

## Investigating the effects of climate change on the potential of water harvesting from air humidity under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

Ramezani Etedali, H.<sup>1</sup>  | Koohi, S.<sup>2</sup>  | Partovi, Z.<sup>3</sup> 

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: [Ramezani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

2. PhD student of water resources engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: [sakine.koohi3731@gmail.com](mailto:sakine.koohi3731@gmail.com)

3. PhD student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: [zahra73.partoviii@gmail.com](mailto:zahra73.partoviii@gmail.com)

(Received: 19 Sep 2023, Revised: 7 Oct 2023, Accepted: 11 Oct 2023, Published online: 11 Oct 2023)

### Abstract

Extracting water from air humidity as one of the new and sustainable methods for providing water resources in areas with a lack of natural water resources and also in the conditions of drought is of great importance. Considering the influence of the amount of water that can be extracted from air humidity on changes in meteorological variables such as air temperature, wind speed and air humidity, therefore the potential of water extraction from air humidity can be strongly affected by climate changes. Therefore, the current research has been carried out with the aim of investigating the potential changes of water extraction from air humidity under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios from the fifth climate change report. The results in the base period showed that the climate models have a suitable efficiency for investigating the potential of water extraction from air humidity, so that the average correlation index at the level of study stations is more than 0.67 and the value of the RMSE error index is 1.83 liters per square meter in The day is limited to In addition, the monitoring of water extraction conditions from air humidity under climate scenarios in the coming periods indicates the existence of an increasing trend at the 95% confidence level in the amount of water that can be extracted from air humidity, such as the value of Menkendall's non-parametric test under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. In the periods of 2026-2050 and 2076-2100, it is estimated to be more than 1.64. In general, based on the results, it was found that the northwest region of the study area has the greatest potential for the implementation of water extraction projects from air humidity. Therefore, due to the occurrence of global warming in recent years, the increase in water needs in different sectors and the consequent increase in pressure on the available water resources, the need to pay attention to this water source, planning and taking serious action for its use is felt more than ever. The results of the present research can be useful in planning for the sustainable management of water resources under the influence of global warming.

**Keywords:** Unconventional Water, Global Warming, Water Harvesting, Climate Scenarios, CMIP5.

**Cite this article:** Ramezani Etedali, H., Koohi, S., & Partovi, Z. (2023). Effects of climate change on the potential of water harvesting from air humidity under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. *Journal of the Nivar*, 47(122-123), 63-81. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.417155.1264>



## بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

هادی رضانی اعتدالی<sup>۱</sup> | سکینه کوهی<sup>۲</sup> | زهرا پرتوی<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه:

[Ramezani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

۲. دانشجوی دوره دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

رایانامه: [sakine.koohi3731@gmail.com](mailto:sakine.koohi3731@gmail.com)

۳. دانشجوی دوره دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

رایانامه: [zahra73.partoviii@gmail.com](mailto:zahra73.partoviii@gmail.com)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹)

### چکیده

استحصال آب از رطوبت هوا به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و پایدار برای تأمین منابع آب در مناطق با کمبود منابع آب طبیعی و همچنین در شرایط وقوع خشکسالی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به تأثیرپذیری کمیت آب قابل استحصال از رطوبت هوا از تغییرات متغیرهای جوی هواشناسی همچون دمای هوا، سرعت باد و رطوبت هوا، بنابراین پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا می‌تواند به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار بگیرد. لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 از گزارش پنجم تغییر اقلیم به انجام رسیده است. نتایج در دوره پایه نشان داد که مدل‌های اقلیمی از کارایی مناسبی برای بررسی پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا برخوردار می‌باشند به طوری که متوسط شاخص همبستگی در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی بیش از ۰/۶۷ و مقدار شاخص خطای RMSE به ۱/۸۳ لیتر بر متر مربع در روز به محدود شده است. علاوه بر این پایش شرایط استحصال آب از رطوبت هوا تحت سناریوهای اقلیمی در دوره‌های آتی حاکی از وجود روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد در مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا است، چنانکه مقدار آماره آزمون ناپارامتری من‌کندال تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های ۲۰۵۰-۲۰۲۶ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ بیش از ۱/۶۴ برآورد شده است. بطور کلی، براساس نتایج مشخص شد که منطقه‌ی شمال‌غرب محدوده مطالعاتی از بیشترین پتانسیل برای اجرای طرح‌های استحصال آب از رطوبت هوا برخوردار می‌باشد. بنابراین با توجه به وقوع گرمایش جهانی در سال‌های اخیر، افزایش نیازهای آبی در بخش‌های مختلف و به تبع افزایش فشار بر منابع آب موجود، لزوم توجه به این منبع آبی، برنامه‌ریزی و اقدام جدی به‌منظور کاربرد آن بیش از پیش احساس می‌شود. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در راستای برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب تحت تأثیر گرمایش جهانی مفید باشد.

**کلمات کلیدی:** آب نامتعارف، گرمایش جهانی، استحصال آب، سناریوهای اقلیمی، CMIP5.

### ۱. مقدمه

یکی از فراوان‌ترین منابع طبیعی موجود در سطح کره زمین، آب می‌باشد. به طور متوسط ۷۵ درصد سطح کره زمین از آب تشکیل شده است که تنها ۳ درصد آن را منابع آب شیرین تشکیل داده است. از این مقدار آب شیرین کمتر از ۱ درصد در آب‌های سطحی و زیرزمینی و ۲ درصد آن به صورت یخچال‌های طبیعی در سطح زمین وجود دارد (موسوی بیگی، ۲۰۰۸). از سوی دیگر حدود ۴ میلیارد نفر در جهان با کمبود منابع آبی مواجه می‌باشند که از این تعداد ۵۰۰ میلیون نفر با کمبود جدی منابع آبی روبرو می‌باشند و به‌طور مداوم نیز بر تعداد آن‌ها افزوده می‌شود (مکونن و هوکسترا، ۲۰۱۶). این

**استناد:** رضانی اعتدالی، هادی؛ کوهی، سکینه؛ و پرتوی، زهرا. (۱۴۰۲). تأثیرات تغییر اقلیم بر پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5. مجله نیوار، ۴۷(۱۲۲-۱۲۳)، ۶۳-۸۱. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.417155.1264>



روزهای بعدی در حالت پایدار ۴ کیلوگرم آب تولید شد. این نتایج تجربی نشان می‌دهد که در روزهای اول به علت اینکه مقداری آب، صرف خیس شدن محیط داخلی لوله شده است، مقدار آب به دست آمده کمتر بوده و به مرور افزایش می‌یابد. محمودی و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه امکان‌سنجی استحصال آب از رطوبت هوا در جنوب استان سیستان و بلوچستان پرداختند. نتایج حاصل از محاسبات تئوری نشان داد که منطقه به علت میانگین رطوبت نسبی بالا، از پتانسیل لازم برای اجرای هر گونه طرح استحصال آب از رطوبت هوا برخوردار می‌باشد. برای محاسبات عملی مقدار آب استحصالی از رطوبت هوا، یک جمع‌کننده پرده‌ای به ابعاد ۱\*۱ متر مربع طراحی و به مرحله اجرا گذاشته شد. مقدار آب استحصالی از این جمع‌کننده به صورت روزانه و به مدت ۳۶۵ روز (از اول مهر ۱۳۹۰ تا پایان شهریور ۱۳۹۱) دیده‌بانی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که سواحل جنوب شرقی ایران به علت میانگین رطوبت نسبی بالا، مستعد اجرای طرح‌های استحصالی برای برداشت آب است.

کریم‌پورریحان و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی به مکان‌یابی برای اجرای پروژه‌های استحصال آب از رطوبت هوا در استان بوشهر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS پرداختند. در این تحقیق پس از تهیه داده‌های هواشناسی، لایه‌های ایجاد شده در GIS با روش بولین وزندهی شده و در نهایت پس از تلفیق نقشه‌ها، مکان‌های مناسب جهت انجام پروژه‌های استحصال آب تعیین شد. در انتها نیز با قرار دادن لایه‌های ساخته شده بر روی یکدیگر، منطقه مناسب برای ماه‌های مدنظر نیز مشخص شدند. شی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی و ارائه روشی به منظور استحصال آب از رطوبت هوا پرداختند. در این تحقیق طراحی و تولید استحصال‌کننده‌ای که شامل مجموعه‌ای از سیم‌های عمودی با نام "هارپ‌های مه" است، انجام پذیرفت و در شرایط آزمایشگاهی تحت کنترل، میزان استحصال مه برای هارپ‌های مه با سه قطر سیم متفاوت با مش‌های متداول از ابعاد برابر مقایسه شد. نتایج نشان داد در سیستم مش‌بندی، سیم‌های متوسط دارای بیشترین میزان جمع‌آوری مه بودند. در مقابل، در هارپ‌های مه میزان استحصال شده، با کاهش قطر سیم، به طور مداوم افزایش یافت. این موضوع باعث افزایش ۳ برابری در میزان

مساله کمبود منابع آب شیرین را به وضوح آشکار می‌سازد. بنابراین، کمبود منابع آبی یک چالش جدی در سطح جهان به ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود که می‌تواند از تاثیرات نامطلوبی بر جوامع و محیط‌زیست برخوردار باشد (سازمان ملل متحد، ۲۰۰۶). در حال حاضر بسیاری از کشورهای جهان با بحران آب مواجه هستند (کومار و یاداو، ۲۰۱۵). کشور ایران نیز در کمربند خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است، از این رو دسترسی به منابع آب شیرین و نزولات جوی در آن اندک می‌باشد. از سوی دیگر علی‌رغم وجود این محدودیت‌ها، تأمین آب برای تأمین نیازهای آبی جامعه و توسعه پایدار اجتناب‌ناپذیر است. استفاده بهینه از منابع آبی موجود و تلاش برای دستیابی به منابع آبی جدید از جمله راهکارها به منظور مقابله با چالش کم‌آبی به شمار می‌روند. در میان روش‌های دستیابی به منابع آبی جدید، استحصال آب از رطوبت هوا را می‌توان نام برد که در سال‌های اخیر مورد استقبال و توجه پژوهشگران در سرتاسر دنیا قرار گرفته است. به هرگونه فعالیتی که بخار آب موجود در جو را متراکم نماید استحصال آب از رطوبت هوا گفته می‌شود (ناسیمنتو پرادا و الیورا، ۲۰۰۱). با توجه به آنکه بخار هوا می‌تواند حتی شامل بیش از ۱۴۰۰۰ کیلوگرم مکعب بخار آب باشد، بنابراین هوا می‌تواند به عنوان یکی از منابع پایدار آب نیز به شمار برود (هامد و همکاران، ۲۰۱۱). از جمله مزایای موجود در این روش می‌توان به هزینه کم، تکنولوژی ساده و قابل دسترس، استحصال آب با کیفیت مناسب و در نهایت پایداری منبع آب برای سال‌های متمادی اشاره نمود (بنی حبیب و همکاران، ۲۰۱۷).

بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد که کشورهای زیادی از جمله شیلی، پرو، اکوادور، کانادا، نامیبیا و نیپال بر روی استحصال آب از مه سرمایه‌گذاری کرده‌اند. همچنین تحقیقات مختلف و متعددی در این زمینه انجام شده که منجر به معرفی روش‌های متنوع استحصال آب از هوا و مه شده است. به عنوان مثال، یوسفی و برومندنسب (۲۰۱۵) در دانشگاه شهید چمران اهواز به صورت آزمایشگاهی به بررسی میزان استحصال آب از بخار آب پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که سیستم‌های چگالشی، در ۲۵ متر لوله طی ۸ ساعت در روز اول حدود ۲ کیلوگرم و در

تغییرات متغیرهای هواشناسی همچون دما، سرعت باد و رطوبت هوا از تاثیر بالایی بر کمیت آب قابل استحصال از رطوبت هوا برخوردار است.

از سوی دیگر در سال‌های اخیر با افزایش تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای و وقوع گرمایش جهانی، تغییر اقلیم به یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در بسیاری از نقاط دنیا تبدیل شده است و نگرانی‌های بسیاری نیز در رابطه با اثرات این پدیده بر بخش‌های مختلف بوجود آمده است (هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). به طوری که پیش‌بینی شده است در صورت ادامه روند گرمایش زمین تا پایان سال ۲۰۵۰ دمای هوا با افزایش ۱/۵ درجه سانتی‌گرادی همراه خواهد بود (ژیانگ و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجاییکه تغییر در متغیرهای هواشناسی یکی از نمودهای تغییر اقلیم به شمار می‌رود؛ بنابراین تغییر در هر یک از متغیرهای مذکور می‌تواند شرایط استحصال آب از هوا را تحت تاثیر قرار دهد. به همین دلیل شناخت و بررسی امکان استحصال آب از رطوبت هوا در آینده و تحت تاثیر تغییرات اقلیمی از اهمیت بالایی در تأمین و برنامه‌ریزی منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی، مدیریت خشکسالی و بحران‌های آبی برخوردار خواهد بود. همچنین بررسی این مقدار می‌تواند در مدیریت صحیح و پایدار منابع آب و حفظ تعادل اکولوژیکی ارزشمند باشد. لذا با توجه به توضیحات فوق، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا به بررسی و امکان‌سنجی استحصال آب از هوا تحت سناریوهای اقلیمی پرداخته شود. لازم بذکر است که پژوهش پیش‌رو براساس داده‌های اقلیمی گزارش پنجم (CMIP5) تغییر اقلیم و تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۵ به‌عنوان دوره مشاهداتی به انجام رسیده است و تغییرات آتی طی سه دوره آماری مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. مواد و روش‌ها

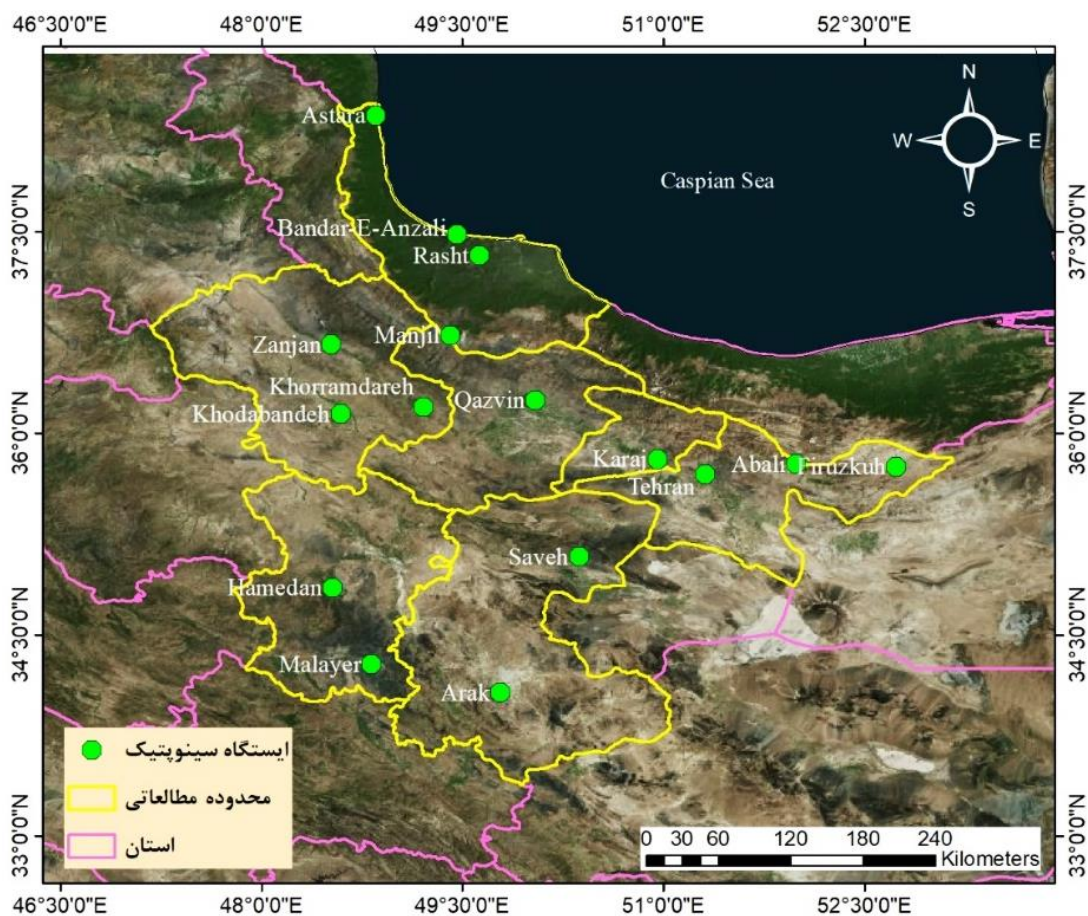
### ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

پژوهش پیش‌رو در سطح ۱۶ ایستگاه سینوپتیک واقع در محدوده شمال و شمال‌غرب کشور به انجام رسیده است. این منطقه در محدوده جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه

استحصال مه برای طرح هارپ در مقایسه با سیستم مش‌بندی شده است. گاندیسان و همکاران (۲۰۱۸) به مدل‌سازی و آنالیز سیستم استحصال آب از مه در منطقه‌ای از عربستان سعودی پرداختند. در این تحقیق جمع‌کننده مه از نوع مش منفذی به‌منظور پیش‌بینی میزان جمع‌آوری آب مه از طریق ترکیب مدل‌های حرارتی و آیرودینامیکی، مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که سرعت باد بیشتر و اندازه بزرگتر قطره مه، حجم بیشتری از آب مه را نتیجه می‌دهد. همچنین بازده آیرودینامیکی در مقایسه با بازدهی حرارتی، تأثیر قابل توجهی بر بازده کل جمع‌کننده دارد. این مدل نشان داد که برای قطره مه با قطر ۳۰ میکرومتر و در سرعت باد ۴ متر در ثانیه می‌توان با نرخ ۰/۶۵ تا ۹/۷ لیتر بر مترمربع بر ساعت آب جمع‌آوری نمود. موریچی و همکاران (۲۰۱۸) روش‌های نوین کاربرد آب از مه را بیان کردند. در این تحقیق، کاربردهای مختلف استحصال آب از مه، علاوه بر میزان آب شیرین موجود، برای آب مورد نیاز با هدف احیای جنگل و کشاورزی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. سلیمانی و شکریمان (۲۰۲۰) به مکان‌یابی مناطق مستعد استحصال آب از مه در بالادست حوضه آبخیز وازرود در مازندران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش از دور پرداختند. نتایج حاصل پس از وزن‌دهی متغیرهای مختلف هواشناسی و محیطی نشان داد که مناطق جنوب‌شرقی، جنوب و جنوب‌غربی این حوضه از الویت بیشتری برای استحصال آب از مه برخوردار می‌باشند. همچنین مشخص شد که داده‌های سنجش از دوری دارای پتانسیل بالایی برای مکان‌یابی و زمانی‌یابی به‌منظور استحصال آب از مه است. وانگ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی روش‌های مختلف موجود برای استحصال آب از هوا در مناطق خشک پرداختند. آن‌ها دریافتند که روش استخراج آب از هوا (EWA) برای تأمین آب در مقیاس بزرگ (تا ۱۰۰۰ متر مکعب در روز) طراحی شده است. در فناوری EWA رطوبت هوا در سه مرحله، جذب رطوبت روی یک ماده خشک‌کننده جامد، تبخیر آب در دمای متوسط و چگالش با کندانسور غیرفعال متصل به یک پمپ حرارتی استخراج می‌شود. فناوری EWA یک گزینه معقول برای تحویل آب در مکان‌های خشک به شمار می‌رود. همانطور که مشخص است

مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا استفاده شده است. همچنین با توجه به اطلاعات موجود از ایستگاه‌های سینوپتیک، مطالعه طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۹۱ به عنوان دوره پایه صورت پذیرفته است. علاوه بر این، مقادیر آب قابل استحصال از رطوبت هوا برای ایستگاه‌ها طی سه دوره آتی که عبارتند از ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت محدوده و ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه نشان داده شده است.

و ۲۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵۵ دقیقه قرار گرفته است. منطقه مطالعاتی شامل استان‌های قزوین، زنجان، همدان، گیلان، مرکزی، تهران و البرز می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است تا ایستگاه‌های منتخب به نحوی انتخاب شوند که در مناطق با شرایط جغرافیایی متنوع از نظر پارامترهای هواشناسی واقع شوند. در پژوهش حاضر از مقادیر متوسط دمای هوا و سرعت باد (براساس معادله مورد استفاده برای تخمین مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا) ایستگاه‌های سینوپتیک برای محاسبه



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران

## ۲-۲. داده‌های اقلیمی مورد استفاده

انتشار گازهای گلخانه‌ای را در نظر می‌گیرند، به همین دلیل ابزار مهمی برای کمک به درک بهتر از چگونگی تغییرات اقلیمی در آینده، تاثیر آن بر شرایط کره زمین و برنامه‌ریزی برای انجام اقداماتی با هدف کاهش اثرات مخرب تغییرات اقلیمی به شمار می‌روند. در مطالعه حاضر از داده‌های دما و سرعت باد مربوط به

سناریوهای انتشار اقلیمی بر اساس آنچه که انسان‌ها و صنایع ممکن است در آینده در زمینه تولید گازهای گلخانه‌ای به وجود بیاورند، تهیه می‌شوند. این سناریوها به ما در زمینه انجام پیش‌بینی‌هایی در رابطه با آینده اقلیمی کره زمین کمک می‌کنند. از آنجاییکه سناریوهای انتشار، اطلاعات تاثیرگذار بر

که در آن P فشار بخار آب بر حسب میلی بار یا هکتوپاسکال، T دمای هوا بر حسب درجه سانتی گراد می باشد.

با توجه به آنکه از داده های هواشناسی با گام زمانی روزانه برای محاسبه مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا استفاده شده است بنابراین واحد حجم آب قابل استحصال لیتر در روز در متر مربع است. از آنجاییکه جمع آوری تمام آب قابل استحصال محاسباتی امکان پذیر نبوده و مقدار کارایی سیستم استحصال برای استحصال رطوبت هوا به عوامل مختلفی از جمله جنس دستگاه مورد استفاده بستگی دارد (قیاسی و همکاران، ۲۰۲۲)؛ در تحقیق حاضر مقدار ضریب کارایی سیستم استحصال در دوره پایه و با توجه به مقدار آب قابل استحصال محاسباتی با استفاده از داده های مشاهداتی مورد بهینه سازی قرار گرفت، سپس از ضریب کارایی بهینه شده برای هر ایستگاه و مدل اقلیمی به منظور محاسبه تغییرات آبی مقدار آب قابل استحصال (براساس داده های اقلیمی) استفاده شده است. لازم بذکر است که در این تحقیق، حداقل نمودن شاخص خطای RMSE به عنوان تابع هدف برای بهینه سازی ضریب کارایی استحصال در نظر گرفته شده است. برای این منظور از الگوریتم Evolutionary مربوط به تابع بهینه سازی Solver در نرم افزار Excel استفاده شده است. الگوریتم Evolutionary یکی از الگوریتم های بهینه سازی فراشناختی مبتنی بر ازدحام جمعیت است. این الگوریتم در شاخه ای از هوش مصنوعی قرار می گیرد و شامل الگوریتم هایی است که در آن ها جستجو از چندین نقطه در فضای جواب آغاز می شود (ژیا و همکاران، ۲۰۱۳). از تفاوت های این الگوریتم با سایر روش های بهینه سازی می توان به این مورد اشاره نمود که در این الگوریتم تنها یک نقطه مورد جستجو قرار نمی گیرد، بلکه جمعیتی از نقاط به طور همزمان مورد بررسی قرار خواهند گرفت. لازم بذکر است که در این تحقیق براساس مطالعات گذشته مقدار ۲۰ درصد برای محاسبه مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوای مشاهداتی در نظر

مدل های GFDL-ESM2M، CCSM4 و CNRM-CM5 و تحت سناریوهای RCP4.5 (سناریوی متوسط اقلیمی) و RCP8.5 (سناریوی بدبینانه اقلیمی) از پروژه CORDEX<sup>1</sup> استفاده شده است. هدف از توسعه پروژه CORDEX ارائه مجموعه اقلیمی ریزمقیاس شده در دقت های مکانی ۰/۴۴، ۰/۲۲ و در برخی از مناطق ۰/۱۱ درجه و گام های زمانی ۳ ساعته، ۶ ساعته، روزانه، ماهانه و فصلی می باشد (جیورجی و گوتوسکی، ۲۰۱۶). علت انتخاب مدل های اقلیمی مذکور، محدودیت در مدل های ارائه دهندهی متغیری همچون سرعت باد می باشد. دریافت داده های اقلیمی از سایت <https://cds.climate.copernicus.eu> انجام شده است.

### ۲-۳. محاسبه مقدار آب قابل استحصال

در این پژوهش برای محاسبه مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا از روابط ۱ و ۲ (علیزاده، ۲۰۱۰؛ محمودی و همکاران، ۲۰۱۶؛ قیاسی و همکاران، ۲۰۲۲) استفاده شده است.

$$Q_{w-air} = AH \times U \times A \times t \times E \quad (1)$$

$$AH = P \left( \frac{216}{98} \right) \quad (2)$$

که در آن  $Q_{w-air}$  مقدار آب قابل استحصال بر حسب لیتر در روز بر مترمربع، AH رطوبت مطلق بر حسب گرم بر مترمکعب، U سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، A واحد سطح بر حسب مترمربع، t زمان بر حسب ثانیه، E کارایی سیستم استحصال آب و مقدار درصد تبدیل آب موجود در هوا به آب، T دمای هوا بر حسب درجه کلونین و P فشار بخار در ایستگاه بر اساس میلی بار می باشد.

لازم بذکر است که در پژوهش حاضر برای محاسبه فشار بخار آب از رابطه ۳ (موری، ۱۹۶۷) استفاده شده است، این معادله محدوده دمایی بین ۴۰- تا ۵۰+ درجه سانتی گراد معتبر است که اکثر شرایط جوی را پوشش می دهد (موری، ۱۹۶۷).

$$P = 6 / 1078 \times 10^{((v/5 \times T) / (T + 237/3))} \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

در مرحله بعد لازم است که مقدار واریانس با توجه به تعداد داده‌های سری زمانی توسط روابط ۶ یا ۷ محاسبه شده و سپس مقدار آماره Z با رابطه ۸ محاسبه گردد.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

که در آن m بیانگر تعداد سری‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد و t معرف فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله می‌باشند.

در این آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد، قرارگیری مقدار آماره آزمون (Z) در محدوده -۱/۶۴ تا ۱/۶۴ حاکی از عدم وجود روند در سری زمانی داده، افزایش مقدار آماره به بیش از ۱/۶۴ نشان‌دهنده وجود روند افزایشی و کاهش مقدار Z به کمتر از -۱/۶۴ بیانگر وجود روند کاهشی در داده‌ها است.

## ۲-۵. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده

در این پژوهش حاضر از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (CC<sup>1</sup>) (پیرسون، ۱۸۹۶)، جذر میانگین مربعات خطا

گرفته شده است (قیاسی و همکاران، ۲۰۲۲؛ محمودی و همکاران، ۲۰۱۶).

ذکر این نکته لازم است که در تحقیق حاضر برای بررسی تغییرات مکانی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا از روش Ordinary Kriging استفاده شده است. در روش مذکور برای جلوگیری از انحراف در تعیین داده‌ها یک شرط دیگر (مجموع وزن‌ها برابر ۱) اضافه می‌شود، به این ترتیب خروجی حاصل از کمترین انحراف از معیار برخوردار است. به عبارت دیگر در این روش مقدار میانگین ثابت ولی مجهول در نظر گرفته می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸).

## ۲-۴. آزمون روند ناپارامتری Mann-Kendall

در این مطالعه برای بررسی روند تغییرات مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا تحت سناریوهای اقلیمی از آزمون روند توسط من کندال استفاده شده است. آزمون ناپارامتری که توسط من و کندال ارائه و تکمیل شد، بر مبنای مرتبه داده‌ها می‌باشد (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۵؛ ملکی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۳؛ مصطفی‌زاده و مهری، ۲۰۱۸). از این آزمون برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در برابر وجود روند مثبت یا منفی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طوری که فرض صفر در این آزمون عدم وجود روند در داده‌ها و فرض یک وجود روند مثبت یا منفی می‌باشد. در روش من کندال برخلاف سایر روش‌های پارامتری فرض بر پیروی داده‌ها از توزیع خاصی وجود ندارد. برای استفاده از این روش لازم است که در ابتدا اختلاف بین هر جفت از داده‌ها محاسبه شده و پارامتر S با استفاده از رابطه ۴ به دست آید.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات سری،  $X_k$  و  $X_j$  به ترتیب داده‌های ژام و kام سری،  $\text{sgn}(x_j - x_k)$  تابع علامت می‌باشند. تابع علامت با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در تخمین مقدار آب قابل استحصال در دوره تاریخی

در این بخش عملکرد مدل‌های اقلیمی مورد مطالعه به منظور تخمین مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۲ نمودار ماتریسی شاخص‌های آماری  $CC$ ،  $MBE$  و  $RMSE$  بین مقدار آب قابل استحصال به دست آمده از مدل‌های اقلیمی نسبت به مقادیر محاسباتی براساس داده‌های مشاهداتی در دوره پایه برای هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده مقدار متوسط شاخص  $CC$  در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی برای مدل‌های  $CNRM$ ،  $GFDL$  و  $CCSM4$  به ترتیب معادل  $۰/۷۰$ ،  $۰/۶۹$  و  $۰/۶۷$  است که نشان می‌دهد مقادیر آب قابل استحصال به دست آمده براساس داده‌های اقلیمی از همبستگی قابل قبولی با مقادیر مشاهداتی برخوردار است. براساس نتایج، بیشترین همبستگی بین داده‌های اقلیمی و مشاهداتی در ایستگاه‌های منجیل، خدابنده، فیروزکوه، قزوین و زنجان وجود دارد، به طوری که مقدار ضریب همبستگی در ایستگاه‌های مذکور به ازای مدل‌های اقلیمی مورد مطالعه بیش از  $۰/۸۰$  تخمین زده شده است. این در حالی است که میزان شاخص  $CC$  در ایستگاه‌های همدان، رشت و ساوه به  $۰/۴۵$  محدود شده است. ارزیابی نتایج براساس شاخص  $MBE$  گویای این مطلب است که میزان اریبی داده‌ها نسبت به مقادیر مشاهداتی در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی به غیر از منجیل قابل قبول می‌باشد. میزان شاخص  $MBE$  در ایستگاه منجیل به ازای کاربرد داده‌های اقلیمی  $CNRM$ ،  $GFDL$  و  $CCSM4$  به ترتیب معادل است با  $-۳/۸۴$ ،  $-۴/۰۵$  و  $۴/۱۶$  لیتر بر متر مربع در روز که حاکی از بالا بودن میزان اریبی مقادیر آب قابل استحصال محاسباتی براساس داده‌های اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی است. در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار اریبی داده‌های مبتنی بر مدل‌های اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی قابل قبول ارزیابی می‌شود. به عنوان مثال،

$(RMSE^1)$  (هیندمن و کوهلر، ۲۰۰۶)، میانگین انحراف خطا  $(MBE^2)$  (استانسی و همکاران، ۱۹۸۹) انحراف از معیار  $(SD^3)$  (پیرسون، ۱۸۹۴) و ضریب تغییرات  $(CV^4)$  (برون، ۱۹۹۸) برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در دوره پایه استفاده شده است. معادلات مورد استفاده برای هر یک از شاخص‌های فوق، محدوده تغییرات و مقدار بهینه آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. شاخص‌های آماری ارزیابی مورد استفاده در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی مقدار آب قابل استحصال

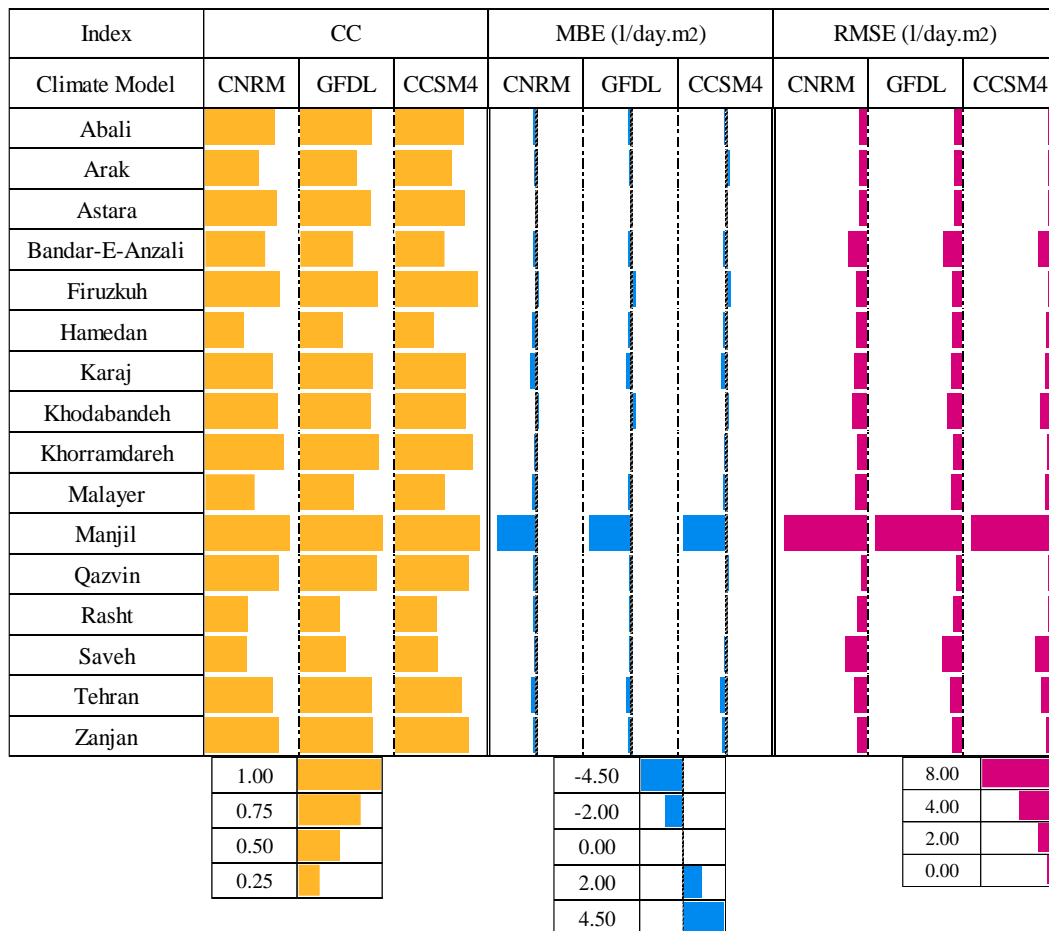
Indices	Equation
$CC$	$\frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(R_i - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}}$
$RMSE$	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - R_i)^2}$
$MAE$	$\frac{\sum_{i=1}^N (R_i - G_i)}{N}$
$SD$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}{N-1}}$
$CV$	$\frac{SD}{\bar{G}}$

که در آن،  $G_i$ : مقادیر داده‌های اقلیمی،  $R_i$ : مقادیر مشاهداتی،  $N$ : تعداد داده‌ها،  $\bar{G}$ : متوسط داده‌های اقلیمی،  $\bar{R}$ : متوسط مقادیر مشاهداتی است.



مشاهداتی در ایستگاه منجیل، خطای داده‌های مذکور در این ایستگاه بیش از سایر ایستگاه‌ها برآورد شده است. از دلایل این مورد می‌توان به وزش بادهای نسبتاً شدید در منطقه منجیل اشاره نمود، به طوری که باد محلی در این منطقه در بهار و تابستان با فراوانی بیشتر و در پاییز و زمستان با فراوانی کمتری می‌وزد. در پژوهشی که توسط نیک‌اندیش و اکبری قمصری (۲۰۱۹) انجام شد، متوسط سرعت باد در ایستگاه منجیل طی دوره زمانی ۲۰ ساله (۱۹۹۳ تا ۲۰۱۴) ۶ متر بر ثانیه برآورد شد. همچنین نشان داده شد که در ۹۰/۵ درصد از سال، این منطقه شاهد وزش باد با شدت‌ها و جهت‌های مختلف است و تنها در ۹/۵ درصد از مواقع باد با سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه در منطقه حاکم است.

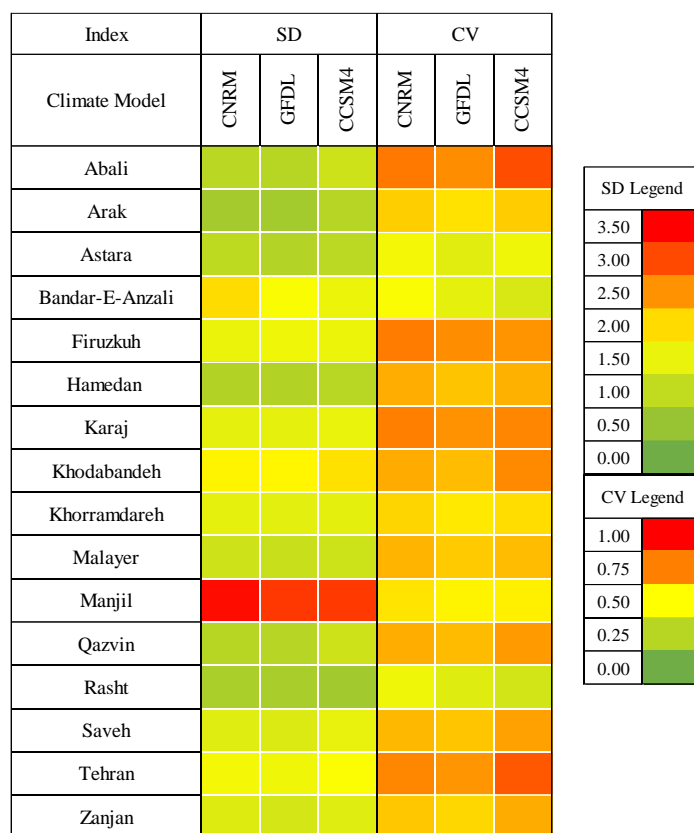
محدوده تغییرات شاخص MBE برای مدل‌های CNRM، GFDL و CCSM4 به ترتیب ۰/۵۵- تا ۰/۱۶، ۰/۴۴- تا ۰/۳۶ و ۰/۵۷ تا ۰/۳۴ لیتر بر متر مربع در روز است. ارزیابی شاخص خطای RMSE نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل‌های اقلیمی در سطح تمام ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه سینوپتیک منجیل می‌باشد، به طوری که مقدار شاخص RMSE- برای مدل‌های CNRM، GFDL و CCSM4 به ترتیب به ۱/۸۳، ۱/۷۴ و ۱/۸۲ لیتر بر متر مربع در روز محدود شده است. در حالی که مقدار شاخص خطا در ایستگاه منجیل به ازای کاربرد مدل‌های اقلیمی مذکور معادل است با ۷/۱۴، ۷/۵۴ و ۷/۵۲ لیتر بر متر مربع در روز. بنابراین، علی‌رغم همبستگی قابل قبول مقادیر آب قابل استحصال محاسباتی مبتنی بر داده‌های اقلیمی نسبت به مقادیر



شکل ۲. نمودار ماتریسی شاخص‌های CC، RMSE و MBE در تخمین مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در دوره پایه

ضریب CV در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برای مدل‌های CNRM، GFDL و CCSM4 به ترتیب برابر است با ۰/۶۳، ۰/۵۹ و ۰/۶۰. در حالی که بررسی مطالعات مختلف نشان دادند که تفاوت قابل توجهی در عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی (سانگ و همکاران، ۲۰۲۰) و شاخص‌های خشکسالی (کوهی و رمضانی اعتدالی، ۲۰۲۲) وجود دارد. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که علی‌رغم تفاوت در کارایی و عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی متغیرهای جوی، بهینه‌سازی ضریب کارایی استحصال برای محاسبه مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در این پژوهش، علاوه بر کاهش خطا در تخمین میزان آب قابل استحصال، با کاهش قابل توجه در پراکندگی داده‌ها و در نتیجه عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی مختلف همراه بوده است.

در این بخش، به منظور بررسی پراکندگی داده‌های اقلیمی و عدم قطعیت مدل‌های مطالعاتی شاخص‌های SD و CV محاسبه و در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که انحراف از معیار داده‌های مبتنی بر مدل‌های اقلیمی در ۳۰ درصد از ایستگاه‌های مطالعاتی کمتر از ۱ لیتر بر متر مربع در روز و در ۵۶ درصد از ایستگاه‌های مطالعاتی در محدوده ۱ تا ۲ لیتر بر متر مربع در روز می‌باشد. همانطور که مشخص است بیشترین انحراف از معیار در مقادیر آب قابل استحصال ایستگاه سینوپتیک منجیل وجود دارد، به طوری که مقدار شاخص در ایستگاه منجیل به ازای کاربرد مدل‌های اقلیمی CNRM، GFDL و CCSM4 به ترتیب ۳/۴۲، ۳/۱۲ و ۳/۱۴ لیتر بر متر مربع در روز تخمین زده شده است. بررسی ضریب تغییرات CV حاکی از عملکرد مشابه هر سه مدل مطالعاتی در ایستگاه‌ها می‌باشد. مقدار متوسط



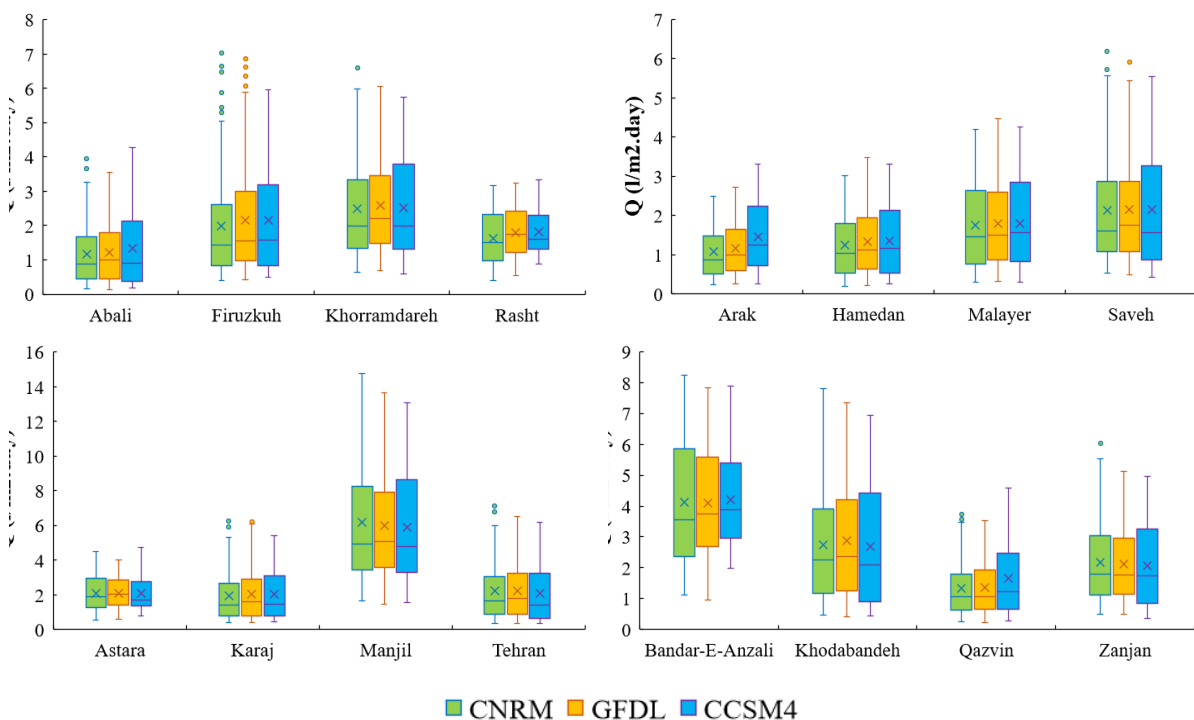
شکل ۳. نمودار ماتریسی شاخص‌های CV و SD در تخمین مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در دوره پایه

بیشتر ایستگاه‌های مذکور به ازای مدل‌های اقلیمی مورد مطالعه به ۳ لیتر در متر مربع در روز محدود شده است. در حالی که در ایستگاه‌های منجیل و بندرانزلی تغییرات میزان آب قابل

از رطوبت هوا به ترتیب به ۸ و ۶ لیتر در متر مربع در روز نیز رسیده است. علاوه بر این، محدوده تغییرات و عدم قطعیت مقادیر آب قابل استحصال به ازای مدل اقلیمی CCSM4 بیش از مدل‌های CNRM و GFDL می‌باشد.

در شکل ۳ نمودار جعبه‌ای مقادیر آب قابل استحصال محاسباتی براساس مدل‌های اقلیمی برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه ارائه شده است. براساس نتایج در دوره پایه پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا در ایستگاه‌های رشت، آبدلی،

اراک، قزوین، آستارا، کرج و تهران به مراتب کمتر از سایر ایستگاه‌ها است. به‌عنوان مثال، مقدار آب قابل استحصال در



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا محاسباتی توسط مدل‌های اقلیمی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه

به دوره پایه تحت سناریوی اقلیمی RCP4.5 در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی است. علاوه بر این روند تغییرات مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در فصل بهار از شیب تندتری نسبت به زمستان برخوردار است. در حالی که شیب افزایش پتانسیل آب قابل استحصال در فصل تابستان کندتر و بعضاً دارای روندی نسبتاً کاهشی می‌باشد.

با توجه نتایج، بیشترین افزایش در پتانسیل آب قابل استحصال نسبت به دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۱) در ایستگاه‌های واقع در جنوب، جنوب غرب و غرب شامل اراک، ملایر، همدان و کمترین افزایش در ایستگاه‌های شمال محدود مطالعاتی:

### ۲-۳. تغییرات پتانسیل آب قابل استحصال از رطوبت هوا تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

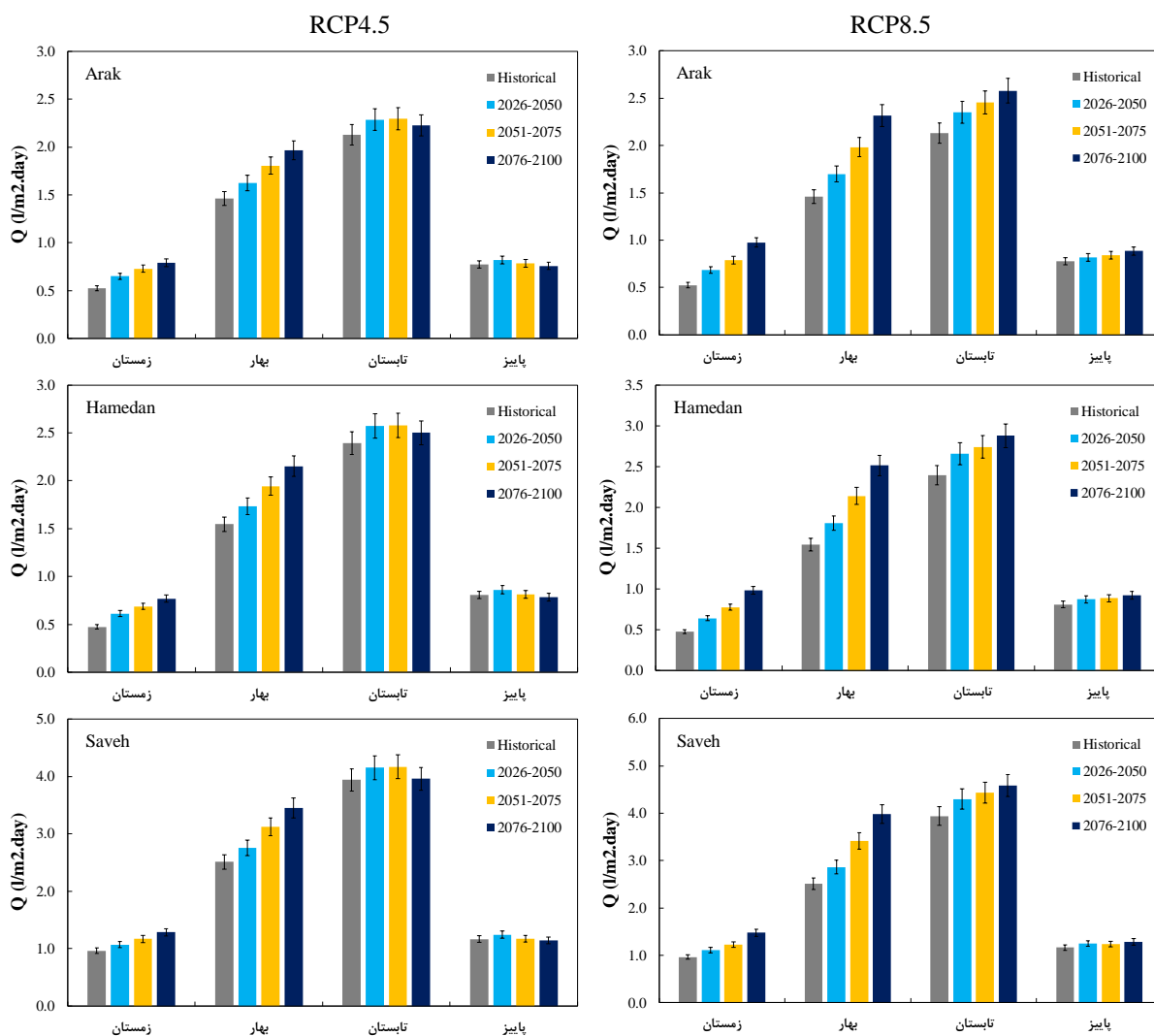
در این بخش از پژوهش، به بررسی تغییرات فصلی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا تحت تاثیر تغییرات اقلیمی طی سه دوره آتی نسبت به دوره پایه پرداخته شده است (شکل ۵). با توجه به تعداد بالای ایستگاه‌های مورد مطالعه، به ارائه نتایج پنج ایستگاه تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 اکتفا شده است. بررسی نتایج حاکی از وجود روندی افزایشی در مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا طی فصل‌های زمستان و بهار در دوره‌های ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ نسبت

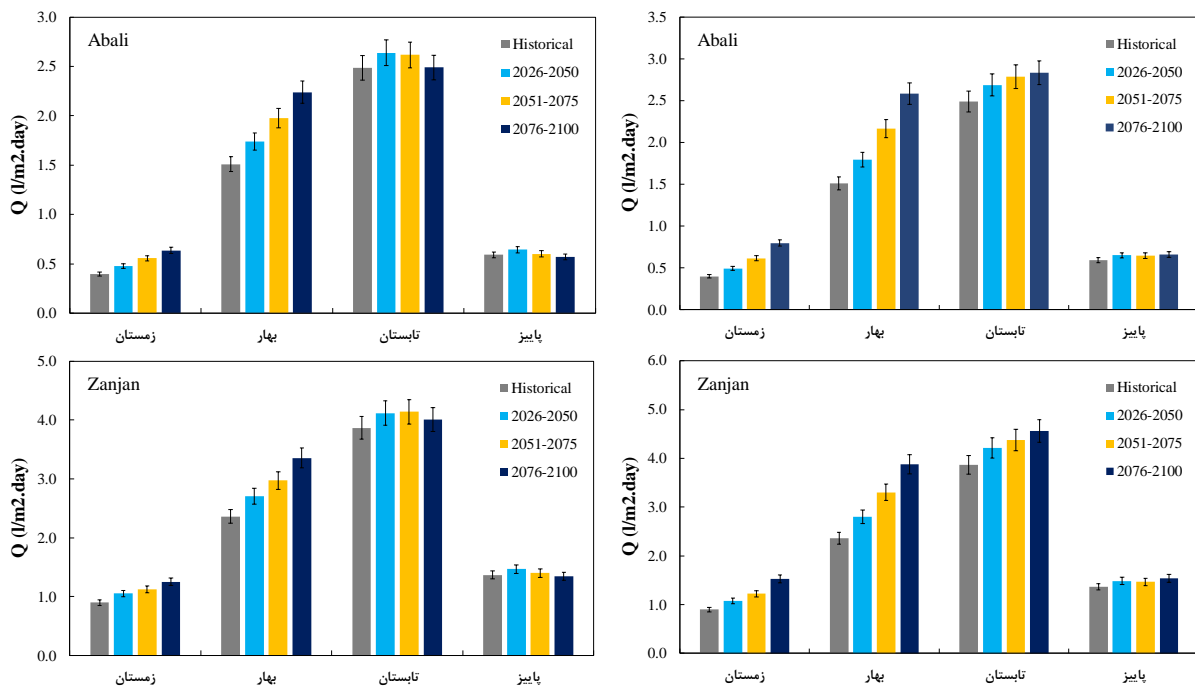
تابستان و بهار از حداکثر پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا برخوردار می‌باشند- که با نتیجه مطالعه محمودی و همکاران نیز همخوانی دارد، به طوری که این محققین با بررسی تغییرات ماهانه پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا در سیستان و بلوچستان به صورت میدانی نشان دادند که بیشترین مقدار آب استحصال‌ی مربوط به فصل‌های گرم سال می‌باشد (محمودی و همکاران، ۲۰۱۶). اگرچه در فصول بهار و تابستان عمدتاً افزایش نیاز آبی به دلیل افزایش دما رخ خواهد داد اما از سوی دیگر، سیستم استحصال آب از هوا مبتنی بر شبکه توری از ظرفیت بالایی برای استحصال آب از رطوبت هوا در این دو فصل برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان از این پتانسیل برای رفع بخشی از نیازهای آبی بهره جست.

آستارا، بندرانزلی، رشت و منجیل می‌باشد. به طوری که تحت سناریوی اقلیمی RCP4.5 متوسط تغییرات مقدار آب قابل استحصال در فصول مختلف در ایستگاه‌های جنوب، جنوب‌غرب و غرب طی سه دوره اول (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تا سوم

(۲۰۷۶-۲۱۰۰) آینده نسبت به دوره پایه به ترتیب به ۰/۵، ۳/۱ و ۵/۰ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 به ۲/۳، ۵/۶ و ۱۲/۴ درصد محدود شده است، در حالی که متوسط تغییرات در ایستگاه‌های آستارا، بندرانزلی، رشت و منجیل تحت سناریوی RCP4.5 به ترتیب به ۴/۶، ۹/۸ و ۱۳/۹ درصد و در سناریوی اقلیمی به ۷/۹، ۱۹/۴ و ۳۶/۸ درصد محدود است.

علاوه بر این، با توجه به نتایج مشخص است که تحت هر دو سناریوی اقلیمی و در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه فصول





شکل ۵. تغییرات فصلی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا محاسباتی تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 در ایستگاه‌های اراک، همدان، ساوه، آبدلی و زنجان به‌عنوان نمونه

در این بخش به بررسی روند تغییرات سالانه پتانسیل آب قابل استحصال در دوره‌های آینده نسبت دوره پایه تحت سناریوهای اقلیمی RCP8.5 و RCP4.5 براساس آزمون ناپارامتری روند من‌کنندال پرداخته شده است. متوسط سری زمانی تغییرات مقدار آب قابل استحصال مبتنی بر مدل‌های اقلیمی در مقیاس زمانی سالانه به همراه باند عدم قطعیت آن‌ها برای ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریوهای اقلیمی مورد بررسی تهیه و در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی مقدار آماره آزمون من‌کنندال حاکی از آن است که در دوره پایه در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه به غیر از تهران، زنجان، آستارا، بندرانزلی و همدان مقدار آب قابل استحصال دارای روند افزایشی یا کاهشی قابل توجهی نمی‌باشد، به طوری که مقدار آماره آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد بیش از ۱/۶۸ برآورد شده است.

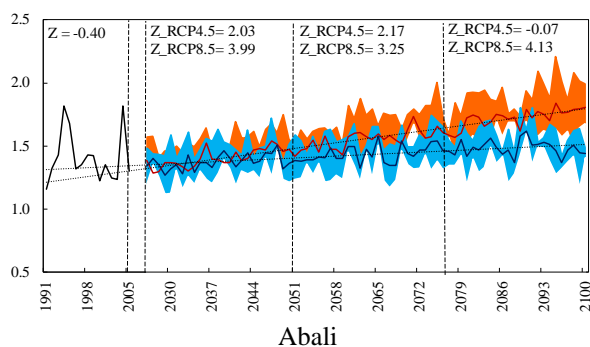
بررسی نتایج در سناریوی RCP4.5 حاکی از آن است که در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ در تمام ایستگاه‌ها بجز آستارا مقدار آماره آزمون ناپارامتری نسبت به دوره پایه افزایش و در سطح ۹۵ درصد نشان‌دهنده وجود روند افزایشی در سری زمانی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا است. بررسی نتایج در دوره دوم آینه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) حاکی از وجود روندی معنادار در مقدار آماره آزمون من‌کنندال در تعدادی از ایستگاه‌های واقع در شمال و شمال‌شرق محدوده مطالعاتی از جمله: آبدلی، آستارا، منجیل، قزوین، تهران و کرج می‌باشد که شیب افزایش در مقدار آب قابل استحصال بیش از دوره پایه و کمتر از دوره اول (۲۰۲۶-۲۰۵۰) است (به استثنای ایستگاه‌های آبدلی و آستارا که شیب افزایش مقدار آب قابل استحصال در دوره دوم آینه بیشتر از دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ می‌باشد).

برای دوره سوم آینه (۲۰۷۶-۲۱۰۰) روند قابل توجهی در سری زمانی آب قابل استحصال مشاهده نشده است (مقدار قدر مطلق آماره آزمون کمتر از ۱/۶۴ است). بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که براساس نتایج دوره‌های اول و دوم آینه یعنی بازه زمانی سال ۲۰۲۶ تا ۲۰۷۵ بیشترین شیب افزایشی در پتانسیل آب قابل استحصال از رطوبت هوا نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های مورد مطالعه رخ خواهد، در حالی که انتظار می‌رود که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۷۶ تا ۲۱۰۰ تغییرات قابل توجهی در پتانسیل

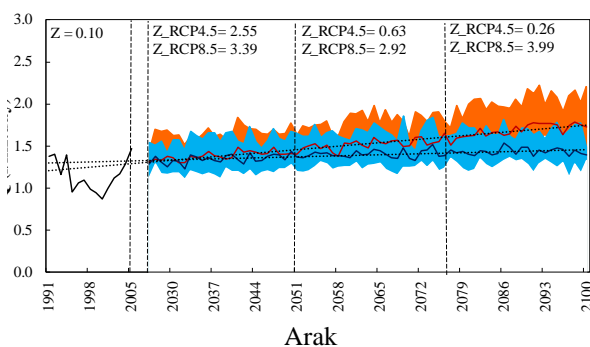
در این بخش به بررسی روند تغییرات سالانه پتانسیل آب قابل استحصال در دوره‌های آینده نسبت دوره پایه تحت سناریوهای اقلیمی RCP8.5 و RCP4.5 براساس آزمون ناپارامتری روند من‌کنندال پرداخته شده است. متوسط سری زمانی تغییرات مقدار آب قابل استحصال مبتنی بر مدل‌های اقلیمی در مقیاس زمانی سالانه به همراه باند عدم قطعیت آن‌ها برای ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریوهای اقلیمی مورد بررسی تهیه و در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی مقدار آماره آزمون من‌کنندال حاکی از آن است که در دوره پایه در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه به غیر از تهران، زنجان، آستارا، بندرانزلی و همدان مقدار آب قابل استحصال دارای روند افزایشی یا کاهشی قابل توجهی نمی‌باشد، به طوری که مقدار آماره آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد بیش از ۱/۶۸ برآورد شده است.

خرمدره و آستارا می‌باشد. در حالی که عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در سایر ایستگاه‌ها بیشتر است. بطور کلی مشخص است که تحت تاثیر سناریوهای اقلیمی بر پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا افزوده خواهد شد. از آنجاییکه یکی از نمودهای تغییر اقلیم افزایش دمای کره زمین که منجر به افزایش دمای هوا خواهد شد. با توجه به اینکه افزایش دمای هوا با افزایش فشار بخار آب و در نتیجه افزایش رطوبت مطلق همراه است، بنابراین می‌توان چنین انتظار داشت که تحت تاثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی به مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا نیز افزوده شود که استفاده از آن با کاهش تاثیرات کمبود منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک همراه خواهد بود. در این زمینه لی و همکاران نیز در تحقیقی عنوان نمودند که کاربرد فناوری‌های استحصال آب از رطوبت هوا ضمن اینکه در راستای مفهوم توسعه پایدار است می‌تواند منجر به کاهش تاثیرات کمبود آب نیز شود، همچنین این محققین بیان داشتند که کاربرد فناوری‌های استحصال آب از رطوبت هوا می‌تواند به منبعی اقتصادی برای تامین آب آشامیدنی روزانه نیز بدل شود (لی و همکاران، ۲۰۲۳).

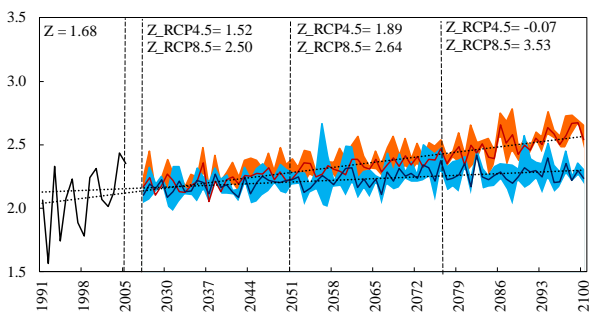
استحصال آب از رطوبت هوا وجود نداشته باشد. بررسی نتایج تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 نشان داد که مقادیر آب قابل استحصال در هر سه دوره آتی از روند افزایشی تبعیت می‌کند که این روند در دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و ۲۰۲۶-۲۰۷۶ از شدت بیشتری نسبت به بازه آماری منتهی به سال ۲۰۷۵ برخوردار است. با توجه به نتایج مشخص است که روند افزایش متوسط سالانه آب قابل استحصال تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 به طور محسوسی از شدت بیشتری نسبت به سناریوی RCP4.5 برخوردار است، به طوری که تغییرات آماره من‌کندال در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی برای سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 طی دوره‌های زمانی فوق (۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۲۶-۲۰۷۵، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰) در محدوده  $-1/05$  تا  $3/20$  و  $2/03$  تا  $4/46$  می‌باشد. بررسی تغییرات باند عدم قطعیت حاصل از کاربرد مدل‌های اقلیمی حاکی از کوچکتر بودن باند عدم قطعیت خروجی‌های اقلیمی در شبیه‌سازی پتانسیل آب قابل استحصال از رطوبت هوا در ایستگاه‌های واقع در محدوده جنوب غرب تا شمال غرب محدوده مطالعاتی شامل: زنجان، رشت، ملایر، همدان، خدابنده،



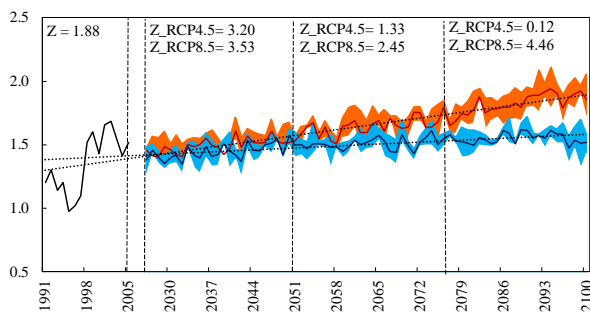
Abali



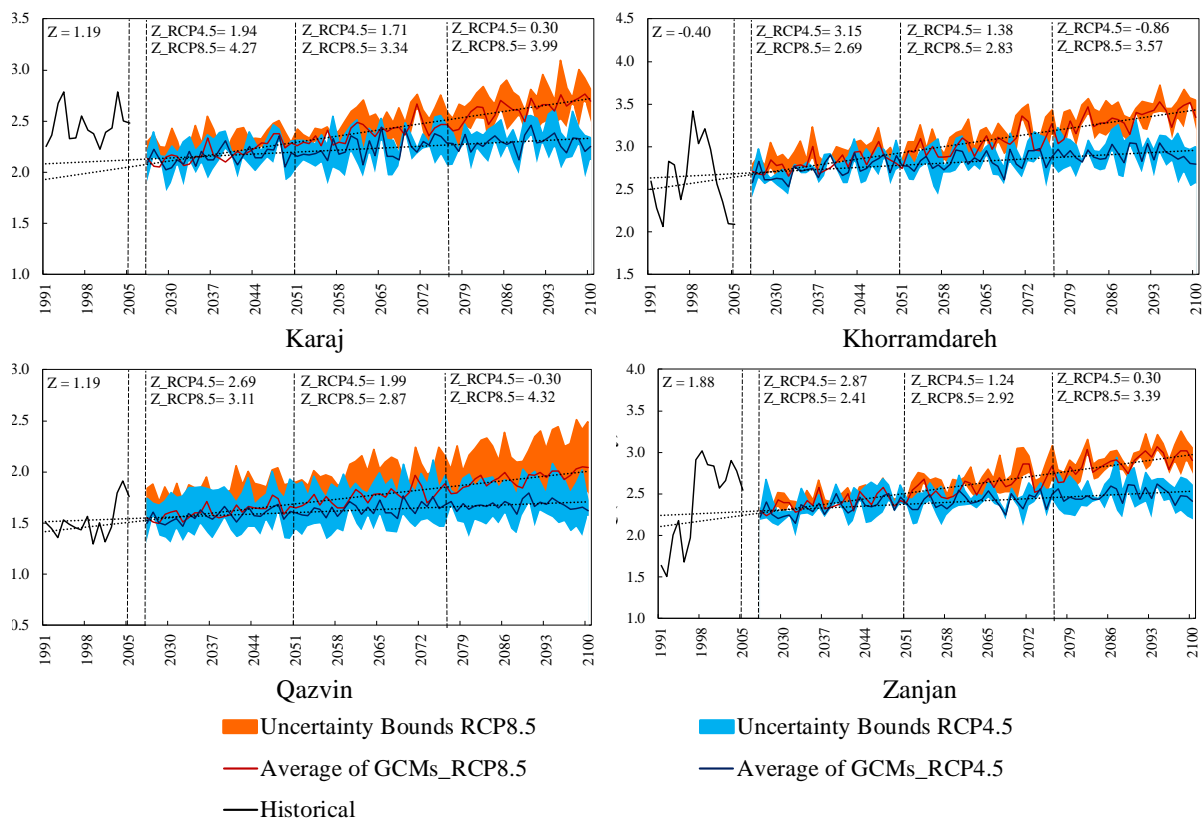
Arak



Astara



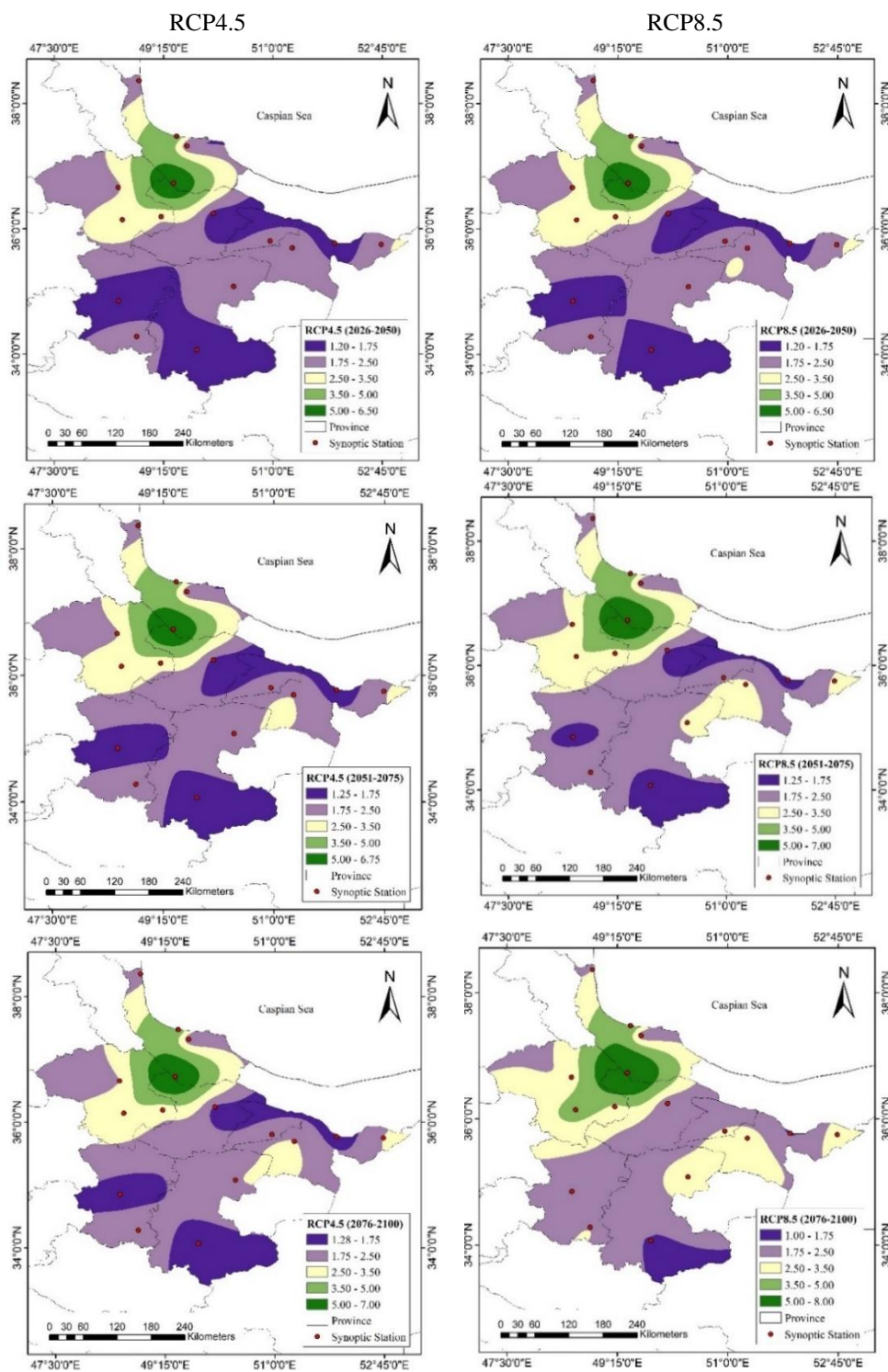
Hamedan



شکل ۶. سری زمانی و مقدار آماره آزمون ناپارامتری من کندال برای روند تغییرات آب قابل استحصال از رطوبت هوا در آینده تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

برای کاربرد طرح‌های استحصال آب از رطوبت هوا برخوردار می‌باشند. بررسی شرایط استحصال آب از رطوبت هوا تحت سناریوی RCP8.5 حاکی از آن است که تحت سناریوی مذکور بر مقدار و همچنین وسعت مناطق دارای پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا نسبت به سناریوی RCP4.5 افزوده خواهد شد. چنانکه حداکثر مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در مناطق شمال غرب محدودده مورد مطالعه برای دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ به ترتیب برابر با ۶/۵۰، ۷/۰۰ و ۸/۰۰ لیتر بر متر مربع در روز است.

در شکل ۷ تغییرات مکانی متوسط سالانه آب قابل استحصال از رطوبت هوا در محدوده مطالعاتی برای سه دوره زمانی آینده و تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در سه دوره زمانی آتی (۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰) مناطق واقع در شمال غرب محدوده مطالعاتی دارای بیشترین پتانسیل استحصال از رطوبت هوا می‌باشد. به طوری که میزان آب استحصالی در این محدوده تحت سناریوی RCP4.5 در دوره‌های اول تا سوم می‌تواند به ترتیب به حداکثر ۶/۵۰، ۶/۷۵ و ۷/۰۰ لیتر بر متر مربع در روز برسد. در حالی که سایر مناطق از پتانسیل کمتری



شکل ۷. تغییرات مکانی پتانسیل آب قابل استحصال از رطوبت هوا تحت تاثیر سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های آتی

#### ۴. نتیجه گیری

استحصال آب از رطوبت هوا به عنوان یک منبع تکمیلی و پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به تأثیرات متنوع موجود بر پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا تحت تاثیر

با توجه به افزایش تغییرات آب و هوایی و فشار بر منابع آب موجود، استفاده از روش‌های نامتعارف تأمین آب همچون



برخوردار می‌باشد (مقدار قدر مطلق آماره آزمون من کندال بیش از ۲/۴۵ است). بررسی تغییرات مکانی پتانسیل استحصالی

رطوبت بیانگر آن است که مناطق واقع در شمال غرب محدوده مطالعاتی (ایستگاه‌های منجیل، بندرانزلی، زنجان و خرمدره) از پتانسیل بیشتری برای بکارگیری طرح‌های استحصال آب از رطوبت هوا نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه برخوردار است. نتایج به دست آمده، پتانسیل کاربرد استحصال آب از رطوبت هوا و همچنین افزایش آن تحت تاثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی را نشان داد؛ همچنین لزوم توجه هر چه بیشتر برنامه‌ریزان و مسئولان برای مدیریت و بهره‌برداری از چنین منابع پایداری را برای تامین بخشی از نیازهای آبی بویژه در بخش کشاورزی پررنگ می‌نماید.

#### ۵. منابع

1. Alizadeh, A., 2010. Principle of applied hydrology. Emam Reza University Press. (In Persian).
2. Bani Habib, M. E., Asadi, M., and Ezzati Amini, M., 2017. Water extraction for agriculture in dry areas. University of Tehran. (In Persian).
3. Brown, C. E., 1998. Coefficient of variation. In Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences. Heidelberg: Springer.
4. Gandhidasan, P., Abualhamayel, H. I., and Patel, F., 2018. Simplified Modeling and Analysis of the Fog Water Harvesting System in the Asir Region of the Kingdom of Saudi Arabia. Aerosol and Air Quality Research, 18, pp.200-213.
5. Ghiasi, B., Kazeroni, H., and Hasanloo, H., 2022. Conventional technologies of harvesting from surface water resources. (In Persian).
6. Giorgi, F., and Gutowski, W. J., 2016. Coordinated experiments for projections of regional climate change. Current Climate Change Reports, 2, pp.202-210.
7. Hamed, A. M., Aly, A. A., and Zeidan, E.-S. B., 2011. Application of solar energy for recovery of water from atmospheric air in climatic zones of saudi arabia. Natural Resources, 2, pp.8-17.
8. Hyndman, R. J., and Koehler, A. B., 2006. Another look at measures of forecast accuracy.

تغییرات اقلیمی، بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی مستدام برای شناسایی مناطق مستعد و کاربرد موثر روش‌های استحصال آب از رطوبت

هوا حائز اهمیت می‌باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا تحت سناریوهای اقلیمی گزارش پنجم تغییر اقلیم در سطح استان‌های قزوین، زنجان، البرز، تهران، همدان، مرکزی، گیلان به انجام رسیده است. برای بررسی روند تغییرات مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در دوره‌های آتی از آزمون ناپارامتری من کندال استفاده شده است. بررسی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا در دوره پایه حاکی از عملکرد قابل قبول هر سه مدل اقلیمی در بیش از ۹۳ درصد ایستگاه‌های مطالعاتی در شبیه‌سازی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا می‌باشد (مقدار شاخص RMSE برای مدل‌های CNRM، GFDL و CCSM4 به ترتیب به ۱/۸۳، ۱/۷۴ و ۱/۸۲ لیتر بر متر مربع در روز محدود شده است). همچنین محدوده تغییرات و عدم قطعیت مقادیر آب قابل استحصال محاسباتی بر مبنای مدل اقلیمی CCSM4 بیش از مدل‌های CNRM و GFDL است. بنابراین توصیه می‌شود کاربرد مدل مذکور با دقت بیشتری انجام پذیرد. ارزیابی تغییرات فصلی مقدار آب قابل استحصال از رطوبت هوا تحت تاثیر تغییرات اقلیمی حاکی از وجود روندی افزایشی در پتانسیل استحصال آب از رطوبت هوا در فصل‌های زمستان و بهار در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی اقلیمی RCP4.5 است، در حالی که در فصل‌های تابستان و پاییز مقادیر آب قابل استحصال عمدتاً ثابت و بعضاً کاهش یافته است. همچنین تحت سناریوی RCP8.5 شیب افزایش پتانسیل آب قابل استحصال از رطوبت هوا نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های مطالعاتی طی فصول مختلف، تندتر از سناریوی اقلیمی RCP4.5 است. همچنین یافته‌های پژوهش در رابطه با تغییرات سالانه مقدار آب قابل استحصال نشان داد که براساس آزمون ناپارامتری من کندال تحت سناریوی RCP4.5، در دوره‌های اول و دوم روندی افزایشی در مقادیر آب قابل استحصال از رطوبت هوا وجود دارد. با توجه به نتایج، روند افزایش متوسط سالانه آب قابل استحصال تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 به طور محسوسی از شدت بیشتری نسبت به سناریوی RCP4.5

20. Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), pp.245–259.
21. Mekonnen, M. M., and Hoekstra, A. Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2.(۲)
22. Morichi, G., Calixto, L. B., and Zanelli, A., 2018. Novel applications for fog water harvesting. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6.(۰۳)
23. Mostafazadeh, R., and Mehri, S., 2018. Determination of the precipitation regime and the seasonality index variations in the central part of the Ardabil province. *Watershed Management Research*, 31(3), pp.28-39. (In Persian).
24. Mousavi-Baygi, M., 2008. The implementation of fog water collection systems in northeast of Iran. *International Journal of Pure and Applied Physics*, 4(1), pp.13–21. (In Persian).
25. Murray, F. W., 1967. On the computation of saturation vapour pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6, pp.203–204.
26. Nascimento Prada, S., and Oliveira da Silva, M., 2001. Fog Precipitation on the Island of Madeira (Portugal). *Environmental Geology*, 41, pp.384–389.
27. Nikandish, N., and Akbari Qamsari, H., 2019. Analysis of geomorphoclimatic factors in the creation of Manjil local wind. *Natural Geography Quarterly*, 11(42), pp.125-140. (In Persian).
28. Pearson, K., 1894. On the dissection of asymmetrical frequency curves. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 185, pp.71–100.
29. Pearson, K., 1896. Mathematical contributions to the theory of evolution.–on a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs. *Proceedings of the Royal Society of London*, 60, pp.489–498.
30. Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., Kennedy, B. S., and Boreyko, J. B., 2018. Fog harvesting with harps. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(14), pp.11979–11986.
31. Solaimani, K., and Shokrian, F., 2020. Suitable site selection of fog water harvesting based-on RS data in upstream of vazrud watershed in Iran. *Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University*, 11(21), pp.249–258. (In Persian).
32. Song, Y. H., Chung, E. S., and Shiru, M. S., 2020. Uncertainty analysis of monthly International Journal of Forecasting, 22(4), pp.679–688.
9. IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis IPCC working group I contribution to AR5. Retrieved October 18.
10. Jiang, R., Liang, J., Zhao, Y., Wang, H., Xie, J., Lu, X., and Li, F., 2021. Assessment of vegetation growth and drought conditions using satellite-based vegetation health indices in Jing-Jin-Ji region of China. *Scientific Reports*, 11(1), pp.1–18.
11. KarimpourReihan, M., Alizadeh, M., and Kamalian, S., 2016. Selection of suitable sites for water harvesting from air humidity in Bushehr province using GIS. *Quarterly of Geography & Regional Planning*, 6(25), pp.43–51. (In Persian).
12. Kendall, M. G., 1975. Rank Correlation Methods (4th Editio). London: Griffin. <https://www.worldcat.org/title/rank-correlation-methods/oclc/3827024>.
13. Koochi, S., and Ramezani Etedali, H., 2022. Future meteorological drought conditions of southwestern Iran based on the NEX-GDDP climate dataset. *Journal of Arid Land*.
14. Kumar, M., and Yadav, A., 2015. Experimental investigation of solar powered water production from atmospheric air by using composite desiccant material “CaCl2/saw wood.” *Desalination*, 367, pp.216–222.
15. Li, H.-J., Cheng, L., Sun, P., Li, F.-F., and Qiu, J., 2023. Potential analysis of atmospheric water harvesting technologies from the perspective of “Trading-in Energy for Water.” *Water*, 15.(878)
16. Mahmodi, P., Khaje Amiri Khaledi, C., and Salari Fanodi, M. R., 2016. Examining the feasibility of water harvesting from air humidity in the southern province of Sistan and Baluchistan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 23(2), pp.253–263. (In Persian).
18. Mahmoudi, P., KhajehAmiriKhaledi, C., and SalariFanodi, M. R., 2016. Examining the feasibility of water harvesting from air humidity in the southern province of Sistan and Baluchistan. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2). (In Persian).
19. Maleki, H., SolaimaniMotlagh, M., Jaedaei, A., and Shater, S., 2013. Analysis of the precipitation and drought trend variations using Mann-Kendall and Sen Tests in Tehran province. *Journal of meteorological Organization*. 37(80-81), pp.43-54. (In Persian).

- precipitation in GCMs using multiple bias correction methods under different RCPs. Sustainability (Switzerland), 12 .(۱۸)
33. Stanski, H. R., Wilson, L. J., and Burrows, W. R., 1989. Survey of common verification methods in meteorology (2nd ed.). World Meteorological Organization.
  34. UN-Water, T. I., 2006. Coping with water scarcity: a strategic issue and priority for system-wide action. In Water and Wastewater International (Vol. 22).
  35. Wang, Y., Danook, S. H., AL-bonsrulah, H. A. Z., and Veeman, D. F. W., 2022. A recent and systematic review on water extraction from the atmosphere for arid zones. Energies, 15.(2).
  36. Xia, H., Zhuang, J., and Yu, D., 2013. Combining crowding estimation in objective and decision space with multiple selection and search strategies for multi-objective evolutionary . optimization. IEEE Transactions on Cybernetics, 44.(3)
  38. Yang, F. g., Cao, S.y., Liu, X.n. and Yang, K.j., 2008. Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging. Journal of Hydrodynamic Ser. B, 20(3), pp.339-346.
  39. Yousefi, B., and BoroomandNasab, S., 2015. Desalination using the condensation irrigation system, a case study of the research farm of Shahid Chamran University of Ahvaz. Water and Wastewater Consulting Engineers, 26(3), pp.127-133.