

مقایسه یافته‌های مدل شبکه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی با مدل‌های رگرسیونی به منظور برآورد دمای خاک در سه اقلیم متفاوت

علی اکبر سبزی پرور^{۱*} - حمید زارع ایبانه^۲ - مریم بیات ورکشی^۳

تاریخ دریافت: ۸۸/۴/۸

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۱/۱۱

چکیده

دمای خاک از پارامترهای مهم و تأثیر گذار در کلیه فرآیندهای هیدرولوژی و کشاورزی است که اندازه‌گیری و پیش‌بینی آن ضروری است. مطالعاتی که تا کنون در زمینه برآورد دمای خاک در مناطق فاقد داده صورت گرفته همگی به اتفاق از مدل‌های رگرسیونی جهت برآورد دمای خاک استفاده کرده‌اند. در این پژوهش ضمن استفاده از مدل‌های رگرسیونی، با بکارگیری سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی^۴ (ANFIS) به عنوان روشی نوین، به پیش‌بینی دمای خاک در شش عمق مختلف (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متر) اقدام شد. علاوه بر این، مهمترین پارامترهای هواشناسی (دمای بیشینه، دمای کمینه، میانگین دمای روزانه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) به عنوان عوامل اثرگذار بر دمای خاک در یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۲) در ایستگاه‌های مورد مطالعه معرفی می‌گردند. مطالعه روی داده‌های هواشناسی ۳ ایستگاه سینوپتیک زاهدان، تهران و رامسر که دارای اقلیم متفاوتی می‌باشند، انجام گرفت. یافته‌ها حاکی از ۴ درصد دقت بیشتر روش ANFIS نسبت به روش آماری رگرسیون بود. همچنین دقت پیش‌بینی دمای خاک با روش ANFIS در دو ایستگاه زاهدان و تهران (اقلیم خشک) به ترتیب ۱۲ درصد و ۴/۵ درصد بهتر از رامسر (اقلیم مرطوب) بود. مقدار ضریب همبستگی (r) بین دمای خاک پیش‌بینی شده توسط شبکه ANFIS و مدل رگرسیون انتخابی با دمای واقعی خاک، نشان داد که با افزایش عمق خاک مقدار r کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که بر خلاف مناطق خشک، در اقلیم مرطوب رامسر با افزایش عمق خاک دقت پیش‌بینی تا ۱۸ درصد افزایش می‌یابد، در حالیکه در دو ایستگاه زاهدان و تهران دقت پیش‌بینی دمای خاک در لایه‌های کم عمق تا ۱۰ درصد بیشتر از لایه‌های عمیق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: دمای خاک، مدل‌های رگرسیونی، ANFIS، اقلیم خشک، اقلیم مرطوب

مقدمه

دمای هوا، توزیع بارش، میزان رطوبت خاک، نوع و ویژگی گرمایی خاک، همانند ظرفیت گرمایی، ضریب رسانایی گرمایی و گرمای ویژه می‌باشد (۸). اهمیت دمای خاک در علوم کشاورزی و هیدرولوژی از یک سو و وجود مشکلات فراوان در ثبت این پارامتر حیاتی پژوهشگران را بر آن داشته است تا به دنبال یافتن رابطه‌ای بین دمای خاک و پارامترهای دیگر باشند تا بتوانند دمای خاک را با دقت مطلوب برآورد کنند. هانکس و همکاران (۱۲) با به‌کارگیری روش عددی موفق به برآورد دمای خاک به عنوان تابعی از زمان و عمق شدند. در این مطالعه دمای محاسبه شده $1/5^{\circ}\text{C}$ با دمای واقعی اختلاف داشت. گومان و لال (۱۱) با استفاده از روش سری فوریه، در یک منطقه استوایی دمای روزانه خاک را پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که بین دمای اندازه‌گیری شده و دمای پیش‌بینی شده از سری فوریه در عمق ۱۳ سانتی متری خاک همبستگی خوبی برقرار است. سامرز و همکاران (۱۹) نحوه فعالیت گیاه از قبیل آزادسازی دی اکسیدکربن را به شدت متأثر از دمای خاک می‌دانند. آلدریگ و کوک

کلیه فرآیندهای فیزیکی خاک به صورت مستقیم یا غیر مستقیم وابسته به دما هستند. دمای خاک در فرآیندهای تبخیر و تعرق، تهویه خاک، جوانه زنی بذر، رشد گیاه، توسعه ریشه‌ها و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک نقش بسزایی دارد (۸). دمای خاک ارتباط تنگاتنگی با عمق نفوذ یخبندان دارد که این امر در کشاورزی، سازه‌های زه‌کشی و شبکه‌های آبرسانی شهری نقش بسزایی دارد. رشد بهینه گیاه بستگی به دمای مطلوب خاک دارد، به گونه‌ای که اندازه دمای خاک زمان کاشت بذر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دمای خاک متأثر از عوامل متعددی از جمله توپوگرافی، تابش خورشید،

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشیار هواشناسی، استادیار آبیاری و دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
(Email: swsabzi@basu.ac.ir) * - نویسنده مسئول:

معدلات برآورد دمای خاک مورد ارزیابی قرار گیرد. در انجام این پژوهش فرض می‌شود بین عوامل جوی بیرون از خاک با کنش و واکنش‌های فیزیکی داخل خاک نظیر نوسانات دمای خاک ارتباط فیزیکی وجود دارد. بنابراین، با در نظر گرفتن این فرض، می‌توان با بکارگیری عوامل جوی، دمای خاک را برآورد نمود. ضمناً فرض شده است که سامانه‌های هوشمند عصبی قادر به پیش‌بینی مقدار دمای خاک در عمق‌های مختلف می‌باشند.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه

این مطالعه با استفاده از اطلاعات روزانه و ساعتی ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی در سه منطقه تهران، زاهدان و رامسر انجام گرفت (جدول ۱). انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس تفاوت در اقلیم و دسترسی به داده‌های مطلوب با طول دوره آماری مناسب بود. طبق طبقه‌بندی جدید یونسکو، شهرهای تهران، زاهدان و رامسر به ترتیب دارای اقلیم نیمه‌خشک گرم، خشک گرم و مرطوب سرد می‌باشند. با توجه به قابلیت دسترسی به محدوده وسیعی از داده‌های هواشناسی در سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۰۶، از داده‌های بازه زمانی بالا در ارزیابی مدل‌ها استفاده گردید. اطلاعات مورد نیاز از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. لازم به ذکر است که در برخی از ماه‌ها داده‌ها به طور منظم ثبت نگردیده بود. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل دمای کمینه هوا (T_{min})، دمای بیشینه هوا (T_{max})، میانگین دمای هوا (T)، رطوبت نسبی هوا (RH)، ساعات آفتابی (n) و سرعت باد در ارتفاع ده متری (U) در مقیاس روزانه بودند. دمای خاک ثبت شده در ایستگاه‌ها در ساعات ۶:۳۰ و ۱۲:۳۰ و ۱۸:۳۰ به وقت محلی کشور بود که با میان‌گیری آن‌ها در سه نوبت، متوسط دمای روزانه در اعماق مختلف بدست آمد. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، کیفیت آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت. بدین منظور نخست بصورت تجربی، برخی داده‌های پرت شناسایی و از مجموعه داده‌ها حذف و سپس همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون ساده ران، تایید شد. بعد از مرتب کردن داده‌ها در نرم افزار Excel به پیش‌بینی دمای خاک اقدام گردید. بدین منظور از روش‌های شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره استفاده شد.

(۱۰) با ارائه مدل رگرسیون چند متغیره، میانگین سالیانه دمای خاک در عمق‌های ۱۰ و ۳۰ سانتی متر را محاسبه کردند. میکس و جیلکریس (۱۶) با ارائه مدل چند جمله‌ای درجه چهارم موفق به محاسبه کمینه و بیشینه دمای خاک در هر روز از سال در ۱۸ منطقه انگلستان شدند. مالکین و آیرس (۱۴) با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره ارتباط بین دمای خاک با پارامترهای هواشناسی را تعیین و با ارائه مدل به برآورد دمای خاک در اعماق ۱، ۲، ۵ و ۱۰ سانتی متر پرداختند. متغیرهای مورد استفاده شامل، دمای هوا و ابرناکی در روز برآورد، دمای هوا در دو روز قبل، نسبت ساعات آفتابی و روز فصل بود. ادیب عباسی (۱) با استفاده از رگرسیون چند متغیره رابطه بین دمای خاک در بازه ساعتی، روزانه و ماهانه را با دمای جعبه اسکرین و رطوبت خاک تعیین نمود. در پژوهش دیگری ثنائی نژاد و همکاران (۲) با استفاده از تحلیل سری‌های فوریه و دوره آماری ۱۲ ساله به برآورد دمای خاک روزانه و سالیانه در عمق‌های مختلف در ۶ ایستگاه کردستان اقدام نمودند. در این تحلیل آنها فقط با استفاده از دمای هوا (۲ متری) و بدون در نظر گرفتن دیگر پارامترهای هواشناسی (تابش، ساعات آفتابی، رطوبت هوا، ابرناکی) روابط همبستگی خود را جهت برآورد دمای خاک پیشنهاد نمودند.

به اعتقاد نجفی مود و همکاران (۸) به دلیل خطای به وجود آمده در هنگام اندازه‌گیری دمای اعماق خاک توسط دماسنج‌های معمولی، عملی‌ترین روش برای پیش‌بینی دمای خاک استفاده از داده‌های هواشناسی بالای سطح خاک می‌باشد. با توجه به اهمیت داده‌های دمای خاک در مطالعات خاکشناسی و هواشناسی کشاورزی (تأثیر دمای خاک بر سرعت تبادل عناصری نظیر سدیم و پتاس، تأثیر دمای خاک بر سرعت تبادل دی اکسید کربن و نیتروژن بین خاک و هوا، تأثیر پذیری میکرو ارگانیسم‌ها از دمای خاک و تأثیر در رشد گیاه)، هدف اصلی در این پژوهش بررسی و مقایسه روابط رگرسیونی مختلف برای تخمین دمای خاک در اعماق مختلف در سه اقلیم متفاوت با استفاده از پارامترهای هواشناسی و ارزیابی دقت این روابط در مقایسه با داده‌های واقعی ثبت شده می‌باشد. همچنین برای اولین بار با استفاده از قابلیت‌های سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی، رهیافت جدیدی برای برآورد دمای خاک ارائه شده و نتایج آن با روابط رگرسیونی موجود مقایسه می‌گردد. این پژوهش در سه منطقه با اقلیم متفاوت انجام گرفت تا ضمن مقایسه نتایج، تأثیر نوع اقلیم بر

(جدول ۱) - مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه شرقی)	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	ارتفاع از سطح	
			دریا	نوع اقلیم (یونسکو)
تهران	۵۱° ۱۹'	۳۵° ۴۱'	۱۱۹۰/۸	نیمه خشک گرم
زاهدان	۶۰° ۵۳'	۲۹° ۲۸'	۱۳۷۰	خشک گرم
رامسر	۵۰° ۴۰'	۳۶° ۵۴'	-۲۰	مرطوب سرد

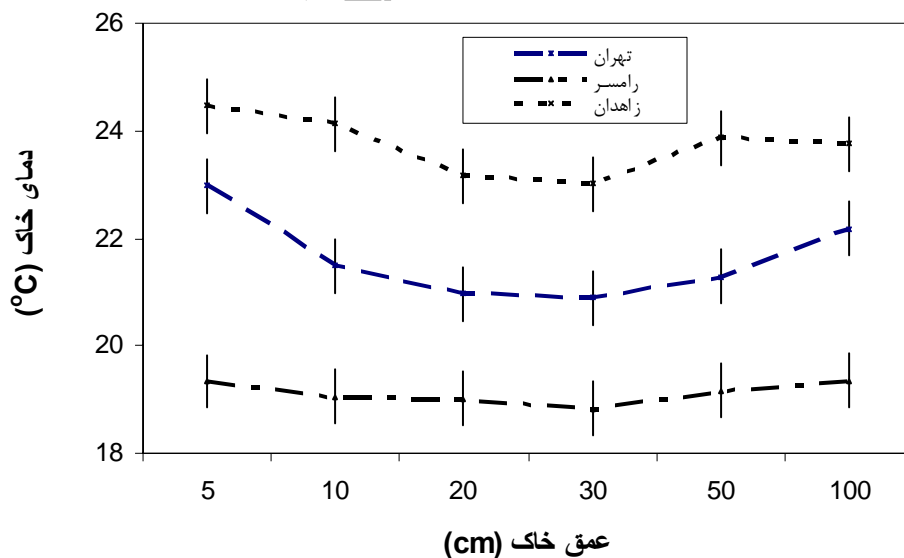
دستور العمل کمپانی سازنده $(\pm 0.5^\circ\text{C})$ در سه ایستگاه نشان داده شده است.

همان گونه که انتظار می رود دمای خاک در زاهدان بیشتر از دو منطقه دیگر و تهران نیز بیشتر از رامسر می باشد. این امر در همه عمق های خاک صادق است. همچنین، روند تغییرات دمای خاک در دو ایستگاه تهران و زاهدان تقریباً مشابه بوده ولی از نظر دامنه نوسانات اختلاف چشمگیری با ایستگاه رامسر دارند (شکل ۱). تشابه روند تغییرات دمای خاک در دو منطقه یادشده می تواند ناشی از تشابه نسبی اقلیمی باشد.

میانگین اقلیمی پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، رطوبت نسبی زیاد هوا و ساعات آفتابی کم در رامسر نسبت به دو ایستگاه دیگر چشمگیر است. به طوریکه دو پارامتر مذکور (n, RH) در تمایز اقلیم این ایستگاه با دو ایستگاه دیگر نقش مهمی را ایفا می کنند. لازم به ذکر است که تفاوت چشمگیری بین میانگین های دمای هوا و سرعت باد در سه ایستگاه مشاهده نمی شود. در شکل ۱ میانگین های دمای روزانه خاک طی دوره آماری مورد مطالعه در اعماق مختلف همراه با دامنه خطای اندازه گیری (بر اساس

(جدول ۲) - میانگین اقلیمی پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در دوره ۱۵ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۶)

ایستگاه	پارامتر	متوسط دمای کمینه هوا ($^\circ\text{C}$)	متوسط دمای بیشینه هوا ($^\circ\text{C}$)	میانگین دمای هوا ($^\circ\text{C}$)	رطوبت نسبی هوا (%)	سرعت باد (m s^{-1})	ساعات آفتابی (hour)	میانگین بارش سالیانه (mm/year)
تهران	میانگین	۱۳/۸	۲۳/۶	۱۸/۷	۴۳/۲	۶/۱	۸/۵	۲۳۰
	کمینه	-۷/۶	۰	-۲/۵	-----	۰	۰	-
	بیشینه	۳۲	۴۱/۶	۳۵/۸	-----	۲۱/۲۲	۱۴	-
زاهدان	میانگین	۱۰/۹	۲۷/۲	۱۹/۱۵	۲۸	۷/۳	۹/۴۷	۷۰
	کمینه	-۱۲/۶	-۱/۴	-۳/۲	-----	۰	۰	-
	بیشینه	۲۹	۴۳	۴۰/۴	-----	۲۸/۳	۱۳/۱	-
رامسر	میانگین	۱۴/۴	۲۰/۶	۱۷/۵	۸۰/۵	۵/۶۵	۴/۷	۱۲۲۶
	کمینه	-۱/۸	۱/۴	۱/۷	-----	۰	۰	-
	بیشینه	۲۷/۴	۳۴/۸	۳۰	-----	۲۴/۴۸	۱۲/۹	-



(شکل ۱) - تغییرات میانگین سالانه (۱۹۹۲-۲۰۰۶) دمای خاک مشاهده شده و محدوده خطاهای اندازه گیری (error bar) در اعماق مختلف خاک در سه ایستگاه متفاوت

که از انجام عملیات بر روی پیام‌های ورودی به این لایه حاصل می‌شود ($W_i f_i$). لایه آخر خروجی شبکه (f) می‌باشد که هدف آن حداقل نمودن اختلاف خروجی به دست آمده از شبکه و خروجی واقعی است.

در مرحله آموزش، با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. روش آموزش اصلی در این سامانه، روش پس‌انتشار خطا^۲ است. در این روش با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا^۲، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش می‌گردد و پارامترها تصحیح می‌شوند. نکاتی که در مورد آموزش شبکه عصبی-فازی باید به آن‌ها توجه کرد عبارتند از (۶):

- الف- اطلاعاتی که برای آزمون و آموزش انتخاب می‌شوند باید به صورت تصادفی انتخاب شوند.
- ب- مدل توانایی شبیه‌سازی اطلاعاتی که خارج از دامنه اطلاعات آموزش باشد را ندارد.
- ج- اطلاعات ورودی به مدل برای حصول نتایج بهتر باید نرمال شوند.
- د- هر چه تعداد داده‌های آموزش مدل بیشتر باشد، مدل بهتر آموزش می‌بیند.

در محیط AnfisEdit نرم‌افزار MATLAB جهت استفاده از شبکه عصبی-فازی دو روش منقطع سازی شبکه‌ای و خوشه‌بندی جزئی وجود دارد که تفاوت عمده آن‌ها در انتخاب تابع عضویت ورودی می‌باشد. در این مطالعه، از روش منقطع سازی شبکه‌ای که نوع تابع عضویت توسط کاربر تعیین می‌شود، استفاده شد. قبل از بکارگیری مدل ANFIS ابتدا نرمال‌سازی به منظور افزایش دقت و سرعت شبکه در پاسخ به پیام‌های ورودی انجام گرفت (رابطه ۱):

$$X_n = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

که در آن X_n مقدار هنجار شده، X_i مقدار واقعی متغیر، X_{\min} کمینه مقدار واقعی متغیر و X_{\max} بیشینه مقدار واقعی متغیر است. داده‌ها پس از استاندارد شدن و قرار گرفتن در محدوده صفر و یک، به دو دسته داده‌ی آموزش (۷۰ درصد) و داده‌ی آزمون (۳۰ درصد) تقسیم شدند. انتخاب داده‌ها به صورت تصادفی صورت گرفت.

در ایستگاه رامسر نیمرخ دمای خاک نوسان کمی داشته و می‌توان گفت میانگین دمای خاک در اعماق مختلف تغییر محسوسی ندارد. این امر ناشی از رطوبت خاک و نقش تعدیل‌کننده آن در اعماق مختلف می‌باشد. در این نوع شرایط آب و هوایی به دلیل بالا بودن رطوبت هوا و افزایش نسبی ابرناکی (نوسانات کم تابش خورشیدی)، از تغییرات سالانه دمای هوا کاسته شده و به دنبال آن دمای خاک نیز تغییر چندانی نخواهد داشت.

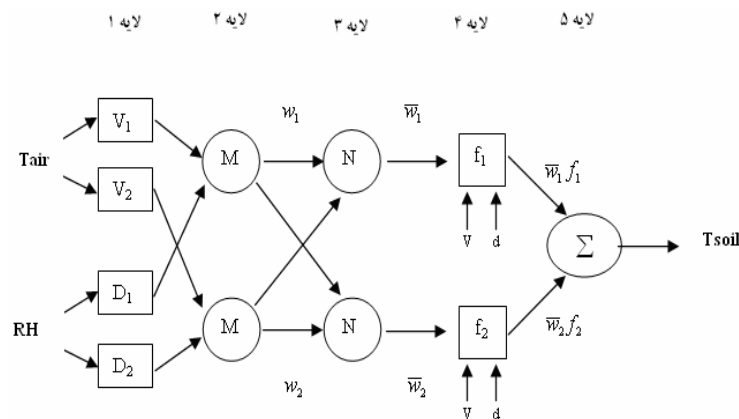
سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی^۱ (ANFIS)

در بین روش‌های نوین مدل‌سازی، سامانه‌های فازی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. توانایی پیاده‌سازی دانش بشری با استفاده از مفاهیم بر چسب‌های زبانی و قواعد فازی، غیر خطی بودن و قابلیت سازش پذیری این سیستم‌ها و دقت بهتر آنها در مقایسه با سایر روش‌ها در شرایط محدودیت داده‌ها، از جمله مهمترین ویژگی‌های این سیستم‌هاست (۳). نکته مهم منطق فازی امکان برقراری ارتباط بین فضای ورودی به فضای خروجی می‌باشد و سازوکار اولیه برای انجام این کار فهرستی از جملات If-Then است، که قانون نامیده می‌شوند. داشتن روشی که با استفاده از آن بتوان اطلاعات موجود برای ساخت این قواعد را استفاده کرد به عنوان ابزاری کارآمد بشمار می‌رود. از طرفی، شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت‌های آموزش پذیری با استفاده از الگوهای مختلف آموزشی می‌تواند ارتباط مناسبی بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد نماید. لذا استفاده ترکیبی از سامانه استنباط فازی و شبکه عصبی مصنوعی به عنوان ابزاری قدرتمند که قابلیت پیش بینی نتایج با استفاده از داده‌های عددی موجود را دارند، تحت عنوان سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی معرفی می‌شود. لذا این سیستم از الگوریتم‌های شبکه عصبی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیر خطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی شبکه‌ای ۵ لایه‌ای، متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال دهنده گره‌ها می‌باشد. ساختار مناسب سامانه عصبی-فازی متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌شود. شکل (۲) نمایشی از معماری شبکه عصبی-فازی با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون می‌باشد. در لایه اول (ورودی) میزان تعلق هر ورودی به بازه‌های مختلف فازی توسط کاربر مشخص می‌شود. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن قانون‌ها (W_i) در لایه دوم بدست می‌آید. در لایه سوم عمل محاسبه وزن نسبی قوانین (W_i) انجام می‌گیرد. لایه چهارم لایه قوانین است

2- Back Propagation (BP)

3- Gradient Descent Method (GDM)

1- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System



(شکل ۲) - ساختار سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS)

مدل رگرسیونی

کاربرد مدل‌های رگرسیونی برای برآورد پارامترهای مختلف توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است (۱۷؛ ۲۰). از آنجائی که این روش‌ها بخوبی می‌توانند تأثیر یک متغیر مستقل را بر متغیر وابسته نشان دهند (۱۵)، سعی گردید قابلیت مدل رگرسیون چند متغیره نیز در پیش‌بینی دمای خاک و پارامترهای هواشناسی به صورت معادله رگرسیونی به کمک نرم افزار SPSS-15 مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با برازش رگرسیون خطی درجه اول (رابطه ۲) و ثبت مقدار ضریب همبستگی (r) متناظر، جهت تعیین فاکتورهای موثر در دمای خاک اقدام گردید. در نهایت بررسی و مقایسه مقدار تأثیر هر یک از پارامترهای هواشناسی بر دمای خاک در اقلیم‌های متفاوت گرم نیمه‌خشک، گرم خشک و سرد مرطوب انجام گرفت.

$$y = a + bx \quad (2)$$

معیارهای ارزیابی

جهت ارزیابی نتایج بدست آمده با داده‌های واقعی معیارهای گوناگونی وجود دارد که کاربرد هر یک به ماهیت مورد مطالعاتی بستگی دارد. با توجه به اینکه در اکثر مطالعات هیدرولوژی از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (r) و جذر میانگین مربعات خطا جهت ارزیابی نتایج استفاده می‌شود، در این پژوهش علاوه بر دو شاخص مذکور از شاخص میانگین درصد خطا نیز استفاده شد.

نتایج و بحث

با اجرای مدل رگرسیونی اتوماتیک، مناسب‌ترین مدل رگرسیون چند متغیره برآورد دمای خاک در اعماق مختلف بدست آمد. این مدل توانایی ارائه مدل رگرسیونی با حداقل خطا و حداقل پارامتر موثر را

داراست. به‌گونه‌ای که متغیرهای مستقل که تأثیر چندانی در متغیر وابسته ندارند را از مدل رگرسیونی خارج می‌نماید. در این تحقیق مدل‌هایی که در آن‌ها ضریب رگرسیون برابر یا بیشتر از ۰/۸ بود به عنوان مدل اولیه مناسب در نظر گرفته شدند (۹). هرچند دیگر روابط رگرسیونی نظیر رگرسیون مرحله‌ای نیز اجرا گردید، اما به دلیل نتایج غیر قابل قبول و جلوگیری از افزایش حجم مقاله از درج نتایج در مقاله خودداری شد. جدول (۳) مدل‌های رگرسیونی برگزیده را با ضرایب همبستگی مربوطه نشان می‌دهد. کلیه روابط ارائه شده در جدول (۳) در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشند.

همان‌گونه که می‌دانیم، مقدار ضرایب هر متغیر در مدل رگرسیونی گویای درجه اهمیت آن متغیر در مدل مربوطه است. بنابراین همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، در دو ایستگاه تهران و رامسر، سرعت باد تأثیر کمی در مقدار دمای خاک نسبت به ایستگاه زاهدان دارند. در مقابل، رطوبت نسبی هوا در ایستگاه زاهدان نسبت به دو ایستگاه رامسر و تهران تأثیر کمتری در دمای خاک منطقه داشته است. این نتایج می‌تواند حساسیت مدل‌های تخمین دمای خاک را به شرایط اقلیمی منطقه نشان دهد. البته طبق جدول (۲)، رطوبت نسبی هوا در ایستگاه زاهدان نسبت به دو ایستگاه دیگر کمتر است. ضمن آن‌که سرعت باد نیز در دو ایستگاه رامسر و تهران نسبت به زاهدان کمتر می‌باشد.

پس از اجرای مدل‌های رگرسیونی، پیش‌بینی دمای خاک با اجرای مدل‌های مختلف شبکه عصبی-فازی صورت گرفت. پارامترهای ورودی شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی و خروجی شبکه هم دمای خاک در اعماق مختلف بود.

- 1- Root Mean Square Error (RMSE)
- 2- Mean Percentage Error (MPE)
- 3- Enter

(جدول ۳)- روابط رگرسیون خطی چند متغیره در برآورد دمای خاک

ایستگاه	عمق خاک (cm)	r	رابطه رگرسیونی
رامسر	۵	۰/۶۴	$T_{soil} = 0.955 T_{min} - 0.255 T_{max} - 0.042 RH + 0.355 n - 0.019 U + 13.701$
	۱۰	۰/۶۵	$T_{soil} = 0.910 T_{min} - 0.225 T_{max} - 0.036 RH + 0.328 n - 0.019 U + 13.055$
	۲۰	۰/۶۶	$T_{soil} = 0.873 T_{min} - 0.193 T_{max} - 0.035 RH + 0.300 n - 0.028 U + 13.026$
	۳۰	۰/۶۹	$T_{soil} = 0.839 T_{min} - 0.173 T_{max} - 0.038 RH + 0.271 n - 0.033 U + 13.231$
	۵۰	۰/۷۴	$T_{soil} = 0.745 T_{min} - 0.109 T_{max} - 0.035 RH + 0.216 n - 0.044 U + 13.655$
	۱۰۰	۰/۷۹	$T_{soil} = 0.641 T_{min} - 0.050 T_{max} - 0.034 RH + 0.152 n - 0.052 U + 14.243$
تهران	۵	۰/۸۷	$T_{soil} = 0.288 T_{min} + 0.776 T_{max} - 0.031 RH + 0.111 n + 0.074 U + 1.044$
	۱۰	۰/۸۸	$T_{soil} = 0.304 T_{min} + 0.758 T_{max} + 0.011 RH + 0.142 n + 0.071 U - 2.613$
	۲۰	۰/۸۹	$T_{soil} = 0.304 T_{min} + 0.758 T_{max} + 0.026 RH + 0.122 n + 0.049 U - 2.934$
	۳۰	۰/۸۹۸	$T_{soil} = 0.314 T_{min} + 0.701 T_{max} + 0.032 RH + 0.106 n + 0.013 U - 2.250$
	۵۰	۰/۸۹۷	$T_{soil} = 0.334 T_{min} + 0.629 T_{max} + 0.042 RH + 0.112 n - 0.003 U - 0.757$
	۱۰۰	۰/۸۸	$T_{soil} = 0.301 T_{min} + 0.507 T_{max} + 0.051 RH + 0.071 n - 0.074 U - 4.243$
زاهدان	۵	۰/۹۴	$T_{soil} = 0.250 T_{min} + 0.275 T_{max} + 0.001 RH + 0.550 n - 0.127 U - 2.523$
	۱۰	۰/۹۴	$T_{soil} = 0.254 T_{min} + 0.274 T_{max} - 0.001 RH + 0.548 n - 0.103 U - 0.914$
	۲۰	۰/۹۴	$T_{soil} = 0.227 T_{min} + 0.264 T_{max} - 0.008 RH + 0.548 n - 0.112 U + 0.296$
	۳۰	۰/۹۲	$T_{soil} = 0.129 T_{min} + 0.254 T_{max} - 0.009 RH + 0.467 n - 0.115 U + 2.469$
	۵۰	۰/۹۳	$T_{soil} = 0.106 T_{min} + 0.227 T_{max} - 0.024 RH + 0.367 n - 0.120 U + 6.265$
	۱۰۰	۰/۵۶	$T_{soil} = -0.050 T_{min} + 0.229 T_{max} - 0.028 RH + 0.249 n - 0.122 U + 11.116$

RH: متوسط رطوبت نسبی (%); U: سرعت باد ده متری (m/s); n: ساعت آفتابی; T_{max} : دمای بیشینه هوا ($^{\circ}C$); T_{min} : دمای کمینه هوا ($^{\circ}C$)

(جدول ۴)- شاخص‌های آماری روش‌های ANFIS و رگرسیونی در پیش‌بینی دمای خاک (مرحله آزمون)

عمق خاک (cm)	روش	تهران			زاهدان			رامسر	
		MPE (%)	RMSE ($^{\circ}C$)	r	MPE (%)	RMSE ($^{\circ}C$)	r	MPE (%)	RMSE ($^{\circ}C$)
۵	ANFIS	۲۴/۳۳	۴/۲۲	۰/۹۴	۱۲/۳	۳/۰۵	۰/۹۶	۳۱/۳	۵/۳
	REGR.	۲۷/۸	۵/۰۶	۰/۹۱	۲۰/۷	۳/۶۵	۰/۹۴	۳۳/۷	۶/۳
۱۰	ANFIS	۲۴/۲	۳/۸۹	۰/۹۴	۱۳/۸	۲/۹۳	۰/۹۶	۲۹/۹	۵/۰۸
	REGR.	۲۸/۵	۴/۹۷	۰/۹۱	۱۶/۳	۳/۵۲	۰/۹۴	۳۱/۶	۶/۰۹
۲۰	ANFIS	۲۲/۱	۳/۷۹	۰/۸۸	۱۵/۵	۳/۰۵	۰/۹۴	۲۸/۱۷	۴/۸۲
	REGR.	۴۹/۰۲	۴/۳۷	۰/۹۴	۱۶/۷	۳/۲۴	۰/۹۴	۳۰/۶۷	۵/۶۹
۳۰	ANFIS	۱۹/۹	۳/۵۵	۰/۹۴	۱۱/۹	۳/۲۶	۰/۹۳	۲۴/۶۳	۴/۳۲
	REGR.	۲۲/۶	۴/۲۲	۰/۸۲	۱۶/۷	۳/۴۲	۰/۹۲	۲۶/۹۸	۵/۱۲
۵۰	ANFIS	۱۷/۱۳	۳/۳۸	۰/۹۴	۱۱/۵	۲/۹۶	۰/۹۳	۱۸/۶	۳/۵۱
	REGR.	۱۷/۵	۳/۹۷	۰/۹۲	۱۲/۳	۳/۰۴	۰/۹۲	۲۰/۸۷	۴/۲۵
۱۰۰	ANFIS	۱۴/۰۳	۳/۴۵	۰/۹۱	۱۱/۷۴	۳/۱۸	۰/۸۵	۱۳/۲	۲/۶۳
	REGR.	۱۵/۵	۳/۸۴	۰/۸۸	۱۲/۳	۳/۱۹	۰/۸۵	۱۵/۱۶	۳/۳

به سایر مدل‌ها داشتند. مقایسه نتایج شاخص‌های آماری مدل‌های رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی-فازی در پیش‌بینی دمای خاک در اعماق مختلف سه منطقه در جدول (۴) ارائه شده است. این نتایج بر مبنای تعداد داده‌های مرحله آزمون بوده که در هر دو

نتایج برآورد دمای خاک با بکارگیری روش فوق نشان داد که تابع عضویت مثلثی و قانون آموزش پس‌انتشار نتایج مناسبی نسبت

1- Triangular

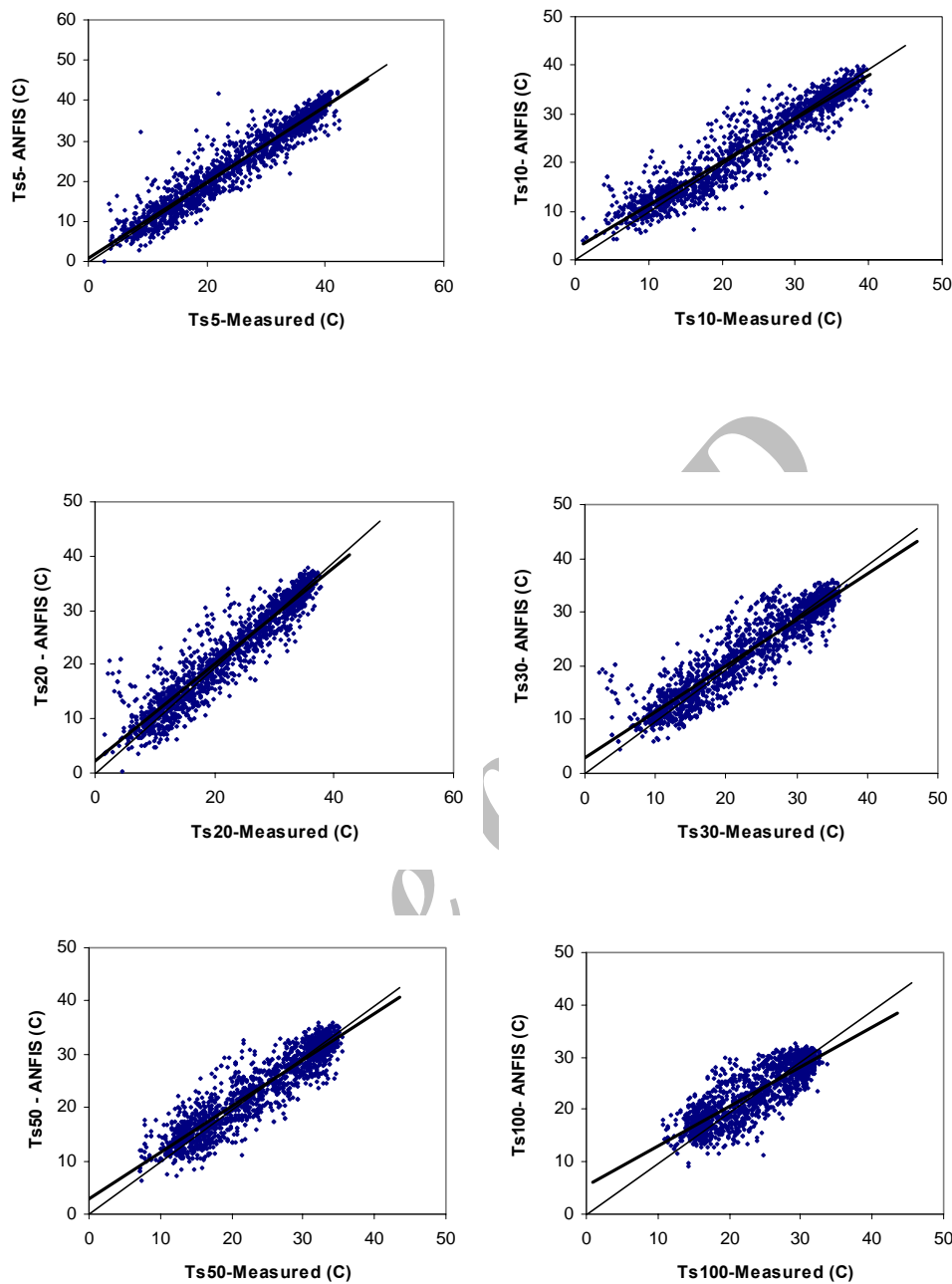
روش (عصبی-فازی و رگرسیون) یکسان در نظر گرفته شد تا مقایسه صحیح بین نتایج دو روش مذکور امکان پذیر باشد.

با انجام آزمون t با استفاده از نرم افزار MINTAB مشخص گردید که اختلاف بین نتایج شبکه عصبی-فازی و مدل رگرسیونی در برخی موارد در سطح ۰/۰۱ معنی دار نیست (تهران و زاهدان). اما در مجموع، مقایسه نتایج روش عصبی-فازی و مدل رگرسیونی در پیش بینی دمای خاک نشان داد که در کلیه ایستگاه ها و اعماق مختلف، روش عصبی-فازی از قابلیت بیشتری نسبت به روش رگرسیون چند متغیره برخوردار است، اگرچه این اختلاف ناچیز می باشد. این امر نشان می دهد که می توان روش ANFIS را به عنوان روشی نوین با دقت مطلوب جایگزین روش رگرسیون چند متغیره در پیش بینی دمای خاک در اعماق مختلف نمود. از آنجایی که این دقت برای کلیه اعماق خاک صادق است، مزیت روش عصبی-فازی را نسبت به روش رگرسیون تأیید می کند. مقایسه نتایج سه ایستگاه نشان می دهد که در ایستگاه زاهدان با اقلیم گرم خشک، نتایج برآورد دمای خاک از خطای کمتری برخوردار است. پس از زاهدان، ایستگاه تهران با اقلیمی کمی مرطوب تر نتایج بهتری نسبت به رامسر ارائه داده است. می توان بیان نمود که دقت پیش بینی دمای خاک به مقدار رطوبت خاک نیز وابسته است. تأثیر خشک بودن اقلیم و رطوبت ناچیز خاک در طول سال می تواند در حصول چنین نتیجه ای نقش داشته باشد. زیرا رطوبت خاک از جمله پارامترهای تأثیرگذار در مقدار دمای خاک، دامنه دمای خاک، زمان وقوع بیشینه و کمینه دمای خاک و سرعت انتقال حرارت در خاک می باشد. در اقلیم های

خشک، به دلیل بارندگی نسبتاً کم، مقدار رطوبت خاک نیز کاهش یافته که در این شرایط انتظار می رود دمای خاک تأثیر بیشتری از انرژی خورشید و T_{max} بگیرد و پیش بینی در این شرایط با خطای کمتر و دقت بیشتر صورت می گیرد. میانگین بارش سالانه در دوره مورد مطالعه (۱۵ ساله) در رامسر حدود ۱۲۳۰ میلی متر، در تهران ۲۳۰ میلی متر و در زاهدان ۷۰ میلی متر است. این مقادیر نشان می دهد که بالا بودن مقدار بارش و تعداد روزهای بارش، مرطوب بودن خاک را به دنبال داشته و تأثیر پذیری دمای خاک را از عوامل جوی تضعیف نموده و در نهایت موجب کاهش دقت در دماهای برآورد شده می شود. از طرفی، همان طور که جدول ۴ نشان می دهد قوی ترین همبستگی در برآورد دمای خاک در اقلیم مرطوب رامسر در عمق ۱۰۰ سانتی متر دیده می شود. در حالیکه بهترین همبستگی ها در دو اقلیم گرم خشک و گرم نیمه خشک در عمق های ۲۰ و ۳۰ سانتی متر به وقوع پیوسته است. این امر می تواند ناشی از تأثیرپذیری بیشتر لایه های بالایی (عمق کم) از بارش و رطوبت خاک باشد. با مبنای قرار دادن مقدار خطای میانگین مجذور مربعات خطا نیز، در مجموع با توجه به شاخص های آماری جدول ۴، توانایی شبکه عصبی-فازی در پیش بینی دمای خاک در زاهدان و تهران در عمق کمتر خاک نسبت به لایه های عمیق تر بهتر می باشد. در مجموع می توان هر دو روش عصبی-فازی و رگرسیون را در برآورد دمای خاک در کلیه اعماق خاک توانا دانست. هر چند مقدار R در اعماق بیشتر، کاهش می یابد (به دلیل کاهش تأثیر عوامل بیرونی) اما مقدار R به تنهایی نشان دهنده دقت همبستگی نبوده و به تنهایی در معرفی بهترین روش کافی نمی باشد (۱۳).

جدول ۵- عرض از مبدا و شیب خط رگرسیونی بین دمای خاک پیش بینی شده با شبکه ANFIS و مقادیر واقعی

ایستگاه	عمق خاک (cm)	R^2	عرض از مبدا	شیب خط
رامسر	۵	۰/۶۳	۱۰/۳۹	۰/۵۲
	۱۰	۰/۶۳	۱۰/۰۲	۰/۵۲
	۲۰	۰/۶۴	۹/۶۳	۰/۵۳
	۳۰	۰/۶۷	۸/۷۶	۰/۵۷
	۵۰	۰/۷۲	۷/۶۱	۰/۶۳
	۱۰۰	۰/۷۹	۶/۰۸	۰/۷۱
تهران	۵	۰/۸۹	۳/۲۷	۰/۸۸
	۱۰	۰/۸۹	۲/۴۵	۰/۹۰
	۲۰	۰/۸۸	۲/۰۸	۰/۹۲
	۳۰	۰/۸۹	۱/۹۶	۰/۹۳
	۵۰	۰/۸۹	۱/۹۵	۰/۹۳
	۱۰۰	۰/۸۳	۳/۳۴	۰/۸۶
زاهدان	۵	۰/۹۲	-۰/۸۲	۰/۹۴
	۱۰	۰/۹۱	۲/۲۲	۰/۹۰
	۲۰	۰/۸۹	۲/۱۵	۰/۸۹
	۳۰	۰/۸۶	۲/۹۷	۰/۸۶
	۵۰	۰/۸۶	۲/۹۲	۰/۸۷
	۱۰۰	۰/۷۳	۵/۴۰	۰/۷۶



(شکل ۳) - مقایسه نتایج پیش‌بینی دمای خاک در اعماق مختلف با شبکه ANFIS نسبت به مقادیر واقعی ثبت شده در ایستگاه زاهدان

برازش‌های ایستگاه زاهدان با توجه به نتایج مطلوب تر آن در شکل (۳) ارائه گردید. نتایج بقیه ایستگاه‌ها به صورت مدل رگرسیونی با ضریب تعیین (R^2) مربوطه در جدول (۵) درج شده است. لازم به ذکر است که نزدیک بودن شیب خط به عدد یک و پایین بودن عرض از مبدأ، از مشخصه‌های مدل برتر می‌باشد.

روند کاهش ضرایب r (کاهش دقت پیش‌بینی) در اعماق بیشتر بدست آمده در این پژوهش با نتایج نجفی مود و همکاران (۸) هم‌خوانی نشان می‌دهد. در این تحقیق مقایسه نتایج دمای خاک پیش‌بینی شده با شبکه عصبی-فازی با مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) برای هر سه منطقه انجام شد. اما به دلیل کاهش حجم مقاله، فقط

جدول ۶) - ضریب همبستگی (r) هر یک از پارامترهای هواشناسی با دمای خاک در سه منطقه مورد مطالعه

ایستگاه	پارامترهای هواشناسی	دمای خاک (درجه سانتی گراد)					
		5cm	10cm	20cm	30cm	50cm	100cm
تهران	U	-۰/۱۲۲	-۰/۱۱۸	-۰/۱۱	-۰/۰۸۹	-۰/۰۸۴	-۰/۰۳۲
	T _{min}	-۰/۸۴۹*	-۰/۸۶۱*	-۰/۸۷۵*	-۰/۸۸۲*	-۰/۸۸۳*	-۰/۸۷۶*
	T _{max}	-۰/۸۶۸*	-۰/۸۷۸*	-۰/۸۹*	-۰/۸۹۶*	-۰/۸۹۳*	-۰/۸۷۱*
	T	-۰/۸۶۵*	-۰/۸۷۷*	-۰/۸۸۹*	-۰/۸۹۶*	-۰/۸۹۵*	-۰/۸۷۵*
	RH	-۰/۶۵۸	-۰/۶۳۹	-۰/۶۳۴	-۰/۶۲۹	-۰/۶۱۶	-۰/۵۷۷
	n	-۰/۵۵۸	-۰/۵۶۰	-۰/۵۵۸	-۰/۵۵۴	-۰/۵۴۹	-۰/۵۱۹
رامسر	U	-۰/۰۳۲	-۰/۰۳۲	-۰/۰۳۲	-۰/۰۴۵	-۰/۰۵۵	-۰/۰۶۳
	T _{min}	-۰/۶۳۴	-۰/۶۳۲	-۰/۶۵۰	-۰/۶۸۰	-۰/۷۲۵	-۰/۷۷۸
	T _{max}	-۰/۵۹۲	-۰/۵۹۹	-۰/۶۱۶	-۰/۶۴۴	-۰/۶۹۰	-۰/۷۲۳
	T	-۰/۶۲۱	-۰/۶۲۸	-۰/۶۴۷	-۰/۶۷۷	-۰/۷۲۲	-۰/۷۷۷
	RH	-۰/۱۸۲	-۰/۱۸۲	-۰/۱۸۷	-۰/۱۹۷	-۰/۲۱۲	-۰/۲۳۰
	n	-۰/۲۱۲	-۰/۲۱۰	-۰/۲۱۲	-۰/۲۱۴	-۰/۲۲۱	-۰/۲۲۴
زاهدان	U	-۰/۰۴۵	-۰/۰۴۵	-۰/۰۳۲	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰	-۰/۰۵۵
	T _{min}	-۰/۸۶۰*	-۰/۸۶۰*	-۰/۸۶۳*	-۰/۸۲۷*	-۰/۸۲۹*	-۰/۷۲۱
	T _{max}	-۰/۹۰۱*	-۰/۸۹۵*	-۰/۹۰۷*	-۰/۸۸۷*	-۰/۸۹۹*	-۰/۸۳۵*
	T	-۰/۹۱۷*	-۰/۹۱۷*	-۰/۹۲۱*	-۰/۸۹۳*	-۰/۹۰۰*	-۰/۸۰۹
	RH	-۰/۶۳۸	-۰/۶۳۸	-۰/۶۴۶	-۰/۶۴۳	-۰/۶۶۷	-۰/۶۵۶
	n	-۰/۵۰۹	-۰/۵۰۹	-۰/۵۰۷	-۰/۵۱۳	-۰/۵۲۲	-۰/۵۱۸

*: معنی‌داری در سطح ۰/۰۵

نقش بسزایی دارد. به نظر می‌رسد در این ایستگاه رطوبت زیاد هوای اطراف بیرون خاک ابتدا موجب کاهش دامنه دمای هوا و به دنبال آن موجب کاهش نوسانات دمای خاک شده و لذا تأثیر پارامترهای هواشناسی را بر دمای خاک در اقلیم مرطوب کاهش می‌دهد. همچنین جدول (۶) نشان می‌دهد در دو ایستگاه زاهدان و تهران بیشترین همبستگی بین دمای خاک و پارامتر میانگین دمای هوا (T) برقرار می‌باشد. اما در ایستگاه رامسر بیشترین مقدار ضریب همبستگی بین دمای خاک و حداقل دمای هوا (T_{min}) دیده می‌شود. علت این امر این است که کمینه دمای هوا تابع شدت تابش از دست رفته شبانه انرژی خاک (Night-time radiative cooling) می‌باشد که تحت این شرایط تأثیر پذیری T_{min} از شرایط حرارتی محیط خاک بیشتر از محیط هوا می‌باشد.

مقایسه نتایج ایستگاه رامسر با نتایج بدست آمده توسط جعفری گلستانی و همکاران (۴) که در ایستگاه مرطوب ساری به مدت یک سال (۸۶-۱۳۸۵) برای عمق‌های ۷ و ۲۰ سانتی متری انجام شده نشان داد که همبستگی بین دمای هوا با دمای خاک در عمق ۲۰ سانتی متری توسط نامبردگان (۰/۹ > r) بالاتر از نتایج تحقیق حاضر (۰/۶۵ = r) است. نتایج نامبردگان تا حدودی قابل تأمل است، زیرا بر اساس یافته‌های تحقیق حاضر در بهترین حالت (برای ایستگاه خشک زاهدان) ضرایب همبستگی بین میانگین دمای هوا و دمای ژرفای ۲۰

جهت بررسی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای هواشناسی در برآورد دمای خاک با برازش مدل رگرسیون خطی، مقدار همبستگی بین هر پارامتر هواشناسی با دمای خاک در عمق‌های مختلف بدست آمد. جدول (۶) مقدار ضریب همبستگی بین پارامترها را نشان می‌دهد. همان طور که جدول (۶) نشان می‌دهد در هر سه منطقه بیشترین مقدار r بین دمای هوا و دمای خاک و ضعیف‌ترین همبستگی بین دمای خاک و سرعت باد می‌باشد. این نتیجه درجه تأثیر پارامتر دمای هوا را در برآورد مقدار دمای خاک می‌رساند. مقایسه میزان r بین پارامترهای هواشناسی و دمای خاک نشان می‌دهد که در ایستگاه زاهدان مقادیر r نسبت به دو ایستگاه دیگر بیشتر می‌باشد. این امر می‌تواند ناشی از تأثیر معکوس رطوبت هوا، رطوبت خاک، مقدار بارش و افزایش تعداد روزهای بارش بر مقدار همبستگی‌ها باشد. همان گونه که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، در رامسر، بیشترین مقدار ضریب r بین دمای خاک و هر یک از پارامترها، در عمق ۱۰۰ سانتی متری به وقوع پیوسته است. بالاتر بودن ضرایب همبستگی عمق ۱۰۰ سانتی متر (نسبت به سایر اعماق) در ایستگاه رامسر احتمالاً بدلیل رطوبت کمتر خاک در این عمق نسبت به سایر اعماق می‌باشد. در لایه‌های کم عمق، به دلیل مرطوب بودن خاک در رامسر، تأثیر پذیری دمای خاک از شرایط جوی کمتر می‌باشد. شرایط آب و هوایی خاص حاکم در این منطقه مرطوب در ایجاد چنین نتیجه‌ای

ایستگاه زاهدان و تهران دقت پیش‌بینی دمای خاک در لایه‌های فوقانی (۵ و ۱۰ سانتی متری) تا ۱۰ درصد بیشتر از عمق ۱۰۰ سانتی متری می‌باشد.

از آنجایی که موضوع پیش‌بینی دمای خاک توسط مدل‌های هوشمند و روابط رگرسیونی در آغاز راه است، لذا نویسندگان این پژوهش بر خود لازم می‌دانند به احتمال خطاهای موجود و اثر آن در دقت نتایج بدست آمده اشاره نمایند.

به طور مثال، استخراج میانگین‌های دمای شبانه روزی خاک فقط از ۳ نوبت اندازه‌گیری (۱۲:۳۰، ۱۸:۳۰، ۲۴:۳۰) بدست آمده است، در حالیکه هیچگونه دمای شبانه ای در آن منظور نگردیده است. این در حالی است که برخی پارامترهای تأثیرگذار بر دمای خاک مانند میانگین روزانه دمای هوا و میانگین دمای حداقل هوا در برگیرنده اندازه‌گیری‌های شبانه نیز می‌باشند. این امر بر دقت پیش‌بینی‌ها اثرگذار خواهد بود. همچنین تأخیر زمانی ایجاد شده در انتقال حرارت به اعماق خاک باعث می‌گردد که زمان وقوع حداکثر و حداقل دمای خاک در اعماق زیاد با پارامترهای متناظر دمای هوا بطور همزمان اتفاق نیافتد. این امر نیز ممکن است دقت نتایج بدست آمده را تحت تأثیر قرار دهد. در انتها، پیشنهاد می‌گردد با استفاده از داده‌های ساعتی بدست آمده از ایستگاه‌های خودکار هواشناسی (Data logger)، دقت برآوردهای بدست آمده را بهبود بخشید. همچنین توصیه می‌شود در مطالعات بعدی تأثیر دیگر پارامترهای هواشناسی نظیر میزان ابرناکی، تعداد روزهای بارش و رطوبت خاک در مقدار دمای خاک برآورد شده، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی وقوع پارامترهای دمایی در نظر گرفته شود.

سانتی متری از مرز ۰/۹۲. فراتر نمی‌رود (جدول ۶). علت این اختلاف ممکن است به دلیل متفاوت بودن بافت خاک، نوع خاک و کوتاهی طول دوره آماری (یک سال) در تحقیق نامبردگان باشد. ضرایب همبستگی پیشنهادی توسط نجفی مود و همکاران (۸) که برای یک دوره یک ساله (۱۳۸۶) در ایستگاه‌های سرد نیمه خشک خراسان رضوی انجام شده است، با نتایج تحقیق حاضر سازگاری بهتری نشان می‌دهد، زیرا بر اساس نتایج نامبردگان میانگین ضریب همبستگی بین میانگین دمای هوا و دمای ژرفای ۲۰ سانتی متری خاک ۰/۸۲ اعلام شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از پارامترهای میانگین دمای حداقل، میانگین دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد به عنوان ورودی شبکه ANFIS و مدل‌های رگرسیونی استفاده گردید. مقادیر دمای خاک پیش‌بینی شده توسط هر یک از روش‌ها در مقابل مشاهدات واقعی دمای خاک و با استفاده از معیارهای آماری (RMSE, MPE) تحت آزمون اعتبارسنجی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که شبکه ANFIS در پیش‌بینی دمای خاک بطور متوسط ۴ درصد دقیق‌تر از مدل‌های رگرسیونی عمل می‌کند. همچنین، دقت پیش‌بینی دمای خاک در دو ایستگاه زاهدان و تهران (اقلیم خشک) به ترتیب ۱۲ درصد و ۴/۵ درصد بهتر از رامسر (اقلیم مرطوب) بود. مقدار ضریب همبستگی (۴) بین دمای خاک پیش‌بینی شده توسط شبکه ANFIS و مدل رگرسیون انتخابی با دمای واقعی خاک نشان داد که با افزایش عمق خاک مقدار همبستگی کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که در اقلیم مرطوب رامسر با افزایش عمق خاک، دقت پیش‌بینی تا حد ۱۸ درصد قابل افزایش است، در حالیکه در دو

منابع

- ۱- ادیب عباسی م. ۱۳۸۵. بررسی روابط بین رژیم دمایی اعماق خاک با دمای هوا (اسکرین) و تعیین عمق یخبندان در استان کردستان. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۲- ثنائی نژاد ح، ادیب عباسی م، موسوی بایگی م، و حیدری گندمان م. ط. ۱۳۸۷. 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، جلد ۲۲، ۲۵-۳۳.
- ۳- دزفولی ک. ا. ۱۳۸۴. اصول تئوری فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسائل مهندسی آب، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد امیر کبیر. چاپ اول.
- ۴- جعفری گلستانی م، رائینی سرجاز م. و ضیاء تبار احمدی م. خ. ۱۳۸۷. برآورد دمای ژرفای خاک با بهره‌گیری از روش تجزیه منحنی و همبستگی‌های رگرسیونی برای شهرستان ساری. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی: جلد ۱۴، شماره ۵.
- ۵- حسینی س. م. ط، سی و سه مرده ع. فتحی پ. و سی و سه مرده م. ۱۳۸۶. کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره در برآورد عملکرد گندم دیم منطقه قروه استان کردستان. پژوهش کشاورزی: آب و خاک و گیاه، جلد هفتم، شماره اول: ۴۱-۵۴.
- ۶- سلطانی ف. ۱۳۸۵. بهره‌برداری بهینه کمی- کیفی از مخازن سدها به کمک تلفیق سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی و الگوریتم ژنتیک.

- پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی آب. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۷- مهدویان م. ۱۳۷۸. پیش‌بینی محلی دمای حداقل شبانه‌روزی در منطقه کرج، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- ۸- نجفی مود م.ح، علیزاده ا، محمدیان ا. و موسوی ج. ۱۳۸۷. بررسی رابطه دمای هوا و دمای اعماق مختلف خاک و برآورد عمق یخبندان (مطالعه موردی استان خراسان رضوی). مجله علمی-پژوهشی آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۲. شماره ۲. ص. ۴۵۶-۴۶۶.
- ۹- مساعدی ا. و کاهه م. ۱۳۸۷. بررسی تأثیر بارندگی بر عملکرد محصولات گندم و جو در استان گلستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد ۱۵، شماره ۴.
- 10- Aldridge R., and Cook F.J. 1983. Estimation of soil temperatures at 0.1m and 0.3m depths. New Zealand Soil Bureau Scientific Report. 62: 18p.
- 11- Ghuman B.S. and Lal R. 1981. Predicting diurnal temperature regimes of the central Appalachians. Soil Science. 132: 247-252.
- 12- Hanks R.J., Austin D.D., and Ondrechen W.T. 1971. Soil temperature estimation by a numerical method. Proc Soil Science Society Am . 35 (5): 665-667.
- 13- Lang H. and Braun L. 1985. Schmelzwasser-Abfluss-Modelle für Schnee- und Gletschergebiete, Mitteilungen der Arbeitsgruppe. Schneedecke und Hydrologie. 1: 40-45.
- 14- Maclean Jr S.F., Ayres M.P. 1985. Estimation of soil temperature from climatic variables at Barrow, Alaska, USA. Arctic & Alpine Research. 17: 425-432.
- 15- McBride G. 2005. Using statistical methods for water quality management. John Wiley and Sons.
- 16- Meikle R.W., and Gilchrist A.J. 1983. A mathematical method for estimation of soil temperatures in England and Scotland. Agricultural Meteorology. 30(3): 221-225.
- 17- Razi M.A., and Athappilly K. 2005. A comparative predictive analysis of neural networks (NNs), nonlinear regression and classification and regression tree (CART) models. Expert Systems with Applications. 29: 65-74.
- 18- Shaykewich C.F. 1980. Estimation of Manitoba soil temperatures from atmospheric meteorological measurements (Pinawa). Canadian Journal of Soil Science. 60 (2): 299-309.
- 19- Summers L.E., Glimour C.M., Wildung R.E., and Beck S.M. 1981. The effect of water potential on decomposition processes in soils, in water potential relation in soil microbiology. Edited by J.E. Parr, W.R. Gardner, and W.R. Elliot, SSSA Sep. Publ. 9: 97-117.
- 20- Yang H., Griffiths P.R., and Tate J.D. 2003. Comparison of partial least squares regression and multi-layer neural networks for quantification of nonlinear systems and application to gas phase Fourier transform infrared spectrum. Analytica Chimica Acta. 489: 125-133 Reimer

A model Comparison Between Predicted Soil Temperatures Using ANFIS Model and Regression Methods in Three Different Climates

A.A. Sabziparvar^{1*} - H. Zare Abyaneh² – M. Bayat Varkeshi³

Abstract

Soil temperature is one of the key parameters affecting most hydrologic and agricultural processes. Therefore, its measurement and prediction is very crucial. So far, the statistical regression methods have been used for estimation of soil temperature for specific location encountering with lack or shortage of data. In this work, soil temperature data are estimated at six different depths for three typical climates (Zahedan, Tehran, Ramsar) by a new approach namely Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), and the results are compared with those of estimated by regression methods. In addition, the most important meteorological parameters (maximum temperature, minimum temperature, mean daily temperature, relative humidity, sunshine hour, and wind speed) which influence soil temperature at the study sites are used during the 15-years period (1992-2006) of study. The comparison of soil temperature data predicted by ANFIS and regression methods indicated that the performance of ANFIS model is 4% more accurate than regression methods. It was found that the accuracy of prediction using ANFIS model for arid climates of Zahedan and Tehran was 12% and 4.5% better than Ramsar (humid), respectively. The statistical comparison of the estimations derived by ANFIS model and the observed soil temperature data of drier climates showed that the coefficients of correlation (r) are reduced (up to 10%) for deeper layers. In contrast, for the humid climate of Ramsar, the model accuracy for near surface layers (5 and 10 cm) was up to 18% less than deeper layers (100 cm).

Keywords: Soil temperature, Regression models, ANFIS, Arid climate, Humid climate

1,2,3 - Associate Professor, Assistant Professor and M.Sc. Student , College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan

(* - Corresponding author: Email: swsabzi@basu.ac.ir)