

## The Effect of Climatic Parameters of Temperature and Precipitation on Water Resources Status of Persian Gulf and Oman Sea Catchment Areas Using CORDEX Project

ATEFE KHOSH BAYAN<sup>1</sup>, SHAHAB ARAGHINEJAD<sup>2</sup>, ZAHRA AGHASHARIATMADARI<sup>3\*</sup>

1. M.Sc. Student of Agrometeorology, Irrigation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Associate Professor, Irrigation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Assistant Professor, Irrigation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: May. 10, 2018- Revised: July. 11, 2018- Accepted: Nov. 27, 2018)

### ABSTRACT

To examine the effects of two climatic parameters of average rainfall and average annual temperature on water resources status toward the population parameters in seven grade-2 watersheds, located in Persian Gulf and Oman Sea, the observation data of 180 synoptic stations in the proposed watershed and historical data of the CORDEX project for the 20-year statistical period (1986-2005) considering RCP2.6, 4.5, 8.5 climate scenarios were used in this study. Then, the EC\_EARTH, CNRM and GFDL climate models were used for the upcoming periods of (2006-2030) and (2031-2050). Finally, the ability of each model to fit the water stress index (based on the lowest error with the base course) for each watershed was studied. The results of this study showed that the all three climate models (EC\_EARTH, CNRM and GFDL) predicted MOND and KOL-MEHRAN watersheds, respectively, as the highest and lowest water resources status in relation to population parameter in upcoming periods of (2006-2030) and (2031-2050) and under RCP2.6, 4.5 and RCP8.5 scenarios, relative to the observational water stress index.

**Keywords:** Climatic Models, Population, RCP Climatic Scenarios, Water Stress Index

## بررسی اثرات پارامترهای اقلیمی دما و بارش بر وضعیت منابع آبی حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از پروژه CORDEX

عاطفه خوش بیان<sup>۱</sup>، شهاب عراقی نژاد<sup>۲</sup>، زهرا آقاشریعتمداری<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی

دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۴/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۹/۶)

### چکیده

در این مطالعه به منظور بررسی اثرات دو پارامتر اقلیمی بارش متوسط و دمای متوسط سالانه بر وضعیت منابع آبی نسبت به پارامتر جمعیت در هفت حوضه آبریز درجه دو واقع در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان، از داده‌های مشاهده‌ای حدود ۱۸۰ ایستگاه سینوپتیک در سطح حوضه آبریز مذکور و داده‌های تاریخی پروژه CORDEX برای دوره آماری ۲۰ ساله (۱۹۸۶-۲۰۰۵ میلادی) با در نظر گرفتن سناریوهای اقلیمی RCP2.6, 4.5, 8.5 استفاده شد. سپس، سه مدل اقلیمی EC\_EARTH، CNRM و GFDL برای دوره‌های آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۰) و (۲۰۰۶-۲۰۳۰) بکار گرفته شد. در نهایت توانایی هر مدل در برازش مقدار شاخص تنش آبی (بر اساس کمترین میزان خطا با دوره پایه) برای هر حوضه بررسی گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد هر سه مدل اقلیمی EC\_EARTH، CNRM و GFDL، حوضه آبریز مند و کل-مهران را به ترتیب به عنوان بیشترین و کمترین میزان وضعیت منابع آبی نسبت به پارامتر جمعیت در دوره‌های آتی (۲۰۰۶-۲۰۳۰) و (۲۰۳۰-۲۰۵۰)، تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و نسبت به شاخص تنش آبی مشاهدات پیش‌بینی کرده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** جمعیت، سناریوهای اقلیمی RCP، شاخص تنش آبی، مدل‌های اقلیمی

### مقدمه

آب عامل اصلی تحولات پیچیده جهانی و توسعه پایدار کشورهاست، به طوری که بر اهمیت تأثیر امنیت آب بر مسائل مختلف، اعم از مسائل اقتصادی-اجتماعی و زیست‌محیطی در گزارش {چالش‌های امنیت آبی در قرن ۲۱} تأکید شده است (Grey and Garrick, 2012). کمبود آب بر همه بخش‌های اقتصادی اجتماعی تأثیر می‌گذارد و پایداری منابع طبیعی را تهدید می‌کند. علاوه بر این، محققان بر این باورند که تغییر اقلیم کمبود منابع آب را در دوره‌های آتی افزایش می‌دهد (Lobell et al., 2010).

پدیده تغییر اقلیم سهم بسزایی در وقوع بحران فعلی آب دارد. طی این وضعیت، سطح منابع آب برای دوره طولانی در زیر خط نرمال قرار گرفته که حاصل برهمکنش متغیرهای مختلف اقلیمی است. افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی و در نتیجه تشدید تغییرات پارامترهای اقلیمی، می‌تواند تأثیرات

منفی زیادی را بر سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب، محیط زیست، صنعت، بهداشت، کشاورزی و کلیه سامانه‌هایی که در کنش با سامانه اقلیم می‌باشند، بگذارد. تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ۱۰ عامل تهدیدآمیز بشر در قرن بیست و یکم، پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است (IPCC<sup>۱</sup>, 2007). یکی از بارزترین اثرات تغییر اقلیم بر اقلیم کره زمین، افزایش شدت و طول دوره خشک‌سالی است. خشک‌سالی در هر دو مقیاس زمانی کوتاه مدت و بلند مدت عامل مهمی در کنترل و مدیریت منابع آبی در کنار سایر عوامل مدیریتی بوده و پایش آن از ملزومات آگاهی از حجم منابع آبی موجود است.

ایران به لحاظ جغرافیایی در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و میانگین میزان بارندگی آن، کمتر از یک‌سوم جهانی می‌باشد و این مقدار کم نیز توزیع مکانی بسیار ناهمگنی دارد، از نظر توزیع زمانی نیز این بارش‌ها فصلی بوده و در

از جمله تحقیقات صورت گرفته می‌توان، به مطالعات (Abiodun *et al.*, 2017) که تأثیرات تغییر اقلیم را روی مشخصه‌های رخداد‌های بارندگی حدی در چهار شهر ساحلی آفریقا تحت دو سناریوی RCP 4.5, 8.5 بررسی کردند، اشاره کرد. آن‌ها ۱۴ شاخص بارندگی حدی و ۱۶ مجموعه داده شبیه‌سازی چندمدله از پروژه CORDEX را مورد ارزیابی قرار دادند. مدل‌ها بر اساس هر دو سناریوی RCP4.5, 8.5، کاهش در توالی‌های تر و افزایش در توالی‌های خشک را در هر چهار شهر برای آینده پیش‌بینی کردند. یک روند افزایشی در شدت و فراوانی رخداد‌های بارندگی پیش‌بینی شد. نتایج این مطالعه می‌تواند کاربرد قابل توجهی در مدیریت آسیب‌پذیری احتمالی شهرهای ساحلی نسبت به رخداد‌های بارندگی حدی، تحت شرایط تغییر اقلیم، داشته باشد.

(Miyanabadi *et al.*, 2016) با توجه به شرایط ناپایدار حوضه نیشابور-رخ، مدل جدید ارائه شده در چارچوب بادیکو (معادله Gereve *et al.*, 2016) را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر واقعی، واسنجی و سپس برای دوره پایه (۱۳۵۱-۱۳۵۰ تا ۱۳۸۴-۱۳۸۳) و دوره آینده (۱۳۹۶-۱۳۹۵ تا ۱۴۲۹-۱۴۲۸) با استفاده از مدل اقلیمی به دست آمده از پروژه CORDEX بکار گرفتند. نتایج بررسی تغییر اقلیم نشان داد که مقدار بارش در دوره آینده ۰/۴۸٪، کاهش و دمای متوسط، تبخیر پتانسیل و تبخیر واقعی به ترتیب ۱۱/۲۵ سلسیوس، ۴/۶۶ و ۲/۱۱٪ افزایش خواهد یافت. طبق شواهد موجود، وضعیت منابع آب در بسیاری از بخش‌های ایران رو به وخامت است. ضرورت تحلیل گذشته، بررسی وضع موجود و پیش‌بینی آینده امنیت آبی کشور، به مدیران کمک می‌کند که در تهیه برنامه‌ها و استراتژی‌ها، با اطلاعات درست نسبت به تحلیل آینده گام بردارند.

(Abbasi *et al.*, 2013) خروجی‌های دو مدل گردش عمومی جو (HadCM3 و ECHAM4) را با استفاده از مدل MAGICC- SCENGEN با لحاظ هیجده سناریوی انتشار IPCC، برای دهه‌های آینده ریزمقیاس کردند و نتایج آن را بر روی ایران تجزیه و تحلیل کردند. نتایج اجرای مدل براساس داده‌های HadCM3 بیانگر کاهش ۲/۵٪ بارش کشور تا دهه ۲۱۰۰ بود. درحالی‌که برای دوره مشابه در مدل ECHAM4 بارش‌های کشورمان به میزان ۱۹/۸٪ افزایش را نشان داد.

(Ababayi *et al.*, 2014) با توجه به اهمیت نقش افزایش جمعیت در مطالعات تغییر اقلیم، به بررسی افزایش جمعیت منطقه‌ی خاورمیانه تا انتهای قرن بیست و یکم میلادی، براساس سناریوهای جمعیتی IIASA پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که

فصولی که بیشترین نیاز به آب وجود دارد، کمترین بارش صورت می‌گیرد.

علاوه بر مسائلی نظیر توزیع ناهمگن زمانی و مکانی بارش در کشور، نوسانات سالانه مقدار بارش نیز یکی از مسائلی است که موجب بروز مشکلات بسیاری از نظر بحران آب می‌شود. پیش‌بینی‌ها در این راستا، حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰ مسئله مدیریت منابع آب اصلی‌ترین موضوع مورد بحث در کشورهای گوناگون جهان خواهد بود. کشور ایران نیز بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده تا سال ۲۰۲۵ به لیست کشورهای که با وضعیت کمبود آب مواجه‌اند، اضافه خواهد شد (Parhikari, 2012). از این رو امروزه، یکی از مهم‌ترین مسائل روز جامعه، نگرش نو و توسعه پایدار به منابع آب و برنامه‌ریزی آن می‌باشد، تا بتوان پدیده خشک‌سالی و کم‌آبی را بهتر شناخته و اثرات اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی آن را بررسی کرده و برای مدیریت آن و حفظ امنیت آبی برنامه‌ریزی اصولی انجام گیرد.

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد که معتبرترین آن‌ها استفاده از داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو یا GCM می‌باشد. مدل‌های GCM، تنها قادر به شبیه‌سازی داده‌های مدل گردش عمومی جو در سطح بزرگ هستند (Samadi *et al.*, 2011). به منظور رفع این محدودیت روش‌های مختلفی ارائه شده است، که به مجموع آن‌ها روش‌های ریزمقیاس نمایی گفته می‌شود. با استفاده از روش‌های ریزمقیاس نمایی، خروجی‌های GCM به متغیرهای سطحی در حوزه مورد مطالعه تبدیل می‌شود.

به منظور ایجاد سهولت در استفاده از مدل‌های ریزمقیاس نمایی دینامیکی، خروجی مدل‌های اقلیم جهانی استفاده شده در گزارش پنجم پانل دولت‌ها برای تغییر اقلیم، موسوم به IPCC AR5، در اختیار مراکزی به منظور ریزمقیاس نمایی دینامیکی و انتشار خروجی‌های ریزمقیاس شده قرار گرفت. نام این پروژه تحت عنوان پروژه CORDEX شناخته می‌شود. پهنه‌های خشکی، زمین را به ۱۳ بخش تقسیم کرده و خروجی مدل‌های اقلیم جهانی را با دقت مکانی ۰/۴۴، ۰/۲۲ و ۰/۱۱ درجه تولید می‌کند. همچنین دقت زمانی خروجی مدل‌های ریزمقیاس نمایی دینامیکی پروژه مذکور، شامل داده‌های سه ساعته، شش ساعته، روزانه، ماهانه و فصلی می‌باشد. علاوه بر افزایش دقت مکانی و زمانی در مدل‌ها، تعداد و نوع متغیرهای ورودی و در نتیجه متغیرهای ریزمقیاس شده و محاسبه شده نیز افزایش قابل توجهی داشته است (Samadi *et al.*, 2011; Giorgi *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2011).

متشکل از رودخانه‌های دز و کارون بوده که در داخل ارتفاعات زاگرس میانی قرار دارند. محدوده جغرافیایی حوضه  $48^{\circ}-00'$  و  $30^{\circ}-30'$  درجه طول شرقی و  $30^{\circ}-00'$  و  $34^{\circ}-05'$  درجه عرض شمالی قرار گرفته است. حوضه آبریز رودخانه‌های جراحی و زهره بین مختصات جغرافیایی  $48^{\circ}-18'$  تا  $52^{\circ}-19'$  درجه طول شرقی و  $30^{\circ}-00'$  تا  $42^{\circ}-31'$  درجه عرض شمالی محصور شده‌اند.

حوضه آبریز حله و مسیل‌های دو طرف، در تقسیم‌بندی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز، پنجمین حوضه خلیج فارس می‌باشد. این حوضه آبریز بین مختصات جغرافیایی  $49^{\circ}-52'$  تا  $52^{\circ}-20'$  طول شرقی و  $28^{\circ}-11'$  تا  $30^{\circ}-21'$  عرض شمالی واقع شده است. حوضه آبریز مند در جنوب استان فارس قرار داشته و دارای مختصات جغرافیایی  $51^{\circ}-10'$  تا  $48^{\circ}-48'$  طول شرقی و  $27^{\circ}-20'$  تا  $30^{\circ}-05'$  عرض شمالی می‌باشد. حوضه آبریز رودخانه‌های کل-مهران در قسمت میانی جنوب کشور قرار گرفته است. مختصات جغرافیایی آن  $51^{\circ}-20'$  تا  $57^{\circ}-00'$  طول شرقی و  $26^{\circ}-00'$  تا  $29^{\circ}-10'$  عرض شمالی می‌باشد. حوضه آبریز بندرعباس-سدیج در تقسیم‌بندی‌های دفتر مطالعات پایه منابع آب، بخشی از حوضه آبریز خلیج فارس بوده و از طرف غرب به حوضه آبریز کل، از شمال به حوضه آبریز هامون جازموریان، از شرق به حوضه آبریز بلوچستان جنوبی و از جنوب به خلیج فارس و دریای عمان محدود گردیده است. برخی مشخصات حوضه‌های آبریز فرعی در جدول (۱) آمده است.

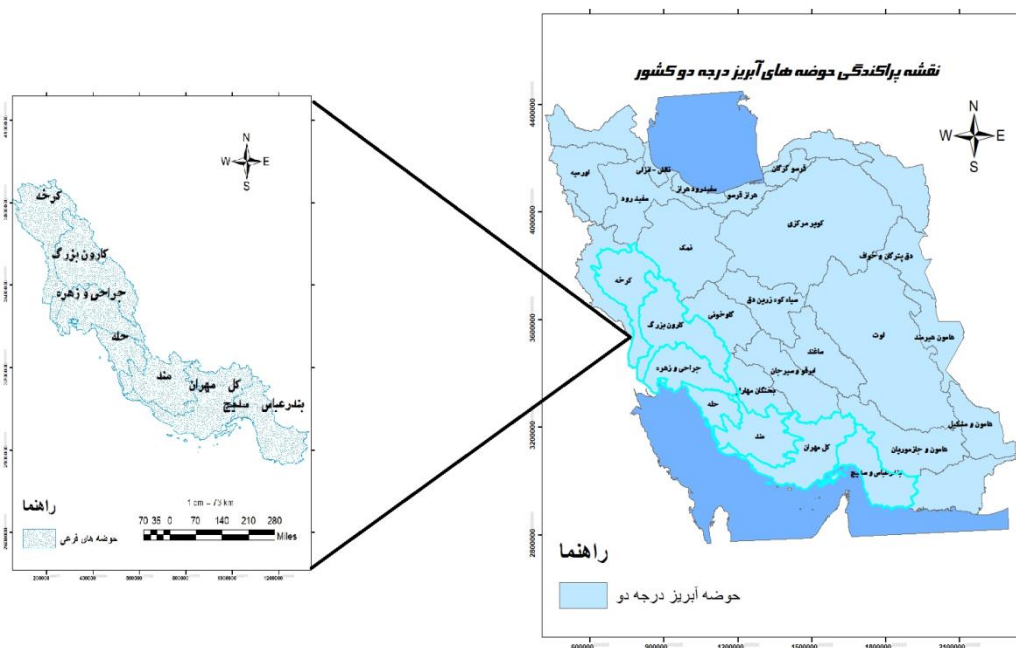
تحت سناریوهای A1-B1 و A2، جمعیت منطقه خاورمیانه از حدود ۳۱۲ میلیون نفر در سال ۱۹۹۵، به ترتیب به بیش از ۸۰۹ میلیون و ۲ میلیارد نفر در سال ۲۱۰۰ رسیده است. نتایج نشان داد که تحت این دو سناریو، متوسط ماهانه‌ی نیاز آب شرب سد طالقان تا سال ۲۰۵۵ میلادی در مقایسه با ۲۰۱۰، به ترتیب ۸۰٪ و ۱۶۱٪ افزایش داشته است.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثرات دو پارامتر اقلیمی دما و بارش بر وضعیت منابع آبی نسبت به جمعیت حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان، به کمک داده‌های ریزمقیاس شده‌ی دینامیکی است. به عبارت دیگر، مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، ایجاد زیرساخت‌های لازم برای تخصیص بهینه منابع آب و ارائه الگوهای مناسب مصرف در بخش‌های مختلف خواهد بود.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه اصلی آبریز خلیج فارس و دریای عمان، دارای هفت حوضه آبریز فرعی کرخه، کارون، جراحی-زهره، حله، مند، کل-مهران و بندرعباس-سدیج تقسیم می‌شود (شکل ۱). حوضه آبریز کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارد. این حوضه از نظر مختصات جغرافیایی بین  $36^{\circ}-06'$  تا  $49^{\circ}-10'$  درجه طول شرقی و  $58^{\circ}-30^{\circ}$  تا  $35^{\circ}-04'$  درجه عرض شمالی قرار گرفته است. حوضه آبریز کارون، ۴/۱ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد و



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

جدول ۱. برخی مشخصات حوضه‌های آبریز فرعی استفاده شده در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان

ردیف	نام حوضه‌های فرعی	مساحت (کیلومتر مربع)	جمعیت	بارش متوسط (میلی‌متر)	ضریب رواناب
۱	کرخه	۵۱۶۸۴	۳۹۰۷۴۸۲	۴۷۷	۰/۱۶
۲	کارون	۶۷۲۵۸	۵۵۰۷۴۰۳	۶۳۲	۰/۴۴
۳	جراحی-زهره	۴۰۷۸۸	۱۷۲۵۷۱۰	۴۸۶	۰/۳۱
۴	حله	۲۱۲۷۵	۱۰۱۶۵۹۰	۲۷۵/۸	۰/۲۹
۵	مند	۴۷۶۵۵	۱۰۷۸۷۷۸	۳۰۷/۵	۰/۰۸
۶	کل-مهران	۶۳۵۶۴	۱۲۴۹۰۶۶	۲۰۸/۶	۰/۰۵
۷	بندرعباس-سدی‌چ	۴۵۲۴۸	۱۱۷۹۱۹۰	۱۹۳/۹	۰/۱۷

## داده‌ها

در تحقیق حاضر از مجموعه‌ای داده به شرح ذیل استفاده شد: در ابتدا دو متغیر اقلیمی بارش و دمای متوسط مشاهده-ای حدود ۱۸۰ ایستگاه سینوپتیک حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان برای بازه ۲۰ ساله (۱۹۸۶-۲۰۰۵ میلادی) (به دلیل همپوشانی با داده‌های تاریخی پروژه CORDEX) انتخاب گردید. پروژه CORDEX به ۱۳ منطقه جغرافیایی (آمریکای جنوبی، آمریکای مرکزی، آمریکای شمالی، اروپا، آفریقا، جنوب (یا غرب) آسیا، شرق آسیا، آسیای مرکزی، استرالیا، قطب جنوب، قطب شمال، ناحیه مدیترانه و منا) تقسیم شده است. ایران در سه منطقه جغرافیایی قرار دارد. در این تحقیق از منطقه جغرافیایی منا<sup>۲</sup> استفاده شده است. به منظور بررسی تغییرات اقلیمی از خروجی مدل اقلیم جهانی EC\_EARTH در این مطالعه استفاده گردیده است.

با توجه به اینکه خروجی‌های مدل ذکر شده، از تفکیک مکانی کمی برخوردار بود، لذا داده‌های این مدل توسط مرکز هیدرولوژی و هواشناسی سوئد (SMHI) تحت پروژه CORDEX به صورت دینامیکی و در مقیاس ماهانه برای پارامترهای مورد پژوهش در این تحقیق (بارش، دمای میانگین) ریزمقیاس شدند و در تفکیک مکانی ریزمقیاس شده ۰/۴۴ درجه مورد استفاده قرار گرفتند.

داده‌های مورد استفاده در این پروژه در دو بخش داده‌های تاریخی و داده‌های تحت سناریو قرار می‌گیرند که بازه زمانی برای بخش تاریخی ۱۹۸۶-۲۰۰۵ و همچنین بازه زمانی خروجی مدل ریزمقیاس شده تحت سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق، دوره ۲۰۰۶-۲۰۵۰ می‌باشد. سناریوهای مورد استفاده در این مطالعه، سه سناریو RCP4.5RCP2.6RCP8.5 از مجموعه سناریوهای IPCC AR5 RCP می‌باشند. مدل اقلیمی

EC\_EARTH تحت هر سه سناریوی نامبرده شده اجرا شده است.

داده‌های استخراج شده از مطالعات بهنگام سازی طرح جامع آب کشور برای حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان، شامل جمعیت، حجم بارش، مجموع منابع آب (مجموع رواناب سطحی و مجموع آب زیرزمینی)، بارش متوسط، دمای متوسط، ضریب رواناب می‌باشد.

## روش‌ها

### ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف

در ابتدا صحت‌سنجی بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های تاریخی مدل اقلیمی EC\_EARTH، برای دوره مشترک ۲۰۰۵-۱۹۸۶ میلادی از طریق چهار روش آماری (ضریب تبیین  $(R^2)$ ، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و درصد نسبی خطا (E)) محاسبه گردید.  $(o_i)$ : مقدار مشاهده شده و  $(e_i)$ : مقدار برآورد شده)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i \times e_i)}{\sqrt{(\sum o_i^2) \times (\sum e_i^2)}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$MAE = \left| \frac{1}{n} \sum (o_i - e_i) \right| \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$E = \left( \frac{o_i - e_i}{o_i} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

نتایج هر کدام از معیارهای خطا برای متغیر بارش و دما در جدول‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده است.

### بررسی میزان تغییرات داده‌های مشاهداتی و مدل

در این بخش میزان اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تاریخی سه

$$WSI_{RCP} = \frac{(C \times V_{RCP}) + B}{P} \quad (\text{رابطه ۶})$$

C: ضریب رواناب

$V_{RCP}$ : حجم بارش آینده مدل

B: مجموع رواناب زیرزمینی

P: جمعیت

#### پارامتر اقلیمی دما و شاخص تنش آبی

ارتباط متغیر اقلیمی دمای متوسط در مقابل شاخص تنش آبی در نظر گرفته شده است. به عبارتی مقایسه دمای مشاهداتی شش حوضه آبریز مذکور با شاخص تنش آبی مشاهداتی، دمای متوسط و شاخص تنش آبی تاریخی سه مدل اقلیمی و همچنین مقایسه دمای متوسط و شاخص تنش آبی سناریوهای سه مدل اقلیمی صورت گرفته است (جدول ۲).

جدول ۲. ارتباط پارامتر اقلیمی دمای متوسط با شاخص تنش آبی

وضعیت شاخص تنش آبی	دما (سلسیوس)
بسیار پایدار	کمتر از ۵
پایدار	۵-۸
نسبتاً پایدار	۸-۱۲
نسبتاً ناپایدار	۱۲-۱۶
ناپایدار	۱۶-۲۰
بسیار ناپایدار	بیشتر از ۲۰

#### نتایج و بحث

نتایج حاصل از اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تاریخی شش حوضه آبریز فرعی نشان داد که در مدل اقلیمی CNRM، حوضه آبریز مند و کرخه کمترین میزان اختلاف را با داده‌های مشاهداتی داشتند و در نتیجه حوضه‌های قابل اطمینان‌تری نسبت به باقی حوضه‌ها می‌باشند. حوضه‌های کل-مهران، حله، بندرعباس-سدیج، جراحی-زهره و کارون به ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج مدل اقلیمی EC-EARTH، حوضه آبریز کل-مهران و بندرعباس-سدیج را به عنوان حوضه‌های با اطمینان بالاتر معرفی نمود و درنهایت مدل اقلیمی GFDL، حوضه‌های آبریز بندرعباس-سدیج، کل-مهران، حله، مند و کرخه را به عنوان حوضه‌های با اطمینان بالاتر نشان داد (شکل ۲).

همچنین نتایج حاصل از اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تاریخی متغیر دما، حاکی از آن است که حوضه‌های مند، کرخه، جراحی-زهره، کارون و حله در مدل اقلیمی CNRM، در رده حوضه‌های با اطمینان بالا قرار می‌گیرند. در مدل اقلیمی EC-EARTH، حوضه‌های مند، کرخه، کارون، جراحی-زهره و حله و

مدل اقلیمی و هم‌چنین میانگین اختلافات مقادیر مشاهده‌ای و تاریخی مدل‌ها نیز به دست آمد و نتایج این مقایسه نشان‌دهنده این است که کدام مدل اقلیمی درصد افزایش یا کاهش بارش و دما را بهتر یا بدتر نشان می‌دهد. به عبارتی نتایج حاصل از این برآورد، موجب تقسیم‌بندی حوضه‌های فرعی، به حوضه‌های قابل اطمینان و حوضه‌هایی که از اطمینان کمتری برخوردارند، می‌شود. در تمام مراحل مطالعه حاضر، عملیات انجام شده به ترتیب درجه اطمینان حوضه‌های آبریز صورت گرفته است.

#### محاسبه شاخص تنش آبی

برای تبیین وضعیت حوضه آبریز و ارزیابی آن از مجموعه عملیاتی که در قالب فرمول‌های ذیل ذکر شده، برای محاسبه شاخص تنش آبی استفاده شده است. این شاخص نشان‌دهنده میزان مجموع منابع آب در دسترس در حوضه برای هر نفر است. Falkernmark and Widstrand (1992) در مطالعات خود بحران آب را بر اساس مقدار سرانه منابع آب تجدیدپذیر سالیانه هر کشور تعریف و میزان سرانه ۱۷۰۰ مترمکعب در سال را به عنوان شاخص تنش معرفی کرده است.

مقادیر حدی شاخص تنش آبی طبق معیارهای ارزیابی شاخص فالکن مارک به این صورت است که اگر میزان شاخص کمتر از ۵۰۰ مترمکعب به ازای هر نفر در سال به دست آمد، نشان‌دهنده وضعیت تنش آبی مزمن منابع آبی خواهد بود. بین ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمکعب نشان‌دهنده تنش آبی شدید، بین ۱۰۰۰ و ۱۷۰۰ مترمکعب نشان‌دهنده تنش آبی نسبی، بین ۱۷۰۰ و ۳۴۰۰ مترمکعب نشان‌دهنده وضعیت عادی یا نرمال و بین ۳۴۰۰ و ۵۱۰۰ نشان‌دهنده وضعیت خوب و در نهایت مقادیر بالاتر از ۵۱۰۰ و کمتر از ۱۰۰۰۰ و بیشتر از ۱۰۰۰۰ به ترتیب نشان‌دهنده وضعیت خیلی خوب و عالی منابع آبی به ازای هر نفر در سال خواهد بود. در این بخش شاخص تنش آبی برای داده‌های مشاهداتی و تاریخی مدل‌ها و آینده محاسبه گردید که شاخص داده‌های مشاهداتی با جایگذاری متغیرهای گزارشات مطالعات بهنگام سازی وزارت نیرو طبق فرمول ذیل محاسبه گردید:

$$WSI_{obs} = \frac{A + B}{P} \quad (\text{رابطه ۵})$$

A: مجموع رواناب سطحی

B: مجموع رواناب زیرزمینی

P: جمعیت

برای محاسبه شاخص تنش آبی داده‌های تاریخی مدل، در ابتدا مجموع رواناب سطحی با توجه به متوسط بارش سالانه تاریخی، مدل و ضریب رواناب محاسبه شد:

است که حوضه از نظر وضعیت منابع آبی موجود نسبت به جمعیت از وضعیت بهتری برخوردار است. بنابراین در مورد داده‌های مشاهداتی، حوضه آبریز مند با مقدار ۵۵۰۳/۳۱ مترمکعب به ازای هر نفر در سال در وضعیت خیلی خوب منابع آبی قرار دارد و پس از آن حوضه‌های بندرعباس-سدیج، حله، کل-مهران و کرخه در وضعیت عادی منابع آبی نسبت به جمعیت قرار دارند. در مدل اقلیمی CNRM، مقدار شاخص تنش آبی داده‌های تاریخی حوضه آبریز مند، ۵۴۸۸/۷۸ مترمکعب به دست آمد که نشان دهنده وضعیت عادی یا نرمال منابع آبی نسبت به جمعیت است. حوضه‌های کرخه، مند، کل-مهران، حله و بندرعباس-سدیج در وضعیت عادی منابع آبی و دو حوضه آبریز جراحی-زهره و کارون در وضعیت خوب منابع آبی قرار دارند.

جدول ۳. نتایج برآورد سه معیار خطا بین داده‌های بارش مشاهده‌ای و تاریخی

مقادیر	مدل CNRM	مدل EC_EARTH	مدل GFDL
$R^2$	۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۸۸
MAE	۴۳/۵۰	۱۳۷/۹۹	۱۰۳/۹۷
RMSE	۸۳/۱۳	۱۶۰/۴۶	۱۳۲/۰۵
E	۱۱/۷۵	۳۷/۲۸	۲۸/۰۹

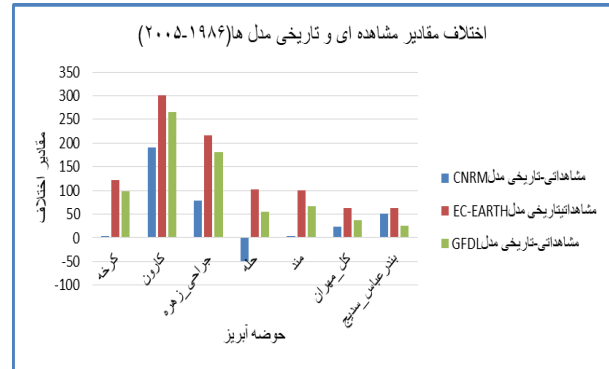
جدول ۴. نتایج برآورد سه معیار خطا بین داده‌های دمای مشاهده‌ای و تاریخی

مقادیر	مدل CNRM	مدل EC_EARTH	مدل GFDL
$R^2$	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۸
MAE	۳/۰۲	۲/۷۶	۲/۷۵
RMSE	۳/۴۸	۳/۳۷	۳/۲۵
E	۱۴/۱۸	۱۲/۹۴	۱۲/۹۰

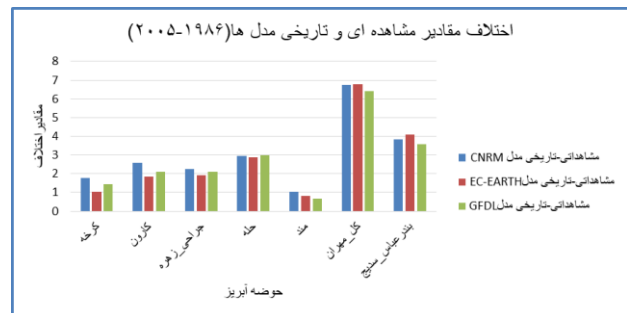
در مدل اقلیمی EC\_EARTH، حوضه‌های کل-مهران و بندرعباس-سدیج در وضعیت عادی، مند در وضعیت خیلی خوب و حله در وضعیت تنش آبی نسبی قرار دارند. در مدل اقلیمی GFDL، حوضه‌های بندرعباس-سدیج، کل-مهران و حله در وضعیت تنش آبی نسبی و حوضه آبریز مند در وضعیت خیلی خوب منابع آبی قرار گرفتند و در نهایت حوضه آبریز کرخه در وضعیت تنش آبی نسبی و حوضه جراحی-زهره در وضعیت عادی و حوضه آبریز کارون در وضعیت تنش آبی عادی قرار گرفتند (شکل ۴).

محاسبه شاخص تنش آبی برای دوره آماری (۲۰۰۶-۲۰۳۰) براساس رابطه (۶) انجام شد و نتایج به این صورت به دست آمد که در سناریوهای RCP2.6,4.5,8.5 مدل

در مدل اقلیمی GFDL نیز حوضه‌های آبریز مند، کرخه، کارون و جراحی-زهره، حله حوضه‌های با اطمینان بالاتر محسوب می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۲. اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تاریخی متغیر بارش



شکل ۳. اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تاریخی متغیر دما

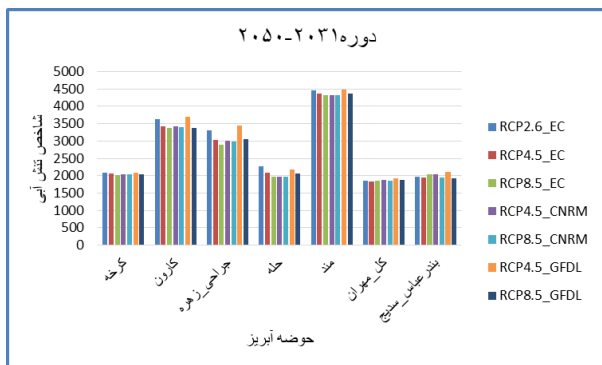
نتایج حاصل از برآورد معیارهای خطا برای متغیر بارش نشان داد که در مدل اقلیمی GFDL، ضریب تبیین، اختلاف کمتری را برآورد کرده است. به عبارت دیگر بیشتر بودن مقدار این معیار نشان می‌دهد که همبستگی و ارتباط بین داده‌های مشاهداتی با داده‌های مدل بهتر است. میانگین مطلق خطا، مجذور میانگین مربعات خطا و درصد نسبی خطا، مدل اقلیمی CNRM را به عنوان کمترین معیار برآورد خطا نشان داده است. میانگین مربعات خطا، اختلاف کمتری را بین داده‌های مشاهده-ای و تاریخی نشان داده است (جدول ۳). در واقع میزان سه معیار خطا، هر چقدر کمتر باشند، نشان‌دهنده خطای کمتر بین داده‌های مشاهده‌ای و تاریخی مدل خواهد بود.

در مورد متغیر دما نیز، بیشترین مقدار ضریب تبیین مربوط به دو مدل اقلیمی CNRM و GFDL است. کمترین مقدار میانگین مربعات خطا و مجذور میانگین مربعات خطا مربوط به مدل GFDL می‌باشد (جدول ۴).

در ارتباط با نتایج حاصل از محاسبه شاخص تنش آبی می‌توان گفت براساس مقادیر حدی شاخص فالکن مارک، هرچه میزان شاخص تنش آبی حوضه‌ای بالاتر باشد نشان دهنده این

حوضه آبریز مند در وضعیت خوب منابع آبی نسبت به جمعیت قرار خواهند داشت.

در مدل CNRM، سناریوهای اقلیمی RCP4.5,8.5، نشان دادند که حوضه آبریز مند با مقدار عددی ۴۳۲۰،۳۶ مترمکعب در وضعیت خوب، حوضه‌های آبریز کرخه حله، بندرعباس-سدیج، جراحی-زهره در وضعیت عادی و در نهایت حوضه آبریز کل-مهران در وضعیت تنش آبی قرار خواهند گرفت. نتایج حاصل از هر دو سناریوی اقلیمی مدل GFDL نیز، وضعیت عادی حوضه‌های آبریز بندرعباس-سدیج، کل-مهران، حله، کرخه، جراحی-زهره و کارون و همچنین وضعیت خوب حوضه آبریز مند را در بر داشت (شکل ۶).

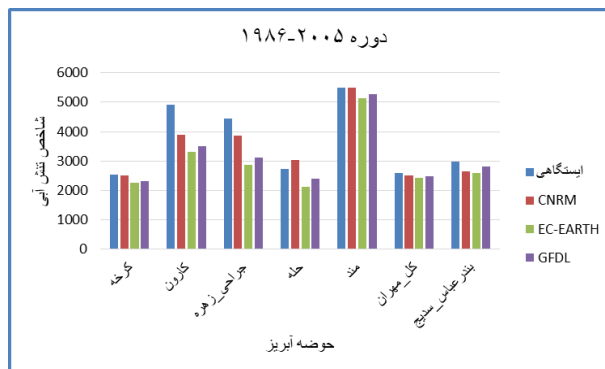


شکل ۶. مقادیر شاخص تنش آبی سناریوهای اقلیمی RCP2.6,4.5,8.5

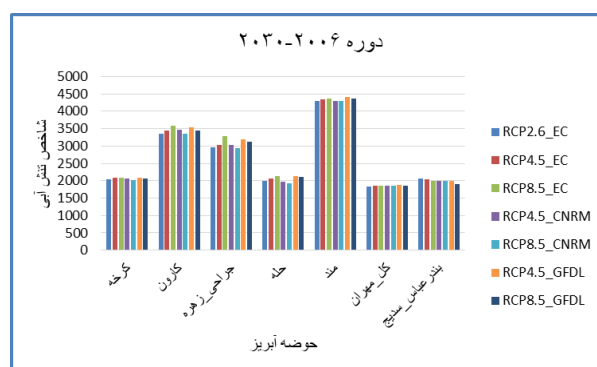
با توجه به جدول (۲)، که وضعیت پایداری شاخص تنش آبی حوضه‌ها را با توجه به متغیر اقلیمی دما به طور توصیفی بیان می‌کند، نتیجه می‌گردد که هر چه دمای متوسط حوضه‌ای کمتر باشد شاخص تنش آبی آن حوضه، پایدارتر خواهد بود.

در ارتباط با داده‌های مشاهده‌ای، بیشترین میزان دمای متوسط سالانه بلندمدت اقلیمی مربوط به حوضه آبریز کل-مهران با مقدار عددی ۲۷/۶ سلسیوس می‌باشد و پس از آن حوضه‌های بندرعباس-سدیج، حله، جراحی-زهره، مند، کرخه و کارون به ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. بنابراین نتیجه می‌گردد که پایدارترین حالت شاخص تنش آبی مشاهده‌ای متعلق به حوضه آبریز کارون است. در بین حوضه‌های قابل اطمینان ذکر شده در بخش‌های قبل، در هر سه مدل تاریخی CNRM، EC\_EARTH و GFDL، حوضه آبریز مند با مقدار عددی به ترتیب ۱۸/۷، ۱۹ و ۱۹/۱ سلسیوس در وضعیت ناپایدار شاخص تنش آبی و همچنین حوضه آبریز کرخه و کارون در وضعیت نسبتاً ناپایدار و حوضه آبریز جراحی-زهره نیز، در وضعیت ناپایدار قرار می‌گیرند (شکل ۷).

EC\_EARTH، حوضه آبریز کل-مهران با مقدار عددی ۱۸۳۱،۵۹ مترمکعب به ازای هر نفر در سال در وضعیت تنش آبی نسبی قرار خواهد داشت و همچنین حوضه آبریز بندرعباس-سدیج در وضعیت عادی و حوضه مند در وضعیت خوب و حوضه‌های آبریز حله، کرخه، جراحی-زهره و کارون در وضعیت عادی منابع آبی قرار خواهند گرفت. سناریوهای اقلیمی RCP4.5,8.5 مدل CNRM، وضعیت خوب حوضه آبریز مند و وضعیت عادی پنج حوضه آبریز دیگر حوضه خلیج فارس و دریای عمان را نشان داد. سناریوهای اقلیمی RCP4.5,8.5 مدل اقلیمی GFDL، نشان داد که حوضه آبریز بندرعباس-سدیج و کل-مهران در وضعیت تنش آبی نسبی، حوضه حله، کرخه و جراحی-زهره در وضعیت عادی، حوضه آبریز مند و کارون در وضعیت خوب منابع آبی قرار خواهند گرفت (شکل ۵).



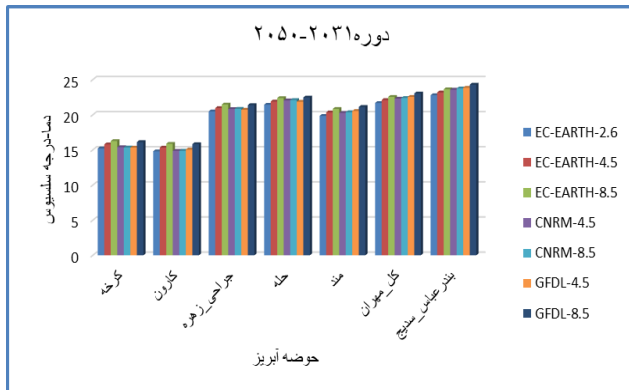
شکل ۴. مقادیر شاخص تنش آبی داده‌های مشاهداتی و تاریخی سه مدل اقلیمی



شکل ۵. مقادیر شاخص تنش آبی سناریوهای اقلیمی RCP2.6,4.5,8.5

در دوره آماری (۲۰۳۱-۲۰۵۰) نیز مقدار شاخص تنش آبی در سناریوهای اقلیمی RCP2.6,4.5,8.5 در حوضه آبریز کل-مهران با مقدار عددی به ترتیب، ۱۸۶۳/۸۲، ۱۸۴۲/۴۹ و ۱۵۸۱/۶۷ مترمکعب و همچنین حوضه‌های آبریز بندرعباس-سدیج، کرخه، حله، جراحی-زهره در وضعیت عادی منابع آبی و





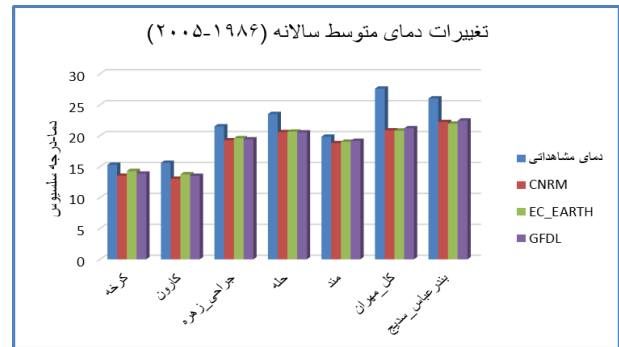
شکل ۹. تغییرات متوسط دمای سالانه مشاهده‌ای و سناریوهای سه مدل اقلیمی

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه از داده‌های بارش و دمای متوسط سالانه مشاهداتی حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان و داده‌های تاریخی و داده‌های سناریوهای اقلیمی پروژه CORDEX، به منظور محاسبه شاخص تنش آبی، برای اولین بار در ایران استفاده شد. مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر مدل دینامیکی مرکز هواشناسی و آب‌شناسی سوئد (SMHI) است. نتایج نشان داد که خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل اقلیمی GFDL، بیشترین همبستگی و مدل اقلیمی CNRM، کمترین میزان خطا را با داده‌های متغیر بارش مشاهداتی دارند. در ارتباط با متغیر اقلیمی دما، بیشترین همبستگی مربوط به دو مدل اقلیمی GFDL و CNRM و کمترین میزان برآورد خطا نیز مربوط به مدل GFDL به دست آمد. در ارتباط با شاخص تنش آبی در دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۳۰ و ۲۰۳۱-۲۰۵۰، سه مدل EC\_EARTH، CNRM و GFDL تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6, 4.5, 8.5، بهترین و بدترین وضعیت منابع آبی نسبت به پارامتر جمعیت را حوضه آبریز مند و کل-مهران نشان دادند. در ارتباط با پارامتر اقلیمی دما و شاخص تنش آبی نیز نتیجه کلی به این صورت است که در دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۳۰ و ۲۰۳۱-۲۰۵۰ پایدارترین حالت شاخص تنش آبی در تمامی سناریوهای سه مدل اقلیمی استفاده شده در این تحقیق، حوضه آبریز کارون و ناپایدارترین حوضه، بندرعباس-سدیح به دست آمد.

### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از مهندسان مشاور بهان سد وزارت نیرو-دفتر برنامه ریزی کلان آب و آبفا به دلیل تأمین داده‌های لازم برای تهیه این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

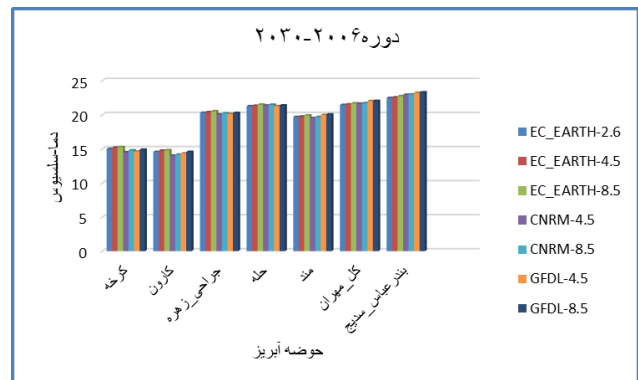


شکل ۷. تغییرات متوسط دمای سالانه مشاهده‌ای و تاریخی سه مدل اقلیمی

نتایج رابطه متغیر اقلیمی دما و شاخص تنش آبی برای

دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۳۰، به قرار زیر است:

در سناریوهای اقلیمی RCP2.6, 4.5, 8.5، مدل‌های اقلیمی EC\_EARTH، CNRM و GFDL، نشان دادند که حوضه آبریز مند در وضعیت ناپایدار، کرخه در وضعیت نسبتاً ناپایدار، جراحی-زهره در وضعیت بسیار ناپایدار، کارون در وضعیت نسبتاً ناپایدار و درنهایت سه حوضه آبریز انتهایی، حله، بندرعباس-سدیح و کل-مهران در وضعیت بسیار ناپایدار قرار می‌گیرند (شکل ۸).



شکل ۸. تغییرات متوسط دمای سالانه مشاهده‌ای و سناریوهای سه مدل اقلیمی

نتایج دوره آماری (۲۰۳۰-۲۰۵۰) نشان داد که در سناریوی

اقلیمی RCP2.6، مدل EC\_EARTH وضعیت ناپایدار حوضه آبریز مند با مقدار عددی ۱۹/۸ سلسیوس را بیان نموده است. سه مدل اقلیمی CNRM، EC\_EARTH و GFDL تحت سناریوهای RCP4.5, 8.5 پیش‌بینی نمودند که حوضه آبریز مند در وضعیت بسیار ناپایدار، حوضه کرخه در وضعیت نسبتاً ناپایدار، جراحی-زهره در وضعیت ناپایدار و کارون و سه حوضه آبریز حله، بندرعباس-سدیح و کل-مهران به ترتیب در وضعیت نسبتاً ناپایدار و بسیار ناپایدار شاخص تنش آبی قرار خواهند داشت (شکل ۹).

## REFERENCES

- Ababayi, B., Mirzayi, F., Souhrabi, T., (2014). The impact of population growth on domestic water demand from Taleghan reservoir under climate change scenarios. *Journal of Water and Sustainable Development*. 1(2), 91-100.
- Abbasi, F., Babayian, A., Malbousi, SH., Asmari, M., Golimikhtari, I., (2013). Assessment of Iran's Climate Change in the Decades (2025-2100) using The microscale of the data of the general circulation model of atmosphere. *Quarterly Journal of Geographic Survey*, Y 27, vol1, Spring 2012, No. 104
- Abiodun, J., Adegoke, J., Abatan, A., Ibe, C., Egbebiyi, T., Engelbrecht, F., Pinto, I., (2017). Potential impacts of climate change on extreme precipitation over four African coastal cities. *Climatic Change*, 143, 399-413.
- Christensen, O. B., Gutowski, W. J., Nikulin, G., & Legutke, S. (2012). *CORDEX Archive Design. Version 26/1/2012*.
- Falkernmark, M. and Widstrand, C. (1992) "Population and water resources: a delicate balance." *Population Bulletin*, 47(3), 1-36
- Greve, P., Gudmundsson, L., Orlowsky, B., Seneviratne, S. I. (2016). A two-parameter Budyko function to represent conditions under which evapotranspiration exceeds precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 20 (6), 2195-2205.
- Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G.R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(3), 175
- Grey, D. and Garrick, D. (2012). 'Water security as a defining of 21st century challenge. Water Security, Risk and Society Conference. . *Environ. Sci. Technol*, 37, 3048-3054
- Lobell, D., Burke, M., Tebaldi, C., Mastrandera, M., Falcon, W., and Naylor, R. (2008). Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*. 319 (5863), 607-610.
- Miyanabadi, A., Alizadeh, A., Sanayinezhad, A., GHahreman, B., Davari, K., (2016). Estimates of annual evaporation variations in arid areas using the modified framework Badiko (Case study: Neyshabur Basin) *Iranian Journal of Irrigation and Drainage No. 3, Vol. 10, Jul.-Agu. 2016, p. 398-41*
- Parhikari, A., (2012). Determining the economic value of irrigation water and farmers' response to precious and non-price policies in Qazvin province. *University of Zabol*.
- Samadi, S., K. Ehteramian and B. Sari Sarraf. (2011). SDSM ability in simulate predictors for climate detecting over Khorasan province. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 19, 741-749
- Taylor, K. E., Balaji, V., Hankin, S., Juckes, M., Lawrence, B., & Pascoe, S. (2011). *CMIP5 data refrence syntax (DRS) and controlled vocabularies*.