

## مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره هفتم، شماره بیستم و پنجم، پاییز ۱۳۹۵

تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۷/۱۸

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

صص ۷۶-۹۴

### ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa با رویکرد احتمالاتی و تحلیل عدم قطعیت (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی رود زرد واقع در استان خوزستان)

حدیثه خدابخش‌ی سورشجانی\*، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب - دانشگاه شهرکرد

رسول میرعباسی نجف‌آبادی، استادیار گروه مهندسی آب - دانشگاه شهرکرد

محمدعلی نصر اصفهانی، استادیار گروه مهندسی آب - دانشگاه شهرکرد

رضا زمانی، دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب - دانشگاه شهید چمران اهواز

#### چکیده

مطالعه‌ی حاضر، به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه‌ی رود زرد واقع در استان خوزستان پرداخته است. در این مطالعه، از ترکیب ۱۴ مدل گردش عمومی تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌ی آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) نسبت به دوره‌ی پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) استفاده شده است. از یک رویکرد وزنی میانگین دما و بارش مشاهده‌ای برای ترکیب مدل‌های GCM استفاده گردید، همچنین روش ترکیبی، عامل تغییر (CF) و مدل LARS\_WG برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها و مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa برای شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب در شرایط پایه (۱۹۹۷-۱۹۹۱) و آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) به کار گرفته شده است. نتایج، نشان‌دهنده‌ی عملکرد قابل قبول مدل WetSpa در شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب است. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارندگی سالانه در دوره - ی آتی حاکی از انتظار افزایش دما و کاهش بارندگی به میزان  $1/51$  ( $1/3$ ) درجه‌ی سانتی‌گراد و  $7/17$  ( $4/62$ ) درصد به ترتیب تحت حالت متوسط سناریوی انتشار A2 (B1) است؛ علاوه بر این، نتایج حاصل از بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب، حاکی از کاهش رواناب سالانه به میزان  $14/53$  ( $12/36$ ) درصد تحت حالت متوسط سناریوی انتشار A2 (B1) است. این نتایج با تغییرات افزایشی دما و کاهش بارش تطابق دارد. نتایج این مطالعه می‌تواند در مدیریت منابع آب حوضه‌ی رود زرد و تخصیص بهینه از سد جره که در خروجی حوضه قرار دارد، مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: مدل‌های GCM، LARS-WG، مدل بارش - رواناب، WetSpa، آنالیز عدم قطعیت.

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد می‌باشد.

\* Email: Hkhodabakhshi93@gmail.com

نویسنده‌ی مسئول:

## ۱- مقدمه

تغییرات رفتار اقلیمی یک منطقه را در مقایسه با رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت منطقه از اطلاعات ثبت شده و مشاهده شده انتظار می رود تغییر اقلیم می نامند. امروزه موضوع تغییر اقلیم به دلیل پیامدهای زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی، یکی از مهم ترین چالش های قرن حاضر تبدیل شده است (IPCC, 2001 و 2007). به دلیل اهمیت تأثیر این پیامدها در برنامه ریزی های کلان یک کشور، دغدغه ی زیادی در بین محققان برای بررسی وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تأثیرگذاری آن بر منابع مختلف و تحلیل علمی آن ایجاد کرده است. یکی از این موضوعات، تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و منابع آب است. هدف از انجام این مطالعه، بررسی احتمالاتی اثر تغییر اقلیم بر رواناب با تحلیل عدم قطعیت در حوضه ی آبخیز رود زرد واقع در استان خوزستان است. در این مطالعه، از ترکیب ۱۴ مدل اقلیمی گردش عمومی (GCM) تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 برای شبیه سازی متغیرهای اقلیمی در دوره ی آتی (2025-2054) نسبت به دوره ی پایه (1971-2000) استفاده شده است. همچنین روش وزن دهی (MOTP) برای استفاده ی ترکیبی مدل های گردش عمومی، روش ترکیبی عامل تغییر (CF) و مدل LARS\_WG<sup>۴</sup> برای ریزمقیاس سازی و مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa<sup>۵</sup> به منظور شبیه سازی بارش - رواناب کار گرفته شده است.

با توجه به ضرورت و اهمیت تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر جنبه های مختلف زندگی، به خصوص بر منابع آبی در سال های آتی، مطالعات بسیاری در سال های اخیر در این زمینه انجام گرفته است که به برخی از آن ها اشاره می شود. ماجون<sup>۶</sup> و همکاران (2012: 1-18) در مطالعه ای به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه ی رودخانه گالگو در اسپانیا پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش میانگین دمای سالانه بیش تر از ۳ درجه ی سانتی گراد و کاهش بارش سالانه و کاهش مقدار آب قابل دسترس برای آبیاری و تولید برقی است. همچنین نتایج مطالعه لی<sup>۷</sup> و همکاران (2014: 517-526) که به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در منطقه ای واقع در جنوب شرقی فلات تبت پرداختند، نشان داد که رواناب در دوره های آتی با افزایش پیش بینی شده است. همچنین مطالعه دهال<sup>۸</sup> و همکاران (2016: 17-1) در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه ی باگماتی در نپال نشان از افزایش بارش سالانه دارد؛ به گونه ای که بیش ترین میزان بارش در تابستان (بارش های موسمی) متمرکز است. در مطالعه ی دیگر آشفته و بزرگ حداد (1392: 37-52) به ارائه ی رویکرد احتمالاتی ارزیابی آثار تغییر آب و هوا بر بدهی رود ایدوغموش آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از کاهش متوسط رواناب سالانه در دوره های آتی نسبت به دوره ی پایه، کاهش جریان های متوسط و زیاد و همچنین افزایش حجم کل رواناب در جریان های کم است. علاوه بر این، در این مطالعه همبستگی گروه زمانی با استفاده از احتمال انتقال جریان نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل، نشان از پایین بودن ضریب همبستگی و بالا بودن شاخص های خطا داشت. قاسمی و همکاران (1392: 37-53) به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب با رویکرد عدم قطعیت! مدل های گردش عمومی جو در حوضه ی شهرچای ارومیه پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش دما در دوره ی آتی بین 0/1 تا 2/53 درجه ی سانتی گراد و نوسانات بارش بین 34 تا 46 درصد نسبت به دوره ی پایه بوده است. همچنین تغییرات رواناب در دوره ی آتی نسبت به دوره ی پایه در فصل پاییز و زمستان افزایشی و در فصل بهار کاهش یافته است. خدیر (1394) به مطالعه ی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب

1- General Circulation Models

2- Mean Observed Temperature Precipitation

3- Change Factor

4- Long Ashton Research Station Weather

5- Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere

6- Majone

7- Li

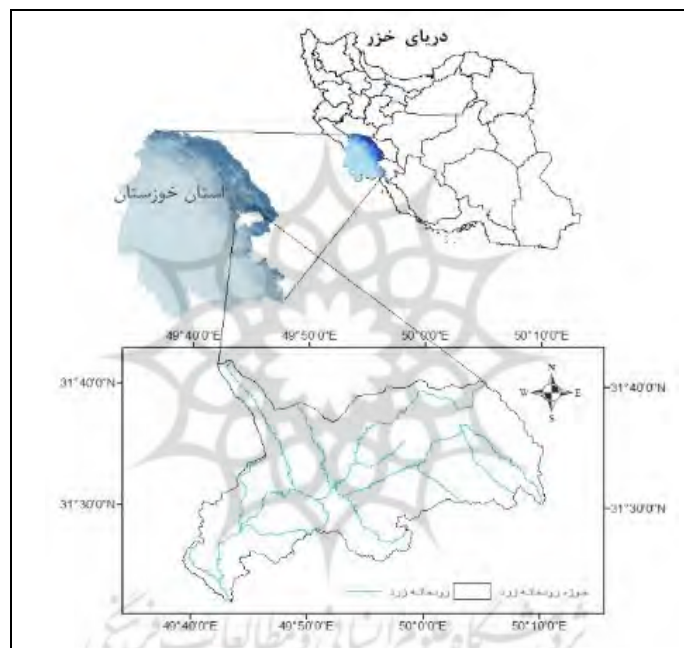
8- Dahal

حوضه‌ی آبریز تالار در استان مازندران پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد که حدود دما در فصل زمستان در دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۶۴ تا ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۸۱، ۷ الی ۹ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. هم‌چنین میانگین سالانه دبی خروجی ایستگاه تالار برای دوره‌ی آینده دور حداقل ۱ و حداکثر ۲/۸ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد. لکزائیان‌پور و همکاران (۱۳۹۵: ۱۸۳-۱۹۸) به ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه‌ی نازلوچای در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش دما، بارندگی و رواناب در دوره‌ی آتی تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 است. در مطالعه‌ی دیگر قربانی و همکاران (۱۳۹۵: ۱۹-۳۴) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند ماهانه رودخانه در حوضه‌ی آبریز گالیش پرداختند. نتایج تحلیل اقلیم آن‌ها نشان داد که در حوضه‌ی گالیش تحت سناریوهای مختلف، دمای هوا در ماه‌های مختلف سال افزایش پیدا می‌کند، اما متوسط مجموع بارش سالانه کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، مطالعات نسبتاً زیادی در زمینه‌ی استفاده از مدل WetSpa جهت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در نواحی مختلف جغرافیایی و آب و هوایی و در توپوگرافی‌های متنوع و هم‌چنین در حوضه‌های کوچک تا خیلی بزرگ انجام گرفته است. همگی این مطالعات بیانگر توانایی قابل‌قبول مدل WetSpa در شبیه‌سازی جریان اعم از سیل و یا جریان روزانه‌ی رودخانه بوده است. علاوه بر این، مدل WetSpa به محققان این امکان را داده که تأثیر عوامل مختلف مانند تغییر اقلیم و یا تغییر کاربری را بر جریان خروجی حوضه و هم‌چنین بر مؤلفه‌های بیلان آبی و پدیده‌های هیدرولوژیکی مختلف حوضه به‌صورت توزیعی بررسی نمایند. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه‌ی صفری و همکاران (۲۰۱۲: ۷۸-۸۹) در به‌کاربردن مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa در پروژه‌ای در آمریکا DMIP2<sup>۹</sup> اشاره کرد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در این حوضه بوده است. هم‌چنین در مطالعه‌ی دیگر وربرین و همکاران (۲۰۱۳: ۹۲-۱۰۲) تأثیر تغییرات و گسترش محدوده‌ی شهری بر دبی ساعتی حوضه‌ی آبریز رودخانه تولکا در کشور ایرلند را با استفاده از مدل WetSpa مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با گسترش محدوده‌ی شهری، زمان تا اوج سیلاب کاهش یافته و ضریب رواناب و دبی اوج به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. هم‌چنین مرادی‌پور و همکاران (۱۳۹۴: ۵۵-۶۴) به بررسی تولید رواناب در حوضه‌ی آبخیز طالقان با استفاده از مدل WetSpa پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی‌ها در این حوضه با ضریب نش-ساتکلیف ۸۳/۳ درصد است. آذین‌مهر و همکاران (۱۳۹۵: ۷۲-۸۲) به شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در حوضه‌ی آبریز دینور واقع در بالادست سد کرخه در استان کرمانشاه با استفاده از مدل WetSpa پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل هیدروگراف روزانه را طبق معیار نش-ساتکلیف ۶۶ درصد، با صحت قابل‌قبولی پیش‌بینی کرده است. علاوه بر این مطالعات، مطالعات متعدد دیگری در زمینه‌ی استفاده از این مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی انجام شده است؛ از جمله می‌توان به مطالعه‌ی دهقانی و همکاران (۱۳۹۲: ۲۵۳-۲۶۱) در حوضه‌ی آبخیز کسلیان، کبیر و بهره‌مند (۱۳۹۲: ۸۱-۹۷) در حوضه‌ی آبریز گرگانرود استان گلستان، نامقی و همکاران (۱۳۹۲: ۱۰۶۷-۱۰۷۶) در حوضه‌ی آبریز اترک در استان خراسان شمالی، الماسی (۱۳۹۳) در حوضه‌ی آبخیز بازفت در استان چهارمحال و بختیاری، جاویدان و بهره‌مند (۱۳۹۴: ۲۶۴-۲۳۳) در حوضه‌ی آبخیز زیارت در استان گرگان، فروتن دانش و همکاران (۱۳۹۴: ۲۰۷-۲۲۰) در حوضه‌ی آبریز زیارت استان گلستان، صادقی و همکاران (۱۳۹۴: ۲۳-۳۳) در حوضه‌ی ناورود در استان گیلان و کریمی و همکاران (۲۰۱۶) در حوضه‌ی دهنو استان لرستان اشاره کرد.

## ۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه، حوضه‌ی رودخانه‌ی زرد می‌باشد که در جنوب غرب ایران، در استان خوزستان در محدوده‌ی رشته‌کوه‌های زاگرس و در محدوده‌ی جغرافیایی  $22^{\circ}$  تا  $31^{\circ}$  عرض شمالی و  $40^{\circ}$  تا  $49^{\circ}$  طول شرقی واقع شده است. مساحت این حوضه‌ی آبخیز تا محل سدّ جره حدود ۸۱۰ کیلومترمربع است. قسمت اعظم این حوضه‌ی آبخیز کوهستانی بوده؛ به گونه‌ای که ارتفاع بلندترین نقطه‌ی این حوضه حدود ۳۳۰۰ متر و ارتفاع متوسط حوضه ۱۱۹۰ متر از سطح دریا برآورد شده است. شیب متوسط حوضه ۲۴ درصد و متوسط بارندگی سالانه در این حوضه نیز حدود ۶۶۲ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین در پایین‌دست این حوضه، سدّ مخزنی جره قرار دارد که از جمله اهداف آن می‌توان به تأمین آب موردنیاز زمین‌های کشاورزی دشت رامهرمز به وسعت حدود ۲۲ هزار هکتار، کنترل سیلاب رودخانه‌ی زرد و امکان تولید انرژی برق آبی به میزان ۴۸ گیگاوات ساعت در سال اشاره کرد. موقعیت حوضه‌ی رود زرد در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت حوضه‌ی رودخانه‌ی زرد در کشور ایران

## ۳- مواد و روش‌ها

### ۳-۱- مدل‌های GCM و تولید سناریو

از میان مدل‌های اقلیمی، معتبرترین روش جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، استفاده از مدل‌های GCM است (میچل<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۳؛ ۲۱۷-۲۴۲؛ ویلی و هریس<sup>۱۲</sup>، ۲۰۰۶؛ ۱-۱۰). در مطالعه‌ی حاضر، به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت ناشی از خروجی مدل‌های گردش عمومی، ترکیبی از ۱۴ مدل گردش عمومی (جدول ۱) تحت دو خانواده‌ی سناریوی انتشار A2 و B1 به کار گرفته شده است. موضوع محتوایی خانواده‌ی سناریو انتشار A2 تمرکز بر رشد سریع جمعیت همراه با توسعه‌ی فن‌آوری و اقتصادی کند تا سال ۲۱۰۰ می‌باشد؛ در حالی که موضوع محتوایی خانواده‌ی سناریوی انتشار B1 از لحاظ جمعیت، جمعیت جهان در اواسط قرن ۲۱ به اوج خود رسیده

11- Mitchell

12- Wilby and Harris

و بعد از آن کاهش می‌یابد و از لحاظ اقتصادی، تأکید بر پایداری اقتصاد محیط‌زیست دارد و دارای دیدگاه اقتصاد جهانی است (IPCC, ۲۰۰۷). به منظور تولید سناریوی اقلیمی، متغیرهای ماهانه اقلیمی (دما و بارش) ۱۴ مدل GCM تحت دو سناریوی مذکور برای دوره‌ی پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱ و دوره‌ی آینده ۲۰۵۴-۲۰۲۵ از مرکز توزیع داده IPCC (DDC: <http://www.ipcc-data.org>) استخراج شد. سپس به منظور حذف اغتشاشات ناشی از بزرگ بودن خروجی مدل‌های GCM در شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی، به جای استفاده‌ی مستقیم از داده‌های خروجی این مدل‌ها در محاسبات، از میانگین دوره‌ی بلندمدت این داده‌ها استفاده شد. به صورتی که برای محاسبه تغییرات میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی ماهانه برای هر یک از مدل‌ها، از مقادیر اختلاف برای مقادیر دما و نسبت برای مقادیر بارش، برای دوره‌های پایه و آینده، مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شد که در واقع این عمل همان تولید داده‌ی اقلیمی است که به این رویکرد، روش ریزمقیاس‌نمایی به روش CF نیز گفته می‌شود.

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut_i} - \bar{T}_{GCM, base_i}) \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

$$\Delta P_i = \left( \frac{\bar{P}_{GCM, fut_i}}{\bar{P}_{GCM, base_i}} \right) \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

که در روابط بالا،  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیانگر تغییرات میانگین بلندمدت دما و بارش ماهانه برای ماه  $i$  است.  $\bar{T}_{GCM, fut_i}$  و  $\bar{P}_{GCM, fut_i}$  میانگین بلندمدت بارش و دمای ماهانه برای  $i$  امین ماه، که توسط مدل‌های GCM تحت سناریوهای مذکور برای دوره‌ی آینده شبیه‌سازی شده است.  $\bar{T}_{GCM, base_i}$  و  $\bar{P}_{GCM, base_i}$  میانگین بلندمدت بارش و دمای ماهانه برای  $i$  امین ماه که توسط مدل‌های GCM تحت سناریوهای مذکور برای دوره‌ی پایه شبیه‌سازی شده است. این رویکرد توسط ویبلی و هریس (۲۰۰۶: ۱-۱۰)، مرید و مساح بوانی (۲۰۰۸: ۲۲۶-۲۳۸) و زارعیان و همکاران (۲۰۱۵: ۴۹۷-۵۱۶) به کار گرفته شده است.

جدول ۱: مشخصات ۱۴ مدل GCM از چهارمین گزارش ارزیابی IPCC (AR4)

ردیف	مدل GCM	مرکز تحقیقات	دقت شبکه (درجه)
۱	CSIRO-MK3	کشورهای مشترک‌المنافع علمی و سازمان تحقیقات صنعتی (CSIRO)	۱/۹ × ۱/۹
۲	CGCM3 (T63)	مرکز مدل‌سازی اقلیم و تجزیه و تحلیل (CCCma)	۱/۹ × ۱/۹
۳	CNRM-CM3	مرکز ملی مطالعات هواشناسی (CNRM)	۱/۹ × ۱/۹
۴	IPSL-CM4	مؤسسه‌ی (IPSL)	۲/۵ × ۳/۷۵
۵	ECHAM5-OM	مؤسسه‌ی (MPI-M)	۱/۹ × ۱/۹
۶	CCSM3	مؤسسه‌ی (NCAR)	۱/۴ × ۱/۴
۷	MRI-CGCM2.3.2	مؤسسه‌ی ملی مطالعات زیست‌محیطی (MRI)	۲/۸ × ۲/۸
۸	BCM2	مرکز (BCCR)	۱/۹ × ۱/۹
۹	INM-CM3	مؤسسه‌ی ریاضیات عددی (INM)	۴ × ۵
۱۰	HadCM3	اداره‌ی هواشناسی بریتانیا (UKMO)	۲/۵ × ۳/۷۵
۱۱	GFDL-CM2	آزمایشگاه ژئوفیزیک دینامیک سیالات (GFDL)	۲ × ۲/۵
۱۲	ECHO-G	مؤسسه‌ی (MIUB)	۳/۹ × ۳/۹
۱۳	GISS-E-R	مؤسسه‌ی (GISS)	۴ × ۵
۱۴	PCM	مؤسسه‌ی (NCAR)	۲/۸ × ۲/۸

## ۳-۲- وزن‌دهی مدل‌های GCM و بررسی احتمالاتی

پس از تعیین محدوده‌ی تغییرات میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی ماهانه هر یک از ۱۴ مدل GCM، به‌منظور برآورد عدم قطعیت حاصل از خروجی مدل‌های GCM از روش تابع چگالی احتمال استفاده شد. به این صورت که در این روش به هر یک از مدل‌ها با نوجه به توانایی آن مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی مشاهداتی که از تفاوت بین متغیرهای بلندمدت ماهانه شبیه‌سازی شده، در دوره‌ی پایه و مقادیر مشاهداتی در همان دوره حاصل می‌شود، وزنی تعلق می‌گیرد. به این روش میانگین دما و بارش مشاهده‌ای (MOTP) گفته می‌شود که از رابطه‌ی ۳ قابل محاسبه است.

$$W_{ij} = \frac{\left(\frac{1}{\Delta d_{ij}}\right)}{\sum_{j=1}^{14} \left(\frac{1}{\Delta d_{ij}}\right)} \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

که در آن،  $W_{ij}$  وزن‌ز امین مدل GCM در ماه  $i$  ام است و  $\Delta d_{ij}$  تفاوت بین میانگین دما یا بارش شبیه‌سازی توسط  $j$  امین مدل GCM در  $i$  ام ماه در دوره‌ی پایه با مقدار مشاهده‌ای در همان دوره است (گوهری و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۰۵-۴۱۹). پس از تعیین وزن‌های مربوط به عملکرد مدل‌های GCM، به‌منظور تحلیل عدم قطعیت، از مقادیر تغییرات میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی ماهانه ( $\Delta P_i$  و  $\Delta T_i$ ) هر یک از ۱۴ مدل GCM و وزن‌های متناظر هر یک از این مدل‌ها به‌منظور ساخت تابع چگالی احتمال (PDF) برای هر ماه استفاده شد. سپس، مطابق با مطالعات مشابهی نظیر توپچابین و سایرت<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۲: ۱۲-۲۹) و گوهری و همکاران (۲۰۱۳: ۴۰۵-۴۱۹) از تابع توزیع گامای دو پارامتری برای تبدیل تابع چگالی احتمال به تابع توزیع تجمعی انتخاب شد. تابع توزیع گامای دو پارامتری به‌صورت رابطه‌های ۴ و ۵ تعریف می‌شود:

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(k)b^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{b}} \quad x \geq 0 \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} e^{-x} dx \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

که در آن،  $x$  متغیر،  $k$  و  $b$  به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس هستند و  $k$  برابر است با تابع گاما است. قابل ذکر است که پارامترهای تابع توزیع گاما (مقادیر  $k$  و  $b$ ) به‌گونه‌ای تعیین شدند که بهترین برازش بر اساس روش حداکثر درست‌نمایی با استفاده از مجموع مربعات خطا (SSE) طبق رابطه‌ی ۶ حاصل می‌شود.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

که در آن،  $y_i$  داده‌های نقطه‌ای،  $y_i^*$  برآورد تابع گاما و  $n$  تعداد نقاط داده است. در مرحله‌ی بعد، از توابع چگالی تجمعی حاصل برای هر ماه،  $\Delta P_i$  و  $\Delta T_i$  تحت سه حالت مختلف احتمالی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد استخراج شد، سپس با ترکیب  $\Delta P_i$  و  $\Delta T_i$  در سطوح احتمالاتی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد)، سه سناریوی ترکیبی ایده‌ال (IS)؛ متوسط (MS)؛ و بحرانی (CS) برای هر یک از سناریوی‌های انتشار A2 و B1 تولید شد. به‌گونه‌ای که کم‌ترین درصد در تغییرات دما به‌عنوان سناریوی ایده‌ال و بیش‌ترین تغییرات در دما به‌عنوان سناریوی بحرانی در نظر گرفته شد. در مرحله‌ی بعد داده‌های اقلیمی (دما و بارش) برای دوره‌ی آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت این شش سناریوی ترکیبی و با استفاده مدل LARS-WG تولید شدند.

- 
- 13- Teutschbein and Seibert
  - 14- Ideal scenario
  - 15- Medium scenario
  - 16- Crisis scenario

### ۳-۳- ریزمقیاس‌نمایی آماری

مدل LARS-WG یکی از روش‌های آماری محسوب می‌شود. این مدل بر اساس توابع توزیع نیمه‌تجربی شروع به پیش‌بینی سری‌های زمانی روزانه متغیرهای اقلیمی و هم‌چنین پیش‌بینی دوره‌های خشک و تر در آینده می‌کند. در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از خروجی مدل LARS-WG، ۳۰۰ سال سری زمانی روزانه برای دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) برای متغیرهای اقلیمی تولید شد و از طریق میانگین‌گیری، سری زمانی ۳۰۰ ساله به ده سری زمانی روزانه احتمالاتی ۳۰ ساله تبدیل شد و سپس مقدار متوسط روزانه‌ی هر یک از این ده سری زمانی محاسبه شد.

### ۳-۴- مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa

مدل WetSpa از جمله مدل‌های پیوسته و توزیعی بوده که باهدف پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر توسط وانگ و همکاران (۱۹۹۶: ۱۸۹-۱۹۳) در دانشگاه VUB بروکسل در بلژیک کدنویسی شده و سپس توسط دی‌اسمیت و همکاران (۲۰۰۰: ۲۹۵-۳۰۴) توسعه پیدا کرده است. این مدل با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه به‌صورت (روزانه- ساعتی) است. با استفاده از این مدل می‌توان هیدروگراف جریان را در خروجی حوضه و یا هر نقطه‌ای از حوضه که در آن جریان به هم می‌پیوندد، با گام-های زمانی متفاوت تخمین زد (دی‌اسمیت و همکاران، ۲۰۰۰: ۳۰۴-۲۹۵).

داده‌های موردنیاز این مدل را می‌توان به دودسته‌ی اطلاعات راقومی و داده‌های اقلیمی- هیدرولوژیکی تقسیم‌بندی نمود. اطلاعات راقومی شامل: مدل راقومی ارتفاع (DEM)، نقشه‌ی کاربری اراضی، نقشه‌ی بافت خاک حوضه می‌باشد که این نقشه‌ها از سازمان منابع طبیعی خوزستان تهیه شدند. داده‌های اقلیمی- هیدرولوژیکی شامل: بارندگی، دما و دبی خروجی حوضه می‌باشند که آمار و ارقام موردنیاز از سازمان آب و برق خوزستان تهیه شد.

### ۳-۵- معیارهای ارزیابی مدل WetSpa

برای ارزیابی عملکرد مدل و مقایسه‌ی نتایج از معیارهای مرسوم نظیر انحراف مدل<sup>۷</sup> (رابطه ۷)، ضریب همبستگی اصلاح شده<sup>۸</sup> (رابطه ۸) و ضریب کارایی ناش- ساتکلیف<sup>۹</sup> (رابطه ۹) استفاده گردید. هم‌چنین برای ارزیابی خوبی عملکرد مدل از معیار جمعی<sup>۱۰</sup> (رابطه ۱۰) استفاده شد. این معیار، جنبه‌های مختلف هیدروگراف شبیه‌سازی شده (شکل، اندازه و حجم) را نسبت به هیدروگراف مشاهده‌ای ارزیابی می‌کند. جدول ۲ دسته‌بندی عملکرد مدل در برازش را تحت معیار جمعی نشان می‌دهد.

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^N (X_s - X_m)}{\sum_{i=1}^N X_m} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$R_{mod} = \frac{\min\{\sigma_m, \sigma_s\}}{\max\{\sigma_m, \sigma_s\}} \times R \quad \text{رابطه ۸}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_m - X_s)^2}{\sum_{i=1}^N (X_m - \bar{X}_m)^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$AM = \frac{R_{mod} + NS + (1 - |MB|)}{3} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

17- Model Bias

18- Modified Correlation Coefficient

19- Nash-Sutcliffe Efficiency

20- Aggregated Measure

در روابط بالا،  $X_s$  داده شبیه‌سازی شده،  $X_m$  داده اندازه‌گیری شده،  $\bar{X}_m$  متوسط داده اندازه‌گیری شده،  $\sigma_m$  انحراف معیار داده اندازه‌گیری شده،  $\sigma_s$  انحراف معیار شبیه‌سازی شده،  $R$  ضریب همبستگی و  $N$  تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

جدول ۲: دسته‌بندی عملکرد مدل در برازش نتایج مدل و داده‌های مشاهداتی بر اساس معیار جمعی

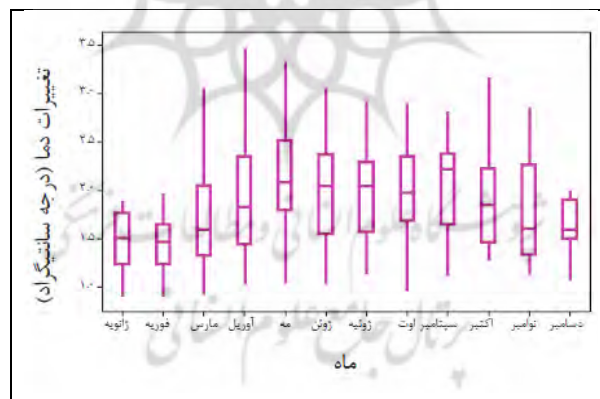
طبقه‌بندی	معیار جمعی (درصد)
عالی	$> 0/85$
خیلی خوب	$0/70 - 0/85$
خوب	$0/55 - 0/70$
ضعیف	$0/40 - 0/55$
بسیار ضعیف	$< 0/40$

منبع: (صفری و همکاران، ۲۰۱۲: ۷۸-۸۹)

#### ۴- نتایج و بحث

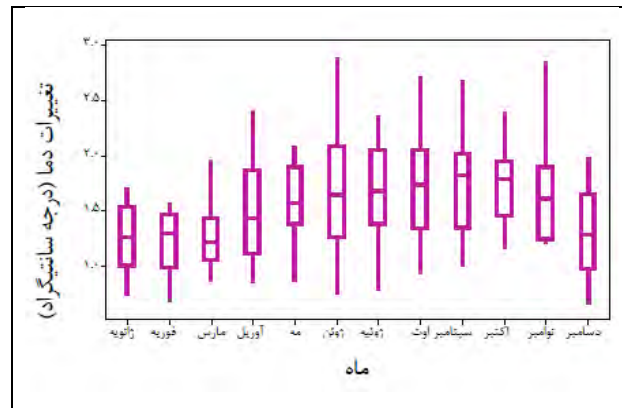
##### ۴-۱- ارزیابی نتایج حاصل از تولید سناریوهای اقلیمی

نتایج حاصل از تولید سناریوهای اقلیمی ( $\Delta Pi$  و  $\Delta Ti$ )، ۱۴ مدل GCM تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 در حوضه رود زرد برای دوره‌ی آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) نسبت به دوره‌ی پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) در شکل‌های ۲ تا ۵ ارائه شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، تمام مدل‌ها افزایش در میانگین دما، ولی با میزان متفاوت را شبیه‌سازی کرده‌اند. همچنین از لحاظ تغییرات بارندگی، در همه مدل‌ها تغییرات نامنظم (کاهش و افزایش) در ماه‌های مختلف شبیه‌سازی شده است.

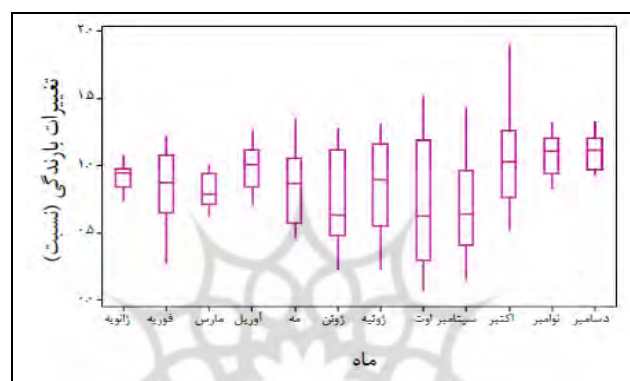


شکل ۲: تغییرات میانگین دمای ماهانه (درجه سانتی‌گراد) تحت سناریوی A2 در حوضه رود زرد





شکل ۳: تغییرات میانگین دمای ماهانه (درجه سانتی‌گراد) تحت سناریوی B1 در حوضه رود زرد



شکل ۴: تغییرات میانگین بارندگی ماهانه (نسبت) تحت سناریوی A2 در حوضه رود زرد



شکل ۵: تغییرات میانگین بارندگی ماهانه (نسبت) تحت سناریوی B1 در حوضه رود زرد

#### ۴-۲- نتایج وزن‌دهی مدل‌های GCM و بررسی احتمالاتی

قابل ذکر است که هر مدلی که وزن بیشتری به خود اختصاص دهد، به این معناست که عملکرد بهتری در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی موردنظر داشته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۳، در شبیه‌سازی متغیر بارندگی در دوره‌ی پایه مدل HadCM3 با کسب بیش‌ترین وزن در پنج ماه از سال (ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر و دسامبر) بهترین مدل از لحاظ عملکرد در حوضه‌ی رود زرد شناخته شد. هم‌چنین طبق جدول ۴، در شبیه‌سازی متغیر دما در دوره‌ی پایه مدل ECHAM5-OM با کسب بیش‌ترین وزن در شش ماه از سال (مارس، آوریل، مه، ژوئن، ژوئیه و اکتبر) بهترین عملکرد را در این حوضه داشته‌اند.

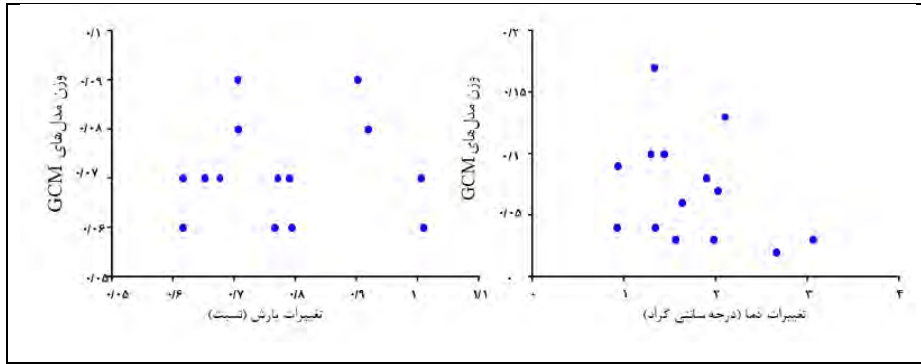
همچنین نمونه‌ای از تابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی حاصل از وزن مدل‌های GCM و سناریوهای اقلیمی ( $\Delta Pi$  و  $\Delta Ti$ ) متناظر هم‌راه در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. همچنین  $\Delta Pi$  و  $\Delta Ti$  استخراج شده از تابع توزیع تجمعی، تحت سه سطح مختلف احتمالی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد در شکل‌های ۸ تا ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۳: وزن‌های ۱۴ مدل GCM برای متغیر بارندگی در حوضه رود زرد

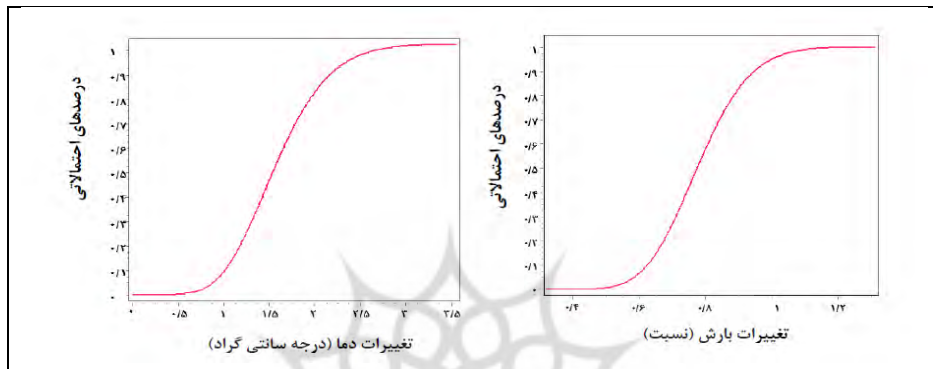
مقیاس زمانی مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
IPSL-CM4	۶/۸۵	۶/۶۷	۶/۷۷	۲/۰۳	۱۱/۲۳	۱/۶۸	۹/۱۲	۳/۴۸	۵/۱۵	۰/۹۲	۴/۰۱	۶/۲۶
MRI-CGCM2.3.2	۷/۱۲	۷/۳۴	۷/۷۵	۳/۳۷	۰/۹۵	۰/۵۶	۱/۸۱	۹/۸۸	۵/۸۸	۲/۲۵	۵/۰۹	۷/۰۷
HadCM3	۹/۲۸	۱۰/۰۹	۹/۲۳	۱۸/۱۷	۲/۶۸	۱/۱۶	۱۰/۱۴	۳/۵۰	۵/۲۷	۱/۵۳	۳۱/۷۹	۱۱/۲۳
CSIRO-MK3	۷/۵۷	۶/۸۹	۶/۸۲	۶/۷۸	۱۵/۰۵	۱/۶۳	۱۰/۴۸	۳/۵۰	۵/۰۵	۱/۸۶	۵/۵۸	۷/۲۴
PCM	۶/۳۰	۶/۱۸	۵/۸۹	۱/۸۴	۵/۱۷	۲۳/۲۰	۹/۷۲	۳/۵۳	۵/۲۸	۰/۷۴	۳/۸۹	۶/۴۴
CNRM-CM3	۷/۲۴	۷/۶۶	۸/۱۱	۴/۱۲	۱/۰۱	۰/۰۷	۰/۷۴	۰/۶۸	۱/۴۸	۷۲/۸۴	۴/۷۸	۶/۸۶
BCM2	۷/۱۳	۷/۳۸	۶/۶۷	۳۴/۸۳	۲/۶۰	۰/۴۰	۱/۱۰	۴۸/۰۹	۱۰/۱۱	۱/۷۳	۱۰/۹۴	۷/۶۱
ECHAM5-OM	۷/۳۱	۶/۷۴	۷/۴۸	۲/۰۱	۴/۰۶	۳۰/۷۶	۱۳/۵۹	۳/۶۷	۵/۸۱	۱/۰۸	۵/۳۰	۷/۰۹
GISS-E-R	۶/۴۴	۶/۲۰	۵/۹۶	۱/۵۳	۴/۸۱	۷/۳۵	۱۰/۹۸	۳/۵۶	۵/۰۵	۰/۹۳	۳/۹۴	۶/۰۳
ECHO-G	۶/۴۸	۶/۴۸	۶/۳۷	۲/۱۰	۲۶/۷۳	۱/۰۱	۱۵/۳۳	۳/۷۶	۱۵/۸۸	۳/۴۲	۴/۴۵	۶/۱۵
INM-CM3	۶/۳۳	۶/۳۰	۶/۳۹	۲/۱۷	۳/۴۶	۰/۳۹	۱/۵۸	۶/۳۹	۱/۷۲	۷/۹۷	۴/۰۷	۶/۱۷
CGCM3 (T63)	۷/۸۷	۷/۶۸	۸/۵۲	۱۱/۲	۰/۹۵	۰/۴۹	۳/۶۳	۴/۵۵	۸/۲۰	۰/۷۷	۶/۳۴	۸/۰۶
GFDL-CM2	۶/۶۶	۷/۵۰	۷/۴۵	۷/۹۲	۱۳/۲۲	۲۹/۰۹	۸/۹۶	۳/۵۳	۱۱/۰۸	۱/۸۹	۴/۸	۶/۳۹
CCSM3	۷/۴۳	۶/۸۹	۶/۵۹	۱/۹۱	۸/۰۸	۲/۲۳	۲/۸۲	۱/۸۷	۱۴/۰۳	۲/۰۵	۵/۰۲	۷/۴۰

جدول ۴: وزن‌های ۱۴ مدل GCM برای متغیر دما در حوضه رود زرد

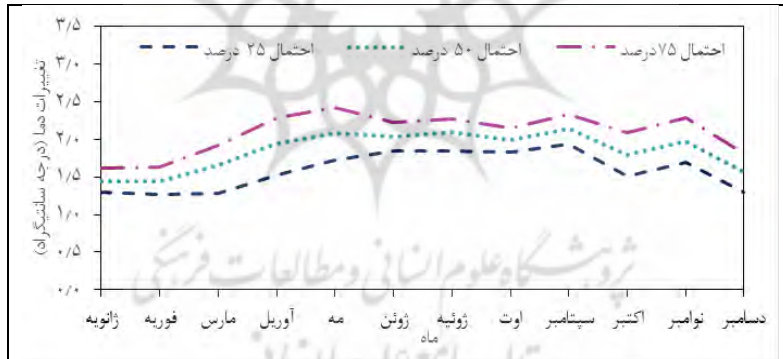
مقیاس زمانی مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
IPSL-CM4	۰/۴۲	۵/۵۶	۵/۹۵	۶/۳۳	۵/۹۰	۱/۵۸	۵/۳۳	۱۳/۸۳	۴/۷۵	۸/۳۳	۴/۳۲	۶/۶۷
MRI-CGCM2.3.2	۰/۴۶	۶/۳۴	۱۰/۲۷	۱۰/۱۹	۸/۸۵	۲۵/۱۵	۷/۰۴	۴/۲۵	۳۱/۱۲	۹/۳۱	۳/۷۳	۶/۰۳
HadCM3	۰/۳۲	۴/۲۹	۴/۴۱	۴/۴۳	۴/۵۵	۱/۶۷	۴/۵۹	۴/۴۹	۲/۳۱	۵/۳۶	۲/۲۶	۴/۲۹
CSIRO-MK3	۰/۵۰	۷/۲۷	۹/۰۴	۶/۶۷	۶/۰۴	۲/۰۵	۴/۳۹	۳/۷۵	۱/۸۷	۵/۱۰	۲/۹۰	۶/۰۳
PCM	۰/۲۲	۲/۸۸	۲/۶۹	۲/۸۵	۲/۵۸	۰/۵۱	۱/۲۵	۱/۰۸	۰/۸۳	۲/۴۳	۱/۴۹	۳/۱۹
CNRM-CM3	۰/۲۱	۲/۹۷	۳/۳۶	۳/۶۵	۳/۶۶	۰/۸۳	۲/۳۴	۱/۸۲	۱/۲۳	۲/۹۸	۱/۶	۲/۹۸
BCM2	۰/۲۲	۲/۶۲	۲/۶۹	۳/۲۲	۲/۸۵	۰/۶۹	۱/۹۲	۱/۶۱	۱/۰۲	۲/۸۲	۱/۶۴	۳/۲۹
ECHAM5-OM	۰/۶۳	۸/۹۴	۱۷/۳۶	۲۰/۲۶	۲۷/۴	۵۳/۷۶	۳۲/۰۸	۲۶/۳۴	۲۱/۸	۲۰/۴۲	۷/۰۷	۸/۵۰
GISS-E-R	۹۴/۸۶	۳۱	۹/۶۹	۱۰/۱۶	۵/۳۹	۰/۵۹	۱/۳۳	۰/۹۸	۰/۹۸	۵/۵۳	۵۸/۵۲	۲۹/۶۸
ECHO-G	۰/۴۸	۶/۵۵	۸/۰۵	۸/۴۲	۷/۰۸	۲	۴/۸۳	۴/۶۰	۳/۰۵	۹/۱۲	۴/۶۵	۷/۱۸
INM-CM3	۰/۳۴	۴/۱۱	۳/۶۲	۳/۳۸	۲/۸۵	۰/۵۱	۱/۱۶	۱/۰۱	۰/۷۸	۲/۶۶	۱/۸۸	۴/۲۰
CGCM3 (T63)	۰/۲۲	۲/۷۹	۲/۳۲	۲/۵۹	۲/۶۳	۰/۷۱	۱/۹۴	۱/۶۲	۰/۹۸	۲/۶۶	۱/۵۴	۳/۰۸
GFDL-CM2	۰/۵۹	۸/۱۸	۱۳/۱۷	۹/۸۲	۹/۱۵	۴/۷۲	۲۰/۴۶	۷/۲۹	۲۳/۶۵	۱۳/۷۶	۴/۱۵	۷/۳۷
CCSM3	۰/۵۳	۶/۵۱	۷/۳۷	۸/۰۴	۱۱/۰۷	۵/۲۴	۱۱/۳۳	۲۷/۳۴	۵/۶۳	۹/۵۰	۴/۲۴	۷/۴۹



شکل ۶: PDF گسسته مقادیر  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  هر یک از ۱۴ مدل GCM در مقابل وزن‌های متناظر آن‌ها (مارس)



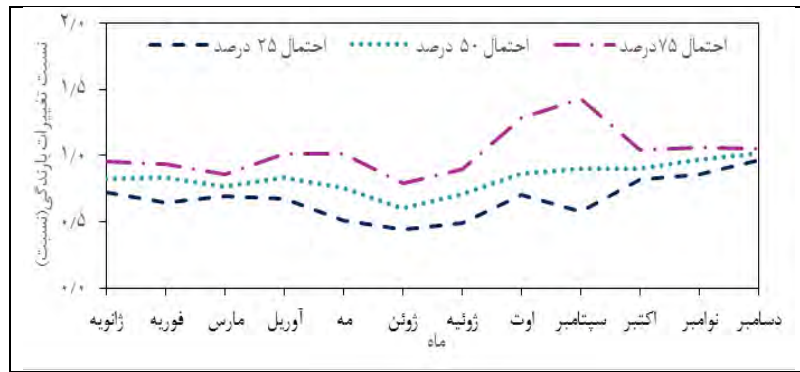
شکل ۷: CDF توسعه یافته از PDF متناظر آن (مارس)



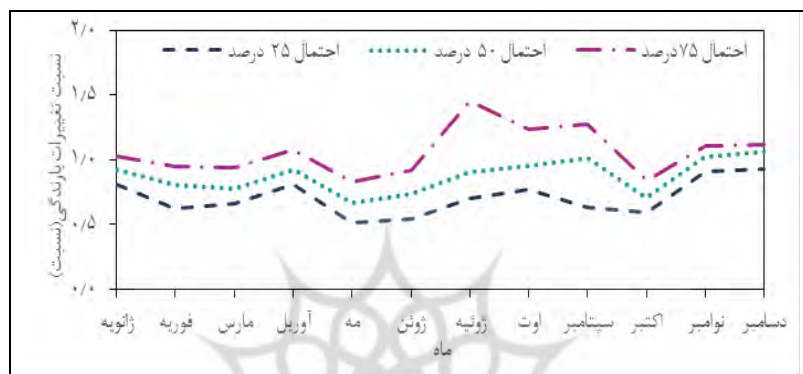
شکل ۸: تغییرات دمای ماهانه تحت سطوح احتمالاتی مختلف سناریوی A2



شکل ۹: تغییرات دمای ماهانه تحت سطوح احتمالاتی مختلف سناریوی B1



شکل ۱۰: تغییرات بارندگی ماهانه تحت سطوح احتمالاتی مختلف سناریوی A2



شکل ۱۱: تغییرات بارندگی ماهانه تحت سطوح احتمالاتی مختلف سناریوی B1

### ۳-۴- ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی

نتایج تغییرات دما و بارش فصلی و سالانه حاصل از سناریوهای اقلیمی ترکیبی در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل، تغییرات میانگین دمای فصلی و سالانه در هر دو سناریوی انتشار A2 و B1 در دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) افزایشی است؛ به‌گونه‌ای که میزان افزایش دمای فصلی و سالانه در سناریوهای اقلیمی ترکیبی A2 بیش از سناریوی B1 بوده است. هم‌چنین در هر سه سناریوی اقلیمی ترکیبی A2 و B1 بیش‌ترین افزایش دما در فصول تابستان و پاییز پیش‌بینی شده است. به‌عنوان نمونه، در سه سناریوی ترکیبی (MS، CS، IS) تحت سناریوی اقلیمی A2 انتظار بیش‌ترین افزایش دما در فصول پاییز (تابستان) به ترتیب به میزان ۲/۴۶ (۲/۰۵) و ۲/۲۶ (۲/۰۳) و ۲/۰۷ (۱/۷۴) درجه سانتی‌گراد است. هم‌چنین اگر حالت متوسط (MS) سناریوی اقلیمی (B1) A2 به‌عنوان حالتی در نظر گرفته شود که احتمال وقوع آن در شرایط واقعی بیش‌تر باشد، در نتیجه انتظار تغییرات افزایشی دمای سالانه تحت این حالت سناریو به میزان ۱/۵ (۱/۶۸) درجه‌ی سانتی‌گراد است. هم‌چنین طبق نتایج جدول ۶، تغییرات بارش در هر دو سناریوی انتشار A2 و B1 در فصول مختلف متفاوت است و در برخی از فصول افزایشی و در برخی فصول کاهش‌ی است؛ به‌گونه‌ای که طبق نتایج به‌دست‌آمده در همه‌ی سناریوهای اقلیمی ترکیبی A2 و B1، بیش‌ترین کاهش بارش در فصل پاییز و زمستان پیش‌بینی شده است. اگرچه طبق جدول ۶ بیش‌ترین درصد تغییرات کاهش‌ی مربوط به فصل تابستان است، اما در این منطقه، بارش تابستانی کم است و تغییرات کم نیز موجب بالا رفتن درصد تغییرات نیز خواهد شد. هم‌چنین تغییرات سالانه‌ی بارش تحت سناریوی انتشار A2 (B1) برای حالت سناریوی ایده‌آل افزایش ۰/۴ (۴/۲۱) درصدی پیش‌بینی شده است، درحالی‌که برای حالت سناریوی متوسط و بحرانی به ترتیب کاهش ۷/۱۷ (۴/۶۲) درصدی و کاهش ۱۵/۳۳ (۱۴/۸۶) درصدی پیش‌بینی شده است.

جدول ۵: میزان تغییرات دما (درجه‌ی سانتی‌گراد) تحت سناریوهای ترکیبی در دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴)

B1			A2			سناریو مقیاس زمانی
IS	MS	CS	IS	MS	CS	
۰/۴۱	۰/۶۰	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۹۰	۱/۱۴	بهار
۱/۴۳	۱/۶۸	۱/۹۲	۱/۷۴	۲/۰۳	۲/۰۵	تابستان
۱/۹۱	۲/۱۰	۲/۲۹	۲/۰۷	۲/۲۶	۲/۴۶	پاییز
۰/۷۲	۰/۸۵	۱/۰۱	۰/۷۴	۰/۸۴	۱/۰۹	زمستان
۱/۱۲	۱/۳۰	۱/۵۰	۱/۲۹	۱/۵۱	۱/۶۸	سالانه

جدول ۶: میزان تغییرات بارندگی (درصد) تحت سناریوهای ترکیبی در دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴)

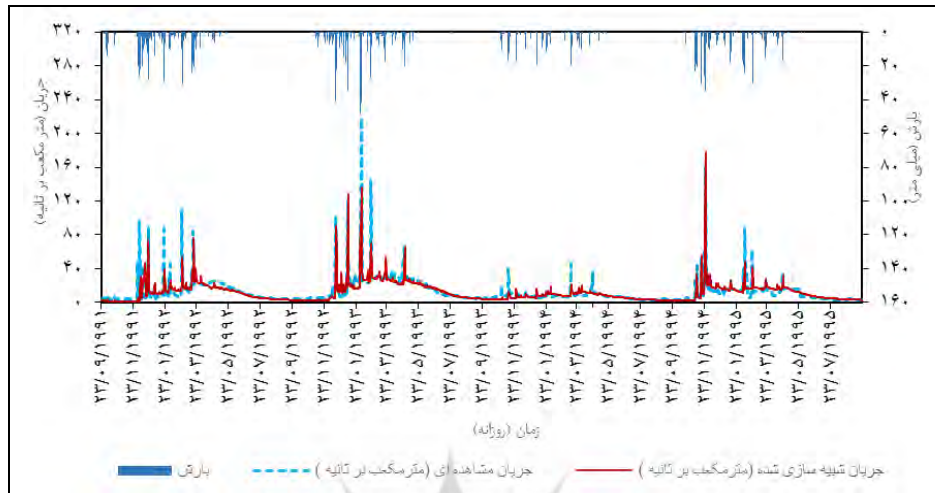
B1			A2			سناریو مقیاس زمانی
IS	MS	CS	IS	MS	CS	
۱۸/۵۴	-۰/۰۷	-۷/۲۱	۹/۵۴	-۱/۷۷	-۸/۳۲	بهار
-۶۴/۸۲	-۷۰/۴۶	-۷۵/۱۵	-۶۶/۵۶	-۷۲/۸۹	-۷۷/۸۲	تابستان
-۱۲/۷۵	-۱۸/۹۴	-۲۶/۶۶	-۱۲/۹۰	-۱۹/۳۰	-۲۵/۸۷	پاییز
۵/۱۸	-۰/۸۷	-۱۳/۱۱	۲/۱۷	-۴/۳۸	-۱۳/۶۸	زمستان
۴/۲۱	-۴/۶۲	-۱۴/۸۶	۰/۴۰	-۷/۱۷	-۱۵/۳۳	سالانه

#### ۴-۴- ارزیابی کارایی مدل WetSpa در دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی

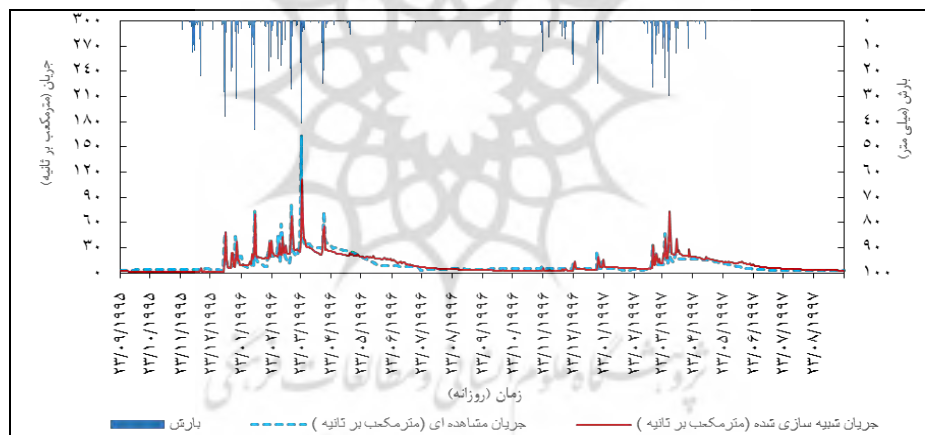
در مطالعه‌ی حاضر، به منظور اصلاح عملکرد مدل WetSpa و کاهش اثر عدم قطعیت در تعیین مقادیر پارامترهایی عمومی مدل برای شرایط حوضه‌ی مورد مطالعه، مقادیر پارامترهای عمومی مدل در محدوده‌های مجاز با قضاوت مهندسی تا رسیدن به نتایج مناسب و رضایت‌بخش واسنجی شدند؛ به گونه‌ای که دوره‌ی زمانی ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۱ تا ۲۱ سپتامبر ۱۹۹۵ به عنوان دوره‌ی واسنجی انتخاب شد. همچنین به منظور بررسی مناسب بودن پارامترهای به دست آمده در مرحله‌ی واسنجی و بررسی کارایی مدل در دوره‌ی آماری دیگر، آزمون اعتبارسنجی مدل، با در نظر گرفتن دوره‌ی آماری ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۵ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۷ انجام شد. نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی آماری مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۷ ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده، دقت شبیه‌سازی مدل بر اساس شاخص ناش- ساتکلیف به ترتیب برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی بیش از ۶۰ و ۵۰ درصد است. از طرف دیگر، معیار یکپارچگی، برای دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۷۹/۶۶ و ۷۱/۳۳ به دست آمده است که با توجه به جدول ۲ کارایی مدل در این حوضه در دسته‌ی خیلی خوب قرار گرفته است. بر این اساس می‌توان گفت مدل WetSpa برآورد خوبی از دبی اوج و حجم جریان داشته است. این یافته‌ها با نتایج صفری و همکاران (۲۰۱۲: ۷۸-۸۹) که از شاخص مذکور برای ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی استفاده کرده‌اند، مطابقت دارد؛ بنابراین به طور کلی نتایج حاکی از عملکرد خوب مدل فیزیکی- هیدرولوژیکی WetSpa در شبیه‌سازی جریان رواناب در خروجی حوضه‌ی رود زرد می‌باشد. همچنین از مقایسه‌ی هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای برای دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) نشان‌دهنده‌ی هم‌خوانی خوب بین دو هیدروگراف می‌باشند؛ به گونه‌ای که خصوصیات ویژه‌ی هیدروگراف‌ها مانند دبی پیک لحظه‌ای، زمان رسیدن به دبی اوج و حجم رواناب بین دو هیدروگراف در هر دو دوره، تطابق قابل قبولی وجود دارد.

جدول ۷: مقادیر معیارهای عملکرد مدل در دوره‌ی واسنجی (۱۹۹۱-۱۹۹۵) و اعتبارسنجی (۱۹۹۵-۱۹۹۷)

معیار ارزیابی	Bias(%)	NS(%)	R <sub>mod</sub> (%)	AM(%)
واسنجی	-۴/۷۶	۶۰/۱۱	۸۳/۶۴	۷۹/۶۶
اعتبارسنجی	۳/۳	۵۰/۴۳	۶۶/۸۸	۷۱/۳۳



شکل ۱۲: مقایسه‌ی بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده‌ی روزانه برای دوره‌ی واسنجی (۱۹۹۱-۱۹۹۵) در حوضه‌ی رود زرد



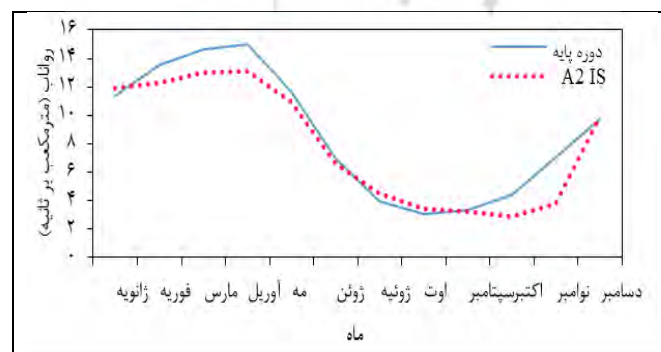
شکل ۱۳: مقایسه‌ی بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده‌ی روزانه برای دوره‌ی اعتبارسنجی (۱۹۹۵-۱۹۹۷) در حوضه‌ی رود زرد

#### ۴-۵- ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب

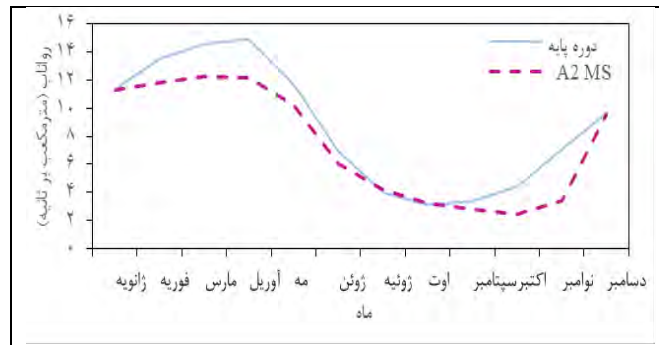
پس از عملیات واسنجی مدل WetSpa و دستیابی به مقادیر بهینه‌ی پارامترهای عمومی، مدل برای دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از سری‌های زمانی (دما، بارندگی و تبخیر) تولیدشده از مدل LARS-WG تحت سناریوهای اقلیمی ترکیبی مدل WetSpa اجرا شد و نهایتاً سری زمانی روانه‌ی رواناب در دوره‌ی آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی رواناب ماهانه تحت سناریوهای اقلیمی ترکیبی A2 و B1 در شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ ارائه شده است. تغییرات رواناب تحت حالت ایده‌آل سناریوی A2 (شکل ۱۴)، به‌غیر از ۴ ماه از سال (ژانویه، ژوئیه، اوت و دسامبر) که رواناب به میزان جزئی (۰/۴۱ مترمکعب بر ثانیه) افزایشی پیش‌بینی شده است، در بقیه‌ی ماه‌ها تغییرات رواناب کاهشی بوده است. به‌طورکلی تغییرات سالانه‌ی رواناب تحت این سناریو با کاهش ۸/۵ درصدی در دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) پیش‌بینی شده است. هم‌چنین تغییرات رواناب تحت حالت متوسط سناریوی A2 (شکل ۱۵)، به‌غیر از ۲ ماه از سال (ژوئیه و اوت) که رواناب به میزان جزئی (۰/۱۵ مترمکعب بر ثانیه) افزایشی

پیش‌بینی شده است، در بقیه‌ی ماه‌ها تغییرات رواناب کاهشی بوده و به‌طور کلی تغییرات رواناب سالانه تحت این سناریو در دوره‌ی آینده کاهش ۱۴/۵ درصدی خواهد داشت. هم‌چنین تغییرات رواناب تحت حالت بحرانی سناریوی A2 (شکل ۱۶) به‌غیر از ماه اوت که تغییراتی در رواناب مشاهده نشده است، در مابقی ماه‌ها تغییرات رواناب کاهشی پیش‌بینی شده است. به‌طور کلی رواناب سالانه تحت این سناریو در دوره‌ی آینده با کاهش ۲۰/۱۷ درصدی پیش‌بینی شده است. از طرفی تغییرات رواناب تحت حالت ایده‌آل سناریوی B1 (شکل ۱۷) به‌غیر از ۴ ماه از سال (ژانویه، ژوئیه، اوت و دسامبر) که رواناب به‌طور میانگین به میزان ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه افزایش داشته است، در بقیه‌ی ماه‌ها تغییرات رواناب کاهشی بوده و به‌طور کلی طبق نتایج حاصل تغییرات رواناب سالانه تحت این سناریو در دوره‌ی آینده با کاهش ۵/۳ درصدی پیش‌بینی شده است. هم‌چنین طبق (شکل ۱۸) تغییرات رواناب تحت حالت متوسط سناریوی B1 به‌غیر از ۴ ماه از سال (ژانویه، ژوئیه، اوت و دسامبر) که تغییرات رواناب به‌صورت افزایشی برآورد شده است (۰/۲۷ مترمکعب بر ثانیه میانگین افزایش در ۴ ماه)، در بقیه‌ی ماه‌ها تغییرات رواناب کاهشی بوده و به‌طور کلی تغییرات رواناب سالانه تحت این سناریو در دوره‌ی آینده کاهش ۱۲/۳۶ درصدی خواهد داشت. هم‌چنین تغییرات رواناب تحت حالت بحرانی سناریوی B1 (شکل ۱۹) به‌غیر از ۲ ماه از سال (ژوئیه و اوت) که تغییرات قابل‌توجهی مشاهده نشده است، در بقیه‌ی ماه‌ها تغییرات رواناب کاهشی بوده و به‌طور کلی تغییرات رواناب سالانه تحت این سناریو در دوره‌ی آینده با کاهش ۱۷/۳۶ درصدی پیش‌بینی شده است.

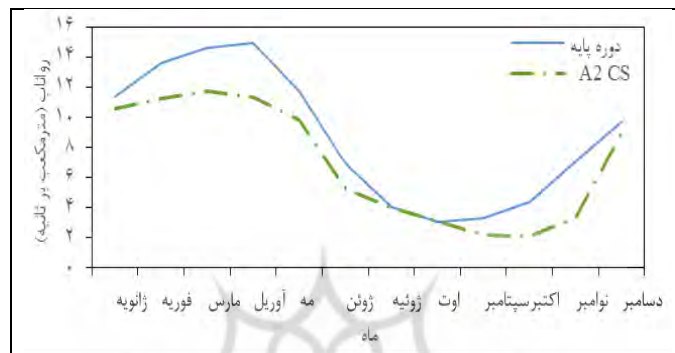
علاوه بر این، بر اساس نتایج حاصل از تغییرات فصلی رواناب (جدول ۸)، در سناریوی انتشار A2 به‌جز در سناریوی ایده‌آل (A2 IS) که در ماه تابستان تغییرات رواناب را به میزان ۳/۵ درصد افزایشی پیش‌بینی کرده است که این نتیجه با توجه به افزایش دما در این فصل و ذوب برف ناشی از آن قابل توجیه می‌باشد، در مابقی فصول و سناریوهای ترکیبی تغییرات فصلی رواناب به‌صورت کاهشی پیش‌بینی شده است؛ به‌گونه‌ای که در فصل پاییز و بهار بیش‌ترین کاهش رواناب تحت هر سه سناریوی ترکیبی MS، IS و CS پیش‌بینی شده است که این مطابق تغییرات بارندگی و افزایش دما در این فصول بوده است. هم‌چنین در سناریوی انتشار B1 به‌جز در سناریوی ایده‌آل (A2 IS) که تغییرات رواناب در فصول تابستان و زمستان، به ترتیب به میزان ۸/۲۶ و ۲/۶۵ درصد افزایشی پیش‌بینی شده است که این نتیجه با توجه به افزایش دما و ذوب ناشی از آن در ارتفاعات برای فصل تابستان و افزایش بارندگی در فصل بهار تحت این سناریو قابل توجیه است. در مابقی فصول و سناریوهای ترکیبی تغییرات فصلی رواناب به‌صورت کاهشی پیش‌بینی شده است؛ به‌گونه‌ای که بیش‌ترین کاهش رواناب نیز تحت سناریوی انتشار B1 در فصول پاییز و بهار پیش‌بینی شده است که این نتیجه نیز با تغییرات دما و بارش موجود در این فصول قابل‌انتظار است و مطابق نتایج حاصل از سناریوی A2 است با این تفاوت که میزان کاهش رواناب تحت سناریوی A2 بیش‌تر از سناریوی B1 بوده است. به‌طور کلی تغییرات سالانه‌ی رواناب تحت تمام سناریوهای اقلیمی ترکیبی به‌صورت کاهشی پیش‌بینی شده است.



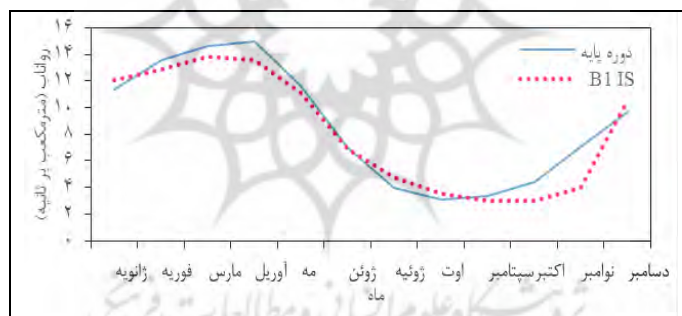
شکل ۱۴: مقایسه‌ی تغییرات رواناب ماهانه‌ی دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریوی اقلیمی ترکیبی A2 IS



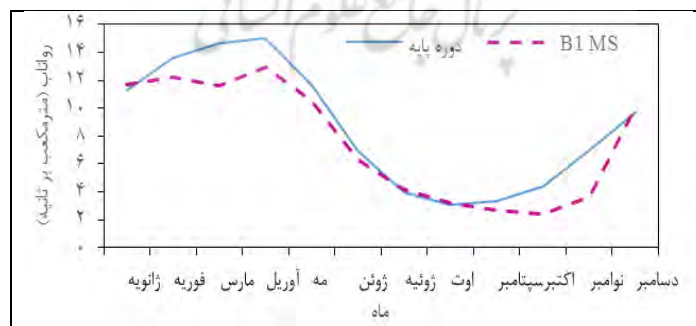
شکل ۱۵: مقایسه‌ی تغییرات رواناب ماهانه‌ی دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریوی اقلیمی ترکیبی A2 MS



شکل ۱۶: مقایسه‌ی تغییرات رواناب ماهانه‌ی دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریوی اقلیمی ترکیبی A2 CS

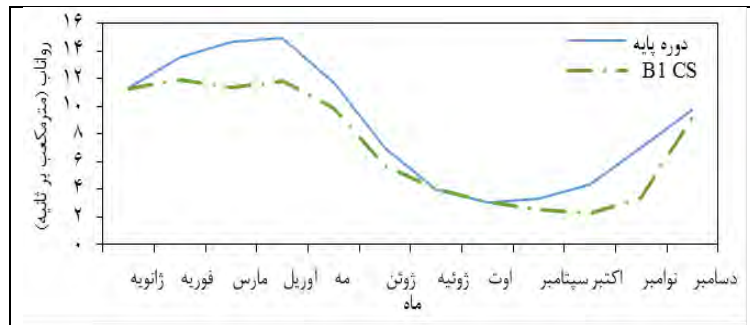


شکل ۱۷: مقایسه‌ی تغییرات رواناب ماهانه‌ی دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریوی اقلیمی ترکیبی B1 IS



شکل ۱۸: مقایسه‌ی تغییرات رواناب ماهانه‌ی دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریوی اقلیمی ترکیبی B1 MS





شکل ۱۹: مقایسه‌ی تغییرات رواناب ماهانه دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریوی اقلیمی ترکیبی B1 CS

جدول ۸: میزان تغییرات رواناب (درصد) تحت سناریوهای ترکیبی در دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴)

B1			A2			سناریوی مقیاس زمانی
CS	MS	IS	CS	MS	IS	
-۱۹/۸۴	-۱۴/۷۷	-۶/۹۰	-۲۰/۳۰	-۱۵/۹۴	-۱۰/۰۵	بهار
-۸/۹۰	-۱/۶۵	۸/۲۶	-۱۲/۵۶	-۴/۷۳	۳/۵	تابستان
-۴۳/۹۷	-۴۰/۸۴	-۳۲/۳۲	-۴۸/۶۱	-۴۱/۳۴	-۳۲/۳۱	پاییز
-۶/۵۵	-۱/۷۵	-۲/۶۵	-۱۱/۰۵	-۵/۴۴	-۱/۳۸	زمستان
-۱۷/۳۶	-۱۲/۳۶	-۵/۲۸	-۲۰/۱۸	-۱۴/۵۳	-۸/۴۹	سالانه

## ۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa با رویکرد احتمالاتی و تحلیل عدم قطعیت برای دوره‌ی آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) در حوضه‌ی رود زرد واقع در استان خوزستان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما، حاکی از افزایش میانگین دمای سالانه تحت هر سه حالت ایده‌آل، متوسط و بحرانی سناریوی انتشار A2 (B1) است. هم‌چنین نتایج حاصل از ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر بارندگی سالانه در دوره‌ی آتی حاکی از انتظار افزایش بارندگی برای حالت ایده‌آل سناریوی انتشار A2 (B1) به میزان ۰/۴ (۴/۲۱) درصد و انتظار کاهش بارندگی برای حالت متوسط و بحرانی سناریوی انتشار A2 (B1) به ترتیب به میزان ۷/۱۷ (۴/۶۲) و ۱۵/۳۳ (۱۴/۱۶) پیش‌بینی شده است. علاوه بر این، نتایج حاصل از بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب، حاکی از کاهش رواناب سالانه تحت هر سه حالت ایده‌آل، متوسط و بحرانی سناریوی انتشار A2 (B1) است؛ به‌گونه‌ای که برای حالت متوسط، سناریوی انتشار A2 (B1) به‌عنوان سناریویی که احتمال وقوع آن بیش‌تر می‌باشد، به میزان ۱۴/۵۳ (۱۲/۳۶) درصد پیش‌بینی شده است که این نتایج با تغییرات افزایشی دما و کاهش بارش تطابق دارد. از لحاظ تغییرات فصلی نیز رواناب تحت هر سه حالت سناریوی انتشار A2 (B1) انتظار بیش‌ترین کاهش رواناب در فصل پاییز و بهار پیش‌بینی شده است. در کل نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تحت هر دو سناریوی انتشار A2 و B1، افزایش دما و کاهش بارش و در نتیجه کاهش رواناب در دوره‌ی آینده مورد انتظار است. میزان این افزایش دما و کاهش بارش و رواناب در سناریوی A2 به‌عنوان یک سناریوی بحرانی بیش از سناریوی B1 برآورد شده است که این نتیجه با ماهیت این دو سناریو تطابق دارد. در نتیجه طبق نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه می‌توان گفت شرایط اقلیمی حوضه‌ی رود زرد در مسیر شرایط خشک‌تر در حال تغییر است. در نتیجه با نوجه به تغییرات پیش‌بینی شده‌ی رواناب در این حوضه در دوره‌ی آتی و با نوجه به محدودیت منابع آب موجود در کشور، به‌منظور کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم در آینده می‌بایست مدیران و برنامه‌ریزان در تصمیم‌گیری‌های محلی خود، از نتایج این‌گونه مطالعات در بهبود مدیریت منابع آب

استفاده نمایند. هم‌چنین با نوجه به نتایج این‌گونه مطالعات راه‌کارهای سازگاری از جمله افزایش عملکرد سامانه‌های منابع آبی، تغییر الگوی کشت در این منطقه، مدیریت صحیح‌تر در رهاسازی آب سدّ جره در این حوضه و تغییر منحنی فرمان سد پیشنهاد می‌شود.

## ۶- منابع

۱. آشفته، پریسا سادات، بزرگ حداد، امید (۱۳۹۲). ارائه‌ی رویکرد احتمالاتی ارزیابی آثار تغییر آب‌وهوا بر بدهی رود ایدوغموش، آذربایجان شرقی، مجله‌ی مهندسی منابع آب، شماره‌ی ۱۷، صص ۳۷-۵۲.
۲. آذین‌مهر، مریم، بهره‌مند، عبدالرضا، کبیر، آتنا (۱۳۹۵). آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل WetSpa در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از PEST در حوزه‌ی آبخیز دینور کرخه، پژوهشنامه‌ی مدیریت حوزه‌ی آبخیز، شماره‌ی ۱۳، صص ۸۲-۷۲.
۳. الماسی، پریسا (۱۳۹۳). بررسی اثر تغییر اقلیم بر فروانی سیلاب در حوزه‌ی آبخیز بازفت، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۴. جاویدان، نرگس، بهره‌مند، عبدالرضا (۱۳۹۴). تفکیک مؤلفه‌های جریان سیل توسط مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa در حوزه‌ی آبخیز زیارت-گرگان، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، شماره‌ی ۵، صص ۲۶۴-۲۳۳.
۵. خدیر، محمدحسین (۱۳۹۴). بررسی رواناب حوضه‌های آبریز تحت سناریوهای تغییر اقلیم (مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی آبریز تالار). پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۶. دهقانی، نوید، وفاهخواه، مهدی، بهره‌مند، عبدالرضا (۱۳۹۲). شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی Wetspa حوزه‌ی آبخیز کسلیان، پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی). شماره‌ی ۶، صص ۲۶۱-۲۵۳.
۷. صادقی، سید هادی، قاسمیه، هدی، ساداتی نژاد، سید جواد (۱۳۹۴). شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa (مطالعه‌ی موردی- حوضه ناورد). مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی-علوم آب‌و‌خاک، شماره‌ی ۷۳، صص ۳۳-۲۳.
۸. فروتن دانش، مهتاب، بهره‌مند، عبدالرضا، زینی‌وند، حسین، اونیق، مجید، نجفی نژاد، علی (۱۳۹۴). شبیه‌سازی اثرات سناریوهای توسعه‌ی مناطق مسکونی بر میزان رسوب معلق با استفاده از مدل WetSpa (مطالعه‌ی موردی: حوزه‌ی آبخیز زیارت استان گلستان)، نشریه‌ی پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، شماره‌ی ۳، صص ۲۰۷-۲۲۰.
۹. قاسمی، الهه، فتاحی، ابراهیم، بابائی، ام‌السمله (۱۳۹۲). تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب با رویکرد عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، شماره‌ی ۱۳، صص ۵۳-۳۷.
۱۰. قربانی، خلیل، سهرابیان، الهه، سالاری جزی، میثم، عبدالحسینی، محمد (۱۳۹۵). پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر روند دبی ماهانه رودخانه با بکار بردن مدل هیدرولوژیکی IHACRES (مطالعه‌ی موردی: حوضه آبریز گالیکش). نشریه‌ی حفاظت آب‌و‌خاک، شماره‌ی ۴، صص ۳۴-۱۹.
۱۱. کبیر، آتنا، بهره‌مند، عبدالرضا (۱۳۹۲). بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل بارش-رواناب WetSpa با استفاده از روش مونت کارلو، مجله‌ی پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، شماره‌ی ۵، صص ۹۷-۸۱.
۱۲. لکزائیان‌پور، غلامحسین، محمدرضاپور، ام‌البنی، مالمیر، مهسا (۱۳۹۵). ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه نازلوچای در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه، مجله‌ی جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۴۲، صص ۱۹۸-۱۸۳.
۱۳. مرادی‌پور، شهین، بهره‌مند، عبدالرضا، زینی‌وند، حسین، نجفی‌نژاد، علی (۱۳۹۴). شبیه‌سازی توزیعی مکانی رواناب با استفاده از مدل WetSpa در حوضه آبخیز طالقان، پژوهشنامه‌ی مدیریت حوزه‌ی آبخیز، شماره‌ی ۱۲، صص ۶۴-۵۵.
۱۴. ناصری، عرفان، شهیدی، علی، فرزانه، محمدرضا (۱۳۹۴). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب به کمک مدل بارش-رواناب SWAT (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی بهشت‌آباد، کارون شمالی). نشریه‌ی سامانه‌های سطوح آبیگر باران، شماره‌ی ۳، صص ۳۸-۲۷.

