

ارزیابی مدل WRF برای پیش‌بینی دما و رخداد سرمازدگی در حوضه آبریز زاینده‌رود

مهرداد نصرافهانی - دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
حجت‌الله یزدان‌پناه* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
محمدعلی نصرافهانی - استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶

چکیده

وقوع مخاطرات جوی، همچون یخبندان و سرمای دیررس بهاره، سالانه، خسارات زیادی در بخش کشاورزی ایجاد می‌کند. برنامه‌ریزی به موقع می‌تواند خسارت ناشی از بلایای طبیعی را کاهش دهد. امروزه، با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا، می‌توان از خسارت‌های ناشی از آن‌ها جلوگیری کرد. در این تحقیق، برای ارزیابی پیش‌بینی دما توسط مدل WRF در زمان وقوع سرماهای دیررس بهاره، از یازده ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود، با درجه تفکیک افقی یک کیلومتر، شبیه‌سازی شد. سپس، با دو رویکرد نقطه‌ای و منطقه‌ای دماهای شبیه‌سازی شده با مقادیر دیدبانی متناظر در پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته دمای سطحی (دومتري) ارزیابی شد. براساس نتایج جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تعیین اصلاح‌شده و شاخص میانگین اریبی که برای دمای شبیه‌سازی ۲۴ ساعته بهتر از ۴۸ ساعته است به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۸ و ۰/۴۸ بود. ارتباط قابل قبولی از لحاظ آماری (ضریب همبستگی) بین متغیر مستقل، که همان داده‌های مدل WRF است، و متغیر وابسته، که همان داده‌های دیدبانی شده (واقعی) است، وجود دارد.

واژگان کلیدی: پیش‌بینی دما، تفکیک افقی، راست‌آزمایی، مدل WRF.

مقدمه

بلایای طبیعی در طول زندگی بشر به فراوانی رخ داده است، ولی امروزه، با بهره‌گیری از فناوری‌های موجود، شناخت بیشتر این بلایا، و ایجاد سامانه‌های پایش و پیش‌بینی می‌توان از ابعاد روزافزون خسارت‌های ناشی از آن‌ها جلوگیری کرد (قرایلو و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۱۳). با توجه به توسعه سامانه مدل‌سازی WRF^۱ در سال‌های اخیر و متداول‌تر شدن استفاده از آن در مراکز پیش‌بینی دنیا، اجرای مطالعاتی برای راست‌آزمایی برون‌داد این مدل به عنوان پیش‌نیاز استفاده پژوهشی و عملیاتی از آن ضروری است (ذوالجودی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۸۸). سامانه مدل‌سازی پیشرفته WRF یک مدل میان‌مقیاس و سامانه‌ای انعطاف‌پذیر با قابلیت‌های فراوان است که می‌توان وضعیت‌های مختلف جو را با استفاده از آن شبیه‌سازی کرد. این مدل در طی چند سال گذشته در حال توسعه بوده است. مدل یادشده قابل نصب بر روی سامانه‌های مختلف و رایانه‌ای است. محدوده کاربرد آن بسیار وسیع است و گستره بین چندین متر تا هزاران کیلومتر را تحت پوشش قرار می‌دهد و با استفاده از تغییر حالت‌های متفاوت پارامترسازی‌های فیزیکی موجود در مدل می‌توان گستره وسیعی از اجراها را به انجام رساند (ارکیان و همکاران، ۱۳۹۴). در واقع، این مدل یک سامانه پیش‌بینی عددی وضع هوا و شبیه‌سازی جو است که برای کاربردهای پژوهشی و عملیاتی طراحی شده است.

E-mail: h.yazdanpanah@geo.ui.ac.ir

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۳۶۳۸۱۰۷

1. Weather Research and Forecasting (WRF)

توسعه و گسترش این مدل به تلاشی همگانی برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی میان‌مقیاس و نیز ایجاد یک سامانه داده‌گواری تبدیل شده است تا فهم و پیش‌بینی وضعیت جوی را گسترش دهد و نیز پیشرفت‌های تحقیقاتی را تسریع کند (قرایلو و همکاران، ۱۳۸۷). با وجود اینکه استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا می‌تواند به پیش‌بینی هرچه صحیح‌تر وضعیت هوا کمک کند، این مدل‌ها در پیش‌بینی پارامترهای نزدیک سطح زمین (بارش، دما، و ...) همواره خطاهای قابل توجهی دارند و در نتیجه عدم قطعیت در نتایج حاصله وجود دارد (ارکیان و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۳). به‌طور کلی، برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی دارای دو نوع خطا هستند: خطاهای سامانمند و ناسامانمند. خطاهای سامانمند به‌طور عمده مربوط به پارامترسازی نامناسب فرایندهای فیزیکی مدل مانند همرفت و تابش یا اختلاف در داده‌های کوهساری (توپوگرافی) و کاربری سطح زمین در مدل و واقعیت می‌شوند و خطاهای ناسامانمند بیشتر از خطای موجود در شرایط اولیه مدل ناشی می‌شوند (وارنر، ۲۰۱۱؛ آزادی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۱).

پیش‌بینی دمای سطح زمین با مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا دارای خطاهای قاعده‌مند (سیستماتیکی) است که عمده آن به دلیل پایین بودن میزان تفکیک توپوگرافی و نیز نقص در فراسنجی فرایندهای فیزیکی متفاوت در مدل است. علاوه بر این عوامل، موارد زیر نیز ممکن است از دلایل تولید خطا در برون‌داد مدل باشد: ۱. مدل دمای میانگین سطحی را پیش‌بینی می‌کند و نه دمای نقطه‌ای؛ ۲. به‌طور کلی، ناهم‌واری مورد استفاده در مدل هموار می‌شود، کمتر از مقدار واقعی است و با توجه به اینکه ۹/۸ آهنگ افت دمای بی‌دررو برای جو غیراشباع درجه سلسیوس در هر کیلومتر است، همین تفاوت به ایجاد خطای قاعده‌مند در پیش‌بینی دمای دومتری منجر می‌شود (آزادی و همکاران، ۱۳۸۷: ۴۷).

منظور از فرایند راست‌آزمایی ارزیابی کیفی پیش‌بینی‌های هواشناسی است که در آن نتایج فرایند پیش‌بینی با دیدبانی‌های متناظر مقایسه می‌شود. از آنجا که استفاده عملیاتی از مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا در چند سال اخیر در ایران متداول شده و هنوز مطالعه‌ای برای راست‌آزمایی همه محصولات مدل انجام نشده است، چنین مطالعاتی ضروری به نظر می‌رسد (ذوالجودی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۸۸).

آزمودن مدل به‌طور کلی شامل آزمودن توانایی آن برای پیش‌بینی است. بنابراین، راست‌آزمایی پیش‌بینی‌ها به‌درستی به‌عنوان نقش مهمی در زمینه هواشناسی فرض می‌شود.

راست‌آزمایی پیش‌بینی‌ها به‌درستی نقش مهمی در زمینه هواشناسی فرض می‌شود. فرایند ارزیابی شامل چندین مرحله مجزا و مرتب است که در هر یک از این مرحله‌ها «عناصری» از این فرایند تعریف می‌شود. توجه به این هدف به تعریف دو شکل مجزا از ارزیابی منجر می‌شود: ارزیابی عملیاتی که با مقدار پیش‌بینی‌ها برای کاربر سروکار دارد و ارزیابی تجربی یا راست‌آزمایی که با کمال پیش‌بینی‌ها یعنی همخوانی بین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات سروکار دارد. مشخصه‌های پیش‌بینی‌ها یعنی ویژگی‌های مطلوب پیش‌بینی‌ها با توجه به این اهداف تعریف می‌شود و تعدادی از اندازه‌گیری‌های مشخصه‌ها برای ارزیابی تجربی بررسی می‌شود. روش‌های راست‌آزمایی پیش‌بینی از امتیازها و شاخص آماری مرسوم تا روش‌هایی برای راست‌آزمایی فرایابی و علمی مفصل‌تر گسترش می‌یابد (تقی‌زاده، ۱۳۸۹). در راست‌آزمایی هر پیش‌بینی به شیوه‌های مختلف ارزیابی عینی از کیفیت پیش‌بینی انجام می‌گیرد. نتایج راست‌آزمایی باید حاوی اطلاعات مفیدی باشد تا بتوان راهکارهای جدیدی برای پیش‌بینی بهتر به‌دست آورد. همچنین، واکاوی آماری راست‌آزمایی می‌تواند به ارزیابی نقاط قوت و ضعف پیش‌بین یا فرایند پیش‌بینی کمک کند (ذوالجودی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۸۹). در مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا، قوانین حاکم بر جو به‌صورت معادلات دیفرانسیل با مقدار اولیه- مرزی- مدل‌سازی شده‌اند. برای حل این معادلات دیفرانسیل از روش‌های عددی استفاده می‌شود. بدیهی است که روش‌های عددی تقریبی

است و همواره دارای خطاست. استفاده از روش‌های عددی در مدل‌ها تنها علت بروز خطا در خروجی مدل نیست؛ بلکه به عواملی مانند خطا در مقادیر اولیه-مرزی، کمبود داده‌های اولیه در برخی مناطق، و آشوبی بودن سیستم دینامیکی جو نیز می‌توان اشاره کرد. بنابراین، پیش‌بینی در یک چنین سیستمی با عدم قطعیت همراه خواهد بود و دارای خطاست. خطای ذکر شده در برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا به دو دسته سامانمند و تصادفی تقسیم می‌شود. خطای سامانمند میزان میانگین انحراف برون‌داد مدل از واقعیت را نشان می‌دهد که با روش‌های آماری موسوم به پس‌پردازش قابل حذف شدن است؛ اما خطای تصادفی از نظم خاصی پیروی نمی‌کند (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۴).

در سال‌های اخیر، با وجود بهبود دقت مدل‌ها در پیش‌بینی عددی وضع هوا، این مدل‌ها همچنان دارای خطا در برون‌داد خود به‌ویژه کمیت‌های سطح زمین‌اند. بخش قابل توجهی از این خطا به‌صورت خطای قاعده‌مند (اریبی) است. از مهم‌ترین عوامل ایجاد خطای اریبی می‌توان به نقص در پارامترسازی‌های فیزیکی مورد استفاده و تفکیک ضعیف توپوگرافی در مدل نسبت به شرایط واقعی اشاره کرد. لازم است روش‌های آماری به‌کارگرفته‌شده برای پس‌پردازش برون‌داد مستقیم مدل قابل اعمال بر روی زمین‌هایی با توپوگرافی پیچیده باشند. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: روش پیش‌یابی کامل (PPM)^۱، روش آماره برون‌داد مدل (MOS)^۲، و روش پالایه کالمن (KF)^۳. اما می‌توان، به‌منظور پیش‌بینی کمیت دمای دومتری سطح زمین از روش پس‌پردازشی میانگین‌گیری وزنی میراشونده (DA) برای تصحیح خطای اریبی موجود در برون‌داد خام مدل پیش‌بینی عددی بهره برد (آزادی و افشاری، ۱۳۹۳).

در سال‌های اخیر، روش‌هایی توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که می‌توان به کمک آن‌ها برون‌داد مدل را بدون نیاز به داده‌های طولانی‌مدت تصحیح کرد؛ از آن جمله می‌توان اشاره کرد به روش‌های پالایه کالمن (هملید، ۱۹۹۵)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۴ (هسیه و تانگ، ۱۹۹۸)، میانگین متحرک (MA)^۵ (کالر و استیل، ۲۰۰۸) و بهترین برآوردگر ساده (BES)^۶ (وودکاک و انگل، ۲۰۰۵).

آزادی و همکاران (۱۳۹۰)، به‌منظور تصحیح برون‌داد مدل، مدل میان‌مقیاس WRF را با دو دامنه با گام‌های شبکه‌ای ۴۵ و ۱۵ کیلومتر برای یک دوره شش‌ماهه از اول نوامبر ۲۰۰۸ تا ۳۰ آوریل ۲۰۰۹ اجرا کردند. سپس، برون‌داد مدل برای بارندگی‌های ۲۴ ساعته با دو روش بهترین برآوردگر ساده و روش میانگین متحرک برای ۲۰۵ ایستگاه هواشناسی همدید کشور تصحیح و پس‌پردازش شد. داده‌های سه ماه اول برای آموزش و بقیه داده‌ها برای آزمون و مقایسه استفاده شده است. نمایه‌های آماری مانند درجه موازنه جرم، میانگین مطلق خطا، و امتیاز مهارتی متناظر با آن برای پیش‌بینی‌های خام و بهبودیافته و برای نشان دادن بهبود نتایج محاسبه و مقایسه شده است. نتایج نشان داد که هر دو روش پس‌پردازش برون‌داد مستقیم مدل را بهبود می‌بخشند؛ به‌گونه‌ای که میانگین مطلق خطا برای ایستگاه‌های مختلف در روش میانگین متحرک بین ۵ تا ۵۰ درصد (با میانگین در حدود ۲۵ درصد) و در روش بهترین برآوردگر ساده به‌طور میانگین در حدود ۱۳ درصد بهبود یافته است (آزادی و همکاران، ۱۳۹۰: ۷۱).

آزادی و افشاری (۱۳۹۳) از روش پس‌پردازشی DA، برای پس‌پردازش برون‌داد مدل منطقه‌ای WRF برای دمای دومتری بر روی ایران و بر روی یک شبکه منظم طول و عرض جغرافیایی ۱۸×۲۷ استفاده کردند. در اینجا، تصحیحات انجام‌شده به‌صورت میانگین‌های وزنی از خطاهای قبلی بین دمای دیدبانی‌شده و پیش‌بینی مدل بوده است؛ به‌گونه‌ای که

1. Model Output Statistics (MOS)
2. Perfect Prognosis Method (PPM)
3. Kalman Filtering
4. Artificial Neural Network
5. Moving Average
6. Best Easy Estimator

به خطاهای نزدیک‌تر از نظر زمانی وزن بیشتری داده می‌شود. دوره مورد مطالعه از اول ژانویه ۲۰۱۲ تا آخر مارس ۲۰۱۲ است. این تصحیح بر روی برون‌داد مستقیم مدل در ساعت UTC12 هر روز انجام شده است. دوره آموزشی مورد استفاده هفده روز انتخاب شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که میانگین مطلق خطا با تقریب خوبی صفر شده و به عبارتی خطای قاعده‌مند به خوبی کاهش یافته است. در ادامه از فرمول‌بندی دیگری از این روش، که گالانیس و آنادرانیستاکیس (۲۰۰۲) آن را معرفی کرده، استفاده شده است. گالانیس و آنادرانیستاکیس (۲۰۰۲) از پالایه کالمن به منظور تصحیح برون‌داد مدل‌های منطقه‌ای برای دمای دومتري و سرعت باد دومتري استفاده و رابطه خطای مدل با پارامترهای دیگر را بررسی کردند.

شو و همکاران (۲۰۰۹) پیش‌بینی‌های مدل WRF را با گوارد داده ماهواره‌ای و بدون گوارد داده ماهواره‌ای در منطقه جنوب غرب آسیا برای کمیت‌های دمای دومتري، بارش و باد در ماه مه ۲۰۰۶ ارزیابی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی‌های دمای دومتري با پیش‌بینی دیگر متغیرهای جوی متفاوت است و خطاها در پیش‌بینی‌های دمای دومتري با توپوگرافی سطح شدیداً مرتبط است. مولر (۲۰۱۱) روش پالایه کالمن و MOS را برای پس‌پردازش برون‌داد مدل MM5 به منظور ارتقای کیفیت پیش‌بینی دما و باد در ۱۱۵۰ ایستگاه هواشناسی اروپای مرکزی استفاده کرد. او روشن ساخت که استفاده از روش MOS می‌تواند تا ۳۵ درصد توانمندی پیش‌بینی‌ها را در مقایسه با روش پالایه کالمن افزایش دهد. اکل و مس (۲۰۰۵) روش میانگین لغزان (MA) را به عنوان یک روش پس‌پردازش برای کاهش خطای سامانمند برون‌داد مدل به منظور پیش‌بینی‌های دما به کار بردند. همچنین، مک کالر و استال (۲۰۰۸)، برای پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه، هفت روش پس‌پردازش را با هم مقایسه کردند.

هدف از اجرای این تحقیق ارزیابی مدل WRF برای پیش‌بینی دما و رخداد سرمازدگی در حوضه آبریز زاینده‌رود است.

مواد و روش‌ها

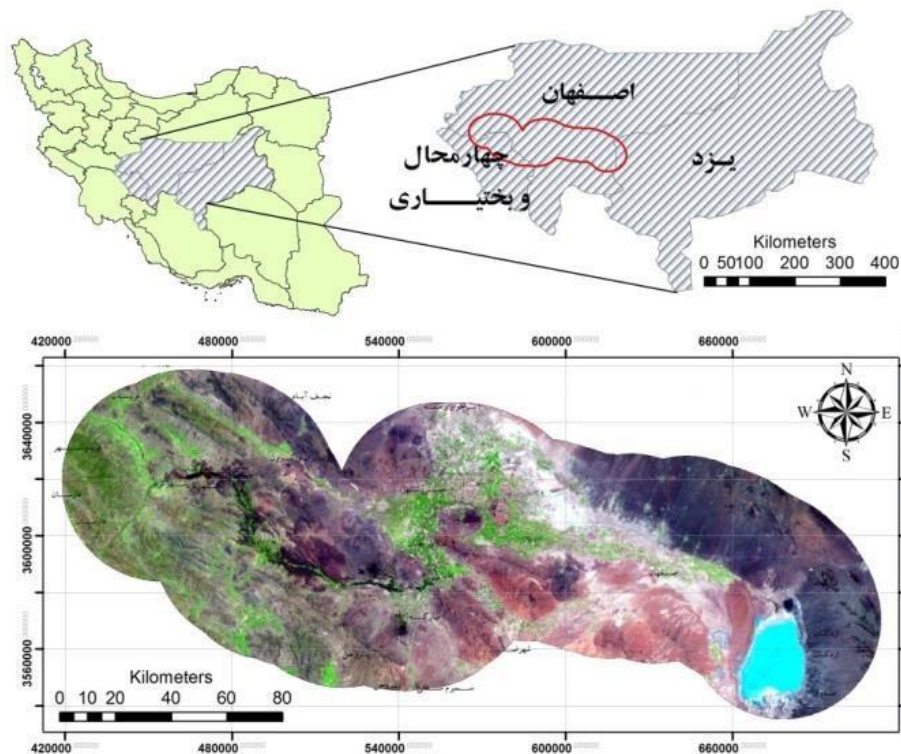
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در حوضه آبریز زاینده‌رود است. حوضه آبریز زاینده‌رود و منطقه تحقیق در مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۲۴ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه مزبور ۴۱۳۴۷ کیلومتر مربع است و هیچ خروجی به دریای آزاد ندارد. این حوضه دارای اقلیم خشک یا نیمه‌خشک است. رودخانه زاینده‌رود اصلی‌ترین منبع تأمین‌کننده آب کشاورزی در حوضه آبریز زاینده‌رود است. موقعیت حوضه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مطالعه از یازده ایستگاه هواشناسی همدیدی در حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شده است.

روش تحقیق

مدل WRF در تاریخ‌هایی که سرمای دیررس بهاره اتفاق افتاده اجرا شده است. این تاریخ‌ها از سازمان جهاد کشاورزی استخراج شده است. مدل در چهار تفکیک افقی یک کیلومتر (domain4)، سه کیلومتر (domain3)، نه کیلومتر (domain2)، و بیست‌وهفت کیلومتر (domain1) انجام شده و بازه زمانی آن ۲۴ و ۴۸ ساعته بوده است. یازده ایستگاه یادشده در منطقه تفکیک یک کیلومتر (domain4) قرار گرفتند. دمای دومتري سطح زمین با استفاده از نرم‌افزار Grads در دو بازه زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعته استخراج و با مقادیر واقعی مشاهده‌شده مقایسه و صحت‌سنجی شد. مقادیر مدل WRF

متغیر مستقل است و مقادیر دیدبانی شده متغیر وابسته است. مقدار ضریب تعیین در دو بازه زمانی محاسبه شد و بیانگر ارتباط خوبی بین داده‌های WRF و دیدبانی شده است. تعداد داده‌ها در محاسبات ارزیابی دقت مدل ۴۳۲ داده بوده است.



شکل ۱. منطقه تحقیق در حوضه آبریز زاینده‌رود (ایرانمهر و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۶)



شکل ۲. پراکندگی یازده ایستگاه مورد مطالعه

جدول ۱. دماهای رخداد سرمازدگی در تاریخ‌های مورد بررسی

Station	۱۳۹۵/۰۱/۰۱	۱۳۹۴/۰۱/۰۴	۱۳۹۲/۰۲/۰۲	۱۳۹۱/۱۲/۳۰	۱۳۹۰/۱۲/۲۹	۱۳۹۰/۰۱/۰۴
Moorchekhort	۰	۰	۳	۱	-۶	۶
Boroijen	-۳	-۵	۲	۰	-۱۴	۷
Zarrinshahr	-۲	-۱	۵	۰	-۷	۸
Esfahan	۱	۰	۵	۲	-۵	۸
Shargh-esfahan	-۴	-۲	۱	۰	-۷	۰
Kabootarabad	۰/۲	-۱	۲/۶	۰/۶	-۶/۶	۱/۲
Mobarekeh	-۱	-۲	۳	۱	-۸	۵
Najafabad	۰	۰	۶	۲	-۶	۸
Saman	-۳	-۱	۳	۰	-۶	۵
Shahreza	-۲	-۲	۶	۰	-۹	۱۰
Shahrekord	-۷	-۶	۰	-۶	-۱۵	۵

جدول ۲. بیکربندی مورد استفاده در اجرای مدل WRF

بیکربندی	حوضه ۱	حوضه ۲	حوضه ۳	حوضه ۴
تفکیک افقی	۲۷ کیلومتر	۹ کیلومتر	۳ کیلومتر	۱ کیلومتر
تعداد نقاط شبکه	۵۰*۵۰	۸۲*۸۲	۱۲۴*۱۲۴	۱۳۹*۱۴۸
گام زمانی در دسترس بودن پیش‌بینی‌ها	۳	۱	۱	۱
تعداد ترازهای قائم		۲۷		
خرد فیزیک		Lin		
همرفت	طرح‌واره Kain_Fritsch	طرح‌واره Kain_Fritsch	خاموش	خاموش
فرایندهای لایه مرزی		Mellor and Yamada		
تابش طول موج بلند		RRTM		
تابش طول موج کوتاه		طرح‌واره گودارد		
مدت زمان اجرا		۳۶ ساعت		
زمان شروع و پایان اجرا	2016/03/18:12:00:00 تا 2016/03/21:00:00:00			

سنججه‌های مورد استفاده در ارزیابی پیش‌بینی

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های تخمین و پیش‌بینی، شاخص‌های عملکردی مختلفی شامل ضریب تعیین (R^2)، مجذور میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین مربع خطا (MSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAD)، درصد خطای نسبی (Error)، ضریب همبستگی (R)، شاخص میانگین اریبی (MBE)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، و شاخص امتیاز مهارتی (MSSS) وجود دارد.

الف) مجذور خطای میانگین مربعات (RMSE): مقدار این شاخص از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. A_t مقادیر دیدبانی شده، F_t مقادیر پیش‌بینی شده، و n تعداد داده‌هاست.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (\text{مجذور خطای میانگین مربعات}) \quad (1)$$

ب) خطای میانگین مربعات (MSE): این شاخص از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. A_t مقادیر دیدبانی شده، F_t مقادیر پیش‌بینی شده، و n تعداد داده‌هاست.

1. Root Mean Square Error
2. Mean Square Error

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad (2)$$

پ) شاخص میانگین اریبی (MBE)^۱: معیار ارزیابی MBE بیانگر میانگین انحراف است. این معیار، علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش‌برآوردی مدل) یا منفی (کم‌برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر دیدبانی شده را نیز نشان می‌دهد و از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$MBE = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n F_i - \sum_{i=1}^n A_i \right) \quad (3)$$

ت) شاخص خطای نسبی (RE)^۲:

$$RE = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n F_i - \sum_{i=1}^n A_i \right)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4)$$

ج) میانگین خطای مطلق (MAD)^۳: در تعیین صحت مدل با MAD مقدار صفر آن نشان‌دهنده صحت ۱۰۰ درصد است و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم‌شدن صحت مدل است.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (5)$$

خ) میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)^۴:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (6)$$

چ) شاخص امتیاز مهارتی (MSSS)^۵:

$$MSSS = 1 - \frac{RMSE_F}{RMSE_A} \quad (7)$$

شاخص MSSS دقت نسبی پیش‌بینی حاصل از مدل پس‌پردازش‌شده در مقایسه با مقادیر واقعی داده‌های مشاهداتی را محاسبه می‌کند. برای محاسبه این شاخص در ابتدا محاسبه خطای میانگین مربعات (Mean Square Error) داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی لازم است. خطای میانگین مربعات برای داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$MSE_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i)^2 \quad MSE_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - X_i)^2 \quad (8)$$

که X_i و F_i به ترتیب آمین مقدار پیش‌بینی و آمین مقدار مشاهداتی‌اند. n تعداد داده‌ها را نشان می‌دهد.

1. Mean Bias Error
2. Relative Error
3. Mean Absolute Deviation
4. Mean Absolute Percentage Error
5. Mean Square Skill Score

برای به‌دست‌آوردن امتیاز مهارتی MSSS، مقادیر $RMSE_F$ و $RMSE_A$ را به‌ترتیب از راه جذرگرفتن از مقادیر میانگین خطای مربعات پیش‌بینی و مشاهداتی به‌دست می‌آوریم و سپس مقدار MSSS را از رابطه ۹ محاسبه می‌کنیم:

$$MSSS = 1 - \frac{RMSE_F}{RMSE_A} \quad (9)$$

از آنجا که در یک پیش‌بینی دقیق مقدار جذر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی صفر خواهد شد، مقدار MSSS در یک پیش‌بینی دقیق ۱ می‌شود. مقدار $MSSS=0$ نشان می‌دهد که استفاده از برون‌داد مدل پیش‌بینی یا استفاده از مقادیر مشاهده‌شده اقلیمی تفاوتی با هم ندارند. مقادیر $MSSS>0$ نشان می‌دهد که دقت مدل پیش‌بینی در مقایسه با میانگین‌های اقلیمی موفق‌تر است.

در انتخاب متغیرهای نهایی آماره‌های F و t نیز مؤثرند. $RMSE$ مقدار اختلاف بین شبیه‌سازی مدل و مشاهدات را، صرف‌نظر از اینکه کدام یک مقدار بیشتر یا کدام یک مقدار کمتری دارند، آشکار می‌کند. $Bias$ مقدار اختلاف شبیه‌سازی مدل و مشاهدات است که مقادیر مثبت (منفی) بیانگر تخمین بیشتر (کمتر) مدل در مقایسه با مقادیر مشاهداتی است. انحراف معیار انحراف اختلاف شبیه‌سازی مدل و مشاهدات را از میانگین اختلاف شبیه‌سازی مدل و مشاهدات نشان می‌دهد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۷).

یافته‌های تحقیق

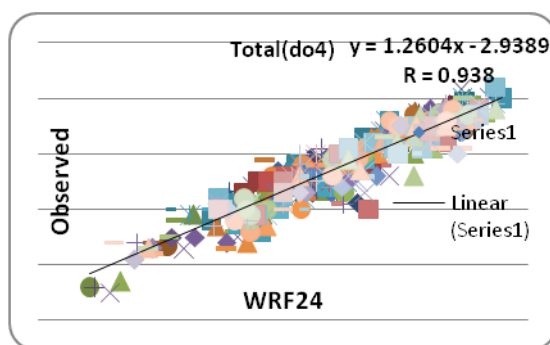
سنجه‌های مورد استفاده در ارزیابی پیش‌بینی ۲۴ ساعته و ۴۸ ساعته در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است که X طول جغرافیایی، Y عرض جغرافیایی، و Z ارتفاع ایستگاه است. شاخص‌های ارزیابی نیز محاسبه شده‌اند. مقایسه دو جدول نشان می‌دهد که اختلاف زیادی بین دو پیش‌بینی ۲۴ و ۴۸ ساعته مشاهده نمی‌شود، ولی در مجموع صحت پیش‌بینی ۲۴ ساعته ارجح است. در شکل ۳ ضریب همبستگی برای کل ایستگاه‌ها در دو بازه زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعته تعیین شده است که اندکی صحت پیش‌بینی ۲۴ ساعته بیشتر است. در همین شکل در قسمت «پ» و «ت» برای دماهای حداقل برآورد شد ضریب همبستگی برای پیش‌بینی‌های دمای حداقل کمتر از حالت کلی برای همه دماهای شبانه‌روز است، که ضریب همبستگی برخلاف حالت قبل برای پیش‌بینی ۴۸ ساعته اندکی بیشتر است.

جدول ۳. سنجه‌های مورد استفاده در ارزیابی پیش‌بینی ۲۴ ساعته

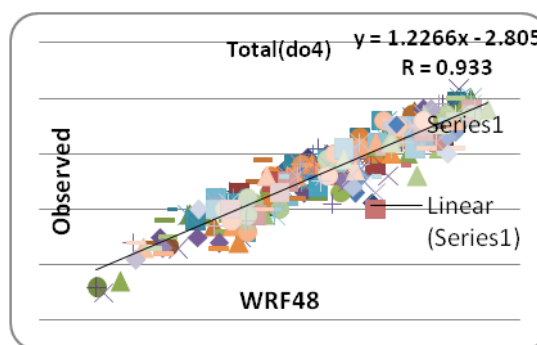
Station	X	Y	Z	RMSE	R Square	MAD	MSE	MAPE	R(XY)	MBE	MSSS
Moorchekhort	۵۱٫۵	۳۳٫۱	۱۶۶۹	۲٫۱۲۹	-۰٫۹۲۶	۱٫۶۹۶۶۶۷	۴٫۵۳۴۳۳	۲۵٫۶۲۴۹۳	۰٫۹۶۲۱۴۶	۱٫۰۹	۰٫۸۲
Boroojen	۵۱٫۳	۳۲	۲۱۹۷	۲٫۹۸۲	-۰٫۸۳۹	۲٫۳۲۳۳۳۳	۸٫۸۹۲۲۵۸	۴۴٫۶۰۴۵۹	۰٫۹۱۵۹۲۹	-۰٫۴۶۲۰۸۳	۰٫۶۵
Zarrinshahr	۵۱٫۴	۳۲٫۴	۱۶۸۰	۲٫۴۹۴	-۰٫۹۱۷	۲٫۰۱۰۳۴۵	۶٫۲۲۳۴۱۴	۲۵٫۲۴۶۴۵	۰٫۹۵۷۶۸۹	-۰٫۱۶۸۹۷	۰٫۸۱
Esfahan	۵۱٫۷	۳۲٫۶	۱۵۵۰	۲٫۴۵۸	-۰٫۸۹۴	۱٫۹۹۲۹۱۷	۶٫۰۴۳۳۴۲	۳۱٫۱۵۴۵۹	۰٫۹۴۵۶۴۹	-۰٫۲۰۲۹۲	۰٫۸
Shargh-e- esfahan	۵۱٫۹	۳۲٫۷	۱۵۴۳٫۵	۲٫۴۵۸	-۰٫۸۳۷	۲٫۶۵	۱۱٫۹۵۶۲۵	۶۷٫۴۶۱۶	۰٫۹۱۴۹۹۲	۱٫۲۵	۰٫۷
Kabootarabad	۵۱٫۸	۳۲٫۵	۱۵۴۳٫۵	۲٫۳۰۷	-۰٫۸۵۴	۲٫۷۸۹۶۶۷	۱۰٫۹۳۹۳۶	۱۴۱٫۰۴۲۱	۰٫۹۲۳۹۱۳	-۰٫۲۵۸۱۳۳	۰٫۷۵
Mobarekeh	۵۱٫۵	۳۲٫۴	۱۶۹۰	۲٫۵۶۲	-۰٫۹۰۹	۲٫۰۱	۶٫۵۶۳۶۶۷	۵۳٫۱۰۷۲۹	۰٫۹۵۲۵۳۴	۰٫۲۵	۰٫۸
Najafabad	۵۱٫۴	۳۲٫۶	۱۶۴۱	۲٫۲۷۵	-۰٫۹۲۶	۱٫۹۰۴	۵٫۱۷۳۳۳۳	۱۸٫۹۶۷۰۶	۰٫۹۶۲۲۶۹	-۰٫۵۲۹۳۳	۰٫۸۲
Saman	۵۰٫۹	۳۲٫۵	۲۰۵۷	۲٫۳۸۱	-۰٫۸۶۲	۱٫۶۸۴۴۴۴	۵٫۶۶۸۸۸۹	۴۴٫۵۳۲۵۸	۰٫۹۲۸۱۳۷	۱٫۲	۰٫۷۳
Shahreza	۵۱٫۸	۳۲	۱۸۴۵	۲٫۴۷۱	-۰٫۹۰۲	۱٫۸۸۵۱۰۶	۶٫۱۰۷۳۳۴	۴۰٫۴۹۹۰۶	۰٫۹۴۹۹۲۹	-۰٫۴۲۹۷۸۷	۰٫۸
Shahrekord	۵۰٫۹	۳۲٫۳	۲۰۴۸٫۹	۲٫۹۰۷	-۰٫۸۶۸	۲٫۷۰۲۱۲۸	۱۵٫۲۶۴۹۵	۶۴٫۳۱۷۹۴	۰٫۹۳۱۶۸۵	۱٫۹۴۲۹۷۹	۰٫۵۶

جدول ۴. سنجه‌های مورد استفاده در ارزیابی پیش‌بینی ۴۸ ساعته

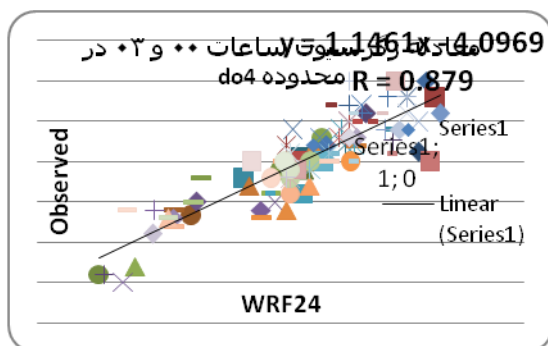
Station	X	Y	Z	RMSE	R Square	MAD	MSE	MAPE	R(XY)	MBE	MSSS
Moorchekhort	۵۱,۵	۳۳,۱	۱۶۶۹	۲,۳۲۰	۰,۹۰۲	۱,۸۱۳	۵,۳۸۳	۲۳,۸۴۵	۰,۹۵	۱,۰۵۳۳۳۳	۰,۸
Boroojen	۵۱,۳	۳۲	۲۱۹۷	۲,۹۰۴	۰,۸۴۲	۲,۲۰۴	۸,۴۳۳	۳۹,۴۷۷	۰,۹۲	۰,۲۳۲۰۸۳	۰,۶۶
Zarrinshahr	۵۱,۴	۳۲,۴	۱۶۸۰	۲,۴۳۰	۰,۹۲۸	۲,۰۳۱	۵,۹۰۷	۳۵,۷۹۱	۰,۹۶	-۰,۲۷۲۴۱	۰,۸۱
Esfahan	۵۱,۷	۳۲,۶	۱۵۵۰	۲,۴۳۶	۰,۸۸۶	۲,۰۵۶	۵,۹۳۳	۳۱,۵۱	۰,۹۴	-۰,۱۶۴۵۸	۰,۸
Shargh-e- esfahan	۵۱,۹	۳۲,۷	۱۵۴۳,۵	۳,۶۴۸	۰,۸۲۲	۲,۷۸۳	۱۳,۳۰۷	۷۰,۱۱۳	۰,۹۱	۱,۵۲۹۱۶۷	۰,۶۷
Kabootarabad	۵۱,۸	۳۲,۵	۱۵۴۲,۵	۳,۳۳۷	۰,۸۴۵	۲,۷۵۳	۱۱,۱۳۴	۱۴۶,۷۴۴	۰,۹۲	-۰,۲۵۲۶۷	۰,۷۵
Mobarekeh	۵۱,۵	۳۲,۴	۱۶۹۰	۲,۵۵۶	۰,۹۱۴	۱,۹۲۳	۶,۵۳۴	۵۳,۲۶۴	۰,۹۶	۰,۳۹۳۳۳۳	۰,۸
Najafabad	۵۱,۴	۳۲,۶	۱۶۴۱	۲,۰۶۸	۰,۹۳۴	۱,۷۹۵	۴,۲۷۵	۱۷,۷۷۶	۰,۹۷	-۰,۴۷۲	۰,۸۴
Saman	۵۰,۹	۳۲,۵	۲۰۵۷	۲,۰۹۳	۰,۸۸۸	۱,۴۸	۴,۳۷۹	۳۹,۶۱۲	۰,۹۴	۲,۹۰۲۲۲۲	۰,۷۶
Shahreza	۵۱,۸	۳۲	۱۸۴۵	۲,۵۵۷	۰,۸۸۹	۲,۰۱۷	۶,۵۴	۴۳,۱۴۱	۰,۹۴	۰,۲۲۳۴۰۴	۰,۷۷
Shahrekord	۵۰,۹	۳۲,۳	۲۰۴۸,۹	۳,۸۳۵	۰,۸۷۴	۲,۶۷۴	۱۴,۷۰۷	۶۲,۲۸۶	۰,۹۴	۱,۹۷۲۷۶۶	۰,۵۷



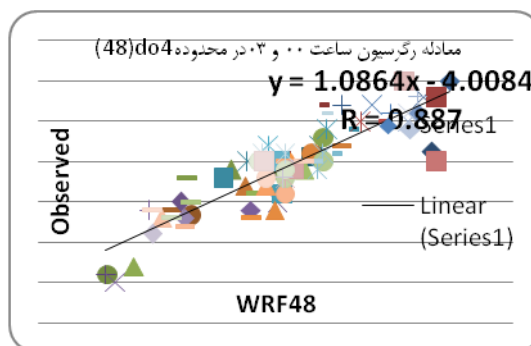
ب



الف



ت



پ

شکل ۳. معادله رگرسیون و ضریب همبستگی داده‌های WRF و داده‌های مشاهده‌شده: الف) با قدرت تفکیک یک کیلومتر و بازه زمانی ۴۸ ساعته؛ ب) با قدرت تفکیک یک کیلومتر و بازه زمانی ۲۴ ساعته؛ پ) و ت) برای پیش‌بینی دمای حداقل در بازه زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعته

در جدول ۵، که یکی از مهم‌ترین نتایج تحقیق بوده، استفاده از ضریب همبستگی درج شده است. هرچه مقدار ضریب همبستگی به یک نزدیک‌تر باشد مدل برازش داده‌شده مناسب‌تر است (یزدان‌پناه، ۱۳۸۹). مقدار ضریب همبستگی که در جدول ۵ آمده برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته برابر ۰,۹۳۸ و برای پیش‌بینی ۴۸ ساعته ۰,۹۳۵ است و نشان‌دهنده آن است که ارتباط قوی بین متغیر مستقل (داده‌های WRF) و متغیر وابسته (داده‌های دیده بانی شده) وجود دارد.

جدول ۵. مقایسه ضریب همبستگی

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
Model Summary wrf24	^a .۹۳۸	۰.۸۷۹	۰.۸۷۹	۲,۴۶۲۱۸
Model Summary wrf48	^b .۹۳۵	۰.۸۷۴	۰.۸۷۴	۲,۵۰۹۴۸

a. Predictors: (Constant), wrf24 b. Predictors: (Constant), wrf48

جدول ۶. جدول آنالیز واریانس

Model ANOVA ^a	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	۱۸۹۳۲,۰۸۳	۱	۱۸۹۳۲,۰۸۳		
Wrf24 Residual	۲۶۰۶,۸۱۰	۴۳۰	۶,۰۶۲	۳۱۲۲,۸۹۵	۰,۰۰۰ ^b
Total	۲۱۵۳۸,۸۹۳	۴۳۱			
Regression	۱۸۸۳۰,۹۷۷	۱	۱۸۸۳۰,۹۷۷		
Wrf48 Residual	۲۷۰۷,۹۱۶	۴۳۰	۶,۲۹۷	۲۹۹۰,۲۴۱	۰,۰۰۰ ^c
Total	۲۱۵۳۸,۸۹۳	۴۳۱			

a. Dependent Variable: observed b. predictors : (Constant), wrf24 c. predictors :(Constant), wrf48

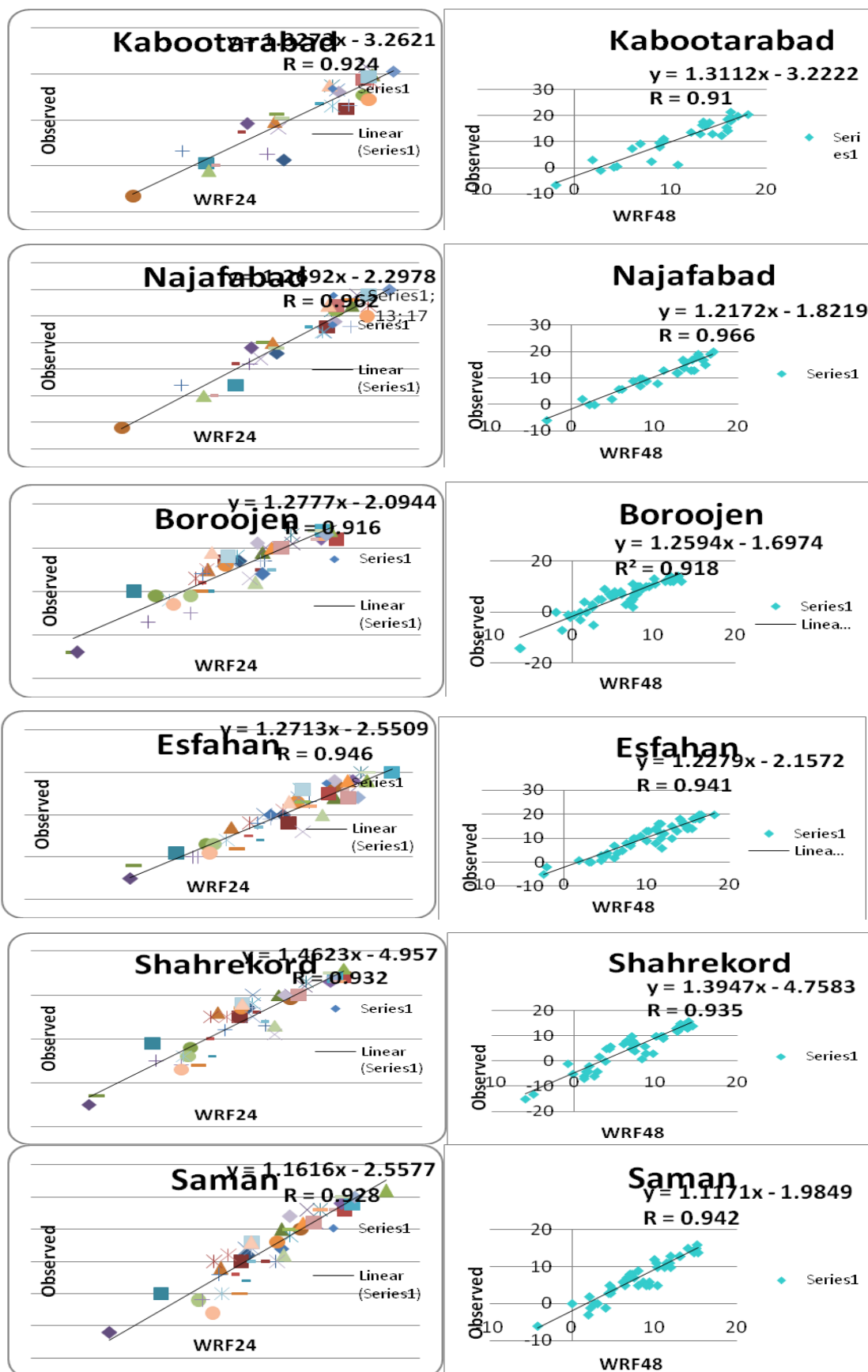
جدول ۷. جدول برآورد ضرایب رگرسیون

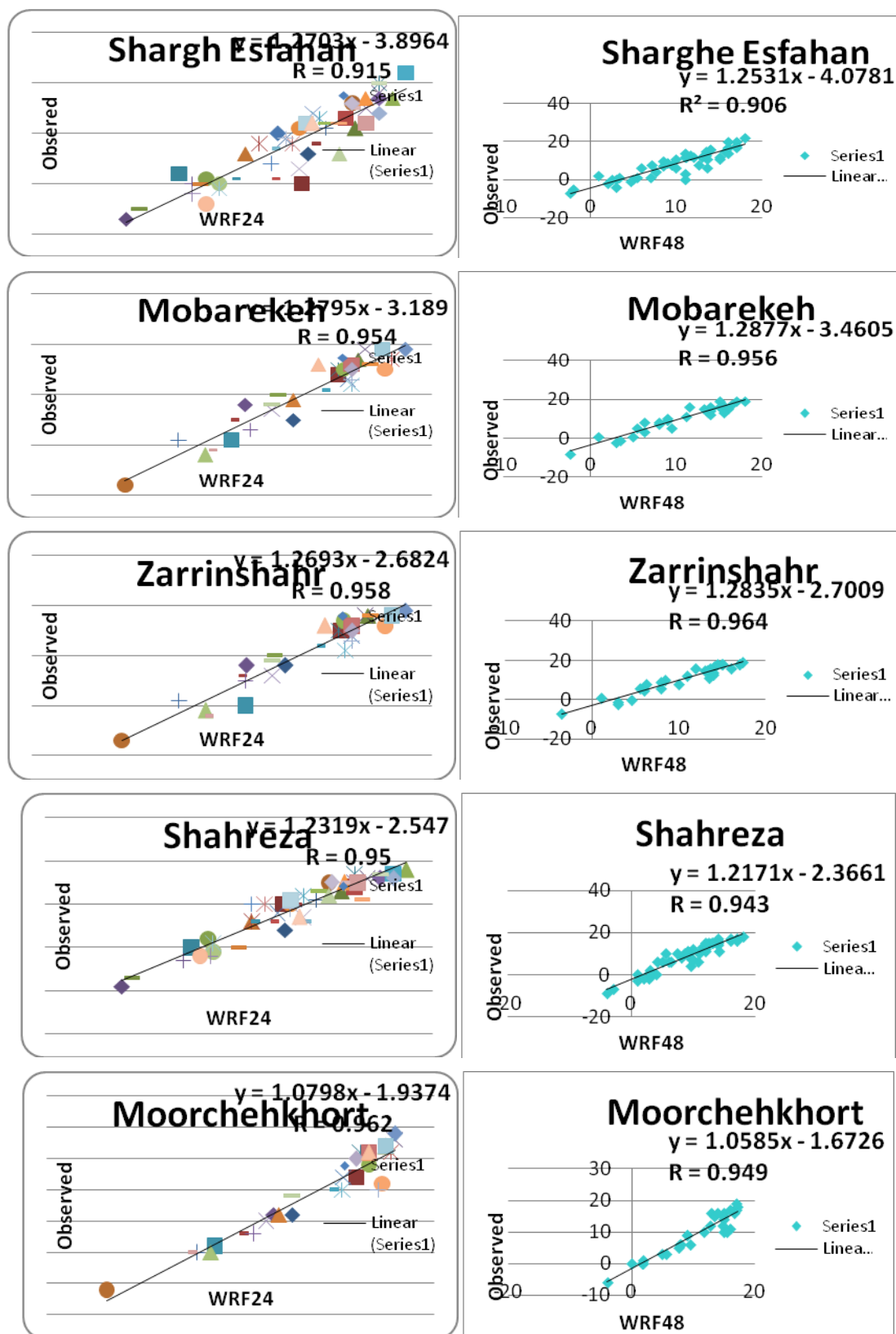
Model Coefficients	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant) wrf24	-۲,۹۳۹	۰,۲۳۸	۰,۹۳۸	-۱۲,۳۳۹	۰,۰۰۰
	۱,۲۶۰	۰,۰۲۳		۵۵,۸۸۳	۰,۰۰۰
1 (Constant) wrf48	-۲,۶۹۸	۰,۲۳۹	۰,۹۳۵	-۱۱,۲۶۹	۰,۰۰۰
	۱,۲۳۱	۰,۰۲۳		۵۴,۶۸۳	۰,۰۰۰

جدول ۶ که یک جدول آنالیز واریانس است، برای آزمون معنی‌دار بودن مدل رگرسیونی استفاده شده است و فرض معنی‌دار بودن مدل رگرسیونی را آزمون می‌کند. مقدار Pvalue یا همان Significant، که در ستون آخر برابر با صفر گزارش شده، از ۰/۰۵ کوچک‌تر بوده و نشان‌دهنده آن است که فرض صفر رد شده و مدل معنی‌دار است. می‌توان از این متغیر مستقل برای پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده کرد.

جدول ۷ با نام Coefficients برآورد ضرایب رگرسیون را نشان می‌دهد و برای هر یک از ضرایب فرض معنی‌داری آن آزمون شده است. بنابراین، دو آزمون انجام گرفته است: یکی، برای ضریب ثابت مدل، که در پیش‌بینی ۴۸ ساعته -۲/۶۹۸ بوده؛ دیگری، برای ضریب متغیر، که در اینجا ۱/۲۳۱ بوده است. با توجه به آزمون معنی‌داری ضرایب رگرسیون در جدول ۷، ملاحظه می‌شود که برای ضریب ثابت رگرسیون و ضریب متغیر آن آزمون معنی‌دار است و فرض صفر رد می‌شود. پس می‌توان از آن‌ها در معادله رگرسیون استفاده کرد.

در شکل ۴ معادله رگرسیون و ضریب تعیین داده‌های WRF و داده‌های مشاهده‌شده برای یازده ایستگاه مورد مطالعه آورده شده که در بخش «الف» با قدرت تفکیک یک کیلومتر و بازه زمانی ۲۴ ساعته است. میزان ضریب تعیین برای دو بازه زمانی خوب است. در مناطق کوهستانی میزان آن نسبت به سایر ایستگاه‌ها کمی کاهش یافته است و آن نیز به دلیل آن است که دمای دومتري سطح زمین وابستگی شدید به توپوگرافی منطقه دارد.





ب

الف

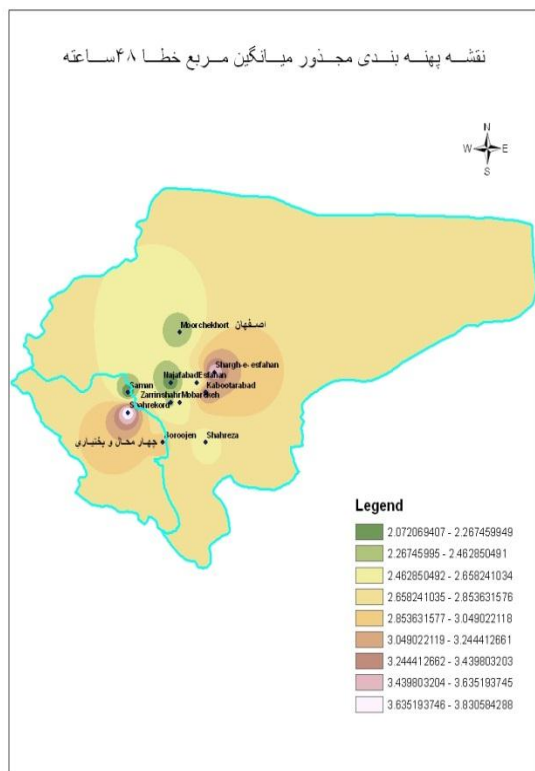
شکل ۴. معادله رگرسیون و ضریب همبستگی داده‌های WRF و داده‌های مشاهده‌شده؛ الف) با قدرت تفکیک یک کیلومتر و بازه زمانی ۴۸ ساعته؛ ب) با قدرت تفکیک یک کیلومتر و بازه زمانی ۲۴ ساعته

نقشه پهنه‌بندی سنج‌های مورد استفاده در ارزیابی پیش‌بینی ۲۴ ساعته و ۴۸ ساعته رسم شد. نقشه‌های سمت راست مربوط به پیش‌بینی ۲۴ ساعته و سمت چپ مربوط به پیش‌بینی ۴۸ ساعته مدل است. روش درون‌یابی به‌کاربرده شده در تهیه نقشه‌ها روش IDW (Inverse Distance Weighted) با توان ۴ است. از این روش بیشتر برای مناطقی که دارای پستی و بلندی‌اند استفاده می‌شود. مطابق جدول ۸ دقت مدل‌های درون‌یابی با اجرای ارزیابی خطا بررسی شده است و مدلی که کمترین خطا را دارد انتخاب می‌شود که در اینجا مدل IDW با توان چهار دارای خطای کمتری است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ایستگاه‌هایی که دارای ارتفاع کمتری هستند میزان خطای مدل آن‌ها کمتر است و برون‌داد مدل به واقعیت نزدیک‌تر است تا ایستگاه‌هایی که ارتفاع بیشتری مانند ایستگاه شهرکرد دارند و این نشان‌دهنده آن است که پیش‌بینی دمای دومتري تحت تأثیر شدید ارتفاع و توپوگرافی منطقه است.

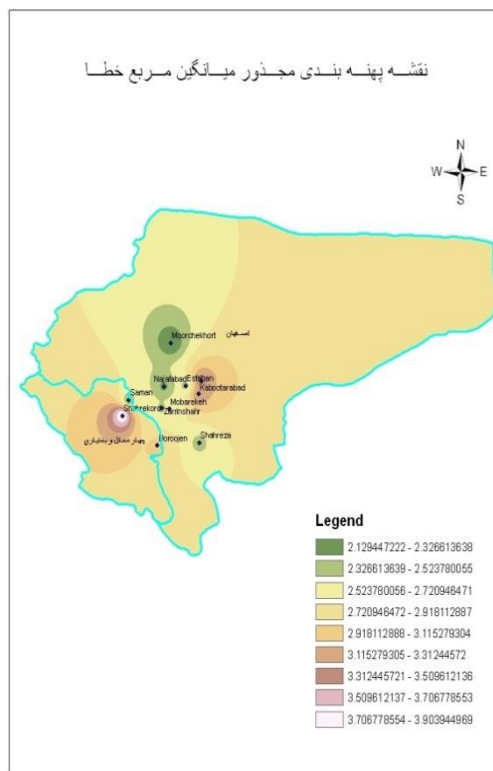
جدول ۸. مقایسه دقت مدل‌های درون‌یابی در GIS

روش‌های درون‌یابی	RMSE	MAD	MSE	MAPE
کریجینگ ساده	۱۴۴٫۹۴	۱۰٫۸۵۳	۳۱۰۳۲٫۲۱	۵٫۷۵
کریجینگ معمولی	۱۴۰٫۱۸	۸۹٫۲۸	۱۹۶۵۸٫۸۱	۴٫۵۵
IDW با توان یک	۱۹۱٫۲۴	۱۵۳٫۹	۳۶۵۷۵٫۳	۸٫۲۹
IDW با توان دو	۱۵۳٫۰۹	۱۰۱٫۵۳	۲۳۴۶۴٫۸۳	۵٫۲۷
IDW با توان سه	۱۳۸٫۱۸	۷۴٫۲۶	۱۹۱۶۵٫۲۵	۳٫۷۵
IDW با توان چهار	۱۳۵٫۳۴	۶۳٫۷۱	۱۸۳۳۱٫۸۵	۳٫۱۷

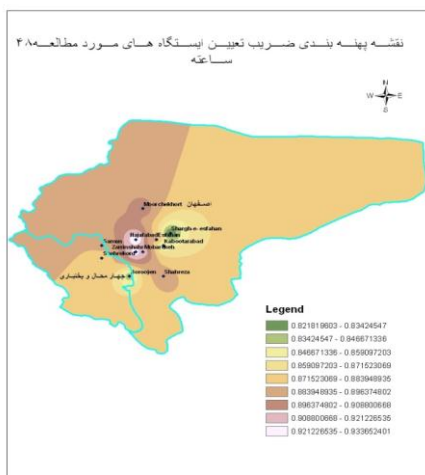
نقشه ۸



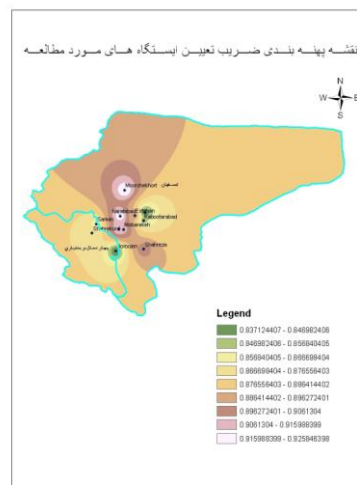
نقشه ۷



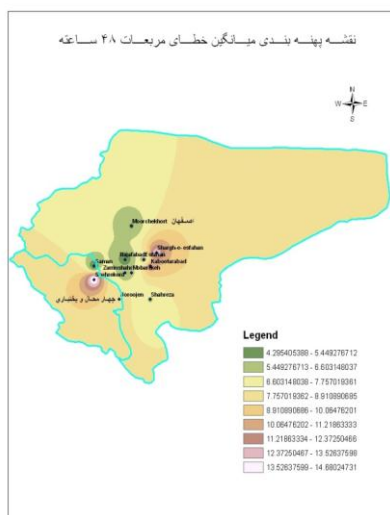
نقشه ۱۰



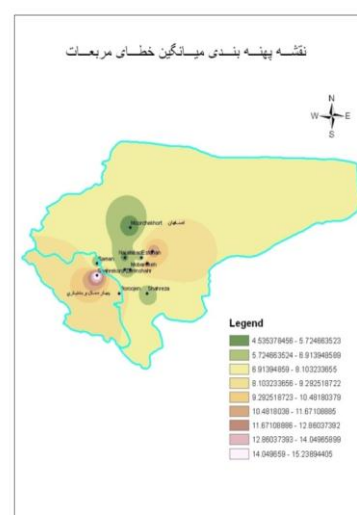
نقشه ۹



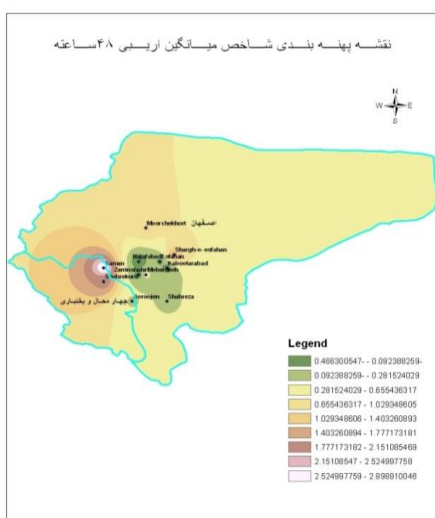
نقشه ۱۲



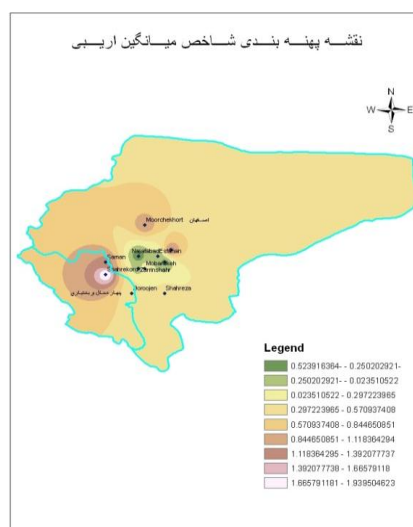
نقشه ۱۱



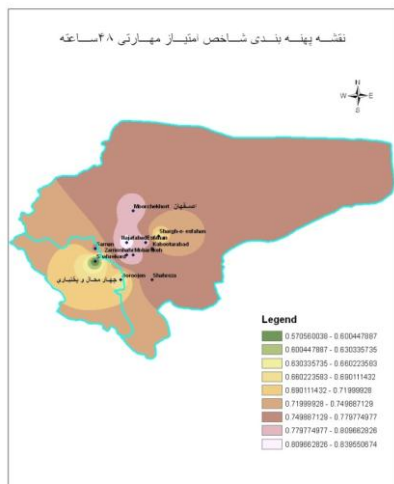
نقشه ۱۴



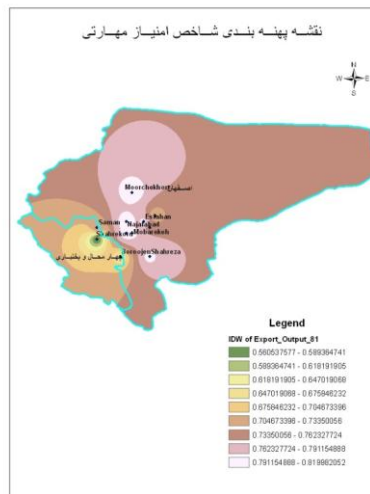
نقشه ۱۳



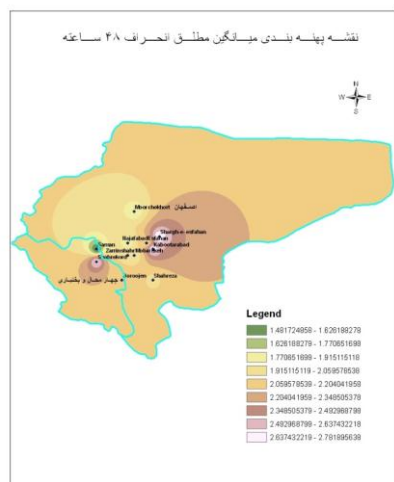
نقشه ۱۶



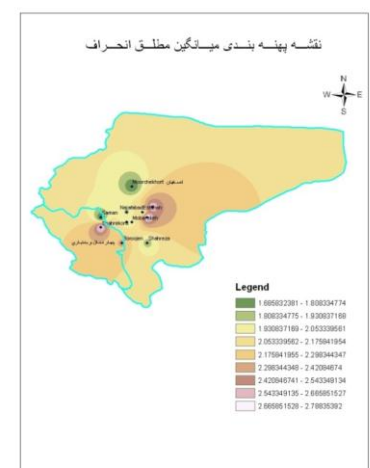
نقشه ۱۵



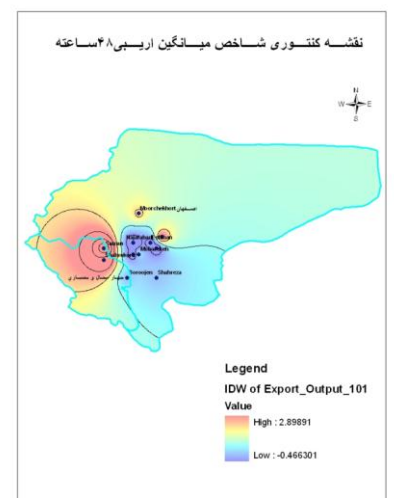
نقشه ۱۸



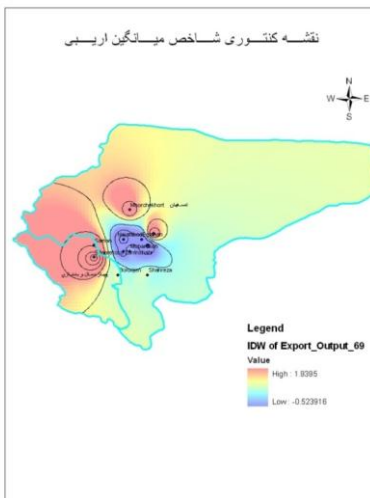
نقشه ۱۷



نقشه ۲۰



نقشه ۱۹

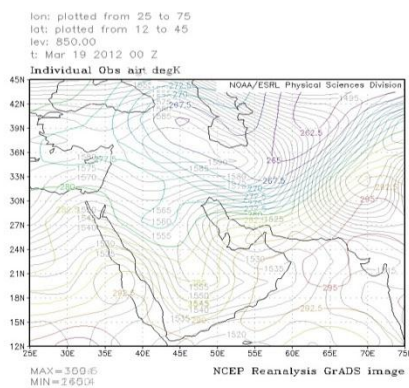


شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی سنج‌های محاسبه‌شده در منطقه مورد مطالعه

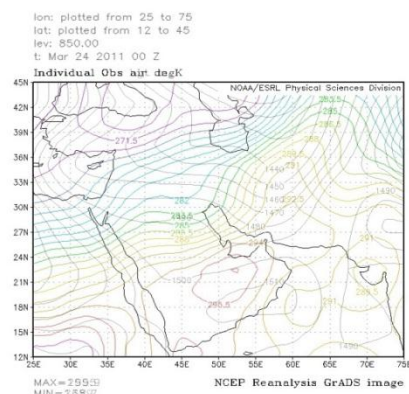
تحلیل همدیدی

با توجه به بررسی نقشه‌های ۸۵۰ میلی‌باری در تاریخ‌های وقوع سرمای دیررس بهاره، می‌توان به ماهیت سرمای دیررس بهاره، که آیا از نوع تشعشی یا فرارفتی است، پی برد. مثلاً، در نقشه ۱، که نقشه ۸۵۰ میلی‌باری در تاریخ ۲۴ مارس ۲۰۱۱ است، فرارفت هوای سرد به‌خوبی مشهود است. خطوط هم‌ارتفاع (خطوط کنتوری) و خطوط دما تقریباً همدیگر را به‌طور عمودی قطع کرده‌اند و یک فرارفت (advection) هوای سرد قوی به‌وجود آمده است. ذکر این نکته لازم است که هرچه شرایط کُزفشاری (قطع خطوط هم‌دما به‌وسیله خطوط کنتوری با زاویه خوب) بهتر و زاویه قطع شدن به ۹۰ درجه نزدیک‌تر باشد، فرارفت هوا قوی‌تر است. در هر شش نقشه فرارفت هوای سرد مشهود است. نتیجه می‌گیریم که وقوع سرماهای دیررس بهاره مورد بررسی در این مقاله بیشتر از نوع فرارفتی است.

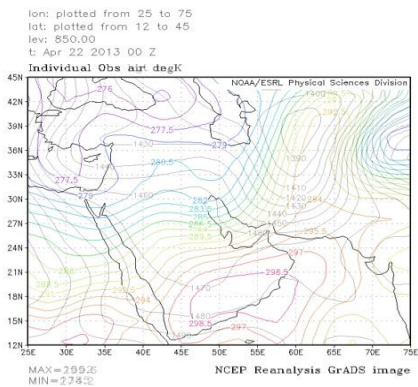
نقشه ۲



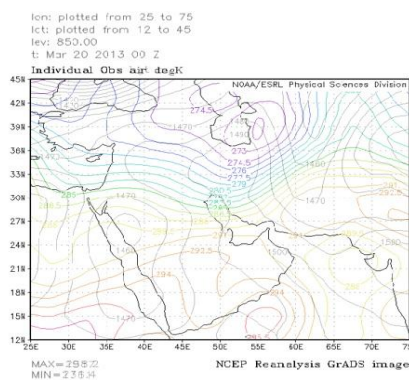
نقشه ۱



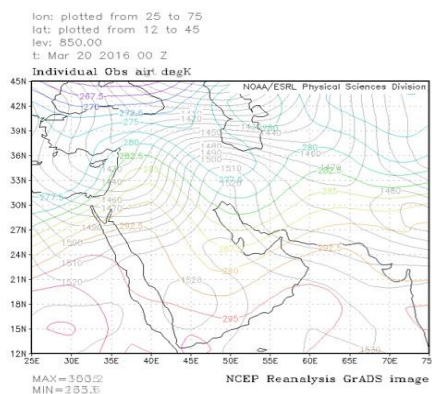
نقشه ۴



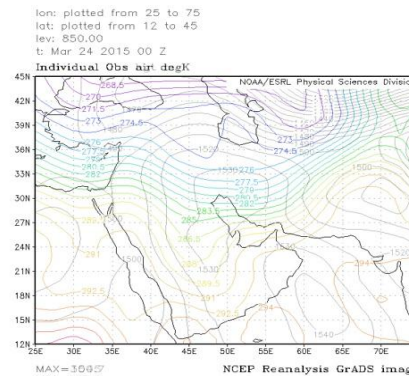
نقشه ۳



نقشه ۶



نقشه ۵



شکل ۶. نقشه‌های ۸۵۰ میلی‌باری در تاریخ‌های وقوع سرمای دیررس بهاره

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از راست‌آزمایی برون‌داد مدل WRF برای پیش‌بینی دما در بازه زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعته مربوط به ۱۱ ایستگاه واقع در حوضه زاینده‌رود در زمان وقوع سرمای دیررس بهاره ارائه شده است. در بیش از ۸۰ درصد موارد، نتایج پیش‌بینی رخداد پدیده منطبق بر نتایج دیدبانی‌هایی است که پدیده مورد نظر اتفاق افتاده است. همبستگی بین دمای دیدبانی‌شده با پیش‌بینی مدل WRF با تفکیک افقی یک کیلومتر نسبت به تفکیک افقی سه کیلومتر دقت بیشتری دارد. برای پیش‌بینی ۲۴ و ۴۸ ساعته دمای روزانه مقدار مناسبی داشت. اگرچه در مجموع پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته دارای دقت بیشتری بودند، کای کنگ و همکاران (۲۰۱۵) به نتیجه مشابه فوق رسیدند. آن‌ها توانایی مدل WRF را برای دمای سطح زمین و بارش در منطقه مالزی ارزیابی کردند. به‌طور کلی، مدل برای دمای سطح زمین با انحراف کمتر از یک‌ونیم درجه سانتی‌گراد به‌خوبی اجرا شد، ولی شبیه‌سازی بارش به‌خوبی دمای سطحی انجام نگرفت. همین‌طور صحت پیش‌بینی دمای دومتری وابستگی شدید به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه دارد؛ به‌نحوی که دقت برآوردهای مدل در مناطق پست و هموار نسبت به مناطق کوهستانی بیشتر است؛ دوآن و همکاران (۲۰۱۸) نیز به همین نتیجه رسیدند. آن‌ها صحت پیش‌بینی دمای سطح زمین و سرعت باد را در شمال غربی چین با مدل WRF ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند خطای پیش‌بینی دما در ارتفاع دومتری و سرعت باد در ارتفاع ده‌متری به‌طور قوی به توزیع عوارض زمین بستگی دارد. همچنین، شو و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از پیش‌بینی‌های مدل WRF نتیجه گرفتند که پیش‌بینی‌های دمای دومتری با پیش‌بینی دیگر متغیرهای جوی متفاوت است و خطاها در پیش‌بینی‌های دمای دومتری با توپوگرافی سطح شدیداً مرتبط است. زانگ و پو (۲۰۱۳) دریافتند که مدل WRF برای پیش‌بینی متغیرهای جوی نزدیک سطح زمین با دیدبانی‌ها در مناطق هموار به‌خوبی مطابقت دارد. در مجموع، نتایج مقاله حاضر نشان می‌دهد که می‌توان از پیش‌بینی‌های مدل WRF به‌خوبی در مناطق پست و هموار برای پیش‌بینی وقوع سرمازدگی استفاده کرد.

منابع

- آزادی، م.؛ صوفیانی، م.؛ وکیلی، غ. و قائمی، ه. (۱۳۹۵). مطالعه موردی اثر گوارد داده‌های ایستگاه‌های دیده‌بانی و جو بالا در برون‌داد بارش مدل WRF روی منطقه ایران، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۰(۳): ۱۱۰-۱۱۹.
- آزادی، م. و افشاری، ف. (۱۳۹۳). پیش‌بینی عددی دمای دومتري با استفاده از برون‌داد مدل WRF بر روی ایران، دانشگاه هرمزگان.
- آزادی، م.؛ شیرغلامی، م.؛ حجام، س. و صحراييان، ف. (۱۳۹۰). پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای بارندگی روزانه در ایران، تحقیقات منابع ایران، ۷(۴): ۷۱-۸۱.
- آزادی، م.؛ جعفری، س.؛ میرزایی، ا. و عربلی، پ. (۱۳۸۷). پس‌پردازش برون‌داد مدل میان‌مقیاس MM5 برای دمای بیشینه و کمینه با استفاده از فیلتر کالمن، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۴(۱): ۴۵-۶۱.
- ارکیان، ف.؛ رنجبر، ع.؛ میرزایی، ا. و دنیا دوست، غ. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی عددی طوفان‌های تندری توسط مدل WRF (ARW) در تهران، کنفرانس ملی هواشناسی ایران، اردیبهشت ۱۳۹۴، دانشگاه یزد.
- ارکیان، ف.؛ مشاطان، ن.؛ کتیرایی بروجردی، پ. و میرزایی، ا. (۱۳۹۳). ارزیابی پیش‌بینی بارش مدل WRF برای بارش‌های سنگین روزانه استان قزوین، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۳ تا ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۳، ص ۲۲-۲۶.
- ایرانمهر، م.؛ پورمنافی، س. و سفینیان، ع. (۱۳۹۴). پایش اکولوژیکی و بررسی تغییرات مکانی- زمانی پوشش اراضی با تأکید بر مقدار مصرف آب بخش کشاورزی در محدوده زاینده‌رود، اکوهیدرولوژی، ۲(۱): ۲۳-۳۸.
- تقی‌زاده، ا. (۱۳۸۹). بررسی عملکرد مدل‌های منطقه‌ای MM5، HRM، و WRF برای پیش‌بینی بارش روی ایران، دانشگاه یزد.
- ذوالجودی، م.؛ قاضی میرسعید، م. و سیفری، ز. (۱۳۹۲). بررسی صحت و دقت طرح‌واره‌های مختلف مدل WRF و ارزیابی پیش‌بینی بارش در ایران زمین، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۸(۲): شماره پیاپی ۱۰۹.
- رحمانی، م.؛ محمدی، ع.؛ خاکزار، م.؛ آزادی، م. و معمار جعفری، م. (۱۳۹۴). شبکه‌بندی برون‌داد پس‌پردازش مدل WRF برای کمی‌ت دمای دومتري روی ایران، طرح پژوهشی پژوهشکده توسعه تکنولوژی.
- غلامی، س.؛ قادر، س.؛ خالقی، ح. و غفاریان، پ. (۱۳۹۷). ارزیابی پیش‌بینی میدانی باد توسط مدل WRF تحت تأثیر شرایط اولیه و مرزی متفاوت در منطقه خلیج فارس: مقایسه با داده‌های همدیدی و ماهواره‌های QuikSCAT و ASCAT، فیزیک زمین و فضا، ۴۴(۱): ۲۲۷-۲۴۳.
- قرایلو، م.؛ ثابت‌قدم، س. و قادر، س. (۱۳۹۲). امکان‌سنجی پیش‌بینی رخداد آذرخش با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF در منطقه ایران، فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۱): ۲۱۳-۲۲۰.
- قرایلو، م.؛ مزرعه‌فراهانی، م. و علی‌اکبری بیدختی، ع. (۱۳۸۷). بررسی طرح‌واره‌های پارامترسازی همرفت کومه‌ای مدل بزرگ‌مقیاس و میان‌مقیاس، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۶(۱): ۱۷۱-۱۹۲.
- یزدان‌پناه، ح.ا. (۱۳۸۹). تحلیل‌های آماری در جغرافیا با رویکرد محاسباتی نرم‌افزار SPSS، دانشگاه اصفهان، انتشارات دانشگاه اصفهان.

Arkian, F.; Mashatan, N.; Katiraei Borojerdi, P. and Mirzaei Haji Baghlo, E. (2014). Evaluation of Precipitation Forecasts of WRF Model for daily Heavy Rain in Qazvin Province, Sixteenth of Iran Geophysics conference, May 13-15, PP. 22-26.

- Arkian, F.; Ranjbar, A.; Mirzaei, E. and Donyadoost, GH. (2015). The Numerical Simulation of Thunderstorms using ARW-WRF Model in Tehran (ten Case studies), Iran weather of national Conference, May 2015, Yazd University.
- Azadi, M. and Afshari, F. (2014). Forecast of 2 meters temperature by output of WRF model over IRAN, University of Hormozgan.
- Azadi, M.; Jafari, S.; Mirzaei, E. and Arabli, P. (2008). Post processing of MM5 forecasts for minimum and maximum temperature 5using a Kalman filter, *Journal of the earth and space physics*, 34(1): 71-81.
- Azadi, M.; Shirgholami, M.R.; Hajjam, S. and Sahraian, F. (2011). WRF Model Output Postprocessing for Daily Precipitation over Iran, *Iran-Water Resources Research*, 7(3): 71-81.
- Azadi, M.; Vakili, GH. and Ghaemi, H. (1395). Case study of The impact of assimilating surface pressure observations stations and upper air in output of WRF model precipitation data in IRAN, *Journal of Iranian Geophysics*, 10(2): 110-119.
- Duan, H.; Li, Y.; Zhang, T.; Pu, Z.; Zhao, C. and Liu, Y. (2018). Evaluation of the Forecast Accuracy of Near-Surface Temperature and Wind in Northwest China Based on the WRF Model, *Journal of Meteorological Research*, 32(3): 469-490.
- Eckel, F.A. and Mass, C.F. (2005). Aspects of effective mesoscale, short-range ensemble forecasting, *Wea. Forecasting*, 20: 328-350.
- Galanis, G. and Anadranistakis, M. (2002). A one-dimensional Kalman filter for the correction of near surface temperature forecasts, *Meteorol. Appl.*, 9: 441-473.
- Gharaylou, M.; Mazraeh Farahani, M. and Aliakbari Bidokhti, A. (2010). Review of cumulus convective parameterization schemes in large and meso- scale models, *Journal of the Earth and Space Physics*, 36(1): 171-192.
- Gharaylou, M.; Sabetghadam, S. and Ghader, S. (2013). Feasibility study of lightning event prediction using WRF mesoscale model in Iran, *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(1): 213-220.
- Gholami, S.; Ghader, S.; Khaleghi Zavareh, H. and Ghafarian, P. (2018). Verification of WRF wind field hindcast forced by different initial and boundary conditions over the Persian Gulf: Comparison with synoptic data and QuikSCAT and ASCAT satellites data, *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(1): 14.
- Homleid, M. (1995). Diurnal corrections of short-term surface temperature forecasts using the Kalman filter, *Wea. Forecasting*, 10: 689-707.
- Hsieh, W.W. and Tang, B. (1998). Applying neural network models to prediction and data analysis in meteorology and oceanography, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 1855-1870.
- Iranmehr, M.; Pourmanafi, S. and Soffianian, A. (2015). Ecological Monitoring and Assessment of Spatial-Temporal Changes in Land Cover with an Emphasis on Agricultural Water Consumption in Zayandeh Rood Region, *Ecohydrology*, 2(1): 23-38.
- Kai Kong, S.; Sentian, J. and Bidin, K. (2015). Evaluation of Weather Research Forecast (WRF) Modeling System on Surface Temperature and Precipitation over Malaysia Region, *Advances in Natural and Applied Sciences*, 9(14): 20-24.
- McCollor, D. and Stull, R. (2008). Hydrometeorological accuracy enhancement via postprocessing of numerical weather forecasts in complex terrain, *Wea. Forecasting*, 23: 131-144.
- Muler, M.D. (2011). Effects of Model Resolution and Statistical Post-processing on ShelterTemperature and Wind Forecasts, *Journal of Applied Meteorology*, 50: 1627-1636.
- Rahmani, M.; Mohamadi, A.; Khakzar, M.; Azadi, M. and Memarjafari, M. (2015). Gridding of post processed WRF output for 2-meter temperature over Iran.
- Taghizadeh, A. (1389). *Evaluation of output Regional models WRF, HRM and MM5 for Precipitation Forecasts over Iran*, Yazd University.
- Warner, T.T. (2011). *Numerical Weather and Climate Prediction*, Cambridge University Press, Cambridge, 550 pp.
- Woodcock, F. and Engel, C. (2005). Operational consensus forecasts, *Wea. Forecasting*, 20: 101-111.

- Xu, J.; Rugg, S.; Byerle, L. and Liu, Z. (2009). Weather forecasts by the WRF-ARW model with the GSI data assimilation system in the complex terrain areas of Southwest Asia, *Weather and Forecasting*, 24: 987-1008.
- Yazdanpanah, H. (2010). Statistical analysis in geography with a computational approach, Isfahan University, Publications of Isfahan University.
- Zhang, H. and Pu, Z. (2013). Examination of Errors in Near-Surface Temperature and Wind from WRF Numerical Simulations in Regions of Complex Terrain, *Journal of Weather and Forecasting*, 28(3).
- Zoljoodi, M.; Ghazi Mirsaeed, M. and Seifari, Z. (2013). Verification of WRF model On Accuracy and Precision of Various Schemes and Evaluation of Precipitation Forecast in Iran, *Geographical Researches Quarterly Journal*, 28(2): 187-194.