

**Evaluation of WRF Model for Simulation of Precipitation and Flood Forecasting in Karun 4 Basin****EMADEDIN SHIRALI<sup>1</sup>, ALIREZA NIKBAKHT SHAHBAZI<sup>1\*</sup>, HOSSEIN FATHIAN<sup>1</sup>, NARGES ZOHRABI<sup>1</sup>, ELHAM MOBARAK HASSAN<sup>2</sup>**

1. Water Science Engineering Department, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2. Environment Department, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

(Received: Dec. 2, 2019- Revised: June. 6, 2020- Accepted: June. 23, 2020)

**ABSTRACT**

In this study, hourly values of precipitation and air temperature in Karoon 4 basin in southwestern of Iran were simulated with WRF numerical model to evaluate the accuracy of the model for flood prediction. The flood event was selected in March 2016. For global boundary conditions of the model, global data with a resolution of 0.75 were used. The WRF model was implemented using eight different configurations, including a convective schema, two planetary boundary layer schemes, two microphysical schemes, a surface layer schema, and two shortwave radiation schemes to obtain a suitable configuration for simulating temperature and precipitation. The results showed that in the simulation of hourly precipitation, the combination of MYJ boundary layer design with other micro-physics and short-ray projections yields better results than YSU schema. The best values of IOA (matching coefficient) between observed and estimated precipitation of the model was 0.77, 0.76, 0.74 and 0.52 in Shahrekord, Saman, Koohrang and Lordegan, respectively, by combining MYJ boundary layer, Lin physics and Dudhia short radiation. While in simulating hourly air temperature, the YSU boundary layer schema combination with other schema showed better performance. So that with this combination, the highest conformity coefficient (0.47) was obtained between the estimated and observed hourly temperature. The estimated rainfall adjusted by MYJ boundary layer configuration, Lin physics, GODDARD short radiation and MYJLG has performed better prediction for peak discharge than the other schemas, so that the lowest Nash coefficient and RMSE were -0.293 and 37 respectively, with this combination. Therefore, the combination of MYJ boundary layer schema, Lin cloud microphysics schema, and GODDARD radiation schema appear to be the best for estimation of precipitation and temperature and consequently for prediction of the March 2016 flood in the Karun 4 basin.

**Keywords:** Precipitation Estimation, Temperature Estimation, WRF Model, Flood Forecast.

## ارزیابی مدل WRF برای شبیه‌سازی بارش و پیش‌بینی سیلاب در حوضه آبریز کارون ۴

عمادالدین شیرالی<sup>۱</sup>، علیرضا نیکبخت شهبازی<sup>۱\*</sup>، حسین فتحیان<sup>۱</sup>، نرگس ظهراهی<sup>۱</sup>، الهام مبارک حسن<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲. گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۳)

### چکیده

در این تحقیق مقادیر ساعتی بارش و دمای هوا در حوضه کارون ۴ در جنوب غربی ایران با مدل عددی WRF، شبیه‌سازی شد تا دقت مدل در پیش‌بینی سیل در این حوضه ارزیابی گردد. واقعه سیل در مارس ۲۰۱۶ انتخاب شد. برای شرایط مرزی و اولیه مدل از داده‌های جهانی با تفکیک ۰/۷۵ درجه استفاده شده است. مدل WRF با استفاده از هشت پیکربندی متفاوت، شامل یک طرح‌واره همرفتی، دو طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای، دو طرح‌واره خردفیزیک، یک طرح‌واره لایه سطحی و دو طرح‌واره تابش موج کوتاه اجرا شد تا پیکربندی مناسب برای شبیه‌سازی دما و بارش به دست آید. نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی بارش ساعتی ترکیب طرح‌واره MYJ لایه مرزی با دیگر طرح‌واره‌های خردفیزیک و تابش کوتاه نسبت به طرح‌واره YSU نتیجه بهتری به دست می‌دهد. بهترین مقدار IOA (ضریب تطابق) بین بارش مشاهداتی و برآورد شده مدل به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۷۶، ۰/۷۴ و ۰/۵۲ در شهرکرد، سامان، کوه‌رنگ و لردگان با ترکیب لایه مرزی MYJ، خردفیزیک Lin و تابش کوتاه Dudhia به دست آمد. در حالی که در شبیه‌سازی دمای هوای ساعتی، ترکیب طرح‌واره لایه مرزی YSU با دیگر طرح‌واره‌ها عملکرد بهتری داشته است. به طوری که با این ترکیب بیشترین ضریب تطابق (۰/۴۷) بین دمای ساعتی برآورد مدل و مشاهداتی به دست آمده است. بارش برآورد شده توسط پیکربندی لایه مرزی MYJ، خردفیزیک Lin، تابش کوتاه GODDARD و MYJLJ در پیش‌بینی دبی اوج بهتر از دیگر طرح‌واره‌ها عمل نموده است به طوری که کمترین ضریب ناش (۰/۲۹۳-) و کمترین RMSE (۳۷) با این ترکیب به دست آمد. بنابراین به نظر می‌رسد ترکیب طرح‌واره لایه مرزی MYJ، طرح‌واره خردفیزیک Lin و طرح‌واره تابشی GODDARD در برآورد بارش و دما و در نتیجه پیش‌بینی سیل مارس ۲۰۱۶ در حوضه کارون ۴ بهترین عملکرد را داشته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد بارش، برآورد دما، مدل WRF، پیش‌بینی سیل.

### مقدمه

این مدل، اندکی برآورد اضافی وجود دارد. در زمینه ارزیابی پیش‌بینی‌های بارش مدل‌های عددی، تحقیقاتی نیز در داخل کشور صورت گرفته است. (Mazraeh Farahani et al. (2010). بررسی اثر تغییر تفکیک افقی مدل میان مقیاس MM5 در شبیه‌سازی بارش ناشی از یک سامانه همدیدی در ایران پرداخته و نتیجه گرفتند که مدل قادر به شبیه‌سازی مناسب میدان بارش است و با کاهش فاصله شبکه‌ای میدان بارش دقت کیفی قابل قبولی پیدا می‌کند. همچنین (Hedayati and Azadi (2010) به بررسی راستی‌آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه ای MM5 در فصل سرد سال روی ایران پرداخته و با به دست آوردن پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸، ۷۲ ساعته برای بارندگی جمعی ۲۴ ساعته، مقادیر شبیه‌سازی شده را با مقادیر دیده‌بانی شده مقایسه کردند. 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. (2013)

پیش‌بینی بارندگی و شناسایی الگوی آن نسبت به زمان در برنامه‌ریزی و مدیریت آن نقش بزرگی داشته و محققین مختلفی با استفاده از روش‌های مختلف به پیش‌بینی آن پرداخته‌اند. با گسترش کاربرد مدل‌های عددی وضع هوا در دهه اخیر، تحقیقات در ارتباط با ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی وارد مرحله تازه‌ای شده است. همچنین با به کارگیری داده‌های ماهواره‌ای تابش و بهبود شرایط اولیه، خطاهای مدل تا حدی روی بعضی از مناطق مورد بررسی کاهش می‌یابد. (Sodoodi et al. (2010). برای پیش‌بینی بارش به بررسی کارایی مدل ECMWF به مدت یک سال روی ایران پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها روشن ساخت که فقط تا حدی موقعیت نوارهای بارشی را مدل ECMWF به درستی پیش‌بینی می‌کند، درحالی که موقعیت بارش‌های بیشینه با مشاهدات سازگار است. همچنین در برآورد بارش‌های روزانه با استفاده از

الگوریتم‌های بسیار پیچیده رسوم به تعقیب اهداف راداری، نحوه رفتار پدیده در لحظات آتی پیش‌بینی می‌شود (Mourre, 2015). این روش برای مواردی که وقوع یک توفان قطعی به نظر می‌رسد، بسیار مفید است و نتایج خروجی با واقعیت رخ داده همخوانی قابل قبولی دارد. در روش دوم، داده‌های راداری با استفاده از سامانه داده‌گذاری به روند محاسباتی مدل عددی اضافه شده و وضعیت میدان‌های محاسباتی مدل به سمت مقادیر واقعی تصحیح می‌شود (Kukkonen et al., 2011; Wilson et al., 2010; Liu, 2008; Benjamin et al., 2004; Zho et al., 2002). Sugimoto et al. (2008) با به کار بردن مدل عددی WRF تفکیک افقی ۴ کیلومتر و بدون استفاده از طرح‌واره‌های همرفت، داده‌های باد شعاعی حاصل از اندازه‌گیری‌های ۲۵ رادار موجود در شبکه‌ی رادار هواشناسی ایالات متحده را برای روش وردشی سه بعدی استفاده کردند که نتیجه پیش‌بینی سه ساعته باد افقی در کل حوضه، کاهش ریشه میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد. Zhou et al. (2017) از مدل WRF برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی بارش استفاده کردند و کاربرد آن را جهت پیش‌بینی سیلاب در حوضه آبریزی در چین بررسی نمودند. نتایج نشان داد مدل هیدرومتئورولوژیکی می‌تواند برای شبیه‌سازی بارش در این حوضه آبریز بکارگرفته شود چراکه دارای دقت مناسب و زمان پیش‌بینی طولانی است. Lu et al. (2016) پیش‌بینی کوتاه مدت بارش در حوضه آبریز کینو در ژاپن را بررسی نمودند. ایشان از مدل WRF برای پیش‌بینی بارش استفاده نمودند. ضمناً ابتدا عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها مورد بررسی قرار گرفت سپس بارش با زمان پیش‌دید ۶ ساعته و ۱۲ و ۲۴ ساعته پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که بارش‌های سنگین با میزان کمتری با این مدل پیش‌بینی می‌شوند. Chawla et al. (2018) مدل WRF را برای پیش‌بینی بارش‌های ماکزیمم در بالادست حوضه آبریز گنگ بررسی کردند. نتایج نشان داد که با ریز مقیاس‌نمایی بیشتر تغییرپذیری بارش بیشتر می‌شود و نتیجتاً خطاهای بیشتری در مدل رخ می‌دهد. بنابراین بارش شبیه‌سازی شده با مدل WRF در مقایسه با CORDEX و NCEP خطای کمتری را نشان می‌دهد. (2016) Febri et al. پیش‌بینی بارش را با مدل WRF-EMS در فصول مرطوب و خشک در غرب سوماترای اندونزی انجام دادند. نتایج نشان داد پیش‌بینی‌های بارش در فصل مرطوب دقیق‌تر از فصل خشک است. Silver et al. (2017) روشی نوین را برای تعیین کالیبراسیون هیدرولوژیکی مدل WRF-Hydro در مناطق خشک جهت پیش‌بینی سیلاب بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بر اساس خصوصیات فیزیکی خاک پیش‌بینی‌ها دقت بهتری پیدا

Taghavi et al. به ارزیابی پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته مدل عددی WRF-ARW در مناطق گوناگون بارش کمی ایران در دوره یک ماهه فوریه ۲۰۰۷ پرداختند. شیوه معمول در ارزیابی پیش‌بینی بارش‌های کمی روش‌های جدول توافقی دودویی است. با محاسبه امتیازات مهارتی و بعضی کمیت‌ها از این جدول‌ها در آستانه‌های متفاوت بارشی، کیفیت پیش‌بینی‌های مدل از دیدگاه‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ارزیابی به درستی روی ناحیه برآورد می‌کند. همچنین امتیازات مهارتی برای آستانه‌های متفاوت روی حوزه مورد تحقیق برای کل بازه یک ماهه بیانگر عملکرد نسبتاً مطلوب مدل در رخداد بارش در بیشتر نواحی است. Azadi et al. (2004) برونداد مدل WRF را با پارامتری سازی همرفت و فرآیندهای لایه مرزی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب طرح‌واره‌های Grell, Betts-Miller یا Kain-Fritsch برای همرفت با طرح‌واره Blackadar برای لایه‌مرزی در مقایسه با دیگر ترکیب‌ها نتایج بهتری را به همراه داشت. (2014) Zakeri et al. به راستی‌آزمایی برونداد مدل WRF برای بارندگی بر روی کشور ایران در دوره فوریه تا انتهای می سال ۲۰۰۹ پرداختند. نتایج 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. در مجموع به نظر می‌رسد مدل از قابلیت نسبتاً مطلوبی برای پیش‌بینی بارندگی در چارچوب عملیاتی در منطقه ایران برخوردار است. (2015) Sasanian et al. به ارزیابی عملکرد مدل WRF با نه 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. (2011) Evans et al. در جنوب شرق استرالیا اثر پارامتره‌سازی‌های فیزیک متفاوت در مدل WRF و اثر متقابل آن‌ها بر روی بارش‌های همرفتی میان‌مقیاس را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از ۳۶ پیکربندی متفاوت مدل WRF برای چهار روز انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از امتیازهای مهارتی راستی‌آزمایی شد. (2012) Givati et al. به بررسی اثر تفکیک افقی بر روی دقت بارش مدل WRF جهت استفاده در پیش‌بینی رواناب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که حوضه‌های با تفکیک افقی ۴ و ۱/۳ کیلومتر در مقایسه با بارش دیدبانی همبستگی بالایی داشته بطوریکه ضریب همبستگی برای آن‌ها ۰/۹۶ و ۰/۹۲ محاسبه شده است. در این سامانه‌های پیش‌بینی به دو روش صورت می‌گیرد. در روش اول، با استفاده از داده‌های راداری، الگوی پدیده مشخص شده و سپس با به کار بردن

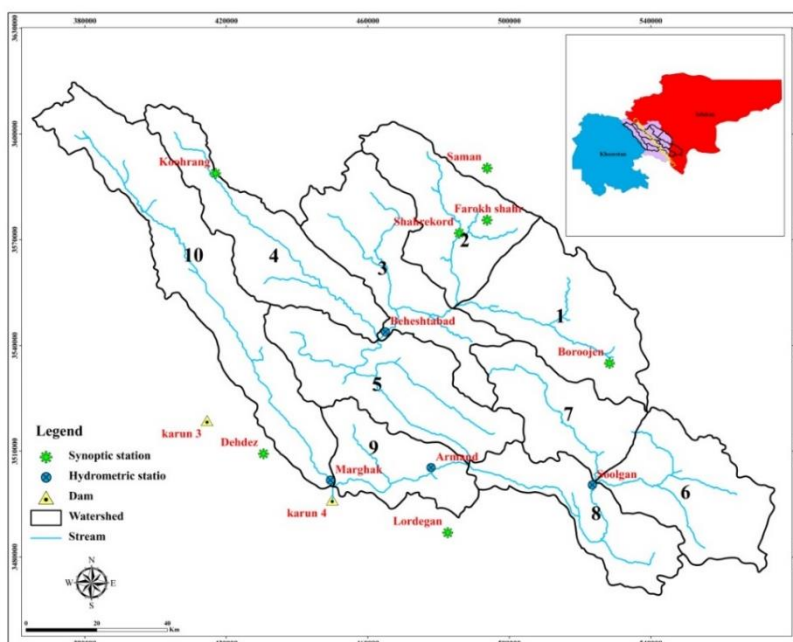
طبق جمع‌بندی‌های صورت گرفته تا کنون از خروجی مدل WRF جهت شبیه‌سازی سیلاب با مدل‌های هیدرولوژیکی نظیر HEC-HMS استفاده نشده است. نوآوری این تحقیق آن است که ارزیابی دقت و عملکرد طرح‌واره‌های مختلف در پیش‌بینی ساعتی بارش و دمای هوا در حوضه کارون ۴، علاوه بر مقایسه مقادیر بارش و دمای هوا پیش‌بینی شده با مشاهداتی در ایستگاه‌های سینوپتیک، بر مبنای مقایسه هیدروگراف سیلاب پیش‌بینی شده با مدل هیدرولوژیکی متناظر با پیش‌بینی بارش و دمای هوا با هر یک از طرح‌واره‌ها با هیدروگراف سیلاب مشاهداتی است. هدف از تحقیق، ارزیابی دقت مدل WRF در پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب در حوضه کارون ۴ است. لذا در این تحقیق با استفاده از مدل WRF مقادیر ساعتی بارش و دمای هوا در حوضه کارون ۴ در جنوب غربی ایران پیش‌بینی شد تا دقت مدل‌ها در پیش‌بینی سیل ارزیابی گردد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کارون در محدوده سد کارون ۴ در قسمت جنوب غربی ایران بین عرض شمالی ۲۰-۳۱ تا ۴۰-۳۲ و طول شرقی ۳۳-۴۹ تا ۴۵-۵۱ در منطقه رشته کوه‌های زاگرس واقع شده و از نظر تقسیمات کشوری عمدتاً به استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان تعلق دارد. حوضه آبریز مذکور تقریباً کوهستانی بوده و ارتفاع متوسط آن ۲۳۵۴ متر و ارتفاع بلندترین نقطه آن ۴۲۰۰ متر می‌باشد مساحت حوضه آبریز رودخانه کارون در محدوده سد کارون ۴، ۱۲۸۵۴ کیلومتر مربع بوده و رشته کوه‌های زاگرس شرایط مناسبی را برای بارش در حوضه آبریز این رودخانه به خصوص نواحی غربی و شمال غربی بوجود آورده است. به گونه‌ای که ارتفاع متوسط بارندگی سالانه حوضه حدود ۶۸۰ میلی‌متر برآورد می‌گردد. همچنین متوسط تبخیر از سطح دریاچه برابر ۱۸۱۱/۲ میلی‌متر است. متوسط آورد سالانه رودخانه ۴۹۲۷/۴ مترمکعب بوده و دمای حداقل اقلیم محل سد برابر ۸ درجه سانتی‌گراد و دمای حداکثر در محل سد برابر ۴/۳۲ درجه سلسیوس برآورد می‌گردد. حوضه کارون ۴ بر اساس نقشه‌های پایه توپوگرافی، شبکه رودخانه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری به ۱۰ زیرحوضه تقسیم شده است. شکل (۱) نقشه زیرحوضه‌بندی حوضه کارون ۴ تا محل سد کارون ۴ بر مبنای نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰، شماره مربوط به هر زیرحوضه و موقعیت ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. خلاصه مشخصات فیزیوگرافی و ارتفاعی حوضه کارون ۴ و زیرحوضه‌های آن در جدول (۱) آمده است. اسامی ایستگاه‌ها و مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری در جدول (۲) ذکر شده است.

می‌کنند. (Huang et al. (2016) معادلات بارش مدل ۳ بعدی WRF و کاربرد آن را در تحلیل نقش تبخیر سطحی در وقایع بارش‌های سنگین بررسی نمودند. نتایج نشان داد که برای رسیدن به پیش‌بینی دقیق تبخیر سطحی می‌بایست میزان بارش سطحی بطور دقیق پیش‌بینی شود. (Godarzi et al. (2018) توانایی مدل WRF در پیش‌بینی بارش‌های سنگین در حوضه آبریز رودخانه کن تهران را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که بارش‌های پیش‌بینی شده توسط NCEP بسیار کم تر از مقدار واقعی برآورد شده‌اند، ضمن این‌که زمان وقوع بارش نیز به درستی پیش‌بینی نشده است. همچنین نتایج بیانگر عملکرد نسبتاً مطلوب مدل WRF در پیش‌بینی بارش‌های سنگین است به طوری که با اجرای این مدل مقدار شاخص خطا به مقدار قابل توجهی نسبت به مدل بزرگ مقیاس کاهش یافت. (Godarzi et al. (2019) یک مدل تصمیم‌گیری برای سیستم هشدار سیل بر اساس گروه پیش‌بینی ارائه نمودند. از مدل پیش‌بینی (WRF) برای پیش‌بینی بارش شدید باران در حوضه کن استفاده شد و یک شبکه بیزی (BN) ایجاد و با استفاده از پیش‌بینی‌های گروه جوی، دبی اوج سیل تخمین زده شد. سرانجام، یک مدل فازی برای تصمیم‌گیری در مورد اختطار سیل ارائه شد. ارزیابی سیستم هشدار سیل پیشنهادی برای سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیستم به عنوان یک سطح هشدار انتخاب شده است. با این حال، اگر احتمال بین برخی از سطوح هشداردهنده به طور مساوی توزیع شود، سیستم هشدار سیل با احتیاط عمل می‌کند زیرا مدل تصمیم‌گیری بالاترین رتبه را به سطح هشدار قوی‌تر اختصاص داده است. (Nasr esfahani et al. (2020) مدل WRF را برای پیش‌بینی دما و سرمازدگی در حوضه آبریز زاینده رود ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد دمای شبیه‌سازی شده با مدل WRF با مدت ۲۴ ساعت بهتر از ۴۸ ساعته است و ارتباط و همبستگی قابل قبولی بین دمای شبیه‌سازی شده و مشاهده شده وجود دارد. (Zhang et al. (2018) اثرات تغییر کاربری اراضی را بر بارش‌های تابستانه با استفاده از مدل WRF بررسی کردند. نتایج نشان داد در مناطق شهری بارش‌های حادی افزایش دارد، در حالیکه بارش‌های تابستانه در این مناطق کاهش می‌یابد. (Gangrade et al. (2019) ارزیابی آسیب‌پذیری سیل با محاسبه PMF در یک محیط در حال تغییر را بررسی نمودند. آن‌ها از مدل WRF برای محاسبه PMP استفاده کردند و از آن برای محاسبه PMF در حوضه آبریز استفاده کردند. نتایج نشان داد محاسبه PMF با این روش تقریباً با روش‌های معمول مطابقت دارد. (Silvestro et al. (2019) مدلی را جهت پیش‌بینی سیلاب با استفاده از پرونده‌های مدل WRF ارائه نمودند.



شکل ۱- مرز زیرحوضه‌ها تا محل سد کارون ۴ و موقعیت ایستگاه‌های مختلف

جدول ۱- خلاصه مشخصات فیزیوگرافی و ارتفاعی حوضه کارون ۴ و زیرحوضه‌های آن

شماره زیر حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	حداقل ارتفاع (متر)	حداکثر ارتفاع (متر)	ارتفاع متوسط (متر)	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	شیب خالص وزنی آبراهه اصلی (%)
۱	۱۴۳۰/۹	۱۸۸	۱۹۸۸	۳۲۰۷	۲۳۲۸	۵۸/۵	۳/۱
۲	۱۱۵۶	۱۷۲	۱۹۸۴	۳۲۶۷	۲۲۴۶	۵۸/۶	۳/۲
۳	۱۳۷۶	۲۶۱	۱۶۴۸	۳۷۲۷	۲۳۸۹	۶۱/۸	۵/۴
۴	۱۲۷۷	۲۲۷	۱۶۴۷	۴۱۹۱	۲۶۶۷	۹۹/۸	۸/۴
۵	۱۵۱۴	۲۱۶	۱۱۲۷	۳۹۸۲	۲۳۵۷	۶۹/۵	۸
۶	۱۲۳۰	۱۷۰	۲۰۷۲	۳۷۰۲	۲۵۲۶	۴۸/۱	۴/۱
۷	۹۵۱	۱۶۳	۲۰۷۳	۳۵۹۴	۲۴۶۴	۶۳/۶	۲/۸
۸	۹۴۳	۱۹۲	۱۱۲۸	۳۸۷۰	۲۴۷۸	۷۵/۸	۶/۳
۹	۸۰۲	۱۴۶	۸۵۲	۳۲۳۱	۱۸۵۵	۴۷/۸	۹/۲
۱۰	۲۱۷۱	۳۴۲	۸۵۰	۴۱۳۲	۲۲۰۶	۱۴۹/۳	۱۴/۳

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده

ایستگاه	نوع ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)
شهرکرد	بارانسنجی	۳۲ ۱۷	۵۰ ۵۱	۲۰۴۸
بروجان	بارانسنجی	۳۱ ۵۷	۵۱ ۱۸	۲۱۹۷
کوهرنگ	بارانسنجی	۳۲ ۲۶	۵۰ ۰۷	۲۲۸۵
لردگان	بارانسنجی	۳۱ ۳۱	۵۰ ۴۹	۱۵۸۰
فرخ شهر	بارانسنجی	۳۲ ۱۸	۵۰ ۵۶	۲۰۶۵
دهدز	بارانسنجی	۳۱ ۴۳	۵۰ ۱۶	۱۴۵۷
سامان	بارانسنجی	۳۲ ۲۷	۵۰ ۵۶	۲۰۵۷
ارمند	هیدرومتری	۵۰ ۴۶	۳۱ ۴۰	۱۰۸۲
مرغک	هیدرومتری	۵۰ ۲۷	۳۱ ۳۹	۹۱۳
بهشت آباد	هیدرومتری	۵۰ ۳۷	۳۲ ۰۱	۱۶۸۰
سولگان	هیدرومتری	۵۱ ۱۴	۳۱ ۳۸	۲۰۸۶

علوم جو طراحی شده است، به گونه‌ای که این مدل برای استفاده در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گستره وسیعی از پدیده‌های جوی از

مدل WRF برای کاربری و استفاده در مقاصد عملیاتی

پیش‌بینی وضع هوا و همچنین مقاصد پژوهشی در زمینه



یک طرح‌واره همرفتی، دو طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای، دو طرح‌واره خردفیزیک، یک طرح‌واره لایه سطحی و دو طرح‌واره تابش موج کوتاه اجرا شده تا پیکربندی مناسب برای بارش مارس ۲۰۰۳ به دست آید. جدول (۳) پیکربندی بخش فیزیکی مدل WRF در هشت اجرای مختلف را نشان می‌دهد. پیکربندی‌ها با استفاده از حروف هر طرح‌واره نامگذاری شده و با شماره مشخص شده‌اند که در ادامه مطلب از آنها استفاده می‌شود.



شکل ۲- دامنه در نظر گرفته شده در مدل WRF

مقیاس چند متر تا چند صد هزار کیلومتر مناسب است (Skamarock *et al.*, 2008). مدل WRF یک مدل غیرهیدروستاتیک (با گزینه اختیاری هیدروستاتیک در حین اجرا) است که شبکه‌بندی افقی آن شبکه آراکوا (Arakawa C-grid) است. 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. در این مطالعه، مقادیر بارش و دمای هوا مربوط به واقعه مارس ۲۰۱۶ با فواصل زمانی ۶ ساعته پیش‌بینی شده است. زمان شروع اجرای مدل 12 UTC روز ۱۴ مارس تعیین شده و پیش‌بینی تا روز ۱۶ مارس ادامه داشته است. برای شرایط مرزی و اولیه مدل از داده‌های جهانی Era-Interim با تفکیک ۰/۷۵ درجه استفاده شده است. مدل WRF با یک حوضه دامنه و با تفکیک مکانی افقی ۲۳ کیلومتر اجرا شده است. دامنه اول که در شکل (۲) نمایش داده شده از شرق مدیترانه تا شرق ایران و خلیج فارس در جنوب و دریای خزر در شمال ایران را در بر می‌گیرد. مدل WRF با استفاده از هشت پیکربندی متفاوت، شامل

جدول ۳- پیکربندی بخش فیزیکی مدل WRF در هشت اجرای مختلف

شماره اجرا	اختصار اسم هر ترکیب	لایه مرزی	خرد فیزیک	تابش موج کوتاه	تابش موج بلند	پوشش سطحی	لایه سطحی	همرفتی
۱	YSULG	YSU(Hong <i>et al.</i> ,2006)	Lin (Chen, <i>et al.</i> , 2002)	Goddard (Chou and Suarez, 1999)	RRTM(Mlawer <i>et al.</i> ,1997)	Unified Noah (Chen <i>et al.</i> , 2011)	MM5 (Jimenez <i>et al.</i> , 2012)	Kf (Kain, 2004)
۲	MYJLG	MYJ(Janjic,1994)	Lin	Goddard	RRTM	Unified Noah	Eta Similarity Scheme (Janjic,1994)	Kf
۳	YSUWG	YSU	WMS5-class(4) (Hong <i>et al.</i> ,2004)	Goddard	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
۴	MYJWG	MYJ	WMS5-class(4)	Goddard	RRTM	Unified Noah	Eta Similarity Scheme	Kf
۵	YSULD	YSU	Lin	Dudhia (Dudhia,1989)	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
۶	MYJLD	MYJ	Lin	Dudhia	RRTM	Unified Noah	Eta Similarity Scheme	Kf
۷	YSUWD	YSU	WMS5-class(4)	Dudhia	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
۸	MYJWD	MYJ	WMS5-class(4)	Dudhia	RRTM	Unified Noah	Eta Similarity Scheme	Kf

تا ساعت ۰۰ UTC روز ۱۵ به عنوان زمان تنظیم مدل در نظر گرفته شده و از محاسبه حذف شدند. داده‌های مشاهداتی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، شامل داده‌های مشاهداتی بارش ۶ ساعته تهیه شده از سازمان هواشناسی هستند. با توجه به حوضه انتخابی ایستگاه‌های فرخ شهر، کوه‌رنگ، شهرکرد،

برای صحت‌سنجی، داده‌های منظم پیش‌بینی شبکه مدل، به نقاط ایستگاه‌های دیدبانی درونیایی شدند و با استفاده از بارش مشاهداتی، کارایی پیکربندی‌های متفاوت در پیش‌بینی کمی بارش مقایسه شد. با توجه به فاصله زمانی بین آغاز اجرای مدل و آغاز بارندگی، ۱۲ ساعت فاصله زمانی از ساعت ۱۲ UTC روز ۱۴

$$PTVE = \frac{\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

(رابطه ۵)

$$IOA = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}, & \text{when } \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \leq c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \\ \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|} - 1, & \text{when } \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| > c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \end{cases}$$

### نتایج و بحث

#### کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

در ابتدا قبل از بکارگیری مدل HEC-HMS جهت پیش‌بینی هیدروگراف سیل، اقدام به واسنجی و صحت‌سنجی آن گردید. در این مدل برای شبیه‌سازی تبدیل بارش به رواناب، تلفات نفوذ، جریان پایه و ذوب برف در زیرحوضه‌ها به ترتیب از روش هیدروگراف واحد کلارک، روش شماره منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)، روش فروکش و روش درجه-روز استفاده گردید. همچنین برای روندیابی جریان در رودخانه‌ها از مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام-کانج استفاده شد. شکل (۳) شماتیک زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های بالادست سد کارون ۴ ساخته شده در محیط مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS را نشان می‌دهد. شکل (۴) مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای واقعه 9Mar2014 در ایستگاه هیدرومتری ارمند برای کالیبراسیون مدل را نشان می‌دهد. به منظور صحت‌سنجی مدل کالیبره‌شده HEC-HMS، شبیه‌سازی بارش-رواناب برای دوره زمانی صحت‌سنجی با مقادیر پارامترهای نهایی حاصل از کالیبراسیون انجام شد. شکل (۵) مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای واقعه 8Mar2011 در ایستگاه هیدرومتری ارمند برای صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴) می‌توان دریافت که تغییرات هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS برای واقعه 9Mar2014 در ایستگاه هیدرومتری ارمند نزدیک به هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای است و مدل HEC-HMS از لحاظ شبیه‌سازی بارش-رواناب بخوبی کالیبره شد. همچنین با توجه به شکل (۵) می‌توان دریافت که تغییرات هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS برای واقعه 8Mar2011، تقریباً نزدیک به هیدروگراف مشاهده‌ای است. جدول (۴) معیارهای آماری نیکوئی برازش برای دوره کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در ایستگاه هیدرومتری ارمند را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴)، مقادیر ضریب ناش-ساتکلایف، درصد خطای حجمی کل و میانگین قدرمطلق درصد خطا بین هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله

بروجن و لردکان به عنوان ایستگاه‌های هم‌دیدگی و ایستگاه دبی‌سنجی ارمند در نظر گرفته شده‌اند که در شکل (۱) نمایش داده می‌شوند. با توجه به نزدیکی ایستگاه فرخ شهر و شهرکرد و خروجی یکسان مدل در این دوشهر، در تحلیل‌ها ایستگاه فرخ شهر حذف شد.

#### مدل HEC-HMS

مدل HEC-HMS و نرم‌افزار مربوطه توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا ارائه شده است. از قابلیت‌های مهم آن، امکان ارتباط با دیگر نرم‌افزارها از جمله سیستم اطلاعات جغرافیایی است. این ویژگی باعث ارتباط درست و سریعتر با دیگر ابزار نرم‌افزاری شده، روند بررسی هر رخداد هیدرولوژی را در زمان کمتری امکان‌پذیر می‌سازد. این مدل از یک سری روابط ساده، تلفات حوضه و آبنمود واحد برای بازسازی سیلاب‌ها از داده‌های بارندگی استفاده می‌کند. در این مدل رابطه‌ای از رواناب سطحی منظور می‌گردد که بر مبنای بارش‌نگار بارش ورودی عمل می‌کند. بارش مازاد پس از کسر سهم نفوذ و یک سری کاهش هیدرولوژیکی و بر اساس توابع خاصی مانند شماره منحنی (CN) در روش سازمان حفاظت خاک (SCS) محاسبه می‌شود. بارش مازاد به دست آمده، منتهی به آبنمود واحد شده که توسط آن آبنمود رواناب خروجی از هر زیرحوضه استخراج می‌شود. در این مدل برای محاسبه تلفات بارندگی و رواناب مستقیم روش‌های مختلف محاسبه نرخ تلفات و محاسبه رواناب مستقیم وجود دارد.

#### معیارهای آماری

برای ارزیابی دقت مدل‌ها، از شاخص‌های آماری سنجش خطا شامل ضریب ناش-ساتکلایف، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدرمطلق درصد خطا، درصد خطای حجمی کل و شاخص توافق استفاده شده است که به ترتیب در روابط ۳ تا ۷ آمده است. شاخص IOA معمولاً برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود. شاخص IOA بین -۱ و +۱ تغییر می‌کند که هرچه مقدار IOA به +۱ نزدیکتر باشد بیانگر عملکرد بهتر مدل است. در رابطه ۷، c برابر با ۲ است. در روابط ۱ تا ۵، n برابر با تعداد داده‌های جریان،  $O_i$  و  $S_i$  مقادیر دبی جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در گام زمانی نام،  $\bar{O}$  میانگین دبی مشاهده‌ای و  $Cov$  کوواریانس داده‌ها است:

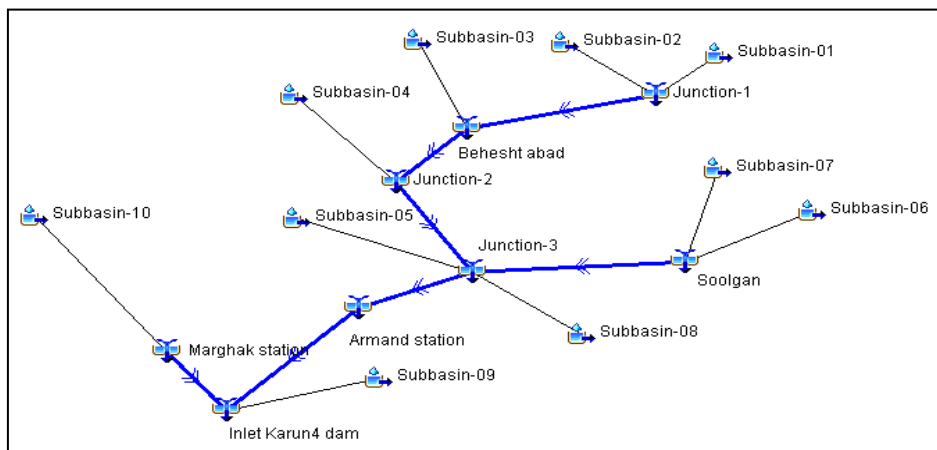
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

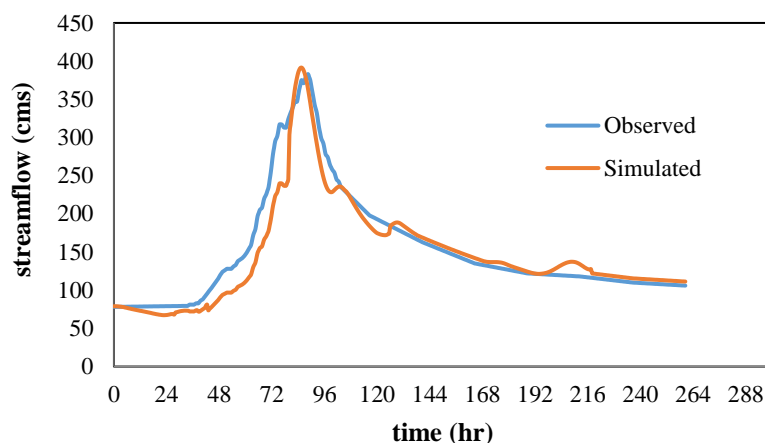
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| * 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

کالیبراسیون به ترتیب برابر با 0.91، -4.27% و 8.85% است. علاوه بر این مقدار منفی PTVE بیانگر برآورد کم حجم رواناب با مدل HEC-HMS است. با توجه به ضریب ناش در جدول (۴)

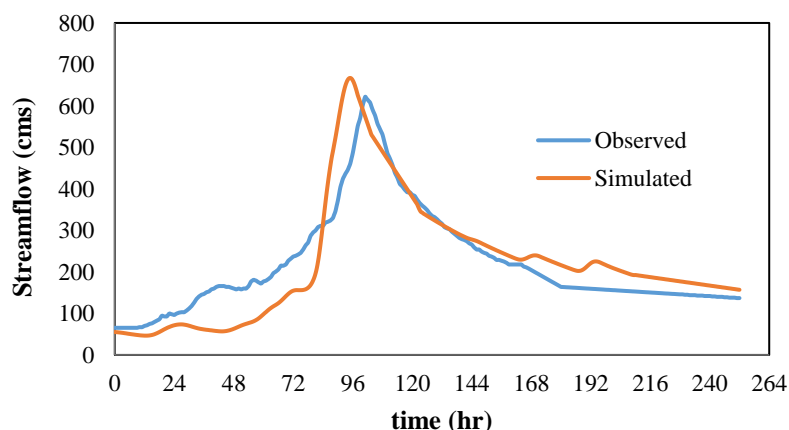
برابر با 0.74، در مرحله صحت‌سنجی مدل HEC-HMS می‌توان دریافت که مدل بخوبی کالیبره شده است.



شکل ۳- توپولوژی زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های بالادست سد کارون ۴ ساخته شده در مدل HEC-HMS



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای واقعه 26Mar1998 در ایستگاه ارمند برای کالیبراسیون مدل



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای واقعه 1Feb1993 در ایستگاه ارمند برای صحت‌سنجی مدل در فوریه ۱۹۹۳

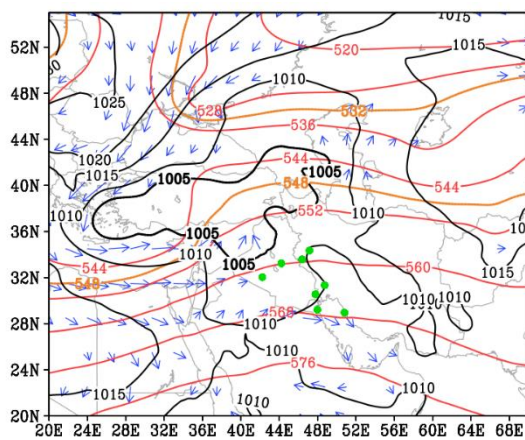
جدول ۴- معیارهای آماری نیکویی برازش دوره کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

مرحله	NS	PTVE (%)	RMSE (cms)	MAPE (%)
کالیبراسیون	۰/۹۱	-۴/۲۷	۲۱/۵	۸/۸۵
صحت‌سنجی	۰/۷۴	۰/۱۹	۶۳/۵	۲۵/۷

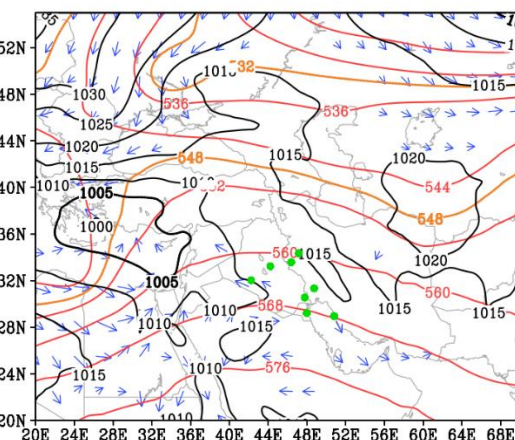


هکتوپاسکال کاهش یافته است. هسته مرکزی آن در شمال ایران مستقر شده و ناوه فشاری آن به مرکز ایران گسترش دارد. در طی این زمان بارش در حوضه افزایش داشته است. در ساعات‌های بعد کم فشار به عرض‌های بالاتر انتقال یافته و پشته فشاری بر روی ایران مستقر می‌شود. به این ترتیب بیش‌ترین بارش گزارش شده در کوه‌رنگ به مقدار ۴۶ میلی متر در ساعت ۱۲ روز ۱۵ مارس گزارش شده است و پس از آن از مقدار بارش کاسته می‌شود. ساعت ۰۰ UTC روز ۱۶ مارس بارش به پایان رسیده است.

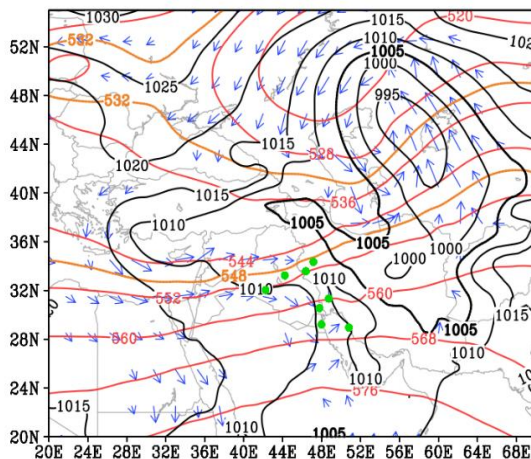
تحلیل همدیدی: بارش و سیل ۱۴ و ۱۵ مارس ۲۰۱۶  
 ساختار همدیدی در ساعت ۰۰ روز ۱۴ مارس کم فشاری ۱۰۰۵ هکتوپاسکال همراه با ناوه ارتفاعی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال را در شرق مدیترانه نشان می‌دهد (شکل ۶). در ساعت ۱۲ UTC همان روز کم فشار به سمت شرق گسترش یافته و ناوه‌ای از آن به مرکز ایران و ناوه دوم به غرب عراق گسترش می‌یابد. به دلیل گسترش ناوه‌ی ارتفاعی به ایران در شش ساعت بعد یعنی ساعت ۱۸ UTC روز ۱۴ مارس بارش در حوضه کارون ۴ آغاز شده است. در ساعت ۰۰ UTC روز ۱۵ مارس کم فشار تقویت شده و به ۹۹۵



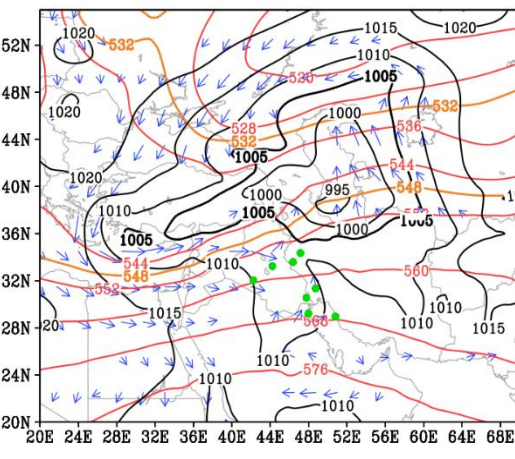
ب



الف



ت



پ

شکل ۶- الف) فشار متوسط سطح (مشکی پر) هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (خط چین)، جهت باد ۹۲۵ هکتوپاسکال (پیکامن) برای زمان‌های ساعت ۰۰ روز ۱۴ مارس (الف)، ساعت ۱۲ روز ۱۴ مارس (ب)، ساعت ۰۰ روز ۱۵ مارس (پ) و ساعت ۱۲ روز ۱۵ مارس (ت)

بروجن مقدار بیش از ۰/۵ داشته و نشان‌دهنده هماهنگی آنها است. همچنین از میان هشت طرح‌واره پیکربندی اجرای ۶ (MYJLD)، اجرای ۲ (MYJLG)، اجرای ۸ (MYJWD) و اجرای ۴ (MYJWG) بیشترین مقدار را داشته‌اند. ترکیب طرح‌واره MYJ لایه مرزی با دیگر طرح‌واره‌ها نتیجه بهتری در بارش ساعتی

مقایسه بارش و دمای مشاهداتی و برون‌داد مدل  
 جدول (۵) شاخص IOA برای بارش ساعتی پیش‌بینی شده با طرح‌واره‌های مختلف را نشان می‌دهد. ضریب IOA بارش مشاهداتی و مدل با هشت طرح‌واره در همه ایستگاه‌ها به جز

ضریب منفی بوده و نشان‌دهنده عدم‌همانگی برون‌داد مدل با مشاهده است.

داشته است. بهترین مقدار IOA به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۶ و ۰/۷۴ و ۰/۵۲ در شهرکرد، سامان، کوه‌رنگ و لردگان با ترکیب طرح-وارهای اجرای ۶ (MYJLD) به دست آمده است. در بروجن این

جدول ۵- شاخص IOA برای بارش ساعتی پیش‌بینی‌شده با طرح‌واره‌های مختلف

ایستگاه	شاخص	MYJLD	MYJLG	MYJWD	MYJWG	YSULD	YSULG	YSUWD	YSUWG
بروجن	IOA	-۰/۴۶	-۰/۴۱	-۰/۳۸	-۰/۲۶	-۰/۶۵	-۰/۷۲	-۰/۵۸	-۰/۶۵
کوه‌رنگ	IOA	۰/۷۴	۰/۷	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۶۷
لردگان	IOA	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۵	۰/۸۴	۰/۶۱	۰/۷۲	۰/۶۳	۰/۷۵
سامان	IOA	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۷
شهرکرد	IOA	۰/۷۷	۰/۶۱	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۷	۰/۶۸

مجموع بارش همانگی خوبی با مشاهده دارد. به این ترتیب مجموع بارش در ایستگاه کوه‌رنگ که بارش‌های قابل توجهی داشته توسط مدل به خوبی برآورد شده در حالی که ایستگاه بروجن با مقدار بارش کم ۱/۵ توسط مدل به خوبی شبیه‌سازی نمی‌شود. دقت مدل در بارش‌های کم خوب نیست. ترکیب طرح‌واره‌های اجرای ۲ (MYJLG) و اجرای ۵ (YSULD) نزدیک‌ترین مقدار مجموع بارش را به داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه-های شهرکرد و کوه‌رنگ دارند.

جدول (۶) مقایسه مجموع بارش دیدبانی و پیش‌بینی‌شده با طرح‌واره‌های مختلف در طول تداوم بارش در ایستگاه‌های مختلف را نشان می‌دهد. در ایستگاه بروجن مجموع بارش برآورد شده توسط مدل از مشاهده‌ای بیشتر است. البته مجموع بارش مشاهده‌ای در این ایستگاه ۱/۵ میلی‌متر است که مقدار زیادی نبوده و مدل نتوانسته این مقدار را به خوبی برآورد نماید. مجموع بارش برآورد شده توسط مدل در سامان و شهرکرد کمتر و در بروجن و لردگان بیشتر از مشاهده است. در ایستگاه کوه‌رنگ

جدول ۶- مقایسه مجموع بارش دیدبانی و پیش‌بینی‌شده با طرح‌واره‌های مختلف در طول تداوم بارش در ایستگاه‌های مختلف

ایستگاه	MYJLD	MYJLG	MYJWD	MYJWG	YSULD	YSULG	YSUWD	YSUWG	Observed
بروجن	۸/۶۹	۸/۱۱	۷/۷۹	۶/۷۵	۱۲/۸	۱۵/۳	۱۰/۹	۱۲/۵	۱/۵
کوه‌رنگ	۸۲/۵	۸۰/۴	۸۱/۲	۸۲/۶	۸۵/۳	۸۴	۸۳/۳	۸۴/۷	۸۶
لردگان	۴۳/۴	۳۸/۳	۴۴/۷	۴۴/۸	۴۱/۶	۴۱/۹	۴۴	۴۵/۹	۲۱/۲
سامان	۵/۸۲	۷/۳۶	۴/۳۶	۵/۴۹	۲/۹	۳/۴	۲/۰۱	۲/۰۲	۱۵
شهرکرد	۸/۴۴	۱۱/۲	۶/۷۲	۸/۶۵	۹/۵۷	۹/۴۶	۸/۵۹	۶/۴۷	۱۷/۱

اجرای ۱ و ۳ که ترکیب طرح‌واره لایه مرزی YSU با دیگر طرح‌واره‌ها است، مقدار ضریب تطابق از دو اجرای دیگر بیشتر است. جدول (۸) مقایسه مقادیر متوسط دمای هوا دیدبانی و پیش‌بینی‌شده با طرح‌واره‌های مختلف در طول تداوم سیل در ایستگاه‌های مختلف را نشان می‌دهد. میانگین دمای پیش‌بینی‌شده توسط مدل در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از دمای مشاهده‌ای است. در ایستگاه‌های کوه‌رنگ، سامان و شهرکرد این اختلاف حدود دو درجه سلسیوس می‌باشد. دو ترکیب طرح‌واره اجرای ۱ (YSULG) و اجرای ۳ (YSUWG) نزدیک‌ترین متوسط

جدول (۷) شاخص r و IOA برای دمای هوای ساعتی پیش‌بینی‌شده با طرح‌واره‌های مختلف را نشان می‌دهد. ضریب IOA در مورد برآورد دمای ساعتی توسط مدل مقدار مناسبی را به دست نداده است. به این معنا که مدل WRF در مورد پیش‌بینی دما عملکرد خوبی ندارد. به جز دو ایستگاه سامان و شهرکرد که به ترتیب ضریب ۰/۴۷ و ۰/۵۲ را دارند در دیگر ایستگاه‌ها ضریب کمتر از ۰/۵ است. چهار ترکیب اجرای ۱ (YSULG)، اجرای ۳ (MYJWG)، اجرای ۲ (MYJLG) و اجرای ۳ (YSUWG) نتیجه بهتری نسبت به چهار طرح‌واره دیگر دارند که در سامان و شهرکرد

(YSULG) ۱ و اجرای ۲ (MYJLG) نتیجه مشابهی نشان داده‌اند.

دما را نسبت به مشاهده برآورد کرده‌اند. در ایستگاه کوه‌رنگ چهار پیکربندی اجرای ۴ (MYJWG)، اجرای ۳ (YSUWG)، اجرای

جدول ۷- شاخص r و IOA برای دمای هوای ساعتی پیش‌بینی‌شده با طرح‌واره‌های مختلف

ایستگاه	Index	YSUWG	YSUWD	YSULG	YSULD	MYJWG	MYJWD	MYJLG	MYJLD
بروجن	r	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۵
	IOA	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۲	۰/۲۶	۰/۲
کوه‌رنگ	r	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۷۶
	IOA	۰/۲۵	۰/۱۶	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۲
لردگان	r	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۸۱
	IOA	۰/۲	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۲۳	۰/۱۲
سامان	r	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۲
	IOA	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۴۳
شهرکرد	r	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۲
	IOA	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۵	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۵۱

جدول ۸- مقایسه مقادیر متوسط دمای هوای دیدبانی و پیش‌بینی‌شده با طرح‌واره‌های مختلف در طول تداوم سیل در ایستگاه‌های مختلف

ایستگاه	Observed	YSUWG	YSUWD	YSULG	YSULD	MYJWG	MYJWD	MYJLG	MYJLD
بروجن	۶/۱۳	۲/۸۷	۲/۵۲	۲/۸۴	۴/۳۸	۲/۷۹	۲/۴۴	۲/۷۳	۲/۳۹
کوه‌رنگ	۲/۹۱	۰/۵۲	۰/۰۸	۰/۵۳	۰/۱	۰/۵۴	۰/۲۱	۰/۵۴	۰/۱۵
لردگان	۹/۴۵	۵/۳۳	۴/۷۷	۵/۳۴	۴/۸۷	۵/۳۴	۴/۷۴	۵/۳۶	۴/۷۱
سامان	۶/۳۲	۵/۰۴	۴/۶۱	۴/۹۵	۴/۵۱	۴/۷۹	۴/۳۵	۴/۷	۴/۲۱
شهرکرد	۶/۰۴	۴/۳۸	۳/۸۹	۴/۲۸	۳/۸	۴/۰۹	۳/۶۷	۴/۰۳	۳/۶۱

مشاهداتی داشته است. به این ترتیب طرح‌واره‌ای که بارش را در کل دوره به خوبی پیش‌بینی کرده در مورد دبی اوج نیز عملکرد مناسبی داشته است. ارتفاع رواناب مشاهداتی نیز ۳/۴۵ میلیمتر بوده که دو ترکیب طرح‌واره اجرای ۲ (MYJLG) و اجرای ۴ (MYJWG) با ۴/۷۱ و ۴/۷۴ میلیمتر نزدیکترین مقدار به مشاهده را نشان می‌دهند. هردو طرح‌واره در موارد قبل نیز هماهنگی خوبی با داده مشاهداتی نشان می‌دهند.

جدول (۹) مقایسه مقادیر دبی اوج و ارتفاع رواناب هیدروگراف سیل پیش‌بینی‌شده برای طرح‌واره‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۹)، دبی اوج مشاهداتی ۲۰۰ مترمکعب در ثانیه بوده و دو ترکیب طرح‌واره اجرای ۲ (MYJLG) و اجرای ۸ (MYJWD) با مقدارهای ۲۲۰/۶ و ۲۳۳/۳ مترمکعب در ثانیه نزدیکترین مقدار به مشاهده را داشته‌اند. طرح‌واره MYJLG در موارد قبل نتیجه خوبی نشان داده و طرح‌واره اجرای ۸ (MYJWD) در مورد بارش نیز هماهنگی مناسبی با داده

جدول ۹- مقایسه مقادیر دبی اوج و ارتفاع رواناب هیدروگراف سیل پیش‌بینی‌شده برای طرح‌واره‌های مختلف

متغیر	مشاهده ای	YSUWG	YSUWD	YSULG	YSULD	MYJWG	MYJWD	MYJLG	MYJLD
دبی پیک (cms)	۲۰۰	۲۸۶/۴	۳۲۳/۷	۴۶۷/۱	۳۶۶/۳	۲۴۲/۸	۲۳۳/۳	۲۲۰/۶	۲۴۹/۹
رواناب (mm)	۳/۴۵	۷/۶	۶/۲۸	۷/۹۶	۶/۷	۴/۷۴	۴/۸۵	۴/۷۱	۵/۱۲

است. بنابراین به نظر می‌رسد در پیش‌بینی سیل نسبت به دیگر طرح‌واره‌ها بهتر عمل نموده است. ترکیب اجرای ۶ (MYJLD) گرچه در روند بارش ضریب توافقی خوبی با داده مشاهداتی داشته اما در پیش‌بینی سیل در دبی اوج و ارتفاع رواناب همچنین ضریب ناش خطای بیشتری نسبت به ترکیب اجرای ۲ (MYJLG) نشان

جدول (۱۰) مقایسه شاخص‌های آماری هیدروگراف سیل پیش‌بینی‌شده برای طرح‌واره‌های مختلف را نشان می‌دهد. بررسی ضریب ناش در هیچ یک از طرح‌واره‌ها نتیجه خوبی به دست نمی‌دهد. اما کمترین مقدار یا نزدیک‌ترین مقدار به صفر را در ترکیب اجرای ۲ (MYJLG) دارد، این طرح‌واره در دبی اوج، مجموع بارش، دمای ساعتی و متوسط دما نتیجه مناسبی داشته

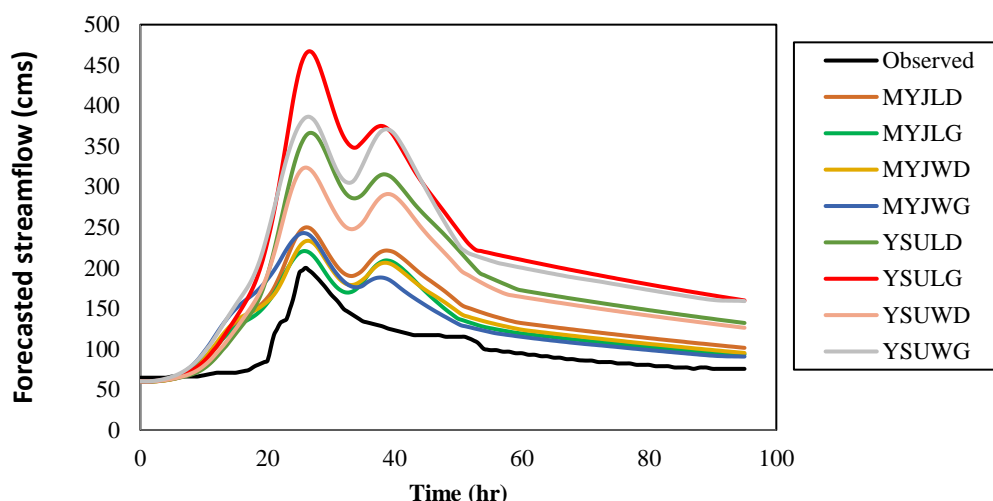
WRF در شکل (۷) نشان داده شده است. تمامی طرح‌واره‌ها مقدار رواناب را بیشتر از مشاهده‌ای پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین زمان آغاز رواناب در مدل زودتر از مشاهده‌ای است. روند تغییرات رواناب حاصل از هر هشت طرح‌واره مشابه همدیگر بوده اما ارتفاع رواناب متفاوت است. نامناسب‌ترین طرح‌واره YSULG می‌باشد.

می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد طرح‌واره لایه مرزی MYJ، طرح-واره خردفیزیک ابر Lin و طرح‌واره تابشی GODDARD در پیش‌بینی سیل مارس ۲۰۱۶ در حوضه کارون ۴ بهترین عملکرد را داشته است.

مقایسه هیدروگراف پیش‌بینی شده در ایستگاه هیدرومتری ارمند حاصل از پیش‌بینی بارش با طرح‌واره‌های مختلف در مدل

جدول ۱۰- مقایسه شاخص‌های آماری هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده برای طرح‌واره‌های مختلف

YSUWG	YSUWD	YSULG	YSULD	MYJWG	MYJWD	MYJLG	MYJLD	معیار
-۱۴/۶۵۷	-۶/۰۸۲	۱۸/۴۷۱	-۸/۸۹۳	-۰/۴۸۳	-۰/۵۱۹	-۰/۲۹۳	-۱/۲۰۸	NS
۴	۲/۷	۴/۴	۳/۱	۱/۲	۱/۲	۱/۱	۱/۵	RMSE Std Dev
۱۱۴/۲۹	۷۶/۱۵	۱۲۴/۷	۸۸/۲۹	۳۱/۸۱	۳۴/۹۶	۳۰/۹۵	۴۲/۷۳	PTVE (%)
۱۲۵/۹	۸۶/۷	۱۴۳/۷	۱۰۲/۴	۳۹/۷	۴۰/۱	۳۷	۴۸/۴	RMSE (cms)
۱۰۹/۶۲	۷۳	۱۱۶/۶	۸۲/۷	۳۲/۷۹	۳۵/۹۲	۳۱/۹۳	۴۲/۹۱	MAPE %



شکل ۷- مقایسه هیدروگراف پیش‌بینی شده در ایستگاه هیدرومتری ارمند حاصل از پیش‌بینی بارش با طرح‌واره‌های مختلف در مدل WRF

اجرای ۱ (YSULG) و اجرای ۳ (YSUWG) بیشترین دقت در برآورد متوسط دمای هوا نسبت به متوسط دمای هوای مشاهده‌ای دارند. نتایج شبیه‌سازی بارش و دمای هوا و پیش‌بینی سیل با طرح‌واره‌های مختلف مدل WRF نشان داد که پیکربندی در اجرای ۲ (MYJLG) از دقت بیشتری نسبت به طرح‌واره‌های دیگر برخوردار است. بنابراین به نظر می‌رسد طرح‌واره لایه مرزی MYJ، طرح‌واره خردفیزیک ابر Lin و طرح‌واره تابشی GODDARD در پیش‌بینی سیل مارس ۲۰۱۶ در حوضه کارون ۴ بهترین عملکرد را داشته است. بنابراین به منظور تعیین دقیق‌ترین طرح‌واره مربوط به مدل WRF در پیش‌بینی بارش و دمای هوا، علاوه بر مقایسه مقادیر بارش و دمای هوای پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده‌ای، هیدروگراف سیلاب پیش‌بینی شده متناظر با پیش‌بینی هر یک از طرح‌واره‌ها با هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که چهار پیکربندی اجرای ۶ (MYJLD)، اجرای ۲ (MYJLG)، اجرای ۸ (MYJWD) و اجرای ۴ (MYJWG) بیشترین دقت را در برآورد بارش ساعتی داشته‌اند. بهترین مقدار IOA به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۶، ۰/۷۴ و ۰/۵۲ در شهرکرد، سامان، کوه‌رنگ و لردگان با اجرای ۶ (MYJLD) به دست آمده است. ترکیب طرح‌واره‌های اجرای ۲ (MYJLG) و اجرای ۵ (YSULD) بیشترین دقت را در برآورد مجموع بارش نسبت به مجموع بارش مشاهده‌ای در ایستگاه‌های شهرکرد و کوه‌رنگ دارند. نتایج نشان داد که چهار پیکربندی اجرای ۱ (YSULG)، اجرای ۴ (MYJWG)، اجرای ۲ (MYJLG) و اجرای ۳ (YSUWG) بیشترین دقت در برآورد دمای هوای ساعتی نسبت به چهار طرح‌واره دیگر دارند که دو ترکیب طرح‌واره در



پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب استفاده گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

مقایسه شد. پیشنهاد می‌شود برای تهیه سیستم پیش‌بینی و هشدار سیل در حوضه‌های آبریز، از پیش‌بینی بارش و دمای هوای ساعتی با مدل WRF در ترکیب با مدل هیدرولوژیکی جهت

## REFERENCES

- Azadi, M., Rezazadeh, P., Mirzaei, and Vakili, G., (2004). Numerical Prediction of Winter Systems on Iran: A Comparative Study of Physical Parameterization, *8th Fluid Dynamics Conference*. (In Farsi)
- Benjamin, S. G., Devenyi, D., Weygandt, S. S., Brundage, K. J., Brown, J. M., Grell, G. A., Kim, D., Schwartz, B. E., Smirnova, T. G., Smith, T. L. and Manikin, G. S., (2004), An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 495-518.
- Chawla, I., Osuri, K.K., Mujumdar, P.P. and Niyogi, D., (2018). Assessment of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for simulation of extreme rainfall events in the upper Ganga Basin. *Hydrology & Earth System Sciences*, 22(2).
- Evans, J. P. and Marie and E. Fei Ji., (2011). Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia. *Springer Link*, 39, 1241-1258.
- Febri, D.H., Hidayat, R. and Hanggoro, W., (2016). Sensitivity of WRF-EMS model to predict rainfall event on wet and dry seasons over West Sumatra. *Procedia Environmental Sciences*, 33, pp.140-154.
- Gangrade, S., Shih-Chieh Kao, Tigstu T. Dullo, Alfred J. Kalyanapu and Benjamin L. Preston, (2019). Ensemble-based flood vulnerability assessment for probable maximum flood in a changing environment. *Journal of Hydrology*, 576, 342-355.
- Givati, A., Lyan, B., Liu, Y., 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.
- Godarzi, L., Banihabib M., Roozbahani, A. (2019). A decision-making model for flood warning system based on ensemble forecasts, *Journal of Hydrology*, 573, 207-219
- Hedayati Dezfuli, A. and Azadi, M. (2010). Verification of MM5 forecast precipitation over Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 36(3). (In Farsi)
- Huang, Y., X. Cui, X. Li, A, (2016). three-dimensional wrf-based precipitation equation and its application in the analysis of roles of surface evaporation in a torrential rainfall event, *Atmos. Res.* 169 (123), 54-64.
- Kukkonen, T., J., Kulmala, M., Moisseev, D., Nurmi, P., Pongjola, H., Pylkko, P., Vesala, T., and Viisanen, Y., (2011). The Helsinki Testbed: A Mesoscale Measurement, Research and Service Platform. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 32, 325-342.
- Liu, Y., (2008). The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. army test and evaluation command'. Part I: overview of the modeling system, the forecast products, and how the products are used. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 1077-1092.
- Lu, Tao & Yamada, Tomohito and Yamada, Tadashi, (2016). Fundamental Study of Real-time Short-term Rainfall Prediction System in Watershed: Case Study of Kinu Watershed in Japan. *Procedia Engineering*. 154. 88-93. 10.1016/j.proeng.2016.07.423.
- Mazraeh Farahani, M., Vazifeh, A., Azadi, M. (2010). Study of the effect of horizontal resolution of MM5 mesoscale model on simulation of precipitation of October 2004 synoptical system over Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 35(4).
- Mourre, L., Condom, T., Junquas, C., Lebel, T., Sicart, J.E., Figueroa, R., and Cochachin, A., (2015). Spatio-temporal assessment of WRF, TRMM and in situ precipitation data in a tropical mountain environment (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 6635-6681.
- Nasr Isfahani, M., Yazdanpanah, H., Nasr Isfahani, M. (2020). WRF model Evaluation for predictiong temperature and in Zayandehrood. *Journal of Natural Geography Research*, 51(1), 163-182. (In Farsi)
- Sasanian, S., Azadi, M., Asgharishirazee, H. and Mirzaee, E. (2015). *Nivar*, 39(90-91), 15-26. doi: 10.30467/nivar.2015.14598
- 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
- Silver, M., Karnieli, A., Ginat, H., Meiri, E. and Fredj, E., (2017). An innovative method for determining hydrological calibration parameters for the WRF-Hydro model in arid regions. *Environmental modelling & software*, 91, 47-69.
- Silvestro, F., L. Rossi, L. Campo, A. Parodi, E. Fiori, R. Rudari and Ferraris, L. (2019). Impact-based flash-flood forecasting system: Sensitivity to high resolution numerical weather prediction systems and soil moisture, *Journal of Hydrology*, 572, 388-402
- Skamarock W. C., S Joseph and Klemp B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485
- Soododi, S., Noorian, A. and Reimer, M. G. (2010). Daily precipitation forecast of ECMWF verified over Iran, *Theor Appl Climatol*, 99, 39-51.
- Sugimoto, S., Crook, N., Sun, J. and Xiao, Q. (2008). An examination of WRF 3DVAR radar data



- assimilation on its capability in retrieving unobserved variables and forecasting precipitation through observing system simulation experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4011-4029.
- Taghavi, F., Neyestani, A., Ghader, S. (2013). Short range precipitation forecasts evaluation of WRF model over IRAN. *Journal of the Earth and Space Physics*, 39(2), 145-170. doi: 10.22059/jesphys.2013.35196. (In Farsi)
- Wilson, J. W., Feng, Y., Chen, M. and Roberts, R. D., (2010). Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems. *Wea. Forecasting*, 25, 1691-1714.
- Zakeri, Z., azadi, M., and sahraeiyan, F. (2014). Verification of WRF forecasts for precipitation over Iran in the period Feb-May 2009. *Nivar*, 38(87-86), 3-10. (In Farsi)
- Zhang, H., Wu, C., Chen, W., Huang, G., (2018). Effect of Urban Expansion on Summer Rainfall in the Pearl River Delta, South China), *Journal of Hydrology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.036>