‌گردد. لذا روابط استخراج شده برای پیش‌بینی دمای خاک‌های بدون پوشش گیاهی (لخت) معتبر می‌باشند. به همین دلیل استخراج روابط مشابه برای سایر پوشش‌ها و سایر اقلیم‌ها در ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌گردد.

۱. ابراهیمی، ا. ۱۳۷۴. مطالعه دمای اعماق مختلف خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
۲. بهیار، م.ب. و غ.ع. کمالی. ۱۳۸۶. رابطه دمای هوا با دمای سطح و اعماق مختلف خاک. تحقیقات جغرافیایی، ۲۳(۳): ۸۱-۱۰۲.
۳. جعفری گلستانی، م.م. رائینی سرجاز و م. ضیاء تبار احمدی. ۱۳۸۶. برآورد دمای ژرفای خاک با بهره‌گیری از روش تجزیه منحنی و هم‌بستگی‌های رگرسیونی برای شهرستان ساری. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی (ویژه نامه زراعت و اصلاح

نباتات) (۵): ۱۱۲-۱۲۳.

۴. چایچی، م.، م. کوچک زاده، م. شهابی فر. ۱۳۸۷. مقایسه الگوریتم‌های روزانه مجزا در برآورد دمای سطح با استفاده از تصاویر ماهواره نوآ. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز.
۵. دانش‌کار آراسته، پ.، م. تجریشی و م. ثقفیان. ۱۳۸۴. تعیین دمای سطح با استفاده از فناوری سنجش از دور در منطقه سیستان. نشریه علمی- پژوهشی آب و آبخیز ۲: ۳۰-۲۰.
۶. رحیمی خوب، ع.، م. کوچک زاده، ج. م. ولی سامانی و ف. شریفی. ۱۳۸۴. ارزیابی چند روش بر آورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهش و سازندگی ۶۸: ۸۴-۹۰.
۷. سازمان هواشناسی کشور ۱۳۸۷. داده‌های هواشناسی دوره اقلیمی ۱۹۹۶ الی ۲۰۰۵. مرکز اطلاعات و آمار، تهران.
۸. مهدویان، م. ۱۳۷۸. پیش‌بینی محلی دمای حداقل شبانه‌روزی در منطقه کرج. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
۹. نجفی مود، م.ح.، ا. علیزاده، ا. محمدیان و ج. موسوی. 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.
10. Béhaegel, M. Sailhac, P. and G. Marquis. 2007. On the use of surface and ground temperature data to recover soil water content information. *J. Appl. Geophys.* 62: 234-243.
11. Ghuman, B. S., Lal, R. 1982. Temperature regime of a tropical soil in relation to surface condition and air temperature and its Fourier analysis. *Soil Sci.* 134: 133-140.
12. George, R. K. 2001. Prediction of Soil Temperature by using Artificial Neural Networks Algorithms. *Nonlin. Anal.* 47: 1737-1748.
13. Heusinkveld, B. G. Jacobs, A.F.G. Holtslag, A. A. M. and S.M. Berkowicz. 2004. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. *Agric. and Forest Meteorol.* 122: 21-31.
14. Keryn, I. P. Polglase, P.J. and P.J. Smethurst. 2004. Soil temperature under forests: a simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agric. and Forest Meteorol.* 121: 167-182.
15. Mihalakakou, G. 2002. On estimating soil surface temperature profiles. *Energy and Buil.* 34: 251-259.
16. Plauborg, F. 2002. Simple model for 10 cm soil temperature in different soils with short grass. *Eur. J. Agron.* 17: 173-179.
17. Usowicz, B. and R. Walczak. 1994. Soil temperature prediction by numerical model. *Polish J. Soil Sci.* 28(2): 87-94.
18. Veronez, M. R., A. B. Thum, A. S. Luz and A. R. Da Silva 2006. Artificial neural networks applied in the determination of soil surface temperature – SST, 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences.
19. Zheng, D. Raymond Hunt Jr. E. and S.W. Running. 1993. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. *Clim. Res.* 2: 183-191.