

ارزیابی کارایی مدل سینوسی در برآورد دمای سالانه خاک سطحی در چند اقلیم

علی محمد قائمی نیا¹، حمیدرضا عظیم‌زاده و حسین ملکی نژاد

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه یزد، مرکز ملی تحقیقات شوری؛ a.ghaemnia@yahoo.com

دانشیار دانشکده منابع طبیعی و کوبرشناسی، پژوهشکده مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه یزد؛ hazimzadeh@yazd.ac.ir

دانشیار دانشکده منابع طبیعی و کوبرشناسی، پژوهشکده مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه یزد؛ hmalekinezhad@yazd.ac.ir

دریافت: 91/8/29 و پذیرش: 92/7/22

چکیده

دما پارامتر مهم فیزیکی خاک است که فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خاک را کنترل کرده و در رشد و عملکرد محصولات کشاورزی نقش دارد. هدف این مقاله ارائه مدل سینوسی ریاضی برای پیش‌بینی دمای خاک در ایستگاه‌های انتخاب شده است. چهار ایستگاه با آب و هوای مختلف از جمله بندرعباس، رشت، شهرکرد و یزد انتخاب شدند. دمای خاک سطحی (پنج سانتی‌متر) در طی 10 سال (1377-1386) در هر یک از ایستگاه‌ها جمع‌آوری گردید. مجموعه داده‌های بکار رفته در ساخت مدل به دو بخش داده‌های آموزشی (70%) و داده‌های اعتبارسنجی (30%) تقسیم شدند. به منظور حذف تأثیر نوسانات اقلیمی احتمالی در بازه زمانی مورد بررسی، داده سال‌های 1377، 1378، 1380، 1381، 1383، 1384 و 1386 برای ساخت مدل استفاده شد. سال‌های 1379، 1382 و 1385 نیز برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند. میانگین و دامنه نوسان سالانه دما به عنوان ورودی مدل سینوسی با استفاده از بیشینه و کمینه داده‌های موجود محاسبه شد. شاخص‌های اعتبارسنجی مدل: جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای اریبی، میانگین درصد خطا، ضریب توافق و ضریب تعیین برای چهار ایستگاه به طور میانگین به ترتیب برابر 2/64، -0/16، 10/84 و 0/59 و 0/93 محاسبه گردید. نتایج حاصل از مدلسازی سینوسی نشان داد که کارایی مدل به ترتیب در ایستگاه‌های بندرعباس، یزد، شهرکرد و رشت کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم‌های مختلف ایران، مدل‌سازی، شاخص‌های اعتبارسنجی

مقدمه

کشاورزی ایالات متحده را 13 میلیون دلار بیان کردند. در مجموع سهم شرایط جوی به طور مستقیم و غیرمستقیم حدود سه چهارم خسارت سالیانه به تولیدات کشاورزی است. در کشور هند کل خسارت‌ها قبل از درو کردن محصولات مختلف در مجموع بین 10 تا 100 درصد برآورد می‌شود (ماوی و توپر، 2004). به منظور

پارامترهای هواشناسی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فعالیت‌های کشاورزی به شمار می‌روند. همه ساله خسارت قابل توجهی به بخش کشاورزی وارد شده که بخش عمده‌ای از آن ناشی از انحراف در شرایط جوی است. ماوی و توپر (2004) به نقل از ووفسینگر و همکاران (1964) میزان خسارت سالیانه در بخش

¹ نویسنده مسئول، آدرس: یزد، انتهای بلوار آزادگان (فرودگاه)، خیابان نهالستان، مرکز ملی تحقیقات شوری

استفاده از روش سری فوریه و مقایسه نتایج آن با نیمرخ-های اندازه‌گیری شده دمای خاک، به شیوه انتقال گرمای هدایتی به پیش‌بینی دمای روزانه خاک در یک منطقه استوایی پرداختند. نتیجه این مطالعه نشان داد که بین مقادیر دمای اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده از سری فوریه در عمق 13 سانتی‌متر خاک، همبستگی خوبی برقرار است. آنها همچنین در مطالعه‌ای (1982) رژیم دمای خاک منطقه استوا را با کمک آنالیز فوریه مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که دمای خاک محاسبه شده از این معادلات در مقایسه با دمای مشاهده شده از دقت بالایی برخوردار است. مکین و آیرس (1985) 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 1، 2، 5 و 10 سانتی‌متر 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. توندولهولم (1990) به وسیله مدلسازی عددی و با استفاده از دو پارامتر دمای هوا و توازن انرژی سطح خاک به مقایسه بین مقادیر دمای خاک اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده در ناحیه سوئد شمالی پرداخت.

می‌هالاکاکو (2001) در مطالعه‌ای دو روش بیان انرژی و شبکه عصب مصنوعی را به منظور برآورد دمای خاک سطحی مقایسه کرد. نتایج نشان داد که تکنیک هوش مصنوعی پیشنهاد شده قادر است برآورد دقیق‌تری از توزیع دمای سطحی خاک بدست آورد. پارامترهایی که به مدل شبکه عصبی وارد شد، شامل دمای هوا، رطوبت نسبی هوا و میزان تابش سیاره‌ای خورشید و خروجی آن مقادیر دمای سطح خاک بدون پوشش در مقیاس ساعتی بود. گائو و همکاران (2007) با استفاده از معادلات ریاضی و قوانین فیزیکی روابط بین رطوبت و ویژگی‌های خاک، دمای خاک در عمق 10 سانتی‌متری یک منطقه خشک را بدست آوردند و پخشیدگی گرما در خاک شنی و چگالی جریان آب برای چهار لایه از خاک برآورد شد. ثنائی‌نژاد و همکاران (1387) با استفاده از تحلیل سری-های فوریه با دوره آماری 12 ساله به برآورد دمای روزانه و سالیانه خاک در عمق‌های مختلف در 6 ایستگاه کردستان اقدام کردند. در این تحلیل آنها فقط با استفاده از دمای هوا (2 متری) و بدون در نظر گرفتن دیگر پارامترهای هواشناسی روابط همبستگی خود را جهت برآورد دمای خاک پیشنهاد نمودند.

بررسی آنها در نهایت به رسم نمودارهای دمای هوا و اعماق خاک به صورت روزانه و سالانه، تعیین توابع

بهره‌برداری اقتصادی و درآمدزا از محصولات کشاورزی شناخت شرایط اقلیمی و نوسانات آب و هوایی هر منطقه ضروری است. دمای خاک یکی از ویژگی‌های عمده خاک بوده و رشد و نمو و تکوین فرآیندهای خاک‌سازی در گرو تغییرات آن می‌باشد. در دمای کمتر از صفر، فعالیت‌های زیستی متوقف شده و در دمای صفر تا پنج درجه سانتی‌گراد، نمو ریشه بسیاری از گیاهان و جوانه-زدن بذرها اغلب کشت‌ها امکان‌پذیر نیست (بای‌بوردی، 1372). گونه‌های مختلف گیاهی به دماهای متفاوتی نیازمندند و باردهی آنها در محدوده معینی از درجه حرارت به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

تحت شرایط بهینه، سرعت جوانه‌زدن بذرها گیاهانی مانند شمعدانی (واشیتانی، 1985)، کاج (واشیتانی و سائیکی، 1986)، نخود (کوول و همکاران، 1986 و ایس و همکاران، 1986)، عدس، سویا، لوبیای چشم بلبلی (کوول و همکاران، 1986)، ارزن (گارسیا-هویدوبرو و همکاران 1982 و محمد و همکاران 1988) و بادام زمینی (محمد و همکاران، 1988) با دما به طور خطی افزایش می‌یابد. از طرفی در هر لحظه دمای خاک از عمقی به عمق دیگر متفاوت بوده و در طول روز و سال نوسان می‌کند. این نوسانات چون پی‌اپی رخ می‌دهند، بنابراین با یک رابطه سینوسی قابل بیان هستند. روش‌های متعدد عددی و تجربی موجود، از شرایط مرزی و خصوصیات حرارتی خاک مانند ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه به عنوان راه حلی به منظور پیش‌بینی دمای خاک استفاده می‌کنند (ادچپونگ و گوپتا-افریبی، 1977 و گومان و لال، 1982). اما این روش‌ها هنوز پیچیده‌اند و به داده‌های ورودی متعددی از خصوصیات خاک که اغلب در دسترس نیستند، احتیاج دارند (تنج و همکاران، 1998). با توجه به اهمیت این موضوع، سازمان هواشناسی کل کشور داده‌های مربوط به دمای خاک را در ایستگاه‌های خود ثبت نموده تا جهت برنامه‌ریزی و پیش‌بینی از آنها استفاده گردد.

با بررسی پژوهش‌های انجام شده در جهت ارائه مدل برای برآورد دمای خاک ملاحظه می‌شود که اکثراً مدل‌هایی با تعداد ورودی‌های زیاد که برآورد یا اندازه-گیری آنها گاهی دشوارتر از اندازه‌گیری مستقیم دمای خاک است، ارائه شده‌اند. چانگ (1957) داده‌های مربوط به دمای خاک را از 780 ایستگاه در سراسر جهان جمع-آوری نمود و نقشه‌های دمای خاک را برای عمق‌های 10، 30 و 120 سانتی‌متری در ماه‌های ژانویه، آوریل و ژولای تهیه کرد. او همچنین توزیع تغییرات دمای سالیانه در عمق‌های مربوطه را ترسیم نمود. گومان و لال (1981) با

بهره‌گیری از رابطه سینوسی می‌توان نتایج قابل قبولی را به دست آورد. بنابراین هدف اصلی این مقاله ارزیابی برآورد دمای روزانه خاک در عمق 5 سانتی‌متر با استفاده از معادله سینوسی در چهار ایستگاه سینوپتیک هواشناسی با اقلیم متفاوت در ایران و سپس ارزیابی توان برآوردی آنها در هریک از اقلیم‌ها بوده است. برای این منظور، از داده‌های دمای خاک در چهار ایستگاه هواشناسی کشور با اقلیم متفاوت استفاده شد و سپس با روش‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (Root Mean Square Error)، میانگین خطای اریبی (MBE) (Mean Bias Error)، MPE، (Mean Percent Error)، ضریب توافق (d) و رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

بررسی داده‌های موجود در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داد که اندازه‌گیری دمای خاک در ایستگاه‌ها (عمق‌های 5، 10، 20، 30، 50 و 100 سانتی‌متر) در سه موقع از روز در ساعت‌های 3، 9 و 15 گرینویچ (به ترتیب 6/30 صبح، 12/30 ظهر و 18/30 عصر به وقت ایران) انجام شده و از 12 خرداد (اول ژوئن) سال 1371 (1992) تاکنون اقدام به ثبت داده‌ها شده است. بنابراین به منظور عدم مواجه با خلاء آماری و انتخاب پایه زمانی مشترک، داده‌های دمای خاک در چهار ایستگاه بندرعباس، رشت، شهرکرد و یزد با مقیاس زمانی روزانه و با دوره آماری 10 سال (1377-1386) برای این مطالعه به کار گرفته شد. شکل 1 بخشی از یک فایل داده دمای خاک مورد استفاده در این پژوهش و شکل 2 تغییرات دمای خاک را در طول سال نشان می‌دهند.

سینوسی نوسانات ادواری دمای هوا و اعماق خاک با استفاده از سری فوریه در ایستگاه‌های مورد مطالعه انجامید. در این تحقیق مشخص شد که رژیم سالانه و روزانه هوا و اعماق خاک برای دوره آماری 12 ساله با خطای کمتر از 1°C در دوره سالانه و کمتر از 2°C در دوره روزانه به وسیله سری فوریه با چهار هارمونی قابل تبیین است. بهیار و همکاران (1380) به منظور پیش‌بینی دمای حداقل خاک و روش‌های مبارزه با یخبندان و سرمزدگی در استان چهارمحال و بختیاری اقدام به بررسی دمای اعماق خاک در سه ایستگاه شهرکرد، بروجن و فرخشهر نمود. نتایج بدست آمده نشان داد که تغییرات ماهانه دمای خاک نسبت به زمان موجی شکل است و هرچه عمق خاک بیشتر می‌شود دامنه تغییرات دما (بیشینه دما منهای کمینه آن) به طور نمایی کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات ماهانه درجه حرارت در اعماق 5، 10، 20، 30 و 50 سانتی‌متری ثابت کرد که درجه حرارت خاک‌های رویین با نوسان انرژی خورشید هماهنگ بوده ولی هرچه بر عمق خاک افزوده می‌شود، تغییرات درجه حرارت کمتر شده و دیر تر به بیشینه درجه حرارت خود می‌رسد. عباسی (1385) روابط ساعتی، روزانه و ماهانه دمای اعماق خاک با دمای هوای اندازه‌گیری شده در پناهگاه هواشناسی (جعبه اسکرین)¹ و رطوبت خاک را تعیین نمود. این کار با استفاده از رگرسیون چند متغیره و مدل آماری JAMP انجام گرفت. جعفری گلستان و همکاران (1386) با استفاده از تجزیه منحنی و همبستگی - های رگرسیونی، دمای اعماق 7 و 20 سانتی‌متری خاک را توسط دمای هوا در ارتفاع 1/8 متری از سطح زمین در منطقه ساری تخمین زدند. آنها همچنین به منظور بهبود نتایج پیش‌بینی شده از روابط رگرسیونی، از روش رفع اختلاف فاز و تجزیه منحنی استفاده کردند که این دو روش به ترتیب سبب 5 تا 10 درصد و 8 تا 12 درصد بهبود در ضریب همبستگی شد. آنها همچنین بیان داشتند که ارتباط بین دمای هوا و ژرفای خاک در سطح احتمال 95 درصد معنی‌دار است. نتیجه مرور منابع فوق بیانگر آن است که محققان برای برآورد دمای خاک از روش‌های فوریه، بیلان انرژی، شبکه عصب مصنوعی، روابط همبستگی میان دمای خاک و برخی پارامترهای هواشناسی و روابط فیزیکی انتقال گرما در خاک مورد استفاده قرار داده‌اند در حالی که با استفاده از داده‌های موجود و

¹ Instrument shelter (Stevenson screen)

2-february - Notepad

ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN
METEOROLOGICAL ORGANIZATION (IRIMO)

STATION BANDAR ABASS
LATITUDE 27 13 N
LONGITUDE 56 22 E
ELEVATION 9.8 MET.

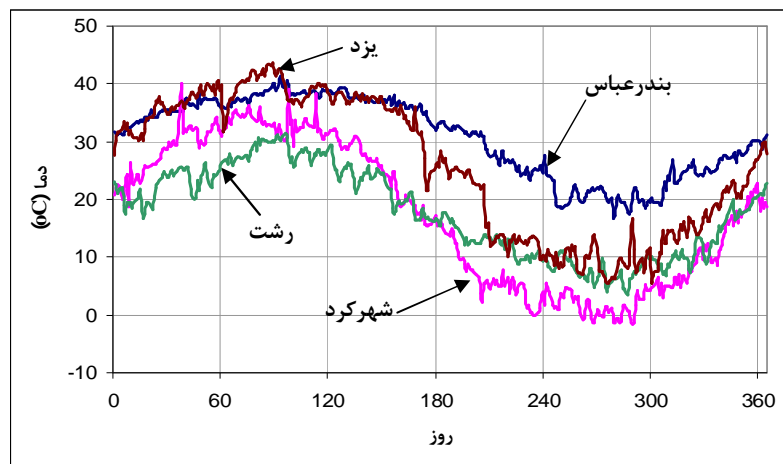
DATA PROCESSING CENTER

MONTH FEBRUARY YEAR 2007

DAILY SOIL-TEMP., RADIATION (CAL / CM2), SUNSHINE & EVAPORATION (MM)

DAY	SOIL-TEMP.(03)						SOIL-TEMP.(09)						SOIL-TEMP.(15)						SUN		
	5	10	20	30	50	100	5	10	20	30	50	100	5	10	20	30	50	100	RAD.	SHINE	EVA.
1	18.0	18.2	19.9	20.0	20.6	22.6	21.0	20.8	19.8	20.0	20.4	22.4	20.8	21.0	20.4	20.0	20.4	22.4	584	0.0	1.9
2	17.4	17.4	19.2	20.0	20.8	22.4	19.8	19.4	19.2	20.0	20.6	22.4	19.6	19.8	19.8	20.0	20.6	22.4	451	0.2	4.1
3	15.6	16.0	18.4	19.6	20.8	22.4	21.8	21.4	18.6	19.6	20.6	22.6	21.0	21.4	20.6	20.0	20.4	22.4	1758	9.8	0.4
4	16.2	16.2	19.0	20.0	20.8	22.4	22.2	21.8	19.2	19.8	20.8	22.6	21.2	21.2	20.6	20.2	20.8	22.6	1192	5.3	2.0
5	18.4	18.4	19.8	20.4	21.0	22.4	22.8	22.4	20.0	20.2	21.0	22.4	20.8	21.2	21.4	20.6	21.0	22.6	1844	9.4	2.3
6	16.0	16.2	19.0	20.2	21.2	22.6	22.2	21.6	19.2	20.0	21.0	22.6	20.4	21.0	21.2	20.4	21.0	22.4	1849	9.5	4.0
7	16.4	16.6	19.4	20.2	21.2	22.6	21.8	21.4	19.2	19.8	21.2	22.6	19.4	19.4	20.2	20.2	20.8	22.6	877	3.3	2.0
8	18.2	18.4	19.6	20.2	21.0	22.6	22.4	22.0	20.0	20.0	21.0	22.4	21.4	21.6	21.4	20.6	21.0	22.6	1530	6.8	5.5

شکل 1- بخشی از یک فایل داده‌های خام دمای خاک



شکل 2- تغییرات سالانه دمای خاک در عمق 5 سانتی‌متر در چهار ایستگاه مورد بررسی

سال‌های 1377، 1378، 1380، 1381، 1383، 1384 و 1386 برای ساخت مدل و از داده‌های سال‌های 1379، 1382 و 1385 برای ارزیابی مدل استفاده شد. جدول 1 ایستگاه‌های مورد مطالعه، موقعیت و برخی از خصوصیات اقلیمی آنها را نشان می‌دهد.

یکی از مشکلات رایج هنگام ساخت مدل‌های پیش‌بینی، تطبیق بیش از حد مدل با خصوصیات داده‌های آموزشی موجود یا بیش برآزش است که این مسأله به پیش‌بینی نادرست و با دقت کمتر از حد انتظار برای مقادیر جدید منجر می‌شود. برای جلوگیری از چنین حالتی، با توجه به حجم زیاد داده‌ها (3650 داده)، داده‌ها به دو بخش داده‌های آموزشی (70%) و اعتبارسنجی (30%) تقسیم شدند. به منظور کاهش اثرات پدیده‌هایی همچون تغییر اقلیم در ساخت و ارزیابی مدل، از داده‌های

جدول 1- موقعیت و برخی از خصوصیات اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

عرض جغرافیایی (°C)	طول جغرافیایی (°C)	ارتفاع (m)	میانگین دمای هوا (°C)	میانگین دمای خاک در عمق 50 سانتی متر (°C)	رژیم دمای خاک
27° 13' N	56°22' E	9/8	27/39	30/71	هایپر ترمیک
37° 19' N	49°37' E	-8/6	16/69	18/15	ترمیک
32° 17' N	50° 51' E	2048/9	11/59	15/62	ترمیک
31° 54' N	54°17' E	1237/2	20/44	24/68	هایپر ترمیک

طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها

روش‌های طبقه‌بندی متنوعی وجود دارند که در همه آنها می‌توان ویژگی‌های مشترکی را پیدا نمود. در این تحقیق از روش‌های طبقه‌بندی دومارتن، کوپن، سلیمانوف، آمبرژه، ایوانف و گوسن برای تشخیص نوع اقلیم ایستگاه-های انتخابی استفاده شده است. جدول 2 روش‌های مختلف طبقه‌بندی اقلیمی را در چهار ایستگاه مورد بررسی نشان می‌دهد (مسعودیان و کاویانی، 1387). دو

روش کوپن و سلیمانوف ایستگاه‌های یزد و بندرعباس و ایستگاه‌های رشت و شهرکرد را در یک طبقه قرار داده‌اند. روش‌های دومارتن و ایوانف دو ایستگاه یزد و بندرعباس را در یک طبقه قرار داده‌اند در حالی که ایستگاه‌های رشت و شهرکرد دارای اقلیم متفاوتند. طبق روش‌های آمبرژه و گوسن چهار ایستگاه انتخابی در چهار اقلیم مختلف قرار دارند بنابراین این دو روش معیار طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها قرار گرفتند.

جدول 2- طبقه‌بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس روش‌های مختلف

ایستگاه				
روشن	بندرعباس	رشت	شهرکرد	یزد
دومارتن	خشک	بسیار مرطوب	نیمه خشک	خشک
کوپن	گرم و خشک	مرطوب جنب حاره	مرطوب جنب حاره	گرم و خشک
سلیمانوف	(بیابانی عرض پایین)	(مدیترانه‌ای گرم)	(مدیترانه‌ای گرم)	(بیابانی عرض پایین)
آمبرژه	بیابانی گرم شدید	استپ جنگلی	استپ جنگلی	بیابانی
ایوانف	صحرائی	خیلی مرطوب	نیمه خشک سرد	خشک سرد
گوسن	نیمه بیابانی شدید	مرطوب جنگلی	بیابانی	صحرائی
		نیمه مدیترانه‌ای	استپی سرد	بیابانی

خاکشناسی ایستگاه‌های مورد مطالعه

با استفاده از اطلاعات موجود ویژگی‌های خاکشناسی ایستگاه‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار

گرفت. اطلاعات وضعیت خاکشناسی (جدول 3) برگرفته از نقشه منابع و استعداد خاک‌های ایران (بنائی، 1380) می‌باشد.

جدول 3- منابع و استعداد خاک در منطقه ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه				
ویژگی	بندرعباس	رشت	شهرکرد	یزد
بافت خاک سطحی	ریز	ریز	متوسط	متوسط
اجزای اصلی تشکیل دهنده	Ustic	Mollic	Typic	Typic
اجزای فرعی تشکیل دهنده	Torrifluvents	Endoaqualfs	Calcixerepts	Torrifluvents
واحد نقشه خاک	Typic	Typic	Typic	Typic
	Aquisalids	Endoaquepts	Haploxerepts	Haplosalids
	Typic	Typic	Typic	Typic
	Haplosalids	Endoaquolls	Xerofluvents	Torriorthents

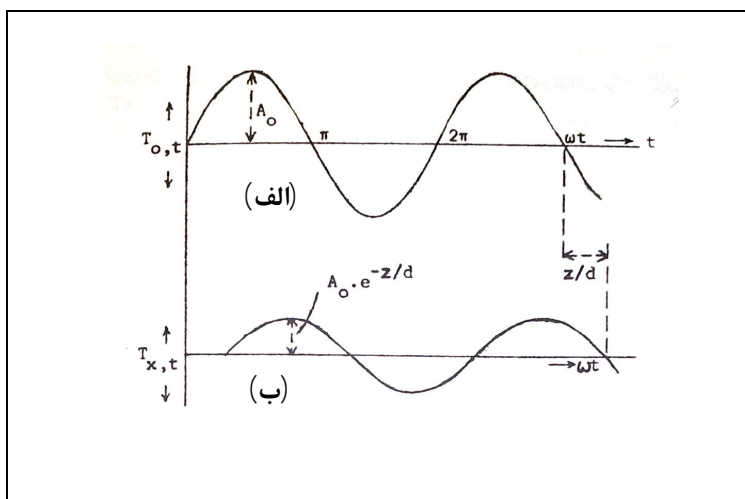
مدل سینوسی برآورد دمای خاک

(1)

$$T_{z,t} = T_{z,0} + A_0 e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin(\omega t - \frac{z}{d})$$

در این رابطه، $T_{z,t}$: دمای خاک در عمق z و زمان t ، $T_{z,0}$: دمای اولیه خاک، A_0 دامنه نوسان تغییرات سینوسی دما در سطح خاک، d : عمق میرش گرما و ω تناوب تغییرات بر حسب رادیان در زمان (ثانیه) است (شکل 3) (بای‌بوردی، 1372).

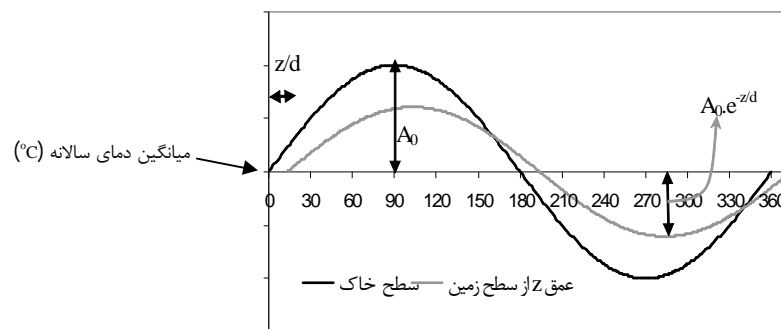
در شرایطی که داده‌های دمای خاک در دسترس نباشد کاربرد روشی استاندارد به منظور محاسبه دمای خاک، ضروری است. در چنین شرایطی استفاده از معادلات ساده برآورد دمای خاک کارساز است. به دلیل نوسان دمای خاک در طول سال، می‌توان با به کارگیری معادلات دارای دوره یا تناوب دمای خاک را پیش‌بینی نمود. مدل سینوسی دارای این ویژگی است. شکل کلی این معادله که برای دمای خاک روزانه (طی 24 ساعت) به کار می‌رود به صورت معادله 1 است.



شکل 3- الف) نوسانات ادواری دمای خاک در سطح، ب) کاهش دامنه نوسان موج گرما و وقوع اختلاف فاز در آن نسبت به سطح (بای‌بوردی، 1372)

سالانه آن را با استفاده از شکل کلی رابطه سینوسی و اعمال تغییر در ضرایب به کار برد (قائمی‌نیا، 1390). در این پژوهش با استفاده از رابطه 2 و داده‌های موجود در یک عمق معین و بدون در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی مانند ظرفیت گرمایی خاک و ضریب پخشیدگی حرارت که بر تعیین عمق میرش گرما موثرند، به برآورد دمای خاک در همان عمق بدون نیاز به عامل d پرداخته شد. واحد زمانی به کاررفته در این رابطه با استفاده از روابط زمانی قابل تبدیل به واحد سالانه است (شکل 4). با توجه به وجود داده‌های دمای خاک در طی سال، تناوب تغییر دما در طی 365 روز از سال به وقوع می‌پیوندد که این عامل با استفاده از $\sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$ در رابطه 2 در محاسبات به کار رفت.

نوسان درجه حرارت در سطح سپس به اعماق منتقل می‌شود، ولی چون ضریب پخشیدگی گرما در خاک معمولاً بین 0/001 تا 0/012 سانتی‌متر مربع در ثانیه تغییر کرده و ناچیز می‌باشد؛ بنابراین دامنه نوسان موج گرما که خاستگاه آن در سطح زمین است با عمق کاهش می‌یابد و در عمق d از سطح خاک به $\frac{A_0}{e}$ یا $0/37A_0$ کاهش می‌یابد (بای‌بوردی، 1372). از طرفی به علت محدود بودن ضریب پخشیدگی گرما در خاک، تغییرات درجه حرارت خاک در عمق z با نوسانات درجه حرارت در سطح خاک اختلاف فاز یافته و برای لحاظ کردن آن در معادله، متغیر $\frac{z}{d}$ در معادله (1) وارد شده است (بای‌بوردی، 1372). با توجه به در دسترس بودن داده‌های دمای خاک در یک عمق معین می‌توان نوسانات دمای



شکل 4- تغییرات سالانه مدل سینوسی دمای خاک در عمق z نسبت به سطح زمین با توجه به شکل 3

تجزیه و تحلیل آماری مدل

به منظور مقایسه داده‌های برآورد شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه از شاخص‌های ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریبی (Root Mean Square Error)، میانگین درصد (Mean Percent Error) MPE، میانگین خطای اریبی (Mean Bias Error) MBE، ضریب توافق (Index of agreement) d و ضریب توافق (Coefficient of determination) R^2 برای مقایسه نتایج استفاده شد. مقادیر تمامی شاخص‌ها به جز R^2 با استفاده از روش فرمول نویسی و R^2 به طور مستقیم در نرم‌افزار Excel محاسبه گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (5)$$

$$MPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|O_i - P_i|}{O_i} \right) \times 100}{n} \right] \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

$$Correl(O, P) = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (8)$$

که در آنها:

P_i : i امین مقدار محاسبه شده توسط مدل، O_i :

با توجه به داده‌های دمای خاک موجود در عمق 5 سانتی - متر ($z = 5$) و بدون نیاز به محاسبه متغیر $\frac{z}{d}$ و به منظور کاهش پیچیدگی‌های احتمالی در محاسبه، می‌توان معادله 1 را این طور نوشت:

$$T_{z,t} = \bar{T}_z + A_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \quad (2)$$

که در آن:

$T_{z,t}$: دمای خاک در عمق 5 سانتی‌متر در روز t، \bar{T}_z : میانگین دمای خاک در عمق 5 سانتی‌متر، A_0 : دامنه نوسان تغییرات موج سینوسی، 2π : تناوب تغییرات بر حسب رادیان (برابر با مقدار عددی 180) و t: شماره روز (1 تا 365) از روزی که موج سینوسی آغاز می‌شود.

در هر ایستگاه با میانگین‌گیری از داده‌های 7 ساله، میانگین دمای خاک در عمق 5 سانتی‌متر محاسبه گردید و با استفاده از رابطه (3) دامنه نوسان سالانه A_0 به دست آمد.

$$A_0 = \frac{\bar{T}_{\max} - \bar{T}_{\min}}{2} \quad (3)$$

که در آن \bar{T}_{\max} و \bar{T}_{\min} به ترتیب میانگین

بیشینه و کمینه دمای خاک در عمق 5 سانتی‌متر هستند.

پس از تعیین پارامترهای رابطه 2، تنها با داشتن شماره روز از شروع افزایش دما از مقدار میانگین، دمای خاک به وسیله معادله سینوسی برآورد گردید. با توجه به شکل 2 و مقایسه آن با شکل 4 مشخص است که تغییرات دمایی خاک در عین تبعیت از مدل سینوسی دارای تغییرات کم و بیش ناگهانی در هر یک از ایستگاه‌ها است، بنابراین یافتن قابلیت این مدل در هر یک از ایستگاه‌ها از نکات قابل بحث در زمینه کاربرد این مدل است.

این پارامترها به شرح ذیل می‌باشند:

\bar{T}_z : میانگین سالانه دمای خاک، از این پارامتر برای تعیین مقدار میانگین دمای خاک در عمق مورد نظر به کار می‌رود. در این پژوهش میانگین سالانه دمای خاک در عمق 5 سانتی‌متر با استفاده از داده‌های روزانه 7 سال برای هر ایستگاه استخراج گردید (جدول 3).

A_0 : نصف اختلاف بین دمای بیشینه و کمینه، در ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر دامنه نوسان تغییرات سالانه دمای خاک اختلاف وجود دارد. وجود رطوبت زیاد در خاک (ایستگاه رشت) و همچنین نزدیکی به عرض‌های پایین جغرافیایی (ایستگاه بندرعباس) سبب می‌شود که دامنه نوسان کاهش یابد و بلعکس در خاک‌های با رطوبت اندک (ایستگاه یزد) و همچنین خاک‌های واقع در عرض‌های میانه (ایستگاه شهرکرد) نوسانات سالانه افزایش یابد. این مقدار نیز با استفاده از داده‌های 7 سال بدست آمدند (جدول 3). اختلاف زیاد میانگین سالانه دمای خاک (حدود 14°C) و نصف اختلاف بین دمای بیشینه و کمینه (حدود 7°C) باعث می‌شود که نتوان معادله واحدی با دقت زیاد را برای چهار ایستگاه پیشنهاد نمود و بایستی برای هر کدام روابط مخصوص به خود را استخراج نمود.

i آمین مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{O} و \bar{P} : میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده و n : تعداد کل مشاهدات می‌باشد. هرچه مقدار $RMSE$ ، MBE (قدر مطلق MBE پس از محاسبه) و MPE کمتر باشند، دقت مدل بالاتر است. مقادیر مثبت MBE نشان دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، بیشتر از مقادیر واقعی و مقادیر منفی آن، نشان دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کمتر از مقادیر واقعی می‌باشد. ضریب توافق یک روش اندازه‌گیری استاندارد درجه خطای پیش‌بینی مدل است (ویلموت، 1981). همچنین ضریب تعیین نشان‌دهنده چگونگی برازش داده‌های نقطه-ای بر یک خط یا منحنی یا به عبارت دیگر نشان می‌دهد که چند درصد افزایش یا کاهش متغیر مستقل از متغیر وابسته تبعیت می‌کند. هر دو در دامنه عددی 0 تا 1 تغییر کرده و هرچه به 1 نزدیک تر باشند کارایی مدل بالاتر بوده و هر کدام به نوعی بیانگر میزان انطباق مقادیر پیش-گویی شده توسط مدل با مقادیر واقعی است.

نتایج

واسنجی مدل

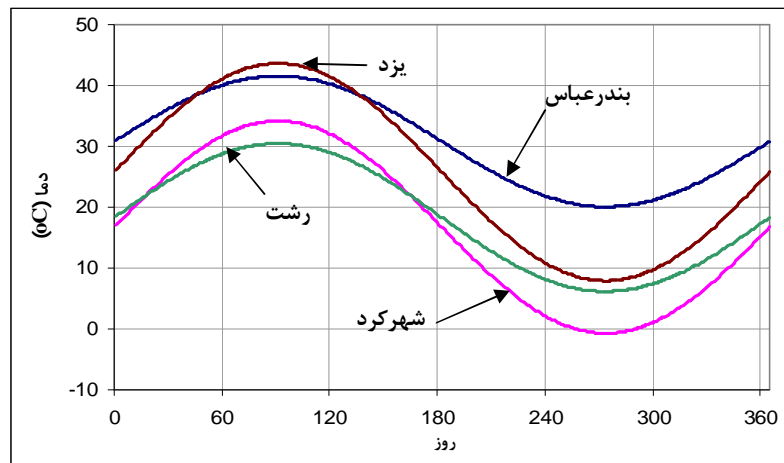
به منظور واسنجی مدل باید اعداد هر یک از پارامترهای مورد استفاده در مدل محاسبه و تعیین گردند.

جدول 3- اعداد استخراج شده برای پارامترهای مورد استفاده در مدل سینوسی

پارامتر	ایستگاه	
A_0	\bar{T}_z	
10/74	30/75	بندرعباس
17/44	16/72	شهرکرد
12/14	18/31	رشت
17/85	25/76	یزد

ایستگاه (یزد و بندرعباس) دما را بیشتر از مقدار واقعی و در دو ایستگاه دیگر (رشت و شهرکرد) دما را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. بررسی میانگین داده‌های خروجی نیز نشان داد که ایستگاه یزد با هیچگونه اختلاف با داده‌های ورودی در رتبه نخست و پس از به ترتیب ایستگاه‌های بندرعباس، رشت و شهرکرد قرار گرفته‌اند.

با استفاده از رابطه 2 و مشخص شدن متغیرهای ورودی به آن (جدول 3) در هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی (شکل 3)، مقایسه آماری داده‌های ورودی با داده-های خروجی از مدل نشان داد که مدل سینوسی در برآورد دماهای کمینه، داده‌ها را بیشتر از مقادیر واقعی آنها برآورد نموده و این اختلاف در ایستگاه رشت به $2/71^\circ\text{C}$ می‌رسد. در حالی که در برآورد دماهای بیشینه، در دو



شکل 4- مدل‌های استخراج شده از داده‌های 7 ساله

جدول 4- نتایج واسنجی مدل در ایستگاه‌های مختلف بر اساس جدول 3

پارامتر	بندرعباس		شهرکرد		رشت		یزد	
	مدل	واقعی	مدل	واقعی	مدل	واقعی	مدل	واقعی
کمینه	20/06	18/06	-0/71	-1/53	6/17	3/46	7/91	5/40
بیشینه	41/53	39/56	34/15	40/00	30/44	31/46	43/60	43/53
میانگین	30/75	30/80	16/72	17/54	18/31	17/74	25/76	25/76
انحراف معیار	6/83	6/74	12/34	11/03	8/59	7/57	12/63	11/87

برآورد دمای خاک در طی سال

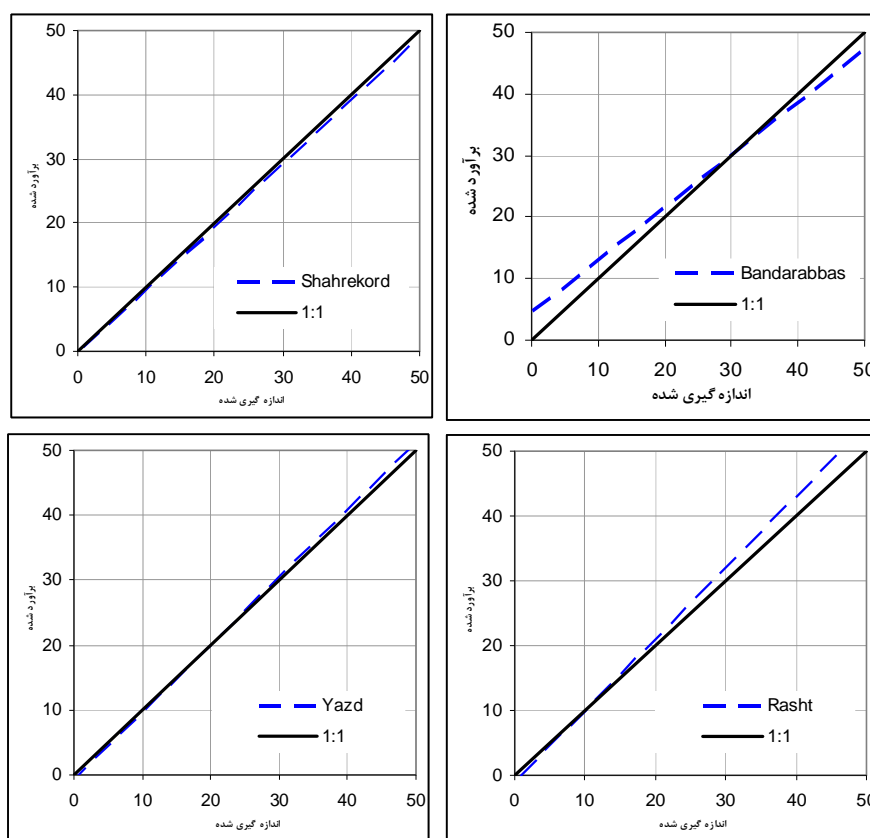
پس از واسنجی مدل با داده‌های آموزشی، اقدام به اعتبارسنجی مدل با داده‌های سه سال مابقی گردید. نتایج حاصل از برآورد دمای خاک با استفاده از مدل سینوسی در ایستگاه‌های بندرعباس، شهرکرد و یزد در طی 7 سال (آموزشی) نشان داد که مدل روند تغییرات دما را به خوبی برآورد نموده است اما به دلیل خاصیت مدل سینوسی، به هنگام تغییرات ناگهانی دما ناکارآمد عمل می‌کند (جدول 4). به طوری که با استفاده از داده‌های 3 ساله (اعتبارسنجی) مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارکرد مدل RMSE، MBE، MPE، d و R^2 برای چهار ایستگاه به طور میانگین به ترتیب برابر 2/64، -0/16، 10/84، 0/93 و 0/59 بدست آمد. در این سه سال مورد بررسی، ایستگاه‌های بندرعباس و شهرکرد به ترتیب با مقدار میانگین 2/28 و 2/91 دارای کمترین و بیشترین RMSE هستند. مقدار MBE در ایستگاه بندرعباس کمترین و در ایستگاه شهرکرد بیشترین است و این در حالی است که از نظر شاخص MPE نیز ایستگاه بندرعباس کمترین و

ایستگاه شهرکرد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. در طی سه سال بررسی، میانگین شاخص توافق در ایستگاه یزد (0/63) بیشترین و در ایستگاه رشت (0/55) کمترین مقدار را بدست آورده است.

همچنین نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده در چهار ایستگاه نشان داد که مدل سینوسی با میانگین $R^2 = 0/93$ دمای خاک را با دقت خوبی برآورد نموده است (جدول 5). اما نکته قابل توجه که از شکل 5 منتج می‌گردد این است که در ایستگاه‌های بندرعباس و رشت نسبت به دو ایستگاه دیگر در برآورد مقادیری که بیشتر از میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده‌اند دچار انحراف شده‌اند و به ترتیب مقادیر را کمتر و بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. ایستگاه بندرعباس مقادیر کمتر از میانگین را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده و این در حالی است که در سه ایستگاه دیگر انحراف قابل توجهی مشاهده نمی‌گردد (شکل 5).

جدول 5- نتایج اعتبار سنجی مدل سینوسی در برآورد روزانه دمای خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه

d	شاخص ارزیابی مدل				سال	ایستگاه
	R ²	MPE	MBE	RMSE		
0/65	0/93	5/77	-0/04	2/11	1379	بندرعباس
0/61	0/92	6/33	0/02	2/21	1382	
0/50	0/89	7/56	-0/26	2/54	1385	
0/62	0/95	10/49	0/82	2/86	1379	شهرکرد
0/55	0/97	8/96	-1/17	2/99	1382	
0/61	0/94	10/29	-0/47	2/90	1385	
0/62	0/93	11/97	-0/56	2/33	1379	رشت
0/56	0/93	13/99	-0/82	2/52	1382	
0/48	0/91	15/50	0/96	2/85	1385	
0/67	0/95	10/19	0/01	2/67	1379	یزد
0/68	0/95	11/70	-0/22	2/63	1382	
0/56	0/94	17/36	-0/21	3/08	1385	



شکل 5- مقایسه دمای برآورد شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در بندرعباس، شهرکرد، رشت و یزد

مناسب برای کشت گیاهان، در تعیین تاریخ کشت محصولات مختلف کشاورزی حائز اهمیت است. با توجه به نظرات تنج و همکاران (1998) در مورد مشکلات استفاده از روش‌های عددی و تجربی موجود در برآورد

بحث

شناخت شرایط اقلیمی و نوسانات آب و هوایی هر منطقه، لازمه بهره‌برداری اقتصادی و درآمدزا از محصولات کشاورزی است. همچنین زمان وقوع دمای

ارزیابی بدست آمده (جدول 6)، به ترتیب ایستگاه بندرعباس، یزد، شهرکرد و رشت دارای بالاترین امتیاز شده و قابلیت مدل سینوسی پیشنهادی را در هریک از اقلیم نشان داد. مدل سینوسی در ایستگاه بندرعباس به دلیل فرارگیری این ایستگاه در نزدیکی خط استوا و عدم وجود تغییرات ناگهانی دما، دمای خاک سطحی (5 cm) را با دقت بالایی برآورد کرد. در صورتی که این مدل ایستگاه رشت را به دلیل نوسانات ناگهانی دمای خاک که می‌تواند ناشی از تأثیر توده هوا و سامانه‌های هواشناسی بر خاک ایستگاه و نفوذ مکرر آب به این عمق ناشی از وقوع فراوان‌تر بارش باران و نزولات جوی باشد، با دقت کمتری برآورد کرده است.

دمای خاک، دمای خاک را می‌توان تنها با داده‌های موجود برآورد نمود. در تحقیق حاضر میزان توانایی مدل سینوسی در برآورد دمای خاک در اقلیم‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و بدین منظور چهار ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور که دارای اقلیم متفاوتی از یکدیگر بودند، مورد استفاده قرار گرفتند. در ابتدا همانند چانگ (1957) تغییرات دمای سالیانه خاک در عمق 5 سانتی‌متر ترسیم شد و روند تغییرات سالانه دما که شباهت به مدل سینوسی داشت آشکار گردید.

بررسی نتایج نشان داد که کارایی مدل سینوسی در برآورد دمای خاک در هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی (نمونه‌های اقلیمی) متفاوت است. به طوری که با انجام رتبه‌بندی ایستگاه‌ها با توجه به مقدار شاخص‌های

جدول 6- رتبه‌بندی هر یک از ایستگاه‌ها با توجه به شاخص‌های ارزیابی

* رتبه شاخص ارزیابی مدل						
ایستگاه	RMSE	MBE	MPE	R ²	d	مجموع
بندرعباس	4	4	4	1	2	15
شهرکرد	1	1	3	4	3	12
رشت	3	3	1	2	1	10
یزد	2	3	2	3	4	14

برای استفاده کاربران دارای مشکلاتی همچون عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز و روش استفاده داشته باشند.

بررسی روش‌های برآورد دمای خاک نشان داد که محققان برای برآورد دمای خاک از روش‌های فوری، بیلان انرژی، شبکه عصب مصنوعی، روابط همبستگی میان دمای خاک و برخی پارامترهای هواشناسی و روابط فیزیکی انتقال گرما در خاک استفاده کرده‌اند. در حالی که با استفاده از داده‌های موجود و بهره‌گیری از رابطه سینوسی، مشخص شد که این مدل با میانگین $R^2=0/93$ در چهار ایستگاه مورد مطالعه، می‌تواند نتیجه قابل قبولی را برای برآورد دمای خاک به دست آورد. در شرایط عدم دسترسی به داده‌های دمای خاک به منظور استخراج پارامترهای مورد نیاز مدل سینوسی و عدم وجود خصوصیات دمایی خاک، طبق اظهار جعفری گلستان و همکاران (1386)، روش استفاده از دمای هوا به منظور تعیین دمای خاک، روش مناسبی است. البته در این روش نیز بایستی روابط برای هر ایستگاه و به طور دقیق‌تر برای هر ماه به طور جداگانه به دست آید.

به طور کلی مدل سینوسی مدل کارآمدی در برآورد چرخه سالانه تغییر دمای خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. گومان و لال (1981 و 1982) با استفاده از روش سری فوری به شیوه انتقال گرمای هدایتی به پیش‌بینی دمای خاک پرداختند. مقایسه داده‌های برآورد شده دمای خاک با داده‌های اندازه‌گیری شده در این مطالعه نشان داد که بین آنها، همبستگی خوبی برقرار است اما این روش نیاز به خصوصیات فیزیکی خاک دارد که ممکن است برای برآورد دمای خاک در دسترس نباشد. روش مکین و آیرس (1985) که با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره به تعیین ارتباط بین دمای خاک با پارامترهای هواشناسی پرداختند نیز نیاز به چندین پارامتر هواشناسی دارد. توندولم (1990) نیز که به وسیله مدل‌سازی عددی و با استفاده از دو پارامتر دمای هوا و توازن انرژی سطح خاک به پیش‌بینی دمای خاک پرداخت نیز به علت نیاز به تعیین توازن انرژی سطح خاک ممکن است دارای محدودیت باشد. تکنیک هوش مصنوعی پیشنهاد شده توسط میهالاکاکو (2001) و معادلات ریاضی و قوانین فیزیکی توسط گائو و همکاران (2007) نیز که برآوردی از توزیع دمای سطحی خاک داشتند ممکن است

فهرست منابع:

۱. بای‌بوردی، م. 1372. فیزیک خاک کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، 671 ص.
۲. بهیار، م. ب. 1380. پیش‌بینی دمای حداقل خاک و روش‌های مبارزه با یخبندان و سرمازدگی در استان چهار محال و بختیاری، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو.
۳. ثنائی‌نژاد، ح.، ادیب‌عباسی، م.، موسوی‌بایگی، م. و حیدری‌گندمان، م. ط. 1387. 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، 23-25: 22.
۴. جعفری گلستان، م.، رائینی سراج، م. و ضیاء تبار احمدی، م. 1386. برآورد دمای ژرفای خاک با بهره‌گیری از روش تجزیه منحنی و همبستگی‌های رگرسیونی برای شهر ساری، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ویژه نامه زراعت و اصلاح نباتات: 112-123: 14(5).
۵. عباسی، ا. 1385. 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.
۶. قائمی‌نیا، ع. م.، عظیم‌زاده، ح. ر. و مبین، م. ح. 1390. شبیه‌سازی تغییرات دمای اعماق مختلف خاک و بررسی برخی عامل‌های جوی تأثیرگذار بر آن، مجله تحقیقات مرتع و بیابان ایران، 42-57: 18(1).
۷. مسعودیان، ا. و کاویانی، م. ر. 1387. اقلیم‌شناسی ایران، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، 179 ص.
8. Adjepong, S. K. and Gupta-Afriyi, K. 1977. Analysis and time series of soil temperature as recorded at different depths at three locations in Ghana. In: Greenland, D. J., Lal, R. (Eds.), Soil Conservation and Management in the Humid Tropics. New York: Wiley
9. Covell, S., Ellis, R. H., Roberts, E. H. and Summerfield, R. J. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. I. A comparison of chickpea, lentil, soybean and cowpea at constant temperatures. Journal of Expert Botany. 37, 705-715.
10. Chang, J. 1957. Global distribution of the annual range in the soil temperature, transactions, American Geophysical Union, 38: 718-723.
11. Ellis, R. H., Covell, S., Roberts, E. H. and Summerfield, R. J. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. II. Intraspecific variation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) at constant temperatures. Journal of Expert Botany, 37, 1503-1515.
12. Garcia-Huidobro, J. L., Monteith, L. and Squire, G. R. 1982. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). I. Constant temperature. Journal of Expert Botany, 33, 288-296.
13. Gao, Z., Bian, L., Wang, L. and Fan, J., 2007. Determination of soil temperature in an arid region, Journal of Arid Environments, 71: 157-168.
14. Ghuman B.S. and Lal, R. 1981. Predicting diurnal temperature regimes of the central Appalachians, Soil Science, 132: 274-252.
15. 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, Journal of Soil Science, 134, 133-140.
16. Maclean, S. F. and Ayres, M. P. 1985. Estimation of soil temperature from climatic variables at Barrow, Alaska, USA, Arctic and Alpine Research, 17: 425-432.
17. Mavi, H. S. and Tupper, G. J. 2004. Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture, Haworth press, Translated in Farsi by G.A. Mozafari, Nikpendar press, 518 pp.

18. Mihalakakau, G. 2001. On estimating soil surface temperature profiles, *Energy and Building*, 34: 251-259.
19. Mohamed, H. A., Clark, J.A. and Ong, C. K. 1988. Genotypic differences in the temperature responses of tropical crops. I. Germination characteristics of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) and pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). *Journal of Expert Botany*. 39, 1121–1128.
20. Tenge A. J., Kaihura, F.B., Lal, S. R. and Singh, B. R. 1998. Diurnal soil temperature fluctuations for different erosion classes of an oxisol at Mlingano, Tanzania. *Soil and Tillage Research*. 49, 211-217.
21. Thundholm, B. 1990. A comparison of measured and simulated soil temperatures using air temperature and soil surface energy balance as boundary conditions. *Agriculture forest meteorology*, 53, 59-72.
22. Washitani, I. 1985. Germination-rate dependency on temperature of *Geranium carolinium* seeds. *Journal of Expert Botany*, 36, 330– 337.
23. Washitani, I. and Saeki, T. 1986. Germination responses of *Pinus densiflora* seeds to temperature, light and interrupted imbibition. *Journal of Expert Botany*, 37, 1376–1387.
24. Willmott, C. J. 1981. On the validation of models, *Physical Geography*, 2, 184-194.