

پیش‌بینی بارش‌های سنگین جنوب غرب ایران بر اساس داده‌گواری مدل WRF/CFSv2 (مطالعه موردی: ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹)

محمد سبزه زاری^۱، مریم رضازاده^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

چکیده

یکی از پدیده‌های حدی جوی بارش‌های سنگین و سیلاب‌های همراه با آن می‌باشد که اثرات مخربی بر شرایط زندگی انسان‌ها دارد. پیش‌بینی این پدیده در یک بازه زمانی مناسب می‌تواند باعث ایجاد آمادگی بیشتر در برابر صدمات و خسارات احتمالی باشد. هدف از این مطالعه پیش‌بینی بارش‌های سنگین بر اساس مدل فصلی CFSv2 به عنوان شرایط اولیه مدل منطقه ای WRF (مدل بدون داده‌گواری) و در نهایت داده‌گواری آن با استفاده از بسته WRFDA به روش وردشی سه بعدی موسوم به 3D-var و با استفاده از داده مشاهداتی سطح زمین، سطوح فوقانی و داده های ماهواره ای (ATMS, MHS, GPSRO) برای بارش سنگین ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹ در منطقه جنوب غرب ایران می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده مشاهداتی بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران سنجی سازمان هواشناسی، ده نقطه با بیشترین میزان مجموع بارش سامانه انتخاب گردید. برای هر یک از این نقاط، پهنه‌بندی اجزای مختلف مدل بدون داده‌گواری و با داده‌گواری از ساعت ۰۰ گرینویچ روز ۱۱ مارس تا ساعت ۱۸ روز ۱۳ مارس برای بازه زمانی بارش سنگین مورد نظر ترسیم شد. از مقایسه پهنه‌بندی برون‌داد سه مدل فصلی اولیه، بدون داده‌گواری و با داده‌گواری با میزان بارش مشاهداتی در ۱۰ نقطه انتخاب شده، بهبود قابل قبول مدل داده‌گواری نسبت به مدل فصلی اولیه به وضوح مشاهده گردید. کارایی کلی این روش با محاسبه سنج‌های پیوسته آماری میانگین مربع خطا (RMSE)، جذر میانگین مربع خطای نرمال شده (NRMSE) و خطای مطلق میانگین (MAE) برای مدل اولیه CFSv2، مدل بدون داده‌گواری و مدل داده‌گواری ارزیابی گردید. نتایج نشان از کارایی قابل پذیرش مدل بدون داده‌گواری نسبت به مدل اولیه و کارایی نسبی مدل داده‌گواری نسبت به مدل بدون داده‌گواری می‌باشد. علاوه بر این ترسیم نمودار تیلور نشان داد که مدل داده‌گواری دارای بیشترین همبستگی و کمترین خطای RMSE نسبت به مدل فصلی اولیه و مدل بدون داده‌گواری می‌باشد.

کلید واژه‌ها: داده‌گواری، داده ماهواره، بارش سنگین، مدل WRF/CFSv2.

مقدمه

کریم خانی و همکاران (۱۳۹۹) طی مطالعه‌ای ویژگی‌های خط تندرزه شامل زمان تشکیل، رشد و نابودی سلول همرفتی و همچنین بارش همراه با آن را در دو حالت داده‌گذاری (3DVAR) و بدون داده‌گذاری برای ساعت ۱۸ گرینویچ روز ۱۸ مارس ۲۰۱۷ با تفکیک افقی ۲۷ و ۹ کیلومتر و برای دو حوضه با استفاده از مدل WRF و داده رادار هواشناسی بوشهر، داده ایستگاه‌های زمینی و جو بالا انجام دادند. نتایج نشان داد که داده‌گذاری تاثیر زیادی در اصلاح نتایج شبیه سازی خط تندرزه چه در زمان تشکیل و رشد سلول‌های همرفتی و چه در بهبود پیش‌بینی میزان بارش خواهد داشت. شریفی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از داده سطح زمین، جو بالا و داده ماهواره‌ای بخار آب قابل بارش GPS در سامانه WRFDA برای دو بارندگی در شمال ایران کاهش ۵ تا ۱۳ درصد در میانگین قدر مطلق خطای پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته را بدست آوردند. ذاکری و همکاران (۱۳۹۴) به روش 3Dvar اثر داده‌گذاری داده ایستگاه‌های زمینی، جو بالا و داده تابندگی ماهواره را در یک دوره دو ماهه بررسی کرده و بهبود اندکی در پیش‌بینی ۴۸ ساعته باد و دما را مشاهده کردند.

نجفی و همکاران (۱۴۰۱) برای مطالعه پیش‌بینی بارش ماهانه ایران بر مبنای یک روش همادی با استفاده از مدل جهانی CFSv2 و ترکیب آن با مدل منطقه ای WRF اقدام نمودند. بر این اساس مدل WRF با چهار پیکربندی فیزیکی و شش شرط اولیه متفاوت به صورت یک سامانه همادی ۲۴ عضوی برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۴ و بارش اکتبر-آوریل اجرا و درستی سنجی اعضاء بر اساس آماره KGE و بارش ماهانه در ۱۴۵ ایستگاه ایران انجام گردید. اجرای این مدل برای پیش‌بینی بارش ماهانه در دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰ به صورت یک مورد مطالعاتی نشان داد که این مدل می‌تواند پراکندگی و هسته‌های بارش ماهانه را بخوبی پیش‌بینی نماید. اُه جیبون و همکاران (۲۰۲۲) بر روی داده CFSv2 از روش تصحیح اریبی متوسط روزانه استفاده نمودند. آنها با استفاده از چند مورد مطالعاتی، ارزیابی دقت شبیه سازی RCM با تفکیک بالا را در بهبود عملکرد پیش‌بینی S2S با استفاده از تصحیح اریبی مرز جانبی انجام دادند. سپس برای مورد موج گرمای شدید کشور کره در سال ۲۰۱۸ و بر مبنای شبیه سازی ۴۵ روز متوالی با استفاده از مدل WRF با قدرت تفکیک ۳-۹ و ۲۷ کیلومتر نتیجه گرفتند

بارش نقش کلیدی در چرخه هیدرولوژی منطقه‌ای و جهانی ایفا می‌کند. همچنین بارش یک متغیر محیطی پیچیده در مدل‌سازی و پیش‌بینی در سامانه‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP) می‌باشد (Chambon, 2013). استفاده از پیش‌بینی با قدرت تفکیک بالا برای بارش‌های سنگین می‌تواند نقش مهمی در پیش‌بینی دقیق سیلاب و تنظیم منابع آبی پشت سدها بازی نماید (Seo et al, 2014). پیش‌بینی عددی وضع هوا از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل WRF آخرین نسل از مدل‌های میان مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا می‌باشد. مطالعات اخیر نشان داده است که مدل WRF پتانسیل بسیار خوبی در شناسایی ویژگی‌های بارش مانند زمان بارش، مکان و توسعه آن دارد (Argueso et al, 2012). با این حال نتایج به علت کیفیت پایین شرایط اولیه برای تولید مقادیر دقیق بارندگی ایده‌آل نیستند (Calveti and Filho, 2014)، که می‌تواند با روش داده‌گذاری بهبود یابند (Zhang et al, 2013). با بهبود مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا، چندین روش داده‌گذاری مانند روش‌های وردشی سه بعدی و چهار بعدی (3DVar/4DVar)، روش همادی فیلتر کالمن (EnKF) و روش گرمای نهان کشانش (LHN) به شکل همادی و وردشی توسعه یافته‌اند (Lio et al, 2013; Xiong et al, 2013). با وجود اینکه روش‌های وردشی چهار بعدی و همادی فیلتر کالمن توانایی بیشتری را به اثبات رسانده‌اند اما هنوز به علت هزینه‌های محاسباتی بالا برای پیش‌بینی‌های عملیاتی وضع هوا در همه جا استفاده از آنها امکان پذیر نیست. در حالت چرخه پیوسته شروع گرم که برای پیش‌بینی‌های مدل در چرخه‌های بعدی داده‌گذاری به عنوان شرایط اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد، در تولید تحلیل‌های منطقی میدان‌های هواشناختی مرتبط با فرایندهای آب‌شناختی روش وردشی سه بعدی با بازدهی بیشتری نسبت به روش‌های وردشی چهار بعدی و همادی فیلتر کالمن عمل می‌کند (Barker et al, 2004; Xiao and Sun, 2007). نیسانی و همکاران (۱۳۹۶) برای یک مورد بارش سنگین در غرب ایران اثر داده‌گذاری به روش 3Dvar را در بهبود پیش‌بینی بارش بررسی کرده و نشان دادند که اریبی بارش نسبت به داده مشاهداتی تا میزان ۷۳ درصد در پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته کاهش می‌یابد.

مواد و روش‌ها

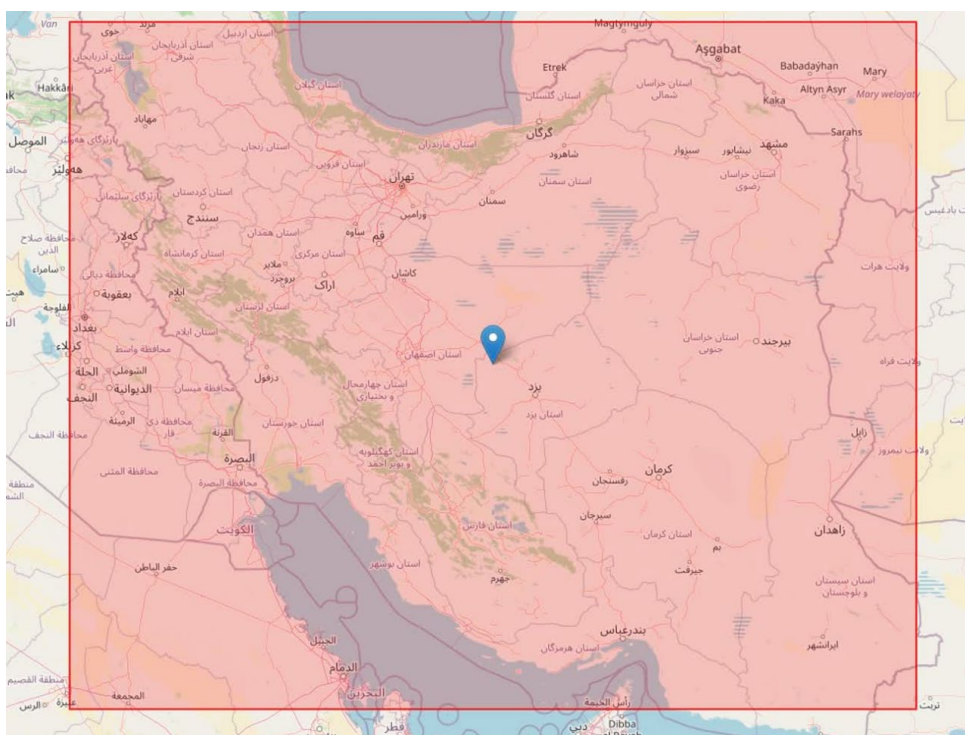
پیکربندی مدل

در این مطالعه از مدل پیش‌بینی عددی وضعیت جوی (WRF) و WRFDA نسخه 4.3.3 به صورت تک دامنه (شکل ۱) استفاده شده است. برای شرایط مرزی و اولیه اجراها از داده جهانی CFSv2 با تفکیک افقی نیم درجه برای متغیرهای جوی استفاده می‌شود. این داده روزانه چهار نوبت به روزرسانی شده‌اند و حاوی پیش‌بینی متغیرهای مختلف جوی برای حدود شش ماه آینده هستند (<https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/prod/cfs/>). تفکیک مکانی مدل ۱۰ کیلومتر بوده است. ابعاد دامنه به صورت شرقی-غربی (e_we) ۱۱۸، شمالی-جنوبی (e_sn) ۹۶، و سطوح عمودی (e_vert) ۳۸ تعیین شده است.

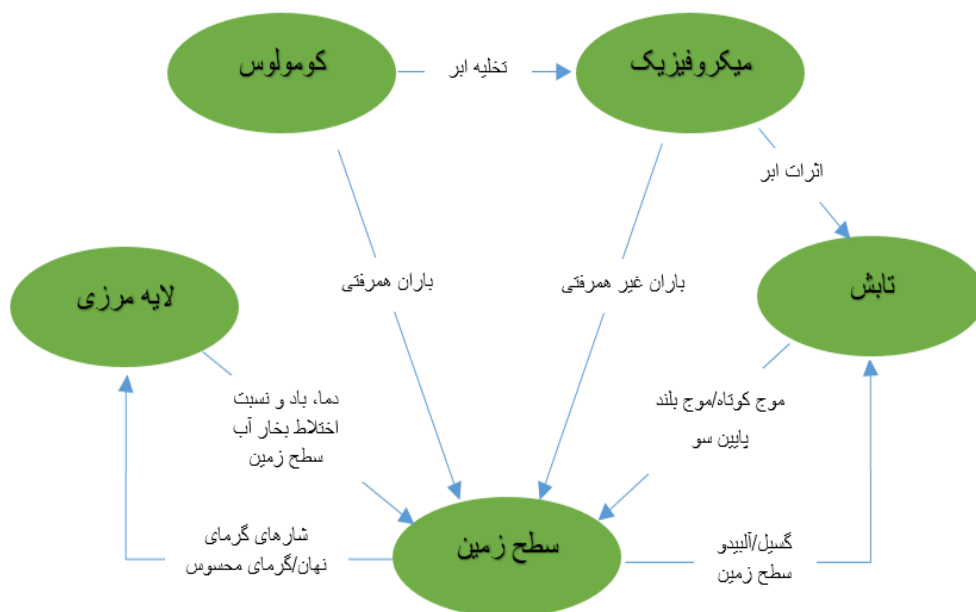
مدل WRF شامل انواع طرحواره‌های فیزیکی است که مسئول اجزای مختلف فرآیندهای فیزیکی هستند. این طرح‌واره‌ها در طول شبیه‌سازی مدل با یکدیگر تعامل دارند تا فرآیندهای فیزیکی در جو زمین را شبیه‌سازی کنند (شکل ۲).

که پیش‌بینی دقیق‌تر پدیده‌های جوی با میزان قدرت تفکیک بالاتر ارتباط دارد.

به دلیل فعالیت سامانه‌های بارشی با شدت، تداوم و گستردگی بالا از اواخر اسفند ماه ۱۳۹۷ و اوایل فروردین ماه ۱۳۹۸ برخی از استان‌های کشور دچار سیلاب‌های شدید با خسارات بالا شدند. شدت و خسارات ناشی از سیل در استان‌های گلستان، خوزستان و لرستان بسیار شدید و چشمگیر بود. مجموع بارش‌های فروردین ماه ۹۸ در کل پهنه حوضه‌های آبریز خوزستان ۱۸۶ میلی‌متر بود که باعث شد تا حجم آب ورودی به سدهای استان خوزستان در فروردین ماه ۱۳۹۸ به میزان کم سابقه ۱۵ میلیارد و ۲۲۳ میلیون متر مکعب برسد. این سیل در پی بارندگی شدید، گسترده و هم‌زمان در حوضه‌های سدهای استان به وجود آمد و طبق گزارش‌ها سیل یادشده موجب آب گرفتگی وسیع شهرها، روستاها، راه‌ها، راه‌آهن و اراضی کشاورزی و خسارت زیادی به تمامی بخش‌ها شامل نفت و انرژی، حمل و نقل و بازرگانی و صنعت و کشاورزی شد. لذا با توجه به شدت سیلاب یادشده، پیش‌بینی دقیق آن در فاصله زمانی مطمئن می‌توانست از بسیاری خسارات به وجود آمده جلوگیری نماید.



شکل ۱: دامنه مورد استفاده در اجرای مدل



شکل ۲: تعامل طرحواره های فیزیکی با یکدیگر (Wrf users guide)

در خصوص نحوه حل کردن مشکل و وجود عدم قطعیت های زیاد در مدلسازی این فرایندها (آراکاو، ۲۰۰۴) بوده است. در زیر قوانین کلی برای پارامترسازی کومولوس در مدل WRF آمده است:

دامنه هایی با فاصله شبکه ≤ 10 کیلومتر: یک طرح کومولوس ضروری است.

دامنه هایی با فاصله شبکه > 3 کیلومتر: بعید است که یک طرح کومولوس ضروری باشد.

دامنه هایی با فاصله شبکه < 3 کیلومتر تا > 10 کیلومتر: این یک "منطقه خاکستری" است که در آن پارامتر کومولوس ممکن است ضروری باشد یا نباشد. در صورت امکان، سعی می شود از دامنه هایی با این اندازه اجتناب شود، اما اگر اجتناب ناپذیر است، بهتر است از طرحواره چند مقیاسی Kain Fritsch یا Grell-Freitas استفاده شود. خلاصه ای از پیکربندی مدل و طرحواره های فیزیکی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

بارش نسبت به انتخاب طرحواره های فیزیکی بسیار حساس می باشد و عدم انتخاب دقیق این طرحواره ها باعث ایجاد خطاهای بزرگ می گردد. بنابراین با توجه به خصوصیات توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، بایستی نسبت به تعیین دقیق طرحواره مورد نظر اقدام نمود. از دیدگاه عملیاتی، یکی از جالبترین طرحواره ها، همرفت کومولوسی است، زیرا مربوط به پیش بینی زمانی و مکانی بارش است. طرحواره های همرفتی متفاوت نه تنها بر مقدار عددی بارش بلکه بر تکامل دینامیکی آن نیز تأثیر می گذارند، زیرا طرحواره ها نمایه های گرمایی عمودی متفاوتی دارند که موجب پاسخ دینامیکی متفاوت می شوند. نسل کنونی و آتی مدل های منطقه ای محدود می توانند در تفکیک های افقی ۱ تا ۳ کیلومتر اجرا شوند و همرفت های عمیق را با دقتی پذیرفتنی در نظر بگیرند، اما مقیاس های افقی در فرایندهای همرفتی بسیار کوچکتر از مقیاس های مدل های عددی بزرگ مقیاس و میان مقیاس هستند؛ لذا طی حدود چهل سال گذشته، روش های متعددی در مدل های NWP جهت بیان فرایندهای همرفت مرطوب به کار گرفته شده است که در ویژگی های مدل ابر، فرضیات و کارایی محاسباتی با هم فرق دارند. دلیل کند بودن پیشرفت های حاصل در این زمینه، وجود پرسش های اساسی

جدول ۱. جزئیات پیکربندی مدل WRF

مقدار/روش	پارامتر
WRF4.3.3	نسخه مدل
۱۰ کیلومتر	تفکیک شبکه
e_sn: ۹۶؛ e_we: ۱۱۸	نقاط شبکه
۳۸	تعداد سطوح عمودی
NCEP CFSv2	شرایط اولیه/مرزی
۶ ساعت	گام زمانی
۲۰۱۹-۰۴-۰۱ تا ۱۱-۰۳-۲۰۱۹	دوره شبیه‌سازی
۲۱ روز	تعداد روزهای اجرای مدل
Hong, Song-You, Jimy Dudhia, and Shu-Hua Chen, 2004	میکروفیزیک
Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997	تابش موج بلند
Chou M.-D., and M. J. Suarez, 1994: Matsui, T., S. Q. Zhang, W.-K. Tao, S. Lang, C. Ichoku, and C. Peters-Lidard, 2018:	تابش موج کوتاه
Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004	فیزیک لایه سطحی
Hong, Song-You, Yign Noh, Jimy Dudhia, 2006:	فیزیک لایه مرزی
Grell, Georg A., 1993 Grell, G. A, D. Devenyi, 2002	پارامترسازی همرفت

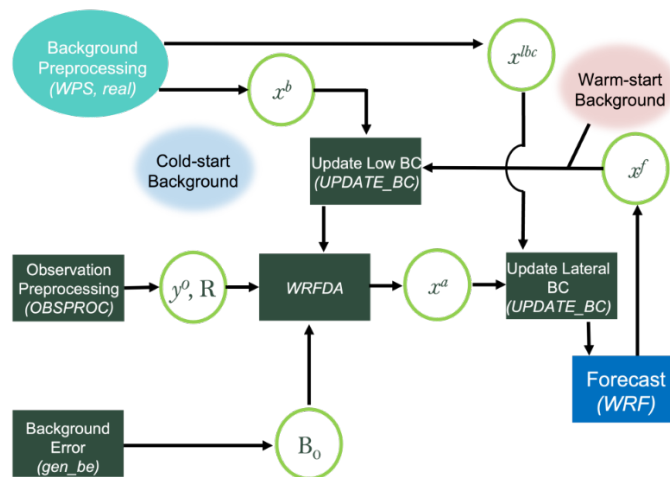
زمان و روش داده‌گذاری

مدل برای بارش‌های سیل آسای ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹ از روز ۱۱ مارس تا ۱ آوریل در یک دوره زمانی ۲۱ روزه در منطقه جنوب غرب ایران اجرا گردید. با توجه به تغییرات زیاد خروجی مدل CFSv2 در هر اجرا و برای بدست آوردن یک پیش‌بینی قابل اطمینان در یک بازه زمانی طولانی، اجراهای مدل از ساعت ۰۰ روز ۱۱ تا ساعت ۱۸ روز ۱۳ مارس (۱۲ اجرا) برای مجموع بارش بازه ۲۴ تا ۳۱ مارس در نظر گرفته شد. با استفاده از داده مدل CFSv2 مدل یکبار بدون داده‌گذاری (WRF) و یکبار با داده‌گذاری (WRFDA) اجرا شده و در نهایت پیش‌بینی مدل برای مجموع بارش در بازه زمانی ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹ با هم مقایسه گردید. یکی از روش‌های متداول داده‌گذاری روش وردشی سه بعدی 3Dvar می‌باشد. مبنای داده‌گذاری وردشی سه بعدی در مدل WRF، فرمولبندی افزایشی چندمتغیره است که در آن متغیرهای کنترلی پیش شرط شامل تابع جریان، فشار نامتعادل، پتانسیل سرعت، نسبت آمیختگی کل آب است (مائیلو و همکاران، ۲۰۱۴). مقصود از روش وردشی سه بعدی، به‌دست

آوردن بهترین برآورد بین حدس اولیه و دیدبانی با کمینه کردن تابع هزینه به طور پیاپی است. تابع هزینه برای داده‌گذاری وردشی سه بعدی با رابطه زیر تعریف می‌شود (داس و همکاران، ۲۰۱۵):

$$j(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(y - H(x))^T R^{-1}(y - H(x)) \quad (1)$$

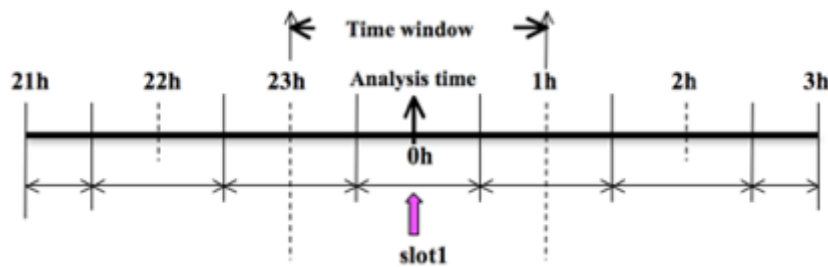
که در آن x میدان آنالیز متغیرهای جوی سطحی است، x_b میدان پس‌زمینه است که معمولاً میدان پیش‌بینی می‌باشد، y میدان داده‌مشاهداتی است و H اپراتور داده‌مشاهداتی است. B ماتریس کوواریانس خطای پس‌زمینه است که با استفاده از روش یک‌ماهه مرکز ملی هواشناسی تولید شده است. R ماتریس کوواریانس خطاهای مشاهده‌ای است و B^{-1} و R^{-1} به ترتیب معکوس ماتریس‌های B و R هستند (Thodsan et al., 2022).



شکل ۳: مراحل اجرای داده گواری با استفاده از مدل WRF (Wrf users guide)

۴. خطای پس زمینه (gen_be) که کواریانس خطاهای پس زمینه حدس اولیه را (B^0) تولید و در سیستم WRFDA استفاده می شوند تا تحلیل بهبود یابد.
۵. سیستم داده گواری (WRFDA) WRF: داده مشاهداتی و سایر داده را به کار می گیرد تا میدان آنالیز (x^a) را تولید کند.
۶. به روزرسانی شرایط مرزی جانبی (UPDATE_BC): که از میدان آنالیز (x^a) برای به روزرسانی شرایط مرزی جانبی استفاده می شود.

۱. پیش پردازش پس زمینه: این مرحله شامل تولید میدان پیش زمینه x^b از سیستم پیش پردازش WPS و برنامه ی real.exe از بسته WRF است.
۲. به روزرسانی شرایط مرزی پایین (UPDATE_BC):
۳. پیش پردازش داده مشاهداتی (OBSPROC): که داده ای مشاهداتی (y^o) و کواریانس خطای آن ها (RRR) پردازش می شوند تا برای داده گواری آماده شوند.



شکل ۴: نمایی از پنجره زمانی مورد استفاده در داده گواری (Wrf users guide)

ادوات مختلف موجود بر روی انواع ماهواره ها است و در بسته نرم افزاری WRFDA مورد استفاده قرار می گیرد. در فرآیند داده گواری داده های ماهواره ای، پردازش های پیش از مرحله داده گواری برای اطمینان از کیفیت داده ها ضروری است. در بسته WRFDA برای اطمینان از صحت داده ها، کنترل کیفیت اولیه انجام می شود که شامل چک کردن مکان داده ها و حذف مشاهدات خارج از دامنه (مثل داده های غیرمعتبر یا نادرست) و بررسی سازگاری قائم پروفایل های

در شکل ۴ پنجره زمانی مورد استفاده در داده گواری نشان داده شده است. پنجره زمانی از یک ساعت قبل از زمان آنالیز شروع و تا یک ساعت بعد از آن ادامه دارد. این طرحواره نشان می دهد که چگونه داده های مشاهداتی در طول پنجره زمانی توزیع و استفاده می شوند. مدل انتقال تابش (RTM) مانند CRTM که توسط JCSDA توسعه یافته است، یکی از ابزارهای مهم در فرآیند داده گواری داده های ماهواره است. CRTM قادر به پردازش تابش از

داده‌های جوی است. در فرایند رقیق‌سازی، نقاط تکراری و داده‌های ناقص برای کاهش نویز و بهبود دقت حذف می‌شوند. پس از پردازش اولیه، دمای درخشندگی توسط مدل RTM از روی تابش به دست می‌آید. آزمون‌های ثانویه بر اساس پارامترهای کیفی انجام می‌شوند و معمولاً شامل ارزیابی انحراف معیار خطای مشاهده شده است. این پارامترها ممکن است تابعی از کانال ماهواره، موقعیت (ارتفاع، منطقه جغرافیایی)، و نوع سطح (خشکی، دریا، برف، یخ و غیره) باشند (Derber, 1998).

داده‌های مورد استفاده در فرآیند داده‌گذاری

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های ماهواره‌های MHS, ATMS, GPSRO و داده‌های مشاهداتی سطح زمین و سطوح فوقانی (prepbufr) می‌باشند. سامانه جمع آورنده داده مایکروویو پیشرفته (ATMS) جدیدترین نسل از سامانه‌های مایکروویو ساندر در ناوگان بین‌المللی ماهواره‌های هواشناسی مدار قطبی است که جایگزین واحد (AMSU) شده است که اولین بار در سال ۱۹۹۸ آماده سرویس دهی شد. اولین سامانه ATMS در اواخر سال ۲۰۱۱ بر روی ماهواره (Suomi NPP) پرتاب شد. دومین سامانه ATMS در سال ۲۰۱۷ بر روی ماهواره JPSS-1 (که اکنون به نام NOAA-20 شناخته می‌شود) پرتاب شد. هر دو سامانه ATMS در مدار در حال حاضر عملیاتی هستند. ATMS دارای ۲۲ کانال مشاهده جمع‌آوری داده دما و رطوبت در محدوده فرکانسی از ۲۳ تا ۱۸۳ گیگاهرتز است. این داده‌ها که توسط مدل‌های پیش‌بینی عددی وضعیت هوا با تأثیر بالا استفاده می‌شوند، به دلیل اینکه امواج مایکروویو می‌تواند از ابرها عبور کند از مهم‌ترین مشاهدات ماهواره‌های مدار قطبی هستند (Kim et al, 2016). سامانه جمع‌آورنده داده مایکروویو رطوبت (MHS) یکی از ابزارهای است که بر روی ماهواره Metop حمل می‌شود. MHS یک رادیومتر مایکروویو پنج‌کاناله با توان کامل است که تابش مایکروویو بالاسو از زمین را در باندهای فرکانسی خاص اندازه‌گیری می‌کند. از آنجا که رطوبت در جو (یخ، پوشش ابر، باران و برف) تابش مایکروویو منتشر شده از سطح زمین را تضعیف می‌کند، می‌توان از مشاهدات انجام

شده توسط MHS تصویری دقیق از رطوبت جوی با استفاده از کانال‌های مختلف که به ارتفاعات مختلف مربوط می‌شوند، استخراج کرد. همچنین می‌توان دمای سطح زمین را تعیین کرد. این سامانه با اسکن عرضی، از مجموعه ابزارهای ATOVS است که برای اندازه‌گیری پروفایل بخار آب جوی طراحی شده است و در محدوده فرکانسی ۸۹ تا ۱۹۰ گیگا هرتز عمل می‌کند. کانال‌های ۱۵۷ گیگاهرتز و ۱۸۳ گیگاهرتز داده‌های رطوبت جوی را فراهم می‌کنند. کانال ۸۹ گیگاهرتز اطلاعاتی در مورد دمای سطح و گسیل‌پذیری به همراه داده‌های (AMSU-A) ارائه می‌دهد و ابرها و بارش‌های ارتفاع پایین را شناسایی می‌کند (Zou et al, 2017).

اختفا رادیویی (RO) یک تکنیک فعال جمع‌آوری داده ماهواره به ماهواره است که از سیگنال‌های رادیویی ارسال شده توسط ماهواره‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) برای جمع‌آوری داده‌های جو با دقت، صحت و وضوح عمودی بالا در همه شرایط آب و هوایی و بر روی زمین و دریا استفاده کرده است. COSMIC روزانه حدود ۱۵۰۰ گمانه‌زنی عمودی RO ارائه می‌دهد. داده‌های RO COSMIC از کیفیت بهتری نسبت به مأموریت‌های قبلی برخوردارند و به سطح زمین بسیار نزدیک‌تر نفوذ می‌کنند؛ ۷۰٪ تا ۹۰٪ از گمانه‌زنی‌ها در سطح جهانی به فاصله ۱ کیلومتری از سطح زمین می‌رسند. این داده‌ها تأثیر مثبتی بر مدل‌های پیش‌بینی وضعیت هوای جهانی عملیاتی دارند (Anthes et al, 2008). برای پیش‌بینی بارش‌های سنگین و پیش‌بینی طوفان‌های حاره‌ای، پیش‌بینی بارش با استفاده از داده‌های ادغام شده اختفای رادیویی (RO) GPS از نظر میزان حداکثر بارش بسیار مطلوب می‌باشد (Boonyuen et al, 2016).

مشاهدات جوی سطح زمین و سطوح فوقانی جو NCEP ADP در قالب (PREPBufr) شامل مجموعه‌ای از گزارش‌های سطح زمین و سطوح فوقانی جو است که به‌طور عملیاتی توسط مراکز پیش‌بینی محیط زیست ملی (NCEP) جمع‌آوری می‌شود. این گزارش‌ها شامل مشاهدات سطح زمین، سطح دریا، رادیوسوند، و هواپیما از سیستم جهانی ارتباطات (GTS)، داده‌های استخراج‌شده از پروفایلر و رادارهای ایالات متحده، داده‌های اقیانوسی SSM/I و بازیابی TCW و

مورد مطالعه ترسیم گردید. این خروجی‌ها برای دو حالت با داده‌گذاری و بدون داده‌گذاری با خروجی مدل CFSv2 در همان بازه زمانی مقایسه گردید (شکل ۷). از مقایسه تصاویر خروجی مدل‌ها، به وضوح افزایش میزان بارش مدل WRF نسبت به مدل CFSv2 در مقایسه با پهنه بندی میزان تجمعی بارش واقعی (شکل ۵) مشخص می‌باشد. همچنین مدل داده‌گذاری نسبت به مدل بدون داده‌گذاری تفاوت اندکی در بهبود میزان بارش را نشان می‌دهد. علاوه بر این مقادیر عددی بارش نقطه‌ای در نقاط شبکه نیز استخراج شده و داده‌های دید بانی بارش نیز از مرکز ملی خشکسالی تهیه گردید (شکل ۵). از داده‌های دیدبانی ۱۰ نقطه با بارش‌های دیدبانی شده بیش از ۱۵۰ میلی‌متر استخراج و با استفاده از برنامه نویسی و پیدا کردن نزدیکترین همسایه مقدار بارش خروجی مدل برای بازه زمانی مورد نظر در نقاط مدنظر استخراج گردیدند. لیست نقاط مورد نظر به همراه طول و عرض جغرافیایی در جدول ۲ آمده است. شکل ۶ محل جغرافیایی ۱۰ نقطه مورد نظر را در حوضه‌های آبریز کارون بزرگ و کرخه نشان می‌دهد. جدول ۳ میانگین خروجی مدل‌های بدون داده‌گذاری (WRF)، با داده‌گذاری (WRFDA) و مدل CFSv2 را برای ۱۲ اجرای هر نقطه مورد نظر با مقدار بارش واقعی در این نقاط را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است خروجی مدل WRF نسبت به مدل اولیه CFSv2 به نسبت بالایی به میزان واقعی بارش نزدیک شده است و نیز خروجی مدل داده‌گذاری WRFDA نیز نسبت به مدل بدون داده‌گذاری WRF نسبت به میزان واقعی بارش از دقت بهتری برخوردار است. تنها در نقطه ۴ خروجی مدل بدون داده‌گذاری و داده‌گذاری شده نسبت به میزان واقعی بارش از مقدار بالاتری برخوردار می‌باشد. در نقطه ۸ نیز خروجی مدل داده‌گذاری شده نسبت به خروجی مدل بدون داده‌گذاری به میزان واقعی بارش از دقت کمتری برخوردار می‌باشد.

سنجه‌های درستی‌سنجی پیوسته

نتایج محاسبات سنجه‌های درستی‌سنجی پیوسته شامل جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و خطای مطلق میانگین (MAE) برای خروجی سه مدل WRF، CFS و WRFDA از ساعت ۰۰ گرینویچ روز ۱۱ مارس تا ساعت ۱۸ گرینویچ

داده‌های باد ماهواره‌ای از سرویس داده‌ها و اطلاعات ماهواره‌ای ملی (NESDIS) هستند. گزارش‌ها می‌توانند شامل فشار، ارتفاع جغرافیایی، دما، دمای نقطه شبنم، جهت و سرعت باد باشند. بازه‌های زمانی گزارش از یک ساعت تا ۱۲ ساعت متغیر است.

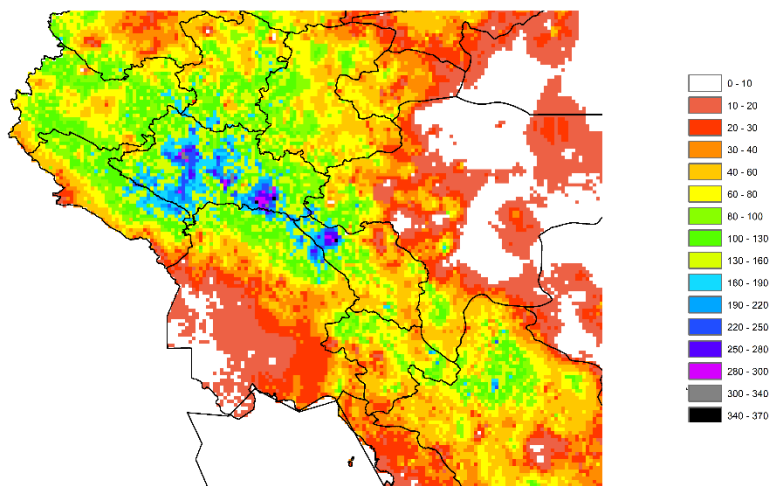
نتایج و بحث

به دلیل فعالیت سامانه‌های بارشی با شدت، تداوم و گستردگی بالا از اواخر اسفند ماه ۱۳۹۷ و اوایل فروردین ماه ۱۳۹۸ برخی از استان‌های کشور دچار سیلاب‌های شدید با خسارات بالا شدند. شدت و خسارات ناشی از سیل در استان‌های گلستان، خوزستان و لرستان بسیار شدید و چشمگیر بود. مجموع بارش‌های فروردین ماه ۹۸ در کل پهنه حوضه‌های آبریز خوزستان ۱۸۶ میلی‌متر بود که باعث شد تا حجم آب ورودی به سدهای استان خوزستان در فروردین ماه ۱۳۹۸ به میزان کم سابقه ۱۵ میلیارد و ۲۲۳ میلیون متر مکعب برسد. این سیل در پی بارندگی شدید، گسترده و هم‌زمان در حوضه‌های سدهای استان به وجود آمد و طبق گزارش‌ها سیل یادشده موجب آب گرفتگی وسیع شهرها، روستاها، راه‌ها، راه‌آهن و اراضی کشاورزی و خسارت زیادی به تمامی بخش‌ها شامل نفت و انرژی، حمل‌ونقل و بازرگانی و صنعت و کشاورزی شد. لذا با توجه به شدت سیلاب یاد شده، پیش‌بینی دقیق آن در فاصله زمانی مطمئن می‌توانست از بسیاری خسارات به وجود آمده جلوگیری نماید.

در این مطالعه برای پیش‌بینی سیلاب فروردین ۹۸ مطابق با ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹ از داده‌های مدل اقلیمی CFSv2 به عنوان شرایط مرزی و اولیه در مدل WRF (اجرای بدون داده‌گذاری) استفاده گردید. سپس با استفاده از داده‌های ماهواره و داده‌های مشاهداتی سطح زمین و سطوح بالای جو فرآیند داده‌گذاری بوسیله مدل WRFDA انجام گردید. با توجه به تغییرات خروجی مدل در هر اجرای مدل بویژه در فاصله زمانی طولانی‌تر، مدل مذکور در فاصله زمانی ۱۱ تا ۱۳ مارس و در چهار نوبت یعنی ساعات ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ گرینویچ و در مجموع ۲۴ اجرا ساخته شد. با استفاده از برنامه نویسی به زبان پایتون خروجی بارش تجمعی در بازه زمانی رخداد بارش‌های سنگین (۲۴ تا ۳۱ مارس) در منطقه

روز ۱۳ مارس و برای ۱۰ نقطه مورد نظر در جدول ۴ ارایه گردیده است. لازم به ذکر است که در تمام این سنجه‌ها هرچه امتیاز به صفر نزدیک‌تر باشد، خطای خروجی مدل کمتر خواهد بود.

Accumulated precipitation (mm) 2019-03-24 06:00 utc 2019-03-31 06:00 utc



شکل ۵: پهنه بندی میزان بارش تجمعی واقعی طی روزهای ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹ در مناطق جنوب غربی کشور (منبع: سازمان هواشناسی کشور)

جدول شماره ۲: طول و عرض جغرافیایی نقاط انتخاب شده

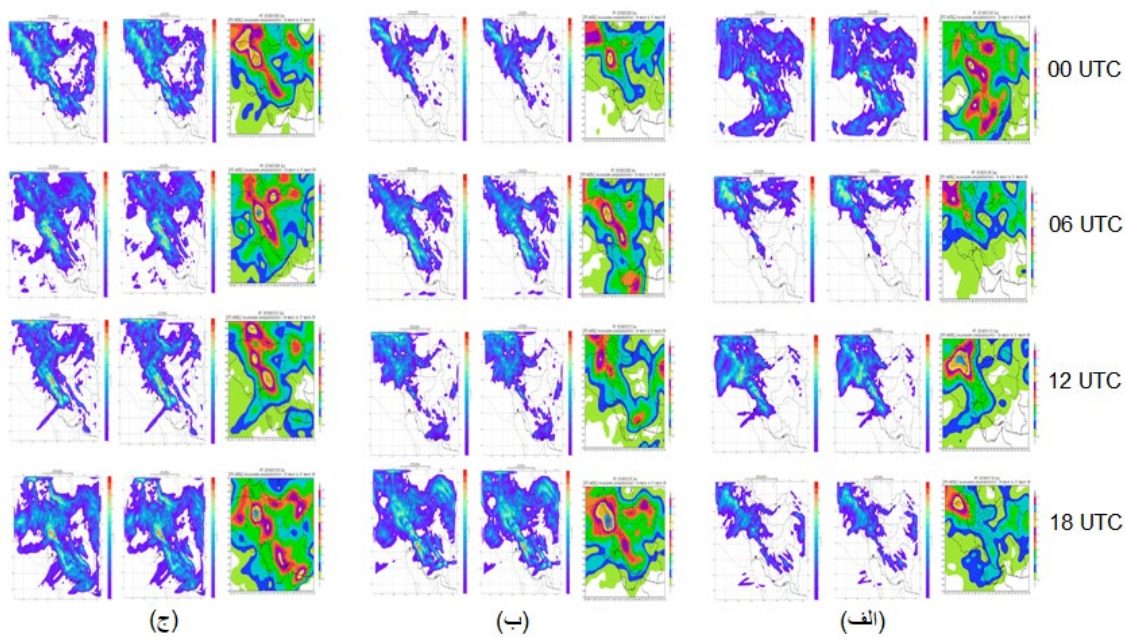
	lat	Lon	grid lat	grid long	distance
1	32.438	50.117	32.41	50.029	0.0921
2	33.04	49.212	33.034	49.288	0.076
3	32.994	48.961	33.034	48.917	0.0594
4	32.936	49.114	32.878	49.102	0.0589
5	33.187	49.153	33.189	49.102	0.0507
6	33.39	48.506	33.344	48.546	0.061
7	33.644	47.965	33.653	47.99	0.0267
8	33.149	47.862	33.189	47.805	0.07
9	33.312	48.496	33.807	47.99	0.0596
10	33.233	48.5	33.189	48.546	0.0637

جدول ۳: میانگین خروجی اجرای مدل‌های مختلف برای ۱۰ نقطه مورد نظر

points	AV-CFS(mm)	AV-wrf(mm)	AV-wrfd(mm)	obs
1	52.25	162.76	163.53	270.00
2	46.68	114.99	115.11	267.00
3	48.34	130.25	138.96	246.00
4	49.26	174.91	179.58	153.00
5	47.73	60.15	62.01	207.00
6	49.06	115.88	118.21	264.00
7	48.96	163.62	165.57	234.00
8	50.13	85.96	84.68	248.00
9	56.95	109.13	110.01	230.00
10	61.34	103.90	107.16	239.00



شکل ۶: موقعیت جغرافیایی ۱۰ نقطه انتخاب شده در حوضه‌های سدهای کارون بزرگ و کرخه



شکل ۷: (الف) از راست به چپ مجموع بارش ۲۴ تا ۳۱ مارس مدل‌های WRF، CFS، WRFDA اجرای روز ۱۱ مارس (ب) از راست به چپ مجموع بارش ۲۴ تا ۳۱ مارس مدل‌های WRF، CFS، WRFDA اجرای روز ۱۲ مارس (ج) از راست به چپ مجموع بارش ۲۴ تا ۳۱ مارس مدل‌های WRF، CFS، WRFDA اجرای روز ۱۳ مارس

جدول ۸: نتایج محاسبه سنج‌های درستی سنجی پیوسته برای مدل‌های WRF، CFS و WRFDA

مدل	MAE	RMSE
CFS	183.36	188.37
WRF	121.25	136.32
WRFDA	119.7	135.00

اقلیمی CFS و در بازه زمانی تقریباً ۲۰ روزه نشان داد که کارایی بسیار خوبی به نسبت مدل کوتاه مدت GFS دارد. به هر حال نتایج نشان دهنده کارایی روش داده‌گواری بر روی مدل ترکیبی WRF-CFS در رخداد بارش‌های سنگین ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹ در نواحی جنوب غربی ایران می‌باشد که به خوبی وقوع بارش‌های حدی را در این ناحیه پیش‌بینی کرده‌است. این موضوع نشان‌دهنده کارایی مناسب این مدل برای پیش‌بینی وقوع بارش‌های سنگین در زمانی طولانی‌تر از مدل‌های کوتاه مدت مانند مدل جهانی GFS می‌باشد. بهبود اندک در برون‌داد مدل داده‌گواری نسبت به مدل بدون داده‌گواری (WRF) حدود ۱ درصد بهبود داشته‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود خطای مطلق میانگین (MAE) برای مدل WRF نسبت به نسبت CFS حدود ۳۳.۹ درصد بهبود داشته‌است. مدل داده‌گواری (WRFDA) تنها ۱.۳ درصد نسبت به مدل بدون داده‌گواری (WRF) بهبود نشان می‌دهد. همچنین RMSE برای مدل WRF نسبت به مدل اولیه CFS حدود ۲۷.۷ درصد و برای مدل داده‌گواری نسبت به مدل بدون داده‌گواری (WRF) حدود ۱ درصد بهبود را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود هر دو سنجه MAE و RMSE با استفاده از داده‌گواری مقدار اندکی بهبود را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر داده‌گواری تابش ماهواره و داده‌های ایستگاهی سطح زمین و جو بالا بر روی مدل ترکیبی WRF-CFS به روش 3D-VAR و مقایسه برون‌داد مدل بدون داده‌گواری و همراه با داده‌گواری برای بارش سیل آسای ۲۴ تا ۳۱ مارس ۲۰۱۹ بررسی شده‌است. در ابتدا مقایسه پهنه بندی برون‌داد مدل‌های CFSv2 با مدل بدون داده‌گواری و مدل همراه با داده‌گواری، یک توافق نسبی بین برون‌داد مدل بدون داده‌گواری با پهنه بندی میزان بارش تجمعی واقعی برگرفته از داده‌های ایستگاهی را نسبت به مدل اولیه CFSv2 نشان می‌دهد. با انجام داده‌گواری تشابه مدل با پهنه بندی میزان بارش تجمعی واقعی نسبت به مدل بدون داده‌گواری کمی بهتر می‌گردد. بررسی سنجه‌های متغیرهای راستی آزمایی متغیرهای پیوسته مانند خطای مطلق میانگین و جذر میانگین مربع خطا بهبود قابل توجهی در مدل بدون داده‌گواری نسبت به مدل اولیه CFSv2 نشان داده ولی بهبود اندکی در برون‌داد مدل داده‌گواری نسبت به مدل بدون داده‌گواری نشان می‌دهد. باید در نظر داشت که به طور معمول داده‌گواری بر روی مدل کوتاه مدت GFS در بازه زمانی حداکثر ۷۲ ساعته انجام می‌گردد که در مطالعات کارایی کمی نشان داده‌است. اما داده‌گواری بر روی مدل

۱- به‌طور محتمل بعضی از این داده‌ها (شامل داده‌های ایستگاهی سطح زمین و جو بالا) در داده‌گواری مدل تمام کره CFS استفاده شده‌اند در نتیجه اثر این داده‌ها در پیش‌بینی مدل مذکور لحاظ شده‌است و احتمال دارد که استفاده مجدد از این داده‌ها بهبود چندانی به همراه نداشته باشد. البته این بدان معنی نیست که استفاده مجدد از این داده‌ها معنی‌دار نبوده و قابل بررسی نیست زیرا استفاده از مدل‌های منطقه‌ای با قدرت تفکیک بالاتر و نیز استفاده از روش‌های متفاوت داده‌گواری می‌تواند نتایج متفاوتی ایجاد کند.

۲- هر چه زمان پیش‌بینی بیشتر شود از کیفیت داده‌های پیش‌بینی کاسته می‌شود، در نتیجه با توجه به تاثیر کیفیت داده‌ها بر اثر داده‌گواری می‌توان نتیجه گرفت که کاهش کیفیت داده‌ها در بازه زمانی طولانی‌تر منجر به کاهش اثر داده‌گواری می‌گردد.

۳- خطاهای مدل‌های عددی به دو نوع تصادفی و سامانمند تقسیم می‌شوند. روش داده‌گواری خطای تصادفی را کاهش می‌دهد. در مناطقی مانند جنوب غربی ایران با رشته کوه پیچیده زاگرس که سهم عمده‌ای از خطای مدل مربوط به خطای سامانمند می‌باشد، احتمالاً داده‌گواری تاثیر چندانی نخواهد داشت.

۴- این احتمال وجود دارد که استفاده از روشها و سامانه‌های داده‌گواری دیگر نسبت به سامانه WRFDA کارایی بیشتری داشته باشد.

منابع

- Characterization of the Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) on the Joint Polar Satellite System-1 Satellite (JPSS-1). In Proceedings of the EGU General Assembly, Vienna, Austria, 17–22 April 2016.
- 12- Najafi MS, Dehban H, Farokhnia A. Forecasting of monthly precipitation based on ensemble approach using CFSv2-WRF model over Iran (case study: October 2019 to April 2020). *Iranian Journal of Geophysics*. 2023 Feb 20;17(1):129-45.
 - 13- Neyestani A, Ghader S, Mohebalhojeh A. Application of data assimilation using WRF model to simulate precipitations caused by synoptic systems in the western regions of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*. 2017 May 22;11(1):101-23.
 - 14- Maiello, R., Ferretti, R., Gentile, S., Montopoli, M., Picciotti, E., Marzano, F.S., and Faccani, C., 2014, Impact of radar data assimilation for the simulation of a heavy rainfall case in Central Italy using WRF-3Dvar: Atmospheric Measurement Techniques, 7, 2919-2935.
 - 15- Oh J, Oh J, Huh M. A Case Study of Bias Correction and the Dynamical Downscaling of CFSv2 S2S Forecasts Using a WRF Model: Heatwave in 2018 over South Korea. *Atmosphere*. 2022 Dec 11;13(12):2086.
 - 16- P. Chambon, S. Q. Zhang, A. Y. Hou, M. Zupanski, and S. Cheung, "Assessing the impact of pre-GPM microwave precipitation observations in the Goddard WRF ensemble data assimilation system," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 140, no. 681, pp. 1219–1235, 2013.
 - 17- Q. Xiao and J. Sun, "Multiple-radar data assimilation and shortrange quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP 2002," *Monthly Weather Review*, vol. 135, no. 10, pp. 3381–3404, 2007.
 - 18- R. A. Anthes, D. Ector, D. C. Hunt, Y. H. Kuo, C. Rocken, W. S. Schreiner, et al., "The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 89, pp. 313-333, 2008/03/01 2008.
 - 19- R. M. Cardoso, P. M. M. Soares, P. M. A. Miranda, and M. Belo-Pereira, "WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate," *International Journal of Climatology*, vol. 33, no. 11, pp. 2591–2608, 2013.
 - 20- Sharifi, M. A., Azadi, M., and Khaniani, A. S., 2016, Numerical simulation of rainfall with assimilation of conventional and GPS
 - 1- Arakawa, A., 2004, The cumulus parameterization problem: Past, present, and future: *Journal of Climate*, 17, 2493-2525.
 - 2- C.-H. Xiong, L.-F. Zhang, J.-P. Guan, J. Peng, and B. Zhang, "Analysis and numerical study of a hybrid BGM-3DVAR data assimilation scheme using satellite radiance data for heavy rain forecasts," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 25, no. 3, pp. 430–439, 2013.
 - 3- D. Argueso, J. M. Hidalgo-Muñoz, S. R. Gómez-Amiz-Fortis, M. J. Esteban-Parra, and Y. Castro-Díez, "High-resolution projections of mean and extreme precipitation over Spain using the WRF model (2070–2099 versus 1970–1999)," *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, vol. 117, no. 12, Article ID D12108, 2012.
 - 4- Das, M. K., Chowdhury, M. D., Das, S., Debsarma, S. K., and Karmakar, S., 2015, Assimilation of Doppler weather radar data and their impacts on the simulation of squall events during pre-monsoon season: *Natural Hazards*, 77, 901-931.
 - 5- Derber, J. C. and W. S. Wu, 1998, The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 126, pp. 2287–2299
 - 6- D. M. Barker, W. Huang, Y. R. Guo, and Q. N. Xiao, "A three-dimensional (3DVAR) data assimilation system for use with MM5: implementation and initial results," *Monthly Weather Review*, vol. 132, pp. 897–914, 2004.
 - 7- J. Liu, M. Bray, and D. Han, "Exploring the effect of data assimilation by WRF-3DVAR for numerical rainfall prediction with different types of storm events," *Hydrological Processes*, vol. 27, no. 25, pp. 3627–3640, 2013.
 - 8- J.-H. Seo, Y. H. Lee, and Y.-H. Kim, "Feature selection for very short-term heavy rainfall prediction using evolutionary computation," *Advances in Meteorology*, vol. 2014, Article ID 203545, 15 pages, 2014.
 - 9- L. Calvetti and A. J. Pereira Filho, "Ensemble hydrometeorological forecasts using WRF hourly QPF and topmodel for a middle watershed," *Advances in Meteorology*, vol. 2014, Article ID 484120, 12 pages, 2014.
 - 10- karimkhani, M., azadi, M., Meshkatee, A. H., ranjbarsaadatabadi, A. Impact of Assimilation of Radar Data on the Simulation of Squall Line Event. *Iranian Journal of Geophysics*, 2020; 14(2): 63-82. doi: 10.30499/ijg.2020.106611
 - 11- Kim, E.J.; Leslie, V.; Lyu, J.; Smith, C.K.; McCormick, L.; Anderson, K. Pre-Launch

- 23- Zakeri Z, Azadi M, Ghader S. Impact of satellite and station observation data assimilation of on the forecast of WRF model. *Journal of Climate Research*. 2015 Mar 21;1394(21):31-42.
- 24- Zou X, Qin Z, Weng F. Impacts from assimilation of one data stream of AMSU-A and MHS radiances on quantitative precipitation forecasts. *Q J R Meteorol Soc*. 2017;143(703):731-43.
- observations over north of Iran: *Annals of Geophysics*, 59, P0322, doi:10.4401/ag6919.
- 21- S. Q. Zhang, M. Zupanski, A. Y. Hou, X. Lin, and S. H. Cheung, "Assimilation of precipitation-affected radiances in a cloudresolving wrf ensemble data assimilation system," *Monthly Weather Review*, vol. 141, no. 2, pp. 754-772, 2013.
- 22- Thodsan, T.; Wu, F.; Torsri, K.; Cuestas, E.M.A.; Yang, G. Satellite Radiance Data Assimilation Using the WRF-3DVAR System for Tropical Storm Dianmu (2021) Forecasts. *Atmosphere* 2022, 13, 956.