

بررسی تاثیر تفکیک افقی و قائم مدل WRF بر پیش‌بینی بارش: چند مطالعه موردی

سکینه خان‌سالاری^{۱*}، مجید آزادی^۲

^۱استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۲دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹)

چکیده

در این مطالعه، به بررسی تاثیر تفکیک افقی و قائم مدل WRF بر پیش‌بینی بارش پرداخته شده است. بدین منظور، شبیه‌سازی بارش‌های سنگین رخ داده در منطقه غرب ایران با استفاده از داده‌های GFS به عنوان شرایط مرزی و اولیه در مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF دو تفکیک افقی و چهار ترکیب متفاوت در موقعیت و تعداد ترازهای قائم انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در روزهایی که شدت بارش رخ داده قابل توجه است، با افزایش تفکیک افقی نتایج شبیه‌سازی بارش بهبود می‌یابد. اما اگر مقدار بارش قابل توجه نباشد میانگین نتایج شبیه‌سازی با افزایش تفکیک افقی اجرای مدل تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد. همچنین افزایش تفکیک افقی در راستای قائم لزوماً منجر به افزایش مهارت پیش‌بینی بارش نمی‌شود و گاهی منجر به فرایش‌بینی نیز می‌شود. به طور کلی با افزایش تفکیک قائم در بالای لایه ذوب مهارت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش تفکیک قائم در لایه زیرین و ردسپهر تنها در بارش‌های سنگین منجر به افزایش مهارت پیش‌بینی می‌گردد. بنابراین تاثیر افزایش تفکیک مدل بر مهارت پیش‌بینی به شدت به موقعیت افزایش ترازها و شدت بارش بستگی دارد. علاوه بر این روابط جداسازی عامل‌های موثر در بالای لایه ذوب و لایه زیرین لایه ذوب نشان می‌دهد که با افزایش تفکیک مدل در سرتاسر لایه و ردسپهر، به‌طور کلی مهارت پیش‌بینی در حالت میانگین کاهش می‌یابد. این مطلب به علت برهمکنش منفی فرآیندهای موثر در و ردسپهر زیرین و فرآیندهای خردفیزیکی بالای لایه ذوب است.

کلمات کلیدی: بارش سنگین، تفکیک افقی، تفکیک قائم، WRF، لایه ذوب، جداسازی عامل‌ها

۱ مقدمه

همکاران، ۱۳۸۲؛ صفر و احمدی‌گیوی، ۱۳۹۶؛ خورشیددوست و همکاران، ۱۳۹۶) و یا افزایش تفکیک مدل در راستای افقی (برای نمونه، امینی و همکاران، ۱۳۹۳؛ کریمخانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷) بوده است و به تفکیک قائم (VGR: Vertical Grid Resolution) در شبیه‌سازی‌های عددی، و همبستگی آن با تفکیک افقی کمتر توجه شده است. شواهدی وجود دارد که تفکیک‌های افقی و قائم مدل را نباید به طور مستقل مشخص کرد. به‌خصوص، ویژگی‌های فیزیک-ای که با افزایش تفکیک شبکه افقی به خوبی قابل شبیه‌سازی هستند

پیش‌بینی هر چه صحیح‌تر میزان بارش از عوامل مهم و موثر در مدیریت آب و انواع طرح‌های وابسته به آن است. رویدادهای بارش سنگین اغلب باعث به‌وجود آمدن مخاطرات طبیعی برای انسان‌ها و زیرساخت‌ها می‌شوند که عدم پیش‌بینی آن منجر به افزایش خطر، بدلیل عدم آگاهی سازمان مدیریت بحران و سایر سازمان‌های درگیر می‌گردد. در زمینه شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش مطالعات بسیاری صورت گرفته است که در این‌شبیه‌سازی‌ها بیشتر توجه پژوهشگران داخلی به تعیین بهترین طرحواره‌های عددی (برای نمونه، آزادی و

صفر درجه سلسیوس می‌رسد) به علت افزایش تعداد لایه‌ها در بالای لایه ذوب مهارت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. همچنین در ارتباط با افزایش تعداد ترازها در لایه سطحی بیان نموده‌اند که از لحاظ فیزیکی حداقل نیاز است تا تراز اول مدل در لایه سطحی باشد تا شارهای گرمایی و تکانه تلاطمی سطحی به‌طور صحیحی محاسبه گردد. ایشان نتیجه گرفتند که با افزایش تفکیک قائم مدل در لایه سطحی شبیه‌سازی فرآیندهای سطحی ارتقاء می‌یابد و مهارت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. در ارتباط با ارتقاء خروجی مدل گردش کلی جو (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) با افزایش تعداد ترازها در لایه سطحی، شین همکاران (۲۰۱۹) نیز به نتایج مشابهی رسیدند. همچنین چو و همکاران (۲۰۱۸) با افزایش تعداد ترازهای قائم (۵۷ تراز) در پکن بارش‌های حدی را با استفاده از مدل WRF شبیه‌سازی ارزیابی نمودند. وو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تفکیک‌های افقی و قائم مختلف توفان و مسیر توفان بر دریای جنوبی چین را شبیه‌سازی نمودند.

ایشان بیان داشتند که شدت توفان شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل با وضوح بالا، به وضعیت واقعی نزدیکتر است و شبکه‌های تو در تو می‌توانند دقت و کارایی محاسباتی را بهبود بخشند. نتایج شبیه‌سازی تحت تأثیر تفکیک عمودی با استفاده از ۳۵ لایه بهتر از نتایج شبیه‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی‌های ۲۰ و ۲۸ لایه است.

همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، در زمینه شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش مطالعات بسیاری در کشور ایران صورت گرفته است اما در بیشتر این شبیه‌سازی‌ها بیشتر توجه پژوهشگران به افزایش تفکیک مدل در راستای افقی بوده و به تفکیک قائم در شبیه‌سازی‌های عددی و همبستگی آن به تفکیک افقی کمتر توجه شده است.

برای مثال امینی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی اثر تفکیک مدل WRF در پیش‌بینی بارش سنگین در استان اصفهان پرداخته‌اند. در این پژوهش مدل WRF با تفکیک ۲۷، ۹ و ۳ کیلومتر در

نیز باید با افزایش تفکیک شبکه قائم به خوبی قابل شبیه‌سازی باشند (و بالعکس) (وارنر، ۲۰۱۱). بزرگ بودن گام شبکه در راستای قائم، باعث ایجاد امواج گرانی کاذب در هنگام شبیه‌سازی می‌شود و شبیه‌سازی توسط مدل ضعیف ارائه می‌شود. این مسئله به‌طور معمول در زمینه ویژگی‌های شیب‌دار در جو مانند جبهه‌ها (اسنایدر و همکاران ۱۹۹۳) یا همرفت مورب ناشی از ناپایداری شرطی متقارن توصیف شده است (پرسون و وارنر ۱۹۹۱). رابطه ریاضی که سازگاری بین افزایش تفکیک شبکه‌های قائم و افقی را تعیین می‌کند، توسط نویسندگان مختلف متفاوت تعریف شده است، اما این عبارات از نظر عملیاتی کاملاً شبیه به هم هستند (وارنر، ۲۰۱۱). مطالعات بسیاری اهمیت رابطه بین فواصل شبکه افقی و قائم را در عددی نشان داده‌اند (به عنوان مثال پکنیک و کیسر، ۱۹۸۹؛ لیندزن و فاکس راینوویتز، ۱۹۸۹؛ پرسون و وارنر، ۱۹۹۱؛ ایگا و همکاران، ۲۰۰۷ و کونر و رندال، ۲۰۱۸).

ایگا و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه اهمیت همبستگی بین تفکیک افقی و قائم، مدل جهانی غیر هیدرواستاتیک تازه توسعه یافته برای آزمایش‌های چرخه زندگی امواج کژفشاری را استفاده و وابستگی به تفکیک ساختارهای جبهه‌ای را بررسی نموده‌اند. نتایج آنها نشان داد که به‌طور کلی، با افزایش تفکیک افقی، جریانات قائم قابل مشاهده می‌شوند. با این حال، اگر نسبت فواصل شبکه عمودی و افقی در مقایسه با شیب جبهه به اندازه کافی ناچیز باشد، ساختار کلی جبهه بدون تغییر باقی می‌ماند. در مقابل، وقتی نسبت فواصل شبکه افقی و عمودی از ۲ تا ۴ برابر شیب جبهه فراتر رود، امواج گرانی کاذب در جبهه سرد ایجاد می‌شوند. ایگو و همکاران (۲۰۰۹)، شبیه‌سازی با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF (Weather Research and Forecasting) برای بررسی اثر VGR بر پیش‌بینی بارش تابستانه در آمریکای شمالی را انجام داده‌اند. ایگو و همکاران (۲۰۰۹) نتیجه گرفتند که با افزایش VGR در بالای لایه ذوب (ارتفاعی از سطح زمین که در آن دمای جو به

همکاران (۲۰۰۹) است. در ابتدا در بخش اول سه سامانه بارشی منجر به سیل در حوضه‌های غربی کشور هر کدام با طول عمر ۴ روز از لحاظ مقدار و توزیع بارش معرفی می‌گردد. در ادامه در بخش دوم تنظیمات اجرای مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF، و مشخصات تفکیک افقی و قائم مدل و نحوه انتخاب و موقعیت ترازهای قائم به تفصیل بیان می‌شود.

۲-۱ سامانه‌های بارشی مورد بررسی

در ادامه در بخش‌های الف تا ج نقشه نحوه توزیع و مقدار بارش رخ داده در سه سامانه بارشی با الگوی زمستانی (زمستان گسترده) که منجر به وقوع سیل در مرزهای غربی (مناطق غرب و جنوب غرب کشور) کشور گردیده نشان داده شده است.

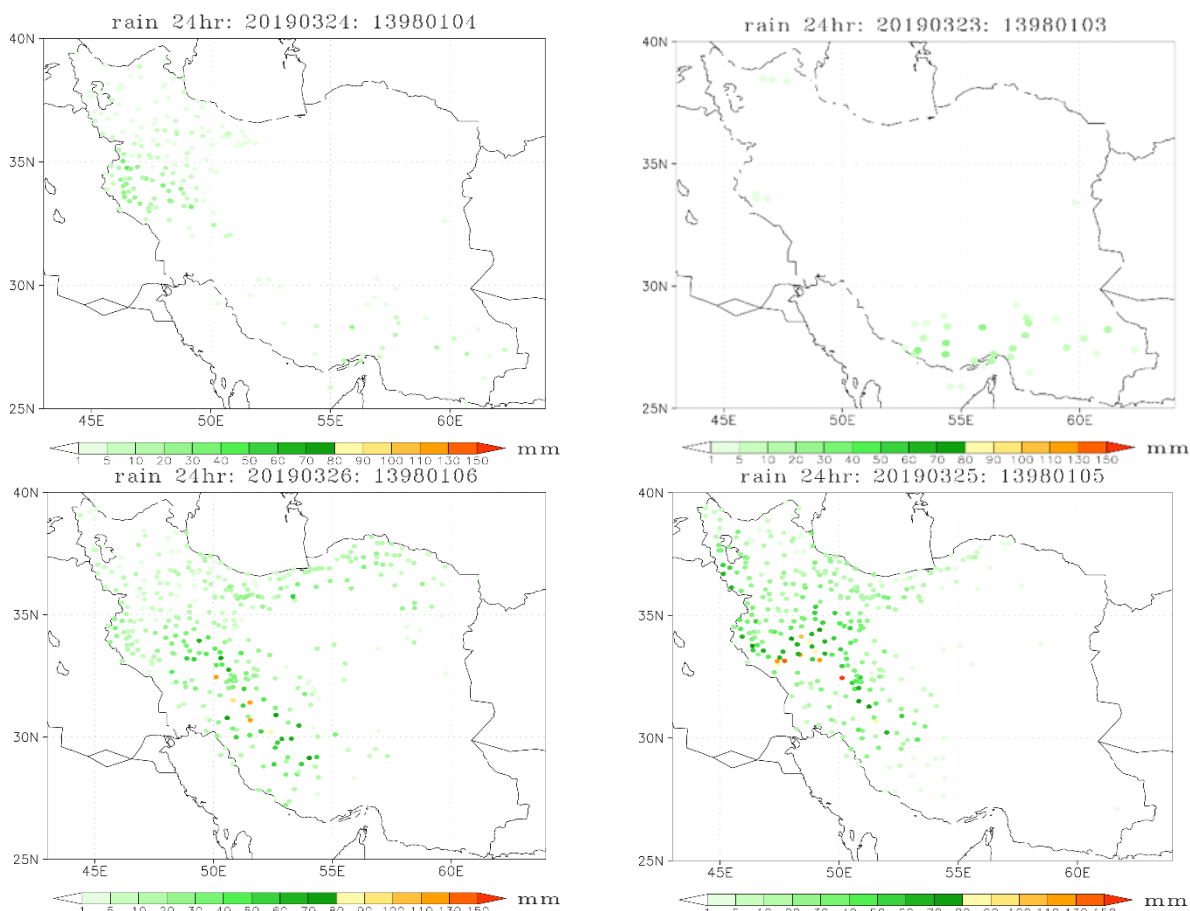
الف) 26-23 مارس ۲۰۱۹ (6-3 فروردین ۱۳۹۸)

سامانه بارشی اول در بازه زمانی ۲۳ تا ۲۶ مارس ۲۰۱۹ (سوم تا ششم فروردین ۱۳۹۸) فعال بوده که منجر به وقوع سیل در مرزهای غربی کشور شده است. در این سامانه، در روز پنجم فروردین در هشت ایستگاه هواشناسی گزارش بارش بیش از ۶۰ میلی‌متر به ترتیب در استان‌های چهارمحال و بختیاری، لرستان، ایلام، همدان، مرکزی، کرمانشاه، آذربایجان غربی و فارس شده است که بیشینه آن به میزان ۱۵۳ میلی‌متر در ایستگاه کوه‌رنگ استان چهارمحال و بختیاری گزارش شده است. همچنین در روز ششم فروردین ۱۳۹۸ در پنج استان کشور بارش بیش از ۶۰ میلی‌متر گزارش شده است که این استان‌ها به ترتیب عبارتند از اصفهان، چهارمحال و بختیاری، فارس، کهگیلویه و بویراحمد و مرکزی و بیشینه بارش مربوط به ایستگاه سمیرم استان اصفهان و ایستگاه کوه‌رنگ استان چهارمحال و بختیاری به میزان ۱۱۲ میلی‌متر بوده است. مقدار بارش بیش از یک میلی‌متر در سطح کشور در این بازه زمانی در شکل ۱، نشان داده شده است که تمرکز بیشینه بارش در حوضه‌های مرز غربی است.

مطالعه موردی بارش سنگین اتفاق افتاده در استان اصفهان، اجرا شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد اجرای مدل با تفکیک ۳ کیلومتر از نتایج بهتری برخوردار است. کریمخانی و همکاران (۱۳۹۶) در حوضه‌های آبریز کرخه و کارون به بررسی پنج مورد بارش سنگین رخ داده در منطقه پرداخته‌اند. در این بررسی مدل WRF با تفکیک افقی ۴، ۱۲ و ۳۶ کیلومتر برای پنج مورد منتخب اجرا شده است. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش دقت پیش‌بینی بارش با افزایش تفکیک افقی مدل است. همچنین گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) به منظور بررسی اثر تفکیک مدل در پیش‌بینی بارش از داده‌های GFS (Global Forecast System) و مدل WRF با تفکیک افقی ۳ کیلومتر استفاده نموده‌اند. بدین منظور سه مورد از بارش‌های تاریخی که منجر به رخداد سیلاب در منطقه مورد مطالعه شده است، انتخاب و با استفاده از مدل WRF شبیه‌سازی شده است. در این مطالعه نتایج حاصل از برون‌داد مدل WRF و پیش‌بینی‌های بزرگ مقیاس NCEP (National Centers for Environmental Prediction) با مقدار بارش مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد که بارش‌های پیش‌بینی شده توسط NCEP بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد شده‌اند. بر اساس مطالب بیان شده، از آنجا که کمتر به اهمیت VGR در کنار توجه به تفکیک افقی مدل پرداخته شده است در این مطالعه، به بررسی تاثیر تفکیک افقی و قائم مدل بر بهینه‌سازی پیش‌بینی بارش پرداخته می‌شود.

۲ روش تحقیق

با توجه به مطالب ذکر شده در ارتباط با وابستگی تفکیک قائم و افقی مدل و همچنین اهمیت شرایط پایداری جو بر نتایج حاصل از تغییرات تفکیک مدل (الیگو و همکاران، ۲۰۰۹)، حاصل از تغییرات تفکیک مدل (الیگو و همکاران، ۲۰۰۹)، اساس کار این مطالعه مطابق با روش مطالعه الیگو و



شکل ۱. بارش ۲۴ ساعته بیش از یک میلی‌متر گزارش شده در ایستگاه‌های همدیدی کشور در بازه زمانی ۱۳۹۸/۱/۳-۲۰۱۹/۳/۲۳ تا ۱۳۹۸/۱/۶-۲۰۱۹/۳/۲۶

فارس بیش از ۶۰ میلی‌متر ثبت شده است. مقدار بارش بیش از یک میلی‌متر در سطح کشور در این بازه زمانی در شکل ۲، نشان داده شده است که تمرکز بیشینه بارش در روز ۱۱ و ۱۲ فروردین در غرب کشور است.

ج) رویداد بارشی

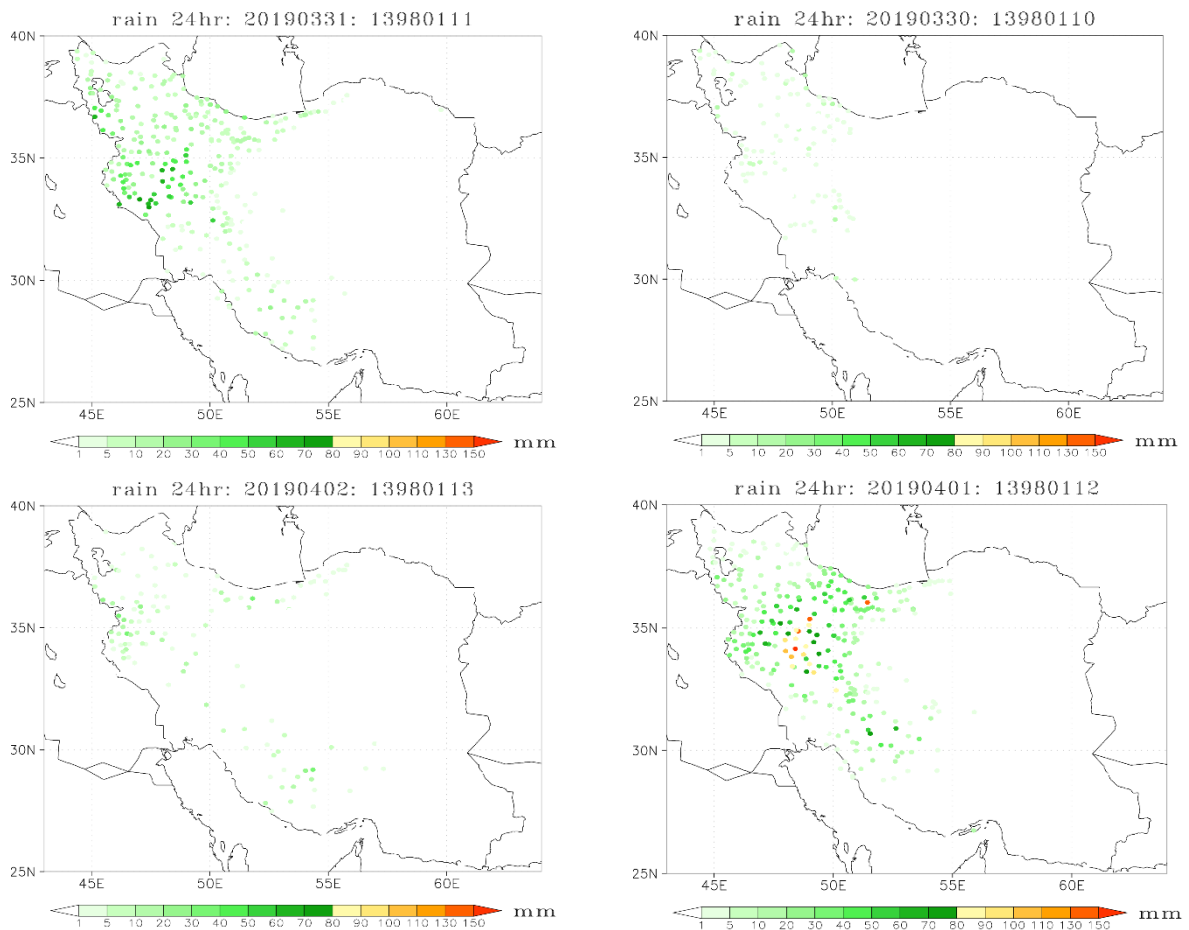
۳۰-۲۷ ژانویه ۲۰۱۹ (۱۰-۷ بهمن ۱۳۹۷)

در این سامانه بارشی بیشینه بارندگی در روز هشتم بهمن ۱۳۹۷ رخ داده است. بیشینه بارش ثبت شده در این روز به میزان ۲۰۰ میلی‌متر در ایستگاه پاره استان کرمانشاه ثبت شده است. همچنین مقدار بارندگی ثبت شده در سایر ایستگاه‌های کشور در این روز در استان‌های ایلام، کردستان، آذربایجان غربی

ب) رویداد بارشی

۳۰ مارس تا دوم آوریل ۲۰۱۹ (۱۳-۱۰ فروردین ۱۳۹۸)

در این سامانه بارشی شدت بارش در استان‌های غربی کشور شامل استان‌های ایلام، لرستان، همدان، کرمانشاه، البرز، چهارمحال و بختیاری، مرکزی، کهگیلویه و بویراحمد، زنجان کردستان، آذربایجان غربی و فارس بوده که منجر به وقوع سیل در مناطق زیادی از غرب کشور شده است. بیشینه بارش در روز ۱۲ فروردین و به میزان ۱۵۵ میلی‌متر در ایستگاه نهاوند استان همدان گزارش شده است. همچنین در این روز میزان بارش روزانه در استان‌های البرز، لرستان، کرمانشاه، چهارمحال و بختیاری، مرکزی، کهگیلویه و بویراحمد، زنجان کردستان و



شکل ۲. بارش ۲۴ ساعته بیش از یک میلی‌متر گزارش شده در ایستگاه‌های همدیدی کشور در بازه زمانی ۲۰۱۹/۳/۳۰ تا ۲۰۱۹/۴/۲ (۱۳۹۸/۱/۱۰) تا ۲۰۱۹/۱/۱۳ (۱۳۹۸/۱/۱۳)

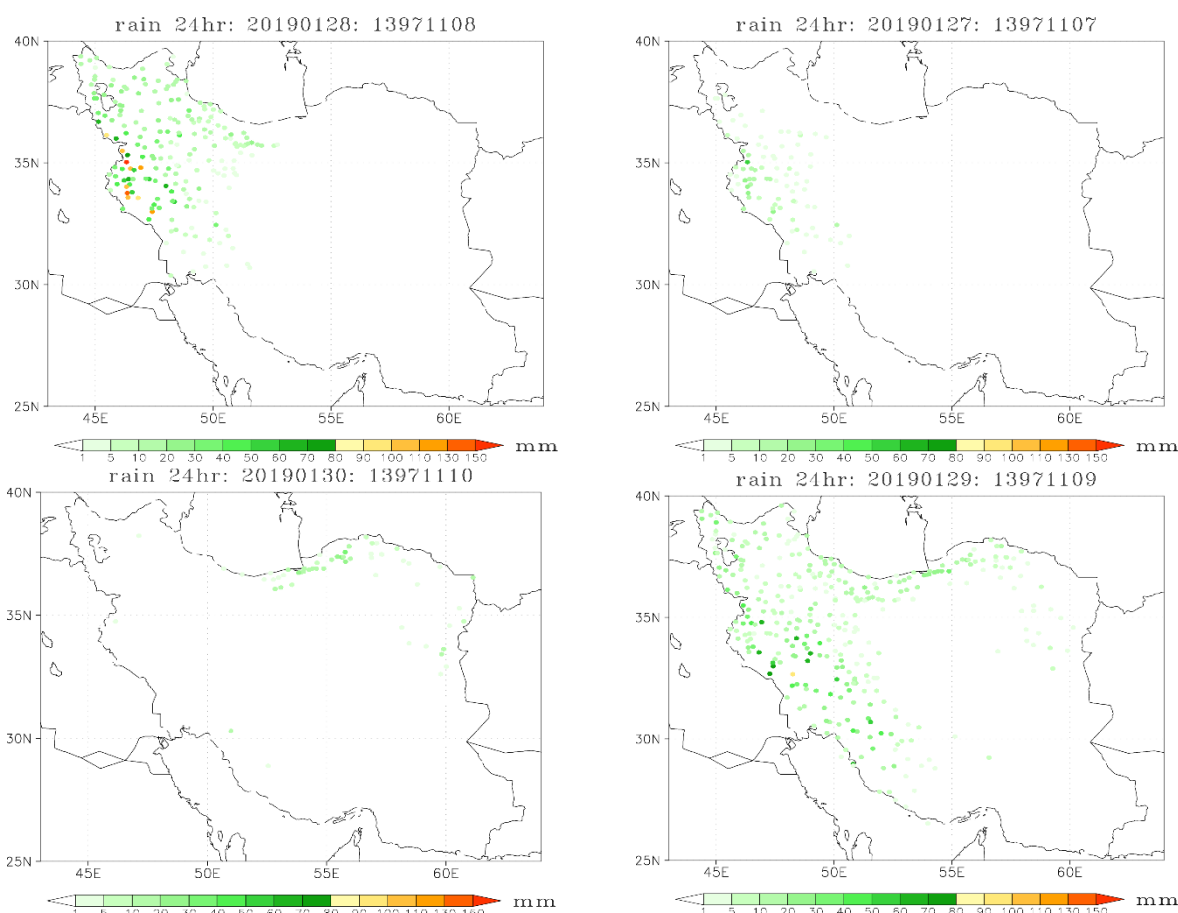
استفاده در مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF استفاده شده است. همچنین به منظور پیش‌بینی بارش روزانه سامانه‌های مورد نظر، مدل از ۳۶ ساعت قبل از تاریخ مورد بررسی اجرا شده است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی سامانه‌های مورد بررسی، بر اساس پیکربندی عملیاتی در مدل اجرایی WRF در سازمان هواشناسی (آزادی و خان‌سالاری، ۱۳۹۸) از پیکربندی موجود در جدول ۱ و در دو دامنه تو در تو بادو است. تفکیک افقی مختلف ۴۵ و ۱۵ کیلومتر و ۲۷ و ۹ کیلومتر استفاده شده است. دامنه‌های شبیه‌سازی در شکل ۴، نشان داده شده است.

از آنجا که تمرکز این مطالعه بر نقش تعداد و موقعیت ترازهای قائم بر نتایج شبیه‌سازی است، بنابراین با توجه به مطالعات انجام

و لرستان بیش از ۶۰ میلی‌متر بوده است. این میزان بارش در روز هشتم بهمن ۱۳۹۷، در مناطق بسیاری از غرب کشور منجر به وقوع سیل شده است. در روز نهم بهمن ۱۳۹۷ نیز بیشینه بارش در ایستگاه حسینه استان خوزستان و به میزان ۹۲ میلی‌متر به وقوع پیوسته است. مقدار بارش بیش از یک میلی‌متر و توزیع بارش در این چهار روز در کشور ایران در شکل ۳، نشان داده شده است.

۲-۲ داده‌ها و پیکربندی مدل

در این بخش به منظور شبیه‌سازی بارش‌های سنگین رخ داده در مناطق غربی ایران از داده‌های GFS با تفکیک افقی ۰/۵ درجه (هامیل و همکاران، ۲۰۰۶) و با فاصله زمانی ۳ ساعته جهت



شکل ۳. بارش ۲۴ ساعته بیش از یک میلی‌متر گزارش شده در ایستگاه‌های همدیدی کشور در بازه زمانی ۲۰۱۹/۱/۲۷ تا ۲۰۱۹/۱/۳۰ (۱۳۹۷/۱۱/۷) تا ۲۰۱۹/۱/۱۰ (۱۳۹۷/۱۱/۱۰)

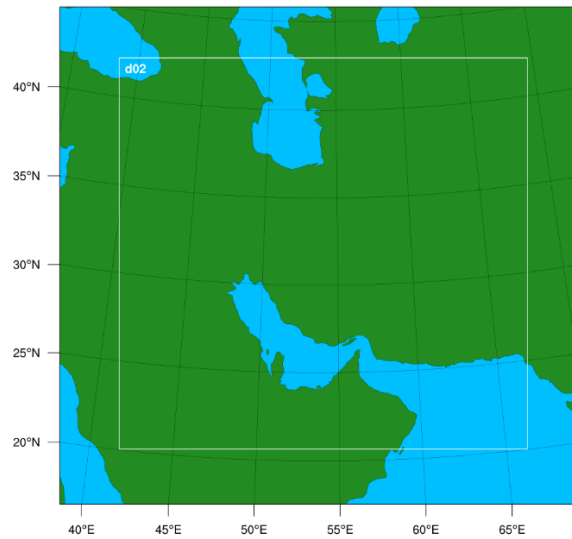
ترازها در بالای لایه ذوب با ۵۷ تراز قائم و ALL مربوط به اجرای مدل با افزایش تعداد ترازها در کل لایه‌های وردسپهر با ۶۰ تراز قائم (حالت ترکیبی DNL و UPL) است. محدوده ارتفاع ترازها در کلیه شبیه‌سازی‌ها از سطح زمین تا ارتفاع حدود ۱۶ کیلومتر است که در اجرای DNL نسبت به اجرای کنترلی تقریباً در محدوده ۲۰۰ تا ۳۵۰۰ متری تعداد ترازها افزایش یافته است. در اجراهای UPL و ALL نسبت به اجرای کنترلی به ترتیب تقریباً از ۲۵۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر به بالا تعداد ترازها افزایش یافته است.

شده در این زمینه (الیگو و همکاران، ۲۰۰۹) از چهار ترکیب موقعیت و تعداد تراز قائم استفاده شده است. تعداد ترازهای پیش‌فرض مدل میان مقیاس WRF که توسط کاربران این مدل عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ۳۱۰ تراز است که در بالای ارتفاع یک کیلومتری دارای VGR ضعیفی است. در مطالعه حاضر موقعیت و ارتفاع ترازهای قائم از سطح زمین در اجراهای مختلف، در شکل ۵، نشان داده شده در این شکل، CON مربوط به اجرای کنترلی با ۳۱ تراز قائم، DNL مربوط به اجرای با افزایش تعداد ترازها در لایه‌های زیرین وردسپهر با ۳۵ تراز قائم، UPL مربوط به افزایش تعداد

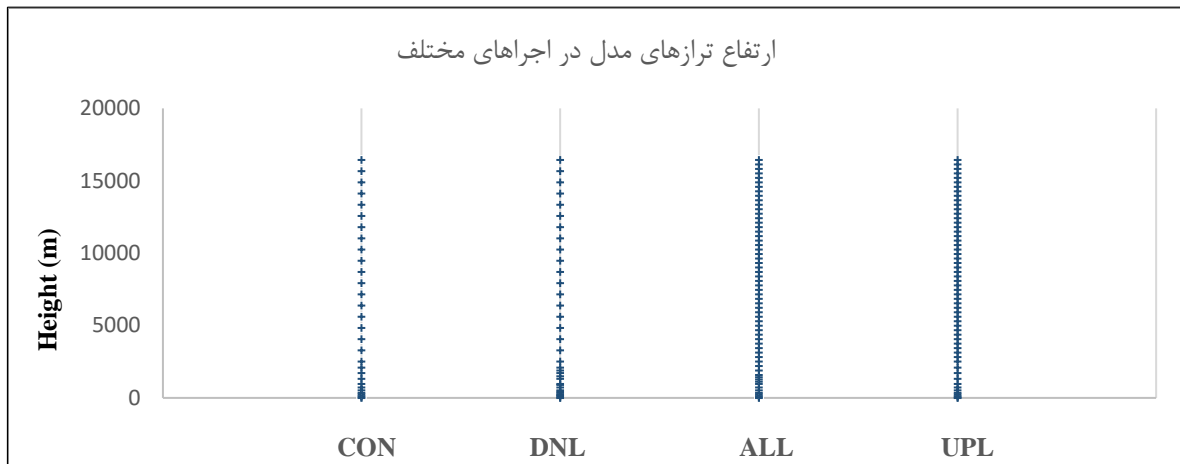
جدول ۱. پیکربندی مورد استفاده در اجرای مدل WRF، اعداد داخل پرانتز مربوط به گزینه انتخابی طرح‌واره‌ها است.

Cumulus Physics	Boundary Layer	Microphysics
Kain-Fritsch (1), Kain (2004)	Mellor-Yamada-Janjic (2), Janjic (1994)	Lin (2), Chen and Sun (2002)
Surface-layer	Land-Surface	Shortwave/Longwave Radiation physics
Eta Similarity (2), Janjic (2002)	Unified Noah (2), Tewari et al. (2004)	Dudhia (1), Dudhia (1989) RRTM(1), Mlawer et al. (1997)

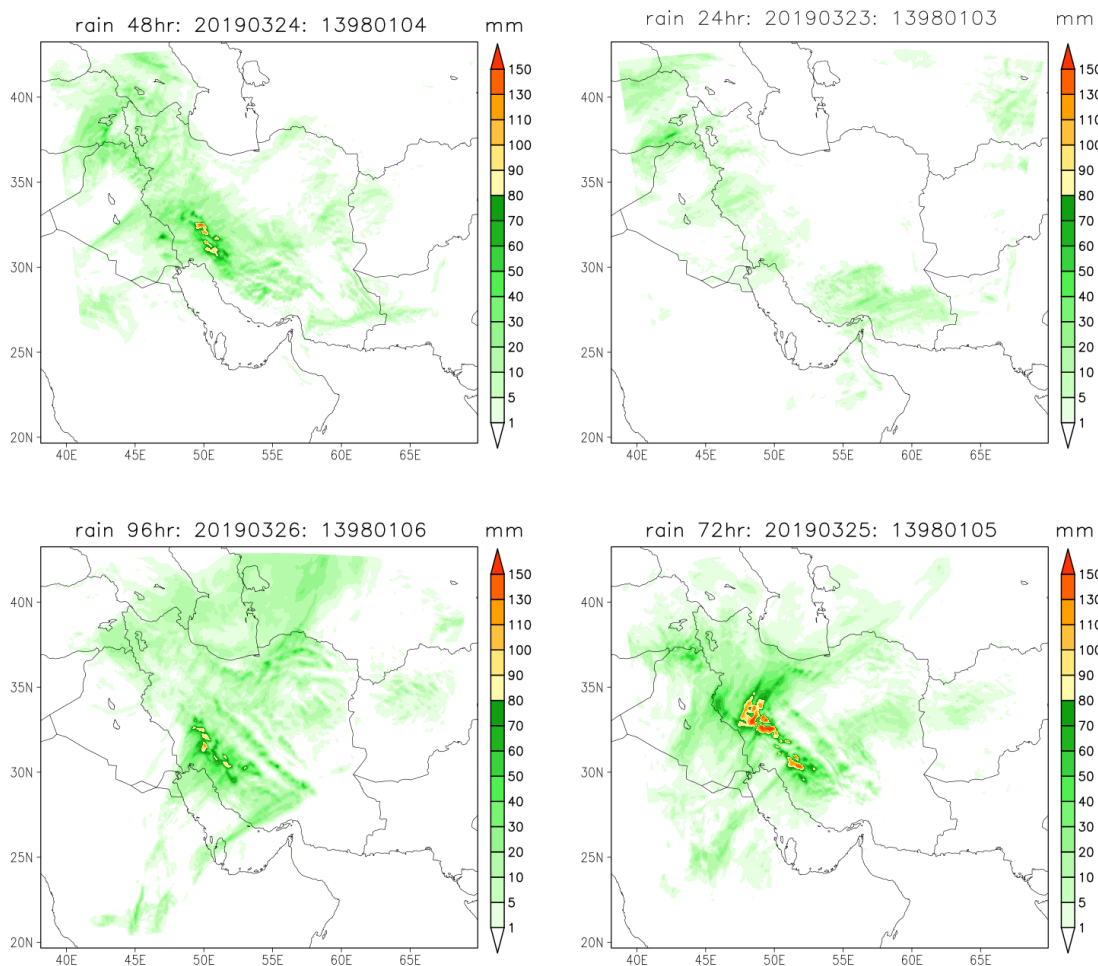
WPS Domain Configuration



شکل ۴. منطقه جغرافیایی دو دامنه مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها



شکل ۵. موقعیت و ارتفاع ترازهای قائم از سطح زمین در اجراهای با تعداد ترازهای مختلف، اجرای مرجع با ۳۱ تراز قائم، DNL با ۳۵ تراز قائم، ALL با ۶۰ تراز قائم (حالت ترکیبی DNL و UPL)، UPL با ۵۷ تراز قائم



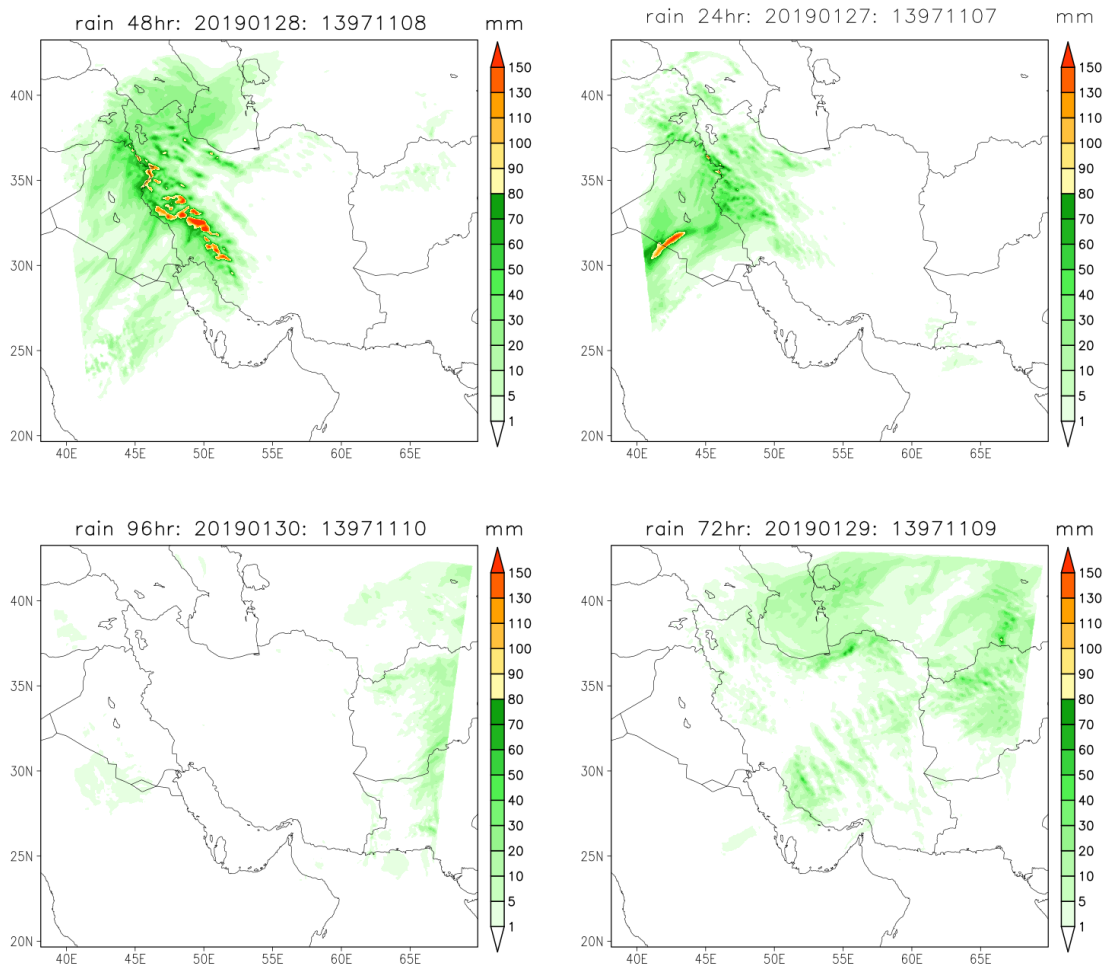
شکل ۶. بارش ۲۴ ساعته شبیه‌سازی شده بیش از یک میلی‌متر با تفکیک افقی ۹ کیلومتر و ۳۱ تراز قائم، در روزهای ۲۰۱۹/۳/۲۳ تا ۲۰۱۹/۳/۲۶ (۱۳۹۸/۱/۳) تا ۲۰۱۹/۳/۲۶ (۱۳۹۸/۱/۶)

بارش مربوط به شبیه‌سازی با تفکیک افقی ۹ کیلومتر و ۳۱ تراز قائم (اجرای کنترلی) در شکل‌های ۶ تا ۸، نشان داده شده است. در ادامه و برای بررسی دقیق‌تر نتایج امتیازهای درستی سنجی برای شبیه‌سازی‌ها در جدول ۲ ارایه و بررسی شده است. با توجه به جدول ۲، مقادیر شاخص‌های درستی سنجی بیان‌گر برتری شبیه‌سازی با تفکیک افقی ۹ کیلومتر (9KM-CON) نسبت به تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر (15KM-31LEV) است. به بیان دیگر با افزایش تفکیک افقی در ۱۲ روز مورد بررسی، میانگین دقت پیش‌بینی بارش (جدول ۲)، ارتقاء یافته است.

۳ نتایج شبیه‌سازی

۳-۱ نتایج شبیه‌سازی سامانه‌های بارش‌زای مورد مطالعه

در سامانه‌های بارشی مورد مطالعه، نتایج شبیه‌سازی این سامانه‌ها برای پیکربندی مطرح شده در جدول ۱ و با دو تفکیک افقی ۱۵ و ۹ کیلومتر (دامنه دوم شبیه‌سازی) و با چهار ترکیب تراز قائم جـو در مقایسه چشمی با مقدار بارش دیدبانی شده (شکل‌های ۱ تا ۳) بیانگر تایید قابل قبول و مشابه برای هر پنج اجرا در هر چهار روز سه سامانه مورد بررسی است. بدلیل زیادبودن تعداد شکل‌ها و محدودیت حجم مقاله، تنها خروجی



شکل ۸. بارش ۲۴ ساعته شبیه‌سازی شده بیش از یک میلی‌متر با تفکیک افقی ۹ کیلومتر و ۳۱ تراز قائم، در روزهای ۲۰۱۹/۱/۲۷ تا ۲۰۱۹/۱/۳۰ (۱۳۹۷/۱۱/۷) تا ۲۰۱۹/۱/۱۰ (۱۳۹۷/۱۱/۱۰)

با توجه به جدول ۲ با افزایش تعداد لایه‌های در بالای لایه ذوب ((9KM-UPL (57LEV)) نتایج پیش‌بینی در تمام آستانه‌ها بهتر شده است. در حقیقت با افزایش VGR در بالای لایه ذوب متوسط (UPL)، به علت افزایش تعداد لایه‌ها در بالای لایه ذوب که منجر به بهبود شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی می‌شود، مهارت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. بدین منظور برای بررسی این مطلب برای نمونه در روز بیشینه بارش ۲۵ مارس سال ۲۰۱۹ که مربوط به سامانه اول مورد بررسی در این تحقیق است، مولفه قائم سرعت و رطوبت نسبی در منطقه بیشینه بارش در غرب کشور در شکل ۹، نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است با افزایش تعداد ترازاها در بالای لایه ذوب حالت اشباع با

اما در بررسی مستقل هر کدام از روزهای هر یک از سه سامانه، در بعضی موارد در آستانه‌های بارشی (آستانه بارشی بیشتر از ۵ و ۱۰ میلی‌متر) نتایج اجرای با تفکیک افقی بالاتر، مهارت پیش‌بینی افزایش چشمگیری ندارد و یا حتی حالت تساوی را نشان می‌دهد. اطلاعات جدول ۲ بر اساس میانگین مقادیر شاخص‌های درستی سنجی است و در هر کدام از شبیه‌سازی‌ها جدول‌های درستی سنجی به دلیل تعداد زیاد آنها آورده نشده است. برای مثال در شبیه‌سازی روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۹ در هر دو اجرای با تفکیک ۱۵ و ۹ کیلومتر برای آستانه بار بیشتر از ۵ میلی‌متر مقدار PSS و TS مساوی هستند و به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۲۴ است. با تمرکز بر شبیه‌سازی با تفکیک افقی ۹ کیلومتر

$$S_{ALL} - S_{CON} = (S_{UPL} - S_{CON}) + (S_{DNL} - S_{CON}) + S_Y \quad (1)$$

در این رابطه S_{CON} مربوط به مهارت پیش‌بینی در اجرای کنترلی، S_{ALL} و S_{UPL} نیز به ترتیب مربوط به مهارت پیش‌بینی در اجرای با افزایش تفکیک قائم مدل در سرتاسر لایه وردسپهر و در بالای لایه ذوب است. همچنین S_{DNL} مربوط به اجرای با افزایش تفکیک قائم مدل در لایه زیرین وردسپهر است. در این رابطه S_Y که سهم برهمکنش عامل‌ها را نشان می‌دهد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_Y = S_{ALL} - (S_{UPL} + S_{DNL}) + S_{CON} \quad (2)$$

بنابراین نتایج ترکیبی این دو حالت یعنی افزایش تعداد ترازها در کل جو (ALL) به علت برهمکنش منفی این دو ساختار (UPL و DNL) (رابطه ۱) منجر به فرآیند پیش‌بینی شده است. بر اساس نتایج امتیاز مهارتی پیرس در ۱۲ روز مورد بررسی، در شبیه‌سازی با تفکیک افقی ۹ کیلومتر و ۴ انتخاب متفاوت تفکیک قائم، مقدار متوسط S_Y که برهمکنش عامل‌ها را نشان می‌دهد، برای آستانه-های بارشی بیشتر از ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب ۰/۰۴-، ۰/۰۵- و ۰/۰۴- به دست آمد.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بهبود کیفیت و مهارت پیش‌بینی بارش به‌خصوص بارش‌های سنگین حوضه‌های مرزی غرب ایران توسط مدل میان‌مقیاس عددی WRF، بر حساسیت شبیه‌سازی به تفکیک مدل تمرکز شده است. بنابراین در این مطالعه، شبیه‌سازی سه سامانه بارشی با شدت فعالیت در منطقه غرب ایران هر کدام با طول عمر چهار روز با استفاده از داده‌های GFS با دو تفکیک افقی و چهار ترکیب موقعیت و تعداد تراز قائم انجام شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد در روزهایی که شدت بارش رخ داده قابل توجه است، با افزایش تفکیک افقی نتایج شبیه‌سازی بارش بهبود می‌یابد. اما اگر مقدار بارش قابل توجه نباشد میانگین نتایج شبیه‌سازی با افزایش تفکیک افقی اجرای مدل تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد.

افزایش رطوبت نسبی و مولفه قائم سرعت در مناطق بیشینه بارش بهتر شبیه‌سازی شده است. با توجه به جدول ۲، بررسی مقادیر PC نشان می‌دهد که برای آستانه‌های بارشی بیشتر از ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر با افزایش VGR در حالت UPL نسبت به اجرای کنترلی به ترتیب از ۰/۷۶، ۰/۸۱، ۰/۸۷ و ۰/۸۹ به ۰/۷۷، ۰/۸۲، ۰/۸۸ و ۰/۹۱ افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش تعداد ترازها در بالای لایه ذوب تعداد پیش‌بینی‌های درست چه در حالتی که بارش در آستانه مورد نظر رخ داده است و چه در حالتی که بارش در آستانه مورد نظر رخ نداده است، افزایش یافته است. همچنین با افزایش تعداد ترازها در زیر لایه ذوب (DNL) در آستانه‌های بارش بیشتر از ۵ و ۱۰ میلی‌متر از مهارت پیش‌بینی کاسته شده است. اما در آستانه بارشی بیش از ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر با شبیه‌سازی بهتر مولفه قائم سرعت و رطوبت نسبی در زیر تراز انجماد (حالت اشباع با افزایش رطوبت نسبی و مولفه قائم سرعت در مناطق بیشینه بارش و در زیر تراز انجماد بهتر شبیه‌سازی شده است)، منجر به افزایش مهارت پیش‌بینی فرآیندهای آبر گرم شده است. برای نمونه در روز بیشینه بارش ۲۵ مارس سال ۲۰۱۹ در این مطالعه، مولفه قائم سرعت و رطوبت نسبی در منطقه بیشینه بارش در غرب کشور در شکل ۹، قابل بررسی و مقایسه با اجرای کنترلی است.

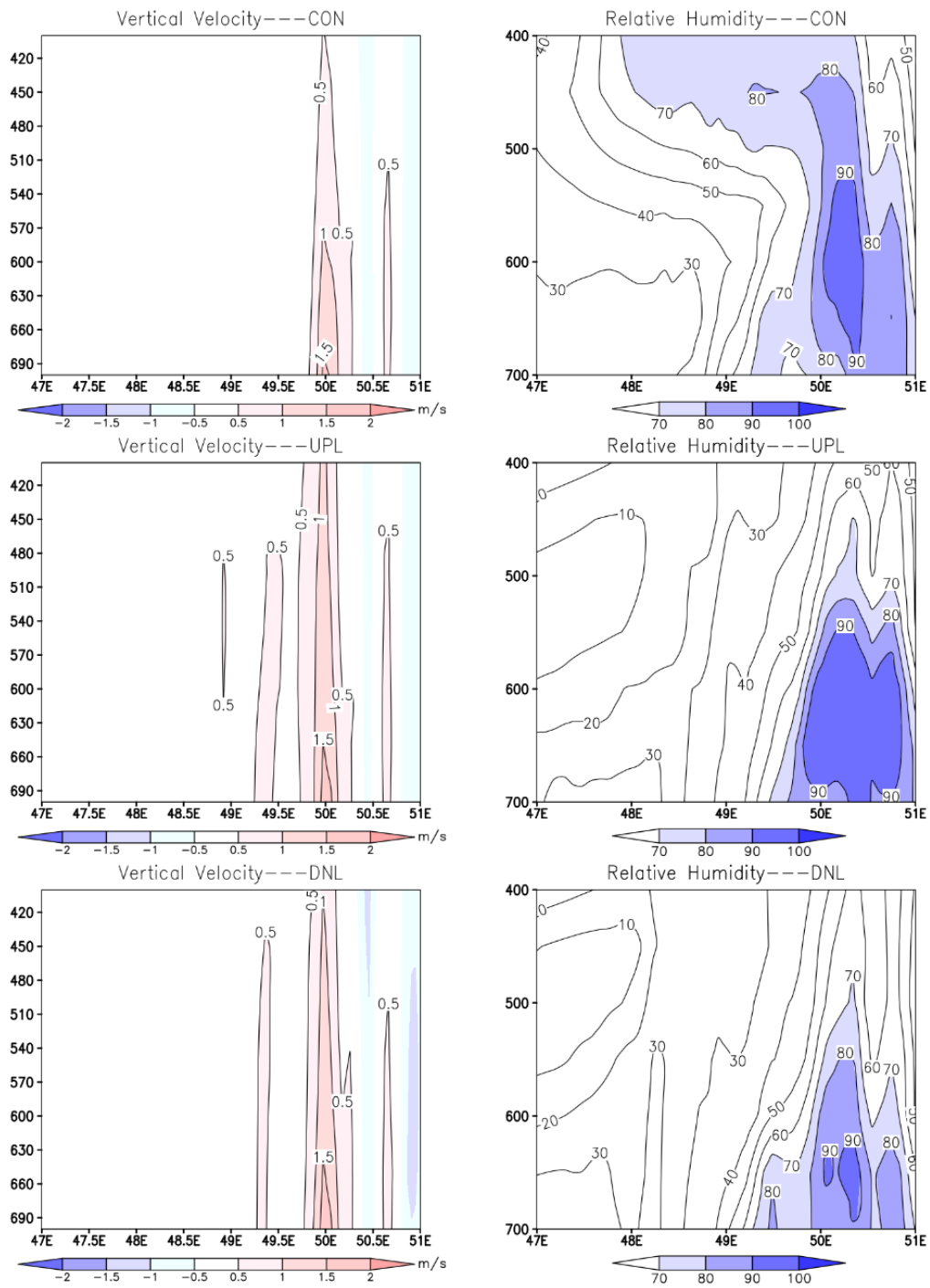
با توجه به جدول ۲، نتایج ترکیبی این دو حالت (UPL و DNL) یعنی افزایش تعداد ترازها در کل جو (ALL) کاهش مهارت و کیفیت پیش‌بینی را نشان می‌دهد. به منظور بررسی نتایج ترکیبی این دو حالت (UPL و DNL) نیاز به بررسی محاسبه برهمکنش دو حالت اجرایی UPL و DNL است. با استفاده از رابطه جداسازی عامل‌های موثر (استین و آلپرت، ۱۹۹۳) در بالای لایه ذوب و لایه زیرین لایه ذوب (رابطه ۱) محاسبات نشان می‌دهد که به علت برهمکنش منفی تراز پایین و بالای وردسپهر، با افزایش تفکیک مدل در سرتاسر لایه وردسپهر در بعضی از سامانه‌های جو، به‌طور کلی مهارت پیش‌بینی در حالت میانگین کاهش می‌یابد.

جدول ۲. میانگین کمیت‌های درستی سنجی برای دو تفکیک افقی ۱۵ و ۹ کیلومتر در سه سامانه بارشی چهار روزه، نتایج ارتقاء یافته نسبت به شبیه‌سازی کنترلی که با تفکیک افقی ۹ کیلومتر است (9KM-CON (31LEV)) با رنگ قرمز مشخص شده است

ردیف	15KM-CON (31LEV)	PSS	TS	PC	B
۱	بارش بیشتر از ۵ میلی‌متر	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۷۴	۱/۲
۲	بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۷۹	۱/۱۶
۳	بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۸۶	۱/۰۷
۴	بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر	۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۸۶	۱/۳
۵	9KM-CON (31LEV)	PSS	TS	PC	
۶	بارش بیشتر از ۵ میلی‌متر	۰/۴۷	۰/۴۰	۰/۷۶	۰/۹۶
۷	بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۰/۵۱	۰/۳۷	۰/۸۱	۰/۹۵
۸	بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۸۷	۰/۹۱
۹	بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۸۹	۱/۱
۱۰	9KM-UPL (51LEV)	PSS	TS	PC	
۱۱	بارش بیشتر از ۵ میلی‌متر	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۷۷	۱/۰۳
۱۲	بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۸۲	۱
۱۳	بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر	۰/۳۸	۰/۲۴	۰/۸۸	۰/۹۸
۱۴	بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر	۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۹۱	۱
۱۵	9KM-DNL (35LEV)	PSS	TS	PC	
۱۶	بارش بیشتر از ۵ میلی‌متر	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۷۵	۱/۲۵
۱۷	بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۷۹	۱/۲۹
۱۸	بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر	۰/۳۷	۰/۲۴	۰/۸۸	۱/۳
۱۹	بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر	۰/۳۵	۰/۱۹	۰/۹	۱/۲
۲۰	9KM-ALL (60LEV)	PSS	TS	PC	
۲۱	بارش بیشتر از ۵ میلی‌متر	0/39	0/36	۰/۷۴	۱/۴۵
۲۲	بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	0/48	0/32	0/79	۱/۲۸
۲۳	بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر	0/35	0/22	0/87	۱/۲۲
۲۴	بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر	۰/۲۹	۰/۱۲	۰/۸۸	۱/۳۵

راستای قائم بر مهارت پیش‌بینی، به شدت به موقعیت و جایگاه ترازهای اضافه شده و شدت بارش سامانه مورد بررسی بستگی دارد. مطالعات دقیق‌تر نشان می‌دهد با افزایش تفکیک مدل در بالای لایه ذوب با بهبود شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی، مهارت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. همچنین تنها در بارش‌های سنگین (بیشتر از ۲۰ میلی‌متر) با افزایش تفکیک مدل در لایه زیرین و ردسپهر با ارتقاء فرآیندهای لایه مرزی و ابر گرم، مهارت و کیفیت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، روابط جداسازی عامل‌های موثر در بالای لایه ذوب و لایه زیرین لایه ذوب نشان می‌دهد که به علت برهمکنش منفی تراز پایین و بالای و ردسپهر، با افزایش تفکیک مدل در سرتاسر لایه و ردسپهر در

به بیان دیگر بر اساس جدول ۲ افقی نتایج شبیه‌سازی بارش بهبود می‌یابد. اما اگر مقدار بارش قابل توجه نباشد میانگین نتایج شبیه‌سازی با افزایش تفکیک افقی اجرای مدل تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد. به بیان دیگر بر اساس جدول با افزایش تفکیک افقی در ۱۲ روز مورد بررسی، میانگین دقت پیش‌بینی بارش، ارتقاء یافته است. اما در بررسی مستقل هر کدام از روزهای هر یک از سه سامانه، در بعضی موارد در آستانه‌های بارشی کمتر (آستانه بارشی بیشتر از ۵ و ۱۰ میلی‌متر) نتایج اجرای با تفکیک افقی بالاتر، مهارت پیش‌بینی افزایش چشمگیری ندارد و یا حتی حالت تساوی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تأثیر افزایش تفکیک مدل در



شکل ۹. رطوبت نسبی (ستون سمت راست) و مولفه قائم سرعت (ستون سمت چپ) شبیه‌سازی شده در روز پیشینه بارش سامانه بارشی اول در ساعت ۱۲ UTC روز ۲۵/۳/۲۰۱۹ در منطقه پیشینه بارش (عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ تا ۵۱ درجه شرقی) (۱۳۹۸/۱/۵)

از مدل WRF منطقه مورد مطالعه: حوضه‌های آبریز کرخه و کارون، فصلنامه علمی پژوهشی اکویولوژی تالاب، سال نهم، شماره ۳۴، ۷۴-۵۵.

گودرزی، ل.، بنی حبیب، م. ا.، و غفاریان، پ.، ۱۳۹۷، ارزیابی عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی بارش‌های سنگین (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کن)، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (۱) ۲۵.

- Aligo, E., Gallus Jr., W., and Segal, M., 2009, On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts: Weather and Forecasting, **24**, 575-594.
- Chen, S. H., and Sun, W. Y., 2002, A one-dimensional time dependent cloud model: Meteorological Society of Japan, **80** (1), 99-118.
- Chu, Q., Xu, Z., Chen, Y., and Han, D., 2018, Evaluation of the ability of the Weather Research and Forecasting model to reproduce a sub-daily extreme rainfall event in Beijing, China using different domain configurations and spin-up times: Hydrol. Earth Syst. Sci., **22**, 3391-3407.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model: Journal of the Atmospheric Sciences, **46**, 3077-3107.
- Hamill, T. M., Whitaker, J. S., and Mullen, S. L., 2006, Reforecasts: An important dataset for improving weather predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc., **87**, 33-46.
- Iga, S., Tornita, H., Satoh, M., and Goto, K., 2007, Mountain-wave-like spurious waves associated with simulated cold fronts due to inconsistencies between horizontal and vertical resolutions: Monthly Weather Review, **135**, 2629-2641.
- Janjic, Z. I., 1994, The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes: Monthly Weather Review, **122**, 927-945.
- Janjic, Z. I., 2002, Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model: NCEP Office Note No. **437**, 61 pp.
- Kain, John S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization, An update: Applied Meteorology and Climatology, **43**, 170-181.

Konor, C. S., and Randall, D. A., 2018: Impacts of the horizontal and vertical grids on the numerical solutions of the dynamical equations – Part 2: Quasi-

بعضی از سامانه‌های جوئی، به‌طور کلی مهارت پیش‌بینی در حالت میانگین کاهش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش مطالعه حاضر برای تعداد موارد بیشتری صورت بگیرد تا در صورت صحت نتیجه پژوهش حاضر، نتایج بدست آمده عمومیت یابد.

۵ منابع

- آزادی، م.، و خان‌سالاری، س.، ۱۳۹۸، خدمات مشاوره، پشتیبانی سامانه هشدار سریع سیل حوضه‌های مرزی غرب ایران، طرح پژوهشی (شماره طرح: ۱۷۰۴-۱۶/۱۳۲۹۹۶۳۲۴۱۰۱۴۰)، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو.
- آزادی، م.، رضازاده، پ.، میرزایی، ا.، و وکیلی، غ.، ۱۳۸۲، پیش‌بینی عددی سیستم‌های زمستانی روی ایران: مطالعه مقایسه پارامترهای فیزیکی. هشتمین کنفرانس دینامیک شماره‌ها، شهریور ماه، دانشگاه تبریز.
- امینی ل.، پرهیزکار، د.، و خاکیان، غ. ر.، ۱۳۹۳، نقش مدل عددی WRF در عددی نمودن پیش‌بینی بارش‌های سنگین در استان اصفهان با درجه تفکیک ۲۷ و ۹ و ۳ کیلومتر، دومین کنفرانس ملی مدیریت و مهندسی سیلاب با رویکرد سیلاب-های شهری.
- خورشیددوست، ع. م.، مفیدی، ع.، رسولی، ع. ا.، و آزر، ک.، ۱۳۹۶، ارزیابی میزان حساسیت مدل RegCM4 به طرحواره‌های پارامترسازی همرفت در مدل‌سازی بارش‌های بهاره شمال غرب ایران: (مطالعه موردی سال ۲۰۰۴) فیزیک زمین و فضا، (۳) ۴۳، ۶۷۱-۶۵۱.
- صفر، م.، و احمدی گیوی، ف.، ۱۳۹۶، گزینش طرحواره همرفت بهینه بر مبنای داده‌های رادار در حین اجرای مدل WRF برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش: فیزیک زمین و فضا، (۳) ۴۳، ۵۸۵-۶۰۰.
- کریم‌خانی، م.، جمشیدی خزلی، ت.، آزادی، م.، و فتاحی، ا.، ۱۳۹۶، تاثیر تفکیک افقی بر دقت پیش‌بینی بارش با استفاده

- inconsistency of the vertical and horizontal resolution: *Monthly Weather Review*, **119**, 917–935.
- Shin, H. H., Ming, Y., Zhao, M., Chen, X., Lin, S., 2019, Improved Surface Layer Simulation Using Refined Vertical Resolution in the GFDL Atmospheric General Circulation Model: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11** (1), 905–917.
- Snyder, C., Skamarock, W. C., and Rotunno, W. C., 1993, Frontal dynamics near and following frontal collapse: *Atmospheric Sciences*, **50**, 3194–3211.
- Stein, U., and Alpert, P., 1993, Factor separation in numerical simulations: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **50**, 2107–2115.
- Warner, T. T., 2011, *Numerical Weather and Climate Prediction*: Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN: 978-0-521-51389-0. Hardback, 526 PP.
- Wu, Z., Jiang, C., Deng, B. et al., 2019, Sensitivity of WRF simulated typhoon track and intensity over the South China Sea to horizontal and vertical resolutions: *Acta Oceanologica Sinica*, **38**, 74–83.
- geostrophic Rossby modes: *Geoscientific Model Development*, **11**, 1785–1797.
- Lindzen, R. S., and Fox-Rabinovitz, M., 1989, Consistent vertical and horizontal resolution: *Monthly Weather Review*, **117**, 2575–2583.
- Martius, O., Schwierz, C., and Davies, H. C., 2006, A refined Hovmoller diaram: *Tellus*, **58**, 221–226.
- Mlawer, Eli. J., Taubman, Steven. J., Brown, Patrick. D., Iacono, M. J., and Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave: *Geophysical Research*, **102**, 16663–16682.
- Murphy. A. H., 1993, What Is a Good Forecast? An Essay on the Nature of Goodness in Weather Forecasting: *Weather and Forecasting*, **8**, 281–293.
- Pecnick, M. J., and Keyser, D., 1989, The effect of spatial resolution on the simulation of upper-tropospheric frontogenesis using a sigma-coordinate Primitive-equation model: *Meteorology and Atmospheric Physics*, **40**, 137–149.
- Persson, P. O. G., and Warner, T. T., 1991, Model GENERATION of spurious gravity waves due to the