



مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد نوزدهم، شماره چهارم، ۱۳۹۱

http://jwsc.gau.ac.ir

مدل‌سازی دمای اعماق خاک به کمک پارامترهای هواشناسی

* وحید یزدانی^۱، بیژن قهرمان^۲، گلاره فراهی^۱ و حدیثه نوری^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، استاد گروه مهندسی آب،

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۲/۹

چکیده

یکی از ویژگی‌های عمده خاک درجه حرارت آن می‌باشد به طوری که رشد و نمو گیاه و تکوین فرآیندهای خاک‌سازی در گرو تغییرات آن می‌باشند. در این راستا دمای سطح و ژرفای خاک به صورت پیوسته اندازه‌گیری نمی‌شوند، بنابراین از نظر داده‌های دمای خاک با کمبود آماری رو به رو هستیم، این در حالی است که پارامترهای هواشناسی به طور مرتب اندازه‌گیری می‌شوند. با توجه به این که رابطه‌های ارایه شده در پژوهش‌های قبلی از دقت چندانی برخوردار نمی‌باشند، در این مقاله سعی بر آن است که رابطه‌ای با دقت مناسب و براساس مقایسه روش‌های رگرسیونی و شبکه عصبی با استفاده از داده‌های روزانه هواشناسی سه ایستگاه مشهد، سبزوار و شیراز معرفی گردد. بررسی ضرایب همبستگی مشخص نمود که دمای هوا، تبخیر و تعرق و تبخیر به ترتیب بیشترین ضریب همبستگی را با دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متر دارند. با توجه به ضرایب همبستگی و نتایج دو مدل بهترین پارامترهای ورودی به ترتیب دمای هوا، تبخیر و تعرق، رطوبت و باران مؤثر با تاخیر زمانی یک روز در نظر گرفته شد. رگرسیون درجه دوم تک‌متغیره دارای کمترین دقت بود و در مقابل بالاترین دقت در شبکه عصبی مشاهده گردید. ضمن این که رگرسیون چندمتغیره نیز از دقت مناسبی برخوردار بود. در محاسبه عمق یخبندان مشاهده شد که رابطه فنلاندی از دقت قابل قبولی برخوردار است، ضمن این که با در نظر گرفتن یک پارامتر اضافی مربوط به عمق باران در روزهای یخبندان به نمای معادله فنلاندی، معادله بالا بهبود یافت. حداکثر خطای برآورد دمای خاک از رابطه پیشنهادی ۱۵ درصد در ایستگاه شیراز بوده و میزان خطا در مشهد و سبزوار به ترتیب ۶/۰ و ۲ درصد مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هواشناسی، دمای خاک، رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی، عمق نفوذ یخبندان

* مسئول مکاتبه: v.yazdany@yahoo.com

مقدمه

گونه‌های مختلف گیاهی به دماهای متفاوتی نیازمندند و باردهی آن‌ها در محدوده معینی از درجه حرارت به بیش‌ترین مقدار می‌رسد (علیزاده، ۲۰۰۲). علاوه بر فرآیندهایی مانند تبخیر و تعرق فرآیندهای دیگری مانند، تهویه خاک، جوانه‌زنی، رشد گیاه، توسعه ریشه‌ها و فعالیت‌های میکروبی درون خاک نیز تابع دمای خاک هستند. همچنین درجه حرارت خاک به‌عنوان یک عامل، به‌صورت قوی و مؤثر در فرآیندهای بحرانی مورد استفاده قرار گرفته و در توازن انرژی سطحی به‌عنوان یک منبع ذخیره و مؤثر بر اتمسفر نقش به‌سزایی دارد (سومرس و همکاران، ۱۹۸۱). از طرفی در هر لحظه گرمای خاک از افقی به افق دیگر متفاوت بوده و در طول روز، ماه و سال نوسان می‌کند. نوع ریشه و رویش آن نیز تابعی از درجه حرارت خاک است. درجه حرارت خاک در طول سال ثابت نبوده و بسته به ساعات روز، فصل و سال تغییرات ادواری یا واره‌ای دارد. نوسانات درجه حرارت در هوا به سطح خاک و در نهایت به اعماق خاک منتقل می‌شود ولی چون ضریب پخشیدگی گرما در خاک معمولاً بین $0/01-0/12$ سانتی‌مترمربع در ثانیه تغییر کرده و ناچیز می‌باشد، بنابراین دامنه نوسان گرما که خاستگاه آن هوا است، با عمق خاک کاهش می‌یابد (بای‌بردی، ۲۰۰۳). در این راستا پارامترهای مهمی در ایستگاه‌های هواشناسی به‌طور مداوم اندازه‌گیری می‌شوند، که شامل دمای هوای درون پناهگاه، سرعت باد، رطوبت هوا، مقدار باران، فشار بخار اشباع و... است، در حالی که دمای سطح و ژرفای خاک به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری نمی‌شوند. بنابراین، از نظر داده‌های دمای خاک با کمبود آماري رو به رو هستیم. از آن‌جا که رژیم دمایی خاک، تأثیر مستقیمی بر رشد گیاهان، گوناگونی آن‌ها و فعالیت‌های زیست‌شناختی خاک دارد، بازسازی این کمبود آماري از اهمیت بالایی در بررسی‌های زیست‌اقلیمی و کشاورزی برخوردار است (جعفری‌گلستان و همکاران، ۲۰۰۷). بررسی تغییرات دمای خاک در بروز پدیده سرمازدگی در محصولات زراعی و باغی بسیار مهم می‌باشد. همچنین به‌منظور اطلاع‌رسانی به کشاورزان و مروجان کشاورزی در زمینه میزان تغییرات دمای خاک منطقه باید اطلاعات درستی از میزان دما در اعماق مختلف داشته باشیم. به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل نوسانات زیاد دمایی و تبخیر، بررسی روند تغییرات دمای اعماق خاک با استفاده از پارامترهای هواشناسی ضروری و لازم به‌نظر می‌رسد.

رسانندگی گرمایی خاک توسط عوامل عادی هواشناسی و محیطی مانند برف، پوشش گیاهی و گرمای نهان تبخیر مهار می‌شود (پولاک و همکاران، ۲۰۰۵) بنابراین، رسانایی حرارتی خاک و هوا به‌دلیل

عوامل هواشناسی و ویژگی‌های فیزیکی خاک تغییر می‌کند (هیراوا و کاسابوچی، ۲۰۰۰). همان‌طور که در تعریف بالا نهفته است، لازمه ارزیابی دما در اعماق مختلف خاک و ارتفاع‌های مختلف هوا آگاهی از خصوصیات فیزیکی آن‌ها است. بنابراین در صورت نبود پارامترهای فیزیکی موردنظر، دست‌یابی به چگونگی توزیع دما در پروفیل خاک میسر نخواهد بود و نیاز به استفاده از روش‌های ساده‌تر و در عین حال با دقت مناسب احساس می‌شود. تاکنون بررسی‌های متعددی در خصوص توزیع قائم دما در پروفیل خاک انجام شده است که هر کدام از برتری‌ها و عیب‌هایی برخوردار می‌باشند.

رایت و کرو (۲۰۰۰) اثر دمای هوای محیط، رطوبت و وضع محل بر دمای خاک در محیط نزدیک و درون جنگل را با استفاده از دمای ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، ژوئیه، آگوست و دسامبر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر این مطلب بود که میانگین دمای سالانه هوا با میانگین دمای سالانه خاک از همبستگی خوبی برخوردار هستند. در مطالعه‌ای دیگر به این اشاره شده است که دمای خاک در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز که خاک یخ‌زده نیست، با یک پسماند زمانی (تأخیر فاز) از دمای هوای سطح خاک پیروی می‌کند، در صورتی که در فصل زمستان، به دلیل پوشش برف و گرمای نهان تبخیر رها شده، این انتقال گرما رخ نمی‌دهد، به بیانی دیگر، چنین همبستگی در فصل زمستان دیده نشده است (بلترامی، ۲۰۰۱). اما باید اشاره نمود که دو مطالعه بالا به رابطه‌ای خاص بین دمای هوا و دمای خاک منجر نشده است. تجزیه منحنی و همبستگی‌های رگرسیونی دمای ژرفای ۷ و ۲۰ سانتی‌متر خاک توسط دمای هوا در ارتفاع ۱/۸ متری از سطح زمین در منطقه ساری نشان داد که ارتباط بین دمای هوا و ژرفای خاک در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است (جعفری‌گلستان و همکاران، ۲۰۰۷). نجفی‌مود و همکاران (۲۰۰۸) رابطه دمای هوا و دمای اعماق خاک را در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر مناسب بودن یک معادله رگرسیونی درجه دوم برای هر عمق خاک بود. در این دو پژوهش نیز رابطه به‌دست آمده از دقت کافی برخوردار نبوده و در بهترین حالت ضریب همبستگی به‌ترتیب برای پژوهش اول و دوم ۰/۹ و ۰/۷ به‌دست آمد، ضمن این‌که مقایسه نسبت به خط ۱:۱ گویای دقت کم این رابطه‌ها هستند.

تامسزاک و شاتزل (۲۰۰۱) روابط دمای هوا (ارتفاع ۱/۵ متری) و خاک (ژرفای ۵ و ۲۰ سانتی‌متری) را طی فصل زمستان در ایالت میشیگان آمریکا در مناطق جنگلی و زراعی بررسی نمودند. آن‌ها بیان داشتند که دمای عمق خاک کم‌تر متأثر از افت و خیزهای دمای هوا می‌باشد و این به دلیل عایق‌بندی ژرفای خاک توسط لایه‌های بالایی است. بلترامی و کلمن (۲۰۰۳) با بهره‌گیری از تئوری انتقال گرمای

زمین- هوا تنها به صورت رسانایی، به بررسی روابط طولانی مدت و کوتاه مدت میان دمای زمین و هوا در زمین‌های کشاورزی و جنگلی کانادا پرداختند. بررسی‌های آنان نشان داد که در کوتاه مدت این مدل‌ها پاسخ قابل قبولی را ارائه نمی‌دهند، اما در مقیاس ۳۰ ساله نتایج مدل بسیار دقیق هستند. رابطه ارائه شده در این پژوهش نیز به دلیل پیچیدگی و پارامترهای ورودی زیاد، چندان جنبه کاربردی نخواهد داشت. به خصوص این که رابطه بالا برای استفاده در هر منطقه نیاز به واسنجی دارد.

در رابطه با عمق نفوذ یخبندان باید اشاره نمود که در طی پژوهش‌های انجام شده، کمبود ارائه یک مدل ساده و یا ارزیابی مدل‌های موجود خودنمایی می‌کند. رهنمایی و همکاران (۲۰۰۸) تنها تأثیر رطوبت و بافت خاک را بر پیش‌روی عمق یخبندان بررسی کردند. فلرچینگر و ساکستون (۱۹۸۹) نشان دادند که دمای متوسط سالانه زمین با افزایش عمق، زمانی که هدایت حرارتی خاک در حالت انجماد نسبت به حالت غیرمنجمد بیش‌تر است، کاهش می‌یابد و عمق نفوذ یخبندان در طی فصل‌های یخبندان به خصوصیات ساختاری برف بستگی دارد. فلرچینگر و هانسون (۱۹۸۹) بیان کردند که مدل گرمای خاک و آب^۱ عمق یخ‌زدگی خاک را در ۳ تراز ارتفاعی به‌طور دقیق شبیه‌سازی می‌کند. همچنین اشاره داشتند کم‌ترین عمق یخ‌زدگی در مناطق مرتفع‌تر و سردتر وجود دارد. خلیلی و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی برای بررسی اعتبارسنجی شاخص یخبندان^۲ در تعیین عمق نفوذ یخبندان در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران (شهرکرد، ارومیه و یزد) اذعان کردند که روش آمریکایی برای عرض‌های جغرافیایی میانی از سایر روش‌ها مناسب‌تر است. نجفی‌مود و همکاران (۲۰۰۸) نیز در مطالعه‌ای مشابه در استان خراسان روش فنلاندی را به‌عنوان روشی با دقت بالا ارزیابی کردند.

روش‌های سری فوریه، رگرسیون چندمتغیره خطی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، معادله‌های موازنه انرژی و سیستم اطلاعات جغرافیایی در زمره روش‌های بررسی رژیم دمایی سطح و اعماق مختلف خاک می‌باشند (ادیب‌عباسی، ۲۰۰۶). در بیش‌تر روش‌های ذکر شده، پارامترهای پایه دمای هوا و رطوبت خاک هستند. در این راستا ادیب‌عباسی (۲۰۰۶) طی بررسی‌های خود توانست روابط ساعتی، روزانه و ماهانه دمای اعماق خاک با دمای اسکرین و رطوبت خاک را تعیین کند. به‌نظر می‌رسد اندازه‌گیری دمای خاک نسبت به اندازه‌گیری رطوبت خاک راحت‌تر است. گومان و لال (۱۹۸۲) با استفاده از روش سری فوریه و مقایسه نتایج آن با نیم‌رخ‌های اندازه‌گیری شده دمای خاک به پیش‌بینی دمای روزانه خاک در یک منطقه استوایی پرداختند. نتیجه این مطالعه نشان داد که بین مقادیر دمای

1- Soil Heat and Water

2- Air Freezing Index

اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده از سری فوریه در عمق ۱۳ سانتی‌متری خاک همبستگی خوبی برقرار است. با توجه به گسترش ریشه گیاهان به اعماق بیش از ۱۳ سانتی‌متر نتایج به دست آمده از مطالعه گومان و لال (۱۹۸۲) چندان جنبه کاربردی ندارد. سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه‌ای که بر روی برآورد دمای خاک با استفاده از رگرسیون چندمتغیره انجام دادند، با احتساب پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه، میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل به‌ترتیب در بهترین و بدترین حالت به ضریب همبستگی ۰/۹۴ در اعماق ۲۰-۵ سانتی‌متری ایستگاه زاهدان و ۰/۶۴ در عمق ۵ سانتی‌متر ایستگاه رامسر دست یافتند. در پژوهشی دیگر سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از دمای هوا، رطوبت هوا، فشار بخار اشباع و تابش خورشیدی اقدام به برآورد دمای اعماق مختلف خاک در اقلیم گرم و نیمه‌خشک نمودند. نتایج آن‌ها بیانگر تغییرات R^2 بین ۰/۹۴ (عمق ۵ سانتی‌متر) تا ۰/۷۳ (عمق ۱۰۰ سانتی‌متر) بوده و تغییرات RMSE نیز بین ۲/۷۵-۲/۶۲ است که در مقایسه با نتایج این پژوهش (ایستگاه شیراز) بیش‌تر می‌باشد. از آنجایی‌که مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت از جمله روزانه از اهمیت زیادی نسبت به مقیاس‌های زمانی طولانی‌مدت برخوردار می‌باشند، بنابراین در این پژوهش ارتباط بین پارامترهای هواشناسی در ارتفاع ۲ متری و دمای خاک در ژرفای ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری (در مقیاس روزانه) با استفاده از رگرسیون خطی، رگرسیون خطی چندمتغیره و شبکه عصبی-مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. هدف این پژوهش ارایه مدلی ساده به‌منظور برآورد دمای خاک با بهره‌گیری از مدل‌های آماری بالا و ارزیابی و بهبود روابط مورد استفاده در برآورد عمق نفوذ یخ‌بندان است. برای این منظور از داده‌های دمای هوای پناهگاه، باران، سرعت باد، رطوبت نسبی، فشار بخار اشباع و دمای اعماق یاد شده در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مشهد، شیراز و سبزوار استفاده شد. لازم به ذکر می‌باشد که انتخاب ایستگاه‌های بالا به‌دلیل قرارگیری آن‌ها در ناحیه نیمه‌خشک بوده است. در مناطق با اقلیم نیمه‌خشک، نوسانات دمایی و تبخیر بیش‌تر است. در انتها مدل مناسب از طریق روش اعتبارسنجی متقاطع انتخاب خواهد شد.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده: در این مقاله به‌منظور تعیین بهترین رابطه بین پارامترهای دمای هوای پناهگاه، باران، سرعت باد، رطوبت نسبی، فشار بخار اشباع و دما در اعماق خاک، از داده‌های اندازه‌گیری شده در سه ایستگاه مشهد، سبزوار و شیراز استفاده شد. داده‌های مورد استفاده شامل مقدار دما در اعماق ۵، ۱۰،

۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر، دمای هوا، سرعت باد، رطوبت، فشار بخار اشباع و باران بود که از سازمان هواشناسی در شهرهای مشهد، شیراز و سبزوار دریافت شد. لازم به ذکر است که همه پارامترهای هواشناسی در ارتفاع ۲ متری اندازه‌گیری شده‌اند. داده‌های بالا به صورت روزانه و طی ۸ نوبت در روز در ساعات ۰، ۳، ۶ و ۹ صبح، ۱۲ ظهر و ۱۵، ۱۸ و ۲۱ عصر در ایستگاه‌های سینوپتیک بالا برداشت و اندازه‌گیری شده است. ضمن این‌که برای انجام این پژوهش از پارامترهای بالا میانگین‌گیری شد. داده‌های بالا در طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۰۹ (مشهد و سبزوار) و سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۰۵ (شیراز) برداشت شده‌اند. جدول ۱ میانگین روزانه داده‌های مورد استفاده را در طی سال‌های مورد بررسی به تفکیک ایستگاه نشان می‌دهد. همان‌طورکه در جدول ۱ نیز مشخص است، کم‌ترین میانگین دما و بیش‌ترین رطوبت نسبی مربوط به مشهد می‌باشد. میانگین بارش و میانگین دما در اعماق مختلف ایستگاه شیراز بیش‌تر از دو ایستگاه دیگر است، این افزایش دما در اعماق امکان دارد به دلیل بیش‌تر بودن دمای هوا و مقدار بارش (به‌عنوان رطوبت خاک) نسبت به دو ایستگاه دیگر باشد. بنابراین در این صورت انتقال گرما به اعماق خاک بهتر صورت می‌گیرد.

جدول ۱- میانگین روزانه پارامترهای هواشناسی در طی سال‌های مورد مطالعه (۱۹۹۲-۲۰۰۹) در ایستگاه سبزوار و مشهد و ۱۹۹۶-۲۰۰۵ برای ایستگاه شیراز.

پارامتر	ایستگاه سینوپتیک	شیراز	مشهد	سبزوار
دما در اسکرین (درجه سانتی‌گراد)	۱۸/۹	۱۵/۵	۱۸	
رطوبت نسبی (درصد)	۳۸	۵۱	۴۱	
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۴/۳	۳/۲	۴/۱	
باران (میلی‌متر)	۰/۹۶	۰/۶	۰/۵	
اقلیم*	نیمه‌خشک	نیمه‌خشک	نیمه‌خشک	
بافت خاک**	لومی رسی	لومی رسی	لومی رسی	
دما در عمق ۵ سانتی‌متر***	۲۲/۸	۱۹/۱	۱۹/۶	
دما در عمق ۱۰ سانتی‌متر	۲۲/۴	۱۸/۸	۱۹	
دما در عمق ۲۰ سانتی‌متر	۲۱	۱۷/۸	۱۸/۵	
دما در عمق ۳۰ سانتی‌متر	۲۱/۲	۱۷/۶	۱۸/۵	
دما در عمق ۵۰ سانتی‌متر	۲۱/۷	۱۸/۲	۲۱/۲	
دما در عمق ۱۰۰ سانتی‌متر	۲۱/۳	۱۸/۲	۲۱	

* براساس طبقه‌بندی جدید یونسکو (غفاری و همکاران، ۲۰۰۴)، ** بافت خاک ایستگاه طبق رده‌بندی خاک در سیستم یونیفاید و *** اندازه‌گیری دما در اعماق مختلف خاک در داخل ایستگاه صورت گرفته است.

با در نظر گرفتن میزان بارش و مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع (رابطه پنمن مانیتث- فائو ۵۶)، تا حدودی تأثیر مقدار رطوبت به منظور به دست آوردن رابطه بهینه مورد بررسی قرار گرفت. مقدار تبخیر و تعرق مرجع نیز توسط نرم افزار Ref-ET محاسبه گردید. به طور معمول در طی بارندگی تمام باران در خاک نفوذ نخواهد کرد و تنها بخشی از آن که به عنوان باران مؤثر شناخته می شود در منطقه توسعه ریشه نفوذ کرده و باعث مرطوب شدن این منطقه می گردد (گروه کار کمیته ملی، ۲۰۰۳). بنابراین با استفاده از رابطه های ۱ و ۲ مقدار باران مؤثر نیز محاسبه گردید.

$$E_r = 0.6R - 1 \quad R < 7 \quad (\text{میلی متر}) \quad (1)$$

$$E_r = 0.8R - 2/4 \quad R < 7 \quad (\text{میلی متر}) \quad (1)$$

که در آن ها، E_r و R به ترتیب مقدار باران مؤثر و بارندگی (میلی متر) می باشند. باید متذکر شد که رابطه های بالا از طرف سازمان فائو برای مناطق خشک و نیمه خشک ارائه شده است (گروه کار کمیته ملی، ۲۰۰۳)، بنابراین برای ایستگاه های مورد بررسی مناسب هستند. همچنین باید اشاره داشت که مقادیر کم تر از صفر نیز همانند مقادیر صفر به عنوان نداشتن باران مؤثر در نظر گرفته می شود. با کم کردن تبخیر و تعرق از باران تجمعی روز قبل، مقدار رطوبت (باران) موجود در خاک برای روز مورد نظر به دست آمد که به عنوان مقدار رطوبت در آن روز در نظر گرفته شد. در این صورت باران با یک روز تاخیر زمانی در محاسبات وارد شد.

برای پیش بینی دمای اعماق خاک توسط پارامترهای هواشناسی از رگرسیون خطی، رگرسیون خطی چندمتغیره و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده به طوری که پارامترهای هواشناسی به عنوان ورودی و دما در اعماق مختلف به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. برای انتخاب پارامترهای بهینه ورودی ابتدا ضریب همبستگی پیرسون بین دمای سطح خاک (دما در عمق ۵ سانتی متر به عنوان دمای سطح خاک در نظر گرفته شد) و پارامترهای هواشناسی محاسبه گردید و پارامترهایی که از ضریب همبستگی بالایی برخوردار بودند به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که برای محاسبه عمق نفوذ یخبندان نیز از روش های نروژی، فنلاندی، آمریکایی و روش استاندارد^۱ استفاده شد (نجفی مود و همکاران، ۲۰۰۸).

معیارهای ارزیابی: در این پژوهش برای ارزیابی کارایی مدل های رگرسیونی و عصبی در برآورد دمای ژرفای خاک، از معیارهای ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربع خطا^۲ و میانگین خطای مطلق^۳ استفاده گردید. رابطه های مربوط به این آماره ها به صورت زیر می باشد:

1- SNIPLL-15-74

2- RMSE

3- MAE

$$R^r = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2 \right)} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (۴)$$

که در آن‌ها، X_i و Y_i : i امین داده واقعی و برآورد شده، \bar{X} و \bar{Y} : میانگین داده‌های X_i و Y_i و n : تعداد نمونه‌های ارزیابی می‌باشند. ضمن این‌که برای درک شهودی بهتر نتایج، مقایسه نسبت به خط ۱:۱ نیز انجام گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۲ نشان‌دهنده میزان تغییرات دمای هوا و اعماق خاک در مقیاس روزانه در ایستگاه‌های مورد بررسی می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشخص است با افزایش عمق خاک میزان نوسانات دما کاهش می‌یابد و در عمق ۱۰۰ سانتی‌متر به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد (البته با توجه به اعماق مورد بررسی). کاهش میزان نوسانات دمای خاک با افزایش عمق نیز توسط تامسزاک و شاتزل (۲۰۰۱) نیز گزارش شده است. در مطالعه‌ای دیگر نوسانات دما در عمق ۵ سانتی‌متر بیش‌تر از سایر اعماق بوده است (چاکو و رنوکا، ۲۰۰۲)، این نوسانات زیاد در جدول ۲ کاملاً مشهود است. در همه ایستگاه‌ها دما در فصل‌های سرد با افزایش عمق، افزایش و در فصل‌های گرم سال با کاهش عمق، کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج جدول زیر می‌توان به این نکته اشاره نمود که در هر سه ایستگاه مورد بررسی دمای خاک در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری هیچ‌گاه کم‌تر از صفر نگردیده است.

وحید یزدانی و همکاران

جدول ۲- میانگین و میزان تغییرات دماهای هوا و اعماق مورد بررسی بر حسب درجه سانتی گراد به تفکیک ایستگاه (سالهای ۱۹۹۲-۲۰۰۹ در مشهد و سبزوار و ۱۹۹۶-۲۰۰۵ در شیراز).

ایستگاه	دمای هوا	۵ (سانتی متر)	۱۰ (سانتی متر)	۲۰ (سانتی متر)	۳۰ (سانتی متر)	۵۰ (سانتی متر)	۱۰۰ (سانتی متر)
شیراز	میانگین سانتی گراد	۱۸/۹	۲۲/۸	۲۲/۴	۲۱	۲۱/۷	۲۱/۳
	حداکثر سانتی گراد	۴۳/۲	۳۵/۶	۴۵/۲	۳۵/۸	۳۳	۳۰/۷
	حداقل سانتی گراد	-۷/۴	-۲/۸	-۱/۸	-۱	۴/۵	۹/۷
	انحراف معیار	۹	۱۰/۹	۱۰/۱	۸/۴۹	۸/۳۲	۷/۸
مشهد	میانگین سانتی گراد	۱۵/۵	۱۹/۱	۱۸/۸	۱۷/۸	۱۷/۶	۱۸/۵
	حداکثر سانتی گراد	۳۴	۴۴/۸	۳۹	۳۴	۳۳/۵	۲۹
	حداقل سانتی گراد	-۱۴	-۷/۸	-۶/۸	-۵/۵	-۵/۱	-۰/۲۲
	انحراف معیار	۹/۷	۱۱/۸	۱۱	۱۰/۱	۹/۵	۸/۳
سبزوار	میانگین سانتی گراد	۲۲	۲۱/۹	۲۱/۴	۲۰/۷	۲۰/۶	۲۱/۱
	حداکثر سانتی گراد	۳۷	۴۹	۴۲	۳۷/۸	۳۶/۸	۳۷/۲
	حداقل سانتی گراد	-۱۳	-۱۹/۴	-۵/۶	-۵	-۴/۸	-۰/۰۶
	انحراف معیار	۱۸	۱۲/۴	۱۱/۶	۱۰/۴	۹/۸	۸/۸

جدول ۳ مقادیر ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده توسط نرم افزار SPSS را به تفکیک ایستگاه نشان می دهد. لازم به ذکر است به دلیل نوسانات زیادتر دما در عمق ۵ سانتی متری نسبت به سایر عمقها (چاکو و رنوکا، ۲۰۰۲) و همچنین تأثیرگذاری بیش تر پارامترهای هواشناسی در این عمق (۵ سانتی متر)، محاسبه های مربوط به ضریب همبستگی تنها برای عمق ۵ سانتی متر انجام گردید. همان طور که در جدول ۳ نیز مشخص است بیش ترین ضریب همبستگی مربوط به دمای هوا و کم ترین آن مربوط به رطوبت نسبی که مقدار عکس دارد، می باشد. نتایج پژوهش رایت و کرو (۲۰۰۰) و سبزی پرور و همکاران (۲۰۱۰) نیز بالا بودن ضریب همبستگی دمای هوا با دمای خاک را تصدیق می کند. همان طور که در جدول ۳ مشخص است ضریب همبستگی پارامترهای هواشناسی با دما در عمق ۵ سانتی متری در هر منطقه متفاوت می باشد، این تفاوت را شاید بتوان با تفاوت در ارتفاع از سطح دریا، دقت اندازه گیری، دقت وسایل مورد استفاده و دیگر موارد مرتبط توجیه نمود. در هر حال با توجه به این که روند انتقال دما از سطح به اعماق خاک تابعی از رطوبت خاک نیز می باشد (بای بردی، ۲۰۰۳)، بنابراین برای برآورد دمای اعماق خاک (عمق بیش از ۵ سانتی متر) تنها نمی توان به دمای هوا اکتفا نمود، بنابراین در ادامه از سایر پارامترها برای برآورد دما در اعماق استفاده خواهد شد. پایین بودن ضریب همبستگی بین باران و دمای ۵ سانتی متر را می توان به در نظر گرفتن باران تجمعی نسبت داد، به این دلیل که در این حالت باران موجود

پایین‌تر از عمق ۵ سانتی‌متر قرار می‌گیرد. بررسی ضریب همبستگی باران با دمای سایر اعماق بیانگر افزایش ضریب همبستگی با عمق است. برای مثال مقدار ضریب همبستگی باران با دمای اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر برای شهر شیراز به ترتیب برابر $0/373$ ، $0/38$ ، $0/38$ ، $0/49$ و $0/5$ می‌باشد.

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای هواشناسی در ارتفاع ۲ متری و دما در عمق ۵ سانتی‌متر.

پارامتر	ایستگاه سینوپتیک	مشهد	سبزوار	شیراز
دمای هوا		$0/97^*$	$0/98^*$	$0/98^*$
باران		$-0/13$	$-0/1$	$-0/28$
باران مؤثر با تاخیر زمانی ۱ روز		$-0/15$	$-0/13$	$-0/26$
تبخیر و تعرق مرجع*		$0/79^*$	$0/71^*$	$0/84^*$
تبخیر**		$0/5^*$	$0/2$	$0/67^*$
سرعت باد		$0/37$	$0/1$	$0/22$
ساعت آفتابی		$0/3$	$0/29$	$0/56^*$
رطوبت نسبی		$-0/76^*$	$-0/2$	$-0/77^*$
فشار بخار اشباع		$0/44$	$0/2$	$0/43$

* مقدار تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده توسط فرمول پنمن مانیتث- فائو ۵۶، ** مقدار تبخیر از تشت کلاس A و * معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد.

رگرسیون ساده: در ابتدا برای مقایسه بهتر روش‌های برآورد دما در اعماق خاک، نتایج رابطه رگرسیونی ساده بین دمای هوا و دمای اعماق در جدول ۴ ارائه شده است (انتخاب دمای هوا به‌عنوان ورودی به دلیل دارا بودن بالاترین ضریب همبستگی است). همان‌طور که در جدول ۴ نیز مشخص است، استفاده از رابطه‌ای که تنها براساس دمای هوا برای برآورد دما در اعماق خاک است نمی‌تواند برآورد دقیقی از دما در اعماق را ارائه دهد. با افزایش عمق نیز دقت رابطه به دست آمده کم‌تر می‌گردد. تامسزاک و شاتزل (۲۰۰۱) این کاهش ضریب همبستگی را ناشی از عایق‌بندی ژرفای خاک توسط لایه‌های بالایی دانسته‌اند. گرچه همبستگی بالایی بین دمای هوا و دمای خاک به دست آمد اما با کمی دقت در مقدار پارامترهای آماری RMSE و MAE می‌توان دریافت که دقت مدل‌های ارائه شده چندان بالا نیست، به‌خصوص در ایستگاه سبزوار این دقت کم، مشهودتر است. در این رابطه جعفری گلستان و همکاران (۲۰۰۷) بیان داشتند که در چرخه شبانه‌روزی بین میانگین دمای هوای هر ساعت از شبانه‌روز در ارتفاع ۱/۸ متری و ژرفای ۷ و ۲۰ سانتی‌متری خاک در هر یک از فصل‌های

وحید یزدانی و همکاران

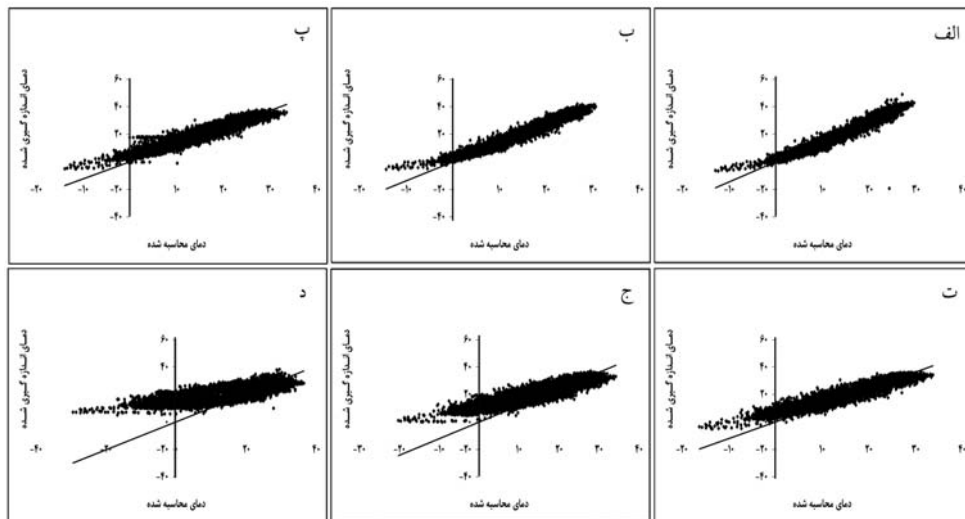
سال همبستگی معنی دار و بالایی ($r=0/84-0/99$) وجود دارد. این در حالی است که در نتایج به دست آمده در این پژوهش مقدار ضریب تبیین در اعماق ۵ و ۲۰ سانتی متر به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۳ می باشند. در پژوهش دیگری که توسط نجفی مود و همکاران (۲۰۰۸) انجام شد، رابطه درجه دومی برای تمام اعماق ارایه گردید و در بهترین حالت ضریب همبستگی ۰/۷ (در عمق ۱۰ سانتی متر) به دست آمد. لازم به ذکر است که مطالعه انجام شده توسط نجفی مود و همکاران در طی یک سال بوده است در حالی که نتایج این بررسی به دست آمده از یک دوره ۱۳ ساله می باشد. مناسب نبودن دوره های کوتاه مدت برای ارزیابی دمای خاک نیز توسط بلترامی و کلمن (۲۰۰۳) بیان شده است.

جدول ۴- پارامترهای آماری مربوط به رگرسیون خطی درجه دوم به تفکیک ایستگاه (سالهای ۲۰۰۹-۱۹۹۲ در ایستگاه های مشهد و سبزوار و ۲۰۰۵-۱۹۹۶ در ایستگاه شیراز)*.

ایستگاه	عمق (سانتی متر)	a	b	c	R^2	RMSE (درجه سانتی گراد)	MAE (درجه سانتی گراد)
مشهد	۵	۰/۰۰۹۲	۰/۹۲۳۳	۱/۶۸۴۵	۰/۹۵	۲/۴۶	۱/۹۳
	۱۰	۰/۰۰۷۹	۰/۸۷۶۱	۲/۵۵۵۷	۰/۹۴	۲/۵	۱/۹۶
	۲۰	۰/۰۰۷۷	۰/۷۷۵۹	۳/۲۳۰۴	۰/۹۳	۲/۶۸	۲/۱۱
	۳۰	۰/۰۰۷۶	۰/۷۰۲۴	۴/۱۹۲	۰/۹	۲/۹۳	۲/۳
	۵۰	۰/۰۰۷۷	۰/۵۵۸۴	۶/۹۳۹۵	۰/۸۴	۳/۳	۲/۶
	۱۰۰	۰/۰۰۶۷	۰/۳۷۱۱	۱۰/۵۵۱	۰/۶	۳/۶۳	۳
سبزوار	۵	-۰/۰۰۳	۰/۹۲۵۳	-۰/۳۵۸۷	۰/۹۶	۸/۳۳	۷
	۱۰	-۰/۰۰۳۱	۰/۹۷۵۷	-۱/۰۱۵	۰/۹۶	۷/۱	۶/۲
	۲۰	-۰/۰۰۰۴	۰/۹۵۵۱	-۱/۵۱۶۶	۰/۹۳	۵/۷	۵/۱
	۳۰	-۰/۰۰۱۳	۱/۰۳۶۶	-۲/۵۸۱۶	۰/۹	۵/۸	۵/۱۲
	۵۰	-۰/۰۰۱۷	۱/۱۳۵۶	-۵/۲۱۲۶	۰/۸۶	۸	۶/۸۷
	۱۰۰	-۰/۰۰۴۵	-۱/۴۲۹۹	-۱۰/۰۲۶	۰/۶۹	۱۱	۸/۶
شیراز	۵	۰/۰۰۵۵	۱/۰۶۱۳	۰/۷۶۱۴	۰/۹۶	۲/۱	۱/۶۸
	۱۰	۰/۰۰۳۳	۱/۰۴۶۷	۱/۲۲۳۱	۰/۹۶	۱/۹۷	۱/۵۷
	۲۰	۰/۰۰۰۲	۱/۰۰۴۲	۲/۳۲۰۵	۰/۹۴	۵/۳	۴/۹
	۳۰	۰/۰۰۱۲	۰/۸۹۲۷	۳/۶۶۸۷	۰/۹۱	۲/۴	۱/۹
	۵۰	۰/۰۰۲۳	۰/۷۸۰۴	۵/۵۹۲۸	۰/۸	۲/۶	۲/۱۷
	۱۰۰	۰/۰۰۳۳	۰/۵۰۸	۱۰/۳۴۴	۰/۷	۴/۸	۴/۱

$$*T_s = aT^b + bT + c$$

به‌منظور ارایه تصویری روشن‌تر از دقت پایین روابط تک‌پارامتری که تنها بر پایه دمای هوا می‌باشند، در شکل ۱ مقایسه دمای خاک برآورد شده و اندازه‌گیری شده در اعماق مختلف با یکدیگر، ارایه شده است. نتایج به‌دست آمده از شکل ۱ نیز نتایج جدول ۴ را تصدیق می‌کند. نتایج به‌دست آمده از مطالعه جعفری‌گلستان و همکاران (۲۰۰۷) پراکنش زیادی در اطراف خط ۱:۱ در عمق ۲۰ سانتی‌متر داشتند، در حالی‌که نتایج به‌دست آمده در این مطالعه در عمق ۲۰ سانتی‌متری از پراکنش کم‌تری برخوردار است. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در تعداد داده‌ها و منطقه مورد بررسی باشد. نتایج بررسی رابطه‌ها به‌صورت فصلی نشان داد که مقدار ضریب همبستگی در فصل زمستان کم‌تر از سایر فصل‌ها است. این تفاوت را می‌توان توسط شرایط جوی متفاوت (ریزش برف، دمای کم هوا، یخبندی خاک و...) توجیه کرد. بلترامی و کلمن (۲۰۰۳) در بررسی خوپذیری دمای هوا- خاک، این‌گونه رفتار متفاوت را به انتقال رژیم گرمایی نسبت دادند. در حالی‌که جعفری‌گلستان و همکاران (۲۰۰۷) این رفتار را این‌طور توجیه نمودند که در زمستان بخش کلانی از گرمای انتقالی بین نیوار^۱ پایینی و خاک صرف گرمای نهان تبخیر می‌شود، در حالی‌که در فصل‌های دیگر پاسخ گرمایی زمین توسط تابش گرمایی مستقیم خورشید تعیین می‌شود. ضمن این‌که بررسی‌ها مشخص کرد که میزان نوسانات دما در زمستان در اعماق خاک نسبت به سایر فصل‌ها کم‌تر است. زیرا هنگامی‌که اولین برف روی سطح زمین را می‌پوشاند، درجه حرارت هوا و خاک با یک شیب مثبت ملایم به ثبات و پایداری خواهند رسید و به‌دلیل این‌که پوشش برف در سطح خاک یک لایه مرزی صفر درجه ایجاد می‌کند، به‌صورت مؤثرتری خاک را عایق‌بندی کرده و نوسانات درجه حرارت را کاهش می‌دهد. طبق آنچه در شکل ۱ نیز به‌طور شهودی مشخص است، استفاده از رابطه‌ای که تنها بر پایه دمای هوا باشد، مناسب برآورد دما در اعماق مختلف خاک نیست. به‌طوری‌که با افزایش عمق از کارایی آن کاسته می‌شود و در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری به بالاترین خطا می‌رسد. با وجود این‌که در هر سه ایستگاه، در طی دوره برداشت داده، دمای کم‌تر از صفر درجه ثبت نشده است، با این‌حال رابطه ارایه شده دمای کم‌تر از صفر را محاسبه کرده است.



شکل ۱- همبستگی مقادیر دمای محاسبه شده توسط رگرسیون یک متغیره درجه دوم در اعماق مختلف با مقادیر اندازه گیری شده دما در اعماق متناظر در طی سالهای آماری (۲۰۰۹-۱۹۹۲) در ایستگاه سبزوار (خط ممند بیانگر خط ۱:۱ است)، الف) عمق ۵ سانتی متر، ب) عمق ۱۰ سانتی متر، پ) عمق ۲۰ سانتی متر، ت) عمق ۳۰ سانتی متر، ج) عمق ۵۰ سانتی متر و د) عمق ۱۰۰ سانتی متر.

رگرسیون خطی چندمتغیره: برای محاسبه دمای اعماق خاک از رابطه های مختلف با پارامترهای ورودی متفاوت استفاده شد و با مدنظر قرار دادن پارامترهای آماری، مناسب ترین رابطه در هر عمق محاسبه گردید (جدول ۵). با در نظر گرفتن مقادیر دمای هوا، باران مؤثر تجمعی، تبخیر و تعرق و رطوبت نسبی به عنوان ورودی، مناسب ترین رابطه به دست آمد. همان طور که در جدول ۵ نیز مشخص است در تمام اعماق خاک و در هر سه ایستگاه نتایج رگرسیون چندمتغیره و تک متغیره در اعماق سطحی خاک زیاد تفاوت نداشته ولی همبستگی ها در اعماق زیاد قوی تر شده است (جدول های ۴ و ۵). این بهبود در نتایج برآورد دمای اعماق در ایستگاه سبزوار مشهودتر از سایر ایستگاه ها است. با اضافه شدن عمق خاک مقدار ضریب رگرسیونی مربوط به دمای هوا کاهش می یابد، این کاملاً بدیهی است که با افزایش عمق مقدار تأثیر دمای هوا کاهش یابد. چنین نتیجه ای از سوی تامسزاک و شاتزل (۲۰۰۱) نیز گزارش شده است. در مقابل ضریب رگرسیونی مربوط به باران با افزایش عمق خاک به طور تدریجی افزایش می یابد. در ادامه لازم بود برای درک شهودی بهتر دمای محاسبه شده در مقابل

دمای اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گیرد (شکل ۲). همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشخص است پراکنش داده‌ها در اطراف خط ۱:۱ نسبت به حالت رگرسیون یک‌متغیره کم‌تر است. در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری مدل پیشنهادی دمای زیر صفر را محاسبه نمی‌کند، در مقادیر اندازه‌گیری شده نیز دمای زیر صفر وجود ندارد. این در حالی است که در رگرسیون تک‌متغیره دمای زیر صفر برآورد شده است (شکل ۱). لازم به ذکر است که نتایج به‌دست آمده از رگرسیون چندمتغیره نسبت به نتایج جعفری گلستان و همکاران (۲۰۰۷) و نجفی مود و همکاران (۲۰۰۸) از دقت بیشتری برخوردار است. بیش‌ترین ضریب همبستگی در مطالعه نام‌بردگان به ترتیب ۰/۹ و ۰/۷ می‌باشد در حالی که به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب همبستگی این مطالعه ۰/۹۶ و ۰/۷ (عمق ۱۰۰ سانتی‌متر) می‌باشند.

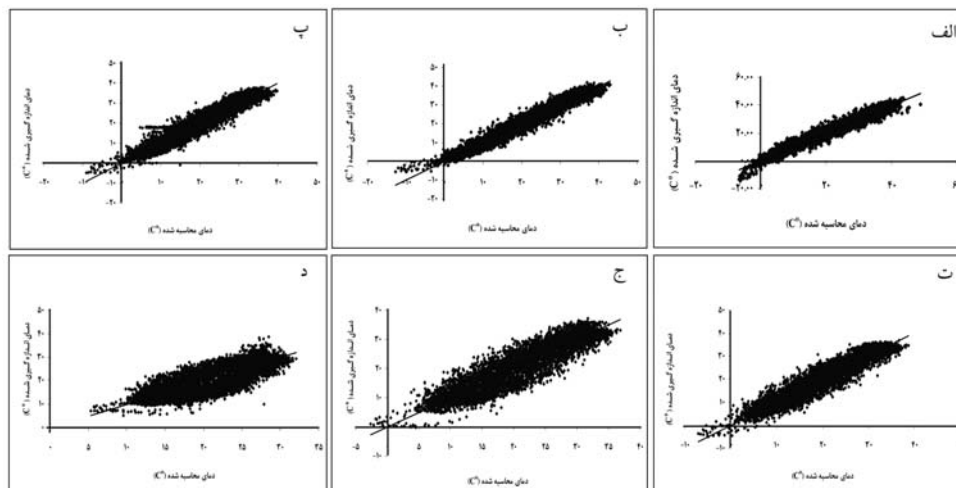
در مطالعه ادیب‌عباسی (۲۰۰۶) رابطه‌ای براساس دمای هوا و رطوبت خاک به‌دست آمد که مقدار ضریب همبستگی بین $R < 0/998$ و $0/86 < R$ بود. البته باید متذکر شد که محاسبه رطوبت خاک به دلیل بالا بودن هزینه و سختی در اندازه‌گیری آن به جای دمای خاک خود جای سؤال است. در پژوهش دیگری که توسط سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) بر روی برآورد دمای خاک با استفاده از رگرسیون چندمتغیره انجام شد، با احتساب پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه، میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل به ترتیب در بهترین و بدترین حالت به ضریب همبستگی ۰/۹۴ در اعماق ۲۰-۵ سانتی‌متری ایستگاه زاهدان و ۰/۶۴ در عمق ۵ سانتی‌متر ایستگاه رامسر دست یافتند. در مقابل نتایج این پژوهش بیانگر ضریب ۰/۹۶ در اعماق ۵ و ۱۰ ایستگاه‌های شیراز و سبزوار و ضریب ۰/۷ در عمق ۱۰۰ سانتی‌متر ایستگاه سبزوار است. همچنین میانگین جذر مربعات خطا در این پژوهش ۲/۴۷ بود، در حالی که این پارامتر در مطالعه سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) ۴/۳ گزارش شده است. با افزایش عمق مقادیر ضریب همبستگی کاهش و پارامترهای خطا افزایش می‌یابد (جدول ۵). در مقابل در مطالعه سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) نتیجه‌ای عکس به‌دست آمده است. ارایه مدلی که با افزایش عمق خاک دقت بهتری در تخمین دما نسبت به اعماق بالاتر داشته باشد خود جای تامل است. در پژوهشی دیگر سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از دمای هوا، رطوبت هوا، فشار بخار اشباع و تابش خورشیدی اقدام به برآورد دمای اعماق مختلف خاک در اقلیم گرم و نیمه‌خشک نمودند. نتایج آن‌ها بیانگر تغییرات R^2 بین ۰/۹۴ (عمق ۵ سانتی‌متر) تا ۰/۷۳ (عمق ۱۰۰ سانتی‌متر) بوده و تغییرات RMSE نیز بین ۲/۷۵-۲/۶۲ است، که در مقایسه با نتایج این پژوهش (ایستگاه شیراز) بیش‌تر می‌باشد.

وحید یزدانی و همکاران

جدول ۵- پارامترهای آماری مربوط به رگرسیون خطی چندمتغیره به تفکیک ایستگاه (سالهای ۱۹۹۲-۲۰۰۹ در ایستگاه‌های مشهد و سبزوار و ۱۹۹۶-۲۰۰۵ در ایستگاه شیراز)*.

ایستگاه	عمق (سانتی‌متر)	a	b	c	d	e	R ^۲	RMSE (درجه سانتی‌گراد)	MAE (درجه سانتی‌گراد)
مشهد	۵	۱/۲۳	-۰/۰۱۹۹	۰/۰۲۲۹	-۰/۰۳۹	-۰/۹۴۱	۰/۹۵	۲/۵	۱/۹
	۱۰	۱/۱۵	-۰/۰۲۲۴	۰/۰۲۳۱	-۰/۰۳۷	۰/۰۴۱	۰/۹۴	۲/۵	۲
	۲۰	۱/۰۵	-۰/۰۲۹۵	۰/۰۲۶۹	-۰/۰۳۶	۰/۴۴۲	۰/۹۳	۲/۷	۲/۴
	۳۰	۰/۹۶۲	-۰/۰۲۲۹	۰/۰۲۲۶	-۰/۰۳۸۳	۱/۷۶	۰/۹	۲/۹	۲/۳
	۵۰	۰/۷۷۹	-۰/۰۲۳۴	-۰/۰۰۲۱	-۰/۰۳۴۹	۶/۴۴	۰/۸۷	۳/۳	۲/۶
	۱۰۰	۰/۵۰۵	-۰/۰۱۸	-۰/۰۳۳۴	-۰/۰۲۶۸	۱۲/۶	۰/۷۱	۳/۴	۲/۸
سبزوار	۵	۱/۱۵	-۰/۹۲۶	۰/۰۰۸۶	۱/۰۷	-۰/۱۹۴	۰/۹۶	۲/۳	۱/۷
	۱۰	۱/۰۸	-۰/۸۲۹	۰/۰۰۴۶	۰/۹۵	۰/۸۷۱	۰/۹۶	۲/۳	۱/۸
	۲۰	۰/۹۴۹	-۰/۶۴۴	۰/۰۱۰۷	۰/۷۶۷	۲/۲۵	۰/۹۳	۲/۶	۲
	۳۰	۰/۸۶۴	-۰/۴۸۱	۰/۰۰۰۸	۰/۶۲۳	۳/۹۲	۰/۹۱	۲/۸	۲/۲
	۵۰	۰/۷۳۰	-۰/۵۵۹	-۰/۰۱۵۶	۰/۶۷۲	۷/۹۳	۰/۸۶	۳/۲	۲/۶
	۱۰۰	۰/۴۶۱	-۰/۳۶۷	-۰/۰۳۶۶	۰/۴۵۳	۱۳/۸	۰/۷	۳/۷	۳
شیراز	۵	۱/۱۸	-۰/۰۰۵۵۲	-۰/۰۰۵۲۴	-۰/۰۱۵۸	۲/۹۳	۰/۹۶	۱/۵	۰/۹۴
	۱۰	۱/۱۲	-۰/۰۱۳۴	-۰/۰۰۴۵۱	-۰/۰۸۶۶	۳/۵۳	۰/۹۶	۱/۴	۰/۸۷
	۲۰	۱/۰۴	۰/۰۱۸۷	-۰/۰۰۴۱۲	-۰/۲۸۵	۵	۰/۹۵	۱/۵	۰/۸۵
	۳۰	۰/۹۸۵	-۰/۰۲۷۷	-۰/۰۳۶۳	-۰/۳۶	۵/۹۸	۰/۹۲	۱/۷	۱/۶
	۵۰	۰/۹۳۴	-۰/۰۳۵۳	-۰/۰۳۲	-۰/۴۱۴	۷/۳۵	۰/۸۹	۱/۹	۱/۲
	۱۰۰	۰/۷۵۱	-۰/۰۴۸۴	-۰/۰۲۹۲	-۰/۵۷۵	۱۱/۷	۰/۷۶	۲/۳	۱/۵

* $T_s = aT + bR + cRH + dET + e$ ، T: دما (سانتی‌گراد)، R: باران (میلی‌متر)، RH: رطوبت نسبی (درصد)، ET: تبخیر و تعرق (میلی‌متر) و e: تبخیر (میلی‌متر).



شکل ۲- همبستگی مقادیر دمای محاسبه شده توسط رگرسیون چندمتغیره در اعماق مختلف با مقادیر اندازه‌گیری شده دما در اعماق متناظر در طی سال‌های آماری (۲۰۰۹-۱۹۹۲) در ایستگاه سبزواری (خط ممتد بیانگر خط ۱:۱ است)
 الف) عمق ۵ سانتی‌متر، ب) عمق ۱۰ سانتی‌متر، پ) عمق ۲۰ سانتی‌متر، ت) عمق ۳۰ سانتی‌متر،
 ج) عمق ۵۰ سانتی‌متر و د) عمق ۱۰۰ سانتی‌متر.

شبکه عصبی مصنوعی: به منظور برآورد دمای اعماق خاک از دو مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه و شبکه تاخیر زمانی استفاده گردید. با سنجش پارامترهای آماری ضریب همبستگی، RMSE و MAE می‌توان به بهترین مدل دست یافت. آرایش‌های مختلفی با پارامترهای ورودی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به در نظر گرفتن کم‌ترین هزینه در برداشت پارامترهای ورودی، چهار پارامتر دما، رطوبت نسبی، باران تجمعی و تبخیر و تعرق مانند رگرسیون چندمتغیره به‌عنوان ورودی شبکه استفاده شدند.

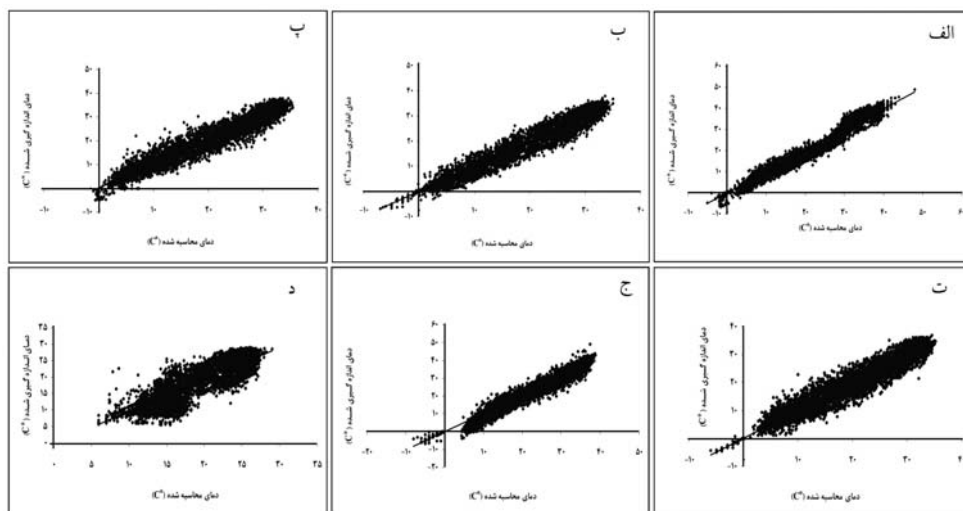
اطلاعات مربوط به بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دمای اعماق مختلف خاک، در جدول ۶ نشان داده شده است. در سه عمق ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر مدل پرسپترون چندلایه دقت مناسبی داشت در حالی‌که در سایر اعماق مدل تاخیر زمانی از دقت بهینه برخوردار بود. باید متذکر شد که مقدار عمق نمونه‌ها و طول خط سیر در عمق‌های ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر به ترتیب ۱ و ۲ انتخاب گردید. در مقابل در عمق ۱۰۰ سانتی‌متر به ترتیب مقادیر ۴ و ۱۵ در نظر گرفته شد. ضریب مومنتم برای تمام عمق‌ها ۰/۹۹ در نظر گرفته شد ضمن این‌که نرخ آموزش (ضریب یادگیری) برابر ۱ به‌دست آمد. همچنین برای اجرای شبکه از تابع فعالیت تانژانت هایپربولیک و قانون یادگیری مومنتم استفاده

شد. بررسی دما در مقیاس فصلی مشخص نمود که شبکه عصبی در فصل زمستان از دقت بیشتری نسبت به رگرسیون چندمتغیره برخوردار است و دمای اعماق خاک را بهتر مدل می‌کند. جدول ۶ نیز مانند جدول‌های ۴ و ۵ افزایش مقادیر فراسنج‌های RMSE و MAE و کاهش ضریب همبستگی را با افزایش عمق نشان می‌دهد. این در حالی است که نتایج سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) بیانگر کاهش RMSE با افزایش عمق چه در رابطه رگرسیونی ارائه شده و چه در مدل استنتاج تطبیقی عصبی- فازی معرفی شده، می‌باشد. در مطالعه سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) میانگین ضریب جذر مربعات خطای به دست آمده از مدل استنتاج عصبی- فازی ارائه شده در سه ایستگاه تهران، زاهدان و رامسر برابر ۳/۶۸ است، در صورتی که این پارامتر در این پژوهش برابر ۲/۶۵ به دست آمد. این اختلاف‌ها امکان دارد به دلیل تفاوت در مدل عصبی و مناطق مورد بررسی باشد، ضمن این که تعداد سال‌های مورد بررسی نیز متفاوت است.

جدول ۶- جزئیات ساختار شبکه مطلوب.

مرحله آزمون			مرحله آموزش			تعداد تکرار	آرایش	مدل عصبی	عمق خاک (سانتی‌متر)
MAE (درجه)	RMSE (درجه)	R ²	MAE (درجه)	RMSE (درجه)	R ²				
(سانتی‌گراد)	(سانتی‌گراد)		(سانتی‌گراد)	(سانتی‌گراد)					
۱/۵	۲/۳	۰/۹۸	۱/۵	۲/۲	۰/۹۷	۱۰۰۰	۴-۳-۱	MLP	۵
۱/۸	۲/۵	۰/۹۷	۱/۶	۲/۳	۰/۹۷	۱۰۰۰	۴-۲-۱	MLP	۱۰
۱/۸	۲/۴	۰/۹۴	۱/۹	۲/۵	۰/۹۷	۱۰۰۰	۴-۴-۱	MLP	۲۰
۲/۱	۲/۷	۰/۹۱	۲	۲/۶	۰/۸۵	۱۰۰۰	۴-۳-۱	Time-lag	۳۰
۲/۳	۲/۹	۰/۹۴	۲/۲۷	۲/۸	۰/۹۷	۱۰۰۰	۴-۳-۱	Time-lag	۵۰
۲/۵	۳/۵	۰/۸۷	۲/۴	۳/۲	۰/۸۷	۱۳۰۰	۴-۳-۱	Time-lag	۱۰۰

شکل ۳ بیانگر ارتباط بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی موجود در جدول ۶ در اعماق مختلف است. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود، نتایج شبکه عصبی مصنوعی در زمان وقوع دماهای کم‌تر از صفر بهتر از رگرسیون (یک‌متغیره و چندمتغیره) است. ضمن این که با توجه به جدول ۶ و شکل زیر شبکه عصبی مصنوعی در همه عمق‌ها، برآورد مناسب‌تری نسبت به روش‌های رگرسیونی دارد. البته باید متذکر شد که در عمق ۱۰۰ سانتی‌متر دقت برآورد کم‌تر از رگرسیون چندمتغیره می‌باشد.



شکل ۳- همبستگی مقادیر دمای محاسبه شده توسط شبکه عصبی در اعماق مختلف با مقادیر اندازه‌گیری شده دما در اعماق متناظر در طی سال‌های آماری (۲۰۰۹-۱۹۹۲) در ایستگاه سبزوار (خط ممتد بیانگر خط ۱:۱ است) الف) عمق ۵ سانتی‌متر، ب) عمق ۱۰ سانتی‌متر، پ) عمق ۲۰ سانتی‌متر، ت) عمق ۳۰ سانتی‌متر، ج) عمق ۵۰ سانتی‌متر و د) عمق ۱۰۰ سانتی‌متر.

برآورد عمق یخبندان: عمق نفوذ یخبندان محاسبه شده توسط روش‌های نروژی، فنلاندی، آمریکایی و روش استاندارد در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۷ نیز مشخص است در طی دوره مورد مطالعه، دمای عمق ۵۰ سانتی‌متری در ایستگاه مشهد به‌طور میانگین کم‌تر از صفر گردیده است، در حالی که روش‌های فنلاندی، نروژی، آمریکایی و استاندارد به‌ترتیب اعماق ۴۴، ۳۹، ۳۵ و ۷۷ سانتی‌متری را نشان دادند، که این نتایج بیانگر دقت بالای روش فنلاندی نسبت به سایر روش‌ها است. روش استاندارد مقدار عمق نفوذ یخبندان را بیش از واقعیت برآورد می‌کند، چنین نتیجه‌ای از سوی ادیب‌عباسی (۲۰۰۶) در ایستگاه‌های کردستان و نجفی‌مود و همکاران (۲۰۰۸) در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی نیز ارائه شده است.

در ایستگاه‌های سبزوار و شیراز نیز روش فنلاندی از دقت بهتری نسبت به سه روش دیگر برخوردار است. اما روش فنلاندی به‌طور متوسط ۱۵ درصد خطا در برآورد عمق یخبندان دارد، بنابراین لازم است تا معادله فنلاندی برای شرایط موجود بهینه گردد. در این مطالعه روشی بر پایه روش فنلاندی و با اضافه کردن یک پارامتر مربوط به عمق باران روزانه بر حسب متر ارائه کردیم، که

دارای دقت بهتری نسبت به روش فنلاندی است (رابطه ۶- الف و ب). اضافه کردن پارامتر مربوط به بارش به توان معادله بالا به این دلیل بود که در روش فنلاندی توان معادله ثابت می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که بتوان با ایجاد تغییرات در توان معادله به دقت بهتری دست یافت.

$$AFI = \{(\sum T_{month}) \times N_i\}, \quad T_{month} < 0 \quad (6\text{-الف})$$

$$D = \lambda \times (AFI)^{1/2+h} \quad (6\text{-ب})$$

که در آن‌ها، T_{month} : متوسط دمای ماهانه کم‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد (= میانگین دماهای روزانه کم‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد در هر ماه)، N_i : تعداد روزهای ماه است، D : عمق نفوذ یخبندان بر حسب متر، AFI : شاخص یخبندان، h : مساوی با Ln (متوسط ارتفاع بارش در طی روزهای یخبندان در سال مورد مطالعه) و λ : ضریب بدون بعد معادله می‌باشد که تابع بافت خاک بوده و بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۱۲۵ برای بافت رسی تا ۰/۱۲۵ بافت سنگ‌ریزه تغییر می‌کند و در این پژوهش با توجه به بافت لومی رسی خاک مقدار λ برابر ۰/۰۲ در نظر گرفته شد. باید اشاره نمود که در نظر گرفتن مقدار باران در رابطه بالا به این دلیل بود که مقدار رطوبت خاک (باران) بر انتقال گرمایی خاک تأثیر به‌سزایی دارد و با افزایش آن مقدار انتقال گرما بیشتر می‌گردد (بای‌بردی، ۲۰۰۳). رابطه ارایه شده توسط داده‌های یک سال محاسبه، و توسط سایر سال‌ها واسنجی شد. همان‌طور که در جدول زیر نیز مشخص است رابطه پیشنهادی برای ایستگاه‌های مشهد، شیراز و سبزوار به ترتیب دارای ۰/۶، ۱۵ و ۲ درصد خطا در برآورد عمق یخبندان است. درصد خطای بالا در ایستگاه شیراز ممکن است به دلیل مقدار باران کم‌تر این ایستگاه نسبت به مشهد و سبزوار در روزهای یخبندان باشد.

جدول ۷- عمق نفوذ یخبندان محاسبه شده توسط روش‌های مختلف بر حسب سانتی‌متر به تفکیک ایستگاه.

ایستگاه	روش					
	فنلاندی	نروژی	آمریکایی	استاندارد	عمق واقعی	روش پیشنهادی
مشهد	۴۴	۳۹	۳۵	۷۷	۵۰	۵۰/۳
سبزوار	۴۱	۳۴	۳۳	۱۰۰	۴۵	۴۶
شیراز	۱۵	۵	۷/۷	۳۸	۲۰	۱۷

نتیجه‌گیری

با ارزیابی ضریب همبستگی بین دمای هوا و سایر پارامترهای هواشناسی بهترین ورودی‌ها در مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چندمتغیره به ترتیب دمای هوا، تبخیر و تعرق، رطوبت هوا و باران مؤثر با تاخیر زمانی یک روز به دست آمد. بیش‌ترین ضریب همبستگی مربوط به دمای هوا و کم‌ترین آن نیز مربوط به رطوبت نسبی هوا که مقدار عکس دارد، می‌باشد. نتایج بررسی رابطه‌ها به صورت فصلی نشان داد که مقدار ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی در فصل زمستان کم‌تر از سایر فصل‌ها است. باید اشاره نمود که یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در روند تغییرات دمای خاک مقدار رطوبت آن می‌باشد که در این پژوهش با به‌کارگیری باران مؤثر با تاخیر زمانی، این مشکل حل گردید، ضمن این‌که با محاسبه تبخیر و تعرق و به پیروی بیلان رطوبتی خاک، مقدار رطوبت خالص خاک به دست آمد و به همین دلیل نتایج به دست آمده در این پژوهش بهتر از سایر پژوهش‌ها می‌باشد.

در طی بررسی‌های انجام شده در این مطالعه مشخص گردید که شبکه عصبی مصنوعی در برآورد دمای عمق‌ها از عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. البته باید متذکر شد که تفاوت بین روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چندمتغیره زیاد نیست، بنابراین با توجه به راحتی استفاده از روابط رگرسیونی حتی برای کشاورزان می‌توان استفاده از نتایج شبکه عصبی مصنوعی و یا رگرسیون چندمتغیره را برای برآورد دمای عمق‌های خاک پیشنهاد نمود. همان‌طور که مشخص است ضریب هر پارامتر در معادله رگرسیونی بیانگر میزان اهمیت آن است. نتایج از اهمیت بالای دمای هوا و تبخیر و تعرق در هر سه ایستگاه خبر می‌دهد، بنابراین بر این اساس مشخص می‌گردد که حساسیت مدل ارایه شده نسبت به دقت در برآورد این دو پارامتر بیش‌تر از سایر پارامترها است. در محاسبه عمق یخبندان مشاهده گردید که رابطه فنلاندی از دقت قابل‌قبولی برخوردار است، ضمن این‌که با در نظر گرفتن یک پارامتر اضافی مربوط به عمق باران در روزهای یخبندان به نمای معادله فنلاندی، رابطه بالا بهبود یافت. حداکثر خطای به دست آمده از رابطه پیشنهادی ۱۵ درصد در ایستگاه شیراز و میزان خطا در مشهد و سبزوار به ترتیب ۰/۶ و ۲ درصد مشاهده شد. معادله ارایه شده برای محاسبه عمق نفوذ یخبندان می‌تواند برآوردهای دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌ها در منطقه مطالعاتی و سایر مناطق با آب و هوای مشابه را داشته باشد.

منابع

1. Adib-Abbasi, M. 2006. Review the relationship between temperature regimes with deep soil temperature (screen) and determine the depth of ice in Kordestan. M.Sc. Thesis Meteorology Faculty of agriculture, Mashhad University, 157p. (In Persian)
2. Alizadeh, A. 2002. Soil, Water, Plant Relationship, Mashhad University, 75: 483p. (In Persian)
3. Beltrami, H. 2001. On the relationship between ground temperature histories and Meteorological records. *Global and Planetary Change*, 29: 327-348.
4. Beltrami, H., and Kellman, L. 2003. An examination of short and long-term air ground temperature coupling. *Global and Planetary Change*, 38: 291-303.
5. Bybordi, M. 2003. Soil Physics. Tehran University, 670p. (In Persian)
6. Chacko, T.P., and Renuka, G. 2002. Temperature mapping, thermal diffusivity and subsoil heat flux at Kariavattom of Kerla. *Proc. Indian Acad. Sci.* 111: 79-85.
7. Flerchinger, G.N., and Hanson, C.L. 1989. Modeling soil freezing and thawing on a rangeland watershed, *Trans. ASAE*, 32: 1551-1554.
8. Flerchiger, G.N., and Saxton, K.E. 1989. Simultaneous Heat and Water Model of a Freezing Snow- Residue-Soil System II. Field Verification. *Trans. ASAE*, 32: 573-578.
9. Ghuman, B.S., and Lal, R. 1982. temperature regime of a tropical soil in relation to surface condition and air temperature and its Fourier analysis, *Soil Science*, 134: 133-140.
10. Hiraiwa, Y., and Kasubuchi, T. 2000. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5-75 °C). *Euro. J. Soil Sci.* 51: 211-218.
11. IRNCID groups. 2003. Water management in field, 178p. (In Persian)
12. Jaffari-Golestan1, M., Raeini-Sarjaz, M., and 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.* 14: 5. 112-123. (In Persian)
13. Khalili, A.S., Rahimi, H., and Aqashariati, G. 2005. AFI Credit Index poll in determining the penetration depth in the glacial climate type arid and semi arid Iran (Yazd and Shahr Kord). *Geophysical Conferences*, 12: 50-59. (In Persian)
14. Najafi-Mood, M.H., Alizadeh, A., Mohamadian, A., and Mousavi, J. 2008. Investigation of relationship between air and soil temperature at different depths and estimation of the freezing depth (Case study: Khorasan Razavi), *J. Water and Soil.* 22: 2. 456-466. (In Persian)
15. Pollack, H.N., Smerdon, J.E., and Van Keken, P.E. 2005. Variable seasonal coupling between air and ground temperatures: A simple representation in terms of subsurface thermal diffusivity. *Geophysical Research Letters*, 32p.
16. Qaffari, A.A., Qasemi, V.R., and Depaoo, E. 2005. Zonnating climate Iran by Unesco method. *J. Agric. drought.* 12: 30-35. (In Persian)

17. Rahnama-Yami, E., Khalili, A., and Rahimi, H. 2008. Investigation on soil temperature regime and frost depth of soil in laboratory model. *J. Sci. Engine.* 19: 8. 79-89. (In Persian)
18. Sabziparvar, A.A., Zare-Abyaneh, H., and Bayat-Varkeshi, M. 2010. A model Comparison Between Predicted Soil Temperatures Using ANFIS Model and Regression Methods in Three Different Climates, *J. Water and Soil.* 24: 2. 274-285. (In Persian)
19. Sabziparvar, A.A., Tabari, H., and Aeeni, A. 2010. Estimation of average daily temperature in some of climate Iran with using metrological data, 14: 52. 125-137. (In Persian)
20. Sommers, L.E., Gilmour, C.M., Wildung, R.E., and Beck, S.M. 1981. The effect of water potential on decomposition processes in soils, in *Water Potential Relations in Soil Microbiology*. Edited by J.E. Parr, W.R. Gardner and W.R. Elliot, SSSA Spec. Publ. 9: 97-117.
21. Tomczak, D.M., and Schaetzl, R.J. 2001. Wintertime temperature in the fine-textured soils of the Saginaw valley, Michigan. *The Great Lakes Geographer*, 8: 87-98.
22. Wright, L., and Crew, J.T. 2000. Temperature and soil moisture regimes in and adjacent to the Fernow experimental forest. USDA. Research Paper, 713: 1-4.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 19(4), 2013
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Modeling soil depth temperature by using meteorological parameters

***V. Yazdani¹, B. Ghahreman², G. Farahi¹ and H. Nori³**

¹Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

²Professor, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

³M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan,

Received: 02/28/2011; Accepted: 02/28/2012

Abstract

Soil temperature is one of the main characteristics of soil that its changes have a great impact on many processes such as growth, plants flourishing and soil formation. Nevertheless, temperatures throughout the soils profile are not measured continuously. As a result, we encounter the lack of statistics in soils temperature data, while meteorological parameters are being measured regularly. Since presented relationships in the previous investigations do not provide the appropriate accuracy to predict soils temperature, the objective of this paper is to introduce a high accuracy relationship based on comparison of regression methods and Artificial Neural Network (ANN) by using daily meteorological data of three stations located in Mashhad, Sabzevar and Shiraz. Solidarity coefficients indicated that ambient temperature, evapotranspiration and evaporation have the most solidarity with the soil temperature at a depth of 5 cm, respectively. According to solidarity coefficient and results of the 2 models, air temperature, evapotranspiration, humidity and effective precipitation with daytime lag of one day were regarded as the best input parameters, respectively. The results showed that second order regression with single variable had the lowest accuracy while the highest accuracy was observed in the ANN method. In the mean time, multiple regressions had a reasonable accuracy. In calculation of freezing depth we concluded that Finish equation has an acceptable accuracy, whereas by considering an added parameter related to the precipitation depth in the cold days to the equations order, the results of the Finish equations will improve dramatically. Maximum error of 15% was observed for the recommended equation in Shiraz station and count of error in Mashhad and Sabzevar 0.6% and 2% observed respectively.

Keywords: Meteorological parameters, Soil temperature, Regression, Artificial neural network, Freezing penetration depth

* Corresponding Author; Email: v.yazdany@yahoo.com

