

## بررسی موردی کارایی میانگین سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی وضعیت جوی در منطقه غرب ایران

سید محمود خوانساری<sup>۱</sup>، سید حسین ثنایی نژاد<sup>۲\*</sup>، امین علیزاده<sup>۲</sup>، آذر زرین<sup>۳</sup> و سرمد قادر<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۴</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱)

### چکیده

استفاده از مدل‌های هواشناسی یکی از مناسب‌ترین روش‌های پیش‌بینی وضع جو است، اما باتوجه به ماهیت پیچیده جو گاهی این مدل‌ها نیز از پیش‌بینی دقیق آن عاجزند. روش‌های نوینی جهت کمک به افزایش دقت پیش‌بینی‌ها توسعه داده می‌شود که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش همادی (Ensemble) پیش‌بینی وضع جوی اشاره کرد. پژوهش حاضر به ارائه نتایج حاصل از توسعه یک سامانه پیش‌بینی همادی برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد ۱۰ متری از سطح زمین، دمای هوا و بارش تجمعی ۲۴ ساعته در منطقه غرب ایران می‌پردازد. جهت توسعه مدل همادی، اعضای سامانه همادی با استفاده از ترکیب سه پیکربندی منتخب و ایجاد پریشیدگی در شرایط اولیه مدل با استفاده از روش مونت کارلو ترکیب شده‌اند. همچنین در شبیه‌سازی‌های مدل WRF برای هر یک از اعضای سامانه همادی از سه دامنه تودرتو با تفکیک‌های افقی ۲۷، ۹ و ۳ کیلومتر استفاده شده است. بررسی نتایج به کمک سنج‌های آماری مانند خطای مطلق میانگین (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و KGE در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های موجود در منطقه صورت گرفت. برای پیش‌بینی ۷۲ ساعته مؤلفه‌های باد در تراز ۱۰ متری سطح زمین جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۲/۳۱ متر بر ثانیه و برای دمای تراز ۲ متری سطح زمین برابر با ۲/۷۵ درجه سلسیوس به دست آمد که نشان از کارایی مناسب میانگین همادی برای پیش‌بینی متغیرهای مذکور باتوجه به شرایط منطقه از نظر ناهمواری‌ها دارد. مدل در پیش‌بینی بارش در با چهار سنج آماری برای رویدادهای بیشتر از دودسته ارزیابی شده است. سنج FAR نشان می‌دهد که در بارش‌های ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بیشترین هشدار غلط وجود دارد، درحالی‌که سنج HSS نشان‌دهنده مهارت بالایی مدل نسبت به پیش‌بینی‌های تصادفی در این بازه است. همچنین، مدل توانایی خوبی در شناسایی بارش‌های واقعی دارد و در بارش‌های بالای ۵۰ میلی‌متر عملکرد مطلوبی داشته، اما در سایر موارد اندکی بیش پیش‌بینی مشاهده شده است. همچنین مدل در محدوده کوهستانی منطقه موردنظر بیشترین چالش را برای پیش‌بینی متغیرها در طی روزهای پیش‌بینی داشته است.

**کلمه‌های کلیدی:** پیش‌بینی عددی وضعیت جو، سامانه همادی، مدل WRF، پریشیدگی

## ۱ مقدمه

پیش‌بینی هواشناسی از دیرباز موضوعی مهم جهت آگاهی به‌موقع از رفتار طبیعت بوده است. این مهم با پیشرفت علم و کشف معادلات حاکم حالت جدیدی به خود گرفت. لوئیس فرای ریچاردسون و ویلهلم برکنس چهره‌های محوری در توسعه ریاضیات در پیش‌بینی عددی وضعیت آب‌وهوا (Numerical weather prediction) بودند و ریچاردسون بود که در کتاب خود ایده پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوا را با توجه به حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی ارائه کرد (لینچ، ۲۰۱۶؛ لاجوی و همکاران، ۲۰۰۹). پس از آن با پیشرفت علوم رایانه‌ای دقت و قابلیت مدل‌های عددی هواشناسی افزایش پیدا کرد به‌طوری‌که تا قبل از آن پیش‌بینی آب‌وهوا بر محاسبات دستی و معادلات ساده تکیه داشت؛ اما پیشرفت رایانه‌ها هواشناسان را قادر ساخت تا محاسبات پیچیده‌تری را انجام دهند و مدل‌های عددی پیشرفته ایجاد کنند (لینچ، ۲۰۰۸؛ مورلی، ۲۰۲۰). علاوه بر آن این پیشرفت مقدمات پیاده سازی پیش‌بینی‌های همادی را فراهم ساخت. هدف این نوع از پیش‌بینی وضعیت جو ارائه پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتر با در نظر گرفتن شبیه‌سازی‌های متعدد با شرایط اولیه (Initial condition) متفاوت است. این روش از دهه ۱۹۹۰ مشهور شد و به طور گسترده توسط مراکز عمده پیش‌بینی آب‌وهوا در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفت (چن و همکاران، ۲۰۲۲). از روش‌های پرکاربرد ایجاد یک سامانه همادی می‌توان به روش بردار تکین (Singular vector) که در مراکز مختلف هواشناسی مانند NCEP، ECMWF و CMC استفاده می‌شود (نایتینگ و همکاران، ۲۰۰۵) و یا استفاده از روش ایجاد پریشیدگی در شرایط اولیه اجرای مدل عددی هواشناسی (لی، ۲۰۲۴)، اشاره کرد. مدل‌های عددی پیش‌بینی وضعیت جو که در کارهای پژوهشی استفاده می‌شوند بسته به نوع پژوهش متفاوت است؛ اما مدل عددی WRF یکی از قوی‌ترین

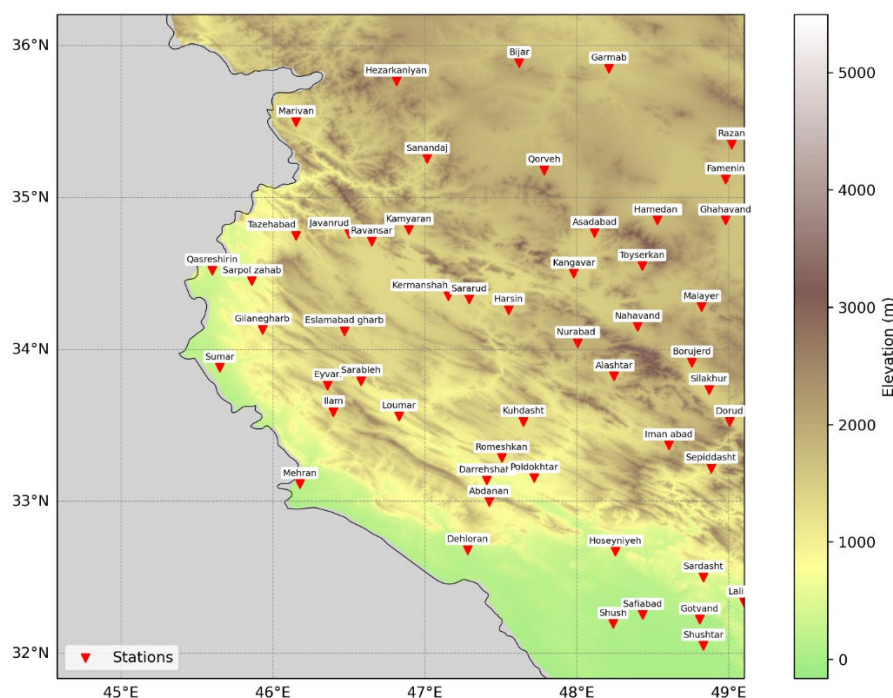
مدل‌های پیش‌بینی عددی است که می‌تواند سامانه همادی مطلوبی را فراهم آورد. مدل عددی WRF امکان شبیه سازی دقیق فرآیندهای جوی را با تفکیک مکانی بالاتری نسبت به مدل‌های جهانی فراهم می‌کند. این قابلیت مدل را قادر می‌سازد تا پدیده‌های آب و هوایی محلی را با دقت بیشتری به تصویر بکشد (استولاکی و همکاران، ۲۰۱۱؛ هاینز و بروموچ، ۲۰۰۸). همچنین این مدل قابلیت تنظیم بسیار بالایی برای اجرا در شرایط مختلف دارد (کرامر و همکاران، ۲۰۱۸). از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در پیش‌بینی همادی با استفاده از مدل WRF می‌توان به استفاده پیش‌بینی سرعت باد، پیش‌بینی فصلی بارش و همچنین پیش‌بینی مسیر طوفان اشاره کرد (دیالو، ۲۰۲۴؛ چانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ میوشی و کانی، ۲۰۱۱). همچنین در سال‌های اخیر استفاده از این روش در ایران نیز مورد استقبال قرار گرفته است که می‌توان به بررسی عملکرد سامانه همادی چندفیزیکی مدل میان‌مقیاس WRF جهت شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران (مرادیان و همکاران، ۱۳۹۹) که با استفاده از پارامتر سازی‌های فیزیکی مختلف به ارزیابی خروجی این سامانه همادی پرداخته‌اند، به کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده‌شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس (قادر و همکاران، ۱۳۹۴) که نشان دادند سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF در منطقه مورد مطالعه نسبت به پیش‌بینی‌های قطعی (Deterministic) عملکرد بهتری داشته است. استفاده از روش Breeding جهت ساختن سامانه همادی (اشرفی و همکاران، ۱۳۸۸) که به بررسی روش مورد نظر در توسعه سامانه همادی مدل MM5 می‌پردازد و در نهایت استفاده از چند مدل برای توسعه یک سامانه همادی برای پیش‌بینی بارش روی ایران (فتحی و همکاران، ۱۳۹۸) که این پژوهش نیز نشان داد سامانه همادی در عمل نسبت به پیش‌بینی قطعی توانایی بیشتری دارد.

## ۲ روش انجام پژوهش

### ۱-۲ منطقه مورد مطالعه

به دلیل تأثیر قابل توجه ناهمواری منطقه غرب ایران، به ویژه وجود رشته کوه زاگرس بر الگوهای بارش، این منطقه به عنوان دومین ناحیه پر بارش در کشور شناخته می شود. وقوع برخی از رخداد های بارشی شدید و سیلاب های مخرب، مانند سیلاب های سال ۱۳۹۸ شمسی، نشان دهنده اهمیت این منطقه برای ارزیابی توانایی مدل ها در پیش بینی و شبیه سازی چنین وقایعی است؛ لذا در کار حاضر این منطقه انتخاب شده است تا توانایی مدل برای پیش بینی و شبیه سازی این وقایع ارزیابی شود. پراکندگی ایستگاه ها و منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در این پژوهش، عملکرد یک سامانه پیش بینی همادی مبتنی بر مدل WRF در منطقه غرب ایران مورد بررسی قرار گرفته است. این سامانه شامل ۱۵ عضو است که با اعمال پیش بینی در شرایط اولیه طراحی شده و به طور ویژه برای منطقه ای با ناهمواری پیچیده توسعه یافته است. در این مطالعه، خروجی متغیرهای مختلف هواشناسی از جمله دمای ۲ متری سطح زمین، بارش تجمعی ۲۴ ساعته و میدان باد در ارتفاع ۱۰ متری ارزیابی شده است. از جمله تفاوت های این پژوهش با مطالعات قبلی می توان به افزایش تعداد اعضای همادی و تمرکز بر منطقه ای با ویژگی ناهمواری های خاص اشاره کرد همچنین لازم به ذکر است عملکرد میانگین سامانه های همادی منطقه ای در مناطق غربی کشور در سایر پژوهش ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۱. نقشه ناهمواری و پراکندگی ایستگاه های سینوپتیک به کار گرفته شده در منطقه غرب ایران.

### ۲-۲ داده های مورد استفاده

متغیرهای مختلف هواشناسی از جمله دمای تراز ۲ متری، بارش و میدان باد در تراز ۱۰ متری به کار گرفته شد؛ لذا برای بررسی میانگین مدل همادی از داده های ایستگاهی

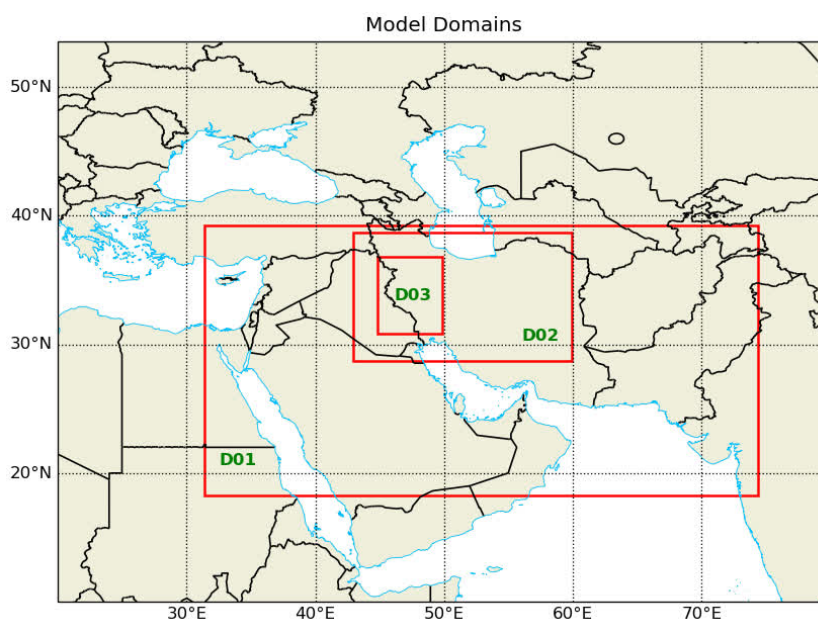
در کار حاضر سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش بینی با فواصل زمانی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته

۲۷ کیلومتر، ۹ کیلومتر و ۳ کیلومتر بوده است (شکل ۲) دامنه‌های اجرای مدل قابل مشاهده می‌باشند. همچنین برای تامین شرایط مرزی و اولیه از داده‌های GFS با تفکیک افقی ۰/۵ درجه استفاده شده است که قابل دریافت از سایت مرکز ملی پیش‌بینی آمریکا (NCEP) (یا وهمکاران، ۲۰۱۹) می‌باشد.

متعلق به ۵۳ ایستگاه همدیدی در استان‌های غربی کشور استفاده شده است.

### ۳-۲ پیکربندی مدل عددی WRF

نسخه استفاده شده مدل WRF در این پژوهش ۳/۹ می‌باشد که سامانه همادی بر پایه آن توسعه داده شده است. برای اجرای مدل از سه دامنه محاسباتی تو در تو با تفکیک افقی



شکل ۲. نقشه حوزه‌های محاسباتی به کار گرفته شده در سامانه همادی مدل WRF.

۲۰۲۲) که بارش‌های سنگین محسوب می‌شوند انتخاب شدند. زمان شروع اجرای مدل ۰۰ UTC بوده و با گام‌های زمانی ۹۰ ثانیه (برای بزرگ‌ترین حوزه محاسباتی) تا ۷۲ ساعت بعد اجرا شده است. در این مدل از نگاشت Lambert استفاده شده است. همچنین جهت اجرای همادی مدل با توجه به سخت افزارهای موجود و ایجاد حالت بهینه در اجرای مدل، از ترکیب طرحواره‌های خردفیزیک Lin، Thomson و WSM5 و لایه مرزی سیاره‌ای YSU و MYJ و ترکیبی از تابش‌های موج بلند و موج کوتاه و طرحواره‌های کومولوسی مختلف استفاده شده و پریشیدگی در شرایط اولیه به روش مونت کارلو لحاظ شده است. برای توسعه یک پیش‌بینی همادی باید اطمینان حاصل کرد که پریشیدگی ایجاد شده از تنوع قابل قبولی برخوردار باشد، به

سامانه به کار گرفته شده در کار حاضر مبتنی بر سامانه همادی توسعه داده شده توسط قادر و همکاران (۱۳۹۴) می‌باشد. این سامانه به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی، شبیه‌سازی و تحلیل شرایط جوی طراحی شده و در چندین پژوهش علمی دیگر از جمله قادر و همکاران (۱۳۹۵)، قادر و همکاران (۲۰۱۶)، قادر و همکاران (۱۳۹۷) و قادر و همکاران (۱۳۹۹) نیز به کار گرفته شده است که برای مطالعه بیشتر در مورد جزئیات سامانه می‌توان به این منابع رجوع کرد.

برای بررسی کارایی سامانه همادی ۴ تاریخ ۲۷ بهمن ۱۳۹۹ (۱۵ فوریه ۲۰۲۱)، ۲۴ آذر ۱۴۰۰ (۱۵ دسامبر ۲۰۲۱)، ۲۲ دی ۱۴۰۰ (۱۲ ژانویه ۲۰۲۲) و ۲ آذر ۱۴۰۱ (۲۳ نوامبر

در رابطه فوق  $r$  ضریب همبستگی پیرسون است،  $\alpha$  عبارتی است که متغیر بودن خطاهای پیش‌بینی را نشان می‌دهد و با نسبت انحراف معیار داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده  $\frac{\sigma_F}{\sigma_O}$  تعریف می‌شود و  $\beta$  نسبت میانگین داده‌های مشاهده شده به شبیه‌سازی شده است  $(\frac{H_F}{\mu_O})$ .

ب) اریبی (Bias): اریبی در پیش‌بینی وضعیت جو به خطاهای سیستماتیک اشاره دارد که زمانی رخ می‌دهد که شرایط جوی پیش‌بینی شده از شرایط واقعی مشاهده شده فاصله بگیرد. اریبی می‌تواند از منابع مختلفی ناشی شوند، از جمله محدودیت‌های مدل‌های پیش‌بینی عددی، کیفیت داده‌های مشاهداتی و عدم قطعیت‌های ذاتی در فرآیندهای جوی. (لو و همکاران، ۲۰۲۲) نحوه محاسبه اریبی به شرح زیر است.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i) \quad (2)$$

در رابطه فوق  $F$  و  $O$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و داده‌های ایستگاهی متغیر مورد نظر هستند. پ) جذر میانگین مربع خطا (RMSE): معیاری آماری است که برای ارزیابی دقت یک مدل با اندازه‌گیری ریشه دوم میانگین مجذور اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی استفاده می‌شود. RMSE به طور ویژه در ارزیابی خطاهای پیش‌بینی مفید است، به خطاهای بزرگ‌تر به دلیل جذر تفاوت‌ها وزن بیشتری می‌دهد، و معیاری برای همسویی پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های واقعی فراهم می‌کند. مقدار RMSE کمتر نشان‌دهنده تناسب بهتر مدل با داده‌ها است و مقادیر نزدیک‌تر به صفر نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی بالاتر است (چو، ۲۰۲۳).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

ت) خطای مطلق میانگین (MAE): این سنجه معیار ارزیابی پرکاربردی در زمینه‌های مختلف به‌ویژه در مدل‌سازی و پیش‌بینی است. MAE میانگین بزرگی خطاهای بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی را با

همین دلیل از روش مونت کارلو که مبتنی بر تابع چگالی احتمال خطای اولیه پیش‌بینی است استفاده می‌شود (پالمر و هگدورن، ۲۰۰۶). در این پژوهش، مطابق با پژوهش قادر و همکاران (۱۳۹۵)، اعضای همادی با استفاده از روش ترکیبی ایجاد پربشیدگی در شرایط اولیه و پارامترسازی‌های فیزیکی متفاوت ساخته شده‌اند. این سامانه همادی از ترکیب‌های مختلف پارامترسازی‌های فیزیکی برای ۳ فیزیک مختلف توسعه یافته است، به گونه‌ای که برای هر یک از این سه ترکیب، پنج پربشیدگی شامل دو پربشیدگی مثبت، دو پربشیدگی منفی و یک عضو کنترل استفاده شده است. با حاصلضرب این موارد، سامانه همادی مورد استفاده متشکل از ۱۵ عضو می‌شود.

## ۲-۴ سنجه‌های آماری استاندارد جهت ارزیابی

### نتایج

برای ارزیابی میانگین مدل همادی نیاز به استفاده از سنجه‌های آماری متداول است که این سنجه‌ها عبارت‌اند از اریبی (Bias)، سنجه KGE و جذر میانگین مربع خطا (RMSE). برای ارزیابی عملکرد مدل همادی در پیش‌بینی متغیر بارش از سنجه‌های درستی‌سنجی رخدادهای دسته‌ای بیشتر از دودسته نیز استفاده شده است. در این بخش به توضیح و معرفی روابط موارد مذکور می‌پردازیم.

الف) سنجه ضریب کارایی (Kling-Gupta (KGE): یک سنجه آماری ترکیبی است که عمدتاً در هیدرولوژی و مدل‌سازی‌های عددی برای ارزیابی کارایی مدل‌های پیش‌بینی استفاده می‌شود. این سنجه سه مؤلفه مهم را ادغام می‌کند: همبستگی، اریبی و تنوع که برای ارزیابی اینکه یک مدل چقدر داده‌های مشاهده شده را تکرار می‌کند ضروری است. (عبدالباری و همکاران، ۲۰۲۴) KGE از نظر ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (1)$$

سنجه فراوانی اریبی FBI: این سنجه نشان می‌دهد مدل WRF بیش تخمینی یا کم تخمینی رخداد گرایش دارد. اگر بزرگ‌تر از یک باشد، مدل، بیش بینی و اگر کمتر از یک باشد، مدل کم پیش بینی دارد.

نسبت هشدار خطا یا FAR: این سنجه که تنها تابعی از هشدارهای خطا و موفقیت است، نسبت هشدار اشتباه پیش بینی را نشان می‌دهد. با کم پیش بینی بهبود می‌یابد و دامنه‌ای بین صفر تا یک دارد. امتیاز عالی برای این سنجه صفر است.

مهارت (HSS (Heidke Skill Score): یک معیار آماری است که برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های طبقه بندی شده، به‌ویژه در هواشناسی و زمینه‌های مرتبط استفاده می‌شود. این سنجه یک مدل پیش‌بینی را با مقایسه پیش‌بینی‌های آن با نتایج مشاهده شده، با در نظر گرفتن احتمال وقوع پیش‌بینی‌های درست به طور تصادفی، ارائه می‌کند. در این سنجه امتیاز از ۰ تا ۱ متغیر است که در آن نمره ۱ نشان دهنده دقت کامل، صفر نشان دهنده عدم مهارت (معادل حدس زدن تصادفی) است و مقادیر منفی بدتر از پیش‌بینی‌های تصادفی است (هیورین، ۲۰۱۴).

محاسبه میانگین تفاوت مطلق بین آنها اندازه گیری می‌کند (چای و دراکسلر، ۲۰۱۴).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (۴)$$

در رابطه فوق F و O به ترتیب نمایش دهنده مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده در یک زمان و مکان مشخص و N تعداد کل مقادیر پیش بینی و مشاهده است.

ن) سنجه‌های رویدادهای بیشتر از دودسته: این دسته از سنجه‌ها برای درستی سنجی پیش‌بینی‌هایی تعریف می‌شوند که با دسته‌های مختلف سروکار دارند. در پیش بینی‌های دسته‌ای تنها یکی از مجموعه رویدادهای ممکن روی خواهد داد. برای محاسبه این سنجه‌ها، می‌توان از ترکیب حالت‌های مختلف بین مشاهدات و پیش بینی و سنجه‌های مختلفی را تعریف و بررسی کرد. در این پژوهش از ترکیب یک جدول ۴ در ۴ برای ارزیابی بارش استفاده شده است، مطابق با جدول شماره ۲.

از مهم‌ترین سنجه‌های دسته‌ای می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

احتمال آشکارسازی یا POD: این سنجه شبیه سازی درست بارش را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. دامنه این سنجه صفر تا یک و امتیاز کامل آن یک است.

جدول ۱. جدول توافقی ۴×۴ برای دسته‌های تعریف شده.

مشاهده بارش کمتر از ۱ میلی متر در روز	مشاهده بارش بین ۱ تا ۱۰ میلیمتر در روز	مشاهده بارش بین ۱۰ تا ۵۰ میلیمتر در روز	مشاهده بارش بیشتر از ۵۰ میلیمتر	
a	b	c	D	پیش‌بینی بارش کمتر از ۱ میلی متر در روز
e	f	g	H	پیش‌بینی بارش بین ۱ تا ۱۰ میلیمتر در روز
i	j	k	L	پیش‌بینی بارش بین ۱۰ تا ۵۰ میلیمتر در روز
M	N	O	P	پیش‌بینی بارش بیشتر از ۵۰ میلیمتر

### ۳ بحث و نتایج

در بررسی میانگین مدل همادی در کار حاضر تکیه اصلی بر میانگین همادی است، چرا که میانگین همادی یک مفهوم اساسی در پیش‌بینی وضعیت جو است و نشان‌دهنده

میانگین پیش‌بینی‌های متعدد تولید شده توسط یک سامانه پیش‌بینی همادی می‌باشد. این میانگین به‌عنوان یک پیش‌بینی قطعی عمل می‌کند و اطلاعات جمعی از تمامی اعضای همادی را در بر می‌گیرد که در نتیجه تخمینی

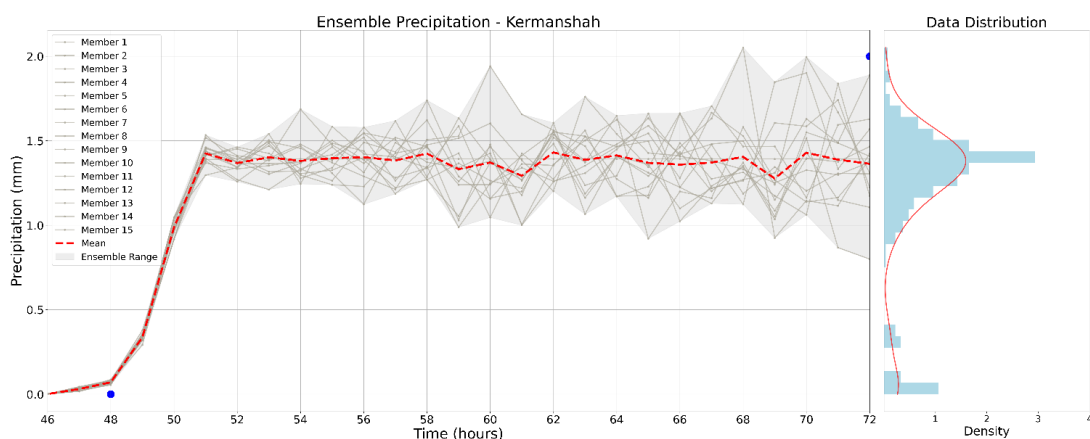
است، این داده‌ها به صورت دایره‌های توپر آبی به شکل اضافه شده‌اند. در ساعت ۴۸ پس از پیش‌بینی داده مشاهداتی گزارش شده (تجمعی ۲۴ ساعته) برابر با صفر بوده است و مقدار داده مشاهداتی ۲۴ ساعت بعد یعنی ساعت ۷۲ بعد از اجرای مدل برابر ۲ میلی‌متر بوده است که در نمودار به صورت دایره‌های آبی اضافه شده است.

علاوه بر نکات فوق مطابق شکل ۴ مربوط به حوزه سوم اجرای می‌باشد، مطابق این شکل همه اعضای همادی به صورت قابل قبولی هسته بارش را به درستی تشخیص داده‌اند و اختلاف اعضا اغلب در پیش‌بینی بارش‌های صفر تا یک میلی‌متر است، لذا در گام اول جهت پوشش نسبی همه اعضای همادی، میانگین همادی مورد بررسی قرار گرفت.

اساساً توسعه یک سامانه همادی فرایندی دقیق است و اجرای مدل WRF به صورت همادی نیاز به زمان مناسب دارد، عاملی که در پیش‌بینی‌های عملیاتی نقش محدودکننده دارد. یکی از مواردی که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد مهارت سامانه همادی از زمان شروع اجرا است؛ لذا متغیرهای دمای تراز ۲ متری، میدان باد در تراز ۱۰ متری و بارش تجمعی ۲۴ ساعته در حوزه سوم محاسباتی که تفکیک افقی بیشتری دارد مورد بررسی قرار گرفته است.

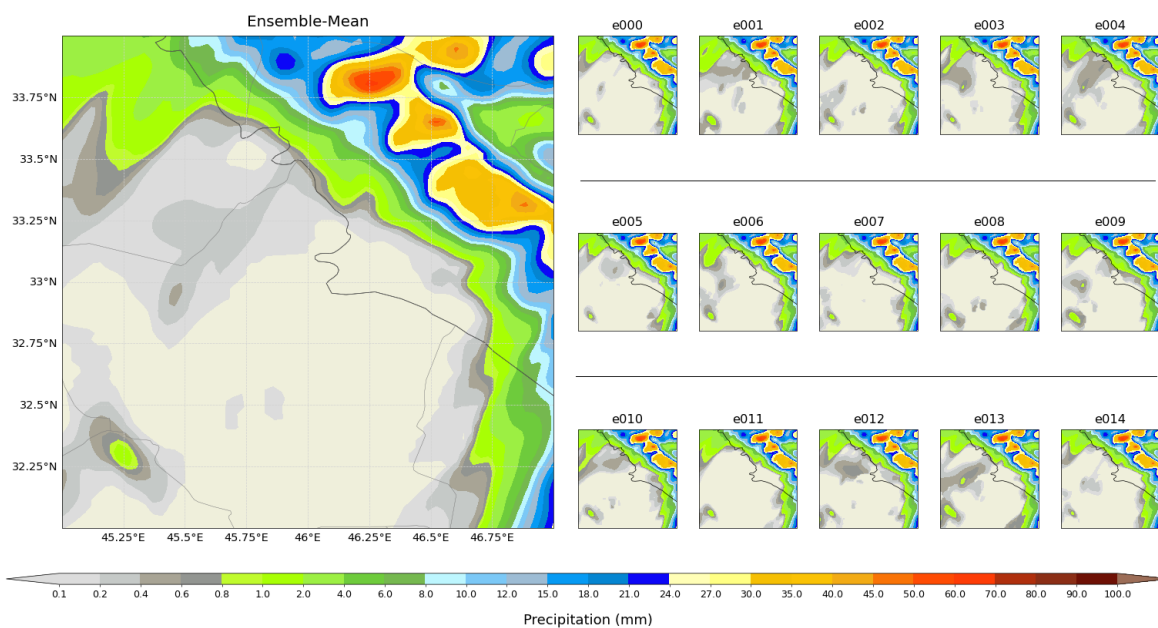
مطمئن‌تر از شرایط جوی مورد انتظار نسبت به هر پیش‌بینی قطعی ارائه می‌دهد. میانگین همادی به‌ویژه در کاهش اثرات خطاهای تصادفی موجود در پیش‌بینی‌های فردی مؤثر است و بدین ترتیب دقت کلی پیش‌بینی را افزایش می‌دهد (فتحی و همکاران، ۲۰۱۹؛ گالوس، ۲۰۱۰). همچنین در تمامی متغیرهای بررسی شده در این پژوهش احتمال وقوع مقدار پیش‌بینی حول میانگین بیشتر است، البته باید توجه داشت این تحلیل مختص پژوهش حاضر می‌باشد و نمی‌توان آن را به سایر موارد پژوهشی تعمیم داد. در شکل شماره ۳ نمودار پراکنش همادی جهت نمایش بارش تجمعی ساعتی طی ۷۲ ساعت از زمان

شروع اجرای مدل عددی رسم شده است. در این نمودار، محور قائم نشان‌دهنده مقدار بارش و محور افقی بیانگر زمان سپری شده از شروع اجرای مدل است. این نمودار بر بازه زمانی ۴۶ تا ۷۲ ساعت پس از آغاز اجرای مدل تمرکز دارد و مربوط به ایستگاه کرمانشاه و اجرای مدل در تاریخ ۲۷ بهمن ۱۳۹۹ می‌باشد. این شکل تمامی ۱۵ عضو، میانگین همادی و همچنین داده‌های مشاهداتی ایستگاهی را دربر گرفته و در نمودار سمت راست (چگالی احتمال) احتمال وقوع حول هر یک از اعضا نمایش می‌دهد. همچنین با توجه به این که داده‌های بارش اخذ شده از سازمان هواشناسی به صورت تجمعی ۲۴ ساعته بوده



شکل ۳. نمودار منتخب پراکنش اعضای همادی نسبت به میانگین متعلق به بارش در ایستگاه کرمانشاه. (زمان شروع اجرای مدل: ساعت ۰۰:۰۰ UTC -

۱۵ فوریه ۲۰۲۱ (۲۷ بهمن ۱۳۹۹)).



شکل ۴. نقشه بارش تجمعی ۲۴ ساعته در روز سوم پیش‌بینی اعضای همادی در مقایسه با میانگین همادی در حوزه سوم محاسباتی مربوط به اجرای مدل در تاریخ ۲۷ بهمن ۱۳۹۹.

پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعت، ۴۸ ساعت و ۷۲ ساعت مختلف در حوزه سوم محاسباتی ارائه شده است محاسبه و در جدول شماره ۲ آورده شده است.

### ۱-۳ نتایج سنج‌های آماری استاندارد

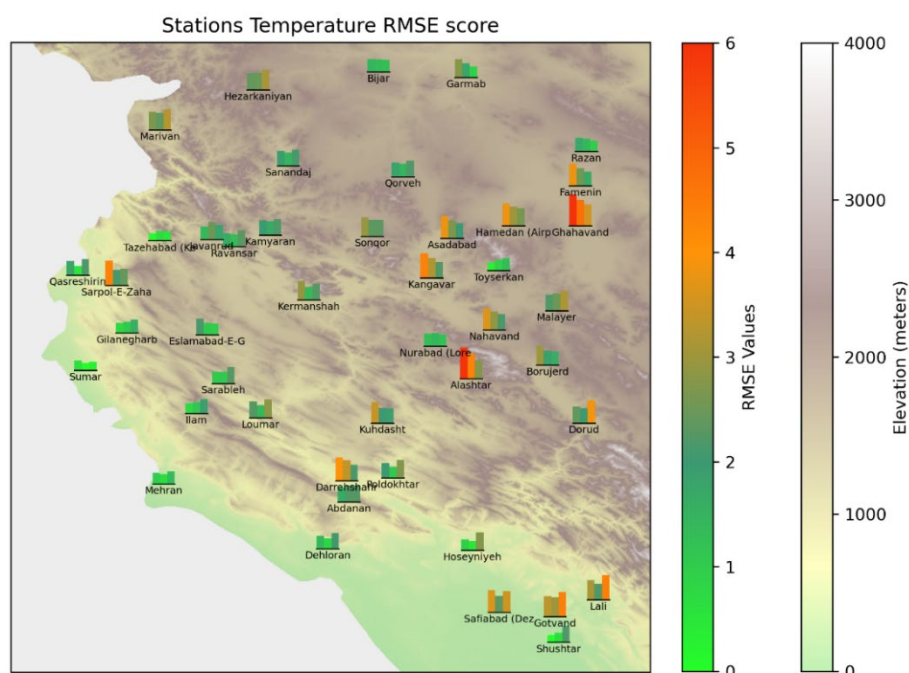
در این بخش نتایج درستی سنجی منتخب شامل RMSE، MAE، MBE، R<sup>2</sup>، KGE، برای کمیت‌های باد و دما در

جدول ۲. نتایج بررسی سنج‌های آماری برای متغیرهای دما و سرعت باد.

سرعت باد					دما					زمان پیش‌بینی
KGE	R <sup>2</sup>	MBE	MAE	RMSE	KGE	R <sup>2</sup>	MBE	MAE	RMSE	
0/294	0/201	0/271	1/165	1/589	0/834	0/841	-1/165	2/324	2/986	24
-0/0187	0/163	1/012	1/884	2/725	0/893	0/863	-0/228	1/976	2/55	48
-0/4433	0/029	2/318	3/250	4/429	0/845	0/805	0/558	2/145	2/75	72

RMSE صورت پذیرفته است. به علاوه به جهت فهم مناسب‌تر از منطقه، از نقشه ناهمواری نیز استفاده شده است. لازم به ذکر است که توانایی مدل در پیش‌بینی دما همان‌گونه که در جدول مشاهده شده مناسب است، آنچه در شکل مشاهده می‌شود دقت مدل با سنج معرفی شده طی زمان‌های پیش‌بینی است که با در نظر گرفتن صحت داده‌های گزارش شده در برخی ایستگاه‌ها در روز سوم عملکرد مدل بهتر و در مواردی ضعیف‌تر شده است که باتوجه به دور شدن از شرایط اولیه اتفاقی محتمل است.

کمیت دما از نظر پیش‌بینی‌پذیری نسبت به دو کمیت باد و بارش در وضعیت بهتری قرار دارد این موضوع تا حد زیادی به دلیل ماهیت نسبتاً پایدار و تدریجی تغییرات دما در مقایسه با متغیرهای پویاتر مانند باد و بارش است. در شکل ۵ سنج RMSE در سه بازه زمانی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در منطقه مورد مطالعه برای کمیت دمای تراز ۲ متری میانگین مدل همادی، در تمامی ایستگاه‌ها و تاریخ‌های اجرایی، به طور تجمیعی با استفاده از نمودار ستونی نشان داده شده است. هر یک از نمودارها مربوط به یک زمان پیش‌بینی است و تغییرات رنگ نمودارها بر اساس تغییرات

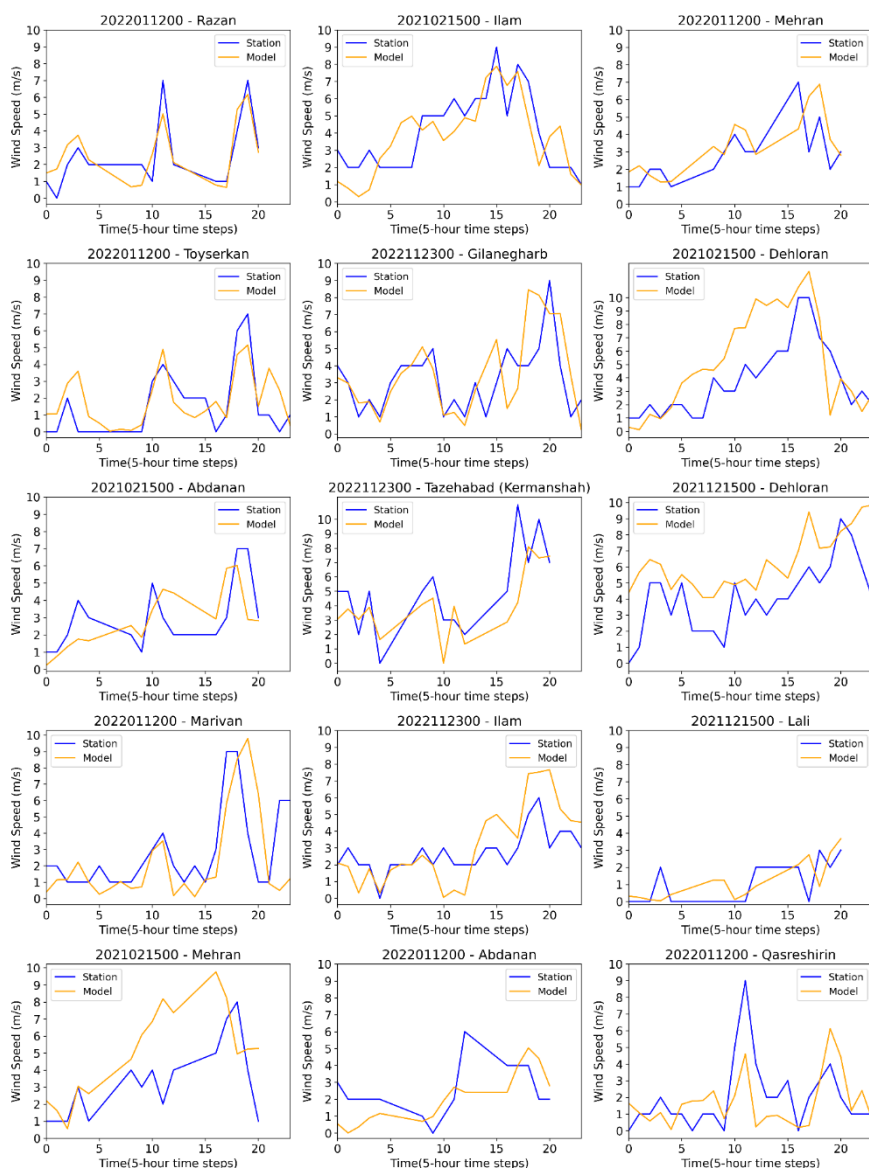


شکل ۵. نقشه و نمودار میله‌ای تغییرات سنجه RMSE در پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته کمیت دمای ۲ متری میانگین مدل همادی، ستون اول از سمت چپ مربوط به پیش‌بینی ۲۴ ساعته، ستون وسط نشان دهنده پیش‌بینی ۴۸ ساعته و ستون آخر از سمت چپ نشان دهنده پیش‌بینی ۷۲ ساعته می‌باشد.

برای بررسی داده‌های خروجی سرعت باد در چهار تاریخ مشخص و پیش‌بینی سه‌روزه، می‌توان به شکل ۷ که ارزیابی مدل را نسبت به داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد، توجه کرد. این شکل نمایش دهنده مقادیر ارزیابی در ۳ روز متوالی پیش‌بینی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با پیشرفت زمان اجرای مدل همادی مقدار خطای RMSE بیشتر می‌شود. این مقدار در برخی ایستگاه‌ها بیشتر از سایر ایستگاه‌ها بوده که نشان از شرایط سخت مدل برای پیش‌بینی میدان باد در آن ایستگاه دارد.

شکل ۸ که نمایی از عملکرد مدل در محدوده مورد مطالعه را با در نظر گرفتن سنجه RMSE نشان می‌دهد، به‌نوعی پهنه‌بندی سنجه مورد نظر در حوزه سوم به حساب می‌آید. این شکل به‌وضوح توزیع خطاها را در مناطق مختلف ترسیم کرده و نشان می‌دهد که چگونه عملکرد مدل تحت تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی قرار دارد. با عنایت به شکل برخی نقاط در شمال و شمال شرق (مناطق مسطح‌تر و احتمالاً تحت تأثیر جریانات هوایی متغیرتر) در پیش‌بینی ۷۲ ساعته میدان باد، افزایش خطای RMSE را

از جمله کمیت‌هایی که تغییرات ناهمواری تأثیر بسزایی در پیش‌بینی آن دارد سرعت باد است. طبیعی است که مدل‌های با تفکیک افقی پایین نمی‌توانند تأثیر ارتفاعات بر سرعت باد را به‌درستی نمایش دهند چرا که ممکن است شتاب باد بر روی قله‌ها یا کاهش سرعت در دره‌ها را ثبت نکنند. در کار حاضر با توجه به تعریف دامنه محاسباتی تا ۳ کیلومتر تلاش شده است تا دقت مدل در پیش‌بینی باد بیشتر شود. جهت بررسی توانایی مدل همادی در پیش‌بینی میدان باد ۷۲ ساعته، در شکل شماره ۶ داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل همادی در ۲۴ ساعت سوم در کنار داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های منتخب نمایش داده شده است. در این نمودار محور قائم اندازه سرعت باد و محور افقی زمان با گام زمانی ۵ ساعت می‌باشد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، داده‌های خروجی سرعت باد در تاریخ‌ها و ایستگاه‌های منتخب در مقایسه با داده‌های ایستگاهی رفتار نزدیکی داشته‌اند و مدل در شناسایی الگو و همچنین در آستانه‌های سرعت باد توانایی خوبی از خود نشان داده است.



شکل ۶. مجموعه نمودارهای مقایسه سرعت باد در ۲۴ ساعت سوم با گام‌های زمانی ۲ ساعته میانگین مدل همادی نسبت به داده‌های مشاهداتی در تاریخ‌ها و ایستگاه‌های منتخب.

در این کتاب آستانه‌های مناسب برای بررسی بارش تجمعی ۲۴ ساعته یک میلی‌متر، ۱۰ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر معرفی شده است؛ لذا در محاسبات مربوط به سنج‌های دسته‌ای از این آستانه‌ها استفاده شده است.

در شکل ۹، چهار مورد از سنج‌های آماری برای ارزیابی رویدادهای بارش در دودسته مختلف ارائه شده است. پیکان‌های موجود در کنار نمودارها نشان‌دهنده وضعیت مطلوب در هر نمودار هستند. به طور خاص،

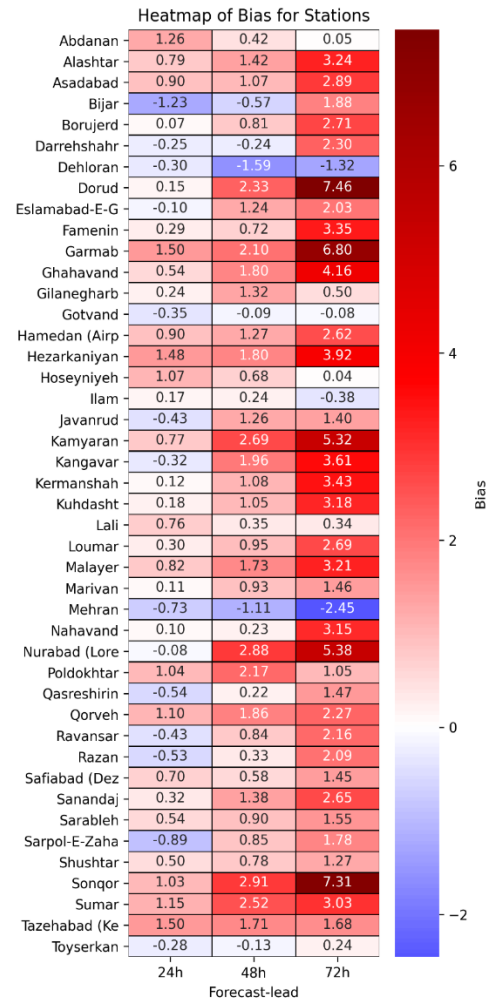
نشان می‌دهند، که ممکن است ناشی از تأثیرات جغرافیایی یا خطای مدل در پیش‌بینی تغییرات سریع باشد.

با توجه به اینکه بارش در تاریخ‌های منتخب در روز سوم رخ داده است در این بخش تنها به بررسی بارش تجمعی ۲۴ ساعته از میانگین مدل همادی در روز سوم، می‌پردازیم. آستانه‌های موردنظر برای بررسی خروجی‌های بارش برگرفته از کتابچه راهنمای سیستم پردازش و پیش‌بینی جهانی داده‌ها سازمان جهانی هواشناسی (WMO) می‌باشد.

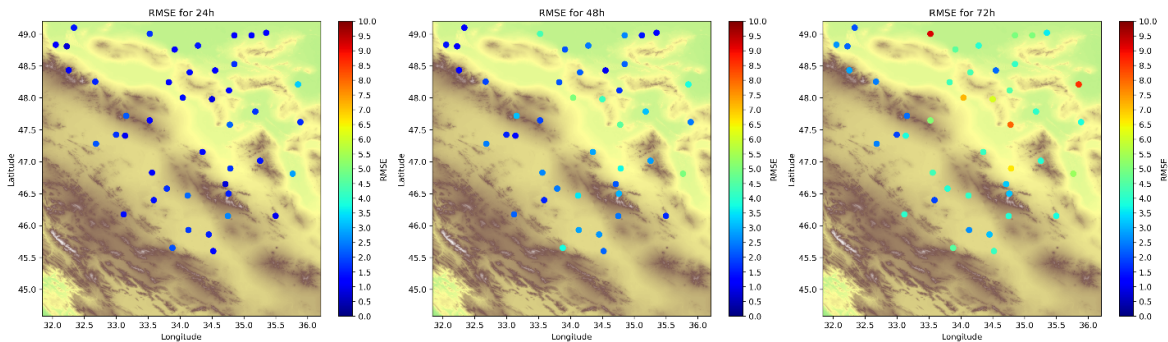
هشدار غلط را نشان می‌دهد. اما در عوض، طبق سنجه HSS، مهارت مدل برای پیش‌بینی بارش‌ها در این بازه زمانی نسبت به دیگر بازه‌ها بیشتر بوده است. این نکته حائز اهمیت است که دقت پیش‌بینی‌ها بر اساس تعداد پیش‌بینی‌های صحیح واقعی که ناشی از مهارت پیش‌بینی‌کننده است، نه صرفاً پیش‌بینی تصادفی، قابل ارزیابی است. از سوی دیگر، بررسی سنجه POD نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی با دقت بالا قادر به شناسایی بارش‌های واقعی در تمامی آستانه‌ها بوده است. در همین راستا، طبق سنجه FBI، به جز در بازه‌ای که بارش‌ها بیشتر از ۵۰ میلی‌متر بوده‌اند و مدل عملکرد مطلوبی داشته است، در سایر موارد شاهد اندکی بیش پیش‌بینی توسط مدل بوده‌ایم. این موضوع می‌تواند با توجه به وقوع بارش‌های

حدی در چهار تاریخ موردنظر دور از انتظار نبوده باشد. در شکل ۱۰، یک مقایسه دقیق و جامع از داده‌های ایستگاهی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در روز سوم با میانگین مدل همادی در چهار تاریخ مختلف به تصویر کشیده شده است. این شکل به وضوح عملکرد مدل را در شناسایی هسته‌های بارشی نشان می‌دهد و به ما این امکان را می‌دهد که دقت پیش‌بینی‌های مدل را مورد بررسی قرار دهیم. نمودار به گونه‌ای طراحی شده است که دایره‌ها مقادیر مشاهده‌ای بارش تجمعی ۲۴ ساعته در ایستگاه‌ها و بخش سایه دار نشان دهنده مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشند. این انتخاب رنگ، توجه خواننده را به تطابق و

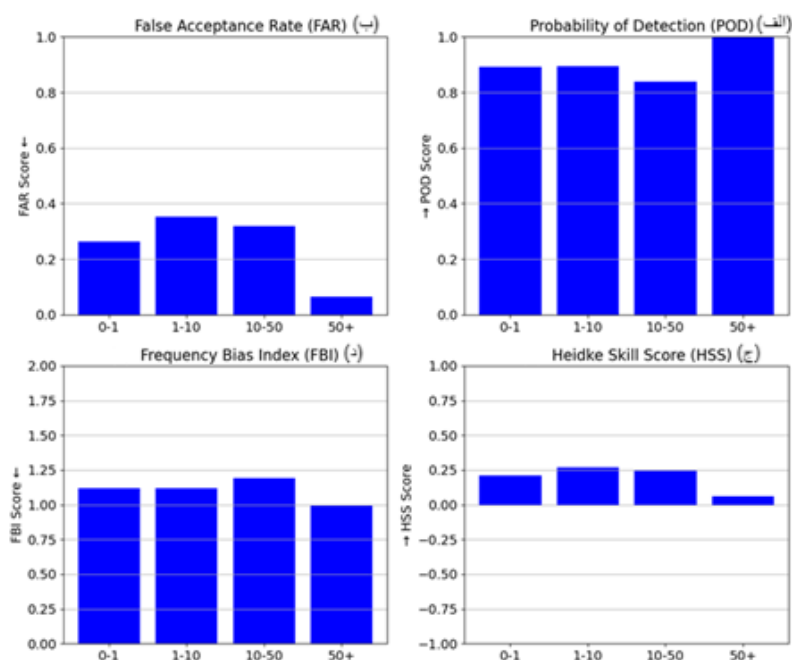
پیکان‌های رو به بالا بیانگر این موضوع است که با افزایش مقدار سنجه موردنظر، دقت پیش‌بینی نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. با توجه به نتایج بررسی سنجه FAR، مشخص شده است که مدل در بارش‌های بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بیشترین



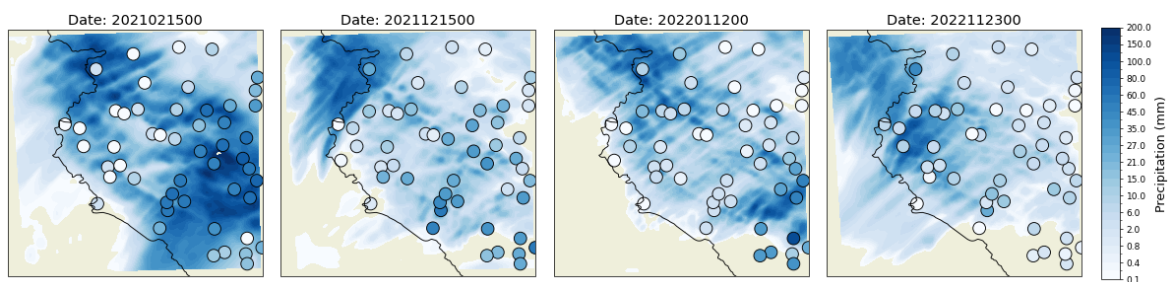
شکل ۷. نمودار تغییرات اریبی (Bias) مدل همادی در سرعت باد در ایستگاه‌های مختلف و در پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته.



شکل ۸. نقشه تغییرات سنجه RMSE سرعت باد در منطقه مورد مطالعه. به ترتیب از سمت چپ ۲۴ ساعته، ۴۸ ساعته و ۷۲ ساعته.



شکل ۹. مجموعه نمودارهای سنجه‌های رویدادهای بیشتر از دودسته، نمودار (الف) متعلق به سنجه POD، نمودار (ب) متعلق به سنجه FAR، نمودار (ج) متعلق به سنجه FBI و نمودار (د) متعلق به سنجه HSS.



شکل ۱۰. نقشه مقایسه داده‌های بارش میانگین مدل همادی در مقایسه با داده‌های ایستگاهی.

مورد بررسی عمدتاً در محدوده میانگین متغیرهای پیش‌بینی شده قرار دارند؛ بنابراین، برای سنجش دقیق‌تر کارایی مدل، از میانگین همادی متغیرها استفاده شد. بدیهی است که تعمیم این موضوع به رویدادهای بیشتر نیازمند کار آماری بیشتر است. با توجه به ناهمواری متنوع و وجود کوه‌های زاگرس در این منطقه، تأثیرات قابل توجهی بر پیش‌بینی وضعیت جوی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل همادی توسعه‌یافته در مقایسه با داده‌های ایستگاهی عملکرد قابل قبولی دارد. برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها، از سنجه‌های آماری مختلفی مانند خطای مطلق میانگین (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)

همخوانی داده‌ها جلب می‌کند. به‌ویژه، تطابق رنگ دایره‌ها با رنگ نقشه نشان‌دهنده نزدیکی و دقت داده‌های مدل نسبت به داده‌های ایستگاهی در منطقه مورد نظر است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد یک سامانه همادی توسعه‌یافته برای مدل WRF در منطقه غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. این سامانه شامل ۱۴ عضو اصلی و یک عضو میانگین همادی است که باهدف پیش‌بینی میدان باد در تراز ۱۰ متری، دمای تراز ۲ متری سطح زمین و بارش تجمعی ۲۴ ساعته در تاریخ‌های منتخب طراحی شده است. نتایج ارزیابی‌های اولیه در کار حاضر نشان داد که رویدادهای

قادر، سرمد، یازجی، دانیال، سلطان پور، محسن، نعمتی، محمد حسین "به کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس"، هیدروفیزیک، ۱، ۱، ۱۳۹۴، ۵۴-۴۱.

قادر، سرمد، یازجی، دانیال، شهبازی، حسین، پیش‌بینی میدان باد و سایر میدان‌های هواشناسی در محدوده شهر تهران با استفاده از یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل جهت استفاده در مدل‌های آلودگی هوا، چهارمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، تهران، 22 تا 23 دی ماه 1394.

قادر، سرمد، یازجی، دانیال، سلطان‌پور، محسن و نعمتی، محمدحسین، به کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس، مجله هیدروفیزیک، جلد 1 شماره، صفحات 41 تا 54، 1395.

قادر، سرمد، صفر، محمود و جوان‌نژاد، رضا، ارزیابی عملکرد اعضای یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل، نوزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، 14 و 15 آبان 1399.

قادر، سرمد، صفر، محمود، جوان‌نژاد، رضا، پیش‌بینی برخی میدان‌های هواشناسی با استفاده از یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل: مطالعه موردی اولین کنفرانس بین‌المللی پیش‌بینی عددی وضع هوا و اقلیم، تهران، 28 تا 29 آبان 1397.

مائده فتحی، مجید آزادی، غلامعلی کمالی، امیرحسین مشکاتی. "استفاده از سامانه همادی با چند مدل برای پیش‌بینی بارش روی ایران"، نیوار، ۴۳، ۱۰۶-۱۰۷، ۱۳۹۸، ۷۸-۷۲.

Bari, M. (2024). Performance evaluation of a national seven-day ensemble streamflow forecast service for australia. *Water*, 16(10) 1438 .

Chai, T. and Draxler, R. (2014). Root mean square

استفاده شده است. به‌عنوان مثال، برای پیش‌بینی ۷۲ ساعته مؤلفه‌های باد، RMSE برابر با ۲/۳۱ متر بر ثانیه و برای دما ۲/۷۵ درجه سلسیوس به دست آمد. مدل همچنین در پیش‌بینی بارش‌ها با استفاده از چهار سنجه آماری ارزیابی شده و نشان‌دهنده مهارت بالای مدل نسبت به پیش‌بینی‌های تصادفی است. با این حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد؛ به‌ویژه در بارش‌های ۱ تا ۱۰ میلی‌متر که بیشترین هشدارهای غلط ثبت شده است. در عوض، مدل توانایی خوبی در شناسایی بارش‌های واقعی دارد و در بارش‌های بالای ۵۰ میلی‌متر عملکرد مطلوبی داشته است. به‌طورکلی، این تحقیق بر اهمیت و کارایی روش همادی در بهبود پیش‌بینی‌های جوی تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که علی‌رغم چالش‌های موجود، این سامانه می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی وضعیت جوی در مناطق کوهستانی مورد استفاده قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

نگارنده اول بر خود لازم می‌داند که مراتب قدردانی خود را از همکاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران جهت امکان استفاده از فرصت مطالعاتی به جا آورد، همچنین از سازمان هواشناسی کشور بابت همکاری در ارائه داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی نیز تشکر می‌نماید.

### منابع

اشرفی، خسرو، قادر، سرمد و صداقت کردار، عبدالله، "اعمال روش پیش‌بینی همادی breeding به مدل تحقیقاتی-عملیاتی WRF." هشتمین همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران.

رضازاده، مریم، مرادیان، فاطمه، قادر، سرمد، (۱۳۹۸). بررسی عملکرد سامانه همادی چندفیزیکی مدل میان‌مقیاس WRF جهت شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۴(۱)، ۱۳-۳۸.

- 128 (۵).
- Gallus, W. A. (2010). Application of object-based verification techniques to ensemble precipitation forecasts. *Weather and Forecasting*, 25(1), 144-158.
- Ghader S., Yazgi, D., Soltanpour M., Nemati M.H., "On the use of an ensemble forecasting system for prediction of surface wind over the Persian Gulf" in proceedings of the 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2016), Tehran, Iran, 31 Oct. 2 Nov. 2016.
- Gneiting, T., Raftery, A., Westveld, A., and Goldman, T. (2005). Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum crps estimation. *Monthly Weather Review*, 133(5).
- Grönquist, P., Yao, C., Ben-Nun, T., Dryden, N., Dueben, P., Li, S., and Hoefler, T. (2021). Deep learning for post-processing ensemble weather forecasts. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 379(2194), 20200092 .
- Gustineli, M. (2022). A survey on recently proposed activation functions for deep learning.
- Hines, K. and Bromwich, D. (2008). Development and testing of polar weather research and forecasting (wrf) model. part i: greenland ice sheet meteorology\*. *Monthly Weather Review*, 136(6), 1971-1989 .
- Hyvärinen, O. (2014). A probabilistic derivation of heidke skill score. *Weather and Forecasting*, 29(1), 177-181 .
- Jha, D., et al. (2019). NOMAD: A distributed web-based platform for managing materials science research data. *\*Journal of Physics: Materials\**, 2, 036001 .
- Kirkwood, C., Economou, T., Odbert, H., and Pugeault, N. (2021). A framework for probabilistic weather forecast post-processing across models and lead times using machine learning. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 379(2194), 20200099 .
- Kramer, M., Heinzeller, D., Hartmann, H., Berg, W., & Steeneveld, G. (2018). Assessment of mpas variable resolution simulations in the grey-zone of convection against wrf model results and observations. *Climate Dynamics*, 55(1-2), 253-276 .
- Lee, M. and Chen, Y. (2021), Precipitation error (rmse) or mean absolute error (mae)? – arguments against avoiding rmse in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250 .
- Chang, C., Yang, S., and Keppenne, C. (2014). Applications of the mean recentering scheme to improve typhoon track prediction: a case study of typhoon nanmadol (2011). *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 92(6), 559-584.
- Chen, J., Li, X., Xu, C., Zhang, X., Xiong, L., & Guo, Q. (2022). Postprocessing ensemble weather forecasts for introducing multisite and multivariable correlations using rank shuffle and copula theory. *Monthly Weather Review*, 150(3), 551-565.
- Cho, J. (2023). Innovative imaging and analysis techniques for quantifying spalling repair materials in concrete pavements. *Sustainability*, 16(1), 112 .
- Deng, J., Deng, Y., & Cheong, K. (2021). Combining conflicting evidence based on pearson correlation coefficient and weighted graph. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(12), 7443-7460 .
- Deng, L. (2014). A tutorial survey of architectures, algorithms, and applications for deep learning. *Apsipa Transactions on Signal and Information Processing*, 3 (1).
- Diallo, M. (2024), Wind speed ramp rate predictions using wind farm scada data assimilation and a wrf ensemble. *Journal of Physics Conference Series*, 2745(1), 012015 .
- Fathi, M., Azadi, M., Kamali, G., and Meshkatee, A. H. (2019). Improving precipitation forecasts over iran using a weighted average ensemble technique. *Journal of Earth System Science*, modeling for extreme weather based on sparse hybrid machine learning and markov chain random field in a multi-scale subspace. *Water*, 13(9), 1241 .
- Li, L. (2024). Generative emulation of weather forecast ensembles with diffusion models. *Science Advances*, 10(15).
- Lovejoy, S., Schertzer, D., Allaire, V., Bourgeois, T., King, S., Pinel, J., and Stolle, J. (2009). Atmospheric complexity or scale by scale simplicity?. *Geophysical Research Letters*, 36(1).
- Luo, Y., Xu, X., Liu, Y., Chao, H., Chu, H., Chen, L., ... & Wang, J. (2022). Robust precipitation bias correction through an ordinal distribution

- autoencoder. *Ieee Intelligent Systems*, 37(1), 60-70 .
- Lynch, P. (2008). The origins of computer weather prediction and climate modeling. *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3431-3444 .
- Lynch, P. (2016). An artist's impression of richardson's fantastic forecast factory. *Weather*, 71(1), 14-18 .
- Miyoshi, T. and Kunii, M. (2011). The local ensemble transform kalman filter with the weather research and forecasting model: experiments with real observations. *Pure and Applied Geophysics*, 169(3), 321-333 .
- Morley, S. (2020). Challenges and opportunities in magnetospheric space weather prediction. *Space Weather*, 18(3).
- Palmer, T., and Hagedorn, R. (Eds.). (2006). *Predictability of weather and climate*. Cambridge University Press.
- Rasp, S., and Lerch, S., (2018). Neural networks for postprocessing ensemble weather forecasts. *Monthly Weather Review*, 146(11), 3885-3900 .
- Sengoz, C., Ramanna, S., Kehler, S., Goomer, R., and Pries, P., (2023), Machine learning approaches to improve north american precipitation forecasts. *IEEE Access*, 11, 97664-97681.  
<https://doi.org/10.1109/access.2023.3309054>
- Stolaki, S., Pytharoulis, I., and Karacostas, T. (2011). A study of fog characteristics using a coupled wrf-cobel model over thessaloniki airport, greece. *Pure and Applied Geophysics*, 169(5-6), 961-981 .
- World Meteorological Organization. (2018). *Manual on the Global Data-processing and Forecasting System*. World Meteorological Organization.

## Assessment of the performance of the ensemble mean of an ensemble forecasting system developed for the WRF model for weather prediction: A case study over the west part of Iran

Seyed Mahmoud Khansari <sup>1</sup>, Seyed Hossein Sanaei Nejad <sup>2\*</sup>, Amin Alizadeh <sup>2</sup>, Azar Zarrin <sup>3</sup> and Sarmad Ghader <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>4</sup> Professor, Department of Physics Space, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 23 December 2024, Accepted: 11 March 2025)

### Summary

The use of meteorological models is one of the most suitable methods for forecasting atmospheric conditions. However, due to the complex nature of the atmosphere, these models sometimes struggle to provide accurate predictions. Innovative methods are being developed to enhance forecasting accuracy, among which the ensemble forecasting method is notable. This study presents results from the development of an ensemble forecasting system for the WRF model aimed at predicting 10-meter wind fields, air temperature, and 24-hour cumulative precipitation in western Iran. To develop the ensemble model, members of the ensemble system were created by combining three selected configurations and introducing perturbations in the model's initial conditions using a Monte Carlo method. Additionally, in the WRF model simulations for each ensemble member, three nested domains with horizontal resolutions of 27, 9, and 3 kilometers were utilized. The results were analyzed using statistical metrics such as Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Kling-Gupta Efficiency (KGE) in comparison with observational data from existing stations in the region. For 72-hour predictions of wind components at a height of 10 meters above ground level, the RMSE was found to be 2.31 meters per second, while for 2-meter air temperature, it was 2.75 degrees Celsius. These results indicate that the ensemble mean is effective for predicting these variables given the region's topographical conditions. The model's performance in predicting precipitation was evaluated using four statistical metrics for events exceeding two categories. The False Alarm Ratio (FAR) indicated that there were many false alarms for precipitation amounts between 1 and 10 millimeters, while the Heidke Skill Score (HSS) demonstrated high skill relative to random forecasts in this range. Furthermore, the model showed good capability in identifying actual precipitation events and performed well for rainfall amounts exceeding 50 millimeters; however, slight over-predictions were noted in other cases. The model faced its greatest challenges in predicting variables within the mountainous areas of the region during forecast days.

**Keywords:** Numerical weather prediction, ensemble system, WRF model, perturbation

---

\*Corresponding author:

sanaei@um.ac.ir