



Comparing the Performance of the Dynamic-Statistical Hybrid Method with the Dynamic Method for Downscaling of CMIP5 Precipitation Data

M. Nekooamal Kermani¹, A.R. Massah Bavani^{2*},
A. Roozbahani³, and M.R. Mohammadpur⁴

Abstract

One of the most important challenges of hydrological studies is the projection of precipitation variability in a basin in future periods. Atmospheric Ocean General Circulation Models (AOGCMs) can project this variability but in large-scale regions. Various versions of these models have been released, one of which is the CMIP5 series with about 40 dynamic models. In this study, the CCSM4 climate model has been used. The data output of this model is in 1×1 (Latitude \times longitude) degree. To downscale the precipitation data of this model, the hybrid of two dynamic (WRF1) and statistical methods has been proposed. The study area is the Poldokhtar subbasin in the Karkheh basin and rainfall data between 1996-2005 have been used. First, the precipitation data were downscaled by the WRF model from the range of 1×1 degree to 9×9 km, and then these data were converted to the range of 3×3 km separately by two methods: a) hybrid and b) WRF. The results showed that the dynamic downscaling by the WRF model in the range of 9×9 km quite shows the precipitation fluctuations during the statistical period. In the 3×3 km range, the hybrid method performed better than the WRF method. Finally the results showed that downscaling of precipitation in this basin using both methods is associated with underestimation and should be accompanied by an bias correction method. As a result, by reducing the time and cost of dynamical downscaling of climate models, the findings of this paper can be of great help in making decisions about water resources management in the wet and dry years of the coming decades of a basin.

Keywords: CMIP5, Hybrid Downscaling, WRF, Poldokhtar.

Received: August 4, 2021

Accepted: January 5, 2022

مقایسه عملکرد روش هیبرید دینامیکی - آماری با روش دینامیکی برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش CMIP5

محمد نکوآمال کرمانی^۱، علی‌رضا مساح بوانی^{۲*}، عباس روزبهانی^۳ و محمدرضا محمدپور^۴

چکیده

اطلاع از تغییرات افت و خیز بارش در سال‌های پیش‌رو در یک حوضه آبریز یکی از مهم‌ترین چالش‌های مطالعات هیدرولوژیکی است. تغییرات این پارامتر به‌وسیله مدل‌های گردش کلی بررسی می‌شود. نسخه‌های گوناگونی از این مدل‌ها منتشر شده است که یکی از نسخه‌های آن مدل‌های سری CMIP5 است که دارای حدوداً ۴۰ مدل دینامیکی در دسترس است. در این مطالعه از مدل اقلیمی CCSM4 استفاده شده است. خروجی داده‌های این مدل 1×1 درجه می‌باشد که جهت ریزمقیاس‌کردن داده‌های بارش این مدل، از پیوند (Hybrid) دو روش دینامیکی (WRF^۱) و آماری استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز پلدختر از زیر حوضه‌های کرخه می‌باشد و از داده‌های بارش بین سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۹۶ استفاده شده است. ابتدا داده‌های بارش توسط مدل WRF از دامنه 1×1 درجه به 9×9 کیلومتر ریزمقیاس شد و سپس این داده‌ها توسط دو روش (الف) هیبرید و (ب) WRF به طور جداگانه به دامنه 3×3 کیلومتر تبدیل گردید. نتایج مشخص کرد که ریزمقیاس‌نمایی هیبرید (که هزینه زمانی و محاسباتی کمتری نسبت به روش WRF دارد) افت و خیزهای بارش را بهتر از روش WRF در مقیاس 3×3 کیلومتر برآورد کرده است. در کل ریزمقیاس‌نمایی بارش در این حوضه با استفاده از هر دو روش با کم برآوردی همراه است و می‌بایست با یک روش تصحیح خطا تصحیح گردد. نهایتاً با کاهش هزینه‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی مدل‌های اقلیمی به‌وسیله روش هیبرید، یافته‌های این تحقیق می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌گیری در خصوص مدیریت منابع آب در سال‌های تر و خشک در دهه‌های آینده نماید.

کلمات کلیدی: CMIP5، ریزمقیاس‌نمایی هیبریدی، WRF، پلدختر.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳/۵/۱۴۰۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۵/۱۰/۱۴۰۰

1- Ph.D. Candidate of Water Resources Engineering, Department of water Resource Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran. Email: nekooamal1358@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran. armassah@ut.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran. Email: roozbahany@ut.ac.ir

4- Assistant Professor, Atmospheric Science & Meteorological Research Center, Tehran, Iran. Email: mrmohammadpur@yahoo.com

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.4.6.3](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.4.6.3)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب گروه مهندسی منابع آب، دانشکدهگان ابوریحان تهران، پاکدشت، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکدهگان ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکدهگان ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران.

۴- استادیار گروه آب، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۱ امکانپذیر است.



مؤثر جهت بهبود خروجی بارش مدل دینامیکی WRF جهت استفاده در مطالعات منابع آب به خصوص استفاده در مدل‌های هیدرولوژی است.

یکی از روش‌هایی که می‌تواند نقاط ضعف روش‌های دینامیکی را پوشش دهد، استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری و هیبرید ریزمقیاس‌نمایی آماری-دینامیکی است. روش ریزمقیاس‌نمایی آماری بدون در نظر گرفتن روابط بر همکنش جوی و فیزیک منطقه، و فقط بر اساس رابطه بین داده‌های ثبت شده گذشته در یک منطقه (با در نظر گرفتن طول و عرض جغرافیایی) و مدل اقلیمی، یک الگوی جفت شده بین این دو داده برقرار می‌کند و دارای معادلات ساده‌تر و هزینه زمانی و محاسباتی کمتر در مقابل روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی است اما به تنهایی دارای دقت کافی در ریزمقیاس پارامترهای جوی به خصوص بارش نیستند (Yhang et al., 2017; Peltier et al., 2018). ترکیب ریزمقیاس‌نمایی آماری و دینامیکی به عنوان یک مدل ریزمقیاس هیبریدی، موجب می‌گردد که نقاط ضعف بیان شده به حداقل رسیده و داده‌های دقیق‌تری جهت مطالعات منابع آب یک حوضه حاصل گردد.

با توجه به ضروریات مطرح شده، هدف اصلی این تحقیق توسعه یک مدل هیبرید دینامیکی- آماری جهت ریزمقیاس‌نمایی مکانی بارش مدل بزرگ مقیاس GCM و افزایش دقت این داده‌ها در بازه زمانی پایه (تاریخچه‌ای) است تا بتوان روشی را ارائه نمود تا با بهره‌گیری از مزایای روش‌های دینامیکی، قادر باشد در صرف کمترین زمان و هزینه، نتیجه مطلوبی را ارائه نماید. در نهایت می‌توان با تعیین مدل هیبرید مناسب، داده‌های سناریوهای مختلف را در تحقیقات بعدی به خوبی ریزمقیاس نمود. از خروجی این داده‌های ریزمقیاس شده می‌توان در برآورد پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی که احتیاج به داده‌های بادقت مکانی و زمانی بالا دارند مثل؛ دبی اوج سیلاب، زمان رسیدن به دبی اوج، مدت زمان رخداد سیلاب (زمان پایه) و حجم سیلاب با دور برگشت‌های مختلف برای دوره آبی (مثلاً ۲۰۳۰ تا ۲۱۰۰) استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه کرخه یکی از ۹ حوضه منتخب از طرف "برنامه چالش جهانی آب و غذا" است. زیرحوضه پلدختر نیز یکی از سیل‌خیزترین حوضه‌های کشور است که سیل فروردین سال ۱۳۹۸ در این حوضه

جهت مدیریت صحیح منابع آب یک حوضه در سال‌های پیش‌رو باید اطلاعات دقیق‌تری از بارش به عنوان مهمترین منبع آب ورودی به حوضه در حال حاضر و دهه‌های آتی اختیار داشت. مدل‌های GCM^2 یکی از متداول‌ترین و مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی اقلیم آینده هستند؛ زیرا مدل‌های اقلیمی ابزاری مناسب برای مطالعه سازوکار تغییرات اقلیم گذشته و آینده است. اما داده‌های آنها بزرگ مقیاس می‌باشند (از ۱ تا ۲/۵ درجه) و با در نظر نگرفتن برخی از ویژگی‌های مهم محیطی مانند توپوگرافی و پوشش گیاهی، سبب می‌شود که داده‌های این مدل‌ها در مقیاس‌های مختلف فضایی و زمانی نیازمند ارزیابی و ریزمقیاس‌نمایی باشند. برای رسیدن به این مهم، از ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و یا آماری و پس‌پردازش داده‌ها استفاده می‌شود (Rahimi et al., 2019).

هدف ریزمقیاس دینامیکی حل معادلات فیزیکی و دینامیک جو می‌باشد که داده‌هایی مکانی بادقت (۵۰ تا ۵ کیلومتر) و زمانی بادقت مناسب نسبت به داده‌های بزرگ مقیاس تولید کند؛ اما دارای پیچیدگی و محاسبات بیشتری نسبت به مدل‌های ریزمقیاس آماری هستند (Bechler et al., 2015; Georgi et al., 2020). یکی از اهداف این تحقیق ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های GCM جهت تولید داده‌های بادقت بالای بارش به منظور استفاده در مطالعات هیدرولوژی یک حوضه تحت شرایط تغییر اقلیم، است. بدین منظور نیاز به داده‌های با تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ کیلومتر است (Xingying et al., 2020). در این تحقیق جهت ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی داده‌های CMIP5 از مدل منطقه‌ای WRF استفاده شده است. در سال‌های اخیر در مطالعات بسیاری از مدل WRF در ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی داده‌های اقلیمی استفاده شده است. عملکرد مدل‌های منطقه‌ای مانند WRF وابستگی زیادی به نوع مدل GCM و پارامترهای فیزیکی مدل دارد (Mearns et al., 2013). انتشار خطایی مانند Overcorrecting در مدل‌های GCM می‌تواند در زمانی که پارامترهای اقلیمی مانند بارش و دما توسط مدل‌های منطقه‌ای ریزمقیاس می‌گردند اتفاق افتاده و رشد بیشتری یابد (Clark et al., 2016). علاوه بر این نقطه ضعف، روابط پیچیده، نیاز به محاسبات زیاد، هزینه بالا جهت تهیه سخت‌افزار جهت حل معادلات عددی و همچنین صرف زمان زیاد برای اجرای مدل WRF موجب شده است که رسیدن به مقیاس‌های کوچک مکانی و زمانی در یک منطقه مشکل باشد (SUN et al., 2016; Peltier et al., 2018). با توجه به مشکلات ذکر شده برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی، یکی دیگر از اهداف این تحقیق ارائه روشی

در این تحقیق از بانک داده‌های تحقیقاتی NCAR استفاده شده است. این مجموع داده‌ها شامل تصحیح اریبی خروجی مدل جهانی CCSM4 است. مدل CCSM4 شامل تمام متغیرهای موردنیاز (شرایط مرزی و اولیه) جهت استفاده در مدل دینامیکی WRF است. این مدل شامل قابلیت‌های کاملاً جدید زیرساختی است که امکان انعطاف و توسعه‌پذیری جدید را برای رفع چالش‌های موجود در مدل‌سازی سیستم زمین فراهم می‌کند. این مدل کاربر را قادر می‌سازد تا طیف گسترده‌ای از رویکردهای مختلف را برای پیکربندی‌ها و وضوح مختلف مدل ایجاد کند تا از حداکثر بازده و کارایی اطمینان حاصل کند. محققانی نظیر (Chiew et al., Rasmussen et al., 2014), (Walton et al., 2018), (Masoompour et al., 2018), (Gorguner et al., 2019) از مدل اقلیمی CCSM4 استفاده کرده‌اند و در مواردی برتری این مدل نسبت به مدل‌های دیگر نشان داده شده است. داده‌های موردنیاز جهت اجرای مدل WRF برای ۲۶ سطح فشاری اتمسفر، فاصله زمانی ۶ ساعته و قدرت تفکیک مکانی تقریباً ۱ درجه از سایت <https://rda.ucar.edu/datasets/ds316.1> دریافت می‌شوند. این داده‌ها بر اساس ERA-Interim (که توسط مرکز پیش‌بینی اروپا (ECMWF) پشتیبانی می‌شود) در بازه زمانی سال پایه ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۵ تصحیح اریبی شده‌اند.

موجب خسارات زیاد جانی و مالی گردید. حوضه پلدختر با مساحتی بالغ بر ۲۰۰۰ کیلومترمربع در بخش میانی کوه‌های زاگرس واقع شده است. رودخانه کشکان رودخانه اصلی این حوضه و یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه کرخه است. رژیم این رودخانه در بسیاری از بارش‌ها حالت سیلابی به خود می‌گیرد. این حوضه از نظر مختصات جغرافیایی بین ۴۷/۵۳ و ۴۸/۹ طول شرقی و ۳۳/۰۲ و ۳۳/۶۸ عرض شمالی قرار دارد که از لحاظ تقسیمات هیدرولوژی ایران، حوضه پلدختر جزء حوضه درجه ۱ خلیج فارس قرار گرفته است. شکل ۱-الف) حوضه پلدختر را نشان می‌دهد.

۲-۲- داده‌های موردنیاز

- داده‌های مدل اقلیمی

زمانی که نیاز به پارامترهای منطقه‌ای باشد، به طور مثال داده‌های بارش‌های حدی یک منطقه، خروجی‌های مدل‌های GCM قادر به نشان دادن آن نیستند. علاوه بر این بیشتر GCMها بر اساس میانگین پارامترها تولید شده‌اند و نمی‌توانند یک خروجی مطمئن و دقیقی برای پارامترهای منطقه‌ای داشته باشند. در نتیجه این خروجی‌ها نمی‌توانند به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل‌ها به‌خصوص مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند (Bechler et al., 2015).

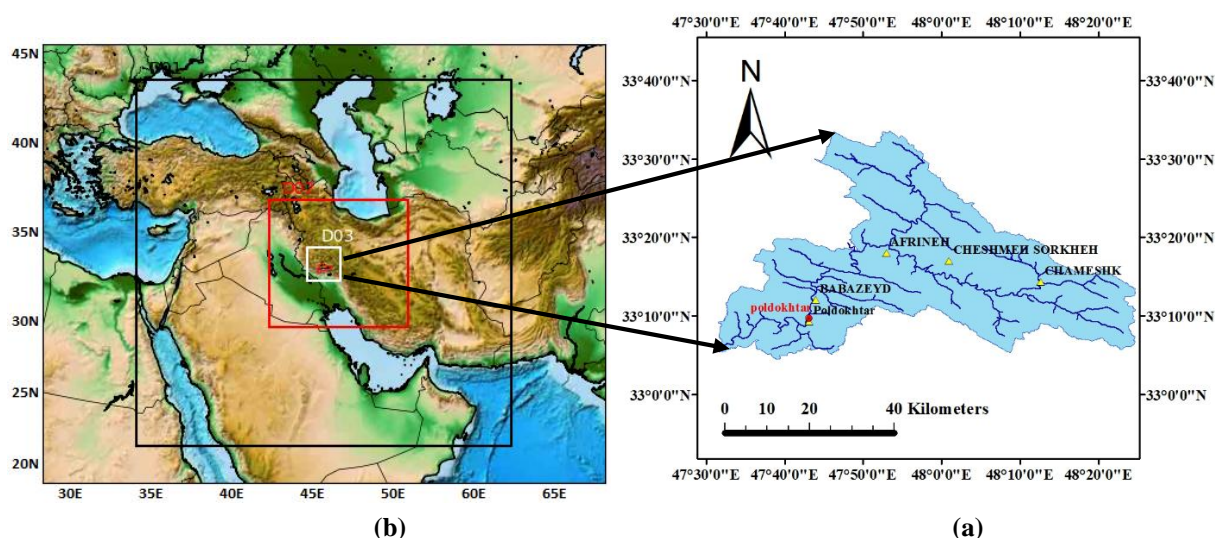


Fig. 1- (a) Poldakhtar catchment (b) Three horizontal boundary layers of WRF model; the black line is the first layer with a resolution of 27×27 , the red line is the second layer with a resolution of 9×9 and the white line is the third layer with a resolution of 3×3

شکل ۱- (a) حوضه پلدختر (b) سه لایه مرزی تفکیک افقی مدل WRF، خط مشکی لایه اول با قدرت تفکیک 27×27 ، خط قرمز لایه دوم با قدرت تفکیک 9×9 و خط سفید لایه سوم با قدرت تفکیک 3×3

داده‌های سطح زمین

استفاده شده است. با تغییر و آماده‌سازی داده‌های اقلیمی، این مدل علاوه بر مدل‌سازی پارامترهای هواشناسی برای دوره‌های گذشته و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت، قابلیت مدل‌سازی اقلیمی نیز خواهد داشت. هسته این مدل بر اساس پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت هواشناسی پایه‌گذاری شده است و در نتیجه دارای روابط فیزیکی گسترده‌تر و پیچیده‌تری همراه با در نظر گرفتن مؤلفه‌های اتمسفری بیشتری است، همچنین، قدرت تفکیک مکانی بالاتر و استفاده از لایه‌های عمودی بیشتر جوی در حل معادلات جو و دیگر موارد را می‌توان از دلایل رو به گسترش استفاده از مدل دینامیکی WRF جهت ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های اقلیمی دانست.

در تحقیقات (Duan et al. (2017)، (Erlar, Yhang et al. (2017)، (Rogelis et al. (2018)، (Felder et al. (2018)، (et al. (2019)، (Gorguner et al. (2019)، (Yanping Li و Jared et al. (2021)، (et al. (2021) از مدل WRF به‌عنوان یک مدل منطقه‌ای میان مقیاس جهت ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی مدل‌های اقلیمی CMIP5 استفاده شد. برای تفکیک افقی در مدل WRF، منطقه مورد مطالعه در سه لایه (لایه اول با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر، لایه دوم با تفکیک افقی ۹ کیلومتر و لایه سوم با تفکیک افقی ۳ کیلومتر) به‌صورت یک مجموعه متناهی از نقاط در دو بعد گسسته‌سازی گردید. شکل ۱-ب) نشان‌دهنده لایه‌بندی افقی حوضه مورد مطالعه است. جهت واسنجی مدل در منطقه مورد مطالعه از طرح‌واره‌های مختلف استفاده می‌شود. برای انتخاب طرح‌واره^۵ مناسب و جهت جلوگیری از صرفه وقت و هزینه زیاد، از مطالعات پیشین که در منطقه مورد مطالعه انجام شده است استفاده شد. (Neyestani et al. (2018) مدل WRF را برای بارش‌های حدی واسنجی نمودند. در این تحقیق از طرح‌واره‌های پیشنهادی ایشان استفاده شده است. طرح‌واره‌های فیزیکی بکار رفته در این مطالعه برای اجرای مدل WRF شامل طرح‌واره لایه مرزی^۶ YSU، طرح‌واره خردفیزیک^۷ WSM5، طرح‌واره تابش طول موج^۸ Dudhia، طرح‌واره تابش طول موج بلند مدل انتقال تابشی سریع^۹ RRTM، طرح‌واره لایه سطحی^{۱۰} Revised MM5 Monin-Obukhov، و طرح‌واره سطح Noah می‌باشد.

۲-۴- مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری

در این تحقیق، تغییرات بارش خروجی از مدل WRF به‌واسطه یک رابطه رگرسیون چندمتغیره با روش IDW در سه مرحله به شرح زیر ترکیب می‌شوند:

مرحله اول: روش رگرسیون چندمتغیره (MLR)

جهت ارزیابی مدل CCSM4، نیاز به داده‌های سطح زمین است. بدین منظور از داده‌های مشاهداتی درون‌یابی شده سازمان هواشناسی کشور که در مقیاس‌های مکانی ۳×۳، ۵×۵ و ۹×۹ به‌طور روزانه آماده می‌شود استفاده شده است. در این روش جهت درون‌یابی مقادیر بارش از رابطه ۱ (روش CAI^۴) استفاده شده است:

$$\bar{P} = \bar{P} + \sum_{j=1}^{n_i} w_{ij} \delta P_j / \sum_{j=1}^{n_i} w_{ij} \quad (1)$$

در این رابطه δP_j انحراف سالانه بارش در هر ایستگاه، \bar{P} متوسط بلند مدت بارش هر ایستگاه، وزن (w_{ij}) تابعی معکوس از فاصله یک مکان نمونه‌برداری شده (j) تا یک مکان نمونه‌برداری نشده (i) و \bar{P} بارش درون‌یابی شده است.

این روش مبتنی بر کسر کردن میانگین اقلیمی با تفکیک بالا از اطلاعات سالانه ایستگاهی، درون‌یابی انحراف‌ها نسبت به میانگین و اضافه کردن انحراف‌های پهنه‌بندی شده به میانگین اقلیمی درون‌یابی شده روی نقاط هدف و حذف خودکار اربیبی بین میانگین در بازه‌های زمانی مختلف به‌طور روزانه می‌باشد. از حدود ۳۲۰۰ ایستگاه سینوپتیک، باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی سازمان هواشناسی و وزارت نیرو در سطح کشور با این روش نقشه‌های پهنه‌بندی بارش تهیه می‌شود. شکل ۲ توانایی روش درون‌یابی CAI را در مقابل روش معمول IDW با شاخص‌های آماری هانسن-کویپرز و PBIAS نشان می‌دهد. شاخص هانسن-کویپرز هرچه به عدد ۱ و شاخص PBIAS هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از توانایی بالاتری در پهنه‌بندی بارش برخوردار است. همانطور که در شکل مشخص است روش CAI به خوبی توانسته است، بارش را در سطح کشور نسبت به روش معمول IDW پهنه‌بندی نماید.

پس از ریزمقیاس‌نمودن داده‌های ۱ درجه مدل اقلیمی به داده‌های با تفکیک ۳×۳ و ۹×۹ کیلومتر توسط مدل هیبرید، خروجی حاصل با داده‌های مشاهداتی سازمان هواشناسی کشور جهت ارزیابی روش ریزمقیاس‌نمایی، مقایسه خواهد شد.

۲-۳- مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی

مدل WRF یک مدل غیر هیدرواستاتیکی با قابلیت انتخاب هیدرواستاتیکی با هسته دینامیکی است که با همکاری مراکز NCAR، NOAA، NCEP، تهیه شده است. در این تحقیق از نسخه WRF3.8

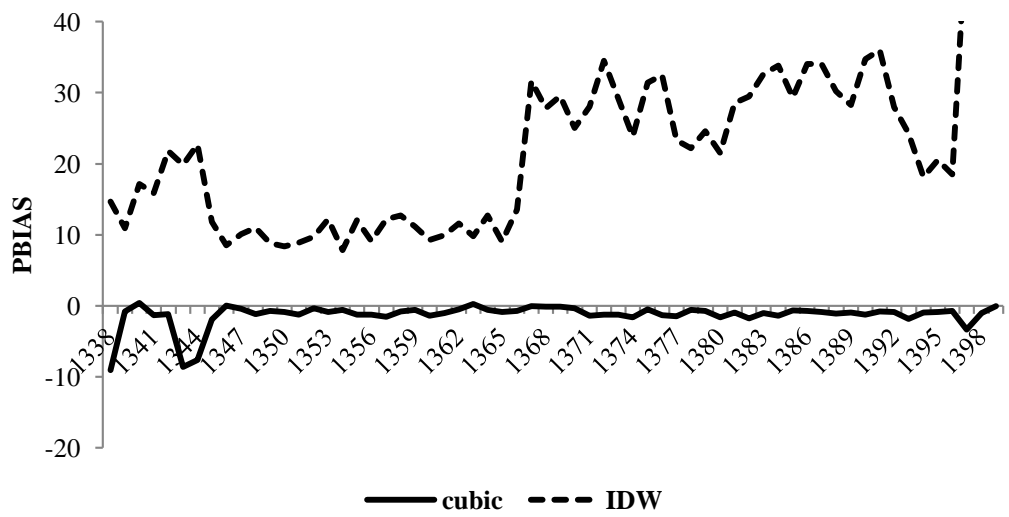
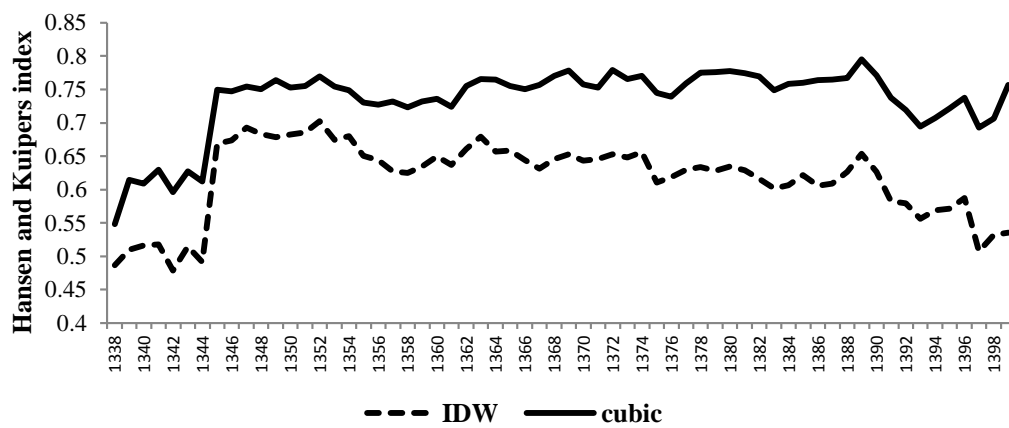
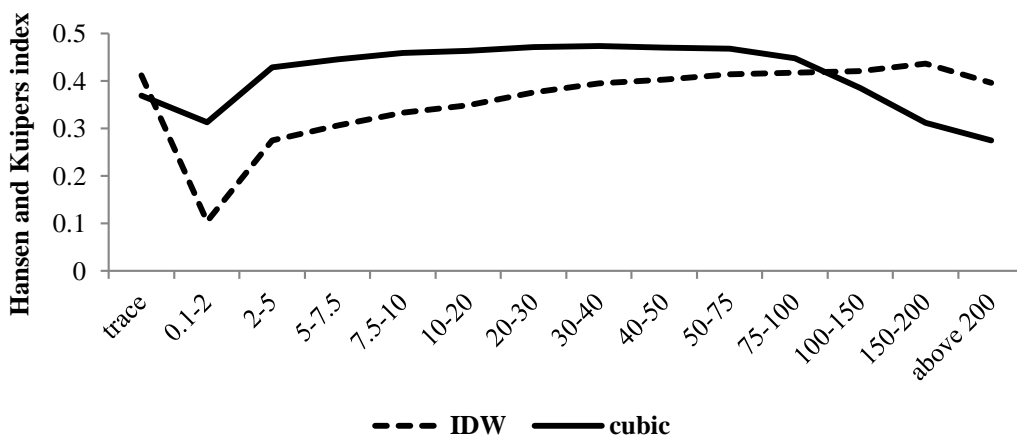


Fig. 2- Statistical evaluation of precipitation interpolation method CAI against IDW
 شکل ۲- ارزیابی آماری روش پهنه‌بندی بارش CAI در مقابل IDW

داده‌های شبکه دینامیکی WRF با مقیاس مکانی بزرگتر (۹ کیلومتر) به داده‌های شبکه‌ای با مقیاس کوچکتر (۳ کیلومتر) تبدیل می‌شوند. (Altaf et al., 2017) از روش رگرسیون چندمتغیره و ۹ پارامتر اقلیمی جهت ریزمقیاس‌نمایی بارش استفاده نمودند. (Joshi et al., 2015) جهت ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما از سه روش ریزمقیاس‌نمایی آماری MLR، CCA و SBL استفاده نمودند. (Sharifi et al., 2019) نیز از روش MLR برای ریزمقیاس‌نمایی بارش استفاده نمودند. همان‌طور که در مطالعات پیشین مشاهده می‌گردد، تاکنون ترکیب این دو روش صورت نگرفته است همچنین در این تحقیق بعد سوم (ارتفاع Z) به معادله هیبرید اضافه شده است. این روش موجب می‌شود که از محاسبات سنگین و هزینه زیاد جهت تولید شبکه‌ای با مقیاس کوچک‌تر توسط مدل‌های دینامیکی کاسته شده و مانع از انتشار بیش از حد خطاهای GCM در مدل می‌شود.

۲-۵- شاخص‌های ارزیابی مدل

در این تحقیق بمنظور ارزیابی خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی از آماره‌های خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE^{11}$) (رابطه ۵)، آماره اریب (Bias) (رابطه ۶) و ضریب توافقی (WI) (رابطه ۷) استفاده شد. (Miri et al., 2017). اگر دو سری داده باهم توافق کامل داشته باشند، مقدار WI برابر با یک است؛ ولی اگر حاصل نمایه کمتر از یک باشد، مقدار توافق بین دو سری زمانی مقایسه شده، به نسبت کمتر است. (Masoompour et al., 2018).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_o)^2}{n}} \quad (5)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_m - Y_o) \quad (6)$$

$$WI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_o)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_m - \bar{Y}_o| + |Y_o - \bar{Y}_o|)^2} \quad (7)$$

در این روابط Y_m خروجی مدل، Y_o داده‌های مشاهداتی، و \bar{Y}_o میانگین داده‌های مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد داده‌های بزرگ مقیاس مدل CCSM4 ابتدا با مدل دینامیکی WRF به تفکیک مکانی 9×9 کیلومتر ریزمقیاس شدند و سپس این خروجی‌ها با دو روش دینامیکی (مدل WRF) و دینامیکی-آماري (هیبرید) به تفکیک 3×3 کیلومتر ریزمقیاس گردیدند. جهت مقایسه این دو روش (دینامیکی و هیبرید) مقادیر بارش سالانه طی دوره آماری ۱۹۹۶ لغایت ۲۰۰۵ در

در این روش ابتدا، رابطه زیر بین مقدار بارش و موقعیت مکانی برقرار می‌گردد:

$$P_c = aX_c + bY_c + cZ_c + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن X_c طول جغرافیایی، Y_c عرض جغرافیایی، Z_c ارتفاع، ε مقدار ثابت معادله و P_c مقدار بارش درون‌یابی شده از خروجی داده‌های WRF در هر نقطه می‌باشد.

مرحله دوم: روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)

این روش بر این فرض استوار است که تأثیر پدیده موردنظر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. در این روش از فاصله به‌عنوان وزن متغیر معلوم در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود. به بیان دیگر فرض می‌شود که نقش متغیر پیوسته در تأثیرگذاری با فاصله از مکان نقطه مجهول کاهش می‌یابد. از طرف دیگر تأثیر شدت وابستگی مکانی در داده‌ها را با استفاده از توان در معکوس فاصله می‌توان اعمال کرد. رابطه ۳ این مطلب را بیان می‌کند.

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{d_{i1}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i1}^2}} \quad (3)$$

که در آن P_c مقدار بارش درون‌یابی شده از خروجی مدل WRF، P_i مقدار بارش از خروجی شبکه دینامیکی WRF، d_i فاصله اقلیدسی در هر نقطه مورد نظر تا شبکه دینامیکی و n تعداد نقاط مجاور نقطه موردنظر است.

مرحله سوم: هیبرید روش‌های IDW و MLR

همان‌طور که گفته شد جهت درنظر گرفتن تأثیر نقاط همسایگی، معادله رگرسیون (معادله ۱) با معادله IDW (معادله ۲) ترکیب شد. ترکیب کردن این دو روش شامل دو عملیات است: ۱- محاسبه کردن وزن‌ها از شبکه‌بندی بارش تولیدشده از مدل دینامیکی WRF، ۲- اصلاح بارش نقاط درون‌یابی توسط رابطه رگرسیون در نقاط شبکه بارش. رابطه ۴ معادله هیبرید را نشان می‌دهد. کلیه پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

$$P_c = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4)$$

$\times \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{P_i + a(X_c - X_i) + b(Y_c - Y_i) + c(Z_c - Z_{ij})}{d^2} \right] \left(\frac{1}{d^2} \right)^2 \right\}$

ضرایب a ، b ، c و ε به روش حل عددی تجزیه گوسی و در محیط برنامه‌نویسی فرترن محاسبه شدند. در معادله (۴)، X و Y از خروجی شبکه‌ای مدل WRF که شامل مقدار بارش در طول و عرض جغرافیایی موردنظر است، به دست می‌آید. بطورکلی در این روش

نزدیک شده است. این در حالی است که در سال ۱۹۹۸ داده‌های مشاهداتی و مدل دینامیکی یک‌افت و خیز کاهشی را نشان می‌دهند در نتیجه می‌توان برآورد بارش در این سال را، بهترین برآورد در نظر گرفت. بدترین برآورد بارش مربوط به سال ۱۹۹۶ با اختلاف میانگین ۲۷۴/۸ میلی‌متر می‌باشد. میانگین سالانه بارش داده‌های مشاهداتی طی این دوره آماری حدوداً ۵۶۸ میلی‌متر است و مدل حدود ۳۴۷ میلی‌متر می‌باشد، یعنی مدل حدود ۲۲۱ میلی‌متر کمتر از میانگین مشاهداتی طی این دوره آماری برآورد کرده است.

بر اساس میانگین داده‌های مشاهداتی سال‌های ۱۹۹۸، ۱۹۹۹، ۲۰۰۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴ مقادیر بارش کمتر از میانگین بوده است. اگر این سال‌ها را به‌عنوان سال خشک در نظر گرفته شود می‌توان گفت در دوره مورد مطالعه مدل WRF بارش سال‌های خشک را بهتر شبیه‌سازی کرده است. به‌طور کلی بر اساس تشخیص درست افت و خیز بارش و مقدار ضریب تبیین بین داده‌های مشاهداتی و مدل بدست آمده ($R^2=0/67$)، مدل عملکرد مناسبی در ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها داشته است و در مقیاس مکانی ۹ کیلومتر توانسته است به‌خوبی افت و خیز بارش سالانه را برآورد نماید. (Masoompour et al. (2018) نتیجه گرفتند، گرچه مدل‌های اقلیمی در برآورد مقدار بارش با دقت مناسب، توانایی بالایی ندارند اما به‌خوبی دوره‌های زمانی بارش را برآورد و توانایی مناسبی در تشخیص افت‌وخیزهای بارش در اکثر نقاط منطقه مورد مطالعه خود را دارند.

شکل ۴ نمودار جعبه‌ای داده‌های بارش را در حوضه نشان می‌دهد. ضلع پایین آن نماینده صدک ۲۵ (چارک اول) و ضلع بالایی آن نماینده صدک ۷۵ (چارک سوم) باشد. طول عمودی جعبه، نشان‌دهنده دامنه بین چارکی^{۱۳} می‌باشد، خط داخلی جعبه نشان‌دهنده میانه^{۱۴} است.

حوضه پلدختر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه حوضه پلدختر در مقیاس مکانی مدل اقلیمی CCSM4 بسیار کوچک است و تعداد نقاط داده‌های شبکه بارش که در حوضه قرار می‌گیرد نیز کم می‌باشد، لذا جهت تبدیل داده‌های شبکه‌ای بارش به میانگین بارش حوضه از روش میانگین‌گیری حسابی استفاده شد. سپس، با توجه به حجم زیاد مطالب و محدودیت صفحات مقاله، بر اساس سالی که هر دو روش نتایج بهتری را نشان می‌دهند مقایسه ماهانه بین این دو روش صورت پذیرفت. در این راستا ابتدا خروجی مدل ریزمقیاس دینامیکی WRF را در دامنه ۹ کیلومتر با داده‌های مشاهداتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس داده‌های دو مدل ریزمقیاس دینامیکی WRF و هیبرید (دینامیکی-آماري) در دامنه ۳ کیلومتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است هدف این تحقیق تصحیح خطای هر کدام از دو روش نبوده و تنها به مقایسه افت و خیز مقادیر بارش حاصل از دو روش با داده‌های مشاهداتی پرداخته شده است.

۳-۱- ارزیابی مدل WRF در دامنه ۹ کیلومتر

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افت و خیز بارش طی ۱۰ سال (۱۹۹۶ لغایت ۲۰۰۵) در حوضه پلدختر نسبت به داده‌های مشاهداتی توسط مدل دینامیکی (WRF) به‌خوبی برآورد شده است. در کل مدل دینامیکی مقدار بارش را در کل سال‌ها در حوضه، کم برآورد^{۱۱} محاسبه کرده است. بهترین برآورد به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۱۹۹۸ با اختلاف میانگین ۱۵۱/۴ و ۱۵۵/۶ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ افت و خیز ثابتی در مقادیر بارش مشاهداتی وجود دارد، اما این افت و خیز در مدل دینامیکی در سال ۲۰۰۱ افزایشی است و به همین علت میانگین بارش مدل در این سال به میانگین بارش مشاهداتی

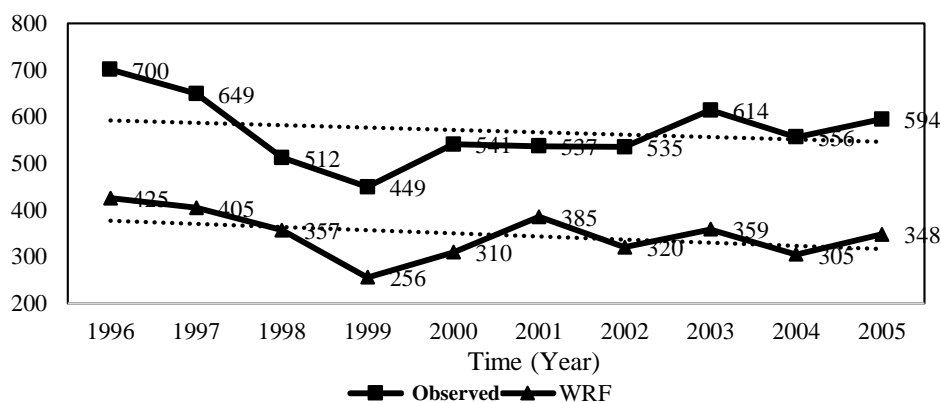


Fig. 3- Observational annual rainfall and WRF model at 9 km spatial scale in Poldakhtar basin

شکل ۳- بارش سالانه مشاهداتی و مدل WRF در مقیاس مکانی ۹ کیلومتر در حوضه پلدختر

است که مدل در سال ۱۹۹۶ با $RMSE=321/1$ نتوانسته است برآورد مناسبی از بارش داشته باشد. آماره اریبی (BIAS) در سال ۱۹۹۸ کمترین مقدار خود را دارد $BIAS=-151/5$ میلی متر. مقادیر منفی این آماره نشان‌دهنده کم برآورد کردن مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی می‌باشد. نمایه توافقی WI مقدار توافق بین داده‌های مشاهداتی و مدل را در سال ۱۹۹۸ برابر $0/89$ نشان می‌دهد که بیانگر توافق خوب بین این سری از داده‌ها است.

شکل ۵ پراکنش بارندگی مشاهداتی و ریزمقیاس شده توسط مدل WRF را در حوضه پلدختر در سال ۱۹۹۸ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل الف (مشاهداتی) مشاهده می‌شود بخش شرقی و مرکزی حوضه دارای بارندگی بیشتری است و در قسمت غربی حوضه مقدار بارش کمتری وجود دارد. بخش مرکزی و شرقی حوضه نسبت به بخش غربی حوضه دارای ارتفاع بیشتری از سطح دریا می‌باشد. در شکل ب، در بخش‌های شرقی و مرکزی، مدل WRF به خوبی توانسته است افت و خیز مکانی بارش در سطح حوضه را مدل نماید. همچنین، با کاهش ارتفاع افت و خیز بارش در WRF کاهش پیدا می‌کند. اما مقدار بارش مدل شده در بخش شمالی بیشتر از مشاهداتی می‌باشد که دلیل آن را می‌توان ارتفاعات در شمال حوضه دانست.

خطوطی که در بالا و پایین جعبه به سمت جعبه کشیده شده‌اند ویسکر^{۱۵} نام دارند که نشان‌دهنده بیشینه و کمینه واقعی مقادیر بارش هستند. داده‌هایی که خارج از محدوده ویسکر قرار می‌گیرند داده‌های پرت^{۱۶} نام دارند. فاصله این مقادیر از بالا یا پایین جعبه کمتر از سه برابر طول جعبه است. بر اساس این شکل در تمام سال‌ها دهک ۵۰ درصد (میانه) مدل، کمتر از مشاهداتی است در نتیجه داده‌های مدل برآورد کمتری نسبت به داده‌های مشاهداتی دارند. داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل چولگی مثبتی دارند. در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۲ بیشترین چولگی مثبت در داده‌های مشاهداتی ملاحظه می‌شود. بیشترین داده‌های پرت مشاهداتی مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ است و این در حالی است که در خروجی مدل WRF بیشترین داده‌های پرت مربوط به سال ۲۰۰۰ می‌باشد. میانه داده‌های مشاهداتی و مدل در سال ۱۹۹۸ کمترین فاصله را دارند. همچنین، پراکنندگی داده‌های مشاهداتی و مدل در این سال کمترین است و توزیع داده‌ها حول دهک ۵۰ درصد نسبتاً متقارن است. در نتیجه می‌توان گفت که مدل برآورد مناسبی از داده‌های بارش در این سال را داشته است.

جدول ۱ مقایسه آماری داده‌های خروجی مدل با مشاهداتی را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول کمترین خطا با توجه به آماره RMSE مربوط به سال ۱۹۹۸ به میزان ۲۲۶ میلی متر می‌باشد. این در حالی

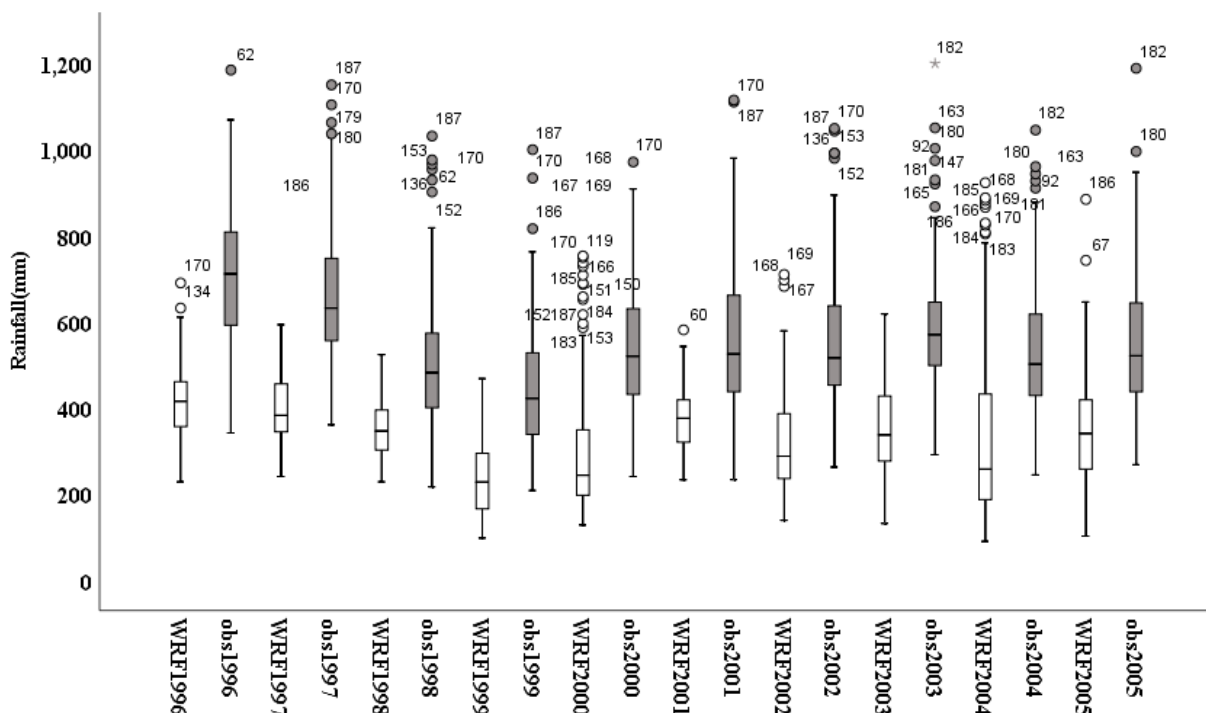


Fig. 4- Box plot of observational rainfall data and WRF model

شکل ۴- نمودار جعبه‌ای داده‌های بارش مشاهداتی و مدل WRF

Table 1- Statistical comparison of observed annual rainfall data and WRF model (spatial separation of 9 km) in Poldakhtar basin during the period 1996-2005

جدول ۱- مقایسه آماری داده‌های بارش سالانه مشاهداتی و مدل WRF (تفکیک مکانی ۹ کیلومتر) در حوضه پلدختر طی دوره زمانی ۱۹۹۶-۲۰۰۵

	Error index	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Observational comparison and WRF	RMSE	321.1	293.2	226.0	236.1	274.1	238.1	242.6	300.6	289.1	297.9
	BIAS	-274.9	-244.6	-151.5	-193.3	-231.3	-155.6	-214.3	-255.2	-251.3	-246.4
	WI	0.43	0.57	0.89	0.84	0.81	0.80	0.84	0.69	0.80	0.74

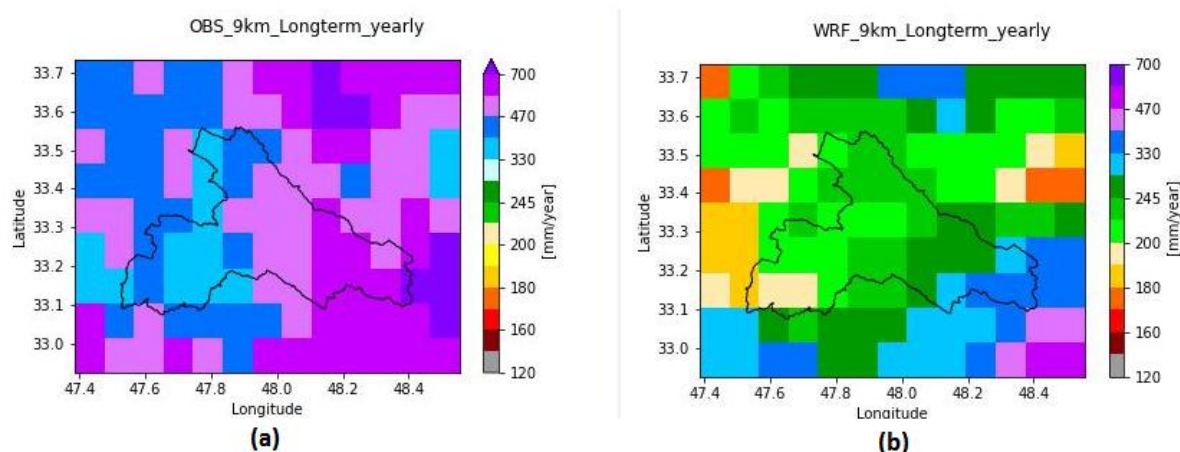


Fig. 5 - Comparison of (a) observational rainfall dispersion and WRF model (b) in 1998 at spatial scale 9 km in Poldakhtar basin

شکل ۵- مقایسه پراکندگی (a) بارش مشاهداتی و (b) مدل WRF در مقیاس مکانی ۹ کیلومتر در حوضه پلدختر

نسبتاً ثابتی در داده‌های مشاهداتی دیده می‌شود این الگو به خوبی در مدل هیبرید نسبت به مدل دینامیکی حفظ شده است. بهترین برآورد نسبت به میانگین مشاهداتی مربوط به سال ۱۹۹۸ است که برای مدل‌های دینامیکی (WRF) و هیبرید (Hybrid) به ترتیب ۲۹۶/۷ و ۲۲۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. میانگین سالانه بارش داده‌های مشاهداتی در مقیاس مکانی ۳ کیلومتر طی این دوره آماری تقریباً ۵۳۴ میلی‌متر است و در مدل‌های دینامیکی و هیبرید به ترتیب ۳۲۵ و ۳۷۹ میلی‌متر می‌باشد که مدل هیبرید حدود ۱۵۶ میلی‌متر کمتر از میانگین مشاهداتی طی این دوره آماری برآورد کرده است. این در حالی است که در مدل دینامیکی این عدد ۲۰۹ میلی‌متر برآورد شده است. در مجموع در مقیاس ۳ کیلومتر در دوره مورد مطالعه، مدل هیبرید بارش سال‌های خشک را بهتر شبیه‌سازی کرده است. به‌طور کلی عملکرد مدل هیبرید بر اساس تشخیص درست افت و خیز بارش و مقدار

۲-۳- ارزیابی مدل WRF و هیبرید در دامنه ۳ کیلومتر همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افت و خیز بارش طی ۱۰ سال (۱۹۹۶ لغایت ۲۰۰۵) در مقیاس ۳ کیلومتر نیز مانند مقیاس ۹ کیلومتر در حوضه پلدختر نسبت به داده‌های مشاهداتی توسط مدل دینامیکی (WRF) و مدل هیبرید (Hybrid) به خوبی برآورد شده است. در کل هر دو مدل دینامیکی و هیبرید مقدار بارش را در کل سال‌ها در حوضه، کمتر از مقدار مشاهداتی (کم برآورد) محاسبه کرده‌اند، اما مدل هیبرید برآورد بهتری نسبت به مدل دینامیکی داشته است. بهترین برآورد نسبت به میانگین مشاهداتی مربوط به سال ۱۹۹۸ است که برای مدل‌های دینامیکی (WRF) و هیبرید (Hybrid) به ترتیب ۱۳۴/۳ و ۶۲/۹ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است افت و خیز بارش توسط مدل هیبرید بهتر از مدل دینامیکی برآورد شده است. بطوری‌که بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ که افت و خیز

ضریب تبیین بین داده‌های مشاهداتی و مدل ($R^2=0/71$)، عملکرد بهتری نسبت به مدل دینامیکی داشته است.

جدول ۲ مقایسه آماری داده‌های خروجی مدل دینامیکی و هیبرید را با داده‌های مشاهداتی در مقیاس مکانی ۳ کیلومتر نشان می‌دهد. بر اساس این جدول کمترین خطا در طول دوره آماری با توجه به آماره RMSE مربوط به سال ۱۹۹۸ است. مقدار این آماره برای مدل‌های WRF و Hybrid به ترتیب ۱۸۹ و ۱۵۷/۲ میلی‌متر می‌باشد. این در حالی است که هر دو مدل در سال ۱۹۹۶ با بیشترین مقدار این آماره، نتوانسته‌اند برآورد مناسبی از بارش داشته باشند. آماره اریبی (BIAS) نیز در سال ۱۹۹۸ کمترین مقدار خود را دارد. این آماره به ترتیب برای مدل‌های WRF و Hybrid برابر با ۱۳۴/۳ و ۶۲/۹ میلی‌متر است. مقادیر منفی این آماره نشان‌دهنده کم برآورد کردن مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی می‌باشد. نمایه توافقی WI مقدار توافق بین داده‌های مشاهداتی و مدل را در سال ۱۹۹۸ برای مدل‌های دینامیکی و هیبرید به ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۸۴ نشان می‌دهد که بیانگر توافق بسیار خوب بین این سری از داده‌ها است.

۴- نتیجه‌گیری

تشکیل یک شبکه ریزمقیاس از خروجی مدل‌های AOGCM توسط مدل‌های دینامیکی و یا مدل‌های آماری برای استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی از محورهای اصلی مطالعات تغییر اقلیم در منابع آب است.

با توجه به اینکه مدل هیبرید نتایج بهتری داشته است نمودار جعبه‌ای آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در تمام سال‌ها دهک ۵۰ درصد (میانه) مدل هیبرید، کمتر از مشاهداتی می‌باشد در نتیجه داده‌های مدل برآورد کمتری نسبت به داده‌های مشاهداتی دارند. داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل چولگی مثبتی دارند. در مدل هیبرید در سال‌های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ داده‌ها پراکنش نسبتاً نرمالی را دارند. بیشترین چولگی مثبت در داده‌های مشاهداتی ملاحظه می‌شود. بیشترین پراکندگی داده‌های مشاهداتی در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ مشاهده می‌شود. اما در داده‌های مدل پراکندگی داده‌ها در سال ۲۰۰۳ مشهود است. بیشترین داده‌های پرت مشاهداتی و مدل هیبرید (Hybrid) مربوط به سال ۲۰۰۳ است. میانه داده‌های مشاهداتی و مدل در سال ۱۹۹۸ کمترین فاصله را دارند. همچنین پراکندگی داده‌های مشاهداتی و مدل در این سال کمترین است و توزیع داده‌ها مدل حول دهک ۵۰ درصد نسبتاً متقارن است؛ اما داده‌های مشاهداتی کمی، چولگی مثبت دارند. در کل می‌توان گفت که مدل هیبرید برآورد مناسبی از داده‌های بارش در این سال را داشته است. این مطلب در جدول ۲ به‌خوبی مشخص است.

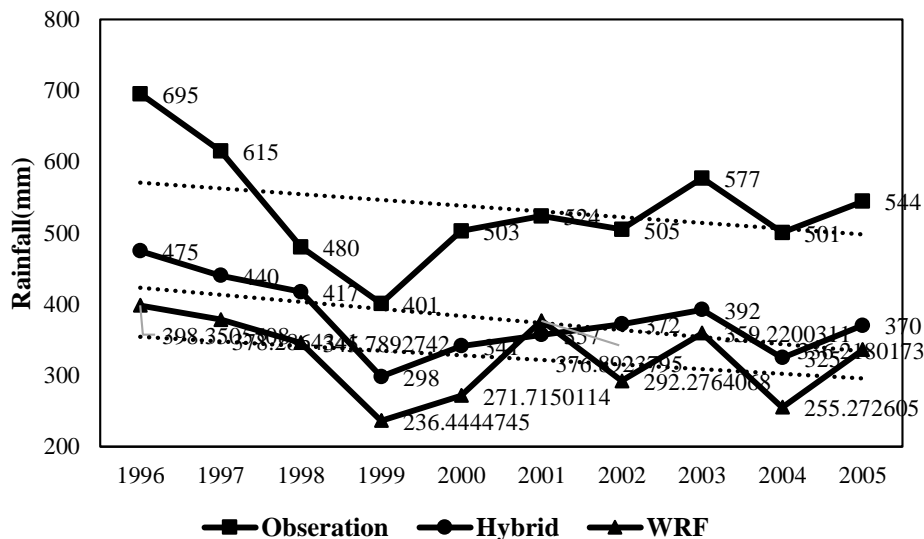


Fig. 6- Observational annual precipitation, WRF model and hybrid model at 3 km spatial scale in Poldakhtar basin

شکل ۶- بارش سالانه مشاهداتی، مدل WRF و مدل هیبرید در مقیاس مکانی ۳ کیلومتر در حوضه پلدختر

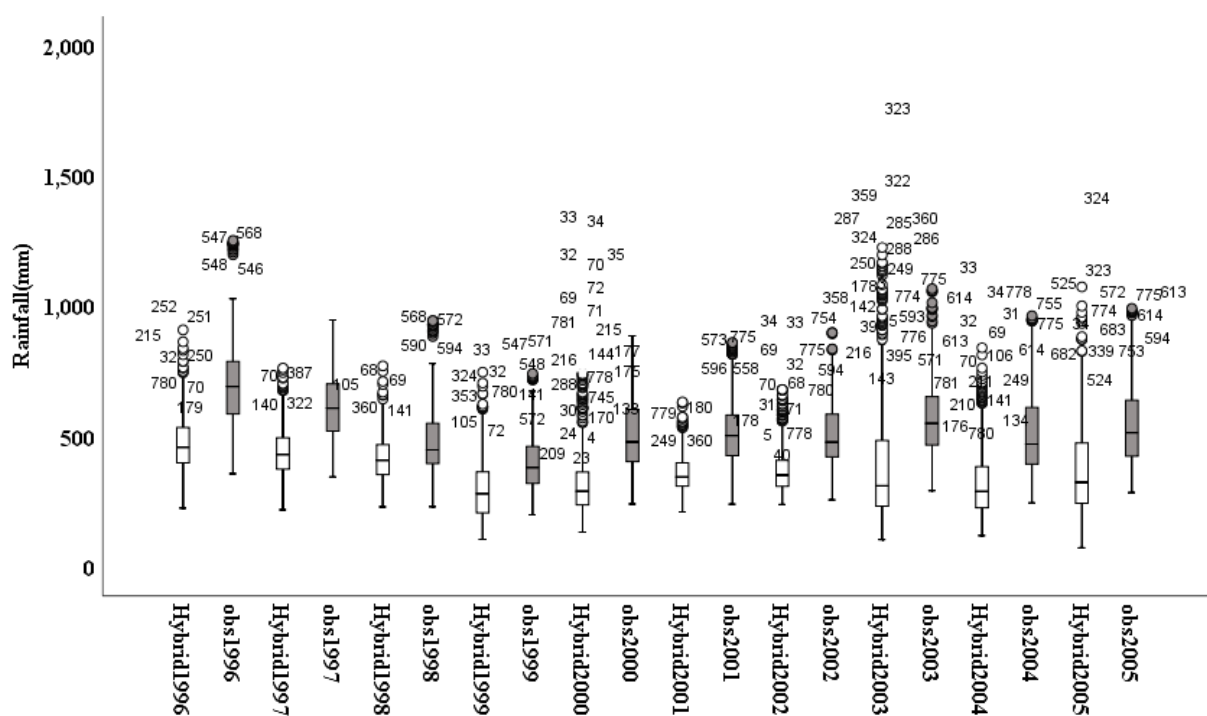


Fig. 7- Box plot of observational rainfall data and hybrid model

شکل ۷- نمودار جعبه‌ای داده‌های بارش مشاهداتی و مدل هیبرید

Table 2- Statistical comparison of observed annual rainfall data, WRF model and Hybrid (spatial separation of 3 km) in Poldakhtar basin during the period 1996-2005

جدول ۲- مقایسه آماری داده‌های بارش سالانه مشاهداتی، مدل WRF و مدل هیبرید (تفکیک مکانی ۳ کیلومتر) در حوضه پلدختر طی دوره زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۶

	آماره‌های خطا	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Observational WRF comparison	RMSE	341.7	266.8	189.0	196.4	291.6	201.1	259.4	281.7	322.4	280.4
	BIAS	-296.7	-236.8	-134.3	-164.4	-230.8	-146.8	-212.5	-217.5	-245.2	-207.9
	WI	-0.28	0.29	0.87	0.79	0.59	0.71	0.64	0.40	0.53	0.51
Observational comparison Hybrid	RMSE	291.8	233.4	157.2	200.0	277.8	223.2	201.6	352.5	273.0	290.0
	BIAS	305.4	-220.4	-62.9	-174.9	-102.4	-161.2	-166.6	-132.8	-184.5	-175.8
	WI	-0.24	0.30	0.84	0.82	0.57	0.67	0.73	0.18	0.60	0.47

نمودند. (2018) Masoompour et al. مدل CCSM4 را بهترین مدل اقلیمی بین ۸ مدل دیگر معرفی نموده و اختلاف بارش داده‌های این مدل را با داده‌های مشاهداتی حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه گزارش داده است.

(2018) Lie et al. نیز نتیجه گرفتند که مدل هیبرید ۵۰ تا ۱۵۰ درصد بیش برآورد نسبت به داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. بر اساس این پژوهش‌ها، مشخص است که مقادیر برآورده شده بارش از مدل‌های اقلیمی دارای آریبی می‌باشند که جهت استفاده در محاسبات هیدرولوژیکی مانند سیل و یا مدل‌های هیدرولوژی، باید تصحیح آریبی بر روی این داده‌ها انجام شود.

اما همانطور که گفته شد هدف اصلی این تحقیق تصحیح خطا نبوده بلکه توسعه روشی است که طی آن بتوان ضمن حفظ قدرت تفکیک مکانی بالا، هزینه و زمانبر بودن عملیات ریزمقیاس‌نمایی توسط روش دینامیکی را کاهش داد. در نتیجه تصحیح خطای مقادیر بارش ریزمقیاس شده، موضوع تحقیق دیگری بوده که پیشنهاد می‌شود بر اساس نوع استفاده از داده‌های ریزمقیاس شده، از روش‌های تصحیح آریبی متناسب استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Weather Research and Forecasting
- 2- General Circulation Model
- 3- Coupling
- 4- Climatologically Aided Interpolation
- 5- Scheme
- 6- Boundary Layer Scheme
- 7- Microphysics Scheme
- 8- Longwave Radiation Scheme
- 9- Rapid Radiation Transfer Model
- 10- Surface Layer Scheme
- 11- Root-Mean-Square Error
- 12- Lowstimate
- 13- Interquartile
- 14- Median
- 15- Whisker
- 16- Outliers

با این وجود با توجه به هزینه زمانی و محاسباتی زیاد ریزمقیاس‌نمایی توسط روش‌های دینامیکی، ارائه روشی که بتواند این هزینه‌ها را کاهش داده و از طرفی شبکه بارش با قدرت تفکیک مکانی بالا ایجاد کند ضروری بوده که هدف اصلی این پژوهش بوده است. این مهم با استفاده از ترکیب دو روش درون‌یابی آماری (رگرسیون و IDW) و هیبرید آن با روش دینامیکی WRF و افزودن دو بعد، الف) ارتفاع و ب) فاصله اقلیدسی انجام یافته است. که برای انجام آن داده‌های بارش مدل اقلیمی CCSM4 با تفکیک مکانی حدود 100×100 کیلومتر، ریزمقیاس و به داده‌های بارش با تفکیک 3×3 کیلومتر تبدیل گردید. داده‌های ریزمقیاس شده بارش با تفکیک مکانی بالا در مطالعات سیل و مدیریت حوضه کاربردی می‌باشند.

برای توسعه روش مذکور از اطلاعات حوضه پلدختر از زیرحوضه‌های کرخه استفاده گردید. در این تحقیق داده‌های بارش مدل اقلیمی CCSM4 ابتدا با روش دینامیکی WRF به تفکیک مکانی 3×3 کیلومتر ریزمقیاس گردید. در گام دوم با استفاده از هیبرید روش دینامیکی- آماری داده‌های بارش مدل اقلیمی CCSM4 ابتدا با روش دینامیکی WRF به تفکیک مکانی 9×9 و سپس با روش آماری به تفکیک مکانی 3×3 ریزمقیاس و با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید.

نتایج نشان داد که در مقیاس ۳ کیلومتر مدل هیبرید بر اساس تشخیص درست افت و خیز بارش مشاهداتی و مقدار ضریب تبیین بین داده‌های مشاهداتی و مدل ($R^2=0.71$)، عملکرد بهتری نسبت به مدل دینامیکی داشته است. به‌طور کلی خروجی بارش در این روش کم برآوردی نسبت به داده‌های مشاهداتی دارد، اما افت و خیز بارش در طول ده سال (۲۰۰۵-۱۹۹۶) و همچنین افت و خیز بارش ماهانه در سال ۱۹۹۸ به‌خوبی توسط مدل برآورد شده است.

باید توجه داشت که گرچه مدل هیبرید نسبت به مدل دینامیکی WRF افت و خیز بارش مشاهداتی را در مقیاس ۳ کیلومتر بهتر برآورد کرده است ولی هر دو روش مقدار خطای زیادی را در برآورد بارش مشاهداتی نشان داده‌اند. این مقدار خطا در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است. بطوری‌که (2019) Victor et al. داده‌های مشاهداتی بارش سال ۲۰۰۵-۱۹۵۱ را با خروجی ۲۲ مدل اقلیمی CMIP5 مورد بررسی قرار دادند و اختلاف بارش را در مدل CCSM4 با داده‌های مشاهداتی حدود ۳۲۰ میلی‌متر گزارش نمودند. (2018) Lie et al. نیز در تحقیقی از مدل اقلیمی (CCSM4) CESM1.0 استفاده نمودند و اختلاف بارش را در مناطق مختلف از ۶۰ تا ۱۷۰ میلی‌متر گزارش

۵- مراجع

- Altaf Y, Ahmad A, Mohd F (2017) MLR based statistical downscaling of temperature and precipitation in Lidder Basin Region of India. *Environ Pollut Climate Change* 1(2):1-7
- Bechler A, Vrac M, Bel L (2015) A spatial hybrid approach for downscaling of extreme precipitation fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(10):4534-4550
- Chiew F, Zheng H, Potter N, Ekstrom M (2017) Future runoff projections for Australia and science challenges in producing next generation projections. In: *Proc. of International Congress on Modelling and Simulation* 22-24 May, Hobart, Tasmania Australia Retrieved from www.mssanz.org.au
- Clark M, Wilby R, Gutmann E (2016) Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. *Current Climate Change Reports* 2(2):55-64
- Erlar A, Frey S, Khader O, d'Orgeville M, Park Y (2019) Simulating climate change impacts on surface water resources within a lake-affected region using regional climate projections. *Water Resources Research* 55(10):130-155
- Felder G, Gómez-Navarro J, Zischg A, Raible C, Röthlisberger V, Bozhinova D (2018) From global circulation to local flood loss: Coupling models across the scales. *Science of the Total Environment* 635:1225-1239
- Georgi F, Hewitson B (2020) Regional climate information-evaluation and projections. In *Climate Change 2001 The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Gorguner M, Levent Kavvas M, Ishida K (2019) Assessing the impacts of future climate change on the hydroclimatology of the Gediz Basin in Turkey by using dynamically downscaled. *Science of the Total Environment* 646:481-499
- Jared H B, Adam J T, Vasu V (2021) High-resolution dynamically downscaled rainfall and temperature projections for ecological life zones within Puerto Rico and for the US Virgin Islands. *International Journal of Climatology* 41(2):1305-1327
- Joshi D, Hilaire A, Ouarda T, Daigle A (2015) Statistical downscaling of precipitation and temperature using Sparse Bayesian Learning, Multiple Linear Regression and Genetic Programming frameworks. *Canadian Water Resources Journal* 4(12):1023-1036
- Lei C, Vladimir A A, Christopher D A (2018) The polar WRF downscaled historical and projected twenty-first century climate for the coast and foothills of Arctic Alaska. *Frontiers in Earth Science* 5(111):235-247
- Masoompour S J, Miri M, Porkamar F (2018) Assessment of CMIP5 climate models with observed precipitation in Iran. *Iranian Journal of Geophysics* 11(4):40-53
- Miri M (2017) Investigation of the relationship between climate change and degradation of Zagros forests: A case study of Ilam region. Ph.D. Thesis, School of Geography, University of Tehran (In Persian)
- Neyestani A, Sarmad G, Gustafsson N, Mohebalhojeh A (2018) Inter-comparison of HARMONIE and WRF model simulations in convective-permitting scale over western area of Iran. *Iranian Journal of Geophysics* 12(1):1-18
- Peltier W, d'Orgeville M, Erlar A, and Xie F (2018) Uncertainty in future summer precipitation in the Laurentian Great Lakes Basin Dynamical downscaling and the influence of continental scale processes on regional climate change. *Journal of Climate* 31(23):56-70
- Piras M, Mascaro G, Deidda R, Vivoni E (2014) Quantification of hydrologic impacts of climate change in a Mediterranean basin in Sardinia, Italy, through high-resolution simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(12):5201-5217
- Rahimi B S, Jahanbakhsh A S, Sari Sarraf B (2019) Dynamic downscaling to study climate change in the Karkheh Basin. *Management and Engineering Watershed of Journal* 11(3):633-649
- Rasmussen R, Ikeda K, Liu C, GOCHIS D (2014) Climate change impacts on the water balance of the Colorado Headwaters: High-Resolution Regional Climate Model Simulations. *American Meteorological Society* 15(3):1091-1116
- Rogelis M, Werner M (2018) Streamflow forecasts from WRF precipitation for flood early warning in mountain tropical areas. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(1):853-870
- Sharifi E, Saghafian B, Steinacker R (2019) Downscaling satellite precipitation estimates with multiple linear regression, artificial neural networks, and spline interpolation techniques. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 124(2):789-805
- Sun F, Hall A, Schwartz M, Walton D, Berg N (2016) Twenty-first-century snowfall and snowpack changes over the southern California Mountains. *Journal of Climate* 29:91-110

- Victor O, Haishan C, Chujie G (2019) Evaluation of CMIP5 twentieth century rainfall simulation over the equatorial East Africa. *Theoretical and Applied Climatology* 135(3-4):893-910
- Walton D, Sun F, Hall A, Capps S (2018) A hybrid dynamical–statistical downscaling technique Part I: Development and validation of the technique. *Journal of Climate* 28(12):4597-4617
- Xingying H, Daniel L S, Alex D H (2020) Future precipitation increase from very high resolution ensemble downscaling of extreme atmospheric river storms in California. *Science Advances* 6(29):1-14
- Yanping L, Zhenhua L (2021) High-Resolution Weather Research Forecasting (WRF) modeling and projection over western Canada, Including Mackenzie Watershed. *Arctic Hydrology Permafrost and Ecosystems*: 815-847. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9_28.