

**Web site:**

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 3 (55)

Received:
2024-05-24

Accepted:
2024-11-02

Pages: 95-113

Evaluation of Adaptation Paths to Climate Change in the Karun 3 Basin

Erisa Jahangiri¹, Baharak Motamedvaziri^{2*} and Hadi Kiadaliri³

- 1) Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2) Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3) Department of Environment and Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
*Corresponding author email: bm vaziri@gmail.com

Abstract:

Background and Aim: Adaptive planning and water allocation in the conditions of climate change is facing deep challenges due to various uncertainties. In this situation, decisions should be made that are more stable and maintain their function in different climatic scenarios. This study was carried out with the aim of planning agricultural adaptation measures in the conditions of climatic uncertainty in the Karun 3 watershed using the robust decision-making (RDM) approach. To achieve this goal, GCM models under two emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) and WEAP model were used to simulate the current situation of water resources and uses in the basin. Runoff and cultivated area were considered as parameters with uncertainty.

Method: To realize the research goal, the WEAP model was used to simulate the current situation of the basin's water resources and uses. Because under the effect of climate change, the precipitation and temperature parameters of the area will undergo changes in the future from three models - EC-EARTH, CNRM-CM5 and GFDL-ESM2M under two scenarios RCP4.5 and RCP8.5 to investigate the amount of temperature changes and future period precipitation was used. Also, in this research, the IHACRES rainfall-runoff model was used to simulate the runoff of the Karun River in the future. Measures such as 10% increase in irrigation efficiency (S1) and changing the cultivation pattern (S2) were considered as effective adaptation measures in the agricultural sector. Finally, by using the robust decision-making approach (RDM), the strength of the presented strategies under the existing uncertainties for the future period was examined and evaluated. Based on two approaches, RDM minimizes the effect of uncertainty. The Regret Method, which is obtained by minimizing the amount of deviations in performance caused by uncertainty compared to the ideal state, and the robustness approach or the satisfactory boundary, which calculates the fraction of scenarios that meet the designed criteria.

Results: The results of runoff simulation for the future period (2055-2030) show that the amount of Karun river runoff will decrease by 22-8% in different months compared to the base period. Evaluation of the simulation results of the WEAP model in the current situation, the drinking water needs are almost completely provided in most of the sectors and only in the A8 sectors, which is the study area of 2301 (Khorramshahr) and A6 (the study areas of Lali and Indica).) are facing water shortage. Also, the results showed that there is no shortage in the industry sector. Meanwhile, sectors A1, A2 and A3 are facing a shortage of water resources in the agricultural sector. The results show that due to the deficiencies in the existing conditions, the Behesht Abad watershed will not have the necessary potential to transfer water to the volume of 580 million cubic meters per year through the Behesht Abad tunnel to the Zayandeh Rood watershed. Also, the results showed that the satisfaction index of strategy 2 and strategy 1 is 0.78 and 0.65, respectively. Also, the comparison of the results of the regret index shows that strategy 2 is stronger than strategy 1.

Conclusion: Finally, based on the research approach and the definition of stable decision-making, the results showed that the strategy of changing the cultivation pattern can be put on the agenda as a stable strategy, so that it can work in a wide range of uncertainty and climate scenarios. Maintain within the current status of the basin. The main strength of this study is its systematic methodology, which helps to make more informed decisions and design comprehensive adaptive programs. It can also be applicable to other basins by considering different goals and indicators. However, future studies on climate change uncertainties and socio-economic evaluation of adaptation measures are other areas that could improve the analyses.

Keywords: Climate change, WEAP model, Robust decision making, Runoff, Karun



شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۴۸۰

شاپا الکترونیکی: ۲۲۵۰-۷۴۰۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.iriauwsrj@gmail.com

سال چهاردهم

شماره ۳ (۵۵)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۸/۱۲

صفحات: ۹۵-۱۱۳

ارزیابی مسیرهای سازگاری با تغییر اقلیم در حوضه آبریز کارون ۳

اریسا جهانگیری^۱، بهارک معتمدوزیری^{۲*} و هادی کیادلبیری^۳

(۱) دانشجوی دکتری گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

(۲) دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

(۳) دانشیار گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: bm vaziri@gmail.com

چکیده:

زمینه و هدف: برنامه‌ریزی تطبیقی و تخصیص آب در شرایط تغییر اقلیم به دلیل عدم قطعیت‌های مختلف با چالش‌های عمیقی مواجه است. در این شرایط تصمیماتی باید اتخاذ شوند که از استواری بیشتری برخوردار باشند و در سناریوهای مختلف اقلیمی همچنان کارکرد خود را حفظ نمایند. این مطالعه با هدف برنامه‌ریزی اقدامات سازگاری کشاورزی در شرایط عدم قطعیت اقلیمی در حوضه آبریز کارون ۳ با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری استوار (RDM) انجام شد. برای تحقق این هدف، از مدل‌های GCM تحت دو سناریوی انتشار (RCP4.5 و RCP8.5) و مدل WEAP برای شبیه‌سازی وضعیت موجود منابع و مصارف آب حوضه استفاده شد. رواناب و سطح زیر کشت به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شدند.

روش پژوهش: برای تحقق هدف تحقیق، از مدل WEAP برای شبیه‌سازی وضعیت موجود منابع و مصارف آب حوضه استفاده شد. از آنجا که تحت اثر تغییر اقلیم پارامترهای بارش و دما محدوده در آینده دستخوش تغییرات می‌گردد از سه مدل EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای بررسی میزان تغییرات دما و بارش دوره آتی استفاده شد. همچنین در این پژوهش برای شبیه‌سازی رواناب دوره آتی رودخانه کارون از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده شد. اقداماتی همچون افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری (S1) و تغییر الگوی کشت (S2) به عنوان اقدامات سازگاری موثر در بخش کشاورزی در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری استوار (RDM) استحکام راهبردهای ارائه شده تحت عدم قطعیت‌های موجود برای دوره آتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. RDM بر اساس دو رویکرد اثر عدم قطعیت را به مینیمم‌ترین حالت ممکن می‌رساند. رویکرد پشیمانی (Regret Method) که با مینیمم کردن میزان انحرافات در عملکردهای ناشی از عدم قطعیت در مقایسه با حالت ایده آل به دست می‌آید و رویکرد استحکام و یا مرز رضایتمندی که محاسبه کسری از سناریوهای طراحی شده را برآورده می‌کنند به دست می‌آید.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی رواناب دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) نشان می‌دهد میزان رواناب رودخانه کارون به نسبت دوره پایه کاهش ۸-۲۲ درصدی را در ماه‌های مختلف خواهد داشت. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل WEAP در وضعیت موجود نیاز شرب تقریباً در اکثر بخش‌ها به صورت کامل تامین می‌گردد و تنها در بخش‌های A8 یا همان محدوده مطالعاتی ۲۳۰۱ (خرمشهر) و A6 (محدوده‌های مطالعاتی لالی و اندیکا) با کمبود آب مواجه هستند. همچنین نتایج نشان داد که در بخش صنعت کمبودی مشاهده نمی‌شود. در این میان بخش‌های A1، A2 و A3 با کمبود منابع آب در بخش کشاورزی روبه رو هستند. نتایج نشان می‌دهد با توجه به کمبودها در شرایط موجود، حوضه آبریز بهشت آباد پتانسیل لازم برای انتقال آب به حجم ۵۸۰ میلیون متر مکعب در سال توسط تونل بهشت‌آباد به حوضه آبریز زاینده رود را نخواهد داشت. همچنین نتایج نشان داد شاخص رضایتمندی استراتژی ۲ و استراتژی ۱ به ترتیب ۰.۶۵ و ۰.۷۸ می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج شاخص پشیمانی نشان می‌دهد استراتژی ۲ استحکام بالاتری به نسبت استراتژی ۱ دارد.

نتایج: در نهایت براساس رویکرد تحقیق و تعریفی که از تصمیم‌گیری استوار ارائه شد، نتایج نشان داد که استراتژی تغییر الگوی کشت می‌تواند به عنوان راهبردی استوار در دستور کار قرار گیرند، بطوریکه توانسته در طیف وسیعی از شرایط عدم قطعیت و سناریوهای اقلیمی عملکرد خود را در حدود وضع موجود حوضه حفظ نماید. نقطه قوت اصلی این مطالعه روش-شناسی نظامند آن است که به تصمیم‌گیری آگاهانه تر و طراحی برنامه‌های تطبیقی جامع کمک می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن اهداف و شاخص‌های مختلف می‌تواند برای سایر حوضه‌ها نیز قابل اجرا باشد. با این حال، مطالعات آینده در مورد عدم قطعیت‌های تغییرات آب و هوا و ارزیابی اجتماعی-اقتصادی اقدامات سازگاری، حوزه‌های دیگری هستند که می‌توانند تحلیل‌ها را بهبود بخشند.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، مدل WEAP، تصمیم‌گیری استوار، رواناب، کارون

مقدمه

پدیده تغییر اقلیم به‌ویژه تغییرات دما و بارش را تحت تاثیر قرار داده و باعث تغییرات سیستم هیدرولوژیک در سطح کلان می‌شود. این تغییرات از جنبه‌ها و ابعاد مختلف بر اکوسیستم طبیعی اثرگذار بوده و دارای اهمیت فزاینده است زیرا سیستم‌های انسانی وابسته به اقلیم مانند صنعت، کشاورزی و غیره بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده اند و عمل می‌کنند (IPCC^۱, 2007; Haddad et al., 2023). سیستم منابع آب نیز در دهه‌های اخیر تحت تاثیر پدیده‌های مختلف جوی و فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است. این تأثیرات، سبب بروز پیامدهای مختلف بر وضعیت بهره‌برداری و تخصیص منابع آب شده است (Berrang et al., 2021; Kim et al., 2021; Feola et al., 2015). اثر پدیده تغییر اقلیم از یک طرف و توسعه‌های بدون آمایش سرزمین از طرف دیگر سبب شده تا مدیریت عرضه و تقاضا در سیستم منابع آب یک حوضه با بی-نظمی، عدم تعادل و مناقشه همراه باشد. به طور مشخص سیستم‌های منابع آب و کشاورزی (به دلیل وابستگی زیاد به شرایط اقلیمی و همچنین اثرگذاری بر تولید، کیفیت و عملکرد محصولات، تغییرات آب در دسترس کشاورزی، تغییرات نیاز آبی گیاهان و...) نسبت به این تغییرات به صورت سالانه یا فصلی حساس هستند (Derner et al., 2018, Bizikova et al., 2018, Escarcha et al., 2014). از این رو درک اهمیت اثرات تغییر اقلیم و تدوین استراتژی‌های سازگاری برای کم کردن این اثرات ضروری است (Mousavi et al., 2020; Asif et al., 2023). در این زمینه، ایجاد استراتژی‌های مدیریتی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن تغییرات شرایط محیطی و اجتماعی به انطباق بیشتر آنها کمک می‌کند (De Silva and Dayawansa, 2021; Sippel et al., 2020).

به طور مشخص، سیاست‌گذاری برای سازگاری با تغییر اقلیم در معرض عدم قطعیت‌هایی از منابع مختلف قرار دارد. لمپرت^۲ و همکاران (۲۰۰۴) به دلیل وجود عدم قطعیت‌های شدید اجتناب ناپذیر در برنامه‌ریزی بلند مدت، به تصمیم‌گیرندگان پیشنهاد می‌کنند که به دنبال تصمیمات استواری باشند که عملکرد مطلوبی را در طیف وسیعی از شرایط محتمل آینده داشته باشند و بتوانند از طریق اقدامات اصلاحی با شرایط جدید سازگاری یابند. پیش‌نمایی‌های^۳ مربوط به میزان بارندگی، رواناب، تغییر در رشد و موقعیت جمعیت در معرض عدم قطعیت‌های شدید قرار دارند. با پذیرش عدم قطعیت شدید به عنوان بخش انکارناپذیر از تصمیم‌گیری بلندمدت و لزوم توجه به آن، رویکردهایی با محدودیت‌ها و نقاط قوت مختلفی برای کمک به سیاست‌گذاران و طراحان سیستم در تهیه برنامه‌های سازگاری توسعه یافته‌اند که انواع مختلفی از اطلاعات را در

حمایت از تصمیم‌گیری فراهم می‌کنند (Linkov et al., 2014). برای تحلیل عدم قطعیت شدید، اخیراً استفاده از مفهوم استواری^۴ مورد توجه قرار گرفته است. بدین معنی که گزینه استوار می‌تواند عملکرد مناسب خود را در طیف وسیعی از حالات ممکن (ناشی از عدم قطعیت‌های مورد اشاره) برای سامانه مورد مطالعه حفظ کند (Hall et al., 2012). به عنوان مثال طراحی سیستم جمع‌آوری آب شهری که می‌تواند در طیف وسیعی از بارش‌ها همچنان کارآمد باشد (Prutsch et al., 2010). با استفاده از این مفاهیم روش تصمیم‌گیری استوار^۵ (RDM) توسعه یافته است که بر کشف و مقایسه مناطقی از فضای عدم قطعیت که در آن یک راهبرد، مطلوب یا غیر مطلوب عمل می‌کند، تمرکز دارد. محققین مختلف از روش RDM برای حل برخی مسائل مرتبط با منابع آب استفاده نمودند.

مهربانی^۶ و همکاران (۲۰۰۴) اثربخشی استراتژی‌های سازگاری در بخش کشاورزی از جمله افزایش ۵ درصدی راندمان آبیاری (S1) و تغییر روش آبیاری به Dry-DSR (کشت مستقیم بذر برنج) در شرایط عدم قطعیت اقلیمی را با استفاده از یک رویکرد تصمیم‌گیری در حوضه پایین‌دست سد سفیدرود مورد بررسی قرار دادند. در ابتدا، مدل‌سازی حوضه با استفاده از نرم‌افزار مدیریت یکپارچه WEAP برای دوره ۲۰۰۶-۲۰۲۰ انجام شد. متعاقباً، تأثیر تغییر اقلیم با در نظر گرفتن سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 بر منابع آب سطحی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی عملکرد استراتژی تحت عدم قطعیت‌های مختلف و تعیین اثربخشی هر استراتژی، از رویکردهای پشیمانی و رضایت استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش در بارندگی پیش‌بینی شده برای دوره آینده به میزان ۱/۸-۳/۵ درصد در مقایسه با دوره پایه بود که با افزایش دماهای حداکثر و حداقل همراه است. در صورت تداوم روندهای فعلی و در کنار آن تأثیر تغییرات اقلیمی، کسری سالانه شبکه آبیاری و زهکشی سد سفیدرود ممکن است به ۹۳۲.۷ میلیون متر مکعب در سال افزایش یابد. بر اساس نتایج، تغییر روش آبیاری به Dry-DSR به عنوان یک استراتژی استوار توصیه گردید که توانایی حفظ پایداری حوضه را تحت طیف گسترده‌ای از عدم قطعیت‌ها و سناریوهای تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد.

منگستو^۷ و همکاران (۲۰۲۱) اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه رودخانه آپر بلو نایل^۸ را با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای COSMO و مدل هیدرولوژیکی SWAT مورد ارزیابی قرار دادند. پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم نشان‌دهنده افزایش دمای میانگین سالانه و کاهش بارش در اغلب قسمت‌های حوضه بود. اثر تغییر اقلیم بر منابع آب با اجرای مدل SWAT واسنجی و اعتبارسنجی شده برای دوره آینده

یک سد واقع در کره بررسی نمودند. روش‌های RDM و SDM برای ارزیابی سناریوهای فرضی برنامه‌های تأمین آب برای حوضه سد Andong و حوضه سد Imha استفاده شد. پس از ایجاد سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و شش گزینه فرضی، رتبه گزینه‌ها به ترتیب توسط RDM و SDM برآورد شد. نتایج نشان داد حتی اگر سناریوها و گزینه‌های یکسانی برای رتبه‌بندی توسط هر دو روش RDM و SDM استفاده شوند، میانگین تفاوت در رتبه‌بندی گزینه‌ها بین روش‌های RDM و SDM ۰/۳۳-۱/۳۳ خواهد بود.

لمپرت و گرووز^{۱۵} (۲۰۱۰) ضمن معرفی رویکرد RDM، به اهمیت استفاده از این رویکرد برای ارزیابی مدیریت آب شهری در غرب آمریکا تحت شرایط عدم قطعیت آینده اشاره نمودند و بیان کردند که گنجاندن سازگاری در فعلی می‌تواند ۷۲ درصد از خروجی‌های پرهزینه را حذف نماید. گرووز و لمپرت (۲۰۰۷) از رویکرد RDM برای یافتن استوارترین راهبردهای بلندمدت در مدیریت منابع آب کالیفرنیا استفاده نمودند.

اثرات منفی تغییر اقلیم در مناطق گرم و خشک بیشتر است (Kheiri, 2017). بجز قسمت‌های کوهستانی شمال و غرب ایران، این کشور در مناطق خشک تا نیمه‌خشک جهان واقع شده است (Kousari et al., 2011) و لذا بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در کشور ایران که با دلیل مسأله تغییر اقلیم و افزایش مصارف آب در بخش‌های مختلف با خطر بروز بحران آب مواجه است دارای اهمیت فزاینده‌ای است. از طرف دیگر، تردید در مورد داده‌ها، مدل‌ها، و اثرات عوامل اقتصادی و اجتماعی همگی در افزایش عدم قطعیت نتایج سناریوهای آینده‌ی مدل‌سازی شده تأثیر می‌گذارند (Hughes et al., 2011 in Kumar et al., 2017). با توجه به اینکه رویکرد RDM برای حمایت از تصمیمات در شرایط عدم قطعیت شدید مورد استفاده قرار می‌گیرد و از طرف دیگر، با توجه به محدودیت سوابق پژوهشی در این زمینه، در این پژوهش از این رویکرد استفاده شد و بررسی عدم قطعیت پارامترهای رواناب و سطح زیر کشت منطقه در دستور کار قرار گرفت. در همین راستا، هدف این تحقیق ارائه روش‌شناسی و بستر مدل‌سازی برای ارزیابی راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم در بخش کشاورزی در چارچوب مفهوم استواری و روش تصمیم‌گیری استوار (RDM) می‌باشد. بدین منظور، برای بخش شبیه‌سازی هیدرولوژیکی محدوده از مدل WEAP و از مدل بارش-رواناب IHACRES به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی رواناب رودخانه کارون استفاده شد. در ادامه راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم همچون افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت در جهت کم کردن این اثرات در بخش کشاورزی اجرا گردید و در نهایت رویکرد RDM برای ارزیابی این راهبردها تحت عدم قطعیت‌های موجود برای دوره آتی در دستور کار تحقیق حاضر قرار گرفت.

مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده افزایش تبخیر و تعرق به دلیل افزایش دمای پیش‌بینی شده بود. علیرغم کاهش بارش، رواناب سطحی تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 افزایش و آبدهی کل حوضه تحت هر دو سناریو کاهش داشت.

بابائیان^۹ و همکاران (۲۰۲۱) ترکیبی از رویکرد مسیرهای سازگاری (AP) در ترکیب با مدل ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) را برای ارزیابی استواری اقدامات سازگاری و طراحی مسیرهای سازگاری استوار تحت عدم قطعیت‌های اقلیمی آینده در حوضه رودخانه حبله‌رود استفاده نمودند. سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره ۲۰۸۰-۲۰۲۰ میلادی به عنوان سناریوهای با عدم قطعیت شدید در نظر گرفته شدند با توجه به نتایج، تغییر الگوی کشت نشان‌دهنده استوارترین اقدام سازگاری در ترکیب‌های مختلف سناریوهای اقلیمی است. سایر اقدامات سازگاری، از جمله کم آبیاری، تغییر در تاریخ کاشت محصول، و بهبود راندمان آبیاری، در بازه زمانی مشخص از ۲۰۲۰ تا ۲۰۸۰ نسبتاً استوار هستند. توالی این اقدامات سازگاری بر اساس استواری و تاریخ انقضا، منجر به طراحی نقشه‌های مسیر سازگاری تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 می‌گردد.

ناتالی^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰) اثر تغییر اقلیم بر آبدهی را در پاتوگونیا شمالی^{۱۱} مورد مطالعه قرار دادند. خروجی‌های مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای در پروژه CORDEX برای آمریکای جنوبی در مدل InVEST^{۱۲} مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این پروژه نشان‌دهنده افزایش دما بیش از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش از ۱۰- تا ۳۰- درصد بود. افزایش تبخیر و تعرق و کاهش بارش موجب کاهش شدید آبدهی از ۲۰- تا ۴۰- درصد در سراب حوزه‌های آبخیز پاتوگونیا شمالی شد.

عباسی^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۰) با هدف برنامه‌ریزی اقدامات سازگاری در شرایط عدم قطعیت اقلیمی شدید در بخش کشاورزی در یک حوضه نیمه‌خشک در ایران (حوضه طشک-بختگان) از رویکرد تصمیم‌گیری استوار استفاده کردند. بدین‌منظور از یک نسخه اصلاح شده مدل SWAT با نام SWAT-PARS برای شبیه‌سازی وضعیت منابع آب و بخش کشاورزی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. با ترکیب مدل SWAT با یک مدل بهینه‌سازی استوار مبتنی بر NSGA-II، نوع و مکان بهینه و استوار اقدامات مدیریت کشاورزی استوار تحت عدم قطعیت اقلیمی تعیین شد. برای این منظور، کم آبیاری، افزایش راندمان آبیاری، تغییر الگوی کشت و تغییر تاریخ کشت به عنوان اقدامات سازگاری موثر در بخش کشاورزی در نظر گرفته شد.

کانگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۳) کاربرد تصمیم‌گیری استوار (RDM) نسبت به تصمیم‌گیری استاندارد (SDM) را با مقایسه نتایج برنامه‌های تأمین آب تحت عدم قطعیت‌های اقلیمی برای

مواد و روش‌ها

مورد مطالعه استفاده شد (Asghar et al., 2019). پس از شبیه‌سازی وضعیت موجود (۲۰۰۷-۲۰۲۱) توسط مدل WEAP، رواناب حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی توسط نرم افزار IHACRES، به عنوان ورودی مدل WEAP در نظر گرفته شد تا شرایط منابع و مصارف محدوده مطالعاتی در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 مورد بررسی و ارزیابی واقع گردد.

رواناب رودخانه کارون و سطح زیر کشت حوضه به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت که می‌توانند شرایط آبی را تحت تاثیر قرار دهند در نظر گرفته شدند. افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت کشاورزی نیز به عنوان اقدامات سازگاری موثر در بخش کشاورزی در نظر گرفته شد (Abbasi et al., 2020). در نهایت با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری استوار (RDM) استحکام راهبردهای ارائه شده تحت عدم قطعیت‌های موجود برای دوره آتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. RDM بر اساس دو رویکرد اثر عدم قطعیت را به مینیمم‌ترین حالت ممکن می‌رساند. رویکرد پیشیمانی^{۲۱} که با مینیمم کردن میزان انحرافات در عملکردهای ناشی از عدم قطعیت در مقایسه با حالت ایده آل به دست می‌آید و رویکرد استحکام و یا مرز رضایتمندی که محاسبه کسری از سناریوهایی که معیارهای طراحی شده را برآورده می‌کنند به دست می‌آید (Hadka et al., 2015; Yan et al., 2017).

۱- محدوده مطالعاتی

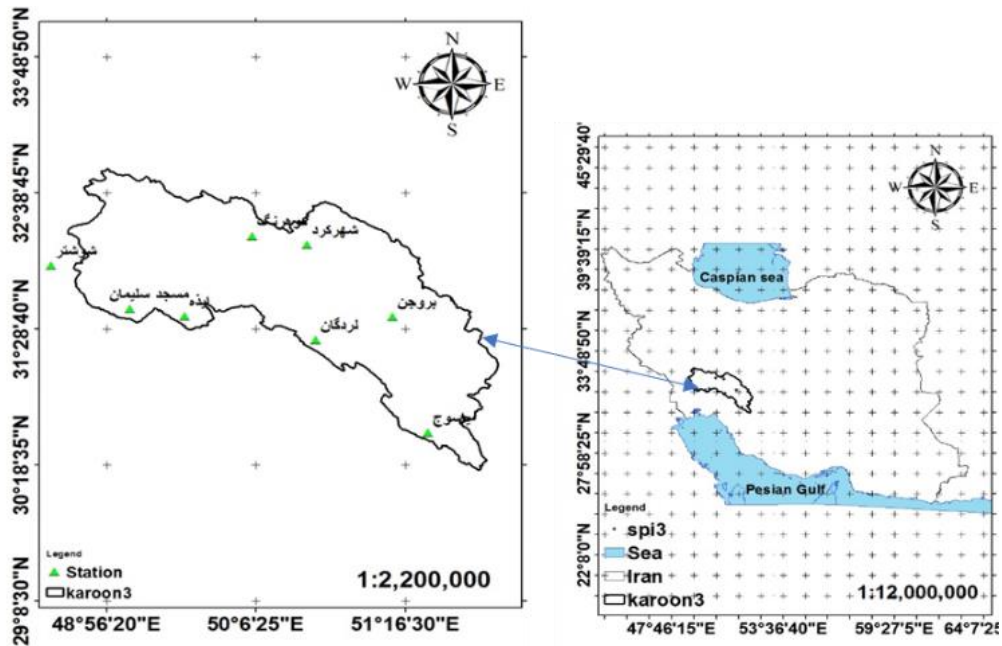
منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوزه آبخیز کارون ۳ به مساحت ۶۸۷۷۹ کیلومتر مربع، بین طول جغرافیایی "۳۹'۴۷" تا ۴۸° و عرض جغرافیایی "۵۱' ۵۹' ۵۹" و ۳۰° ۱۳' ۴۹" تا ۵۲'۲۹" واقع می‌باشد. حوضه آبریز رودخانه کارون سه بخشی از حوزه آبخیز خلیج فارس و در داخل ارتفاعات زاگرس میانی قرار دارد. حداکثر ارتفاع منطقه ۴۴۰۵ متر و قسمت عمده‌ای از استان‌های خوزستان، چهارمحال بختیاری، اصفهان، کهگیلویه و بویر احمد را در بر گرفته است (شکل ۱).

۲- مدل WEAP

مدل WEAP توسط موسسه محیط زیست استکهلم (SEI) توسعه یافته است. WEAP بصورت یک ابزار پیش‌بینی، نیاز آبی، جریان‌ها و مقدار ذخیره، گسترش آلودگی و آبدهی را شبیه‌سازی می‌کند (Gao et al., 2017). این نرم افزار قادر به شبیه‌سازی طیف وسیعی از مولفه‌های طبیعی و ساخته شده این سیستم‌ها از قبیل رواناب، دبی پایه، تغذیه طبیعی آب‌های زیرزمینی، تحلیل نیازها، ذخیره آب، حقایقه‌ها و اولویت‌های تخصیص، بهره‌برداری از مخزن، تولید برقابی، روندیابی آلودگی و

در موضوع تغییر اقلیم و بررسی تغییرات پارامترهای دما و بارش برای دوره آتی از دیتاهای ریزمقیاس شده ۳ مدل GCM۱۶ تحت دو سناریوی انتشار RCP۱۷ (RCP4.5) و RCP8.5 استفاده شد. انتخاب سه مدل EC-EARTH، GFDL-ESM2M و CNRM-CM5 بر اساس عملکرد خوب آن‌ها در شبیه‌سازی داده‌های تاریخی بارش و دما و همچنین با توجه به مقادیر ضرایب R^2 ، NSE و $BIAS$ به عنوان معیارهای ارزیابی صورت گرفت (Almazroui et al., 2020). داده‌های دمای حداکثر و دمای حداقل و بارش خروجی مدل-های اقلیمی EC-EARTH، GFDL-ESM2M و CNRM-CM5 تحت پروژه CORDEX برای سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به کمک نرم افزار CMhyd ریزمقیاس شده و سری‌های زمانی دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش برای ۸ ایستگاه هواشناسی در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) تولید شد. بدین ترتیب که سناریوهای تغییر اقلیم از مرکز محاسبات اقلیمی آلمان (DKRZ) مرتبط با سیستم سازمانی ESGF۱۹ تحت پروژه CORDEX برای منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا دریافت گردید. این داده‌ها در تفکیک زمانی روزانه و در تفکیک مکان ۰.۴۴ درجه به صورت فایل NetCDF می‌باشد. با توجه اینکه در پروژه CORDEX دوره پایه تا سال ۲۰۰۵ می‌باشد، در این مطالعه، دوره تاریخی سال‌های (۱۹۹۰-۲۰۰۵) انتخاب شد. همچنین با توجه به اینکه دوره آینده در پروژه CORDEX از سال ۲۰۰۶ شروع می‌شود و پارامترهای اقلیمی تا پایان سال ۲۱۰۰ پیش‌نگری شده‌اند، قسمتی از این پیش‌نگری‌ها به عنوان دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) در نظر گرفته شد. در طی فرآیند ریزمقیاس نمایی در پروژه CORDEX به علت مقیاس‌گذاری (میانگین‌گیری فضایی در سطح یک شبکه) و سایر تخمین‌ها، انحرافات به داده‌ها وارد شده که منجر به مقادیر داده‌های اقلیمی نادرست می‌گردد. بنابراین، به منظور ارزیابی و پیش‌نگری تغییر اقلیم آینده در سطوح منطقه‌ای این انحرافات باید از داده‌های اقلیمی تولید شده حذف گردد که به-منظور تصحیح انحرافات داده‌های استخراج شده، از مدل CMhyd استفاده شد.

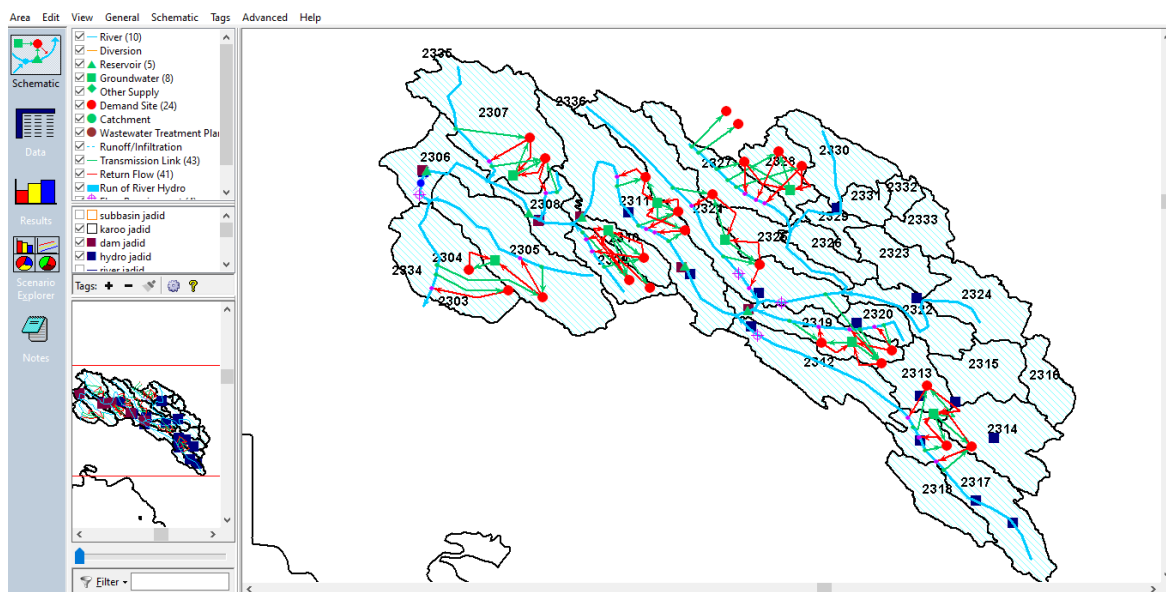
از آنجا که تحت اثر تغییر اقلیم پارامترهای بارش و دما محدوده در آینده دستخوش تغییرات می‌گردد. در این میان، بررسی میزان رواناب دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) برای تخمین حجم آب در دسترس در حوضه آبریز لازم است. از این رو در این پژوهش برای شبیه‌سازی رواناب دوره آتی از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده شد (Jakeman and Hornberger, 1993). به عنوان یک مدل هیدرولوژیکی از ظرفیت مدل WEAP۲۰ نیز برای ارزیابی و مدیریت منابع و مصارف محدوده



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کارون ۳

که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تامین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر قیود است (Demertzi et al., 2014). در پژوهش حاضر، ابتدا شماتیک منابع و مصارف آب محدوده مطالعاتی همانند شکل (۲) در محیط نرم افزار WEAP ترسیم و شبیه‌سازی گردید. دوره شبیه‌سازی از سال (۲۰۰۷ - ۲۰۲۱) در نظر گرفته شد. سپس اطلاعات مربوط به رودخانه کارون و سرشاخه‌های آن، مخزن سدها و آبخوان‌ها، مصارف خانگی^{۲۲}، مصارف صنعت و کشاورزی به تفکیک و به ترتیب با اولویت نیاز شرب، محیط زیست، صنعت و کشاورزی به مدل اضافه گردید.

کیفیت آب، ارزیابی آسیب‌پذیری و نیازهای اکوسیستم است (Mehta et al., 2011). مزیت اصلی WEAP در رویکرد یکپارچه در شبیه‌سازی سیستم‌های آبی و جهت‌گیری آن، در راستای سیاست‌ها است (Abera Abdi and Ayenew, 2021). WEAP در معادلات خود، مسائل مربوط به نیاز (الگوهای مصرف آب، راندمان تجهیزات، استفاده مجدد، هزینه‌ها و تخصیص) را همگام با مسائل مربوط به منابع (جریان‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، مخازن و انتقال‌های آب) لحاظ کرده است. WEAP از یک مدل برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند



شکل ۲. پیکربندی سامانه منابع آب حوضه آبریز کارون ۳ در نرم‌افزار WEAP

میزان برداشت از آب سطحی و زیرزمینی و مقدار آب برگشتی به منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز برای مصارف مختلف بر اساس اطلاعات ارائه شده در جداول ۱ تا ۳ در نظر گرفته شد که واحد اعداد میلیون مترمکعب است. به دلیل ساده‌سازی مدل‌سازی، مصارف حوضه آبریز کارون ۳ به ۸ بخش A1-A8 تقسیم‌بندی گردید و هر کدام از زیر بخش‌ها به صورت مجزا در مدل WEAP در نظر گرفته شد (مطالعات کشاورزی حوضه- آبریز کارون، ۱۳۹۳).

جدول ۱. مصارف کشاورزی حوضه آبریز کارون ۳

	Demand site	Agriculture (mcm)	Irrigation efficiency	Supply percent		Return flow percent	Return flow percent	
				GW	SW		GW	SW
	۲۳۲۲	۱۳/۶	۴۰	۱۲	۸۸	۱۰	۴۵	۵۵
	۲۳۲۳	۱۷۸/۲	۴۱	۶۷/۳	۳۲/۷	۱۲	۴۰	۶۰
	۲۳۲۴	۱۱۴/۷	۴۲	۶۵/۱	۳۴/۹	۱۴	۳۰	۷۰
	۲۳۲۵	۱۱	۳۸	۹	۹۱	۱۰	۴۰	۶۰
	۲۳۲۶	۹۲	۴۰	۱۰/۱	۸۹/۹	۱۴	۲۵	۷۵
A1	۲۳۲۷	۷۸/۵	۳۷	۳۸/۸	۶۱/۲	۱۸	۳۵	۶۵
	۲۳۲۸	۱۵۵	۴۰	۳۹/۵	۶۰/۵	۱۱	۴۰	۶۰
	۲۳۲۹	۷۶	۳۸	۶۶	۳۴	۱۰	۲۵	۷۵
	۲۳۳۰	۲۲۱/۵	۴۱	۹۷	۳	۹	۳۵	۶۵
	۲۳۳۱	۸۳	۴۱	۶۷/۵	۳۲/۵	۹	۴۰	۶۰
	۲۳۳۲	۶۰/۵	۴۳	۹۹/۳	۰/۷	۱۱	۴۵	۵۵
	۲۳۳۳	۸۴	۴۳	۷۳/۸	۲۶/۲	۱۶	۵۰	۵۰
	۲۳۱۲	۱۳/۶	۳۷	۹۲/۵	۷/۵	۱۶	۷۰	۳۰
	۲۳۱۳	۴۸/۳	۴۱	۸۱/۴	۱۸/۶	۹	۸۰	۲۰
	۲۳۱۴	۹۴	۴۰	۴۳	۵۷	۸	۵۰	۵۰
A2	۲۳۱۵	۱۶۸/۸	۴۱	۱۶/۵	۸۳/۵	۹	۴۸	۵۲
	۲۳۱۶	۱۴۸/۷	۴۳	۲۸	۷۲	۱۴	۵۰	۵۰
	۲۳۱۷	۳۱۳/۳	۴۰	۵۲/۵	۴۷/۵	۸	۴۵	۵۵
	۲۳۱۸	۱۰۳	۴۰	۱۲/۶	۸۷/۴	۷	۵۰	۵۰
A3	۲۳۱۹	۱۰۸/۲	۴۱	۶۳	۳۷	۱۱	۴۰	۶۰
	۲۳۲۰	۱۱۰/۹	۴۳	۹۳/۸	۶/۲	۱۶	۳۵	۶۵
A4	۲۳۲۱	۳۵/۱	۳۸	۳۸/۵	۶۱/۵	۱۲	۲۵	۷۵
A5	۲۳۰۹	۱۶/۴	۳۶	۵۲/۲	۴۷/۸	۱۱	۴۸	۵۲
A6	۲۳۰۷	۹/۱	۳۶	۷۳/۲	۲۶/۸	۱۰	۴۰	۶۰
	۲۳۰۸	۸/۶	۳۶	۳۲/۴	۶۷/۶	۷	۲۰	۸۰
	۲۳۰۴	۱۶۸۶/۶	۳۷	۶/۶	۹۳/۴	۱۴	۴۵	۵۵
A7	۲۳۰۶	۱۹۸/۵	۳۸	۱۵/۶	۸۴/۴	۱۲	۴۵	۵۵
	۲۳۱۰	۲۲/۶	۳۸	۵۲/۷	۴۷/۳	۱۰	۴۵	۵۵
	۲۳۱۱	۵/۲	۳۶	۹۵	۵	۱۳	۳۰	۷۰
A8	۲۳۰۱	۳۶۰	۳۷	۰	۱۰۰	۱۸	۰	۱۰۰

جدول ۲. مصارف شرب حوضه آبریز کارون ۳

	Demand site	Domestic (mcm)	Supply percent		Return flow percent	Return flow percent	
			GW	SW		GW	SW
A1	۲۲۲۲	۰/۳	۹۱	۹	۷۷	۷۹	۲۱
	۲۲۲۳	۲/۵	۹۲	۸	۷۸	۸۸	۱۲
	۲۲۲۴	۰/۸	۱۰۰	۰	۷۲	۹۰	۱۰
	۲۲۲۵	۱/۴	۸۰	۲۰	۷۷	۱۰۰	۰
	۲۲۲۶	۱/۹	۷۸	۲۲	۸۴	۸۳	۱۷
	۲۲۲۷	۱/۵	۸۵	۱۵	۷۷	۱۰۰	۰
	۲۲۲۸	۱۰/۹	۷۸	۲۲	۸۴	۷۳	۲۷
	۲۲۲۹	۲/۸	۷۷	۲۳	۷۸	۸۸	۱۲
	۲۲۳۰	۲۲/۴	۱۰۰	۰	۷۸	۸۱	۱۹
	۲۲۳۱	۰/۸	۹۷	۳	۷۰	۱۰	۹۰
	۲۲۳۲	۰/۴	۱۰۰	۰	۷۸	۳۰	۷۰
	۲۲۳۳	۶/۷	۹۸	۲	۸۰	۲۸	۷۲
	۲۳۱۲	۲/۱	۷۸	۲۲	۷۳	۹۵	۵
	۲۳۱۳	۲/۸	۶۹	۳۱	۷۲	۹۷	۳
	A2	۲۳۱۴	۱/۶	۱۰۰	۰	۷۳	۸۷	۱۳
۲۳۱۵		۳/۲	۱۰۰	۰	۸۰	۶۵	۳۵
۲۳۱۶		۰/۱	۱۰۰	۰	۷۲	۹۰	۱۰
۲۳۱۷		۱۷/۶	۹۵	۵	۸۵	۵۲	۴۸
۲۳۱۸		۱/۳	۸۰	۲۰	۷۷	۹۰	۱۰
A3	۲۳۱۹	۷	۸۷	۱۳	۷۳	۹۲	۸
	۲۳۲۰	۲/۷	۸۳	۱۷	۷۲	۹۸	۲
A4	۲۳۲۱	۳/۲	۸۵	۱۵	۷۵	۹۹	۱
A5	۲۳۰۹	۱	۳۹	۶۱	۷۲	۴۲	۵۸
A6	۲۳۰۷	۴	۱۲	۸۸	۶۹	۴۳	۵۷
	۲۳۰۸	۱/۲	۱۲	۸۸	۶۶	۴۸	۵۲
A7	۲۳۰۴	۱۶	۶۷	۳۳	۶۸	۲۰	۸۰
	۲۳۰۶	۴/۱	۳	۹۷	۶۷	۳۲	۶۸
	۲۳۱۰	۱۴/۴	۹۳	۷	۸۰	۴۱	۵۹
	۲۳۱۱	۳	۴۵	۵۵	۷۲	۴۶	۵۴
A8	۲۳۰۱	۶۲/۳	۰	۱۰۰	۷۰	۱۰	۹۰

جدول ۳. مصارف صنعت حوضه آبریز کارون ۳

	Demand site	Industry (mcm)	Supply percent		Return flow percent	
			GW	SW	percent	percent
	۲۳۲۲	.	.	.	.	.
	۲۳۲۳	.	.	.	.	.
	۲۳۲۴	.	.	.	.	.
	۲۳۲۵	.	.	.	.	.
	۲۳۲۶	۰/۵	۹	۹۱	۵۳	۱۰
A1	۲۳۲۷	.	.	.	.	.
	۲۳۲۸	.	.	.	.	.
	۲۳۲۹	۰/۲	۳۳	۶۷	۵۳	۳۲
	۲۳۳۰	.	.	.	.	.
	۲۳۳۱	.	.	.	.	.
	۲۳۳۲	.	.	.	.	.
	۲۳۳۳	۱/۳	۲۲	۷۸	۵۳	۲۲
	۲۳۱۲	.	.	.	.	.
	۲۳۱۳	.	.	.	.	.
	۲۳۱۴	.	.	.	.	.
A2	۲۳۱۵	۰/۲	.	.	۵۳	۱۶
	۲۳۱۶	.	.	.	.	.
	۲۳۱۷	۰/۹	۲۵	۷۵	۵۳	۲۷
	۲۳۱۸	.	.	.	.	.
A3	۲۳۱۹	۰/۲	۱۶	۸۴	۵۳	۱۶
	۲۳۲۰	.	.	.	.	.
A4	۲۳۲۱	.	.	.	.	.
A5	۲۳۰۹	۰/۳	۹۰	۱۰	۵۳	۱۰۰
A6	۲۳۰۷	.	.	.	.	.
	۲۳۰۸	.	.	.	.	.
	۲۳۰۴	۸/۳	۸۷	۱۳	۵۳	۸۷
A7	۲۳۰۶	۰/۱	۱۰۰	.	۵۳	۹۸
	۲۳۱۰	۰/۱	۸۵	۱۵	۵۳	۸۷
	۲۳۱۱	.	.	.	.	.
A8	۲۳۰۱	۱۹/۲	۹۶	۴	۵۳	۹۹

۳- رویکرد تصمیم‌گیری استوار^{۲۳}

هدف اصلی در روش RDM دستیابی به سیاست‌های (دسته‌ای از متغیرهای تصمیم) استوار می‌باشد. به این مفهوم که در طی فرایند مقایسه، سیاست‌هایی که در طیف وسیع‌تری از شرایط آتی دارای عملکرد بهتر از حد آستانه خاصی باشند، انتخاب گردند (Hall et al., 2012). رویکرد RDM معمولاً از ۴ مرحله هدف‌گذاری، شبیه‌سازی، اصلاح سیاست و توصیف مشخصات عدم قطعیت‌های باقیمانده تشکیل شده است (Kasprzyk et al., 2013). در مرحله هدف‌گذاری عدم قطعیت‌ها ($U_j = (u_1, \dots, u_m)$)، سیاست‌ها (q_i)، روابط کلیدی و شاخص-

های عملکردی ($f(q_i, U_j)$) تعریف می‌گردد. در مرحله شبیه‌سازی یک یا چند سیاست یا استراتژی به عنوان کاندید ارزیابی انتخاب می‌گردد و سپس برای تمامی سناریوهای محتمل، شبیه‌سازی انجام می‌شود و عملکرد سیاست‌ها تحت سناریوهای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. طی این ارزیابی می‌توان پایگاه داده-ای شامل عملکرد هر سیاست در شرایط سناریوهای محتمل را تشکیل داد. اگر در مسئله‌ای برای هر سناریو دو پارامتر دارای عدم قطعیت وجود داشته باشد ($U_j = (u_1, u_2)$) جدولی مشابه جدول (۴) برای هر سیاست تشکیل می‌شود. متناسب با اهداف این تحقیق α و β می‌توانند تغییرات سطح زیر کشت کشاورزی و رواناب رودخانه کارون باشند.

جدول ۴. نتیجه شبیه‌سازی یک استراتژی خاص در حضور دو عدم قطعیت

$u_2 \backslash u_1$	α_1	α_2	...	α_k
β_1	$f(q_i, (\alpha_1, \beta_1))$	$f(q_i, (\alpha_2, \beta_1))$	...	$f(q_i, (\alpha_k, \beta_1))$
β_2	$f(q_i, (\alpha_1, \beta_2))$	$f(q_i, (\alpha_2, \beta_2))$	...	$f(q_i, (\alpha_k, \beta_2))$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
β_l	$f(q_i, (\alpha_1, \beta_l))$	$f(q_i, (\alpha_2, \beta_l))$	...	$f(q_i, (\alpha_k, \beta_l))$

جدول (۴) نشان می‌دهد که سناریو q_i برای تمامی حالات نمایش داده شده در رابطه (۱) به صورت گسته مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار خواهد گرفت. تعداد این شبیه‌سازی‌ها برای هر سیاست، بسته به تعداد عدم قطعیت‌ها و تعداد گسسته‌سازی‌ها می‌تواند صدها یا هزاران شبیه‌سازی باشد. مطابق رابطه (۱) (u_1, u_2) به ترتیب عضو α و β می‌باشند. همچنین i تعداد استراتژی‌ها یا سناریوها را نشان می‌دهد. z نیز مطابق شکل (۲) تعداد عدم قطعیت‌ها را نشان می‌دهد.

(۳)

$$R_{satisficing} = \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} I_s(f(x; s))$$

Is: satisficing indicator function

در نهایت استراتژی دارای بیشترین عدم حساسیت (کمترین عدم قطعیت) است، که شاخص پشیمانی کوچک‌تر و شاخص استحکام بالاتری داشته باشد. همانگونه که ذکر شد تعداد شبیه‌سازی‌ها برای هر سیاست یا استراتژی، بسته به تعداد عدم قطعیت‌ها و تعداد گسسته‌سازی‌ها می‌تواند صدها یا هزاران شبیه‌سازی باشد.

در این پژوهش به منظور تعیین محدوده تغییرات رواناب رودخانه کارون و به منظور مدیریت عدم قطعیت‌های موجود تغییرات رواناب پیش‌بینی شده توسط مدل IHACRES تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آبی مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج حاصل شده، بازه عدم قطعیت تغییرات میانگین سالانه رواناب رودخانه کارون بین ۲۰+ تا ۳۰- درصد در نظر گرفته شد. مانند آنچه در تحقیق (Mansouri et al., 2014) قابل مشاهده است. همچنین محدوده تغییرات سطح زیر کشت بین ۵+ تا ۵- درصد در نظر گرفته شد (شکل ۳). شاخص درصد پوشش نیاز^{۲۴} به عنوان معیار ارزیابی عملکرد استراتژی‌ها تحت شرایط عدم قطعیت در دوره آینده در نظر گرفته شد.

(۱)

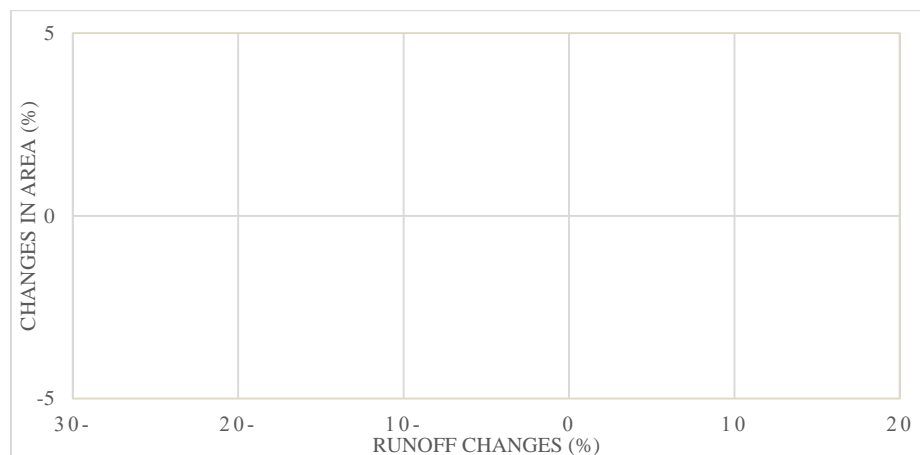
$$\forall (u_1, u_2) = \{u_1, u_2 | u_1 \in [\alpha_1 \alpha_k], u_2 \in [\beta_1 \beta_l]\}$$

به منظور ارزیابی عملکرد سیاست‌ها و یا استراتژی‌ها تحت عدم قطعیت شدید و برای تعیین استحکام هر استراتژی دو رویکرد ارزیابی استحکام وجود دارد (Hadka et al. 2015; Yan et al. 2017). رویکرد پشیمانی و رویکرد رضایتمندی که در زیر توضیح داده شده است (Herman et al. 2015).

Regret Method: استحکام مبتنی بر پشیمانی با به حداقل رساندن انحرافات در عملکرد ناشی از عدم قطعیت در مقایسه با یک راه حل ایده آل به دست می‌آید.

(۲)

$$R_{Regret} = \min_i \left\{ \text{quantile}_{s \in S} \left(\left| \frac{f_i(x; s) - \sup_{y \in P} f_i(y; s)}{f_i(x; s)} \right|, 0.9 \right) \right\} \quad Sa$$



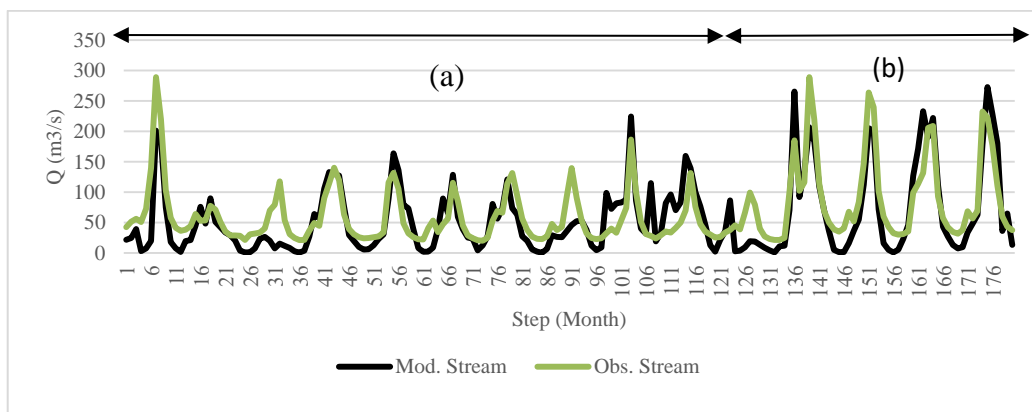
شکل ۳. فضای عدم قطعیت در این تحقیق

عملکرد مدل در دوره واسنجی و دوره صحت سنجی، به وسیله مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و استفاده از معیارهای عملکردی محاسبه و در جدول (۵) ارائه شده است. از مشاهده نتایج مشخص گردید که دوره واسنجی با ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۷۲ و ضریب نش NS برابر ۰/۶۶ و Bias برابر ۰/۱۷ عملکرد قابل قبولی داشته است. همچنین نتایج دوره صحت‌سنجی نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول این مدل در شبیه‌سازی رواناب رودخانه کارون است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مدل واسنجی شده برای حوضه، به طور کلی جریان‌های کم را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند، اما در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر، در بعضی از سال‌ها ناتوان بوده و مقادیر کمتری را پیش بینی کرده است. پس از واسنجی مدل IHACRES، سری زمانی ماهانه دما و بارندگی دوره آبی ۲۰۳۰-۲۰۵۵ به مدل معرفی شد و سری زمانی ماهانه رواناب رودخانه کارون در ایستگاه ارمند در دوره آبی شبیه‌سازی گردید. نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که میزان رواناب رودخانه کارون طی دوره آبی در اغلب ماه‌ها روند کاهشی دارد که با نظر گرفتن کاهش بارندگی در دوره آبی نتیجه قابل قبولی می‌باشد. شبیه‌سازی رواناب رودخانه کارون به صورت ماهانه در دوره آبی نیز نشان از کاهش ۸-۲۲ درصدی در ماه‌های مختلف دارد. در مجموع نتایج نشان از روند کاهشی میانگین آورد سالانه رودخانه کارون نسبت به دوره پایه می‌باشد. لازم به ذکر است از خروجی رواناب دوره آبی تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در مدل WEAP جهت شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه برای دوره آبی استفاده می‌شود که نتایج آن در بخش‌های بعد ارائه گردیده است.

با ترکیب مختلف از عدم قطعیت‌ها، ۳۶ آینده محتمل حاصل شد. به این صورت که در سناریوی افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری ۱۸ حالت عدم قطعیت و در سناریو یا استراتژی تغییر الگوی کشت ۱۸ حالت عدم قطعیت وجود دارد. که مجموعاً ۳۶ آینده محتمل حاصل می‌گردد. در این پژوهش هر کدام از استراتژی‌های افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت تحت ۱۸ ترکیب مختلف از عدم قطعیت توسط شاخص R_{Regret} مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این صورت که در هر ترکیب مختلف از عدم قطعیت مقدار شاخص درصد پوشش نیاز از مقدار شاخص درصد پوشش نیاز در حالت ایده‌آل کم می‌شود و بر مقدار شاخص درصد پوشش نیاز در حالت ایده‌آل تقسیم می‌شود. در نتیجه هر چه مقدار شاخص پوشش‌مانی کمتر باشد مطلوب‌تر است. شاخص استحکام نیز مطابق توضیحات بالا تحت ترکیب مختلف از عدم قطعیت‌ها محاسبه می‌شود (رابطه ۳). در نتیجه هر کدام از استراتژی‌هایی که از مقدار استحکام بالاتر و مقدار شاخص پوشش‌مانی کمتر داشته باشد، استراتژی استوار این تحقیق می‌باشد.

نتایج و بحث

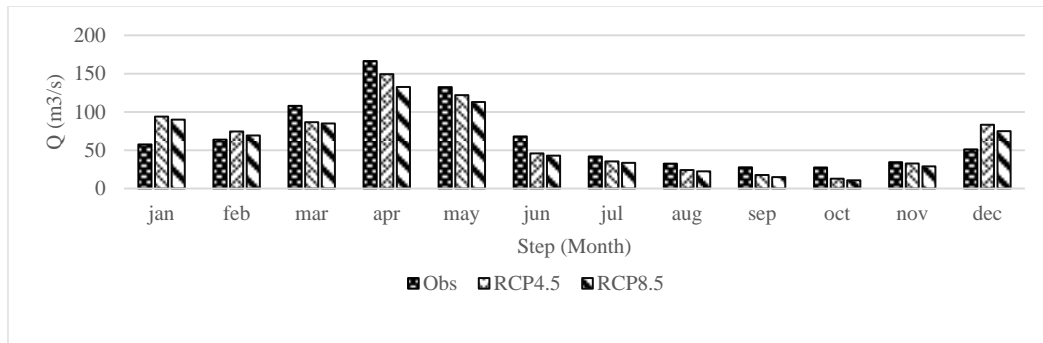
۱- پیش‌بینی رواناب دوره آبی تحت تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم همانطور که بیان شد در این پژوهش، مدل سازی بارش-رواناب با استفاده از نرم افزار IHACRES به منظور محاسبه رواناب ماهانه در دوره آبی در رودخانه کارون صورت پذیرفت. جهت شبیه‌سازی رواناب ماهانه منطقه مورد مطالعه در دوره آبی، در ابتدا مدل IHACRES برای دوره (۲۰۰۷-۲۰۱۶) واسنجی شده و برای دوره (۲۰۱۷-۲۰۲۱) مورد صحت سنجی قرار گرفت (شکل ۴). نتایج



شکل ۴. مقایسه مقادیر رواناب ماهانه مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده توسط نرم افزار IHACRES (a: دوره واسنجی، b: دوره صحت‌سنجی)

جدول ۵. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHACRES در محدوده مطالعاتی

دوره	دوره واسنجی (۲۰۰۷-۲۰۱۶)			دوره صحت سنجی (۲۰۱۷-۲۰۲۱)		
آماره	R^2	NS	Bias	R^2	NS	Bias
مقدار	۰/۷۲	۰/۶۶	۰/۱۷	۰/۶۵	۰/۵۷	۰/۲



شکل ۵. مقایسه میانگین ماهانه رواناب رودخانه کارون در ایستگاه ارمند طی دوره مدل‌سازی و دوره پیش‌بینی (۲۰۳۰-۲۰۵۵)

نظر گرفته شد. نتایج عملکرد مدل در دوره واسنجی و دوره صحت سنجی، در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه توسط نرم‌افزار WEAP (جدول ۷) نشان داد که در طول دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۰۷ نیاز شرب تقریباً در اکثر بخش‌ها به صورت کامل تامین می‌گردد و تنها در بخش‌های A8 یا همان محدوده مطالعاتی ۲۳۰۱ (خرمشهر) و A6 (محدوده‌های مطالعاتی لالی و اندیکا) با کمبود آب مواجه هستند. با توجه به جدول (۸) بخش غالب این کمبودها در فصل تابستان می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که در بخش صنعت کمبودی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن می‌تواند برداشت تلفیقی از آب زیرزمینی و آب سطحی در حجم پایین باشد. نتایج مدل‌سازی نشان داد در شرایط موجود پروژه‌های انتقال تونل کوه‌رنگ ۱ و ۲ که در مجموع سالانه ۵۵۰ میلیون متر مکعب از آب رودخانه کوه‌رنگ را به حوضه‌آبریز زاینده رود انتقال می‌دهند که در شرایط نرمالی قرار دارند. میزان نیاز سالانه حوضه-آبریز کارون ۳ در بخش‌های مختلف در شرایط موجود حدود ۶۲۳۰ میلیون متر مکعب می‌باشد که حجم زیادی از کمبودها در این حوضه مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد. در این میان بخش‌های A1، A2 و A3 با کمبود منابع آب در بخش کشاورزی روبه‌رو هستند و فصل تابستان نیز بیشترین کمبود را نشان می‌دهد. بخش A1 شامل محدوده‌های مطالعاتی گندمان، اردل، بروجن، شلمزار، شهرکرد و ... همگی جز حوضه‌آبریز بهشت‌آباد می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده این بخش بیشترین کمبود منابع آب را برای کشاورزی دارد ولی متأسفانه طرح‌های توسعه در این حوضه در دست اجرا می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد با توجه به کمبودها در شرایط موجود، حوضه‌آبریز بهشت‌آباد پتانسیل لازم برای انتقال آب به حجم ۵۸۰ میلیون متر مکعب در سال توسط تونل بهشت‌آباد به حوضه‌آبریز زاینده رود را نخواهد داشت.

مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده برای دوره آینده تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و رواناب دوره پایه نشان می‌دهد که در نه ماه مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر مقدار رواناب دوره پایه بیش از مقدار آن در دوره آینده تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 است و در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر مقدار رواناب دوره پایه کمتر از مقدار آن در دوره آینده تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 است. همچنین، مقایسه مقدار رواناب دوره آینده تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد که مقدار رواناب در تمام ماه‌ها در دوره آینده تحت سناریوی RCP4.5 بیش از مقدار آن تحت سناریوی RCP8.5 است.

در همین راستا، مهربانی و همکاران (۲۰۲۴) نیز کاهش بارش و افزایش دمای حداقل و دمای حداکثر و در پی آن کاهش رواناب ورودی به شبکه آبیاری و زهکشی سد سفیدرود را نتیجه‌گیری نمودند. منگیستو و همکاران (۲۰۲۱) افزایش دمای میانگین سالانه و کاهش بارش در اغلب قسمت‌های حوضه را نتیجه‌گیری نمودند. با این وجود، رواناب سطحی تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 افزایش و آبدهی کل حوضه تحت هر دو سناریو کاهش داشت. ناتالی و همکاران (۲۰۲۰) نیز افزایش دما و کاهش بارش را پیش‌بینی نمودند. همچنین، با پیش‌بینی افزایش تبخیر و تفرق و کاهش بارش، کاهش شدید آبدهی از ۲۰- تا ۴۰- درصد در سراب حوضه‌های آبخیز پاتوگونیای شمالی را نتیجه‌گیری نمودند.

۲- ارزیابی نتایج مدل WEAP

بررسی و ارزیابی منابع و مصارف حوضه‌آبریز کارون ۳ در شرایط آتی (۲۰۲۴-۲۰۴۲) انجام گرفت. رشد مصارف شرب، صنعت و کشاورزی با توجه به اطلاعات ارائه شده در مطالعات تلفیق حوضه-آبریز کارون در نظر گرفته شد. همچنین پروژه‌های انتقال آب تونل سوم کوه‌رنگ و تونل بهشت‌آباد نیز برای بررسی در دوره آتی در

جدول ۶. نتایج واسنجی و اعتبار سنجی مدل WEAP در ایستگاه گنود

اعتبارسنجی (۲۰۱۷-۲۰۲۱)		واسنجی (۲۰۰۷-۲۰۱۶)		دوره	
Bias	NS	R ²	Bias	NS	R ²
۰/۱۲	۰/۶۵	۰/۸۵	-۰/۱۴	۰/۷۳	۰/۹۲
آماره		مقدار			

جدول ۷. عدم تامین نیازهای حوضه آبریز کارون ۳ در شرایط موجود*

	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱
Agriculture (A1)	۳۹/۳	۱۰۳/۷	۱۸۳/۲	۱۳۷/۰	۱۸۷/۶	۱۷۰/۸	۱۸۷/۲	۱۸۴/۸	۱۵۷/۴	۱۱۸/۵	۱۶۹/۶	۱۱۷/۶	۶۹/۳	۸۸/۷	۶۵/۶
Agriculture (A2)	۰/۰	۷۰/۲	۷۸/۰	۷۲/۱	۳۹/۱	۱۰/۹	۲۳/۰	۲۳/۸	۴۲/۱	۲۵/۰	۵۱/۲	۷۹/۰	۴۰/۵	۰/۰	۰/۰
Agriculture (A3)	۰/۰	۲۰/۴	۱۳/۰	۱۰/۵	۱۱/۳	۱۵/۴	۸/۳	۱۱/۶	۱۲/۷	۱۱/۱	۱۸/۶	۰/۴	۰/۹	۰/۹	۰/۰
Agriculture (A4)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۸	۱/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Agriculture (A5)	۰/۰	۰/۰	۰/۸	۰/۵	۰/۵	۱/۱	۰/۰	۰/۴	۰/۰	۰/۲	۱/۲	۱/۳	۱/۰	۰/۰	۰/۰
Agriculture (A6)	۰/۱	۱/۳	۱/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۲	۰/۰	۰/۳	۰/۷	۰/۸	۰/۳	۰/۲	۰/۵	۰/۲
Agriculture (A7)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Agriculture (A8)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Domestic (A1)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Domestic (A2)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Domestic (A3)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Domestic (A4)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Domestic (A5)	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۰
Domestic (A6)	۰/۰	۱/۱	۰/۹	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۰/۶	۰/۶	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Domestic (A7)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Domestic (A8)	۲/۳	۶/۷	۴/۴	۳/۱	۳/۶	۲/۸	۲/۶	۱/۳	۱/۶	۱/۵	۲/۵	۳/۱	۰/۳	۲/۵	۰/۸
Industry (A1)	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Industry (A2)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Industry (A3)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Industry (A5)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Industry (A7)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Industry (A8)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Kohrang Tunnel (1)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Kohrang Tunnel (2)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Sum	۴۱/۷	۲۰۳/۴	۲۸۲/۱	۲۲۴/۶	۲۴۳/۶	۲۰۳/۹	۲۲۳/۱	۲۲۲/۱	۲۱۴/۷	۱۵۷/۷	۲۴۴/۸	۲۰۲/۴	۱۱۲/۴	۹۲/۷	۶۶/۷

* واحد اعداد ارائه شده در جدول، میلیون مترمکعب است.

جدول ۸. درصد پوشش نیازهای حوضه آبریز کارون ۳ در شرایط موجود*

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Agriculture (A1)	۶۹/۲	۸۸/۶	۹۷/۸	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۹/۸	۹۳/۴	۸۱/۶	۶۸/۵
Agriculture (A2)	۹۰/۷	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۹/۷	۹۹/۱	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۸۱/۱
Agriculture (A3)	۹۸/۰	۹۲/۴	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۹/۸	۹۳/۹	۸۸/۲	۹۷/۷
Agriculture (A4)	۹۶/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۷/۴
Agriculture (A5)	۹۳/۵	۹۸/۷	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۹/۶	۹۹/۴	۹۵/۵	۹۴/۱	۹۲/۲
Agriculture (A6)	۸۵/۱	۹۷/۶	۱۰۰/۰	۹۹/۷	۱۰۰/۰	۹۹/۴	۱۰۰/۰	۹۷/۵	۹۵/۲	۹۵/۵	۹۱/۹	۸۸/۲
Agriculture (A7)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Agriculture (A8)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Domestic (A1)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Domestic (A2)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Domestic (A3)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Domestic (A4)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Domestic (A5)	۹۱/۹	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۲/۳	۸۵/۴	۸۹/۲
Domestic (A6)	۷۶/۷	۹۸/۱	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۴/۹	۹۲/۴	۸۰/۸	۷۶/۹
Domestic (A7)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Domestic (A8)	۹۲/۳	۹۸/۳	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۹/۰	۹۶/۱	۹۱/۱	۸۷/۷	۸۷/۴
Industry (A1)	۷۳/۳	۹۰/۳	۹۶/۹	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۸۳/۳	۷۰/۲
Industry (A2)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Industry (A3)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Industry (A5)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Industry (A7)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Industry (A8)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Kohrang Tunnel (1)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰
Kohrang Tunnel (2)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰

* واحد اعداد ارائه شده در جدول، میلیون مترمکعب است.

جدول ۹. عدم تامین نیازهای حوضه آبریز کارون ۳ در سناریو ۱*

	۲۰۲۴	۲۰۲۵	۲۰۲۶	۲۰۲۷	۲۰۲۸	۲۰۲۹	۲۰۳۰	۲۰۳۱	۲۰۳۲	۲۰۳۳	۲۰۳۴	۲۰۳۵	۲۰۳۶	۲۰۳۷	۲۰۳۸	۲۰۳۹	۲۰۴۰	۲۰۴۱	۲۰۴۲
Agriculture (A1)	۱۶۲/۳	۲۷۱/۳	۲۱۹/۳	۱۷۹/۴	۲۱۷/۷	۲۲۸/۴	۱۹۶/۷	۲۱۸/۹	۲۱۸/۴	۲۱۸/۰	۲۲۱/۹	۱۵۸/۴	۱۶۳/۲	۱۶۹/۰	۱۶۳/۱	۲۲۳/۷	۲۵۵/۵	۲۰۳/۰	۲۲۵/۶
Agriculture (A2)	-/-	۸۸/۷	۸۸/۹	۸۳/۹	۵۲/۷	۲۰/۳	۲۸/۴	۳۲/۴	۵۷/۸	۴۲/۰	۶۷/۷	۹۴/۹	۳۸/۵	۴/۹	-/-	۳۳/۹	۲۶/۴	۴۴/۵	۳۸/۵
Agriculture (A3)	۲۲/۹	۲۸/۰	۲۸/۹	۲۵/۵	۳۱/۰	۲۹/۴	۲۹/۵	۳۱/۳	۳۱/۷	۳۲/۵	۲۹/۷	۱۴/۶	۲۰/۳	۲۲/۶	۲۰/۵	۲۰/۴	۲۸/۳	۲۸/۶	۳۰/۲
Agriculture (A4)	-/-	-/-	-/-	-/۶	-/۳	۲/۵	۱/۵	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Agriculture (A5)	-/-	-/-	۱/۳	-/۸	۱/۱	۲/۰	-/-	-/۹	-/۳	-/۶	۲/۶	۲/۷	۲/۱	-/۱	-/-	۱/۲	۲/۷	-/-	۱/۶
Agriculture (A6)	۲/۴	۱/۱	۲/۰	۱/۹	-/۶	-/۴	۱/۹	۳/۹	۴/۲	۱/۰	۲/۰	۳/۵	۱/۵	۳/۱	۹/۵	۹/۸	۴/۹	۷/۶	۸/۰
Agriculture (A7)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Agriculture (A8)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A1)	۱/۶	۱/۸	۲/۳	۱/۷	۲/۱	۱/۷	۱/۳	۲/۰	۲/۴	۲/۷	۲/۹	۱/۰	۱/۸	۲/۱	۱/۸	۳/۰	۲/۱	۱/۶	۲/۴
Domestic (A2)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A3)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A4)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A5)	-/-	-/-	-/۱	-/-	-/-	-/۱	-/-	-/-	-/-	-/-	-/۱	-/۲	-/۱	-/-	-/-	-/۱	-/-	-/-	-/-
Domestic (A6)	-/۹	-/۶	-/۵	-/۲	-/۱	-/-	-/۳	-/۷	-/۸	-/۳	-/۲	-/۲	-/۲	-/۱	۱/۳	۱/۱	-/۷	-/۷	-/۳
Domestic (A7)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A8)	۴/۵	۳/۲	۳/۷	۲/۹	۲/۷	۱/۴	۱/۶	۱/۶	۲/۷	۳/۳	-/۳	۲/۷	-/۹	۲/۵	۷/۱	۴/۷	۳/۴	۴/۰	۳/۱
Industry (A1)	-/۵	۱/۰	۱/۰	-/۹	۱/۲	۱/۲	-/۹	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۵	-/۷	-/۹	-/۹	-/۸	۱/۷	۱/۸	۱/۳	۱/۹
Industry (A2)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A3)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A5)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A7)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A8)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Tunel Beheshtabad	۳۴/۳	۷۳/۶	۱۳۷/۲	۷۹/۱	۱۵۵/۶	۱۰۷/۹	۹۹/۹	۱۱۴/۷	۱۱۱/۳	۹۳/۷	۱۲۲/۲	۵۴/۳	۳۱/۷	۵۶/۵	۳۲/۹	۱۳۲/۱	۱۰۶/۸	۹۹/۵	۱۱۴/۴
Kohrang Tunnel (1)	۱۷/۷	۳۸/۲	۷۱/۰	۴۰/۹	۸۰/۵	۵۵/۸	۵۱/۷	۵۹/۳	۵۷/۶	۴۸/۵	۶۳/۲	۲۸/۱	۱۶/۴	۲۹/۲	۱۷/۰	۶۸/۳	۵۵/۳	۵۱/۶	۵۹/۲
Kohrang Tunnel (2)	۱۴/۸	۳۱/۷	۵۹/۲	۳۴/۱	۶۷/۱	۴۶/۵	۴۳/۱	۴۹/۴	۴۸/۰	۴۰/۴	۵۲/۷	۲۲/۴	۱۳/۷	۲۴/۴	۱۴/۲	۵۶/۹	۴۶/۰	۴۳/۰	۴۹/۳
Kohrang Tunnel (3)	۱۴/۸	۳۱/۷	۵۹/۲	۳۴/۱	۶۷/۱	۴۶/۵	۴۳/۱	۴۹/۴	۴۸/۰	۴۰/۴	۵۲/۷	۲۲/۴	۱۳/۷	۲۴/۴	۱۴/۲	۵۶/۹	۴۶/۰	۴۳/۰	۴۹/۳
Sum	۲۷۶/۴	۵۸۰/۸	۶۷۴/۵	۴۸۶	۶۷۹/۷	۵۶۴/۱	۵۰۹/۹	۵۶۵/۸	۵۸۴/۶	۵۲۴/۸	۶۱۹/۷	۴۰۸/۱	۳۱۵	۳۴۰/۸	۲۸۲/۴	۶۳۳/۷	۵۸۱	۵۳۱/۷	۵۸۳/۷

* واحد اعداد ارائه شده در جدول، میلیون مترمکعب است.

جدول ۱۰. عدم تامین نیازهای حوضه آبریز کارون ۳ در سناریو ۲*

	۲۰۲۴	۲۰۲۵	۲۰۲۶	۲۰۲۷	۲۰۲۸	۲۰۲۹	۲۰۳۰	۲۰۳۱	۲۰۳۲	۲۰۳۳	۲۰۳۴	۲۰۳۵	۲۰۳۶	۲۰۳۷	۲۰۳۸	۲۰۳۹	۲۰۴۰	۲۰۴۱	۲۰۴۲
Agriculture (A1)	۱۶۴/۳	۲۷۵/۸	۲۲۰/۱	۱۸۲/۳	۲۱۸/۳	۲۵۲/۲	۲۰۱/۴	۲۲۰/۰	۲۱۹/۰	۲۱۸/۰	۲۲۲/۱	۱۵۸/۹	۱۶۵/۲	۱۷۱/۹	۱۶۵/۱	۲۲۲/۱	۲۶۰/۳	۲۰۷/۶	۲۲۶/۶
Agriculture (A2)	-/-	۹۶/۳	۹۳/۰	۸۸/۱	۵۷/۶	۲۵/۹	۴۳/۶	۳۷/۷	۶۷/۶	۴۷/۲	۷۲/۳	۹۹/۰	۵/۵	۷/۹	۱/۹	۳۶/۳	۳۲/۰	۴۹/۷	۴۲/۸
Agriculture (A3)	۲۴/۴	۳۸/۲	۲۸/۲	۲۶/۵	۳۰/۶	۲۸/۷	۲۸/۸	۳۰/۵	۳۱/۳	۳۲/۵	۲۹/۳	۱۴/۲	۲۱/۹	۲۴/۳	۲۲/۱	۳۰/۰	۲۷/۵	۲۸/۲	۲۹/۴
Agriculture (A4)	-/-	-/-	-/-	-/۹	-/۶	۲/۸	۱/۵	-/-	-/-	-/۲	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/۶	-/-
Agriculture (A5)	-/-	-/-	۱/۴	-/۸	۱/۱	۲/۱	-/-	-/۹	-/۴	-/۷	۲/۶	۲/۷	۲/۱	-/۱	-/-	۱/۲	۲/۷	-/-	۱/۷
Agriculture (A6)	۲/۴	۱/۱	۲/۰	۱/۹	-/۶	-/۴	۱/۹	۳/۹	۴/۲	۱/۰	۲/۰	۳/۵	۱/۵	۳/۱	۹/۵	۹/۸	۴/۹	۷/۶	۸/۰
Agriculture (A7)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Agriculture (A8)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A1)	۱/۷	۱/۸	۲/۲	۱/۸	۲/۰	۱/۸	۱/۳	۲/۰	۲/۳	۲/۷	۲/۹	-/۹	۱/۸	۲/۲	۱/۸	۲/۸	۲/۱	۱/۵	۲/۴
Domestic (A2)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A3)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A4)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A5)	-/-	-/-	-/۱	-/-	-/-	-/۱	-/-	-/-	-/-	-/-	-/۱	-/۲	-/۱	-/-	-/-	-/۱	-/-	-/-	-/-
Domestic (A6)	-/۹	-/۶	-/۵	-/۲	-/۱	-/-	-/۳	-/۷	-/۸	-/۳	-/۲	-/۲	-/۲	-/۱	۱/۳	۱/۱	-/۷	-/۷	-/۳
Domestic (A7)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Domestic (A8)	۴/۵	۳/۲	۳/۷	۲/۹	۲/۷	۱/۴	۱/۶	۱/۶	۲/۷	۲/۳	-/۳	۲/۷	-/۹	۲/۵	۷/۱	۴/۷	۳/۴	۴/۰	۳/۱
Industry (A1)	-/۵	۱/۰	۱/۰	-/۹	۱/۲	۱/۲	-/۹	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۵	-/۷	-/۹	-/۹	-/۸	۱/۷	۱/۸	۱/۳	۱/۹
Industry (A2)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A3)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A5)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A7)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Industry (A8)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Tunel Beheshtabad	۳۲/۶	۷۸/۱	۱۴۲/۴	۸۳/۵	۱۶۰/۴	۱۱۲/۶	۱۰۲/۸	۱۱۹/۳	۱۱۶/۱	۹۸/۸	۱۲۸/۶	۵۶/۱	۳۵/۰	۶۰/۳	۳۶/۲	۱۳۷/۴	۱۱۱/۵	۱۰۳/۱	۱۱۹/۰
Kohrang Tunnel (1)	۱۶/۹	۴۰/۴	۷۳/۷	۴۲/۲	۸۳/۰	۵۸/۳	۵۳/۲	۶۱/۷	۶۰/۱	۵۱/۱	۶۶/۵	۲۹/۰	۱۸/۱	۳۱/۳	۱۸/۷	۷۱/۱	۵۷/۷	۵۳/۱	۶۱/۶
Kohrang Tunnel (2)	۱۴/۱	۳۳/۷	۶۱/۴	۳۶/۰	۶۹/۱	۴۸/۶	۴۴/۳	۵۱/۴	۵۰/۰	۴۲/۶	۵۵/۴	۲۴/۲	۱۵/۱	۲۶/۰	۱۵/۶	۵۹/۲	۴۸/۱	۴۴/۳	۵۱/۳
Kohrang Tunnel (3)	۱۴/۱	۳۳/۷	۶۱/۴	۳۶/۰	۶۹/۱	۴۸/۶	۴۴/۳	۵۱/۴	۵۰/۰	۴۲/۶	۵۵/۴	۲۴/۲	۱۵/۱	۲۶/۰	۱۵/۶	۵۹/۲	۴۸/۱	۴۴/۳	۵۱/۳
Sum	۲۷۶/۴	۶۰۳/۹	۶۹۱/۱	۵۰۵	۶۹۶/۳	۵۸۵/۷	۵۲۵/۹	۵۸۲/۴	۶۰۰/۹	۵۲۲/۴	۶۲۰/۲	۴۱۶/۵	۳۲۸/۴	۳۵۶/۵	۲۹۵/۵	۶۳۸/۶	۶۰۱/۹	۵۴۸	۶۰۰/۳

* واحد اعداد ارائه شده در جدول، میلیون مترمکعب است.

نتایج جدول (۹) نشان داد که با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه و رشد مصارف، مقادیر عدم تامین نیازها بیش از دو برابر افزایش یافته است. در حوضه آبریز بهشت آباد اجرایی شدن دو پروژه انتقال آب بهشت آباد (۵۸۰ میلیون متر مکعب) و تونل سوم کوه‌رنگ (۲۵۰ میلیون متر مکعب) می‌تواند بر روی تامین

در سناریو ۱ و ۲ به ترتیب روند توسعه مصارف تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 بررسی گردید. علاوه بر در نظر گرفتن نرخ رشد مصارف شرب، صنعت و کشاورزی در دوره آتی، طرح‌های توسعه محدوده شامل تونل انتقال آب بهشت آباد و تونل سوم کوه‌رنگ نیز در مدل‌سازی لحاظ گردید.

جدول ۱۱. شاخص رضایت بخش برای استراتژی های (۱، ۲) در شرایط آینده

strategies	future conditions	
	S1	S2
Satisficing index	۰/۶۵	۰/۷۸

نتایج شاخص پشیمانی تحت شرایط اقلیمی آتی در عدم قطعیت‌ها مختلف نشان می‌دهد (جدول ۱۳-۱۴) که عملکرد استراتژی ۱ مبتنی بر شاخص پشیمانی در اواخر فصل بهار و فصل تابستان ضعیف است. همچنین مقایسه نتایج شاخص پشیمانی نشان می‌دهد استراتژی ۲ (جدول ۱۴) استحکام بالاتری به نسبت استراتژی ۱ (جدول ۱۳) دارد. بنابراین، نتایج ارزیابی استحکام استراتژی ۱ و ۲ نشان داد که مؤثرترین اقدام سازگاری عمدتاً بر مدیریت مصرف آب متمرکز بوده است (Abbasi et al., 2020; Sabbaghi et al., 2020). به عبارت دیگر شاخص پشیمانی و رضایتمندی نشان داد که استراتژی تغییر الگوی کشت در بستر RDM مؤثرتر بوده و از استواری بیشتری برخوردار است.

در همین راستا، بابائیان و همکاران (۲۰۲۱) نیز تغییر الگوی کشت را به عنوان استوارترین اقدام سازگاری در ترکیب‌های مختلف سناریوهای اقلیمی شناسایی نمودند و عباسی و همکاران (۲۰۲۰) گزینه‌های مدیریتی کم‌آبیاری، افزایش راندمان آبیاری، تغییر الگوی کشت و تغییر تاریخ کشت را به عنوان اقدامات سازگاری مؤثر در بخش کشاورزی در نظر گرفتند.

اجرای استراتژی‌های سازگار تحت ترکیب مختلف عدم قطعیت‌ها در آینده ممکن است با موانع متعددی روبرو شود. همانطور که سینگ و چاداساما (۲۰۲۱) بیان کردند، فقدان منابع مالی، تکنولوژیکی و اطلاعات مرتبط محلی، موانع اصلی سازگاری است. برای کاهش این موانع، لازم است اقدامات سازگاری کارآمد با حمایت‌های مالی، فناوری و سازمانی همراه شود. همچنین اگر انواع بیشتری از عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شوند، بنابراین تغییرپذیری آینده و تعاملات پویا بین آب و سیستم اجتماعی در تحلیل عملکرد و تصمیم‌گیری سیاست‌ها آشکارتر می‌شود.

نیازها به خصوص کشاورزی اثرگذار باشد و این محدوده را با تنش آبی روبه‌رو کند. همچنین نتایج جدول (۱۰) نشان می‌دهد که در سناریو RCP8.5 به نسبت RCP4.5 میزان کمبودها افزایش بیشتری داشته است.

۳- ارزیابی نتایج استواری راهبردها

برای بررسی کارایی استراتژی‌های سازگار با تغییر اقلیم، ابتدا عملکرد استراتژی‌ها تحت شرایط آب و هوایی دوره آتی مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۸ و ۹). سپس به منظور ارزیابی عملکرد استراتژی‌ها تحت عدم قطعیت‌های مختلف و برای تعیین استحکام هر استراتژی از دو رویکرد پشیمانی و رویکرد رضایتمندی استفاده شد. در این راستا تعیین معیار ارزیابی استحکام از اهمیت بالایی برخوردار است. معیار انتخاب شده در این مطالعه شاخص درصد پوشش نیاز ۲۵ می‌باشد. استفاده از رویکرد پشیمانی و رضایتمندی مستلزم تعیین آستانه ایده آل برای معیار ارزیابی استحکام می‌باشد که درصد پوشش نیاز کشاورزی در شرایط موجود به عنوان آستانه ایده آل در نظر گرفته شد. هدف این پژوهش طراحی و ارزیابی استراتژی‌های استوار تحت عدم قطعیت‌های شدید در بخش کشاورزی بود. در این راستا روشی با ترکیبی از مدل شبیه‌سازی WEAP و رویکرد تصمیم‌گیری استوار (RDM) توسعه و اعمال شد. در ادامه ارزیابی استحکام اقدامات سازگاری پیشنهادی شامل استراتژی افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری (S-1) و تغییر الگوی کشت (S-2) تحت ترکیب مختلف عدم قطعیت‌ها در آینده با دو شاخص پشیمانی و شاخص رضایتمندی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تحت اثرات تغییر اقلیم منابع آب سطحی محدوده روند کاهشی داشته و از سوی دیگر افزایش تقاضای آب در شرایط اقلیمی آینده را خواهیم داشت. همچنین نتایج جدول (۱۱) نشان داد شاخص رضایتمندی استراتژی ۱ و استراتژی ۲ به ترتیب، ۰/۶۵ و ۰/۷۸ می‌باشد در مجموع استراتژی ۲ به نسبت استراتژی ۱ در دوره آتی شاخص رضایتمندی بالاتری دارد.

جدول ۱۲. طبقه بندی شاخص استحکام RDM

Robustness class	Robust			Less Robust		Not Robust
	Excellent	Very good	Good	Fair	Moderate	Poor
Robustness value	[۰-۰/۰۵)	[۰/۰۵-۰/۱)	[۰/۱-۰/۲)	[۰/۲-۰/۳)	[۰/۳-۰/۴۵)	[۰/۴۵-۱]

(Babaeian et al., 2021)

جدول ۱۳. مقادیر شاخص پشیمانی در سناریو S1 در دوره آتی

uncertainty conditions	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
۱	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۱۰
۲	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۲۰
۳	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۲۸
۴	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۳۲
۵	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۳۴
۶	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۸	۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۳۷
۷	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۷	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۳۸
۸	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۴۴	۰/۵۷	۰/۶۳	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۳۸
۹	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۲۴	۰/۱۴
۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۳۱	۰/۲۳
۱۱	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۳۲
۱۲	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۴۴	۰/۳۲
۱۳	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۳۷
۱۴	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۴۹	۰/۵۳	۰/۳۸
۱۵	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۸	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۳۸
۱۶	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۴۶	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۳۸
۱۷	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۷
۱۸	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۱	۰/۱۶

جدول ۱۴. مقادیر شاخص پشیمانی در سناریو S2 در دوره آتی

uncertainty conditions	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۳
۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۰۸
۳	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۱۸
۴	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۴
۵	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۳۹	۳/۲۹
۶	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۳۲
۷	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۳۵
۸	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۳۵
۹	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۶
۱۰	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۸	۰/۱۴
۱۱	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۲۰
۱۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۶
۱۳	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۲۴	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۳۰
۱۴	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۴۰	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۳۵
۱۵	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۳۵
۱۶	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۳۵
۱۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۵

نتیجه‌گیری

استراتژی‌های سازگار با تغییر اقلیم تحت عدم قطعیت‌های مختلف در بخش کشاورزی با استفاده از رویکرد RDM در حوضه‌آبریز کارون انجام شد. شبیه‌سازی رواناب رودخانه کارون

ارزیابی استحکام برای سنجیدن عملکرد طرح‌ها در عدم قطعیت‌های مختلف مورد نیاز است. این مطالعه با هدف ارائه

و تغییر الگوی کشت در جهت کاهش اثرات تغییرات اقلیمی در بخش کشاورزی ارائه شد. نتایج نشان داد استراتژی ۲ به نسبت استراتژی ۱ عملکرد بهتری در افزایش درصد پوشش نیاز کشاورزی دارد. سپس استحکام استراتژی‌های ارائه شده توسط رویکرد پشیمانی و رضایتمندی ارزیابی شد. نتایج نشان داد شاخص رضایتمندی استراتژی ۲ و استراتژی ۱ به ترتیب ۰٫۷۸ و ۰٫۶۵ می‌باشد. نتایج شاخص پشیمانی تحت شرایط اقلیمی آبی در عدم قطعیت‌ها مختلف نشان می‌دهد که عملکرد استراتژی ۱ مبتنی بر شاخص پشیمانی در اواخر فصل بهار و فصل تابستان ضعیف است. همچنین مقایسه نتایج شاخص پشیمانی نشان می‌دهد استراتژی ۲ استحکام بالاتری به نسبت استراتژی ۱ دارد. در نهایت براساس رویکرد تحقیق و تعریفی که از تصمیم‌گیری استوار ارائه شد، نتایج نشان داد که استراتژی تغییر الگوی کشت می‌تواند به عنوان راهبردی استوار در دستور کار قرار گیرند، بطوریکه توانسته در طیف وسیعی از شرایط عدم قطعیت و سناریوهای اقلیمی عملکرد خود را در حدود وضع موجود حوضه حفظ نماید. نقطه قوت اصلی این مطالعه روش‌شناسی سیستماتیک آن است که به تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر و طراحی برنامه‌های تطبیقی جامع کمک می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن اهداف و شاخص‌های مختلف می‌تواند برای سایر حوضه‌ها نیز قابل اجرا باشد. با این حال، مطالعات آینده در مورد عدم قطعیت‌های تغییرات آب و هوا و ارزیابی اجتماعی-اقتصادی اقدامات سازگاری، حوزه‌های دیگری هستند که می‌توانند تحلیل‌ها را بهبود بخشند.

به صورت ماهانه در دوره آبی نیز نشان از کاهش ۸-۲۲ درصدی در ماه‌های مختلف دارد. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل WEAP در وضعیت موجود نیاز شرب تقریباً در اکثر بخش‌ها به صورت کامل تامین می‌گردد و تنها در بخش‌های A8 یا همان محدوده مطالعاتی ۲۳۰۱ (خرمشهر) و A6 (محدوده‌های مطالعاتی لالی و اندیکا) با کمبود آب مواجه هستند. همچنین نتایج نشان داد که در بخش صنعت کمبودی مشاهده نمی‌شود. در این میان بخش‌های A1، A2 و A3 با کمبود منابع آب در بخش کشاورزی روبه‌رو هستند و فصل تابستان نیز بیشترین کمبود را نشان می‌دهد. بخش A1 شامل محدوده‌های مطالعاتی گندمان، اردل، بروجن، شلمزار، شهرکرد و ... همگی جز حوضه آبریز بهشت‌آباد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با توجه به کمبودها در شرایط موجود، حوضه آبریز بهشت‌آباد پتانسیل لازم برای انتقال آب به حجم ۵۸۰ میلیون متر مکعب در سال توسط تونل بهشت‌آباد به حوضه آبریز زاینده رود را نخواهد داشت. نتایج نشان داد در دوره آبی با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه و رشد مصارف، مقادیر عدم تامین نیازها بیش از دو برابر افزایش یافته است. در حوضه آبریز بهشت‌آباد اجرایی شدن دو پروژه انتقال آب بهشت‌آباد (۵۸۰ میلیون متر مکعب) و تونل سوم کوه‌رنگ (۲۵۰ میلیون متر مکعب) می‌تواند بر روی تامین نیازها به خصوص کشاورزی اثر گذار باشد و این محدوده را با تنش آبی روبه‌رو کند. همچنین نتایج نشان داد در دوره آبی، مقدار عدم تامین نیازهای محدوده به نسبت شرایط موجود افزایش می‌یابد. در ادامه ارائه استراتژی‌های افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری

Reference:

- Abbasi, H., Delavar, M., Bigdeli Nalbandan, R., & Hashemy Shahdany, M. (2020). Robust strategies for climate change adaptation in the agricultural sector under deep climate uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(6), 755-774.
- Abera Abdi, D., & Ayenew, T. (2021). Evaluation of the WEAP model in simulating subbasin hydrology in the Central Rift Valley basin, Ethiopia. *Ecological Processes*, 10(1), 1-14.
- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M. N., & Ismail, M. (2020). Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(2), 297-320.
- Asghar, A., Iqbal, J., Amin, A., & Ribbe, L. (2019). Integrated hydrological modeling for assessment of water demand and supply under socio-economic and IPCC climate change scenarios using WEAP in Central Indus Basin. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 68(2), 136-148.
- Asif, Z., Chen, Z., Sadiq, R., & Zhu, Y. (2023). Climate change impacts on water resources and sustainable water management strategies in North America. *Water Resources Management*, 37(6), 2771-2786.
- Babaeian, F., Delavar, M., Morid, S., & Srinivasan, R. (2021). Robust climate change adaptation pathways in agricultural water management. *Agricultural Water Management*, 252, 106904.
- Berrang-Ford, L., Siders, A. R., Lesnikowski, A., Fischer, A. P., Callaghan, M. W., Haddaway, N. R., ... & Abu, T. Z. (2021). A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*, 11(11), 989-1000.
- Bizikova, L., Crawford, E., Nijnik, M., & Swart, R. (2014). Climate change adaptation planning in agriculture: processes, experiences and lessons learned from early adapters. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 19(4), 411-430.
- De Silva, R. P., & Dayawansa, N. D. K. (2021). Climate change vulnerability in agriculture sector: an assessment and mapping at divisional secretariat level in Sri Lanka. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 725-738.

- Demertzi, K. A., Papamichail, D. M., Georgiou, P. E., Karamouzis, D. N., & Aschonitis, V. G. (2014). Assessment of rural and highly seasonal tourist activity plus drought effects on reservoir operation in a semi-arid region of Greece using the WEAP model. *Water international*, 39(1), 23-34.
- Derner, J., Briske, D., Reeves, M., Brown-Brandl, T., Meehan, M., Blumenthal, D., ... & Peck, D. (2018). Vulnerability of grazing and confined livestock in the Northern Great Plains to projected mid-and late-twenty-first century climate. *Climatic Change*, 146(1), 19-32.
- Escarcha, J. F., Lassa, J. A., & Zander, K. K. (2018). Livestock under climate change: a systematic review of impacts and adaptation. *Climate*, 6(3), 54.
- Feola, G., Lerner, A. M., Jain, M., Montefrio, M. J. F., & Nicholas, K. A. (2015). Researching farmer behaviour in climate change adaptation and sustainable agriculture: Lessons learned from five case studies. *Journal of Rural Studies*, 39, 74-84.
- Gao, J., Christensen, P., & Li, W. (2017). Application of the WEAP model in strategic environmental assessment: Experiences from a case study in an arid/semi-arid area in China. *Journal of environmental management*, 198, 363-371.
- Groves, D. G., & Lempert, R. J. (2007). A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Global Environmental Change*, 17(1), 73-85.
- Haddad, R., Najafi Marghmaleki, S., Kardan Moghaddam, H., Mofidi, M., Mirzavand, M., & Javadi, S. (2023). Improving the management of agricultural water resources to provide Gavkhuni wetland ecological water right in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24.
- Hadka, D., Herman, J., Reed, P., & Keller, K. (2015). An open source framework for many-objective robust decision making. *Environmental Modelling & Software*, 74, 114-129.
- Hall, J. W., Lempert, R. J., Keller, K., Hackbarth, A., Mijere, C., & McInerney, D. J. (2012). Robust climate policies under uncertainty: A comparison of robust decision making and info-gap methods. *Risk Analysis: An International Journal*, 32(10), 1657-1672.
- Herman, J. D., Reed, P. M., Zeff, H. B., & Characklis, G. W. (2015). How should robustness be defined for water systems planning under change?. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10), 04015012.
- IPCC. 2007. Summary for policymakers. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., and Midgley, P. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 1-19.
- Jakeman, A. J., & Hornberger, G. M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?. *Water resources research*, 29(8), 2637-2649.
- Kang, N., Kim, Y. O., Jung, E. S., & Park, J. (2013). Applicability of robust decision making for a water supply planning under climate change uncertainty. *Journal of Climate Change Research*, 4(1), 11-26.
- Kasprzyk, J. R., Nataraj, S., Reed, P. M., & Lempert, R. J. (2013). Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. *Environmental Modelling & Software*, 42, 55-71.
- Kheiri, M., Soufizadeh, S., Ghaffari, A., AghaAlikhani, M., & Eskandari, A. 2017. Association between Temperature and Precipitation with Dryland Wheat Yield in Northwest of Iran. *Climatic Change*. (141): 703-717. doi: 10.1007/s10584-017-1904-5.
- Kim, J. H., Sung, J. H., Chung, E. S., Kim, S. U., Son, M., & Shiru, M. S. (2021). Comparison of Projection in Meteorological and Hydrological Droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4. 5 and SSP2-4.5. *Sustainability*, 13(4), 2066.
- Kousari, M.R., & Asadi Zarch, M.A. 2011. Minimum, maximum, and Mean Annual Temperature, Relative Humidity, and Precipitation Trends in Arid and Semi-arid Regions of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 5(4): 907-914. doi: 10.1007/s12517-009-0113-6.
- Kumar, S. 2017. Reference evapotranspiration (ET_o) and irrigation water requirement of different crops in Bihar. *Journal of agrometeorology*. 19(3): 238-241. doi: 10.54386/jam.v19i3.662.
- Lempert, R. J., & Groves, D. G. (2010). Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(6), 960-974.
- Lempert, R., Nakicenovic, N., Sarewitz, D., & Schlesinger, M. (2004). Characterizing climate-change uncertainties for decision-makers. *Climatic Change*, 65(1-2), 1-9.
- Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W. ... & Thiel-Clemen, T. (2014). Changing the resilience paradigm. *Nature Climate Change*, 4(6), 407-409.
- Mansouri et al., 2016 is correct Mansouri, B., Ahmadzadeh, H., Massah Bavani, A., morid, S., Delavar, M., & Lotfi, S. (2016). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Zarrinehrud Basin Using SWAT Model. *Water and Soil*, 28(6), 1203-1291. doi: 10.22067/jsw.v0i0.35633. (In Persian)

- Mehraban, M., Marghmaleki, S. N., Sarang, A., & Azar, N. A. (2024). Developing climate change adaptation pathways in the agricultural sector based on robust decision-making approach (case study: Sefidroud Irrigation Network, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4), 378.
- Mehta, V. K., Rheinheimer, D. E., Yates, D., Purkey, D. R., Viers, J. H., Young, C. A., & Mount, J. F. (2011). Potential impacts on hydrology and hydropower production under climate warming of the Sierra Nevada. *Journal of Water and Climate Change*, 2(1), 29-43.
- Mengistu, D., Bewket, W., Dosio, A., & Panitz, H. J. 2021. Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*. 592: 125614. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125614.
- Mousavi, A., Ardalan, A., Takian, A., Ostadtaghizadeh, A., Naddafi, K., & Bavani, A. M. (2020). Climate change and health in Iran: a narrative review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(1), 367–378.
- Natalia, P., Silvia, F., Silvina, S., & Miguel, P. 2020. Climate change in northern Patagonia: critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology*. 1-16. doi: 10.1007/s00704-020-03104-8.
- Prutsch, A., Grothmann, T., Schauer, I., Otto, S., & McCallum, S. (2010). Guiding principles for adaptation to climate change in Europe. ETC/ACC technical paper, 6, 32.
- Sabbaghi, M. A., Nazari, M., Araghinejad, S., & Soufizadeh, S. (2020). Economic impacts of climate change on water resources and agriculture in Zayandehroud river basin in Iran. *Agricultural Water Management*, 241, 106323.
- Singh, P. K., & Chudasama, H. (2021). Pathways for climate change adaptations in arid and semi-arid regions. *Journal of cleaner production*, 284, 124744.
- Sippel S, Meinshausen N, Fischer E M, Székely E, & Knutti R (2020) Climate change now detectable from any single day of weather at global scale. *Nature Climate Change* 10(1):35-41.
- Yan, D., Ludwig, F., Huang, H. Q., & Werners, S. E. (2017). Many-objective robust decision making for water allocation under climate change. *Science of the Total Environment*, 607, 294-303.

یادداشت ها

- ¹ Intergovernmental Panel on Climate Change
- ² Lempert
- ³ Projections
- ⁴ Robustness
- ⁵ Robust Decision Making
- ⁶ Mehraban
- ⁷ Mengistu
- ⁸ Upper Blue Nile
- ⁹ Babaeian
- ¹⁰ Natalia
- ¹¹ Northern Patagonia
- ¹² Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
- ¹³ Abbasi
- ¹⁴ Kang
- ¹⁵ Lempert and Groves
- ¹⁶ General Circulation Models
- ¹⁷ Representative Concentration Pathway
- ¹⁸ Nash-Sutcliffe efficiency coefficient
- ¹⁹ The Earth System Grid Federation
- ²⁰ Water evaluation and planning
- ²¹ Regret Method
- ²² Domestic
- ²³ *Robust Decision Making*
- ²⁴ Demand Site Coverage
- ²⁵ Demand Site Coverage
- ²⁶ Singh and Chudasama