

ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل پایگاه ECMWF در برآورد تغییرات دمای عمق‌های مختلف خاک (مطالعه موردی: شهر تهران)

❖ معصومه مقبل*؛ استادیار آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در ایستگاه‌های هواشناسی همدید داده‌های دمای عمق‌های مختلف خاک از بیشترین خلا آماری برخوردار است که تحقیقات مرتبط با دمای عمق خاک مانند مطالعات کشاورزی را با مشکل رو به رو می‌سازد. از اینرو، در پژوهش حاضر تلاش شد تا علاوه بر ارزیابی تغییرات دمای عمق‌های مختلف خاک و توزیع مکانی و زمانی آن، دقت و عملکرد داده‌های بازتحلیل پایگاه ECMWF در برآورد دمای عمق خاک به عنوان جایگزینی برای داده‌های ایستگاهی دارای خلا، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. برای این منظور، داده‌های ایستگاهی دمای شش عمق از خاک (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متری) مربوط به چهار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک (شامل مهرآباد، ژئوفیزیک، شمال تهران و دوشان تپه) در تهران برای بازه زمانی (۱۹۹۷-۲۰۱۸) و در مقیاس ساعتی از سازمان هواشناسی کشور استخراج شد. ابتدا با استفاده از آزمون من-کندال روند تغییرات دمای عمق‌های مختلف خاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین توزیع مکانی-زمانی داده‌های عمق‌های خاک در تهران تعیین شد. علاوه بر این، داده‌های شبکه بندی شده و بازتحلیل پایگاه ECMWF نسخه ERA5 برای محدوده مورد مطالعه دریافت و به فرمت متنی تبدیل شد. در ادامه، دقت و عملکرد داده‌های بازتحلیل با استفاده از آزمون‌های آماری ضریب همبستگی، خطای میانگین، خطای میانگین مطلق و خطای جذر میانگین مربعات تعیین شد. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که دمای عمق‌های مورد مطالعه در هر چهار ایستگاه فوق‌الذکر از روند افزایشی برخوردار است. ضریب همبستگی بین داده‌های ایستگاهی و بازتحلیل برای عمق اول (۵ تا ۳۰ سانتی متری) ۰/۹۷ و برای عمق دوم (۳۰ تا ۱۰۰ سانتی متری) ۰/۹۵ بدست آمد. به طور میانگین داده‌های بازتحلیل در عمق یک (۵ تا ۳۰ سانتی متری) و برای ساعات ۰۳، ۰۹ صبح و ۱۵ بعدازظهر (به وقت گرینویچ) به ترتیب به مقدار ۰/۲۰، ۱/۷ و ۲/۲ درجه سانتی گراد حالت بیش برآوردی دارد. این مقدار در ساعات مختلف مورد بررسی برای عمق دوم (۳۰-۱۰۰ سانتی متری) شامل ۰/۸، ۱/۹ و ۲/۵ درجه سانتی گراد است. براین اساس، داده‌های برآوردی دمای عمق‌های خاک موجود بر پایگاه ECMWF می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های ایستگاهی در شرایط نبود داده یا در مناطق فاقد ایستگاه اندازه‌گیری باشد.

کلمات کلیدی: دمای عمق‌های خاک، روند، داده‌های بازتحلیل، ECMWF، تهران.

۱. مقدمه

دمای خاک به عنوان یک متغیر مهم در شناسایی ویژگی‌های حرارتی خاک است که نمایانگر برهمکنش بین جو و سطح زمین است. این چرخه که بین خاک و جو در طول سال اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد که خاک منبع خوبی از پتانسیل انرژی حرارتی است. از طرف دیگر، دمای خاک بسته به ساعات روز، ماه، فصل و سال تغییرات دوره ای نشان می‌دهد که عمدتاً وابسته به تغییرات تابش خورشیدی است و از ویژگی سینوسی برخوردار است [۲۳]. به طوری که، در فصل سرما خاک گرمتر از هوا و محیط اطراف است و در فصل گرما، عکس این حالت اتفاق می‌افتد. از آنجایی که دمای خاک می‌تواند تبادل و توزیع انرژی و موازنه آب در سطح زمین را تحت تاثیر قرار دهد قادر است در تغییرات آب و هوایی نیز موثر واقع شود [۴،۹]. علاوه بر این، دمای خاک یکی از مشخصه‌های فیزیکی عمده خاک بوده، رشد و نمو گیاهان و تکوین فرآیندهای خاکسازی در گرو تغییرات آن است [۱۸]. دمای خاک می‌تواند بر بسیاری از فعالیت‌های زیستی (مانند رشد و نمو گیاهان)، فیزیکی (مانند تخریب و فرسایش خاک) و شیمیایی (مانند میزان تبخیر و تعرق از خاک) اثرگذار باشد. از اینرو، بررسی روند تغییرات دمای خاک در طول زمان می‌تواند به عنوان نشانه ای برای تغییرات آب و هوای محلی مد نظر قرار بگیرد.

با توجه به اهمیت دمای عمق خاک در شرایط هیدرولوژیکی، پراکنش گیاهان، سرعت رشد گیاهان، افزایش تجزیه کربن آلی خاک، و افزایش انتشار دی اکسید کربن از خاک به جو [۱۶، ۲۶، ۲۸، ۲۹]، در مطالعات بسیاری محققان تلاش کرده اند که به ارتباط سنجی بین دمای خاک و عمق‌های آن با سایر پارامترهای جوی مثل دمای هوا پرداخته و از طریق شناسایی ارتباط بین آنها، مدل‌هایی را برای برآورد و تخمین دمای خاک و عمق‌های آن ارائه کنند. مدلسازی دمای عمق‌های خاک

نشان دادند که اختلاف بین داده‌های برآورد شده و داده‌های واقعی با افزایش عمق بیشتر می‌شود [۱۱،۳۰]. در مطالعه ای برآورد دمای عمق‌های خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که این مدل به خوبی قادر به برآورد دمای عمق‌های خاک است [۱۵]. در پژوهش‌هایی دیگر مبنی بر ارائه مدل جدید برآورد دمای عمق‌های خاک مشخص شد که با ترکیب داده‌های هواشناسی یک مدل ELM^۱ می‌تواند یک ابزار مناسب در برآورد دمای عمق‌های مختلف خاک باشد [۵، ۱۰، ۲۲]. برآورد دمای عمق‌های مختلف خاک با استفاده از داده‌های سنجش از دوری نشان داد که تصاویر MODIS از قابلیت خوبی برای برآورد دمای خاک در عمق‌های بالایی و محل رویش ریشه گیاهان برخوردار است [۷]. همچنین نتایج مطالعه‌ای دیگر مشخص کرده است که مدل شبکه عصبی مصنوعی در برآورد دمای خاک و عمق‌های آن از قابلیت مناسبی برخوردار است [۲۵].

در ایران نیز مطالعاتی در خصوص برآورد دمای خاک و عمق‌های آن به عمل آمده است. مطالعات متعددی در زمینه برآورد میانگین روزانه دمای خاک با استفاده از داده‌های هواشناسی نشان داده است که میانگین روزانه دمای هوا می‌تواند معیار مناسبی برای برآورد دمای خاک باشد [۲، ۳، ۸، ۱۴، ۱۹].

با این حال، مطالعات در خصوص دمای خاک و عمق‌های آن همواره با محدودیت‌هایی برخوردار بوده است. یکی از مهمترین این محدودیت‌ها، نبود یا کمبود داده‌های مناسب و کافی در نقاط مختلف است. به عبارت دیگر، اندازه‌گیری دمای خاک و عمق‌های آن در ایستگاه‌های همدید با انواع مختلف حسگر و یا دماسنج‌های معمولی صورت می‌گیرد که پرهزینه بوده و به پایش مداوم نیاز دارد از این رو است که عمدتاً داده‌های مربوط به دما و رطوبت خاک در ایستگاه‌های همدید یا دارای دوره آماری بلند مدتی نیستند و یا از خلاهای آماری بیشماری در طی سال‌های مختلف برخوردارند. این

1 Extreme Learning Machine (ELM).

میزان دقت و اعتبار داده‌های دما و رطوبت عمق‌های مختلف خاک تولید شده توسط پایگاه ECMWF است. بدین منظور از جدیدترین نسل داده‌های مربوط به این پارامتر (دمای عمق‌های خاک) یعنی ERA5^۳ استفاده شد. بدیهی است تعیین دقت این داده‌ها می‌تواند کیفیت پژوهش‌های علمی در خصوص دمای عمق‌های خاک را هم از نظر مکانی (مقیاس مکانی مطالعات) و هم از نظر زمانی (طول دوره مطالعاتی) افزایش دهد.

۲. روش شناسی

۲.۱.۲. داده‌های ایستگاهی

به منظور ارزیابی تغییرات دمای عمق‌های خاک، داده‌های عمق‌های خاک چهار ایستگاه همدید در تهران و برای عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متری از سطح خاک در دوره آماری ۲۲ ساله (۱۹۹۷-۲۰۱۸) در سه بازه ساعتی ۰۳، ۰۹ و ۱۵ (به وقت گرینویچ) از سازمان هواشناسی کشور استخراج شد. این ایستگاه‌ها شامل ایستگاه مهرآباد، ژئوفیزیک، شمال تهران و دوشان تپه هستند که توزیع مکانی و ویژگی‌های جغرافیایی آنها به ترتیب در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۲.۲. داده‌های باز تحلیل ERA5 از پایگاه

ECMWF

داده‌های ERA5، داده‌های باز تحلیل برای کل کره زمین هستند که از نظر زمانی از ۱۹۷۹ تا زمان حال را شامل می‌شوند. این داده‌ها آخرین نسل داده‌های باز تحلیل پایگاه ECMWF هستند که پارامترهای مختلف از جمله دمای خاک را برای سه سطح مختلف شامل ۰-۷ سانتی متر (سطح اول)، ۷-۲۸ سانتی متر (سطح دوم) و ۲۸-۱۰۰ سانتی متر (سطح سوم) در مقیاس زمانی ساعتی و برای کل کره زمین با قدرت تفکیک 0.25×0.25 درجه در

موضوع سبب شده تا در استفاده از این پارامتر در زمینه مطالعات و تحقیقات مربوط به دمای خاک از جمله مطالعات کشاورزی محدودیت‌های زیادی به وجود آید. این محدودیت لزوم یافتن راهکارهایی برای حل این معضل را بیش از پیش نمایان می‌سازد. از جمله این راهکارها، استفاده از پایگاه داده‌ها و اطلاعات به روز و مدرنی است که بتواند خلاهای آماری را تکمیل نماید و در عین حال از دقت و صحت لازم در برآورد دمای عمق‌های خاک برخوردار باشد. یکی از این پایگاه‌های مهم که امکان دسترسی به پارامترهای مختلف جوی و اقلیمی را فراهم می‌نماید مرکز اروپایی پیش بینی‌های میان مدت جوی یا ECMWF^۱ است. این پایگاه منابعی از داده‌های تقریباً روزآمد هواشناسی را در اختیار پژوهشگران قرار داده است که میزان خطای آن در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های زمینی در بسیاری از نقاط جهان اندک و قابل چشم پوشی است. و به همین علت می‌توان با تعیین اعتبار این داده‌ها، از آنها در کنار داده‌های زمینی و یا حتی در حکم جایگزینی برای داده‌های مشاهده ای در مناطق بدون ایستگاه استفاده کرد. داده‌های باز تحلیل شده^۲ این پایگاه معمولاً از ترکیب نتایج پیش بینی‌های کوتاه مدت مدل‌های پیش بینی وضع هوا با داده‌های مشاهداتی به دست می‌آیند. با توجه به قدرت تفکیک بالای این نوع داده‌ها، می‌توانند در تکمیل داده‌های زمینی بسیار مفید واقع شوند و در فواصل بین ایستگاه‌ها و یا در مناطق فاقد ایستگاه مورد استفاده قرار گیرد. تعیین دقت داده‌های تولیدی این پایگاه‌ها و گرایش به سمت استفاده از آنها می‌تواند هزینه‌های ناشی راه اندازی و نصب ایستگاه‌های زمینی، پایش و نگهداری و به هنگام سازی آنها را نیز به حداقل رساند. با توجه به اینکه داده‌های مربوط به دمای عمق‌های مختلف خاک از جمله داده‌های دارای خلاهای بیشمار آماری در بین پارامترهای آب و هوایی مناطق مختلف است، هدف از پژوهش حاضر تعیین

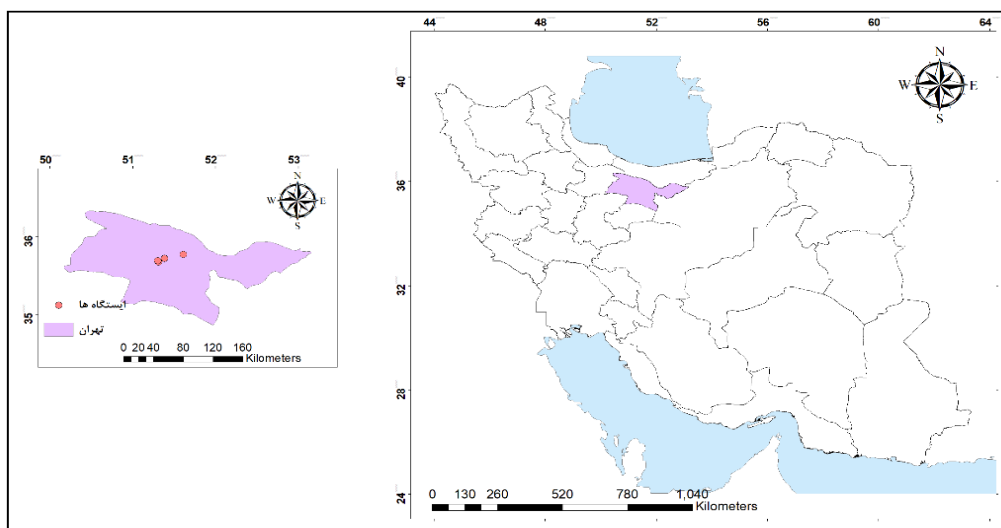
1 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

2 Reanalysis data

3 Fifth major global reanalysis produced by ECMWF.

سطح از داده‌های باز تحلیل اندازه‌گیری نمی‌شود و اندازه‌گیری‌ها از عمق ۵ تا ۱۰۰ متری در ایستگاه‌های سینوپتیک انجام می‌شود. در ادامه، با توجه به اینکه داده‌های فوق، داده‌های شبکه بندی شده و در قالب NetCDF^۱ هستند، قالب این داده‌ها برای نقاط مرجع زمینی (موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه) با استفاده از نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS^۲) به قالب متنی تبدیل گردید تا امکان مقایسه و تطبیق این داده‌ها با داده‌های زمینی و برآورد دقت و عملکرد آنها امکان پذیر باشد.

اختیار کاربران قرار می‌دهد. از آنجاییکه داده‌های مربوط به دمای عمق‌های خاک از جمله داده‌های اقلیمی هستند که عمدتاً با خلاهای اماری در ایستگاه‌های زمینی همراه هستند، در پژوهش حاضر داده‌های باز تحلیل شبکه بندی شده ERA5 برای منطقه مورد مطالعه از پایگاه مربوطه در دوره آماری ۱۹۹۷-۲۰۱۸ و در بازه زمانی ساعتی (۰۳، ۰۹، ۱۵) و در دو سطح دوم و سوم (۷-۲۸ و ۲۸-۱۰۰ سانتی متری زیر خاک) استخراج گردید. دلیل عدم انتخاب سطح اول (۰-۷ سانتی متری) این بود که در ایستگاه‌های زمینی داده عمق ۰-۵ سانتی متری برای تطبیق با این



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

آزمون گرافیکی کندال می‌باشد. نحوه محاسبه این آزمون به طور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است. پس از محاسبات فوق و ترسیم نمودارهای مربوطه، زمانی که روند معنی‌داری در داده‌ها وجود داشته باشد خطوط u'i و u'i هم‌دیگر را قطع می‌کنند. اگر خطوط مذکور در داخل محدوده بحرانی ($\pm 1/96$) هم‌دیگر را قطع کنند نشانه آغاز تغییر ناگهانی و در صورتی که خارج از محدوده بحرانی یکدیگر را قطع کنند بیانگر وجود روند در سری‌های زمانی است [۱۲].

۳.۲. تعیین تغییرات دمای عمق‌های خاک

پس از اخذ داده‌های ایستگاهی و داده‌های باز تحلیل از پایگاه‌ها و مراجع مربوط به هریک و انجام اقدامات اولیه مانند همگن سازی و تبدیل قالب داده‌ها در بخش اول این پژوهش، تغییرات دمای عمق‌های خاک به عنوان یک فاکتور مهم و نمایانگر تغییر اقلیم در منطقه با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین وجود روند، نوع و زمان تغییر نیاز به

1 Network Common Data Form

2 Geographic Information System.

جدول ۱. مراحل و نحوه محاسبه آزمون من-کندال

معادلات محاسبه ضرایب	ضرایب
$t_i = \sum_{i=1}^n ni$ معادله (۱):	ضریب t آزمون کندال:
$E(t_i) = \frac{n(n-1)}{4}$ معادله (۲):	تابع توزیع ضریب t:
$Var(t_i) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$ معادله (۳):	واریانس تابع توزیع:
$U(t_i) = [t_i - E(t_i)] / \sqrt{Var(t_i)}$ معادله (۴):	در این آزمون وجود روند در شکل دو طرفه آن صحیح بوده و از این رو فرض صفر برای مقادیر بالای $ u(t_i) $ رد می‌گردد و $u(t_i)$ از رابطه زیر استفاده می‌شود:
$(t'_i) = \sum_{i=1}^n ni$ معادله (۵):	تعیین زمان وقوع تغییر:
$u'_i = -u(t'_i)$ معادله (۶):	مولفه u' که معادل عکس u است:

ایستگاه‌هاست [۲۱،۲۰].

۴.۲. ارزیابی کاربرد داده‌های باز تحلیل ERA5

در برآورد دمای عمق‌های خاک

همانطور که پیشتر اشاره شد، به منظور تعیین عملکرد داده‌های باز تحلیل ERA5 در برآورد دمای عمق‌های مختلف خاک، این داده‌ها از پایگاه ECMWF برای منطقه مورد نظر در مقیاس زمانی ساعتی و در دوره آماری ۲۲ ساله در دو عمق ۷-۲۸ و ۲۸-۱۰۰ سانتی متر از این پایگاه دریافت و تبدیل قالب روی این داده‌ها انجام پذیرفت. سپس، برای تعیین دقت این داده‌ها در برآورد دمای عمق‌های خاک از آزمون‌های آماری شامل ضریب همبستگی (R)، خطای میانگین^۲ (ME)، خطای میانگین مطلق^۳ (MAE) و خطای جذر میانگین مربعات^۴ (RMSE) استفاده شد و میزان تطابق داده‌های مشاهداتی

در نهایت توزیع مکانی دمای عمق‌های مختلف خاک در مقیاس سالانه و فصلی و با روش درون یابی^۱ IDW در نرم افزار GIS مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به توضیح است کلیه روش‌های درون یابی بر مبنای این فرضیه توسعه یافته‌اند که نقاط نزدیک تر به یکدیگر نسبت به نقاط دورتر همبستگی و تشابه بیشتری دارند. در روش IDW فرض اساسی بر این است که میزان همبستگی و تشابه بین همسایه‌ها با فاصله بین آنها متناسب است، که می‌توان آن را به صورت تابعی با معکوس از فاصله هر نقطه از نقاط همسایه تعریف کرد. این روش از رابطه (۷) قابل محاسبه است:

$$Z(n) = \frac{1}{N} \{ \sum Z(xi) \} \quad \text{معادله ۷:}$$

که در آن، $Z(n)$ مقدار برآورد شده در نقطه n ، $Z(xi)$ مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت xi ، و N تعداد کل

1 Inverse distance weighting

2 Mean Error

3 Mean Absolut Error

4 Root Mean Square Error

نظر توزیع عمودی دما در خاک، در تمامی ایستگاه‌ها مورد مطالعه دمای عمق دوم (۳۰-۱۰۰) سانتی متری نسبت به عمق اول (۵-۳۰ سانتی متری) کمتر است. به عبارت دیگر، دمای خاک از سطح به عمق کاهش می‌یابد. بررسی توزیع دمای عمق‌های خاک از نظر ماهانه نشان داد که بالاترین دما در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه در ماه جولای و با مقدار $۳۳/۶$ ، $۳۳/۸$ ، $۳۴/۴$ ، $۳۳/۹$ درجه سانتی گراد به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های مهرآباد، ژئوفیزیک، شمال تهران و دوشان تپه بوده که در عمق بالایی (عمق ۱) به ثبت رسیده است. همین ویژگی برای بالاترین دمای ماهانه در عمق دوم نیز با حدود دو درجه اختلاف (دمای کمتر) قابل مشاهده است. در نقطه مقابل، کمترین دمای ماهانه نیز مربوط به دو ماه ژانویه و فوریه است. به عبارت دیگر زمان وقوع کمترین دما در عمق‌های خاک در بین ایستگاه‌ها بین این دو ماه در تغییر است. شکل ۲ توزیع ماهانه دما در دو عمق مورد بررسی را نمایش می‌دهد.

بررسی توزیع مکانی دمای عمق‌های خاک در مقیاس فصلی نیز نشان می‌دهد که علی‌رغم تغییرات دما از نظر کمی در ارتباط با تغییر فصول که در نتیجه آن بالاترین دمای عمق‌های خاک در تابستان و پایین‌ترین در زمستان رخ می‌دهد، اما توزیع جغرافیایی و مکانی این دماها در سطح منطقه از الگوی مشخصی برخوردار است. بر اساس این نتایج مشخص شد که تقریباً در تمامی فصول دمای هر دو عمق خاک در نیمه شرقی تهران بالاتر از نیمه غربی آن است. به عبارت دیگر پایین‌ترین دماها در تمامی فصول در بخش‌های غرب تا شمال غرب منطقه در هر دو عمق رخ می‌دهد در حالیکه بالاترین دماها در فصول مختلف سال در شرق و شمال شرق تهران به وقوع می‌پیوندد. از نقطه نظر فصلی بالاترین دما مربوط به عمق یک و با مقدار $۳۲/۸$ درجه سانتی گراد در فصل تابستان در نیمه شرقی رخ داده است (شکل ۳).

با داده‌های باز تحلیل در محل ایستگاه‌ها و بازه زمانی ساعتی برای دو عمق مورد نظر (۷-۲۸ و ۲۸-۱۰۰ سانتی متری) تعیین گردید. لازم به توضیح است عمق‌های متعارف این دو سطح شامل عمق ۵-۳۰ و ۳۰-۱۰۰ سانتی متری برای داده‌های زمینی در نظر گرفته شد. برای این منظور، داده‌های مشاهداتی دمای عمق‌های خاک و داده‌های ساعتی عمق خاک ERA5 در نزدیکترین نقطه ایستگاه‌های مورد مطالعه در ماتریس‌هایی به ابعاد ۴×۲۴۰۹۰ مرتب شده و مورد استفاده قرار گرفت. در این ماتریس‌ها ۲۴۰۹۰ تعداد مشاهدات ساعتی (سه بار در روز) در طی ۲۲ سال آماری است ($۳ \times ۳۶۵ \times ۲۲$) و ۴ نیز تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح شهر تهران است. نحوه محاسبه هر یک از این آزمون‌ها در معادلات ۸ تا ۱۰ نمایش داده شده است:

$$ME = \sum_{i=1}^n (STERA - STobs) / n \quad \text{معادله ۸:}$$

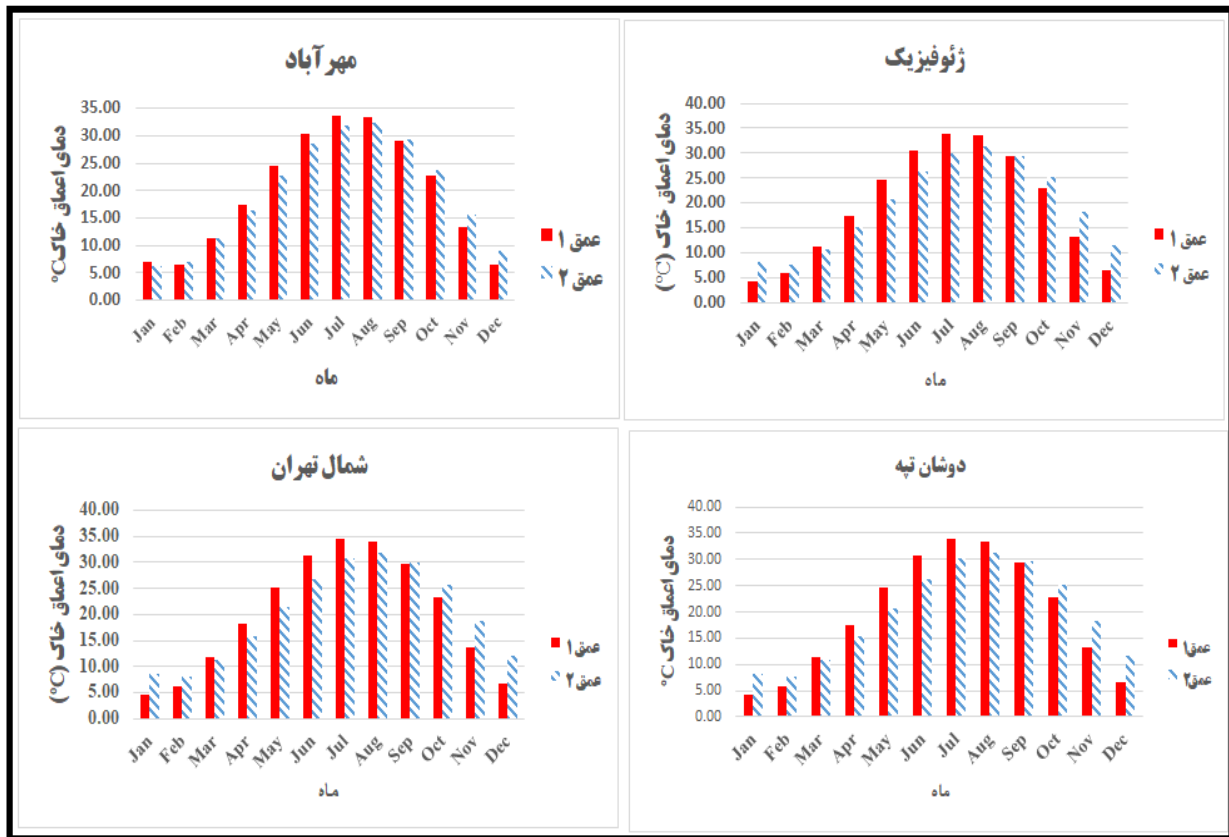
$$MAE = \sum_{i=1}^n (|STERA - STobs|) / n \quad \text{معادله ۹:}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (STERA - STobs)^2} \quad \text{معادله ۱۰:}$$

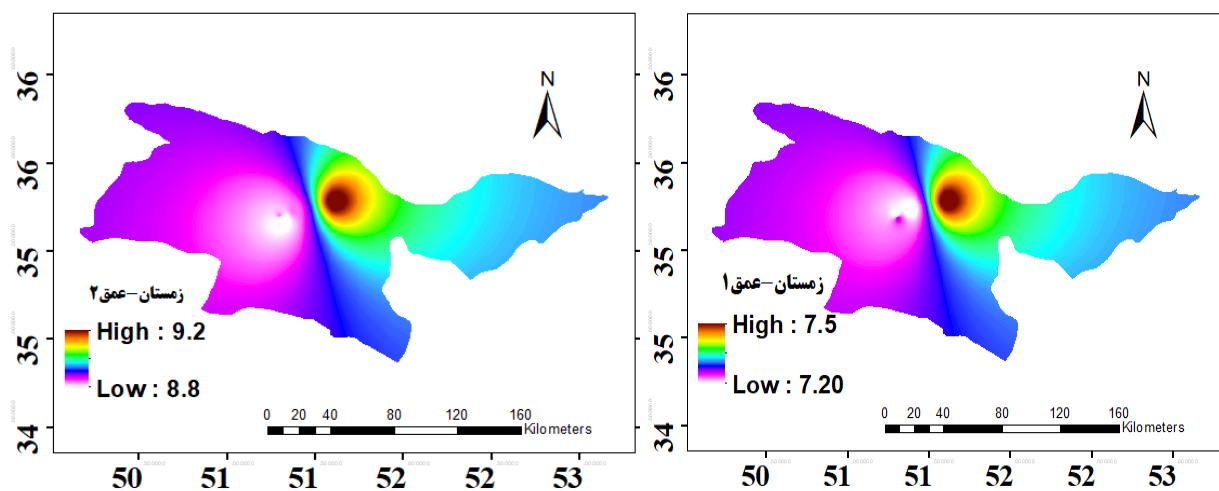
که در آنها منظور از ERA داده باز تحلیل ERA5 و منظور از obs داده مشاهداتی در ایستگاه است.

۳. نتایج

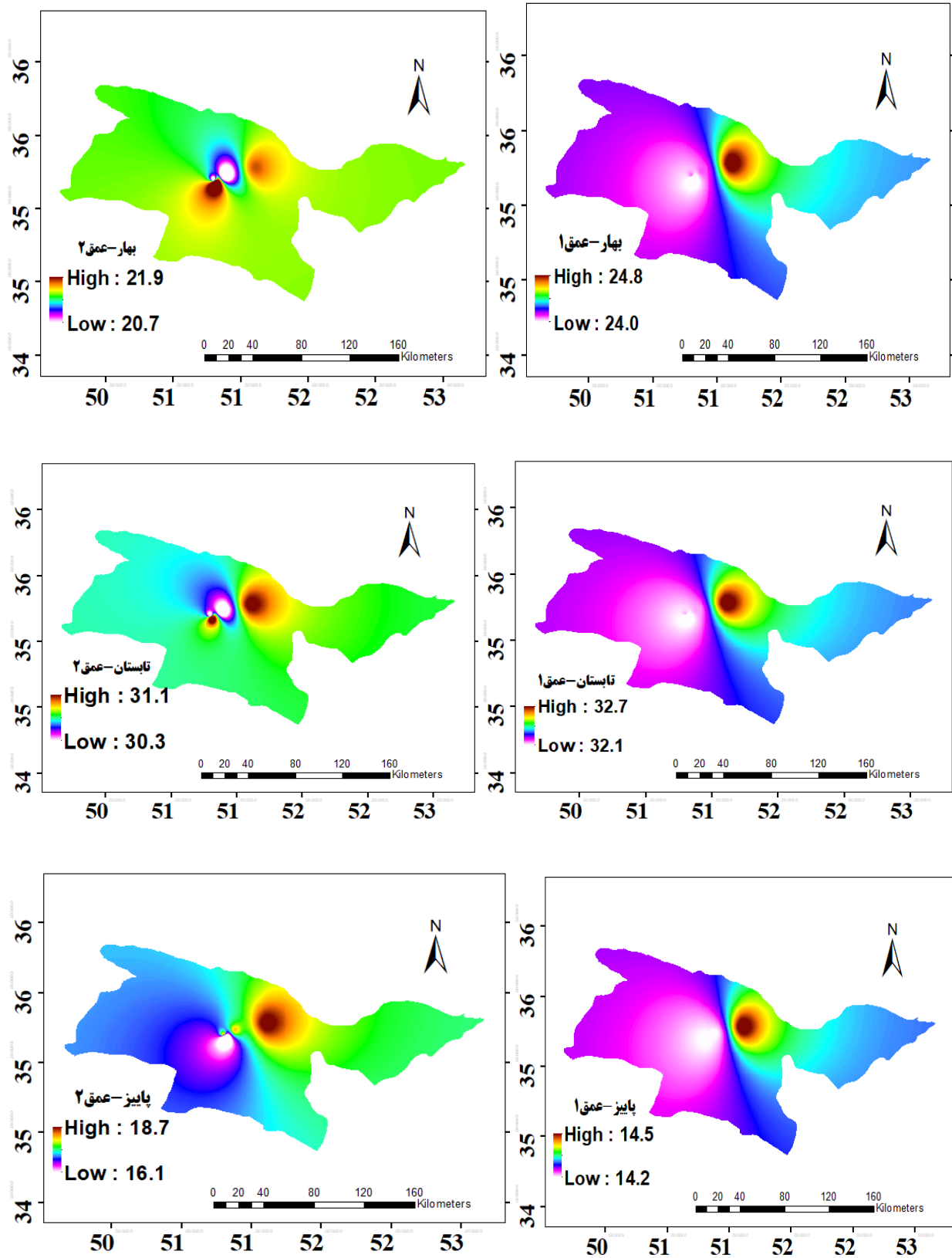
میانگین سالانه دمای خاک تمامی عمق‌های خاک در طول دوره آماری (۱۹۹۷-۲۰۱۸) در ایستگاه‌های مهرآباد، ژئوفیزیک، دوشان تپه و شمال تهران به ترتیب $۱۹/۴$ ، $۱۹/۶$ ، $۱۹/۷$ و $۲۰/۱$ درجه سانتی گراد است. بنابراین، بالاترین دمای عمقی خاک مربوط به ایستگاه شمال تهران است. از



شکل ۲. تغییرات ماهانه دمای خاک در دو عمق مورد مطالعه



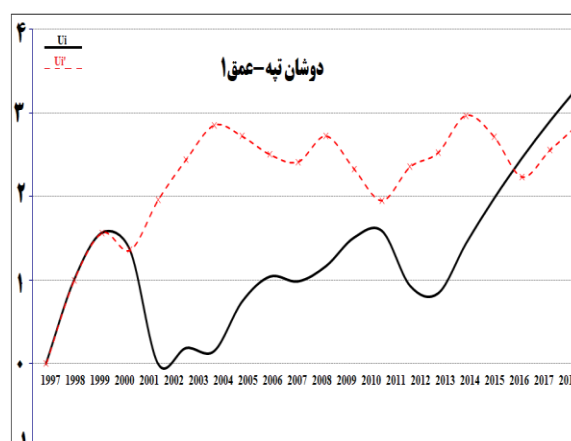
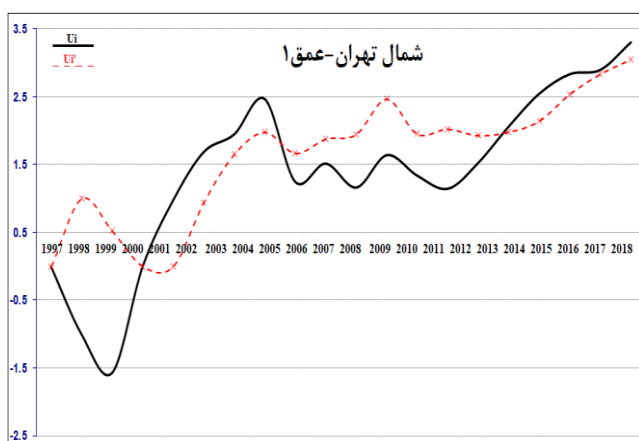
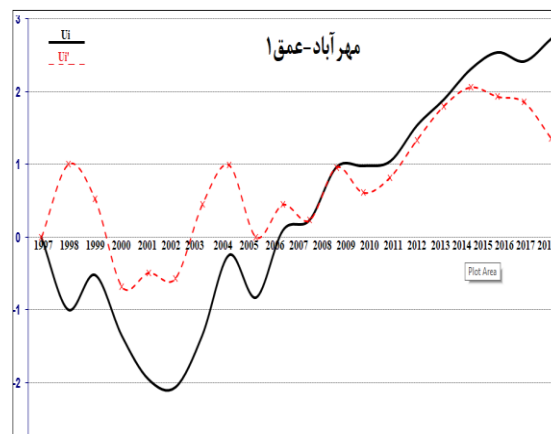
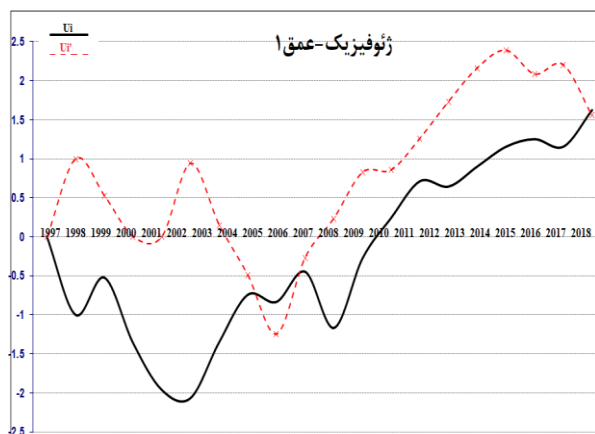
شکل ۳. توزیع مکانی دمای عمق‌های خاک در فصول مختلف سال



ادامه شکل ۳

ایستگاه‌های واقع در غرب تهران از جمله مهرآباد و ژئوفیزیک روند افزایشی بعد از سال ۲۰۰۶ قابل مشاهده است در حالیکه در ایستگاه‌های شرقی تر (شمال تهران و دوشان تپه) با جهش متعدد روند افزایشی از بعد از سال ۲۰۱۱ چشمگیر تر است. در نهایت براساس نتایج حاصل از روندیابی داده‌های دمای عمق‌های خاک، روند غالب در ایستگاه‌ها در هر دو عمق افزایشی بوده است. شکل ۴ نتایج حاصل از آزمون گریفیکی من کندال را در ایستگاه‌های مورد مطالعه و برای عمق ۱ (۵-۳۰ سانتی متری) نمایش می‌دهد. روند مشابهی در داده‌های دمای خاک عمق ۲ (۳۰-۱۰۰ سانتی متری) مشاهده شد.

نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات دمای عمق‌های خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه تهران در دوره آماری ۲۲ ساله بر اساس آزمون من-کندال نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها داده‌های سالانه دمای عمق‌های خاک در هر دو عمق مورد بررسی دارای جهش ناگهانی بوده اند اما زمان این جهش و تغییر در ایستگاه‌های مختلف متفاوت بوده است. علاوه بر جهش و تغییرات ناگهانی در سری زمانی دمای عمق‌های خاک، براساس روند به دست آمده در تمامی ایستگاه‌ها، یک روند افزایشی در دمای عمق‌های خاک قابل مشاهده است. تاریخ آغاز این روند افزایشی بسته به موقعیت ایستگاه‌ها متفاوت است. به طور کلی در

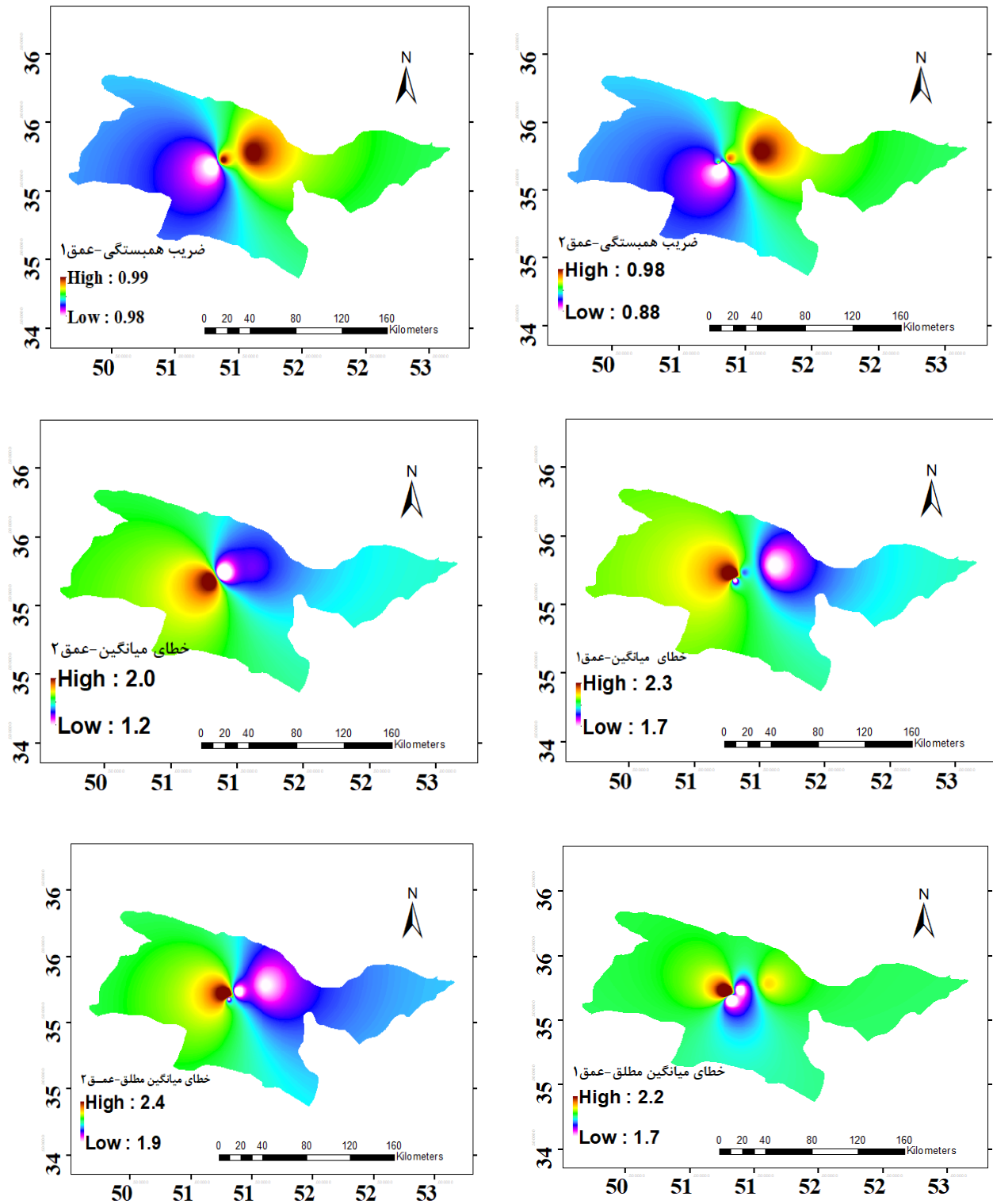


شکل ۴. روند تغییرات دمای عمق‌های خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه براساس آزمون من-کندال

همانطور که قبلا اشاره شد، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی عملکرد داده‌های باز تحلیل ERA5 در تخمین و برآورد داده‌های عمق‌های خاک است. نتایج حاصل از آزمون‌های آماری مختلف بین داده‌های ایستگاهی و داده‌های باز تحلیل نشان داد که در تمامی ساعات روز و در هر دو عمق و در هر چهار ایستگاه مورد مطالعه، بین داده‌های ایستگاهی و داده‌های باز تحلیل ضریب همبستگی معناداری برقرار است. بالاترین ضریب همبستگی در بین ساعات و عمق‌های مختلف ۰/۹۹ و کمترین آن ۰/۹۷ بدست آمد. از این نظر، اگرچه هماهنگی زمانی بسیار زیادی بین سری زمانی داده‌های مورد نظر برقرار است اما به طور کلی نتایج نشان داد که پایگاه ECMWF عمدتاً دارای ویژگی بیش برآوردی^۱ در تخمین داده‌های خاک در هر دو عمق است. به عبارت دیگر، در طول دوره آماری مورد مطالعه، داده‌های این پایگاه عمدتاً نسبت به داده‌های ایستگاهی حالت بیش برآوردی دارد. توزیع مکانی آماره‌های مورد استفاده برای تعیین دقت و عملکرد داده‌های باز تحلیل ERA5 در مقایسه با داده‌های زمینی و ایستگاهی در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود بیشترین هماهنگی بین داده‌های ایستگاهی و باز تحلیل در منطقه مورد مطالعه و براساس آماره‌های مورد استفاده در نیمه شرقی و یا غربی منطقه قرار دارد و مناطق مرکزی براساس نتایج تمامی آماره‌ها کمترین تطابق بین داده‌های باز تحلیل و ایستگاهی را نمایش می‌دهند. این شرایط برای هر دو عمق مورد مطالعه خاک یعنی عمق یک (۵-۳۰ سانتی متری) و عمق دو (۳۰-۱۰۰ سانتی متری) از سطح زمین و در تمامی ایستگاه‌ها قابل مشاهده است. بیشترین ضریب همبستگی بین داده‌های ایستگاهی و داده‌های باز تحلیل در بخش شمالی و با مقدار ۰/۹۹ متمرکز است و کمترین آن با مقدار ۰/۹۷ در بخش

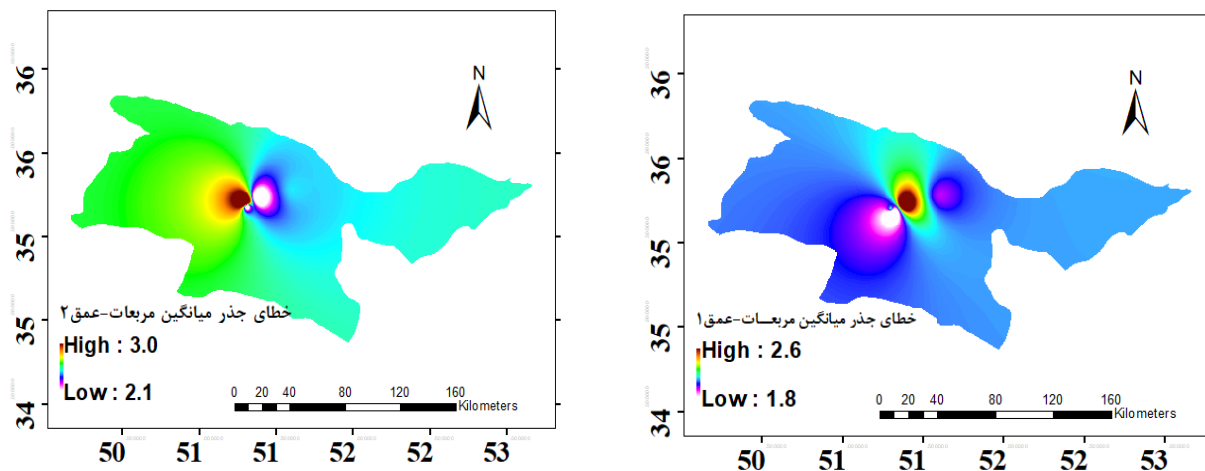
مرکزی و سپس غرب قرار گرفته است. به عبارت دیگر بیش از ۹۷ درصد از وردایی دمای عمق‌های خاک این مناطق را می‌توان به وسیله وردایی داده‌های دمای خاک برآورد شده در پایگاه ECMWF تبیین نمود. برپایه نقشه پراکنندگی مکانی آماره خطای میانگین (ME) کمترین میزان دقت داده‌های باز تحلیل در برآورد دمای عمق‌های خاک در مقایسه با داده‌های ایستگاهی در عمق اول و دوم خاک در بخش مرکز به سمت شمال منطقه متمرکز است در حالیکه بیشترین دقت مربوط به مناطق غرب و جنوب غرب منطقه است. نتایج آماره خطای میانگین مطلق (MAE) به دست آمده از داده‌های زمینی و باز تحلیل در منطقه نشان می‌دهد که کمترین میزان تطابق بین این داده در عمق اول در مرکز منطقه و در عمق دوم مرکز به سمت شمال را شامل می‌شود. اما بیشترین دقت در برآورد داده‌های عمق‌های خاک براساس این آماره در مناطق جنوب غرب، غرب و شمال‌غرب منطقه متمرکز است. همچنین، دقت داده‌های برآوردی این پایگاه از نظر خطای جذر میانگین مربعات (RSME) رفتار متفاوتی از نظر توزیع مکانی دقت برآوردی بین دو عمق اول و دوم نمایش می‌دهد به گونه‌ای که کمترین دقت برآوردی داده‌های باز تحلیل در عمق یک بر اساس این آماره بر مرکز به سمت جنوب غرب منطقه متمرکز است در حالیکه در عمق دوم کمترین دقت در مرکز و شرق منطقه متمرکز است.

علاوه بر این، میزان دقت برآوردی داده عمق‌های خاک پایگاه ECMWF در مقیاس ساعتی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج آن در جدول ۲ نمایش داده شده است. همانطور که در این جدول قابل مشاهده است، بیشترین دقت و تطابق بین داده‌های ایستگاهی و باز تحلیل براساس تمامی آماره‌های مورد استفاده در عمق اول و در ساعات اولیه روز می‌باشد.



شکل ۵. توزیع مکانی ضربیب همبستگی^۱ (R)، خطای میانگین^۱ (ME)، خطای میانگین مطلق^۲ (MAE) و خطای جذر میانگین مربعات^۳ (RMSE) بین داده‌های ایستگاهی و باز تحلیل ERA5

- 1 Mean Error
- 2 Mean Absolut Error
- 3 Root Mean Square Error



ادامه شکل ۵

جدول ۲. تغییرات ساعتی داده‌های ECMWF با داده‌های ایستگاهی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

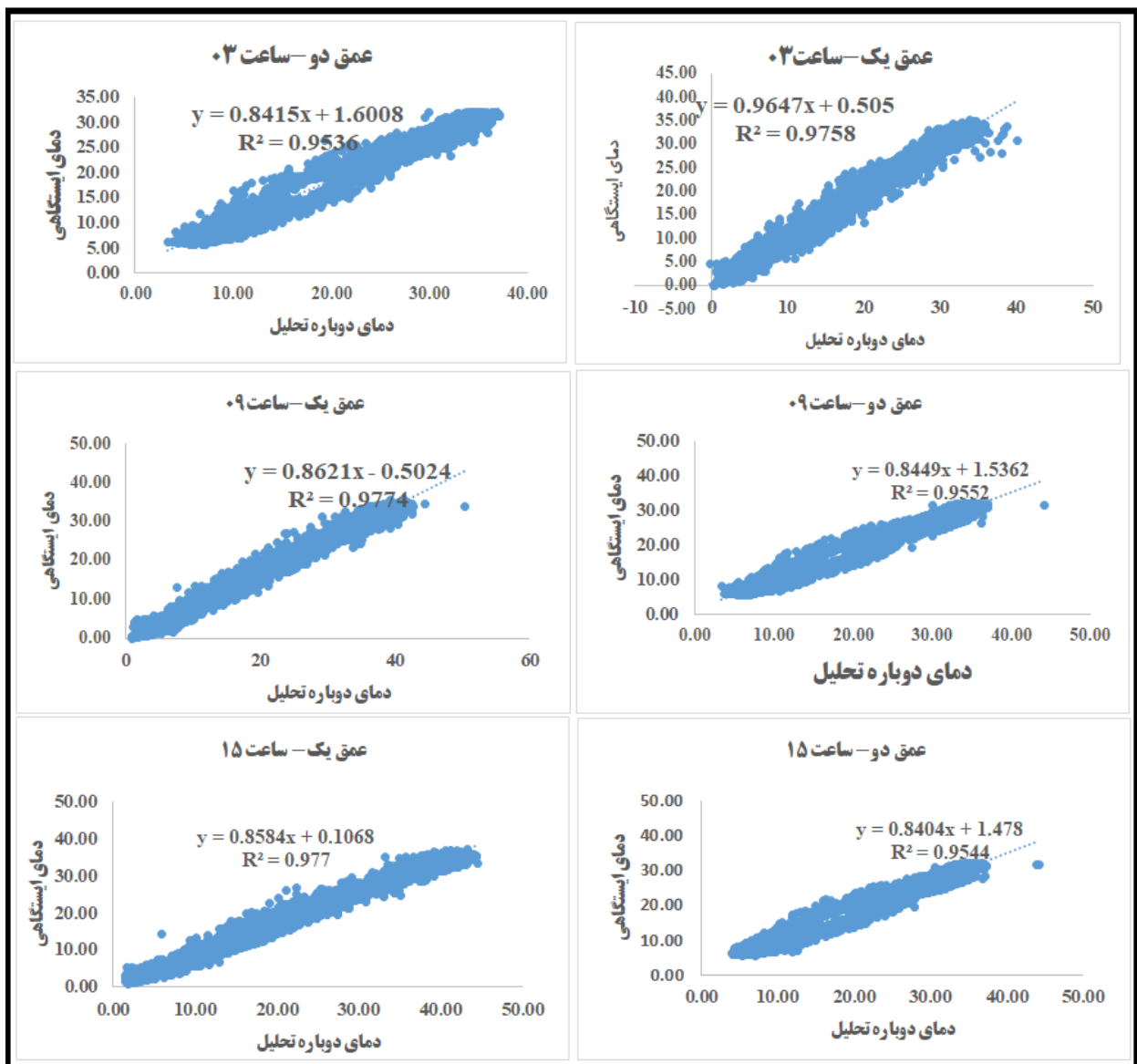
ایستگاه	ساعت	ضریب همبستگی		ME		MAE		RMSE	
		عمق ۱	عمق ۲	عمق ۱	عمق ۲	عمق ۱	عمق ۲	عمق ۱	عمق ۲
مهرآباد	۰۳	۰/۹۸	۰/۹۷	۱/۱	۱/۸	۱/۸	۱/۳	۱/۷	۲
	۰۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۲	۲/۵	۱/۸	۲	۱/۸	۱/۸
	۱۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۲	۲/۲	۲	۲	۲/۰۵	۲/۶
ژئوفیزیک	۰۳	۰/۹۹	۰/۹۸	۱/۶	۱/۲	۱/۸	۱/۹	۲/۲	۲/۱
	۰۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۲/۱	۱/۳	۲	۱/۹	۳	۲/۱
	۱۵	۰/۹۹	۰/۹۸	۲	۱/۳	۱/۹	۱/۹	۳	۲/۲
شمال تهران	۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹	۲	۱/۷	۲	۱/۸	۲	۲/۲
	۰۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۹	۱/۶	۱/۸	۲/۰۵	۲/۲	۲/۶
	۱۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۶	۱/۷	۲/۲	۲	۲/۶	۲/۵
دوشان تپه	۰۳	۰/۹۹	۰/۹۷	۱/۴	۱/۶	۱/۱	۱/۷	۱/۳	۳
	۰۹	۰/۹۹	۰/۹۷	۳	۲/۱	۳	۲/۸	۳	۲/۳
	۱۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۳	۲/۳	۳	۳	۲/۸	۳

سانتی متری بیشتر از عمق دوم است. اگرچه ضریب همبستگی بین داده‌ها در عمق دوم نیز معنادار است. ضریب همبستگی بین این داده‌ها در تمامی ساعات مورد مطالعه برای عمق اول ۰/۹۷ و برای عمق دوم ۰/۹۵ بدست آمده است که گویای ارتباط خطی معنادار بین داده‌های ایستگاهی و داده‌های باز تحلیل ERA5 در

شکل ۶ نیز پراکنش خطی داده‌های عمق‌های خاک در مقیاس ساعتی در پهنه تهران نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بین سری‌های زمانی دمای عمق‌های خاک ایستگاهی و پایگاه ECMWF در مقیاس ساعتی هماهنگی و ارتباط خطی خوبی وجود دارد. در تمامی ساعات ارتباط بین این دو داده در عمق یک یعنی ۵ تا ۳۰

یک و برای ساعات ۰۳، ۰۹ و ۱۵ به ترتیب به مقدار ۰/۲۰، ۱/۷ و ۲/۲ درجه سانتی گراد حالت بیش برآوردی دارد. این مقدار در ساعات مختلف مورد بررسی برای عمق دوم شامل ۰/۸، ۱/۹ و ۲/۵ درجه سانتی گراد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان اختلاف بین داده‌های ایستگاهی و باز تحلیل در عمق یک کمتر از عمق دوم خاک است که نتایج ضریب همبستگی نیز این موضوع را تایید می‌کند.

مقایسه ساعتی است (شکل ۶). وجود چنین ارتباطی می‌تواند اطمینان از استفاده از این داده‌ها را افزایش دهد به نحوی که می‌توان گفت در سالهایی که داده‌های عمق خاک در ایستگاه‌ها فاقد آمار هستند یا در نقاطی که اصلاً فاقد ایستگاه هستند و امکان اندازه‌گیری دمای عمق‌های خاک وجود ندارد داده‌های باز تحلیل این پایگاه می‌تواند جایگزین مناسبی در نظر گرفته شود. انطباق داده‌های ایستگاهی با داده‌های باز تحلیل نشان داد که در کل دوره مورد مطالعه به طور میانگین داده‌های باز تحلیل در عمق



شکل ۶. رابطه خطی میانگین ساعتی دمای عمق‌های خاک در پهنه تهران بر پایه داده‌های ایستگاهی و داده‌های پایگاه ECMWF در طول دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۹۷-۲۰۱۸).

۴. بحث و نتیجه گیری

هدف این پژوهش ارزیابی دقت پایگاه ECMWF در برآورد دمای عمق‌های خاک است. نتایج به دست آمده از بررسی رفتار دمای عمق‌های خاک در سطح تهران نشان داد که تقریباً در تمامی فصول دمای عمق خاک در نیمه شرقی تهران بالاتر از نیمه غربی آن است. به عبارت دیگر پایین‌ترین دماها در تمامی فصول در بخش‌های غرب تا شمال غرب منطقه رخ می‌دهد در حالیکه بالاترین دماها در فصول مختلف سال در شرق و شمال شرق تهران به وقوع می‌پیوندد. علاوه بر این، نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات دمای عمق‌های خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه تهران در دوره آماری ۲۲ ساله بر اساس آزمون من-کندال نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها داده‌های سالانه دمای عمق‌های خاک دارای جهش ناگهانی بوده‌اند. همچنین، براساس نتایج مشخص شد که افت و اخیزهای دمای عمق‌های خاک بر پایگاه ECMWF با داده‌های ایستگاهی در مقیاس‌های زمانی مختلف همبستگی بالایی دارد. میزان همبستگی بین داده‌های باز تحلیل این پایگاه و داده‌های ایستگاهی در مقیاس ساعتی بین ۰/۹۷ تا ۰/۹۵ قرار دارد. علاوه بر همبستگی زمانی بین دو نوع داده مورد مطالعه، بررسی‌ها نشان داد که از نظر میزان دمای برآوردی نیز بین داده‌های باز تحلیل و داده‌های ایستگاهی همانندی مطلوبی وجود دارد و این همانندی در عمق‌های بالاتر بیشتر از عمق‌های پایین‌تر خاک است. این نتایج با یافته‌های سایر مطالعات مطابقت دارد که میزان دقت مدل‌های برآوردی دمای خاک را برای لایه‌های بالاتر بیشتر از لایه‌های عمیق‌تر می‌دانند [۱۳، ۱۷]. براین اساس، دقت دمای برآوردی در عمق ۵ سانتی متری را بیشتر از عمق ۱۰۰ سانتی متری ارزیابی کرده‌اند که با یافته‌های این پژوهش در تطابق است [۲۷]. براین اساس، داده‌های برآوردی دمای عمق‌های خاک

موجود بر پایگاه ECMWF از نظر آزمون‌های آماری مختلف همچون ME، MAE، و RMSE تطابق مطلوبی را با داده‌های ایستگاهی نشان دادند. البته قابل به ذکر است که در بررسی اختلاف بین داده‌های باز تحلیل و داده‌های ایستگاهی حالت بیش برآوردی در داده‌های این پایگاه وجود دارد که میزان آن به طور میانگین کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد است. از این نظر نیز، یافته‌های این پژوهش با یافته‌های سایر مطالعات که به ارزیابی دقت داده‌های پایگاه ECMWF از نظر برآورد سایر پارامترهای اقلیمی (دمای هوا، بارش) پرداخته‌اند هماهنگی دارد. به عنوان مثال نتایج پژوهشی در زمینه ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل ECMWF در تخمین بارش ایران بین داده‌های ایستگاهی و باز تحلیل ارتباط معناداری نشان داده است [۶]. همچنین، ارزیابی دقت داده‌های ECMWF در تخمین بارش روزانه و ماهانه نشان داد که این داده‌ها از عملکرد مطلوبی در برآورد این متغیر دارد [۱]. مطالعه بخار آب قابل بارش داده‌های ECMWF از دقت بالای داده‌های این پایگاه در برآورد آب قابل بارش حکایت دارند [۲۴]. از آنجایی که برخلاف سایر عناصر آب و هوایی مانند دمای هوا، بارش، رطوبت نسبی، داده‌های مربوط به دمای عمق‌های خاک که در ایستگاه‌های هم‌دیدگی کشور در عمق‌های مختلف خاک اندازه‌گیری می‌شوند از خلا آماری یا سال‌های فاقد آمار بیشتری برخوردار هستند، در بسیاری موارد مطالعات در زمینه دمای خاک و عمق‌های آن که از جمله پارامترهای مهم در موضوعات مختلف بالاخص در زمینه کشاورزی و بازدهی محصولات است با مشکل مواجه‌اند. در این راستا و بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت داده‌های پایگاه ECMWF می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های ایستگاهی در شرایط نبود داده یا در مناطق فاقد ایستگاه اندازه‌گیری باشد.

References

- [1] Azizian, A., Ramezani Etedali, H. (2019). Assessing the Accuracy of European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis Datasets for Estimation of Daily and Monthly Precipitation. *Soil and water research*, 50: 777-791.
- [2] Baaghideh, M., Entezari, A.A., Kordi, A. (2018). Investigation of the Relationship between Soil Temperature and Climate Parameters in the Northwest of Iran (1992-2015). *Journal of Geography and Regional Development*, 16: 279-307.
- [3] Behyar, M.B., Kamali, G.H.A. (2007). Relationship between air temperature and surface and depth temperature. *Geographical Research*, 23: 81-102.
- [4] Bilgli, M., Sahin B., Sangun, L. (2013). Estimating soil temperature using neighboring station data via multi-nonlinear regression and artificial neural network models. *Environmental monitoring and Assessment*, 185(1): 347-358.
- [5] Chow, T.T., Long, H., Mok, H.Y. and Li, K.W. (2011). Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables. *Energy and Buildings*, 43(12): 3568-3575.
- [6] Darand, M., Zande Karimi, S. (2016). Evaluation of Spatio-Temporal Accuracy of Precipitation of European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) over Iran. *Physical geography research quarterly*, 47: 651-675.
- [7] Feng, Y., Cui, N., Hao, W., Gao, L. and Gong, D., 2019. Estimation of soil temperature from meteorological data using different machine learning models. *Geoderma*, 338, pp.67-77.
- [8] Ghaemina, A.M., Azimzadeh, H.R., Mobin, M.H. (2011). Simulating temperature variations of soil different depths and study of some effective atmospheric parameters (case Study-Yazd synoptic station). *Journal of Rangeland and Desert*, 18: 42-57.
- [9] Holmes, T.R.H., Owe, M., Dejeu R.A.M., Kooi, H. (2008). Estimating the soil temperature profile from a single depth observation: A simple empirical heat flow solution. *Water Resources Research*, 44(2): 103-112.
- [10] Huang, R., HUANG, J.X., Zhang, C., Wen, Z.H.U.O., CHEN, Y.Y., ZHU, D.H., Qingling, W.U. and MANSARAY, L.R. (2020). Soil temperature estimation at different depths, using remotely-sensed data. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(1): 277-290.
- [11] Kisi, O., Sanikhani, H. and Cobaner, M. (2017). Soil temperature modeling at different depths using neuro-fuzzy, neural network, and genetic programming techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4): 833-848.
- [12] Maroofnezhad, A., Ghasemi, S.H. (2017). Analysis of changes using the method of Mann-Kendall (case Study of four townships of chaharmahal and Bakhtiari province. *Environmental based territorial planning*, 37: 149-166.
- [13] Mesbahzadeh, T., Soleymani Sadro, F., Rafiei Sardoyi, E., Farzneh Pey, F. (2018). Modeling daily soil temperature using synoptic data and Neural network. *Journal of range and watershed management*. Vol. 71; 285-295.
- [14] Najafimod, M.H., Alizadeh, A., Mohammadian, A., Mousavi, J. (2008). Investigation of relationship between air and soil temperature at different depths and estimation of the freezing depth (Case study: Khorasan Razavi). *Journal of Water and Soil*, 22: 456-466.
- [15] Narapusetty, B. and N. Mölders (2005). "Evaluation of snow depth and soil temperatures predicted by the hydro-thermodynamic soil-vegetation scheme coupled with the fifth-generation Pennsylvania State University-NCAR mesoscale model." *Journal of applied meteorology* 44(12): 1827-1843
- [16] Nelson, F. E., Anisimov, O. A., Shiklomanov, N. I. (2001). Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*, 410: 889– 890.
- [17] Parsa Far, N, Maroufi, P., 2011, Estimation of Different Depth Temperatures from Air Temperature Using Frequency Relations, Neural Networks and Neural-Fuzzy Network (Case Study: Kermanshah Region), Vol. 3 No.21; 140-152.
- [18] Qian, B., E. G. Gregorich., S. Gameda., D. W. Hopkins., X. L. Wang. (2011). Observed soil temperature trends associated with climate change in Canada. *Journal of Geophysical Research*, 116: 1-16.
- [19] Sabziparvar A, Tabari H, Aeini A. (2010). Estimation of Mean Daily Soil Temperature by Means of Meteorological Data in Some Selected Climates of Iran. *JWSS* 14 (52) :125-138.

- [20] Sadrikiya, M., Rezazadeh, M., Zamani, A. (2020). A study on the impact of interpolation method on modelling water resources. 11th national congress on civil engineering. Tabriz, Iran.
- [21] Safari, H. (2005). Comparison between IDW and Kriging interpolation methods. *Shahrnegar*, 40; 33-39.
- [22] Sanikhani, H., Deo, R.C., Yaseen, Z.M., Eray, O. and Kisi, O. (2018). Non-tuned data intelligent model for soil temperature estimation: A new approach. *Geoderma*, 330: 52-64.
- [23] Shamsipour, A. A., Azizi, GH., Karimi Ahmadabad, M., Moghbel, M. (2015). Assessment of soil depth temperature variations pattern and a numerical model for its calculation (Case Study: Tehran). *Geography and Environmental Planning*, 3: 17-28.
- [24] Shirvani, A., Nuroozi, H. (2019). Comparison of precipitable water vapor data of ERA-Interim and NCEP-NCAR with radiosonde observations (Case study: Shiraz Station). *Agricultural meteorology*, 13; 13-21.
- [25] Tabari, H.; Talaee, P.H. (2011). Temporal variability of precipitation over Iran: 1966-2005. *Journal of Hydrology*, 396 (3): 313-320.
- [26] Trumbore, S. E., Chadwick, O. A., Amundson, R. (1996). Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 272: 393– 395.
- [27] Zadmehr, H., Farrokhian Firouzi, A. (2020). Estimating Soil Temperature from Metrological Data Using Extreme Learning Machine, Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression Models. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 4: 895-906.
- [28] Zhan, M. J., Xia, L. J., Zhan, L. F., Wang, Y. (2019). Recognition of Changes in Air and Soil Temperatures at a Station Typical of China's Subtropical Monsoon Region. (1961–2018). *Advances in Meteorology*, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/6927045>.
- [29] Zhang, Y., Chen, W.Y. (2005). Soil temperature in Canada during the twentieth century: Complex responses to atmospheric climate change. *J Geophys Res*, 110: D03112, doi:10.1029/2004JD004910.
- [30] Zheng, D., Hunt Jr, E.R. and Running, S.W., 1993. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. *Climate Research*, 2(3), pp.183-191.