

شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه تراز-هرکش، استان خوزستان، با استفاده از مجموعه داده NEX-GDDP و مدل بارش-IHACRES

نجات زیدعلی نژاد^۱، حمیدرضا ناصری^{۲*}، علیرضا شکیب^۲، فرشاد علیجانی^۲
^۱ دانشجوی دکتری تخصصی هیدروژئولوژی، گروه زمین شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۲ استاد، گروه زمین شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
^۳ دانشیار، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۰ ، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۴

چکیده

یادگیری و اعمال روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در مطالعات اقلیمی، با توجه به روزرسانی مداوم و فرمت خروجی نامناسب بیشتر روش‌ها و عدم دسترسی به داده‌های برخی ایستگاه‌های هم‌دیدی (مشاهده‌ای) وقت‌گیر و طاقت‌فرسا است. با این وجود ناسا با ارائه مجموعه داده جدید ریزمقیاس‌شده NEX-GDDP تحت سناریوهای مسیر غلظت معرف، با دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5، و وضوح مکانی ۶۲۵ کیلومترمربع خروجی ۲۱ مدل اقلیمی را تهیه و در دسترس قرار داده است. در این مقاله، ابتدا با استفاده از این مجموعه داده بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه برای دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای گستره لالی استان خوزستان، به دست آمد. داده‌های به دست آمده با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای صحت‌سنجی شدند که نتایج بیانگر مناسب بودن خروجی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، بویژه دما، در گستره لالی می‌باشد. برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 میانگین بارش به ترتیب ۲۸/۶۶، ۲۷/۴۱ و ۲۷ میلیمتر در ماه و دمای میانگین به ترتیب ۱۴/۱۸، ۱۵/۹۸ و ۱۶/۳۱ درجه سلسیوس خواهد بود. نتایج مدل بارش-رواناب بیانگر توانایی مناسب مدل IHACRES در شبیه‌سازی رودخانه تراز-هرکش با ضریب تعیین ۰/۶ و ضریب تعیین ماهیانه ۰/۹ برای دوره واسنجی و ضریب تعیین ۰/۵۱ برای دوره صحت‌سنجی، با در نظر گرفتن داده‌های مشاهده‌ای که فقط یک روز در ماه اندازه‌گیری شده‌اند، می‌باشد. آبدهی رودخانه تراز-هرکش برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۳۴۰، ۳۰۴ و ۲۹۵ لیتر در ثانیه خواهد بود.

کلمات کلیدی: NEX-GDDP، تغییر اقلیم، IHACRES، رودخانه تراز-هرکش

تغییرات اقلیمی در طی دهه‌های گذشته بیشتر فرآیندهای طبیعی حاکم بر کره زمین شامل چرخه آب، پوشش گیاهی و توازن اکولوژیکی اکوسیستم‌ها را تحت تاثیر قرار داده است. درواقع، اثر تغییر اقلیم بطور مستقیم برای توسعه منابع آب و بطور غیر مستقیم در ارتباط با تولید محصولات کشاورزی، کیفیت زیست‌محیطی، توسعه اقتصادی و آسایش اجتماعی با چالش بسیار همراه است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱، ۲۰۱۴). درنتیجه، به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی برای یک گستره خاص، مطالعات تغییر اقلیم بسیار مهم است.

بایستی قبل از اینکه خروجی مدل‌های اقلیمی بتوانند بطور معناداری استفاده شوند پردازش قابل توجهی برای ارزیابی اثرات محتمل و انتخاب‌های سازگاری انجام شود. این پردازش معمولاً شامل ریزمقیاس‌نمایی زمانی و مکانی خروجی مدل‌های اقلیمی جهانی است (جونز و تورنتون^۲، ۲۰۱۳). چندین روش ریزمقیاس‌نمایی، شامل روش‌های آماری و دینامیکی، توسعه یافته‌اند که روش‌های آماری بطور گسترده در طرح‌بندی‌های اقلیمی فصلی در سطح جهانی استفاده شده‌اند (فولر^۳ و همکاران، ۲۰۰۷). بر طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، بدلیل ضرورت‌های همراه با روش‌های آماری پیچیده و نرم‌افزارهای کامپیوتری، مطالعات صورت گرفته تاکنون فقط به مکان‌ها و سناریوهای اقلیمی خاصی محدود بوده‌اند (ویلیبی^۴ و همکاران، ۲۰۰۴)، بطوریکه برای کسانی که می‌خواهند داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده آتی را بدست آورند چندین محدودیت و مانع وجود دارد. یادگیری و اعمال روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، که اغلب در نوشته‌های علمی وجود ندارند، برای کسانی که مهارت‌های آماری و برنامه‌نویسی محدودی دارند بسیار وقت‌گیر و طاقت‌فرسا است. به علاوه، در پروژه‌های مشترک ملی یا منطقه‌ای به داده‌های مشاهده‌ای چندین محل یا منطقه نیاز است.

همچنین، با ارائه هر گزارش ارزیابی جدید توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم هر چند سال یک بار، مدل‌های اقلیمی جهانی و سناریوهای انتشار به روز رسانی می‌شوند، درنتیجه معادلات برازش یا توابع انتقال نیز بایستی برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی جهانی به روز شوند. دراین رابطه تکنولوژی ماهواره‌ای به طور سریع در حال گسترش است و چندین متغیر آب و هوایی می‌تواند با آن اندازه‌گیری شود ولی این داده‌ها درواقع مکمل مشاهدات میدانی و نه جایگزین آن هستند. علاوه بر آن فرمت داده‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. فرمت خروجی مدل‌های اقلیمی جهانی تقریباً هیچوقت به فرمی که بتواند مستقیماً وارد مدل‌های هیدرولوژی شود، وجود ندارد. برای مناطقی به غیر از ایالات متحده آمریکا، بویژه کشورهای در حال توسعه، اغلب دسترسی به داده‌های آب و هواشناسی مشاهده‌ای برای صحت‌سنجی دقت روش ریزمقیاس‌نمایی انتخابی برای بازتولید اقلیم گذشته بسیار مشکل است. یک روش سریع برای دستیابی به داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده در دوره آتی با استفاده از مدل‌هایی که از قبل بطور جهانی با استفاده از مجموعه داده‌های مشاهده‌ای صحت‌سنجی شده‌اند می‌تواند دسترسی به چنین داده‌هایی را به دانشمندان و سیاست‌گذارانی که می‌خواهند آنالیزهای اثر اقلیمی آتی انجام دهند، گسترش دهد (تروتوچاود^۵ و همکاران، ۲۰۱۶)، به‌گونه‌ای که نیاز به ورودی کم و قابلیت اجرا در سطح جهانی مزیت این مجموعه داده‌ای است. درواقع ناسا^۶ برای شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی CMIP5^۷ را بمنظور تولید مجموعه داده با وضوح بالا و با طرح‌بندی بلندمدت با عنوان طرح‌بندی‌های ریزمقیاس‌شده روزانه جهانی تبادل زمین ناسا^۸ (NEX-GDDP) انجام داده است، که نتایج آن در ماه ژوئن ۲۰۱۵ میلادی برای جامعه علوم زمین منتشر شده‌اند (تریشر^۹ و همکاران، ۲۰۱۳).

5 - Trotochaud

6 - NASA

7 - Coupled Model Intercomparison Project Phase

8 - NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections

9 - Thrasher

1 - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

2 - Jones & Thornton

3 - Fowler

4 - Wilby

هوپو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات آتی وقایع حدی بارش را در کشور چین با استفاده از مجموعه داده جدید ریزمقیاس شده روزانه با وضوح بالا - NEX-GDDP بررسی کردند. آنها عملکرد این مجموعه داده در شبیه‌سازی وقایع حدی بارش و تغییرات اقلیمی بلندمدت در کشور چین را ارزیابی و با مدل‌های اقلیمی جهانی CMIP5 مقایسه کردند. بر طبق نتایج، این مجموعه داده می‌تواند الگوهای مکانی وقایع حدی بارش در کشور چین را نشان دهد. نتایج حاصل از این مجموعه داده نسبت به مدل‌های اقلیمی جهانی به داده‌های مشاهده‌ای بسیار نزدیک‌ترند. ضرایب تطابق پیرسون افزایش و خطای نسبی مدل برای بیشتر مدل‌ها کاهش را نشان می‌دهد. به علاوه، اطلاعات بیشتری برای طرح‌بندی تغییرات آتی وقایع حدی بارش می‌تواند از این مجموعه داده نسبت به مدل‌های اقلیمی جهانی به دست آید. آنها همچنین پیش‌بینی کردند این مجموعه داده برای مطالعات تغییر اقلیم در آینده بطور گسترده‌ای استفاده خواهد شد.

به منظور بررسی اثر تغییرات دما و بارندگی بر رواناب، استفاده از مدل‌های بارش- رواناب بسیار سودمند است چون این مدل‌ها قابلیت درون‌یابی و برون‌یابی جریان را متناسب با داده‌های ورودی به مدل دارند (منگیستو^{۱۱}، ۲۰۰۹). مدل‌های هیدرولوژی حوضه آبریز به دسته‌های مختلفی از جمله مدل‌های توزیعی و یکپارچه طبقه‌بندی می‌شوند (جوتیتیانگکون^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۱). انتخاب یک مدل مناسب وابسته به فاکتورهایی از قبیل توانایی شبیه‌سازی متغیرهای طراحی (رواناب سطحی، آب‌های زیرزمینی، بار رسوب و غیره)، دقت، داده‌های در دسترس و مقیاس‌های مکانی و زمانی است (سینگ^{۱۳}، ۱۹۹۵).

تگیگن^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۷) آبدهی روزانه را در سرمنشأ رودخانه نیل در اتیوپی با استفاده از دو مدل مفهومی ساده (GR4J و IHACRES) و یک مدل پیچیده (SWAT) برای چهار حوضه اصلی با داده‌های

مشاهده‌ای بررسی و قابلیت این مدل‌ها را در بازتولید جریان مشاهده‌ای مقایسه کردند. نتایج نشان داد مدل‌های مفهومی ساده برای حوضه‌های کوچکتر جریان مشاهده‌ای را در طول زمان به بهترین وجه ممکن شبیه‌سازی می‌کنند، درحالی‌که مدل پیچیده برای بزرگ‌ترین حوضه بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. درواقع، فرایارامتری^{۱۵} یک مسئله غالب و شناخته شده مربوط به مدل‌های هیدرولوژیک است (باکس و جنکینز^{۱۶}، ۱۹۷۶) که بیشتر مربوط به مدل‌های توزیعی می‌باشد (بونز^{۱۷}، ۱۹۸۹). به علاوه، تحقیقات دیگری نیز نشان می‌دهد که پیش‌بینی جریان توسط مدل‌های ساده در بسیاری از موارد بهتر از مدل‌های توزیعی بوده است (لیتلوود و جیکمن^{۱۸}، ۱۹۹۴، یی^{۱۹} و همکاران، ۱۹۹۷).

به علاوه، در بسیاری از نقاط جهان فعالیت‌های بشری و برداشت بیش از اندازه آب سبب افزایش خشکسالی‌های منطقه‌ای شده‌اند که به این پدیده زیست‌محیطی- اجتماعی خشکسالی انسانی^{۲۰} (مهران و همکاران، ۲۰۱۵، آقاچوک و همکاران، ۲۰۱۵) و یا ورشکستگی آب^{۲۱} (مدنی و همکاران، ۲۰۱۶) می‌گویند. دلیل انتخاب رودخانه تراز- هرکش در گستره لالی تاثیر ناچیز فعالیت‌های انسانی بر روی منابع آبی گستره است، بطوریکه نتوان تنها اثر تغییر اقلیم را مطالعه کرد. چاه‌های بهره‌برداری بسیار کمی در گستره مورد مطالعه وجود دارد، درنتیجه عدم قطعیت اثر چاه‌های پمپاژ بر روی تغییر آبدهی رودخانه وجود ندارد که در نتایج اثرات تغییر اقلیم تاثیرگذار باشد.

در این مقاله ابتدا مجموعه داده NEX-GDDP برای گستره لالی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا دقت آن در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در مقیاس محلی، مربوط به ایستگاه سینوپتیک لالی، تعیین شود. سپس، در صورت دقت مناسب این مجموعه داده، اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی بارش و دما در گستره لالی تعیین

15 - Over-parametrization

16 - Box & Jenkins

17 - Bevens

18 - Littlewood & Jakeman

19 - Ye

20 - Anthropogenic drought

21 - Water bankruptcy

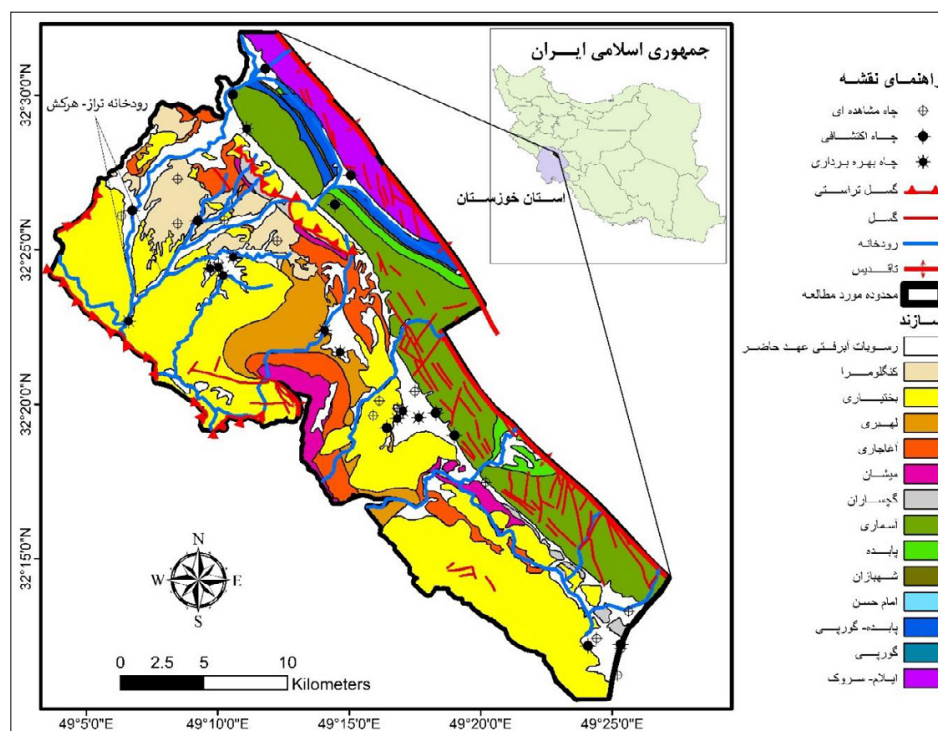
10 - Huo-Po

11 - Mengistu

12 - Jothityangkoon

13 - Singh

14 - Tegegne



شکل ۱. موقعیت گستره لالی و رودخانه تراز- هرکس در بخش شمال خاوری استان خوزستان (با تغییر از نقشه زمین شناسی برگه لالی، ۱۳۴۵)

قرار گرفته است. این گستره براساس تقسیم‌بندی واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران در دو پهنه زاگرس مرتفع و چین‌خورده با روند عمومی شمال باختری- جنوب خاوری قرار دارد (شکل ۱).

رودخانه تراز- هرکس با امتداد شمال خاوری- جنوب باختری تقریباً در بخش شمالی گستره مورد مطالعه قرار دارد که از دو رودخانه تراز و هرکس تشکیل شده است (شکل ۱). اختلاف توپوگرافی یا ارتفاع بالادست و پایین‌دست حدود ۱۰۰۰ متر است و داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به محل تلاقی دو رودخانه است که داده روزانه آن از مهر ۱۳۸۸ (۲۰۰۹/۰۹/۲۳) تا شهریور ۱۳۹۰ (۲۰۱۱/۰۹/۲۲) و داده ماهیانه آن از آبان ۱۳۹۱ (۲۰۱۲/۱۱/۰۶) تا مهر ۱۳۹۴ (۲۰۱۵/۱۰/۰۶) بصورت یک روز مشخص در هر ماه موجود است.

داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک لالی فقط برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۰۷ موجود است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶). با توجه به داده‌های ایستگاه هواشناسی لالی در دوره ۲۰۱۶-۲۰۰۷ متوسط ساعات آفتابی حدود

می‌شود. در نهایت، با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES (جیکمن و هورنبرگر^{۲۲}، ۱۹۹۳) اثر تغییر اقلیم بر رودخانه تراز- هرکس با شبیه سازی رواناب روزانه بررسی می‌شود. دلیل انتخاب رودخانه تراز- هرکس این است که این رودخانه در گستره ای قرار گرفته است که تاثیر سایر عوامل مانند بهره برداری از آب‌های زیرزمینی، عامل انسانی و تغییر کاربری اراضی در آن وجود ندارد و یکی از اهداف این مطالعه این بود که در صورت وجود عامل تغییر اقلیم به تنهایی چه تغییری در آبدهی رودخانه مشاهده می‌شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت و کلیات گستره مورد مطالعه

گستره لالی در فاصله حدود ۱۸ کیلومتری شمال خاوری شهر لالی، بین عرض جغرافیایی ۳۳° ۱۸' و ۳۳° ۳۶' شمالی و طول جغرافیایی ۴۹° ۰۳' و ۴۹° ۲۱' شرقی، در حوضه کارون میانی در شمال استان خوزستان

جدول ۱. مدل‌های CMIP5 مشمول در مجموعه داده NEX-GDDP (تریشر و نمایی، ۲۰۱۵)

نام مدل	مرکز یا موسس	وضوح اتمسفری (lat×lon)
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2.8125×2.8125°
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	1.850×1.875°
GFDL-CM3	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, US	2×2.5°
GFDL-ESM2G	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, US	2×2.5°
GFDL-ESM2M	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, US	2×2.5°
IPSL-CM5A-LR	L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France	1.875×3.75°
IPSL-CM5A-MR	L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France	1.25874×2.5°
MIROC5	Center for Climate System Research, National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change, Japan	1.40625×1.40625°
MIROC-ESM	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo, Japan	2.8125×2.8125°
MIROC-ESM-CHEM	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo, Japan	2.8125×2.8125°
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	1.125×1.125°
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	1.875×2.5°
ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and Bureau of Meteorology, Australia	1.25×1.875°
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	2.8×2.8°
CanESM2	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	2.8×2.8°
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, US	0.9375×1.25°
CESM1-BGC	Community Earth System Model Contributors	0.9×1.25°
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), France	1.40625×1.40625°
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	1.5×2°
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.875×1.875°
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.875×1.875°

سناریوهای جدید مسیرهای غلظت معرف^{۲۸} RCP4.5 و RCP8.5 مربوط به گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم است (مینشاوسن^{۲۹} و همکاران، ۲۰۱۱، تیلور^{۳۰} و همکاران، ۲۰۱۲). تفکیک مکانی مجموعه داده NEX-GDDP حدود ۰/۲۵ درجه یا حدود ۲۵ کیلومتر است که در کل مربوط به یک سلول با مساحت ۲۵ × ۲۵ کیلومتر، یعنی ۶۲۵ کیلومترمربع، است. هدف از ایجاد این مجموعه داده فراهم کردن یک مجموعه از طرح‌بندی‌های تغییر اقلیم با تصحیح خطا^{۳۱} و وضوح بالا در سطح جهانی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای حساس به گرادیان‌های اقلیمی در مقیاس محلی و اثرات توپوگرافی محلی بر شرایط اقلیمی است (تریشر و همکاران، ۲۰۱۲). در واقع اثر توپوگرافی، که گاهی وقایع بارش محلی را شدت می‌بخشد، نیز در مجموعه داده در نظر گرفته شده است (بائو و ون، ۲۰۱۷).

۷/۹ ساعت، متوسط بارش سالیانه ۳۹۶ میلیمتر و متوسط دمای میانگین سالیانه ۲۵/۱۱ درجه سلسیوس می‌باشد. اقلیم گستره مورد مطالعه در محدوده نیمه خشک قرار می‌گیرد. بیشتر بارندگی سالیانه در فاصله زمانی آبان تا اردیبهشت ماه ریزش می‌کند و فصل خشک منطبق بر خرداد ماه تا مهر ماه می‌باشد.

مجموعه داده NEX-GDDP

در مطالعات اخیر تغییر اقلیم در مقیاس ناحیه‌ای تا محلی از مجموعه داده ریزمقیاس شده NEX-GDDP استفاده شده است (احمدعلیپور^{۲۳} و همکاران، ۲۰۱۶، دونلی^{۲۴} و همکاران، ۲۰۱۶، بائو و ون^{۲۵}، ۲۰۱۷، هوپو^{۲۶} و همکاران، ۲۰۱۷). این مجموعه داده شامل طرح‌بندی‌های^{۲۷} بارش و دما از سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ میلادی برای ۲۱ مدل گردش عمومی (جدول ۱) تحت

28 - Representative Concentration Pathways
29 - Meinshausen
30 - Taylor
31 - Bias corrected

23 - Ahmadelipour
24 - Donnelly
25 - Bao & Wen
26 - Huo-Po
27 - Projections

لالی صحت‌سنجی شدند و سپس تغییرات دما و بارش برای دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) تحت سناریوهای جدید RCP4.5 و RCP8.5 با در نظر گرفتن میانگین عددی خروجی تمامی مدل‌های بکار رفته در مجموعه داده به دست آمدند. در واقع، پس از دستیابی به خروجی مدل‌های اقلیمی مجموعه داده NEX-GDDP در دوره مشاهده‌ای، یعنی ۲۰۱۶-۲۰۰۷، میانگین ماهیانه متغیرهای اقلیمی مربوط به خروجی مدل‌های اقلیمی با میانگین ماهیانه داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد و با توجه به مشخصه آماری R^2 دقت مجموعه داده بررسی شد.

مدل بارش- رواناب IHACRES

برای گستره لالی که یک حوضه کوچک می‌باشد بهتر است از یک مدل هیدرولوژیکی ساده استفاده کرد. الگوریتمی که توسط جیکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳) برای شبیه‌سازی بارش- رواناب ارائه شده است با توجه به ورودی‌های موردنیاز بسیار مناسب به نظر می‌آید. دقت این روش در مطالعات تغییر اقلیم در کشور ایران (سادات آشفته و مساح‌بوانی، ۱۳۸۶، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱؛ قاسمی و همکاران، ۱۳۹۲؛ انصاری و همکاران، ۱۳۹۵) و در جهان (کروک^{۴۱} و جیکمن، ۲۰۰۸) در چندین مطالعه اثبات شده است. اگر سوالات پیچیده‌تری مورد نظر باشد، مدل‌های پیچیده‌تری برای رسیدن به پاسخ‌ها مورد نیاز است. به هر حال، با افزایش پیچیدگی مدل، عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل نیز افزایش می‌یابد. مدل IHACRES یک مدل متریک- مفهومی^{۴۲} است، که در نتیجه سادگی مدل متریک عدم قطعیت پارامتری موجود در مدل‌های هیدرولوژیک کاهش می‌یابد و در همان زمان جزئیات بیشتری را از فرآیندهای داخلی نسبت به یک مدل متریک نشان می‌دهد (کروک و جیکمن، ۲۰۰۸). این مدل یکپارچه^{۴۳} پاسخ‌های بارش- رواناب حوضه را نسبت به جریان کلی رودخانه با استفاده از پارامترهایی که

روش جداسازی مکانی تصحیح خطا^{۳۲} (BCSD) مورد استفاده در مجموعه داده NEX-GDDP یک الگوریتم یا روش ریزمقیاس‌نمایی آماری است (وود^{۳۳} و همکاران، ۲۰۰۲، وود و همکاران، ۲۰۰۴، ماورر^{۳۴} و همکاران، ۲۰۰۸، تریش و همکاران، ۲۰۱۲) که خروجی‌های GCM را با داده‌های مشاهده‌ای اقلیمی متناظر در زمان مشابه مقایسه و از اطلاعات مشتق شده از این مقایسه استفاده می‌کند تا طرح‌بندی‌های اقلیمی آتی را به گونه‌ای تعدیل دهد که با رکوردهای اقلیمی گذشته هماهنگ‌تر و برای گستره مورد نظر واقعی‌تر باشند. الگوریتم همچنین از جزئیات مکانی مستخرج از مجموعه داده‌های مشتق شده مکانی استفاده می‌کند تا خروجی مدل‌های اقلیمی را به شبکه‌های با وضوح بیشتر درونیابی کند. از مجموعه داده واداشت آب و هواشناختی جهانی^{۳۵} (GMFD) برای مدل‌سازی سطح زمین استفاده شده است که در گروه تحقیقات هیدرولوژی زمینی دانشگاه پرینستون^{۳۶} قابل دسترس است (شفیلد^{۳۷} و همکاران، ۲۰۰۶). مجموعه داده واداشت آب و هواشناختی جهانی داده‌های آنالیز مجدد^{۳۸} را با داده‌های مشاهده‌ای ترکیب می‌کند و با وضوح مکانی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درجه و وضوح زمانی ۳ ساعتی، روزانه و ماهیانه در دسترس است. برای تولید مجموعه داده NEX-GDDP از داده‌های روزانه با وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۵ استفاده شده است (اجرای گذشته‌نگرانه^{۳۹}). برای مطالعه جزئیات مربوط به مجموعه داده NEX-GDDP می‌توان به مراجع مربوطه (مثل: تریش و نمانی^{۴۰}، ۲۰۱۵) مراجعه کرد.

در این مطالعه پس از دسترسی به مجموعه داده NEX-GDDP در گستره لالی، خروجی این مجموعه داده با توجه به داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه سینوپتیک

32 - Bias-Correction Spatial Disaggregation

33 - Wood

34 - Maurer

35 - Global Meteorological Forcing Dataset

36 - Terrestrial Hydrology Research Group at Princeton University

37 - Sheffield

38 - Reanalysis data

39 - Retrospective

40 - Nemani

41 - Croke

42 - Conceptual- metric

43 - lump

داده می‌شوند و عملکرد مدل با استفاده از مشخصه‌های آماری بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بررسی و مدل برای بهترین دوره به ازای بهترین مشخصه‌های آماری واسنجی شده و مقادیر ثابت زمانی خشک شدن حوضه و فاکتور تعدیل دما برای بهترین عملکرد مدل انتخاب می‌شوند. به علاوه، مدل با پارامترهای ثابت زمانی خشک شدن حوضه و فاکتور تعدیل دما حاصل از دوره واسنجی در دوره دیگری صحت‌سنجی می‌شود و دقت آن در شبیه‌سازی بارش-رواناب تایید می‌شود. برای واسنجی مدل از داده‌های روزانه موجود و برای صحت‌سنجی نیز به دلیل کمبود داده روزانه به ناچار از داده‌های ماهیانه که بصورت یک روز مشخص در هر ماه موجود است، استفاده شده است.

معیارهای آماری

پارامترهای آماری مختلفی برای توقف شبیه‌سازی و ارزیابی مدل وجود دارند که در این مقاله از ضریب تعیین^{۴۹} (R^2) (کراوز^{۵۰} و همکاران، ۲۰۰۵)، خطای^{۵۱} (Bias)، خطای نسبی^{۵۲} (Rel. Bias)، R^2_{sqrt} ، R^2_{log} و R^2_{inv} استفاده شده است که عبارتند از:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۱)$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum (O_i - P_i)}{n} \quad (۲)$$

$$\text{Rel. Bias} = \frac{\sum (O_i - P_i)}{\sum O_i} \quad (۳)$$

$$R^2_{\text{sqrt}} = 1 - \frac{\sum (\sqrt{O_i} - \sqrt{P_i})^2}{\sum (\sqrt{O_i} - \sqrt{\bar{O}_i})^2} \quad (۴)$$

$$R^2_{\text{log}} = 1 - \frac{\sum (\ln(O_i + \varepsilon) - \ln(P_i + \varepsilon))^2}{\sum (\ln(O_i + \varepsilon) - \ln(\bar{O}_i + \varepsilon))^2} \quad (۵)$$

49 - Coefficient of determination

50 - Krause

51 - Bias

52 - Relative bias

قبل از شبیه‌سازی با مقایسه با داده‌های جریان مشاهده‌ای واسنجی شده‌اند، شبیه‌سازی می‌کند (جیکمن و همکاران، ۱۹۹۰، جیکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳). درواقع این مدل از دو مدول تشکیل شده است. مدول غیرخطی کاهش^{۴۴} بارش را به بارش موثر تبدیل می‌کند. بارش موثر بخشی از بارش است که سرانجام حوضه را به صورت رواناب ترک می‌کند. بخش دوم مدول خطی هیدروگراف واحد^{۴۵} است که بارش موثر را به جریان تبدیل می‌کند (تگیکن و همکاران، ۲۰۱۷). مدول خطی بارش موثر را از طریق هر ترکیب از مشخصه‌های ذخیره‌ای^{۴۶} بصورت موازی یا سری در مسیر رودخانه تعیین مسیر می‌کند.

شکل مخازن از طریق سری زمانی بارش و دبی مشخص می‌شود که معمولاً یا یک مخزنی است، معرف رودخانه‌های موقتی، یا دو مخزنی بصورت موازی می‌باشد که بیانگر جریان پایه و سریع است و به ندرت شکل پیچیده‌تری از این تناسب شبیه‌سازی را بهبود می‌بخشد (جیکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳). براساس سری‌های زمانی مورد استفاده و به روش آزمون و خطا مقادیر بهینه پارامترهای مدل تعیین می‌شود (کروک و همکاران، ۲۰۰۵). روابط بکار رفته در مدل IHACRES توسط جیکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳) توضیح داده شده‌اند.

مدل IHACRES بایستی مورد واسنجی قرار گیرد. برای این کار از داده‌های مشاهده‌ای دما، بارش و دبی حوضه موردنظر در دوره زمانی موجود استفاده می‌شود. پس از واسنجی مدل، رواناب روزانه بر اثر تغییر اقلیم با استفاده از داده‌های دما و بارش ریزمقیاس شده شبیه‌سازی می‌شود. جهت واسنجی مدل بارش-رواناب IHACRES می‌بایست بهترین دوره که در آن بهترین ارتباط بین دما و بارش مشاهده‌ای با رواناب مشاهده‌ای حوضه برقرار می‌شود را انتخاب کرد و سپس مقادیر پارامترهای ثابت زمانی خشک شدن حوضه^{۴۷} و فاکتور تعدیل دما^{۴۸} و دوره زمانی برای واسنجی در مدل تغییر

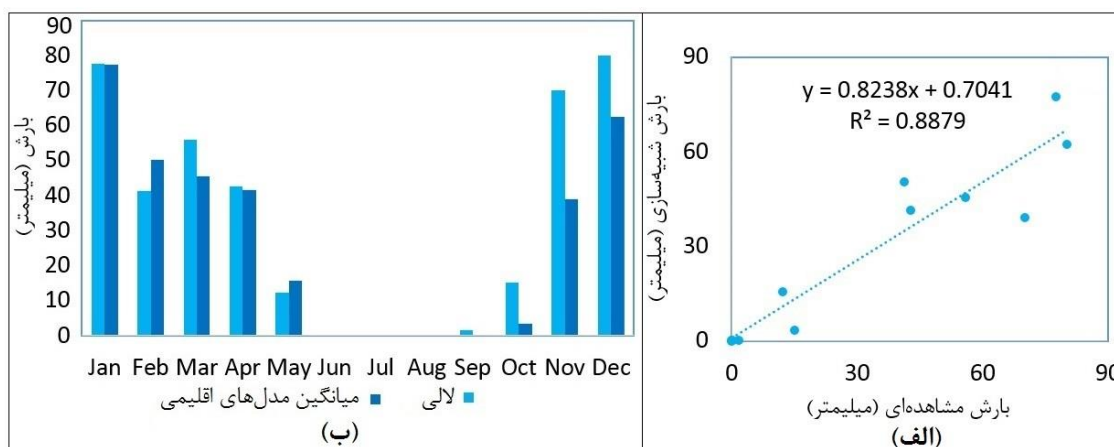
44 - Non-linear loss module

45 - Linear unit hydrograph module

46 - Storage configuration

47 - Catchment drying time constant

48 - Temperature modulation factor



شکل ۲. نمودار پراکندگی (الف) و میله‌ای (ب) بارش تجمعی ماه‌های مختلف مدل‌های اقلیمی در مقابل داده‌های ایستگاه لالی برای دوره ۲۰۰۷-۲۰۱۶

شده مشاهده می‌شود (شکل ۲- الف). با توجه به R^2 حدود ۰/۸۹ در مورد بارش، دقت خروجی مدل‌های اقلیمی موجود در مجموعه داده NEX-GDDP به دلیل نرمال نشدن داده‌های بارش از روش غیرپارامتری^{۵۳} من-ویتی که معادل آزمون t مستقل^{۵۴} است استفاده شد. با توجه به اینکه مقدار سطح اهمیت^{۵۵} یا مقدار p -value برابر با ۰/۲۸۵ به دست آمد، که بیشتر از ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت معناداری بین میانگین دو گروه داده‌های مشاهده‌ای و خروجی مدل‌های اقلیمی موجود در مجموعه داده NEX-GDDP وجود ندارد. روند تغییرات بارش در ماه‌های مختلف تطابق خوبی نشان می‌دهد اما برای ماه‌های اکتبر تا دسامبر نتایج میانگین مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای اختلاف بیشتری را نشان می‌دهند (شکل ۲- ب). به علاوه، برازش میانگین دمای کمینه و بیشینه ماه‌های مختلف مربوط به میانگین عددی خروجی مدل‌های اقلیمی در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه لالی برازش بسیار بالای نتایج مدل‌های اقلیمی با داده‌های مشاهده‌ای را با R^2 حدود ۱ نشان می‌دهند (شکل ۳).

در کل با توجه به نتایج صحت‌سنجی می‌توان گفت میانگین مدل‌های اقلیمی دمای بیشینه را بهتر از

$$R^2_{inv} = 1 - \frac{\sum (\frac{1}{O_i + \varepsilon} - \frac{1}{P_i + \varepsilon})^2}{\sum (\frac{1}{O_i + \varepsilon} - \frac{1}{O_i + \varepsilon})^2} \quad (۶)$$

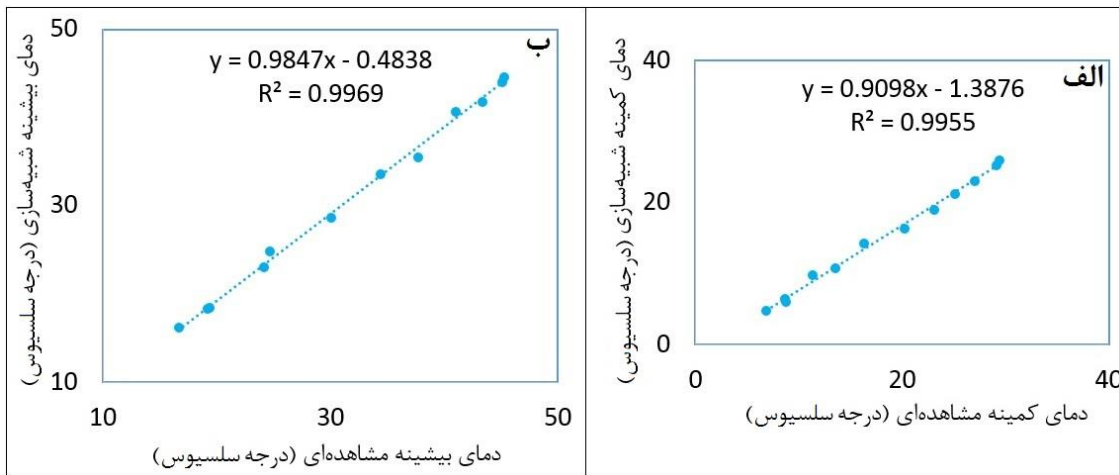
که در آنها O_i مقدار اندازه‌گیری شده، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ مقدار اندازه‌گیری شده متوسط و ε صدک نودم جریان مشاهده‌ای غیرصفر است. R^2 هر چه به یک نزدیکتر باشد شبیه‌سازی بهتر می‌باشد. خطا مقدار خطای کلی جریان برحسب میلیمتر در سال است. R^2_{sqrt} تغییر R^2 با در نظر گرفتن وزن کمتر برای اوج جریان است. R^2_{log} تغییر R^2 با دادن وزن مساوی به کل صدک‌های جریان است. R^2_{inv} تغییر R^2 با دادن وزن بیشتر به جریان‌های کمتر است.

نتایج

صحت‌سنجی مجموعه داده NEX-GDDP

پس از دستیابی به نتایج خروجی مدل‌های مجموعه داده NEX-GDDP هرچند که بصورت جهانی صحت‌سنجی شده‌اند ولی بهتر است صحت و سقم استفاده از آنها برای گستره لالی بررسی شود. برای این کار نتایج مدل‌های مختلف مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۶ با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه لالی مقایسه شده است. در مورد بارش با توجه به عدد R^2 حدود ۰/۸۹ انطباق نزدیکی بین داده‌های دیده بانی شده و شبیه‌سازی

53 Nonparametric Tests
54 Independent-Samples T Test
55 Significance Level or Sig.



شکل ۳. میانگین دمای کمینه (الف) و بیشینه (ب) ماه‌های مختلف مدل‌های اقلیمی در مقابل داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه لالی برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۰۷

مشابه است. میانگین بارش برای دوره پایه و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آتی به ترتیب ۲۸/۶۶، ۲۷/۴۱ و ۲۷ میلی‌متر در ماه است. اختلاف بارش ماهیانه دوره آتی با سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 از دوره پایه بطور میانگین به ترتیب حدود ۱/۲۵- و ۱/۶۶- میلی‌متر است. اگرچه اختلاف بارش ماهیانه دوره آتی از دوره پایه با در نظر گرفتن سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 مقادیر منفی‌تری را نشان می‌دهد، یعنی بارش کمتر می‌شود، این مقدار برای ماه دسامبر و آوریل تحت سناریوی RCP4.5 منفی‌تر است. در کل از لحاظ تغییرات بارش به صورت فصلی می‌توان گفت کاهش بارش عمدتاً مربوط به پاییز و بویژه زمستان است (شکل ۴). اینکه بارش در فصل زمستان، یعنی فصل سرد، خیلی کاهش می‌یابد نگرانی را افزایش می‌دهد زیرا در این فصل دما پایین می‌باشد و تبخیر و تعرق کم‌تر است و احتمال تغذیه آبخوان نیز کمتر می‌شود.

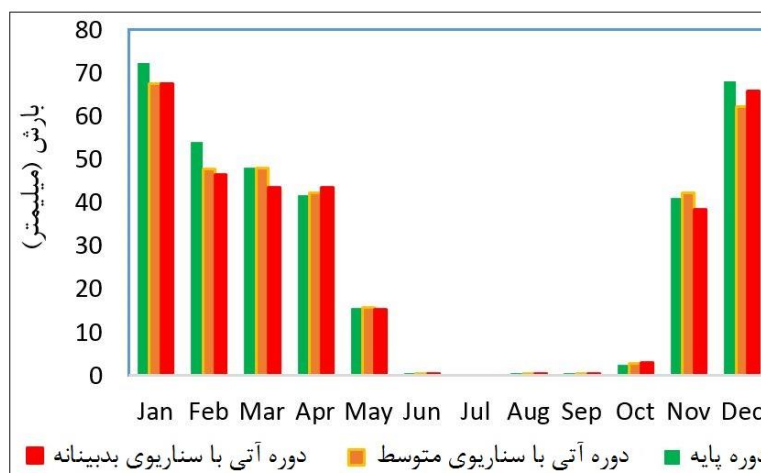
در شمال باختری ایران، حوضه قرنقو در آذربایجان شرقی، در دوره آتی (۲۰۱۰-۲۰۳۹) برخلاف گستره لالی افزایش بارش در فصل پاییز و کاهش آن در فصل تابستان محتمل است (سادات‌آشفته و مساح‌پوایی، ۱۳۹۱). در مطالعه صورت گرفته توسط سلامی و همکاران (۱۳۹۴) برای دشت همدان- بهار تحت سناریوی B1 تابستان

دمای کمینه و در کل دما را بهتر از بارش تخمین می‌زنند. روند تغییرات دما و بارش بخوبی مدل‌سازی شده است اما وقایع حدی مربوط به پیک سیلاب‌ها به خوبی مدل‌سازی نشده است. حتی درمورد بارش نیز میانگین تجمعی مربوط به ماه‌های مختلف بخوبی شبیه‌سازی شده است ولی تغییرات آن بخوبی شبیه‌سازی نشده است.

اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی گستره لالی

پس از صحت‌سنجی خروجی مدل‌های مجموعه داده NEX-GDDP از میانگین عددی خروجی مدل‌های آن برای تعیین اثر تغییر اقلیم بر گستره لالی استفاده شد. در منطقه خاورمیانه که دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است بر اثر تغییر اقلیم افزایش دما و کاهش بارش پیش‌بینی شده است (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹).

برای سه ماه اول سال، یعنی فصل زمستان، کاهش میانگین مجموع بارش ماهیانه به ترتیب برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و درنهایت دوره آتی با سناریوی RCP8.5 مشاهده می‌شود. برای ماه‌های دیگر سال، به عنوان مثال ماه آوریل، تقریباً مقدار بارش برای دوره پایه و دوره آتی با سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 تغییر چندانی نمی‌کند و حتی در برخی موارد برای دوره آتی بیشتر می‌شود. با این حال روند تغییرات



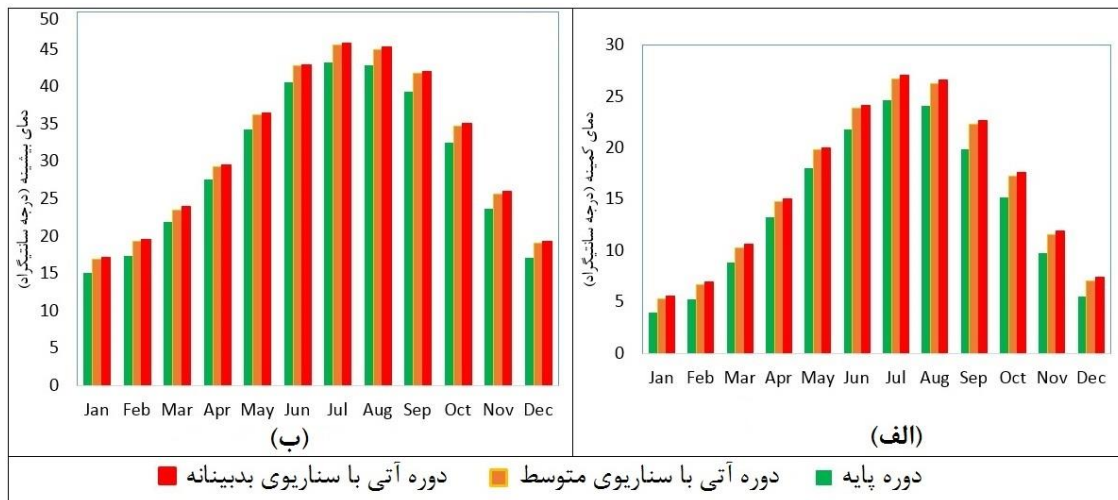
شکل ۴. میانگین مجموع بارش مربوط به ماه‌های مختلف برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی متوسط (RCP4.5) و دوره آتی با سناریوی بدبینانه (RCP8.5)

دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب برابر با ۲۹/۶۲، ۳۱/۶۵ و ۳۱/۹۴ درجه سلسیوس است (شکل ۵). در مطالعه صورت گرفته توسط سلامی و همکاران (۱۳۹۴) برای دشت همدان- بهار تغییرات متوسط سالانه دما بستگی به سطوح احتمالاتی و سناریوهای مختلف در دوره آتی (۲۰۴۵-۲۰۱۵) بین ۰/۹۶ و ۱/۹۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. برای گستره لالی نیز تحت هر دو سناریو در دوره آتی دما افزایش می‌یابد و این افزایش دما، بین ۱/۹۲ و ۲/۲۳، پیش‌بینی می‌شود. برای منطقه جنوب مرکزی ایران در دوره آتی (۲۰۹۵-۲۰۱۵) نرخ افزایش دما حدود ۲/۳ تا ۳/۵ درجه سلسیوس (نادری و رئیسی، ۲۰۱۵) و برای شمال باختری ایران، حوضه قرنقو در آذربایجان شرقی، در دوره آتی (۲۰۳۹-۲۰۱۰) حدود ۰/۲ تا ۴ درجه سلسیوس (سادات‌آشفته و مساح‌بوانی، ۱۳۹۱) پیش‌بینی شده است. در جنوب‌خاوری ایران نیز برای دوره آتی (۲۰۹۹-۲۰۱۱) تغییر دما بین ۰/۰۶- تا ۳/۸۲ درجه سلسیوس محتمل است (حمیدیان‌پور و همکاران، ۱۳۹۵).

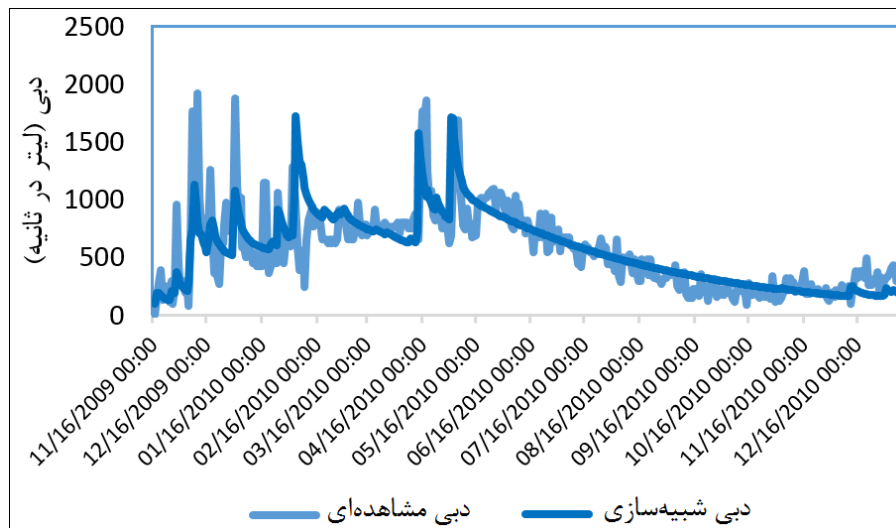
اثر تغییر اقلیم بر آبدهی رودخانه تراز- هرکش
پس از صحت‌سنجی و استفاده از مجموعه داده

مرطوب‌تری پیش‌بینی شده است و تغییرات متوسط سالانه بارش بستگی به سطوح احتمالاتی و سناریوهای مختلف در دوره آتی (۲۰۴۵-۲۰۱۵) بین ۴۱+ تا ۳۸- درصد پیش‌بینی شده است. برای گستره لالی تحت هر دو سناریو بارش کاهش می‌یابد و افزایش آن برخلاف دشت همدان- بهار محتمل نیست. برای جنوب مرکزی ایران نیز کاهش بارش در دوره آتی (۲۰۹۵-۲۰۱۵) در حدود ۱۳ تا ۲۶ درصدی محتمل است (نادری و رئیسی، ۲۰۱۵). در جنوب‌خاوری ایران نیز برای دوره آتی (۲۰۹۹-۲۰۱۱) نوسانات بارش در فصل‌های مختلف، افزایش آن برای فصل سرد و مخصوصاً بهار که منجر به افزایش سیلاب‌های بهاره می‌شود، مشاهده می‌شود (حمیدیان‌پور و همکاران، ۱۳۹۵).

دمای کمینه و بیشینه در دوره آتی با سناریوی RCP8.5 بیشتر از دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و در دوره آتی با سناریوی RCP4.5 نیز بیشتر از دوره پایه هستند. این افزایش دمای کمینه و بیشینه برای فصل تابستان و بخصوص اواسط آن بیشترین مقدار است. دمای کمینه میانگین سالیانه برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۱۴/۱۸، ۱۵/۹۸ و ۱۶/۳۱ درجه سلسیوس و دمای بیشینه میانگین سالیانه نیز برای



شکل ۵. میانگین دمای کمینه (الف) و بیشینه (ب) برای ماه‌های مختلف مربوط به دوره پایه و سناریوهای دوره آتی (RCP4.5 و RCP8.5)



شکل ۶. نتایج دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره واسنجی مدل برای رودخانه تراز- هرکش

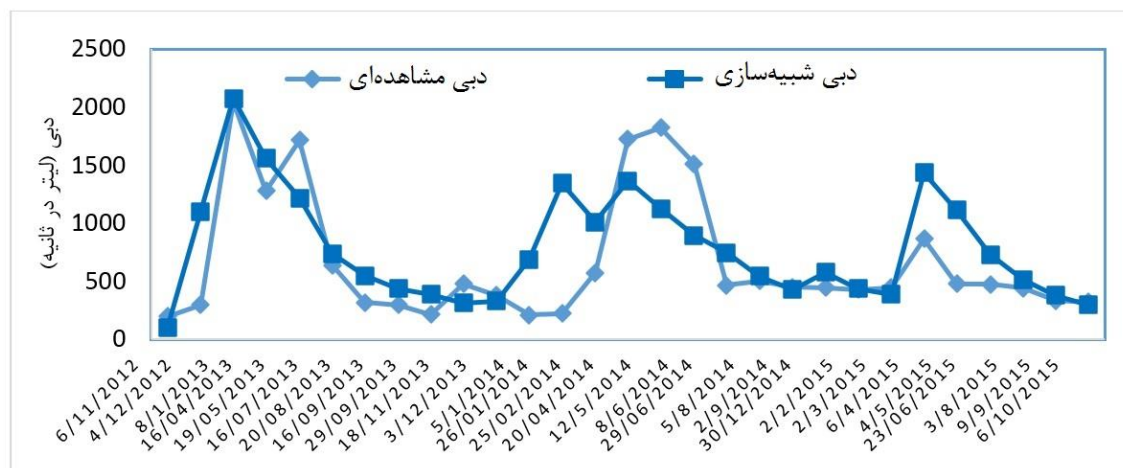
واسنجی بهترین نتایج را برای واسنجی مدل با توجه به مشاهده بصری تطابق نتایج دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی (شکل ۶) و معیارهای آماری (جدول ۲) به دست داد. معیار آماری ضریب تغییر در دوره واسنجی برای گام زمانی روزانه ۰/۶ و برای گام زمانی ماهیانه ۰/۹ است. مقادیر R^2_{inv} ، R^2_{log} ، R^2_{sqrt} نیز به ترتیب برابر با ۰/۶۹، ۰/۷۳ و ۰/۷۳ می‌باشند. به علاوه در دوره واسنجی خطای مدل ۱/۵۳- میلی‌متر در سال و خطای نسبی ۰/۰۲- است.

NEX-GDDP می‌توان با استفاده از خروجی به دست آمده اثر تغییر اقلیم را بر آبدی رودخانه تراز- هرکش بررسی کرد. پس از ورود داده‌های روزانه بارش، دما و آبدی مشاهده‌ای رودخانه تراز- هرکش به محیط نرم‌افزار برای واسنجی مدل از تاریخ ۲۰۰۹/۰۹/۲۳ لغایت ۲۰۰۹/۱۱/۱۵ به عنوان دوره وارم‌آپ^{۵۶} و از تاریخ ۲۰۰۹/۱۱/۱۶ لغایت ۲۰۱۱/۰۱/۱۰ به عنوان دوره واسنجی به مدل IHACRES معرفی شدند. این دوره

56 - Warm-up period

جدول ۲. شاخص‌های آماری محاسبه شده توسط نرم‌افزار مربوط به دوره واسنجی رودخانه تراز- هرکش

شاخص آماری	Bias (mm/year)	Rel. Bias	R ²	R ² _sqrt	R ² _log	R ² _inv	Monthly R ²
مقدار	-1.53	-0.02	0.60	0.69	0.73	0.73	0.90



شکل ۷. نتایج دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره صحت‌سنجی مدل برای رودخانه تراز- هرکش

آمد. متوسط دبی برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۳۴۰، ۳۰۴ و ۲۹۶ لیتر در ثانیه است، که بیانگر کاهش دبی در دوره آتی نسبت به پایه و در دوره آتی با سناریوی RCP8.5 در مقایسه با دوره آتی با سناریوی RCP4.5 می‌باشد. بویژه برای نیمه اول سال دبی اختلاف بیشتری را بین دوره پایه و دوره آتی با سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد (شکل ۸). همچنین مجموع تخلیه برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۳۲۱/۶، ۲۸۷/۸ و ۲۷۹/۶ میلیون مترمکعب است.

بحث

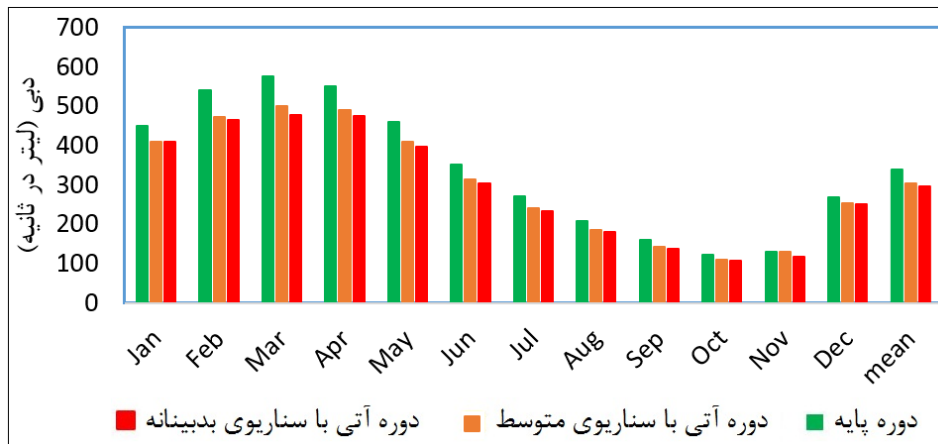
تغییر اقلیم

مجموعه داده NEX-GDDP موفق به پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه با ضریب تعیین حدود یک شد. در مورد بارش این ضریب حدود ۰/۸۹ است که نتیجه

در خصوص طول دوره آماری مربوط به واسنجی مدل بارش- رواناب نیز می‌توان گفت برای دوره واسنجی حدود دو سال داده روزانه کافی است (پی و همکاران، ۱۹۹۷). به علاوه تأخیر^{۵۷} تبدیل بارش به رواناب در بخش مدول خطی توسط مدل محاسبه می‌شود که یک روز محاسبه شد.

برای صحت‌سنجی مدل رودخانه تراز- هرکش از داده‌های اندازه‌گیری شده ماهیانه دبی رودخانه از تاریخ ۲۰۱۲/۱۱/۰۶ لغایت ۲۰۱۵/۱۰/۰۶، که در روز مشخصی از هر ماه اندازه‌گیری شده‌اند، استفاده شد. مدل عملکرد نسبتاً مناسبی در شبیه‌سازی دبی مشاهده‌ای و تغییرات آن دارد (شکل ۷).

بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، با استفاده از مقادیر دما و بارش خروجی مدل‌های اقلیمی برای دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) مقادیر آبدی رودخانه تراز- هرکش برای دوره پایه و دوره آتی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به دست



شکل ۸. نمودار میله‌ای میانگین دبی ماهیانه برحسب لیتر در ثانیه برای دوره پایه و دوره آتی تحت سناریوهای مختلف (RCP4.5 و RCP8.5) رودخانه تراز-هرکش

سودانی، به کم‌فشارهای حرارتی اطلاق می‌شود که محل تشکیل آنها مناطق اطراف دریای سرخ است و خطوط کم‌فشار آنها جنوب دریای سرخ، سودان و اتیوپی را در بر گرفته و در مسیر حرکت از جنوب‌باختر ایران عبور می‌کنند و سبب بارش‌های شدید می‌شوند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱).

عطایی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی آماری-همدید توفان‌های تندری استان خوزستان بیان کردند که به لحاظ زمانی توفان‌های تندری طی ماه‌های ژانویه تا می و اکتبر تا دسامبر صورت می‌پذیرد و وجود حرکت همرفتی شرایط صعود و ناپایداری را مهیا کرده و با بادهای باختری و جنوبی همراه شده و سبب وقوع توفان‌های تندری شدید در این منطقه می‌شود. در منطقه لالی بارش مشاهده‌ای در ماه اکتبر تا دسامبر بیشتر از بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی است که علت آن می‌تواند به توفان‌های تندری مربوط باشد.

مدل بارش-رواناب

یی و همکاران (۱۹۹۷) از نرم‌افزار IHACRES برای یک حوضه خشک با آبدهی کم و موقتی در استرالیا استفاده و بیان کردند که برای این چنین حوضه‌هایی رابطه بین بارش و رواناب غیرخطی می‌شود، در نتیجه شبیه‌سازی آبدهی در آنها بسیار مشکل است که می‌توان

بسیار مناسبی است. در کل پیش‌بینی بارش بسیار مشکل است زیرا پدیده بارش حاصل اندرکنش‌های پیچیده هواسپهر است (محمدی و مسعودیان، ۱۳۸۹). بارندگی یک مولفه اساسی از چرخه آب جهانی، به عنوان یک پارامتر بوم‌شناسی، آب‌شناسی و هواشناسی است (جیا^{۵۸} و همکاران، ۲۰۱۱) و به دلیل پیوند با اجزای مختلف دستگاه اقلیم، رفتاری پیچیده دارد. رخداد بارش نیازمند تأمین شرایط متعددی است و مهیائی رطوبت، سرماییش و ... شرایط لازم برای رخداد بارش به شمار می‌آیند (مسعودیان و محمدی، ۱۳۸۹).

مدل بارش یک مدل دو بخشی است. در حالی که بخش اول تعیین‌کننده رخداد یا عدم رخداد بارش در یک زمان مشخص، معمولاً با گام زمانی یک روز، است، بخش دوم مقدار بارش را تعیین می‌کند. سیستم آب و هوا بایستی یک روز بارانی را تولید کند. مقدار بارش روزانه به طور شدید توسط شرایط محلی و وضعیت توده‌های هوا در آن روز تعیین می‌شود. مقدار بارش عمدتاً یک پدیده تصادفی است که توزیع نرمال ندارد، یک ضرورت برای یک انطباق معتبر، بلکه یک توزیع گامای شدیداً کج شده است.

ناپایداری جوی و رخداد بارش در جنوب‌باختر ایران بطور معمول تحت تأثیر سامانه‌های سودانی است. سامانه

در ارتباط با مشخصه‌های آماری می‌توان گفت R^2 بیشتر برای بررسی دبی‌های حداکثر بکار می‌رود، R^2_{sqrt} برای حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک با دبی پایه کم بکار می‌رود، R^2_{log} و R^2_{inv} برای مواردی که دبی کم مهم است مناسب می‌باشند که R^2_{log} وزن یکسانی را برای جریان‌های کم و زیاد در نظر می‌گیرد و R^2_{inv} برای جریان‌های کم بایاس زیادی دارد (کروک و جیکمن، ۲۰۰۸). با توجه به این نکات R^2_{log} با در نظر گرفتن وزن یکسان برای جریان‌های کم و زیاد می‌تواند معیار مناسبی برای بررسی عملکرد مدل در منطقه لالی باشد که 0.73 می‌باشد و بیانگر توانایی مدل در شبیه‌سازی است.

در بخش واسنجی مدل قابلیت انتخاب مشخصه‌های ذخیره‌ای^{۵۹} برای حوضه مورد نظر وجود دارد. برای یک حوضه با مولفه جریان پایه قوی در نظر گرفتن دو ذخیره توانی بصورت موازی^{۶۰} (آرایه: (2, 1)) مناسب است، برای یک حوضه با جریان موقتی در نظر گرفتن یک ذخیره توانی مجزا^{۶۱} (آرایه: (1, 0)) کافی است، برای یک ساختار با دبی‌های حداکثر شدید و مولفه جریان پایه دو ذخیره توانی و یک ذخیره آنی^{۶۲} (آرایه: (2, 2)) ممکن است مناسب باشد، یک ذخیره توانی و یک ذخیره آنی بصورت موازی^{۶۳} (آرایه: (1, 1)) در واقع یک حالت دبی حداکثر شدید از آرایه ذخیره توانی مجزا (آرایه: (1, 0)) است و دو ذخیره توانی بصورت متوالی^{۶۴} (آرایه: (2, 0)) به ندرت استفاده می‌شود که در واقع بیانگر یک حوضه است که در آن آب از یک منبع ذخیره توانی به دیگری زهکشی می‌شود (کروک و همکاران، ۲۰۰۵). برای رودخانه تراز- هرکش که مولفه دبی پایه بالایی دارد، تغذیه از آب زیرزمینی، و مولفه جریان سریع ناشی از بارش را نیز دارد. آرایه دو ذخیره توانی بصورت موازی (آرایه: (2, 1)) بهترین گزینه است که نتایج واسنجی مدل نیز این

عملکرد مدل را با بررسی عملکرد آنها از روزانه به ماهیانه بهبود بخشید. در مورد رودخانه تراز- هرکش با توجه به این موارد، ضرایب تعیین روزانه و ماهیانه، مشخص می‌شود که مدل توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی دبی از خود نشان داده است.

با این وجود ناحیه‌های خشک و نیمه‌خشک با واقعه‌های بارش شدید با تغییرپذیری مکانی بسیار بالا همراه هستند که منجر به یک پروفیل پاسخ سریع می‌شود. معمولاً کمبود ایستگاه‌های مشاهده‌ای بارش مانع از تخمین دقیق مقدار بارش و توزیع مکانی آن برای یک رویداد خاص در این ناحیه‌ها می‌شود. نکته دیگر اینکه، اگر فقط داده بارش روزانه در دسترس باشد، واسنجی مدل بارش- رواناب در گام زمانی روزانه به معنای استفاده نشدن از تمامی اطلاعات موجود در هیدروگراف است. بحث دیگر فروانی وقایع در ارتباط با واسنجی مدل در ناحیه‌های خشک و نیمه‌خشک است، بگونه‌ای که این حوضه‌ها رویدادهای دبی رودخانه کمتری نسبت به حوضه‌های با اقلیم مرطوب‌تر دارند، این به معنای نیاز به طول دوره واسنجی طولانی‌تر بمنظور کاهش عدم قطعیت پارامترهای مدل است. در غیر این صورت مقادیر پارامترها بیشتر به خطاهای داده‌ای منسوب است که عملکرد شبیه‌سازی در مقایسه با واسنجی کاهش می‌یابد (کروک و جیکمن، ۲۰۰۸).

در ارتباط با واسنجی رودخانه تراز- هرکش در فصل خشک می‌توان گفت در این دوره تغییرات نمودار شبیه‌سازی شده توسط مدل به دلیل نبود بارش بصورت یک منحنی با تغییرات اندک است (شکل ۶). در بخش صحت‌سنجی نیز مدل توانایی قابل قبولی را نشان می‌دهد. با این حال به دلیل اینکه فقط یک روز از هر ماه در نظر گرفته شده است، نتایج می‌توانست برای دوره صحت‌سنجی بسیار بهتر هم باشد (شکل ۷). با توجه به اینکه مدل به طول دوره واسنجی حساس است، بهترین دوره برای واسنجی با در نظر گرفتن بهترین مشخصه‌های آماری و همچنین بهترین انطباق با داده‌های مشاهده‌ای دوره صحت‌سنجی انتخاب شده است.

59 - Store configuration

60 - 2 Exponential Stores in Parallel

61 - Single Exponential Store

62 - 2 Exponential Store and Instantaneous Store in Parallel

63 - Exponential Store and Instantaneous Store in Parallel

64 - 2 Exponential Stores in Series

را تأیید کرد بگونه‌ای که بهترین مشخصه‌های آماری برای این آرایه به دست آمد.

درواقع، مشخصه‌های ذخیره‌ای با توجه به سری زمانی بارش- جریان مشخص می‌شود ولی معمولاً یک ذخیره‌ای (حوضه موقت) و دو ذخیره‌ای موازی (شامل جریان پایه و سریع) هستند و نکته اینکه مشخصه‌های ذخیره‌ای پیچیده‌تر به ندرت نتایج بهتری ارائه می‌دهند (جیکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳).

نکته دیگر اینکه لزوماً استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر نتایج بهتری به دست نمی‌دهند. در مقایسه بین سه مدل، یک مدل مفهومی یکپارچه، یک مدل توزیعی با پیچیدگی متوسط و یک مدل توزیعی بسیار پیچیده، که برای سه حوضه از آفریقا با مساحت حدود ۲۵۴ تا ۱۰۴۰ کیلومتر مربع انجام شد، رفسگارد^{۶۵} (۱۹۹۶) استفاده از مدل مفهومی یکپارچه را به عنوان ساده‌ترین و دقیق‌ترین روش توصیه و بیان کرد برای حوضه‌های خشک با داده‌های واسنجی با دسترس بهتر است این مدل انتخاب شود. درواقع، برای پیش‌بینی جریان، مدل‌های فیزیکی هیچ مزیتی بر مدل‌های مفهومی ندارند و حتی شامل ایرادهای محاسبه‌ای نیز می‌باشند (جیکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳).

جمع‌بندی

علیرغم اینکه مجموعه داده NEX-GDDP واسنجی و حتی صحت‌سنجی نیز شده اند، در مقیاس محلی، یعنی در حد ایستگاه لالی، نیز به منظور اطمینان بیشتر صحت‌سنجی شدند. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که مجموعه داده NEX-GDDP می‌تواند برای گستره لالی با دقت مناسب به کار رود. در مورد بارش با توجه به R^2 حدود ۰/۸۹ و در مورد دمای کمینه و بیشینه با توجه به R^2 حدود یک انطباق نزدیکی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. میانگین بارش برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۲۸/۶۶، ۲۷/۴۱ و

۲۷ میلی‌متر در ماه است. اختلاف بارش ماهیانه دوره آتی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 از دوره پایه بطور میانگین به ترتیب حدود ۱/۲۵- و ۱/۶۶- میلی‌متر است. دمای کمینه میانگین سالیانه برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۱۴/۱۸، ۱۵/۹۸ و ۱۶/۳۱ درجه سلسیوس و دمای بیشینه میانگین سالیانه نیز برای دوره پایه، دوره آتی با سناریوی RCP4.5 و دوره آتی با سناریوی RCP8.5 به ترتیب برابر با ۲۹/۶۲، ۳۱/۶۵ و ۳۱/۹۴ درجه سلسیوس است. متغیرهای دمای کمینه و بیشینه نسبت به بارش دقت بالاتری را نشان می‌دهند که علت آن مشکل بودن شبیه‌سازی بارش و غیرخطی بودن آن در مقایسه با دما است. دمای کمینه و بیشینه در دوره آتی در مقایسه با دوره پایه افزایش و بارش کاهش می‌یابد. در دوره آتی با سناریوی RCP8.5 درمقایسه با سناریوی RCP4.5 بارش کمتر و دمای بیشتری را نشان می‌دهد. کاهش بارش برای دوره آتی در مقایسه با دوره پایه بیشتر برای ماه‌های سرد سال رخ می‌دهد. بارش حتی برای برخی ماه‌های گرم به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. افزایش دما برای ماه‌های گرم سال افزایش بیشتری در دوره آتی در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد. نتایج مدل IHACRES با توجه به مشخصه‌های آماری ($\text{Bias} = -1.53\text{mm/year}$, $\text{Rel. Bias} = -0.02$, $R^2 = 0.60$, $R^2_{\text{sqrt}} = 0.69$, $R^2_{\text{log}} = 0.73$, $R^2_{\text{inv}} = 0.90$, $\text{Monthly } R^2 = 0.73$) بیانگر توانایی این مدل در شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رودخانه تراز- هرکش است. آبدهی این رودخانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد و در دوره آتی نیز با در نظر گرفتن سناریوی RCP8.5 نسبت به RCP4.5 آبدهی کاهش بیشتری نشان می‌دهد. به گونه‌ای که متوسط دبی برای دوره پایه، دوره آتی با RCP4.5 و دوره آتی با RCP8.5 به ترتیب ۳۴۰، ۳۰۴ و ۲۹۶ لیتر در ثانیه است.

تشکر و قدردانی

از سازمان هواشناسی کشور و مدیریت مطالعات پایه

- T. and Lund, J., 2015, Water and climate: recognize anthropogenic drought, *Nature*, 524, 409-411.
- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H. and Svoboda, M., 2016, Centennial drought outlook over the CONUS using NASA-NEX downscaled climate ensemble, *Climatology*, 37(5), 2477-2491.
- Bao, Y. and Wen, X. Y., 2017, Projection of China's near-and long-term climate in a new high-resolution daily downscaled dataset NEX-GDDP, *Meteorological Research*, 31, 236-249.
- Bevens, K., 1989, Changing ideas in hydrology- the case of physically-based models, *Hydrology*, 105, 157-172.
- Box, G. E. P. and Jenkins, G. M., 1976, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco.
- Croke, B. F. W. and Jakeman, A. J., 2008, Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions, In: Wheeler, H. S., Sorooshian, S. and Sharma, K. D. (Eds.), *Hydrological Modelling in Arid and Semi-arid Areas*, Cambridge University Press, Cambridge, 41-48.
- Croke, B. F. W., Andrews, F., Spate, J. and Cuddy, S. M., 2005, *IHACRES user's guide*, Technical report 2005/19, Second edition. iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra.
- Donnelly, M. A. P., Marcantonio, M., Melton, F. S. and Barker, C. M., 2016, Mapping past, present, and future climatic suitability for invasive *Aedes Aegypti* and *Aedes Albopictus* in the United States: a process-based modeling approach using CMIP5 downscaled climate scenarios, *American Geophysical Union Publication*, Conference paper.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C., 2007, Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling, *Climatology*, 27, 1547-1578.
- Huo-Po, C., Jian-Qi S. and Hui-Xin L., 2017, Future changes in precipitation extremes over China using the NEX-GDDP high-resolution daily downscaled dataset, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 10(6), 403-410.
- IPCC, 2014, *Climate change 2014: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, In: Pachauri, R. K. and Meyer, L. A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jakeman A. J. and Hornberger G. M. 1993, How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research*, 29, 2637-2649.
- Jakeman, A. J., Littlewood, I. G. and Whitehead, P. G., 1990, Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments, *Hydrology*, 117, 275-300.

سازمان آب و برق خوزستان به دلیل در اختیار قرار دادن آمار و اطلاعات صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

مراجع

- انصاری، ث.، مساح‌بوانی، ع. و روزبهانی، ع.، ۱۳۹۵، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت سفیددشت)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰(۲)، ۴۳۱-۴۱۶.
- حمیدیان پور، م.، باعقیده، م. و عباس‌نیا، م.، ۱۳۹۵، ارزیابی تغییرات دما و بارش جنوب‌شرق ایران با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های مختلف گردش عمومی جو در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۱، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، بهار ۱۳۹۵، ۴۸(۱)، ۱۰۷-۱۲۳.
- خسروی، م.، اسمعیل‌زاد، م. و نظری‌پور، ح.، ۱۳۸۹، تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب خاورمیانه، چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، زاهدان.
- سادات‌آشفته، پ. و مساح‌بوانی، ع.، ۱۳۸۶، تأثیر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی سیلاب در دوره‌های آتی مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲۴ بهمن ماه ۱۳۸۶، ۴۷-۳۱.
- سادات‌آشفته، پ. و مساح‌بوانی، ع.، ۱۳۸۸، تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب مطالعه موردی حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، تحقیقات منابع آب ایران، ۵(۲)، ۳۹-۲۷.
- سادات‌آشفته، پ. و مساح‌بوانی، ع.، ۱۳۹۱، بررسی تأثیر عدم قطعیت مدل‌های چرخه عمومی جو و اقیانوس و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای بر رواناب حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم، مطالعه موردی: حوضه قرقنو، آذربایجان شرقی، تحقیقات منابع آب ایران، پائیز ۱۳۹۱، ۸(۲)، ۴۷-۳۶.
- سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶، داده‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی لالی، به صورت فایل اکسل.
- سلامی، ه.، انصاری، ح. ر. و مساح‌بوانی، ع.، ۱۳۹۴، پیش‌بینی احتمالاتی اثرهای تغییر اقلیم بر آبخیز ابرفتی دشت همدان- بهار، مدیریت آب و آبیاری، بهار و تابستان ۱۳۹۴، ۵(۱)، ۴۱-۲۷.
- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۴۵، نقشه زمین‌شناسی برگه لالی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- عطایی، ه.، پولادی، ر. و فنائی، ر.، ۱۳۹۵، بررسی آماری-همدیدی توفان‌های تندری استان خوزستان. اولین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های زیست محیطی ایران، راهکارها و چالش‌ها، اردبیل، شرکت کیان طرح دانش، مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد، ۱۶-۱.
- قاسمی، ا.، فتاحی، ا. و بابائی، ا.، ۱۳۹۲، تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب با رویکرد عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، پائیز ۱۳۹۲، ۴(۱۳)، ۵۳-۳۷.
- محمدی، ب. و مسعودیان، ا.، ۱۳۸۹، تحلیل هم‌دید بارش‌های سنگین ایران مطالعه موردی: آبان ماه ۱۳۷۳، جغرافیا و توسعه، ۱۹، ۷۰-۴۷.
- محمدی، ح.، فتاحی، ا.، شمسی‌پور، ع. ا. و اکبری، م.، ۱۳۹۱، تحلیل دینامیکی سامانه‌های سودانی و رخداد بارش‌های سنگین در جنوب‌غرب ایران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، بهار ۱۳۹۱، ۱۲(۲۴)، ۷-۲۴.
- مسعودیان، ا. و محمدی، ب.، ۱۳۸۹، تحلیل فراوانی تابع همگرایی شار رطوبت در زمان رخداد بارش‌های ابرسنگین ایران، چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، زاهدان، ایران، فروردین ۱۳۸۹، ۱۷-۱.
- Aghakouchak, A., Feldman, D., Hoerling, M., Huxman,

- York, **1**(46), 423-445.
- Sheffield, J., Goteti, G. and Wood, E. F., 2006, Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling, *Climate*, **19**(13), 3088-3111.
- Singh, V. P., 1995, *Computer Models of Watershed Hydrology*, Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.
- Taylor, K. E., Ronald, J. S. and Gerald, A. M., 2012, An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bulletin of American Meteorology Society*, **93**, 485-498.
- Tegegne, G., Park, D. K. and Kim, Y. O., 2017, Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin, *Hydrology: Regional Studies*, **14**, 49-66.
- Thrasher, B. and Nemani, R., 2015, Technical Note: NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP).
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C. and Duffy, P. B., 2012, Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping, *Hydrology and Earth System Sciences*, **16**(9), 3309-3314.
- Thrasher, B., Xiong, J., Wang, W. L., Melton, F., Michaelis, A. and Nemani, R., 2013, Downscaled Climate Projections Suitable for Resource Management, *Eos Transactions American Geophysical Union*, **94**, 321-323.
- Trotochaud, J., Flanagan, D. C. and Engel, B. A., 2016, A simple technique for obtaining future climate data inputs for natural resource models, *Applied Engineering in Agriculture*, **32**(3), 371-381.
- Wilby, R. L., Charles, S. P. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P. and Mearns, L. O. O., 2004, Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods, Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCI.
- Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A. and Lettenmaier, D. P., 2002, Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *Geophysical Research: Atmospheres*, **107**(20): 1-15.
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D. P., 2004, Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Climatic Change*, **15**, 189-216.
- Ye, W., Bates, B. C., Viney, N. R., Sivapalan, M. and Jakeman, A. J., 1997, Performance of Conceptual Rainfall-Runoff Models in Low-Yielding Ephemeral Catchments, *Water Resources Research*, **33**(1), 153-166.
- Jia, S., Zhu, W., Lu, A. and Yan, T., 2011, A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China, *Remote Sensing of Environment*, **115**, 3069-3079.
- Jones, P. G. and Thornton, P. K., 2013, Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modeling applications, *Agricultural System*, **114**, 1-5.
- Jothityangkoon, C., Sivapalan, M. and Farmer, D. L., 2001, Process controls of water balance variability in a large semi-arid catchment: downward approach to hydrological model development, *Hydrology*, **254**, 174-198.
- Krause, P., Boyle, D. P. and Base, F., 2005, Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, *Advances in Geosciences*, **5**, 89-97.
- Littlewood, I. G. and Jakeman, A. J., 1994, A new method of rainfall-runoff modelling and its applications in catchment hydrology, *Environmental Modelling*, **2**, 142-171.
- Madani, K., Aghakouchak, A., Mirchi, A., 2016, Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation, *Iranian Studies*, **49**, 997-1016.
- Maurer, E. P. and Hidalgo, H. G., 2008, Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods, *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**, 551-563.
- Mehran, A., Mazdizasni, O., Aghakouchak, A., 2015, A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: linking climate variability, local resilience, and demand, *Geophysical Research Atmospheres*, **120**, 7520-7533.
- Meinshausen, M. S. J., Smith, K., Calvin, J. S., Daniel, M. L. T., Kainuma, M. and et al., 2011, The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300, *Climate Change*, **109**, 213-241.
- Mengistu, K. T., 2009, Watershed hydrological responses to changes in land use and land cover, and management practices at Hare Watershed, Ethiopia, M.Sc. thesis, University of Siegen, Germany.
- Naderi, M. and Raeisi, E., 2015, Climate change in a region with altitude differences and with precipitation from various sources, South-Central Iran, *Theor. Appl. Climatol.*, 1-15.
- Refsgaard, J. C., 1996. Model and data requirements for simulation of runoff and land surface processes in relation to global circulation models. Global environmental change and land surface processes in hydrology: the trial and tribulations of modelling and measuring, In: Sorooshian, S., Gupta, H. and Rodda, J. (Eds.), NATO ASI, Springer-Verlag, New

Simulation of Taraz-Harkesh River's Flow, Khouzestan Province, Under Climate Change with NEX-GDDP Data Set and IHACRES Rainfall-Runoff Model

Nejat Zeydalinejad¹, Hamid Reza Nassery^{2,*}, Alireza Shakiba³, Farshad Alijani⁴

¹ Ph.D. student of hydrogeology, Department of Minerals and Groundwater Resources, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

² Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

³ Associate professor, GIS and Remote Sensing Studies Center, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

⁴ Assistant professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author Email: h-nassery@sbu.ac.ir

Received: 11 March 2019 , accepted: 14 May 2019

ABSTRACT

Learning and utilizing the downscaling approaches in the climate change studies, considering the continuous updates, inappropriate output formats of the most procedures, and inaccessibility of observation data for some synoptic stations, are time-consuming and burdensome. However, NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) data set has been developed for 21 General Circulation Models (GCMs) under two Representative Concentration Pathways (RCPs), i.e. RCP4.5 and RCP8.5, with the spatial resolution of 625 Km². In this study, firstly, precipitation, and minimum and maximum temperatures data were extracted from the data set for Lali region, Khouzestan Province, for the present (1961-1990) and future (2021-2050) time periods. Secondly, the climatic data were verified by the observation data. Thirdly, the discharge rates of Taraz-Harkesh river were simulated by IHACRES rainfall-runoff model. Results demonstrated the average precipitation would be 28.66, 27.41 and 27 mm/month and the average temperature would be 14.18, 15.98 and 16.31°C both for the present, future under RCP4.5 and future under RCP8.5 time periods, respectively. Furthermore, results depicted the ability of the rainfall-runoff model in simulating the river's discharge rates with R²=0.6 and monthly R²=0.9 for the calibration time period and R²=0.51 for the verification time period, which is due to the observations being obtained for one day over the month. Finally, the river's discharge rates were simulated as 340, 304 and 295 l/s for the present, future under RCP4.5 and future under RCP8.5 time periods, respectively.

Keywords: NEX-GDDP, climate change, IHACRES, Taraz-Harkesh River

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Zeydalinejad, N.; Nassery, H.R.; Shakiba, A.R.; Alijani, F. (2019). Simulation of Taraz-Harkesh River's Flow, Khouzestan Province, Under Climate Change with NEX-GDDP Data Set and IHACRES Rainfall-Runoff Model. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 2(2): 162-178

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

