تأثیر تفکیک افقی بر دقت پیش‌بینی بارش با استفاده از مدل WRF منطقه موردمطالعه: حوضه‌های آبریز کرخه و کارون

مهناز کریم‌خانی[1*]
تورج جمشیدی خزلی[2]
مجید آزادی[3]
ابراهیم فتاحی[4]

۱. دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه هواشناسی، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکتری هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران
۳. دانشیارگروه هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

*** مسئول مکاتبات:**
Mahnaz_karimkhany@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۱۴
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۴
کد مقاله : ۱۳۹۶۰۴۰۵۴۴
این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی است.

چکیده

باوجود پیشرفت قابل‌توجه مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا، هنوز پیش‌بینی دقیق بارش چالش‌برانگیز است. با توجه به اهمیت دقت پیش‌بینی بارش در هیدرولوژی و پیش‌بینی سیلاب، در این تحقیق جهت نشان دادن اثر تفکیک افقی بر روی دقت بارش مدل WRF، پیش‌بینی بارش مدل برای سه حوضه با تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر در پنج مورد بارش سنگین منجر به سیلاب (بیشتر از ۵۰ میلی‌متر در ۲۴ ساعت) در حوضه‌های آبریز کرخه و کارون مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا شرایط حاکم بر جو در هنگام رخداد بارش‌های سنگین در منطقه موردمطالعه ازنظر همدیدی با داده‌های ECMWF با تفکیک افقی ۰/۷۵ درجه بررسی شد. در ادامه جهت بررسی کیفیت برونداد مدل ازنظر همدیدی، رودباد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت نسبی و شار رطوبت افقی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برای سه حوضه مدل با تفکیک افقی متفاوت ترسیم و با نقشه‌های متناظر آن‌ها با داده‌های بازتحلیل مقایسه شدند. سپس برونداد بارندگی تجمعی مدل WRF با مقادیر دیدبانی تجمعی ۲۴ ساعته در ۲۲ ایستگاه همدید در حوضه آبریز کارون و ۲۰ ایستگاه همدید در حوضه آبریز کرخه مقایسه شد. برای راستی‌آزمایی برونداد مدل WRF از شاخص آماری ضریب همبستگی استفاده‌شده است. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر، میانگین و بیشینه بارش تجمعی ۲۴ ساعته دیدبانی و پیش‌بینی در سه حوضه مدل و درصد خطای هر یک از حوضه‌ها تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که در بررسی همدیدی در هنگام رخداد بارش‌های سنگین، پیش‌بینی مدل در هر سه حوضه و تفکیک‌های افقی مختلف (برای نمونه ازنظر جهت حرکت بردارهای باد، بیشینه، گستردگی مرکز و انحنا در رودباد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال و همچنین میزان رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال) با واقعیت تطابق کامل دارد. همچنین در مقایسه بارش دیدبانی و پیش‌بینی، دامنه ۴ کیلومتری با ضریب همبستگی بالاتر، دقت بیشتری دارد. درمجموع پیش‌بینی بارش مدل WRF برای حوضه با تفکیک افقی ۴ کیلومتر از نظر افزایش دقت در پیش‌بینی بارش و سیلاب قابل‌قبول می‌باشد به‌طوری‌که پیش‌بینی مدل در حوضه سوم با تفکیک افقی ۴ کیلومتر در مقایسه با حوضه دوم با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر ازنظر میانگین بارش حوضه‌های آبریز ۷ درصد و ازنظر مقدار بیشینه بارش ۵ درصد بهبود داشته است و همچنین درصد بهبود حوضه سوم مدل نسبت به حوضه اول مدل با تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر برای میانگین و بیشینه بارش حوضه‌های آبریز، به ترتیب درصد و ۲۲ درصد می‌باشد.

واژگان کلیدی: مدل WRF، تفکیک افقی، ضریب همبستگی، میانگین بارش، بیشینه بارش.

مقدمه

طبیعت در طول تاریخ، چهره خشن خود را با پدیده‌هایی چون سیل به انسان‌ها نشان داده است. انسان تا چند دهه پیش به هنگام مواجهه با بلایای طبیعی به‌شدت ناتوان بود و از گذشته‌های دور به این می‌اندیشید که به‌طور مسالمت‌آمیزی در کنار آن به زندگی ادامه دهد، ولی متأسفانه

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

وقوع چنین بلایای طبیعی،کاملاً ناگهانی بوده و بسیاری از انسان‌های بی‌گناه را به کام مرگ می‌کشاند. بسیاری از فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی انسان‌ها به شرایط جوی و اقلیمی بستگی دارد. حوضه‌های آبریز کرخه و کارون ازجمله مناطقی هستند که به دلیل وقوع بارش‌های سنگین منجر به سیلاب، متحمل خسارات فراوانی می‌شوند. بنابراین پیش‌بینی این بارش‌ها در جهت کاهش خسارات در این مناطق از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از قدیمی‌ترین و چالش‌برانگیزترین مسائل در پیش‌بینی وضع هوا، پیش‌بینی کمّی بارش است. پیش‌بینی بارش برای کاربردهای هیدرولوژیکی و پیش‌بینی سیلاب‌ها دارای اهمیت زیادی می‌باشد. امروزه پیش‌بینی وضع هوا محدوده وسیعی از زندگی روزمره را تحت تأثیر خود قرار داده است. برای نمونه می‌توان به پیش‌بینی وضع هوا در زندگی عادی، مسائل اقتصادی، ورزشی، پزشکی و نظایر آن اشاره کرد. صحت و دقت پیش‌بینی‌ها ازجمله مسائل پراهمیت و عمده می‌باشد، برای این منظور با استفاده از روش‌های آماری و امتیازهای مهارتی به راستی‌آزمایی پیش‌بینی‌ها پرداخته می‌شود. راستی‌آزمایی پیش‌بینی وضع هوا از دیرباز (۱۸۸۴) مورداستفاده قرارگرفته (Muller, 1994) و در امور بین‌المللی نیز ضروری به نظر می‌رسد. سازمان هواشناسی جهانی (WMO) یک گزارش فنی که بررسی جامعی از روش‌های راستی‌آزمایی پیش‌بینی مورداستفاده در دهه ۱۹۸۰ را در بردارد، منتشر کرده است (Stanski *et al*., 1989). منظور از فرآیند راستی‌آزمایی همان ارزیابی کیفیت پیش‌بینی‌های هواشناسی است که در آن نتایج فرآیند پیش‌بینی با دیدبانی متناظر مقایسه می‌شود. در راستی‌آزمایی هر پیش‌بینی یک ارزیابی عینی از کیفیت پیش‌بینی به شیوه‌های متفاوت صورت می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین اهداف راستی‌آزمایی آن است که نتایج آن باید حاوی اطلاعات مفیدی باشد تا بتواند راهکارهای جدیدی برای پیش‌بینی بهتر به دست آورد. تحلیل آماری راستی‌آزمایی و یا سایر اجزای آن می‌تواند در ارزیابی نقاط قوت و ضعف پیش‌بین و یا امر پیش‌بینی کمک کند. همان‌طور که برای پیش‌بینی روش‌های متفاوتی وجود دارد، راستی‌آزمایی نیز به روش‌های متفاوتی صورت می‌گیرد.

تفکیک افقی در مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا برای پیش‌بینی بارش از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در نقاط مختلف دنیا مطالعات گسترده‌ای جهت بررسی تأثیر تفکیک افقی در دقت پیش‌بینی بارش انجام‌شده است. این بررسی‌ها نشان دادند که افزایش تفکیک افقی می‌تواند توانایی مدل را برای پیش‌بینی بارش ارتقاء بخشد (Katzfey, 1995؛ Martin, 1996؛ McQueen *et al*., 1995؛ Doyle, 1997؛ Colle *et al*., 1999؛ Davis and Carr, 2000؛ Petch *et al*., 2002؛ Adlerman and Droegemeier, 2002؛ Bryan *et al*., 2003؛ Xue and Martin, 2006). از دلایل اصلی افزایش دقت پیش‌بینی با افزایش تفکیک افقی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- خطای روش‌های عددی ناشی از گسسته‌سازی معادله‌های دیفرانسیلی کاهش می‌یابد.

۲- ناهمواری و کاربری اراضی در مدل بهتر تفکیک‌شده بنابراین پدیده‌هایی که ناشی از اثرات ناهمواری هستند، بهتر تعیین می‌شود.

۳- با کاهش فاصله شبکه‌ای، تعداد پدیده‌های کوچک‌مقیاس بیشتری در مدل تفکیک می‌شوند (Warner, 2011)

آزادی و همکاران (۱۳۸۲) برونداد مدل WRF را با پارامتری سازی همرفت و فرآیندهای لایه‌مرزی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ترکیب طرح‌واره‌های Betts-Miller، Grell یا Kain-Fritsch برای همرفت با طرح‌واره Blackadar برای لایه‌مرزی در مقایسه با دیگر ترکیب‌ها نتایج بهتری را به همراه دارد. هدایتی دزفولی و آزادی (۱۳۸۹) به راستی‌آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه‌ای MM5 روی ایران پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که برای آستانه‌های کم بارش در مناطق جنوبی و برای آستانه‌های زیاد بارش در مناطق شمالی و مرتفع کشور خروجی مدل از دقت بیشتری برخوردار است.

تقوی و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته بارش کمی مدل WRF در مناطق گوناگون ایران در دوره یک‌ماهه (فوریه ۲۰۰۷) پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که امتیازات مهارتی برای آستانه‌های متفاوت روی حوضه موردتحقیق برای کل بازه یک‌ماهه و روزهای اوج بارش، بیانگر عملکرد به نسبت مطلوب مدل در رخداد بارش در بیشتر نواحی است. برای آستانه بارش ۰/۱ میلی‌متر مدل در بیشتر ایستگاه‌های همدیدی منتخب تعداد دفعات بارش را به‌درستی برآورد می‌کند و امتیاز مهارتی مطلوبی دارد. اگرچه هنوز دامنه بارش‌های برآورد شده دارای مشکلاتی است. ذاکری و همکاران (۱۳۹۳) به راستی‌آزمایی برونداد مدل WRF برای بارندگی بر روی کشور ایران در دوره

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

فوریه تا انتهای می سال ۲۰۰۹ پرداختند. نتیجه این تحقیق نشان داد که مهارت مدل در پیش‌بینی بارش برای آستانه‌های مختلف متفاوت است و با افزایش آستانه بارش مهارت مدل در پیش‌بینی مقدار بارندگی کاهش می‌یابد. درمجموع به نظر می‌رسد مدل از قابلیت نسبتاً مطلوبی برای پیش‌بینی بارندگی در چارچوب عملیاتی در منطقه ایران برخوردار است. ساسانیان و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی عملکرد مدل WRF با نُه پیکربندی فیزیکی مختلف برای پیش‌بینی بارش زمستانه جنوب غرب ایران پرداختند. آن‌ها برای آستانه‌های مختلف بارشی به راستی‌آزمایی با استفاده از کمیت‌های عددی و امتیازهای مهارتی پرداخته و طرح‌واره‌های مناسب جهت پیش‌بینی بارش را تشخیص دادند.

Evans و همکاران (۲۰۱۱) در جنوب شرق استرالیا اثر پارامتری‌سازی‌های فیزیک متفاوت در مدل WRF و اثر متقابل آن‌ها بر روی بارش‌های همرفتی میان‌مقیاس را مورد بررسی قراردادند. با استفاده از ۳۶ پیکربندی متفاوت مدل WRF برای چهار روز انتخاب‌شده موردبررسی قرار گرفت و با استفاده از امتیازهای مهارتی راستی‌آزمایی شد. Givati و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر تفکیک افقی بر روی دقت بارش مدل WRF جهت استفاده در پیش‌بینی رواناب پرداختند. آن‌ها مدل WRF را برای رخداد ۸ مورد بارشی برای ۴ حوضه متفاوت با تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲، ۴ و ۱/۳ کیلومتر اجرا کرده و دریافتند که حوضه‌های با تفکیک افقی ۴ و ۱/۳ کیلومتر در مقایسه با بارش دیدبانی همبستگی بالایی داشته به‌طوری‌که ضریب همبستگی برای آن‌ها ۰/۹۶ و ۰/۹۲ محاسبه‌شده است.

Chotamonsak و همکاران (۲۰۱۲) به ارزیابی شبیه‌سازی بارش با استفاده از مدل WRF بر روی تایلند پرداختند. آن‌ها از چهار طرح‌واره پارامتری‌سازی همرفت BMJ (Betts, Miller, Janjic)، GD (Grell – Devenyi)، G3D (Grell – Devenyi اصلاح‌شده) و KF (Kain – fritsch) با استفاده و بدون استفاده از روش ناجینگ (Nudging) برای سال ۲۰۰۵ بررسی انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از ناجینگ نتایج بهتری داشته و طرح‌واره BMJ در صورت استفاده از ناجینگ می‌تواند کمترین میزان خطا را داشته باشد.

رنجبر و همکاران (۱۳۹۶) به پیش‌بینی و راستی‌آزمایی بارش مدل WRF در نیمه شمالی کشور در ۳۰ مورد بارشی و ۷۰ ایستگاه هواشناسی همدید پرداختند. آن‌ها در ابتدا بارش را به چهار آستانه ۰/۱ – ۵، ۱۰–۵، ۱۵–۱۰ و بزرگ‌تر از ۱۵ میلی‌متر طبقه‌بندی کرده و با استفاده از جدول توافقی دودویی و محاسبه کمیت‌های عددی نسبت صحیح، هشدارهای نادرست، آهنگ برخورد، اریبی و آهنگ هشدارهای تقلبی و همین‌طور امتیازهای مهارتی‌های که، پیرس و گیلبرت برونداد مدل و دیدبانی را باهم مقایسه کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که توانایی مدل در پیش‌بینی بارش‌های بیشتر از ۱۵ میلی‌متر بالاتر و بهتر بوده است، همچنین مهارت مدل در پیش‌بینی بارش بزرگ‌تر از ۱۵ میلی‌متر نسبت به آستانه اول (۰/۱ – ۵ میلی‌متر) در حدود ۳۱ درصد، نسبت به آستانه دوم (۱۰–۵ میلی‌متر) در حدود درصد و نسبت به آستانه سوم (۱۵–۱۰ میلی‌متر) در حدود ۵۳ درصد دقت بیشتری داشته است.

یک مشکل رایج در استفاده از سنجه‌های کلاسیک برای راستی‌آزمایی بارش آن است که پیش‌بینی‌های انجام‌شده با تفکیک افقی کمتر، ازنظر سنجه‌های کلاسیک دارای دقت بیشتری از پیش‌بینی‌های با تفکیک افقی بالاتر هستند (Ebert, 2008). علیرغم آنکه در بیشتر موارد بررسی چشمی پیش‌بینی‌های با تفکیک بالا به دیدبانی نزدیک‌تر می‌باشند. علت اصلی این امر آن است که سنجه‌های کلاسیک (مانند PC، TS و ...) دارای جریمه دوگانه هستند یعنی اگر در پیش‌بینی بارش یک جابه‌جایی مکانی کوچک داشته باشیم، این جابه‌جایی در سنجه‌های کلاسیک دو بار خطا به‌حساب می‌آید. بنابراین در سال‌های اخیر سنجه‌های جدید شامل روش‌های فازی و ... پیشنهادشده است که استفاده از این روش‌ها می‌تواند پیش‌بینی‌های انجام‌شده با تفکیک افقی بالا را به‌طور صحیح‌تری ارزیابی کند. اما شایان گفتن است که در این روش‌ها دسترسی به داده‌های دیدبانی با تفکیک افقی بالا مانند داده‌های رادار هواشناسی و ... ضروری است.

هدف از این تحقیق بررسی اثر تفکیک افقی روی دقت پیش‌بینی بارش مدل WRF و ارزیابی کیفیت پیش‌بینی مدل در حوضه‌های آبریز کرخه و کارون و ۴۲ ایستگاه همدیدی در حوضه‌های فوق می‌باشد. هرچند استفاده از روش‌های متداول راستی‌آزمایی مانند روش‌های دودویی نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد اما به دلیل مشکلات استفاده از آن‌ها در تفکیک‌های بالا (Ebert, 2008) و کمبود داده‌های دیدبانی مناسب در این مطالعه مورد استفاده قرار نگرفتند. همچنین به دلیل عدم دسترسی به داده‌های دیدبانی با تفکیک بالا مانند داده‌های رادار برای

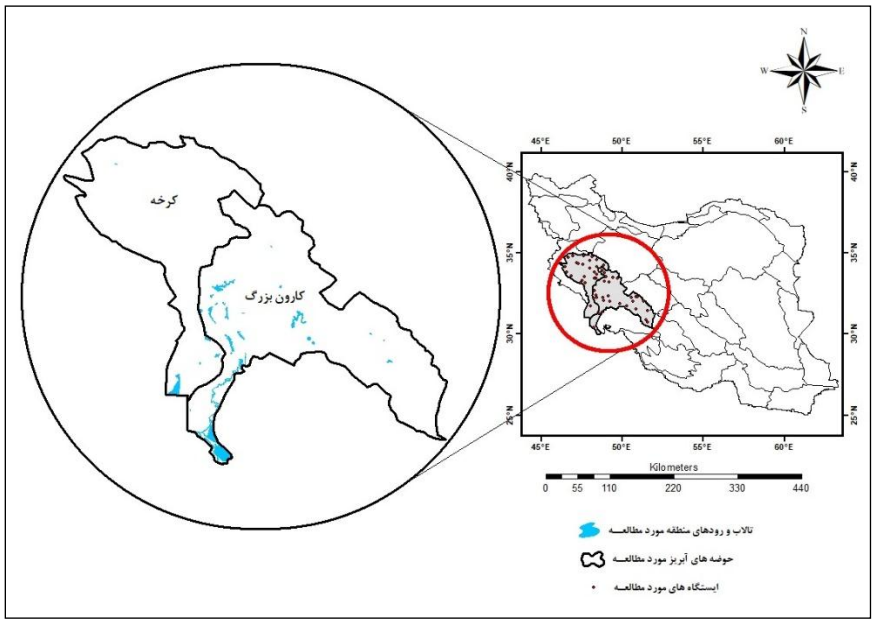
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

تمام موردهای بارشی موردبررسی، امکان راستی‌آزمایی با روش‌های فازی نیز میسر نشده است. اما چون در کاربردهای هیدرولوژی و برای پیش‌بینی سیل، دقت پیش‌بینی بارش کل حوضه از دقت پیش‌بینی منطقه‌ای اهمیت بیشتری دارد. بنابراین در این مقاله از روش‌های آماری مانند ضریب همبستگی بین مقدار بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده و همچنین میانگین کل بارش و بیشینه بارش جهت راستی‌آزمایی استفاده‌شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه در این تحقیق دو حوضه آبریز کرخه و کارون می‌باشد. وسعت حوضه آبریز کرخه حدود ۴۳ هزار کیلومترمربع، بین '۴۶°/۴۶ تا '۵۱°/۵۵ طول شرقی و '۳۰°/۳۷ تا '۳۴°/۸۰ عرض شمالی واقع‌شده است و شامل استان‌های همدان، کرمانشاه، کردستان، ایلام، لرستان و خوزستان می‌باشد. حوضه آبریز کارون که در مناطق میانی و جنوب غربی رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارد با مساحت حدود ۴۴۸۵۹ کیلومترمربع بین مختصات جغرافیایی '۴۸°/۲۱ تا '۵۱°/۵۵ شرقی و '۳۰°/۳۷ تا '۳۳°/۹۱ شمالی واقع‌شده است که در استان‌های خوزستان، لرستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و اصفهان قرارگرفته است.

در این مطالعه از ۲۰ ایستگاه هواشناسی همدیدی واقع در حوضه آبریز کرخه و ۲۲ ایستگاه هواشناسی همدیدی در حوضه آبریز کارون استفاده‌شده است. موقعیت حوضه‌های آبریز کرخه و کارون، تالاب‌ها، رودها و پراکندگی ایستگاه‌های دیدبانی همدیدی موردمطالعه (۴۲ ایستگاه) در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱: موقعیت حوضه‌های آبریز کرخه و کارون، تالاب‌ها، رودها و پراکندگی ایستگاه‌های دیدبانی همدید موردمطالعه.

داده‌های دیدبانی و کنترل کیفی شده بارش در ۲۲ ایستگاه همدید در حوضه آبریز کارون و ۲۰ ایستگاه همدید در حوضه آبریز کرخه برای پنج مورد بارشی سنگین منجر به سیلاب (بیشتر از ۵۰ میلی‌متر در ۲۴ ساعت) و در تاریخ‌های ۳۰ مارس ۲۰۰۹، ۹ آوریل ۲۰۰۹، ۲۷–۲۸ اکتبر ۲۰۱۵، ۱۳ مارس ۲۰۱۶ و ۱۲–۱۳ آوریل ۲۰۱۶ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. دیدبانی‌های بارندگی در ایستگاه‌ها به‌صورت تجمعی

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

شش‌ساعته هستند. آنچه که در این پژوهش مورداستفاده قرار می‌گیرد بارندگی تجمعی ۲۴ ساعته است که به‌صورت ۰۶UTC تا ۰۶UTC روز بعد گزارش می‌شود.

مدل WRF برای کاربست و استفاده در مقاصد عملیاتی پیش‌بینی عددی وضع هوا و همچنین مقاصد پژوهشی درزمینهٔ علوم جو طراحی‌شده است، به‌گونه‌ای که این مدل برای استفاده در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گستره وسیعی از پدیده‌های جوی از مقیاس چند متر تا چند صد هزار کیلومتر مناسب است (Skamarock و همکاران، ۲۰۰۸). مدلWRF یک مدل غیرهیدروستاتیک (با گزینه اختیاری هیدروستاتیک در حین اجرا) است که شبکه‌بندی افقی آن شبکه آراکاوا C (Arakawa C-grid) می‌باشد. در این مدل از طرح‌واره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ–کوتا (Runge-Kutta) و طرح‌واره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود. این مدل از گام‌های زمانی کوچک برای مدهای اکوستیک (Acoustic) و امواج گرانشی استفاده می‌کند.

برای تفکیک افقی در مدل WRF، منطقه موردمطالعه به‌صورت سطح پیوسته (حوضه اول با تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر محدوده ۷۵–۳۰ درجه شرقی و ۵۰–۱۵ درجه شمالی، حوضه دوم با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر محدوده ۶۳–۳۹ درجه شرقی و ۴۲–۲۴ درجه شمالی و حوضه سوم با تفکیک افقی ۴ کیلومتر محدوده ۵۶–۴۴ درجه شرقی و ۳۹–۲۹ درجه شمالی) به‌صورت یک مجموعه متناهی از نقاط در دو بعد گسسته‌سازی می‌شود (خطوط سفیدرنگ افقی و قائم در شکل ۲).

اساساً مدل WRF به‌عنوان یک ابزار دینامیکی برای انجام ریزمقیاس نمایی بر روی‌داده‌های پیش‌بینی تمام کره‌ای GFS به کار می‌رود. بنابراین استفاده از مدل‌های منطقه‌ای مانند مدل WRF یکی از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی است که به آن ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی گفته می‌شود.

پیکربندی مورداستفاده در اجرای مدل براساس مطالعه ذاکری و همکاران (۱۳۹۳) انتخاب و در جدول ۱ ارائه‌شده است.

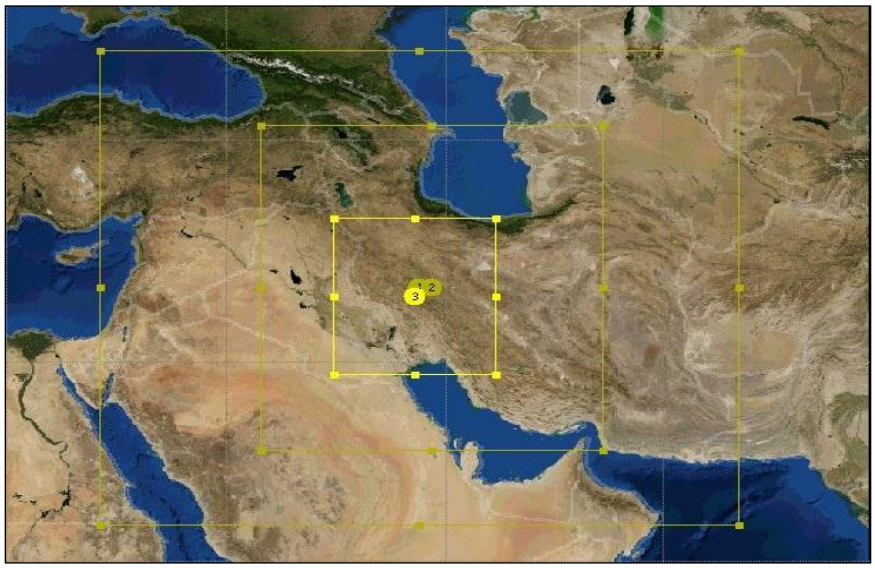
جدول ۱: پیکربندی مورداستفاده در اجرای مدل WRF.

پیکربندی	حوضه ۱	حوضه ۲	حوضه ۳
تفکیک افقی	۳۶ کیلومتر	۱۲ کیلومتر	۴ کیلومتر
تعداد نقاط شبکه	۹۰×۹۰	۱۳۶×۱۳۶	۱۸۱×۱۸۱
گام زمانی در دسترس بودن پیش‌بینی‌ها	۳ ساعته	۱ ساعته	۱ ساعته
تعداد ترازهای قائم	۲۷		
خردفیزیک	طرح‌واره لین (Lin *et al*., 1983)		
همرفت	طرح‌واره کین – فریتز (Kain and Fritsch, 1990, 1993)		
فرآیندهای لایه‌مرزی	طرح‌واره ملور – یامادا – یانیچ (Mellor and Yamada, 1982)		
تابش طول‌موج بلند	طرح‌واره RRTM (Mlawer *et al*., 1997)		
تابش طول‌موج کوتاه	طرح‌واره گودارد (Chou. and Suarez, 1994)		
مدت زمان اجرا	۷۲ ساعت		
زمان شروع و پایان اجرا	از ساعت ۱۸UTC روز اول تا ساعت ۱۸UTC سه روز بعد		

شرایط مرزی و اولیه مدل از داده‌های پیش‌بینی اجرای ساعت ۱۸UTC سامانه مدل‌سازی تمام کره‌ای موسوم به GFS (Global Forecast System) از مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP) با تفکیک افقی ۰/۵ درجه استخراج‌شده است. مدل برای پنج مورد بارشی سنگین و منجر به سیلاب (۳۰ مارس ۲۰۰۹، ۹ آوریل ۲۰۰۹، ۲۷–۲۸ اکتبر ۲۰۱۵، ۱۳ مارس ۲۰۱۶ و ۱۲–۱۳ آوریل ۲۰۱۶) در سه حوضه اجراشده است. حوضه اول با تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر محدوده ۷۵–۳۰ درجه شرقی و ۵۰–۱۵ درجه شمالی، حوضه دوم با تفکیک افقی ۱۲

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

کیلومتر محدوده ۶۳-۳۹ درجه شرقی و ۴۲-۲۴ درجه شمالی و حوضه سوم با تفکیک افقی ۴ کیلومتر محدوده ۵۶-۴۴ درجه شرقی و ۳۹-۲۹ درجه شمالی را پوشش می‌دهد. اگر بخواهیم مدل را برای یک حوضه با تفکیک افقی مختلف انجام دهیم حجم محاسبات بسیار افزایش می‌یابد و روش انجام‌شده در این مطالعه یک روش استاندارد برای انجام ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی می‌باشد (Givati *et al*., 2012). اجرای مدل به‌صورت روزانه و از ساعت ۱۸UTC بوده است. شکل ۲ حوضه‌های مختلف اجرای مدل WRF (تفکیک افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر برای حوضه‌های اول، دوم و سوم) را نشان می‌دهد. از طرح‌واره‌های همرفت کومه‌ای، خردفیزیک، تابش طول‌موج بلند، تابش طول‌موج کوتاه، شرایط سطح زمین، لایه سطحی و لایه‌مرزی سیاره‌ای برای پیکربندی فرمول منطقه‌ای WRF استفاده‌شده است. به دلیل ابزار محاسباتی در دسترس و افزایش حجم محاسبات، بیشینه تفکیک افقی به‌کاررفته در این مقاله ۴ کیلومتر می‌باشد.



شکل ۲: سه حوضه اجرای مدل WRF (تفکیک افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر به ترتیب برای حوضه اول، دوم و سوم).

جهت انجام این مقاله، در ابتدا با استفاده از تحلیل‌های دقیق همدیدی برای هر پنج مورد بارش سنگین و با استفاده از داده‌های بازتحلیل ECMWF با تفکیک افقی ۰/۷۵ درجه ۰، علت بارش‌های سنگین جنوب و جنوب غرب کشور در این‌گونه موارد بررسی و تعیین شد که در ادامه یکی از تحلیل‌های همدیدی مربوط به مطالعه موردی ۱۲ آوریل ۲۰۱۶ برای نمونه ارائه‌شده است. سپس جهت بررسی کیفیت برونداد مدل ازنظر همدیدی، رودباد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت نسبی و شار رطوبت افقی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در سه حوضه با تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر مدل WRF با نقشه‌های متناظر داده‌های بازتحلیل مقایسه و نتایج در ادامه بیان می‌شود. در ادامه برونداد مدل WRF برای بارش تجمعی ۲۴ ساعته برای پنج مورد بارشی سنگین منجر به سیلاب (۳۰ مارس ۲۰۰۹، ۹ آوریل ۲۰۰۹، ۲۷-۲۸ اکتبر ۲۰۱۵، ۱۳ مارس ۲۰۱۶ و ۱۲-۱۳ آوریل ۲۰۱۶) در تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر برای حوضه‌های آبریز کرخه و کارون استخراج شد. سپس به دو روش، میزان همبستگی بین مقدار بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده مدل موردبررسی قرار گرفت. در حالت اول میزان همبستگی بین کل پیش‌بینی مدل و کل دیدبانی در پنج مورد بارش در ۵۴ ایستگاه همدیدی برای سه حوضه به‌طور مجزا و در حالت دیگر همبستگی بارش به‌صورت روزانه برای هر ایستگاه تعیین شد. در ادامه جهت تعیین میزان بهبود پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد برونداد بارش مدل WRF در هر حوضه با تفکیک‌های افقی مختلف، مقدار درصد خطا برای میانگین کل بارش تجمعی ۲۴ ساعته و بیشینه بارش محاسبه شد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

نتایج

جهت بررسی عوامل بارش‌های سنگین در جنوب و جنوب غرب کشور، خصوصاً حوضه‌های آبریز کرخه و کارون به بررسی همدیدی کل پنج مورد بارشی سنگین منجر به سیلاب (بیشتر از ۵۰ میلی‌متر در ۲۴ ساعت) پرداخته شد. در زیر بارش ۱۲ و ۱۳ آوریل ۲۰۱۶ به‌طور کامل از نظر همدیدی تحلیل‌شده‌اند.

آنچه که به‌طورکلی باعث بارش‌های سنگین در جنوب و جنوب غرب کشور و مخصوصاً حوضه‌های آبریز کرخه و کارون می‌شود، تلفیق کم‌فشار مدیترانه و کم‌فشار گرمایی سودان و انتقال رطوبت و فرارفت هوای گرم قابل‌ملاحظه به تراز میانی جو و موقعیت مناسب قرارگیری رودباد جنب حاره و همراهی ترازهای زیرین با سطوح بالای جو می‌باشد که شرایط ناپایداری بارشی مناسب برای رخداد بارش سنگین را به وجود می‌آورد.

به‌عنوان نمونه بارش تاریخ ۱۲-۱۳ آوریل ۲۰۱۶ ازنظر همدیدی مورد ارزیابی قرار گرفت، که به شرح زیر می‌باشد:

شکل ۳ نقشه الف) خطوط ژئوپتانسیل و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، ب) رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ج) خطوط ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، د) رودباد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال برای تاریخ ۱۲ آوریل ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد.

در تراز میانی جو به‌واسطه افزایش ارتفاع بر فراز اروپا و انحراف تاوه قطبی به سمت غرب، با ایجاد فرارفت هوای سرد، منجر به شکل‌گیری سامان‌هایی فعال در غرب ایران می‌شود که با ارسال امواج متناوبی جو ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین یک ناوه عمیق با گرادیان کنتوری قوی که به شکل کم‌فشار بریده و ناوه تیز با هسته سرد می‌باشد، نیز دیده می‌شود.

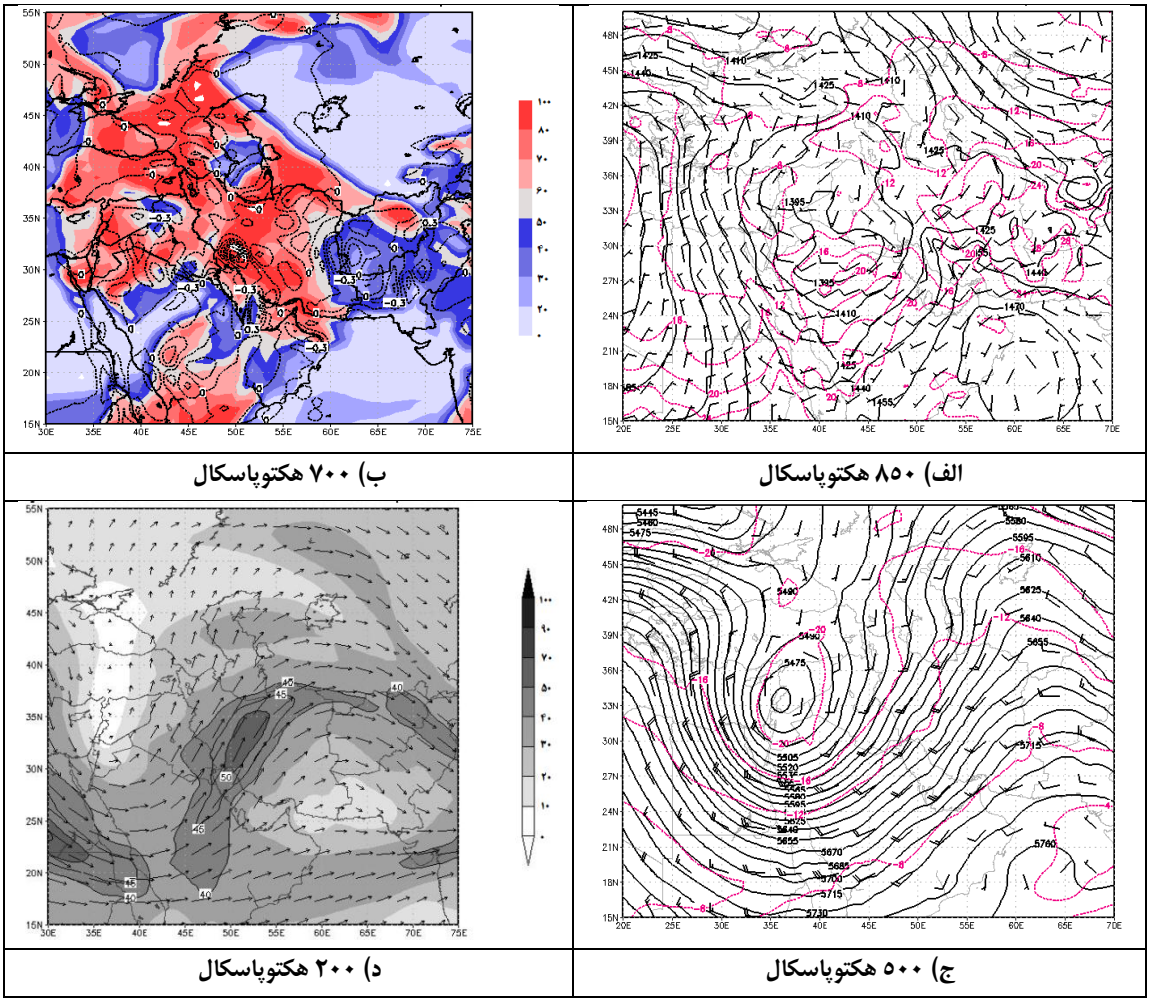
در سطح زمین گسترش زبانه کم‌فشار سودانی و ترکیب آن با کم‌فشار مدیترانه بر روی عراق و غرب ایران، ناوه تراز میانی جو را همراهی می‌کند. گرادیان فشاری و افت فشار و هماهنگی جو میانی و سطحی، شرایط فعالی برای ایجاد ناپایداری در سطح کشور فراهم می‌کند.

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی با توجه به خطوط هم‌دما و هم‌ژئوپتانسیل، ضمن اینکه هماهنگی خوبی بین این تراز و سایر ترازها در خطوط کنتوری دیده می‌شود، از نظر شرایط کژفشاری (قطع خطوط هم‌دما به‌وسیله خطوط کنتوری با زاویه خوب) و همچنین فرارفت جریانات گرم از آب‌های جنوبی کاملاً دیده می‌شود.

در نقشه فرارفت دمایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال فرارفت هوای گرم در جلوی ناوه و جنوب غرب و غرب ایران و فرارفت هوای سرد در جنوب شرق ایران به‌خوبی دیده می‌شود که نشان‌دهنده فعال بودن این سامانه است. گسترش زبانه رطوبتی از ناحیه دریای سرخ و بخش جنوبی تنگه باب المندب که با همگرایی فرارفت رطوبت از ناحیه مدیترانه در غرب ایران تلفیق می‌شود، باعث تقویت میزان رطوبت وارد شده به منطقه جنوب غرب ایران می‌شود. بررسی مدل همگرایی سطح نشان‌دهنده وجود همگرایی مناسبی در منطقه غرب ایران و بخصوص در جنوب غرب ایران و خوزستان است.

بررسی جریان رودباد در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، آرایش بسیار مناسب با انحنا و راستای شمال‌شرقی – جنوب‌غربی رودباد در غرب ایران دیده می‌شود که ازنظر دینامیکی می‌تواند باعث توسعه کم‌فشار سطحی شود.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



الف) ۸۵۰ هکتوپاسکال

ب) ۷۰۰ هکتوپاسکال

ج) ۵۰۰ هکتوپاسکال

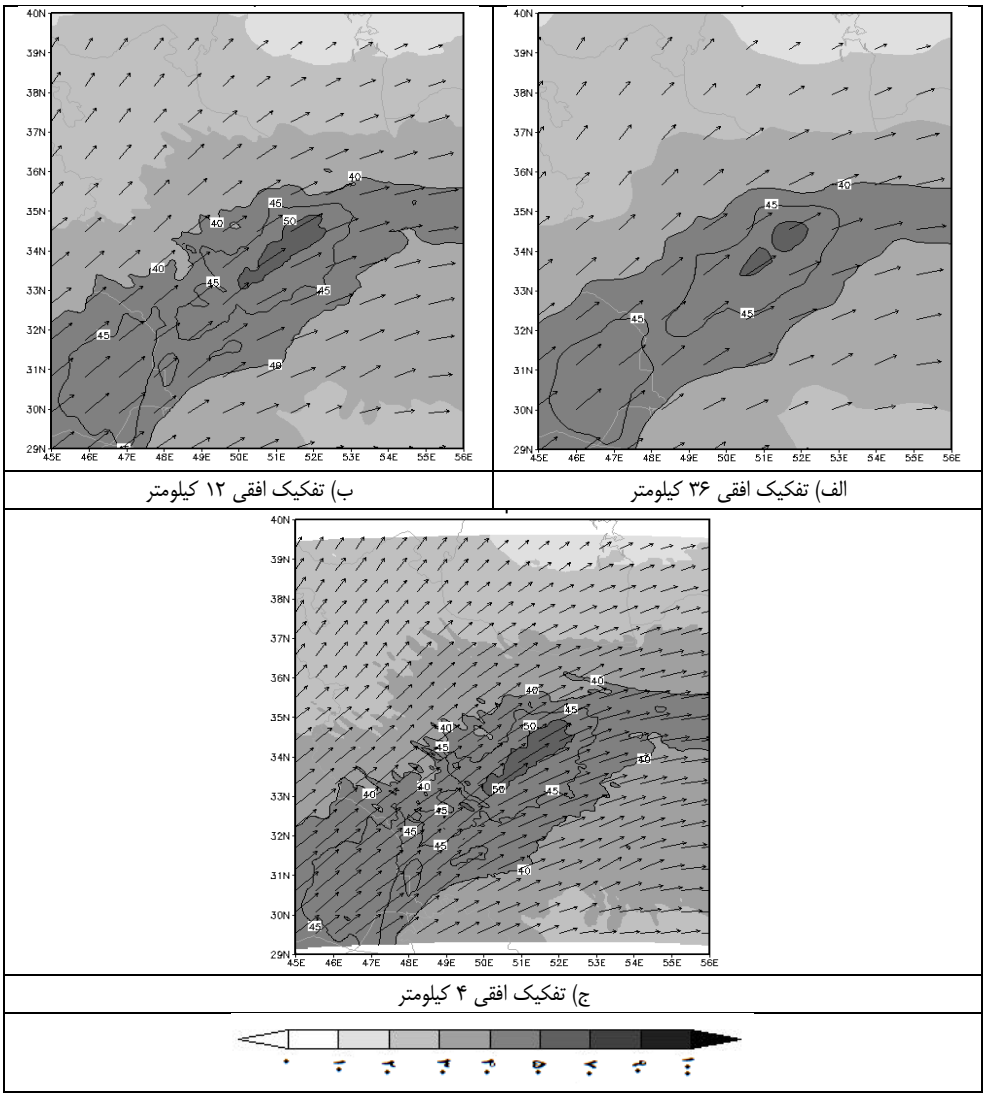
د) ۲۰۰ هکتوپاسکال

شکل ۳: نقشه الف) خطوط ژئوپتانسیل و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، ب) رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ج) خطوط ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، د) رودباد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال برای ساعت ۱۲UTC روز ۱۲ آوریل ۲۰۱۶.

شکل ۴ پیش‌بینی مدل WRF را برای رودباد در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر برای ساعت ۱۲UTC روز ۱۲ آوریل ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. همان‌گونه که می‌توان از شکل ۴ ب و ج مربوط به رودباد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک افقی ۱۲ و ۴ کیلومتر دید، رودباد پیش‌بینی‌شده به‌صورت یک‌تکه و در توافق با رودباد دیدبانی‌شده می‌باشد درحالی‌که در شکل ۴ الف) در خروجی مدل WRF برای تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر، مرکز رودباد به‌صورت دو مرکز مجزا بر روی محور اصلی رودباد با سرعت ۷۰ نات بین ۵۰/۵۰ و ۵۲/۵۰ درجه شرقی قرار دارد. در هر سه شکل ۴ جهت حرکت بردارهای باد از جنوب غربی (عرض ۲۹ درجه شمالی) به سمت عرض‌های بالاتر و به‌صورت حرکت مداری شرق‌سو بین عرض‌های ۳۳ تا ۳۵ درجه شمالی تغییر می‌کند و ازنظر بیشینه و اندازه ناحیه با سرعت ۷۰ نات هر سه تفکیک افقی در پیش‌بینی مدل با یکدیگر و با داده‌های بازتحلیل مشابه هستند. همچنین دقت در شکل‌های ۴ ب و ج

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل WRF با تفکیک‌های افقی ۱۲ و به‌ویژه ۴ کیلومتر همخوانی بیشتری با واقعیت (شکل ۳ د) ازنظر گستردگی مرکز و انحنا دارد.

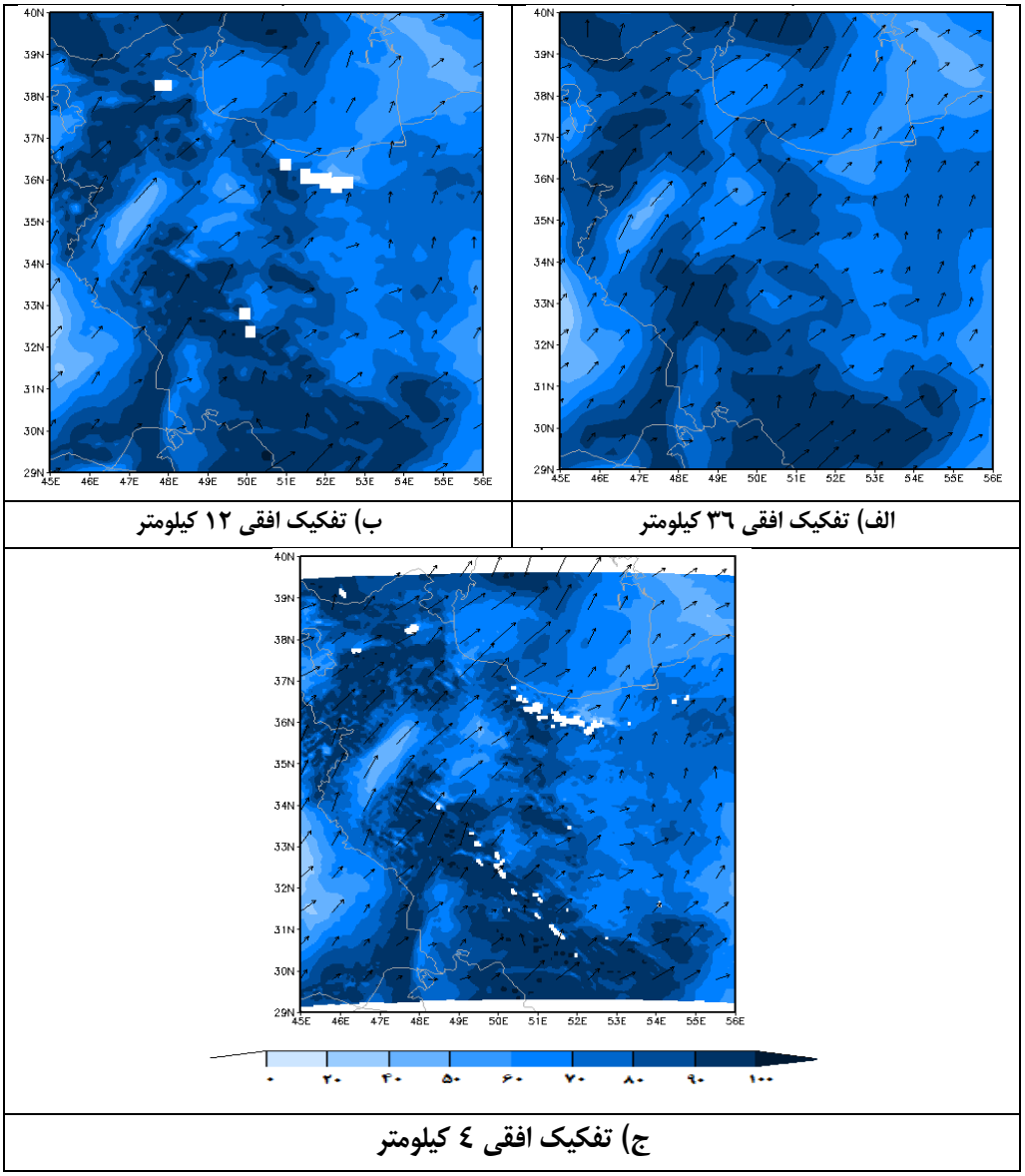


شکل ٤: پیش‌بینی رودباد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال مدل WRF الف) حوضه اول با تفکیک افقی ٣٦ کیلومتر، ب) حوضه دوم با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر و ج) حوضه سوم با تفکیک افقی ٤ کیلومتر برای ساعت ۱۲UTC روز ۱۲ آوریل ۲۰۱٦.

شکل ۵ پیش‌بینی مدل WRF را برای رطوبت نسبی و شار رطوبت افقی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر برای ساعت ۱۲UTC روز ۱۲ آوریل ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. در شکل ۵ الف) پیش‌بینی مدل WRF با تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر بیشترین مقدار رطوبت بین ۴۸ تا ۵۰ درجه شرقی، ۳۲ تا ۳۴ شمالی قرار دارد. در شکل ۵ ب) با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر گستردگی مناطق با رطوبت بیشتر نسبت به تفکیک ۳۶ کیلومتر نمایان‌تر است به‌طوری‌که در برخی از نقاط مقادیر رطوبت بیشتر از ۹۰ درصد مشخص می‌باشد درحالی‌که در تفکیک ۳۶ کیلومتر قابل رویت نیستند. در شکل ۵ ج) خروجی مدل برای حوضه سوم با تفکیک افقی ۴ کیلومتر مقادیر با بیشینه رطوبت برای

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

منطقه وسیع‌تری (۴۷ تا ۵۲ درجه شرقی) دیده می‌شود، از طرفی در این شکل مراکز رطوبتی بیشتر از ۹۰ درصد، نسبت به حوضه دوم مدل با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر با دقت بیشتری قابل‌مشاهده است. در شکل رطوبت با تفکیک افقی ۴ کیلومتر همگرایی شار رطوبت در جنوب غرب ایران نسبت به حوضه با تفکیک ۳۶ و ۱۲ کیلومتر واضح‌تر و با دقت بالاتر نشان داده‌شده است. در مقایسه هر سه پیش‌بینی مدل با نقشه‌های ترسیم‌شده با داده‌های بازتحلیل قابل رویت است که بیشینه رطوبت نسبی برای هر سه حوضه با واقعیت همخوانی کامل داشته و مدل در پیش‌بینی میزان رطوبت نسبی در هر سه تفکیک افقی با دیدبانی (شکل ۳ ب) تطابق کامل دارد.



الف) تفکیک افقی ۳٦ کیلومتر

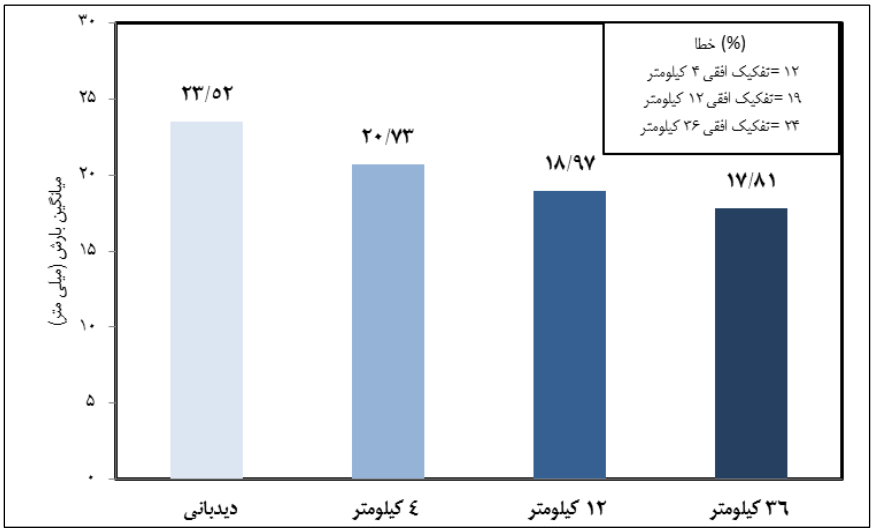
ب) تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر

ج) تفکیک افقی ٤ کیلومتر

شکل ۵: پیش‌بینی رطوبت نسبی و شار رطوبت افقی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال مدل WRF الف) حوضه اول با تفکیک افقی ۳٦ کیلومتر، ب) حوضه دوم با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر و ج) حوضه سوم با تفکیک افقی ٤ کیلومتر برای ساعت ۱۲UTC روز ۱۲ آوریل ۲۰۱٦.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

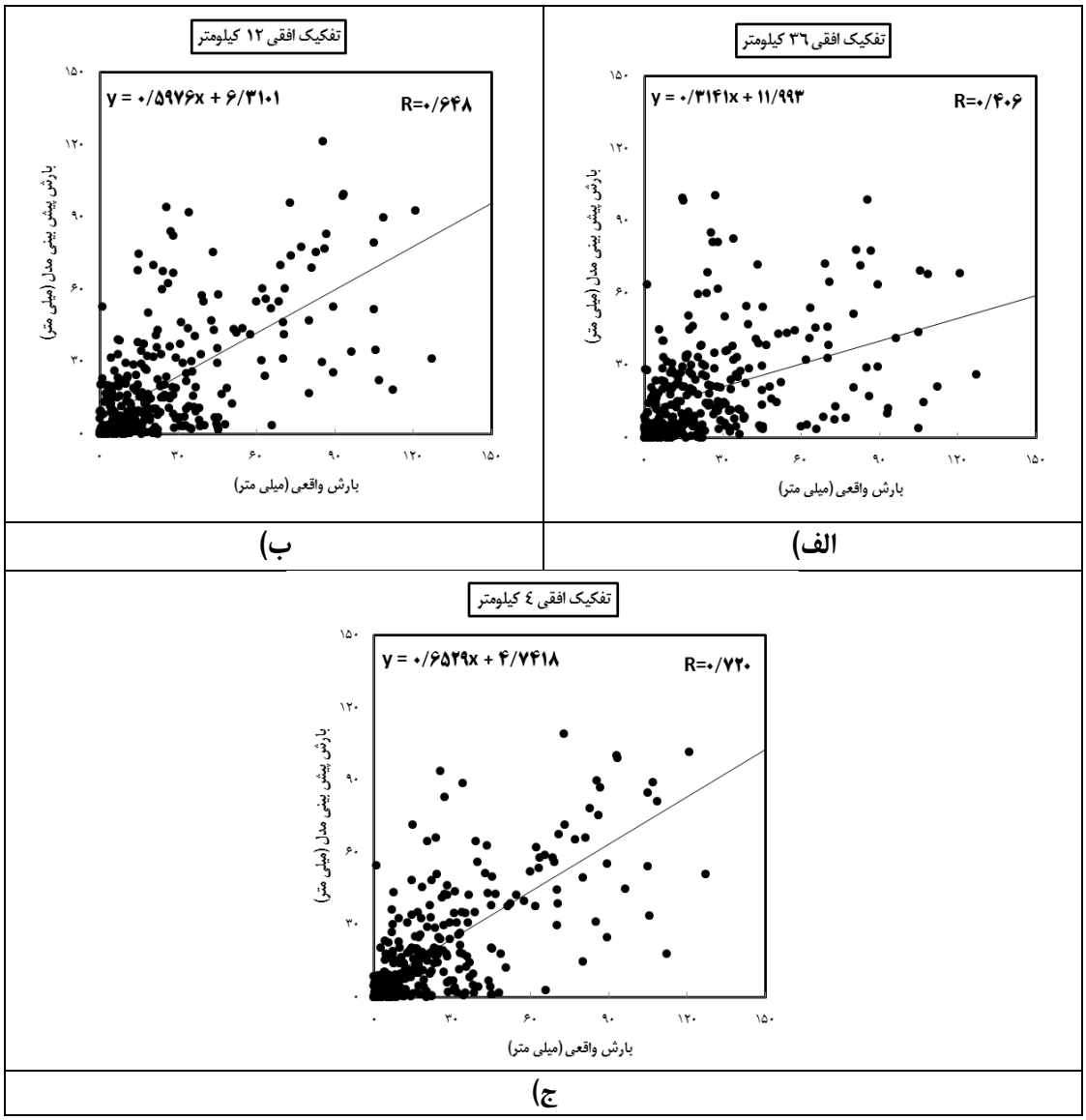
یک گام مهم برای بهینه‌سازی مدل WRF در یک منطقه، آزمون اثر تفکیک افقی مدل می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، همبستگی بین بارش تجمعی مشاهده‌شده و بارش پیش‌بینی‌شده با مدل WRF در تفکیک‌های افقی مختلف بررسی شد. این کار با استفاده از ۴۲ ایستگاه همدیدی انجام شد. شکل ۶ همبستگی بین بارش روزانه دیدبانی‌شده و پیش‌بینی مدل WRF برای ۴۲ ایستگاه همدیدی در حوضه‌های آبریز کرخه و کارون در تفکیک افقی الف)۳۶ کیلومتر، ب) ۱۲ کیلومتر و ج)۴ کیلومتر را نشان می‌دهد. ضرایب همبستگی بارش روزانه دیدبانی و پیش‌بینی برای تفکیک افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر به ترتیب ۰/۴۰، ۰/۶۴ و ۰/۷۲ است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده ضریب همبستگی برای حوضه اول نتیجه خوبی را نشان نمی‌دهد اما نتایج برای تفکیک افقی ۱۲ و ۴ کیلومتر بهتر از ۳۶ کیلومتر بوده و قابل‌قبول است. همچنین با افزایش تفکیک از ۱۲ به ۴ کیلومتر ضریب همبستگی از ۰/۶۴ به ۰/۷۲ افزایش می‌یابد و در حدود ۱۰ درصد بهبود دارد. شکل ۷ همبستگی بین کل بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی مدل WRF در سه حوضه با تفکیک‌های افقی الف) ۳۶ کیلومتر، ب) ۱۲ کیلومتر و ج) ۴ کیلومتر را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی میان کل بارش دیدبانی و پیش‌بینی مدل برای تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۸۰ و ۰/۸۳ می‌باشد. به‌وضوح می‌توان دید که کل بارش پیش‌بینی مدل WRF در تفکیک‌های افقی بالاتر (۱۲ و ۴ کیلومتر) با کل بارش دیدبانی‌شده همبستگی بیشتری نشان می‌دهد. نتایج کامل‌تر برای اثر تفکیک افقی مدل WRF در ارائه‌شده است. همان‌گونه که از شکل ۷: همبستگی بین کل بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده مدل WRF برای ۴۲ ایستگاه همدیدی در پنج مورد بارشی در تفکیک‌های افقی الف) ۳۶ کیلومتر، ب) ۱۲ کیلومتر و ج) ۴ کیلومتر.



شکل ۸: مقدار میانگین پنج مورد بارشی دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده با سه تفکیک افقی ۳٦، ۱۲ و ٤ کیلومتر.

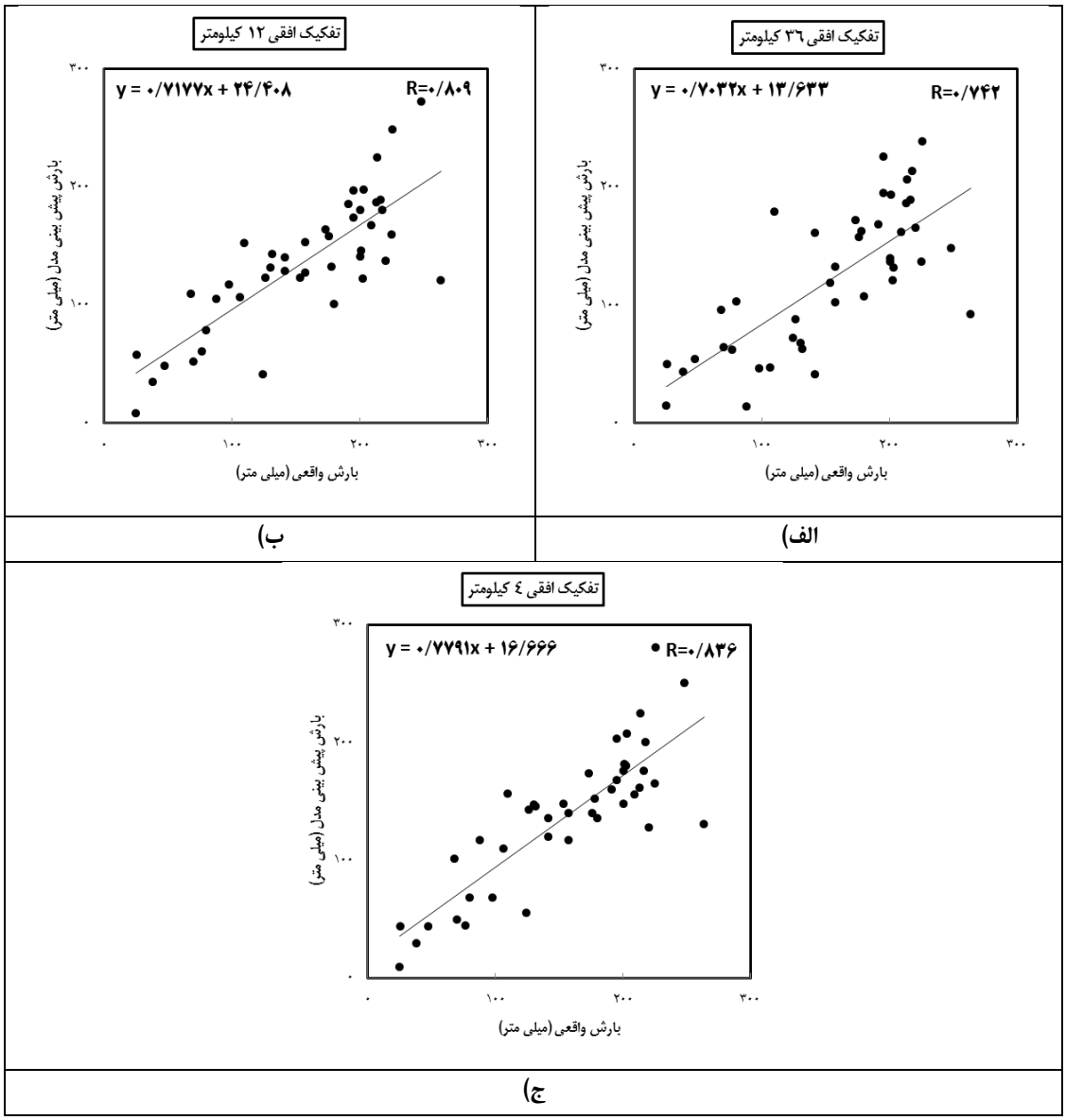
جدول ۲ می‌توان دید اختلاف میان بارش مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده با افزایش تفکیک افقی کاهش دارد و برای تفکیک ۴ کیلومتر به مقدار واقعی نزدیک‌تر می‌باشد. میانگین کل پنج مورد بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده برای ۴۲ ایستگاه همدیدی برای سه تفکیک افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر در شکل ۸ نشان داده‌شده است. میانگین کل بارش دیدبانی‌شده برابر با ۲۳/۵۲ میلی‌متر و میانگین کل بارش پیش‌بینی‌شده با تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر به ترتیب ۱۷/۸۱، ۱۸/۹۷ و ۲۰/۷۳ میلی‌متر می‌باشد. با استفاده از این مقادیر اختلاف بین مقدار میانگین بارش تجمعی ۲۴ ساعته دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده و درصد خطای هر یک از پیش‌بینی‌ها محاسبه شد. درصد خطای میانگین کل پنج مورد بارش دیدبانی‌شده و خروجی مدل با تفکیک افقی ۴ کیلومتر ۱۲ درصد، برای ۱۲ کیلومتر ۱۹ درصد و برای ۳۶ کیلومتر ۲۴ درصد می‌باشد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



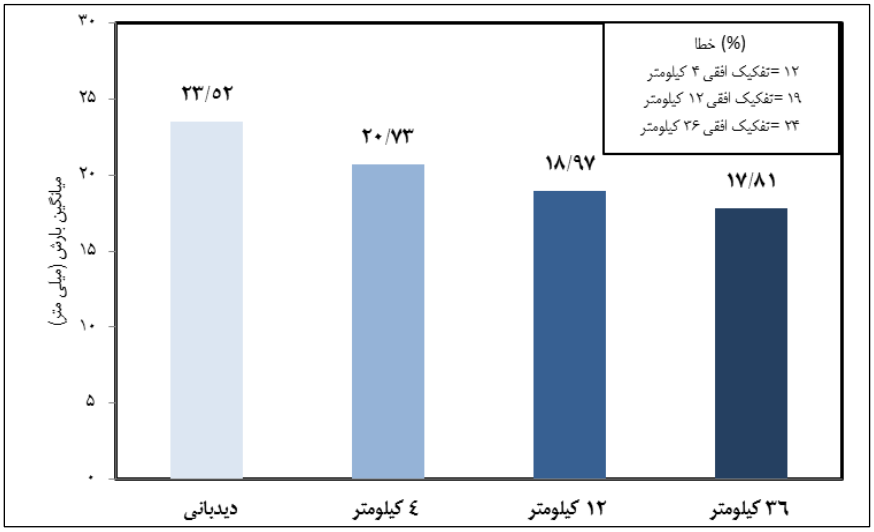
شکل ٦: همبستگی بین بارش روزانه دیدبانی و پیش‌بینی مدل WRF برای ٤٢ ایستگاه همدیدی در حوضه‌های آبریز کرخه و کارون در تفکیک افقی الف) ٣٦ کیلومتر، ب) ١٢ کیلومتر و ج) ٤ کیلومتر.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



شکل ۷: همبستگی بین کل بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده مدل WRF برای ٤۲ ایستگاه همدیدی در پنج مورد بارشی در تفکیک‌های افقی الف) ۳٦ کیلومتر، ب) ۱۲ کیلومتر و ج) ٤ کیلومتر.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



شکل ۸: مقدار میانگین پنج مورد بارشی دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده با سه تفکیک افقی ۳٦، ۱۲ و ٤ کیلومتر.

جدول ۲: مقایسه بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی مدل WRF برای ٤۲ ایستگاه همدیدی و پنج مورد بارشی با تفکیک افقی متفاوت.

بارش پیش‌بینی (تفکیک افقی ۳٦ کیلومتر)	بارش پیش‌بینی (تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر)	بارش پیش‌بینی (تفکیک افقی ٤ کیلومتر)	بارش مشاهداتی (mm)	تاریخ توفان
		حوضه آبریز کارون		
۵۱۶	۴۷۷	**٤٤۷**	۳۲۹	۳۱ مارس ۲۰۰۹
۲۴۹	۲۱۸	**۱۵۹**	۱۸۶	۹ آوریل ۲۰۰۹
۳۱۱	۱۱۵۴	**۱۱۳٤**	۱۱۱۶	۲۷-۲۸ اکتبر ۲۰۱۵
۳۸	۴۲	**٥٦**	۱۸۴	۱۴ مارس ۲۰۱۶
۹۷۳	۱۰۳۲	**۱۰٥۸**	۱۳۱۳	۱۲-۱۳ آوریل ۲۰۱۶
		حوضه آبریز کرخه		
۴۴۶	۳۸۸	**۳٥۸**	۳۵۶	۳۱ مارس ۲۰۰۹
۱	۴	**٤۰**	۸۱	۹ آوریل ۲۰۰۹
۱۸۷۲	۱۷۶۰	**۱٤۹۳**	۱۳۱۵	۲۷-۲۸ اکتبر ۲۰۱۵
۲۷۷	۲۳۳	**۲٥٤**	۳۴۶	۱۴ مارس ۲۰۱۶
۱۱۱۰	۱۱۳۹	**۱۳۰۸**	۲۰۶۴	۱۲-۱۳ آوریل ۲۰۱۶

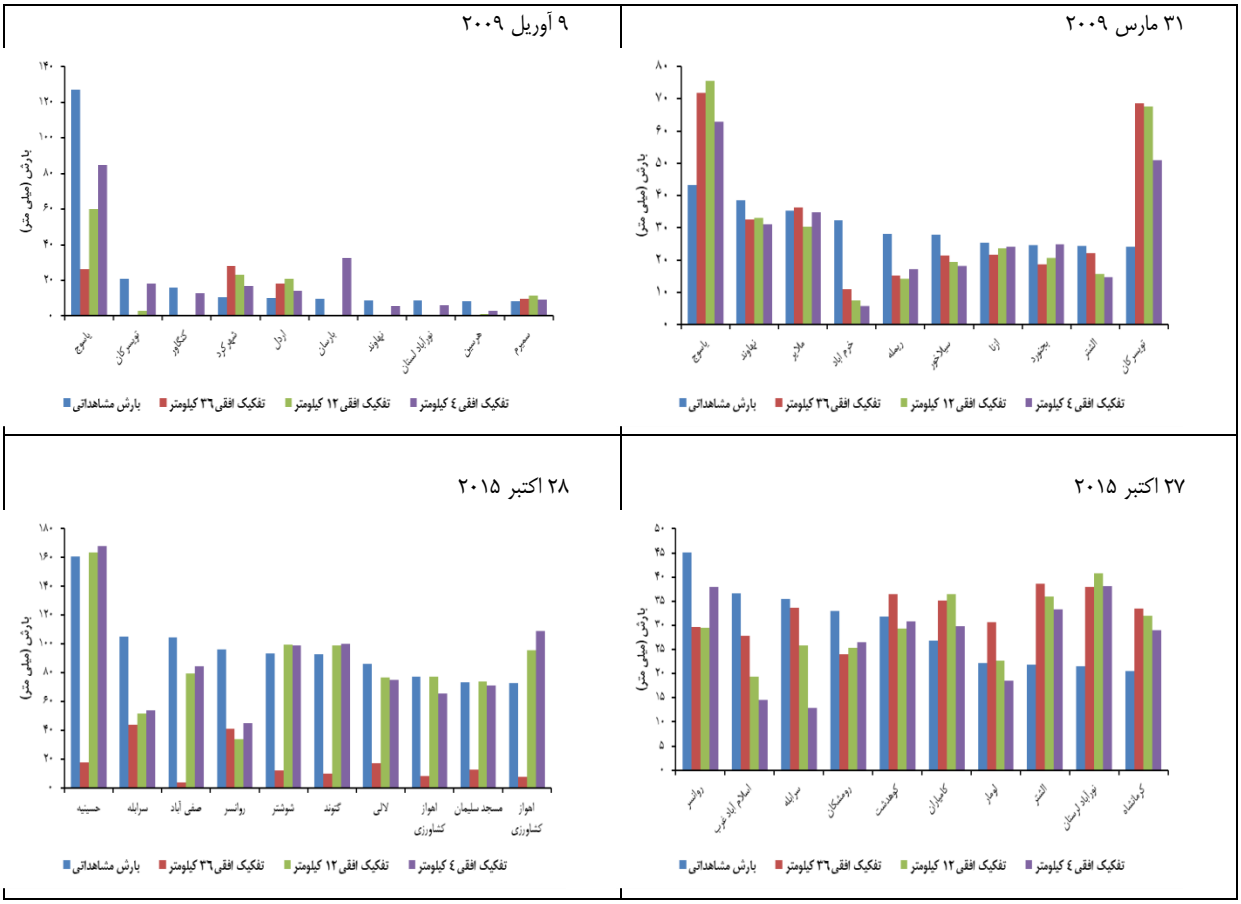
شکل ۹ نمودار تغییرات و مقایسه بین بارش مشاهداتی و بارش پیش‌بینی مدل WRF با سه دامنه با تفکیک‌های افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر برای ۶ روز همراه با بارش سنگین منجر به سیلاب و برای ۱۰ ایستگاه همدید که بیشترین مقدار بارش برای آن‌ها ثبت‌شده است را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

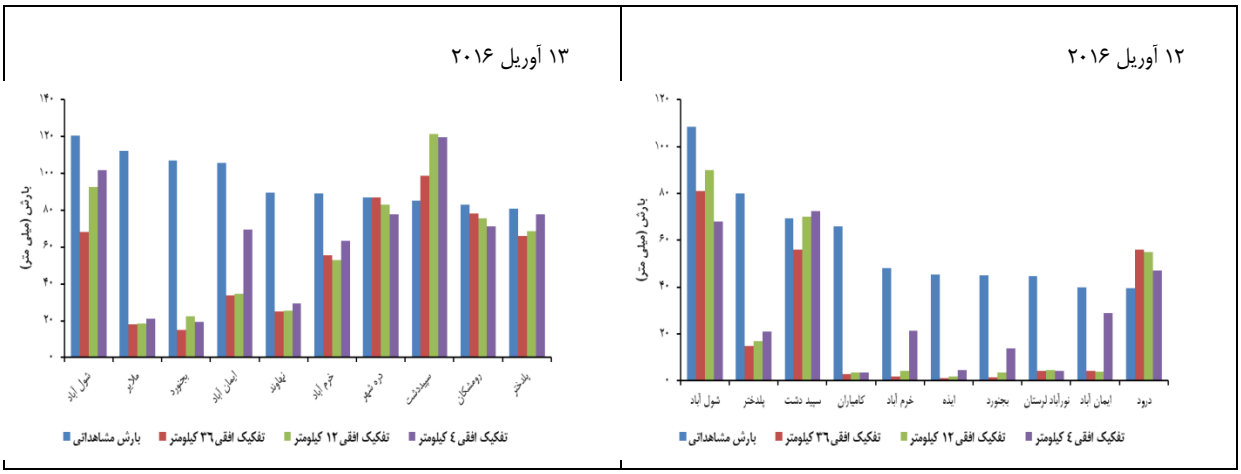
شکل ۱۰ الف) مقدار بارش مشاهداتی داده‌های دیدبانی، ب) پیش‌بینی بارش حوضه اول مدل WRF (تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر)، ج) پیش‌بینی بارش حوضه دوم مدل WRF (تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر) و د) پیش‌بینی بارش حوضه سوم مدل WRF (تفکیک افقی ۴ کیلومتر) برای تاریخ ۱۲ آوریل ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین مقدار بارش دیدبانی ۱۰۸/۵ میلی‌متر بوده است. در پیش‌بینی بارش مدل، بیشینه مقدار بارش در حوضه اول (تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر) ۸۵ میلی‌متر، در حوضه دوم (تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر) ۹۲ میلی‌متر و در حوضه سوم (تفکیک افقی ۴ کیلومتر) ۱۱۲ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین ازنظر بیشینه مقدار بارش، حوضه با تفکیک افقی بالاتر (۴کیلومتر) به مقدار دیدبانی نزدیک‌تر می‌باشد و در این مورد بارشی حوضه اول ۲۲ درصد، حوضه دوم ۱۵ درصد و حوضه سوم ۳ درصد خطا داشته‌اند.

ازنظر اندازه و همچنین شکل منطقه بارشی (موقعیت مرکزهای بیشینه) با توجه به شکل ۱۰، حوضه سوم (تفکیک افقی ۴ کیلومتر) به دیدبانی نزدیک‌تر می‌باشد.

مقدار بارش پیش‌بینی‌شده مدل برای هر سه حوضه با تفکیک‌های افقی متفاوت محاسبه شد. بیشینه بارش برای دیدبانی و پیش‌بینی با هر سه حوضه مدل WRF برای روزهای بارشی موردبررسی، تعیین گردید و سپس درصد خطای هر یک از حوضه‌ها در خروجی مدل مشخص شد. میانگین درصد خطا در مقایسه بارش کل دیدبانی با کل پیش‌بینی مدل WRF برای حوضه اول (تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر)، حوضه دوم (تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر) و حوضه سوم (تفکیک افقی ۴ کیلومتر) به ترتیب ۳۵ درصد، ۳۰ درصد و ۱۳ درصد به دست آمد.



[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



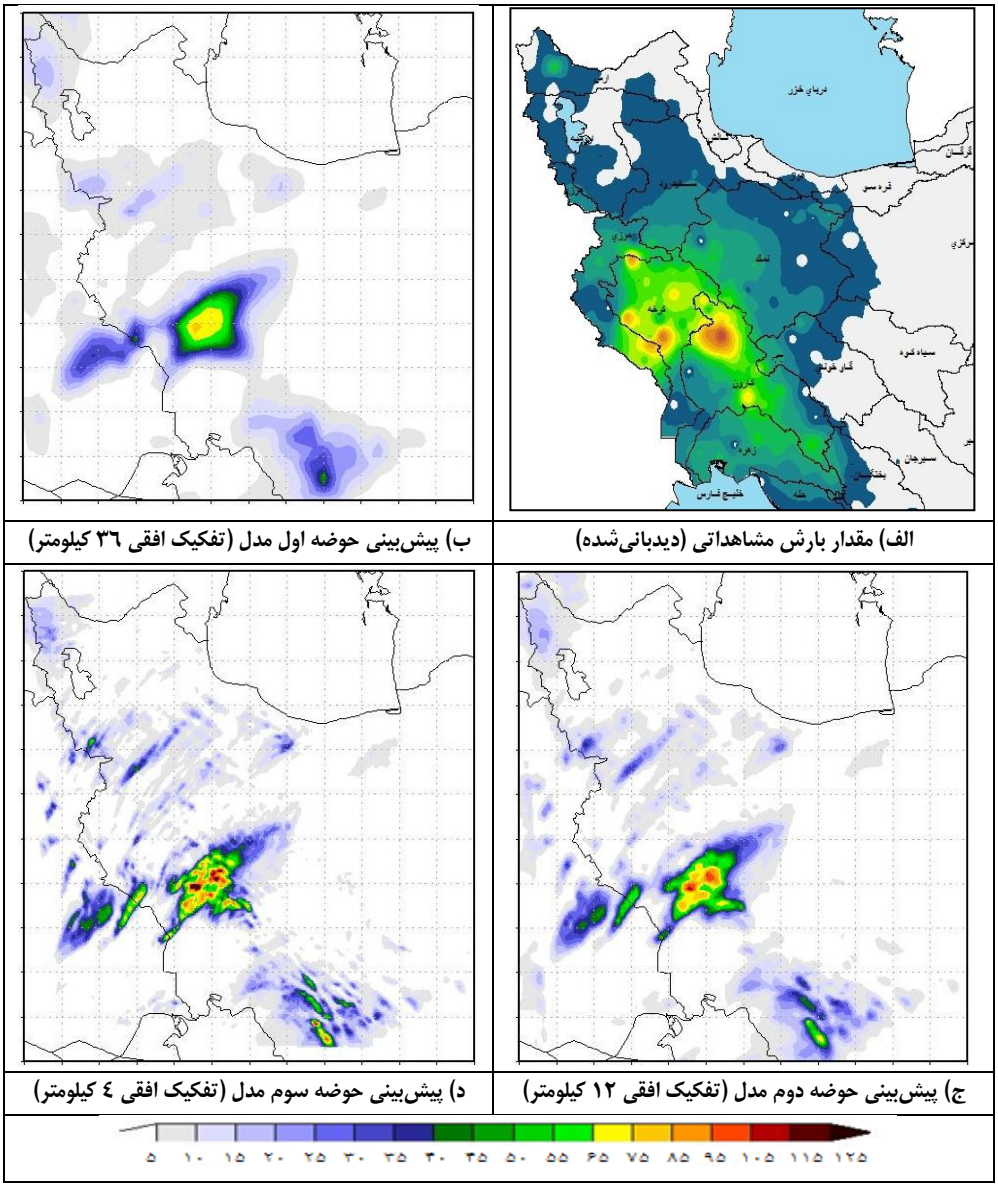
شکل ۹: نمودار تغییرات بارش مشاهداتی (آبی‌رنگ) و بارش پیش‌بینی‌شده مدل WRF با سه تفکیک افقی ۳٦ کیلومتر (قرمزرنگ)، ۱۲ کیلومتر (سبزرنگ) و ٤ کیلومتر (بنفش‌رنگ) برای شش روز همراه با بارش سنگین منجر به سیلاب.

جدول ۳ درصد خطای میانگین هر یک از ۵ مورد بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده مدل WRF با تفکیک افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل‌مشاهده است در هر پنج مورد بارشی، پیش‌بینی مدل با تفکیک افقی ۴ کیلومتر درصد خطای کمتری نسبت به دو تفکیک افقی دیگر (۳۶ و ۱۲ کیلومتر) دارد. با توجه به جدول کمترین مقدار درصد خطا مربوط به بارش ۴ آوریل ۲۰۰۹ با مقدار ۵ درصد در حوضه سوم مدل و بیشترین مقدار درصد خطا مربوط به تاریخ ۳۱ مارس ۲۰۰۹ در حوضه با تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر و مقدار ۴۰ درصد است.

جدول ۳: درصد خطای میانگین هر یک از پنج مورد بارش دیدبانی و پیش‌بینی مدل با تفکیک افقی ۳٦، ۱۲ و ٤ کیلومتر.

تفکیک افقی ٤ کیلومتر	تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر	تفکیک افقی ۳٦ کیلومتر	تاریخ توفان
٪۱۷	٪۲۶	٪۴۰	۳۱ مارس ۲۰۰۹
٪۵	**٪۵**	٪۶	۴ آوریل ۲۰۰۹
٪۹	٪۱۳	٪۱۴	۲۷-۲۸ اکتبر ۲۰۱۵
٪۲۰	٪۲۵	٪۲۸	۱۴ مارس ۲۰۱۶
٪۳۰	٪۳۶	٪۳۸	۱۲-۱۳ آوریل ۲۰۱۶

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



شکل ۱۰: نقشه الف) مقدار بارش مشاهداتی، ب) پیش‌بینی بارش مدل در حوضه اول با تفکیک افقی ۳٦ کیلومتر، ج) پیش‌بینی بارش مدل در حوضه دوم با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر و د) پیش‌بینی بارش مدل در حوضه سوم با تفکیک افقی ٤ کیلومتر برای تاریخ ۱۲ آوریل ۲۰۱٦.

بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر تفکیک افقی بر روی دقت بارش مدل WRF برای پنج مطالعه موردی (۳۰ مارس ۲۰۰۹ تا ۱۳ آوریل ۲۰۱۶) در حوضه‌های آبریز کرخه و کارون برای سه حوضه با تفکیک افقی ۳۶، ۱۲ و ۴ کیلومتر انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

در بررسی همدیدی شرایط حاکم بر جو در هنگام رخداد بارش‌های سنگین، پیش‌بینی مدل در هر سه حوضه با تفکیک‌های افقی مختلف توانایی قابل قبولی داشته و با واقعیت همخوانی کامل دارند.

همبستگی بین کل بارش دیدبانی و پیش‌بینی مدل WRF و بارش روزانه دیدبانی و پیش‌بینی، حوضه سوم با تفکیک افقی ۴ کیلومتر نسبت به دو حوضه دیگر که تفکیک افقی پایین‌تری دارند، دقت بالاتری دارد و یافته مقاله حاضر با تحقیق Givati و همکاران (۲۰۱۲) که حوضه‌های با تفکیک افقی بالاتر در مقایسه با بارش دیدبانی همبستگی بالاتری داشته، همخوانی کامل دارد.

بهبود پیش‌بینی حوضه سوم (تفکیک افقی ۴ کیلومتر) نسبت به حوضه دوم (تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر) ازنظر میانگین کل پنج مورد بارشی ۷ درصد و نسبت به حوضه اول (تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر) ۱۲ درصد می‌باشد.

ازنظر بیشینه بارش دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌شده مدل WRF، حوضه با تفکیک افقی ۴ کیلومتر نسبت به حوضه با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر ۱۷ درصد و نسبت به حوضه با تفکیک افقی ۳۶ کیلومتر ۲۲ درصد بهبود داشته است.

درمجموع مدل WRF در پیش‌بینی بارش کل حوضه‌های آبریز کرخه و کارون، برای حوضه‌ای که تفکیک افقی بالاتری (۴ کیلومتر) دارد، دقت قابل‌قبول‌تری داشته و به مقادیر دیدبانی نزدیک‌تر است و کمترین درصد خطا را به خود اختصاص می‌دهد و افزایش تفکیک افقی می‌تواند توانایی مدل را برای پیش‌بینی بارش ارتقاء بخشد (Kain *et al*., 2008؛ Kain *et al*., 2006؛Schwartz and Coauthors, 2009؛ Weisman *et al*., 2008).

یکی از اهداف اصلی این مقاله، بررسی استفاده از نتایج حاصله در فعالیت‌های عملی می‌باشد و به همین دلیل نیز از انجام آزمایش‌های با حجم محاسبات بالا و غیرقابل انجام ازنظر عملیاتی (تفکیک‌های افقی حدود ۱ کیلومتر) اجتناب شده است. نتایج مقاله حاضر نشان می‌دهد که می‌توان از پیش‌بینی‌های صادرشده به‌خوبی برای صدور هشدار پیش‌بینی استفاده کرد و اساساً این رویه در سال‌های اخیر در سازمان هواشناسی و پژوهشکده هواشناسی جهت پیش‌بینی سیلاب استفاده می‌شود و این مقاله صرفاً جهت بهبود نتایج ارائه‌شده است.

نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله مطابقت خوبی با نتایج مطالعات پیشین دارد (هدایتی و آزادی، ۱۳۸۹؛ ذاکری و همکاران، ۱۳۹۳). هرچند قابل‌ذکر است که بخشی از کاستی‌های مهارت مدل در پیش‌بینی بارندگی مربوط به عدم وجود اندازه‌گیری‌های دقیق بارش، با توجه به ناهمواری پیچیده در منطقه موردبررسی است. به‌عبارت‌دیگر بخشی از عدم توافق برونداد مدل و دیدبانی، مربوط به ناکامل بودن دیدبانی‌هاست مثلاً هسته‌های بیشینه بارندگی معمولاً در نقاط خاصی از ارتفاعات رخ می‌دهد که تعداد دیدبانی‌های در دسترس در این نقاط کمتر است زیرا دیدبانی‌ها معمولاً به‌طور میانگین در کوهپایه‌ها و در دره‌ها انجام می‌شود تا در نقاط شاخص و قله‌ها.

منابع

آزادی، م.، رضازاده، پ.، میرزایی، ا. و وکیلی، غ.، ۱۳۸۲. پیش‌بینی عددی سیستم‌های زمستانی روی ایران: مطالعه مقایسه‌ای پارامتری‌سازی‌های فیزیکی. هشتمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها.

تقوی، ف.، نیستانی، ا. و قادر، س.، ۱۳۹۲. ارزیابی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش مدل عددی WRF در منطقه ایران در دوره یک‌ماهه. مجله فیزیک زمین و فضا، شماره۳۹: صفحات۱۷۰-۱۴۵.

ذاکری، ز.، آزادی، م. و صحرائیان، ف.، ۱۳۹۳. راستی‌آزمایی برونداد مدل WRF برای بارندگی بر روی کشور ایران در دوره فوریه تا انتهای می سال ۲۰۰۹. مجله علمی و ترویجی نیوار، شماره ۸۶-۸۷: صفحات۱۰-۳.

رنجبر سعادت‌آبادی، ع.، کریم‌خانی، م. و فتاحی، ا.، ۱۳۹٦. پیش‌بینی و راستی‌آزمایی بارش مدل WRF در نیمه شمالی کشور. پنجمین کنفرانس مدیریت و مهندسی سیلاب، تهران، ایران.

ساسانیان، س.، آزادی، م.، عسگری شیرازی، ح. و میرزایی حاجی باغلو، ا.، ۱۳۹٤. ارزیابی عملکرد مدل WRF با نه پیکربندی فیزیکی مختلف برای پیش‌بینی بارش زمستانه جنوب غرب ایران. مجله علمی و ترویجی نیوار، شماره ۹۰-۹۱: صفحات۲۶-۱۵.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

هدایتی دزفولی، ا. و آزادی، م.، ۱۳۸۹. راستی آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه‌ای MM5 روی ایران. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۶، شماره ۳: صفحات ۱۲۹-۱۱۵.

Adlerman, E. J. and Droegemeier K. K., 2002. The sensitivity of numerically simulated cyclic mesocyclogenesis to variations in model physical and computational parameters. Monthly Weather Review, 130: 2671–2691.

Bryan, G. H., Wyngaard, J. C. and Fritsch, J. M., 2003. Resolution requirements for the simulation of deep moist convection Monthly Weather Review, 131: 2394–2416.

Chou, M. D. and Suarez, M. J., 1994. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Technical Memorandum, pp.3-85.

Colle, B. A., Westrick, K. J. and Mass C. F., 1999. Evaluation of MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the Pacific Northwest during the cool season. Weather and Forecasting, 14: 137–154.

Chotamonsak, C., Salath, E., Kreasuwan, J. and Chantara, S., 2012. **Evaluation of Precipitation Simulations over Thailand using a WRF Regional Climate Model., Chiang Mai Journal of Science, 39: 623-638.**

Doyle, J. D., 1997. The influence of mesoscale orography on a coastal jet and rainband. Monthly Weather Review, 125: 1465–1488.

Davis, C. and Carr, F., 2000. **Summary of the 1998 workshop on mesoscale model verification. Bull. American Meteor Society, 81: 809–819.**

Ebert, E. E., 2008. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework. Meteorological Applications, 15: 51–64.

Evans, J. P. and Marie, E., 2011. Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia. Springer Link, 39: 1241–1258.

Givati, A., Lyan, B., Liu, Y. and **Rimmer, A., 2012.** Using the WRF Model in an Operational Streamflow Forecast System for the JORDAN River. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51: 285–299.

Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritcsh scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds. American Meteor Society, 246 p.

Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1990. A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization. Journal of Atmospheric. Science, 47: 2784-2802.

Katzfey, J. J., 1995. Simulation of extreme New Zealand precipitation events. Part I: Sensitivity to orography and resolution. Monthly Weather Review, 123: 737–754.

Kain, J. S., Weiss, S. J., Levit, J. J., Baldwin, M. E. and Bright, D. R., 2006. Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004. Weather and Forecasting, 21: 167–181.

Kain, J. S. and Coauthors., 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. Weather and Forecasting, 23: 931–952.

Lin, Y. L., Farley, R. D. and Orville, H. D., 1983. **Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 22: 1065-1092.**

Mellor, G. L. and Yamada, T., 1982. **Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Reviews of Geophysics, 20: 851-875.**

Muller, R. H., 1944. Verification of short – range weather forecasts (a survey of the literature). American Meteor Society, 25: 88–95.

McQueen, J. T., Draxler, R. R. and Rolph, G. D., 1995. Influence of grid size and terrain resolution on wind field predictions from an operational mesoscale model**.** Journal of Applied Meteorology and Climatology, 34: 2166–2181.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

Martin, G., 1996. Adramatic example of the importance of detailed model terrain in producing accurate quantitative precipitation forecasts for southern California. National Weather Service Western Region Tech. Attachment 96-07, 9.

Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997. **Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere, RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. Journal of Geophysical Research, 102: 16663-16682.**

Petch, J. C., A. R. Brown. and M. E. B. Gray., 2002. The impact of horizontal resolution on the simulations of convective development over land. Quart. J. Roy. American Meteor Society, 128: 2031–2044.

Stanski, H. R., Wilson, L. J. and Burrows, W. R., 1989. Survey of common verification Methods in Meteorology. World Weather Watch Technical Report No.8. World Meteorological Organisation.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G., 2008. A description of the Advanced Reasearch WRF Version 3.NCAR Technical Note, TN 475+STR, 113, available at: www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arwv3.pdf (last access: January 2012), 2008.

Schwartz, C. S. and Coauthors., 2009. Next-day convectional owing WRF model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing. Mon. Wea. Rev, 137, 3351–3372.

Xue, M. and W. J. Martin., 2006. A high-resolution modeling study of the 24 May 2002 case during IHOP. Part I: Numerical simulation and general evolution of the dryline and convection. Monthly Weather Review, 134: 149–171.

Weisman, M., Davis, C., Wang, W., Manning, K. and Klemp, K., 2008. Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. Weather and Forecasting, 23: 407–437.

Warner, T., 2011. Numerical Weather and Climate Prediction. Academic press.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]