

تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصولات با استفاده از مدل‌های اقلیمی در شبکه آبیاری مغان سپیده رحمتی^۱، محمد جواد منعم^{۲*}، مجید دلاور^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳. دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تأثیر تغییرات اقلیمی بر تقاضای آب کشاورزی برای ارزیابی بهره‌وری بخصوص در مناطق نیمه‌خشک بسیار مهم است. مطالعه حاضر به بررسی نیاز آبی محصول (CWR) و نیاز آبی آبیاری (IWR) مناطق تحت پوشش شبکه آبیاری مغان با تمرکز بر پیش‌بینی نیازهای آبی آبیاری آینده می‌پردازد. برای این منظور، مقادیر دما و بارش روزانه از مدل‌های اقلیمی تحت سه سناریو (خوش‌بینانه، حدواسط و بدبینانه) تهیه و ریزمقیاس شدند. نتایج نشان می‌دهند که در آینده، دمای حداکثر ۰/۶۸ تا ۲/۰۵، دمای حداقل ۱/۲۱ تا ۳/۱۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بارش سالانه بین ۲۱/۰۶- تا ۲۷/۱۴+ درصد تغییر خواهد داشت. این تغییرات ضمن افزایش نیاز آبی و آبیاری، موجب تشدید نوسانات اقلیمی و ناپایداری در طول سال در منطقه خواهد شد. نتایج نشان دادند که عدم قطعیت مدل‌ها در برآورد تغییرات فصلی نیاز آبی و آبیاری در فصول تابستان و پاییز کمتر از فصول بهار و زمستان است. نتایج نشان می‌دهند که نیاز آبی و حجم تقاضای سالانه آب، برای سناریوهای مختلف بین ۱۲/۷۷٪ تا ۱۳/۷۶٪ افزایش خواهد یافت. شاخص کفایت آبیاری در شبکه مغان برای دوره ۲۰۴۴-۲۰۲۵ به میزان ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت و بمراتب کمتر از یک است که نشان می‌دهد حجم آب تحویلی کمتر از نیاز آبیاری است. این موضوع ناشی از افزایش تقاضای آب به دلیل افزایش دما و تبخیر و کاهش باران موثر است. نتیجه این وضعیت، بروز تنش آبی، کاهش عملکرد محصولات و افزایش آسیب‌پذیری کشاورزان است که نیازمند بازنگری در تخصیص آب، اصلاح الگوی کشت و بهبود بهره‌وری شبکه است.

واژه‌های کلیدی: حجم تقاضای آب، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای SSP، مدل‌های AOGCM.

^۱ * نویسنده مسئول : monem_mj@modares.ac.ir

۱. مقدمه

میانگین دمای سطح زمین بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیم مرتباً در حال افزایش است. به‌گونه‌ای که سناریوهای اخیر IPCC^۱ که در سال ۲۰۰۷ منتشر شد، افزایش متوسط جهانی دما را ۰/۷۶ درجه سانتی‌گراد در قرن گذشته و تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کنند. این پدیده می‌تواند بر بخش‌های مختلفی از جمله بخش آب و به‌خصوص کشاورزی که بزرگترین مصرف‌کننده آب است تأثیر بگذارد. از آنجا که افزایش این احتمال برای دوره‌های آتی می‌تواند آثار زیان‌باری برای جوامع بشری داشته باشد، در سال‌های اخیر تحقیقاتی در این مورد در دنیا صورت گرفته است. در کشور ما نیز با توجه به محدودیت منابع آب، مطالعه و ارزیابی اثرات این پدیده می‌تواند در آمادگی برای کاهش اثرات منفی و مدیریت بهتر آن، بسیار حائز اهمیت است. تقاضای آبیاری رابطه مستحکمی با اقلیم یک منطقه دارد (Tukimat et al., 2017). روند بارندگی، دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد برخی از پارامترهای اقلیمی هستند که بر نیاز آب آبیاری و تولید کشاورزی در یک منطقه تأثیر می‌گذارند (Rehana and Mujumdar 2012; Battude et al., 2016). بنابراین، تغییرات در تقاضای آبیاری به شدت به سناریوهای اقلیمی در حال تغییر وابسته است. درک تقاضای آبیاری در آینده تحت شرایط آب و هوایی متغیر، ممکن است به توسعه استراتژی‌های سازگاری مناسب برای امنیت غذایی و مدل‌سازی محصول کمک کند (Islam et al., 2020).

یکی از نیازهای اساسی برای برنامه‌ریزی تولید محصول و آبیاری در مزرعه، برآورد نیاز آبی محصول است (Dhamge et al., 2008). درک صحیح تأثیرات تغییر اقلیم بر نیازهای آبی محصولات (CWR) در مقابله با مشکلات امنیت غذایی و استفاده پایدار از منابع آب در آینده ضروری است (Zhou et al., 2017). تغییر شرایط آب و هوایی، تأثیرات جدی بر دسترسی به منابع آب در یک منطقه دارد (Adnan et al., 2011; Andrade et al., 2021; Bishet et al., 2020). مطالعات متعددی برای تخمین تغییرات مقادیر ETo و CWR که در نتیجه تغییرات پارامترهای آب و هوایی، یعنی دما و بارش در سناریوهای مختلف RCP^۳ رخ می‌دهد، انجام شده است. مقادیر پیش‌بینی‌شده دما و بارندگی برای ارزیابی تغییرات در ETo و نیاز آبی محصول منطقه‌ای در ناحیه آبیاری تائو (HID)، چین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که افزایش پیش‌بینی‌شده دما و بارندگی منجر به افزایش مستقیم مقادیر ETo در آینده به میزان چهارتا هفت درصد در HID شده است (Zhou et al., 2017). اخیراً مطالعات متعددی توسط محققان برای برآورد تغییرات نیاز آبیاری محصولات تحت شرایط آب و هوایی متغیر انجام شده است. مدل CROPWAT ابزاری موثر برای تخمین مقادیر ETo و CWR از روی پارامترهای آب و هوایی پیش‌بینی‌شده می‌باشد. نتایج تحلیل حساسیت معادله پنمن-مونتیث به متغیرهای مختلف آب و هوایی عملکرد خوبی را در زمانی که حداقل و حداکثر دما در تخمین تبخیر و تعرق مرجع استفاده شد، نشان داد (Koudahe et al., 2018). تغییرات در عملکرد محصول و نیازهای آبیاری برای مناطق زیر کشت مختلف در سراسر جهان تحت سناریوهای مختلف انتشار CO₂ مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده را می‌توان به‌طور مناسب برای برآورد نیاز آبیاری آینده یک منطقه مورد استفاده قرار داد (Ashofteh et al., 2015).

تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات اصلی حوضه زاینده‌رود توسط Massah & Morid (2005) مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق تحت داده‌های مدل گردش عمومی HadCM3 و دو سناریوی A2 و B2 در دو دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ انجام شد که نتایج حاکی از کاهش عملکرد و افزایش ضریب تغییرات سالانه تولید محصولات بود. در ادامه، در جهت تطبیق با این شرایط، تغییر در الگوی کشت و به‌طور مشخص جایگزینی گندم به‌جای برنج به منظور کاهش مصرف آب و افزایش تولید کالری بررسی و توصیه گردید. Knox et al. (2009) تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی و عملکرد نیشکر را در کشور سوئیس مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 برای دوره پایه ۱۹۸۰-۱۹۷۷ و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۹

استفاده شد. به منظور تعیین نیاز آبی در دوره آبی از مدل رویش گیاهی CANEGRO استفاده شد. این تحقیق نشان داد، نیاز آبیاری نسبت به دوره پایه یا وضعیت موجود بین ۲۰ تا ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد محصول جو و نیاز آبیاری در دشت هنگ-های چین توسط Liu et al. (2010) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در اثر این پدیده، دما بین دو تا پنج درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارش بین ۳۰- تا ۱۵ درصد خواهد بود. در این تحقیق از مدل‌های گردش عمومی AOGCM^۴ و برای دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۴ استفاده گردید. نتایج نشان داد که افزایش دما به مقدار دو درجه سانتی‌گراد، کاهش عملکردی به مقدار ۲/۳ درصد و افزایش دما به مقدار پنج درجه سانتی‌گراد، کاهش عملکردی به مقدار ۱۸/۵ درصد خواهد داشت. موارد مشابهی نیز توسط Payne et al. (2004)، Rosenweig et al. (2004) و Xiong et al. (2009) به انجام رسیده است. Wang et al. (2018) به ارزیابی ارتباط میان تغییرپذیری اقلیمی و عملکرد محصول در چهار منطقه بون^۵، وودیوری^۶، مادیسون^۷ و ماسون^۸ واقع در آمریکا پرداختند. در این مطالعه از مدل SWAT^{۱۰} و اسنچی شده در دوره‌ی ۱۹۹۱-۲۰۱۰ به منظور عملکرد محصولات در دوره‌ی ۱۹۹۱-۲۰۱۰ استفاده گردید. نتایج مطالعه نشان‌دهنده همبستگی عملکرد محصول سالانه محصولات در دوره‌ی ۱۹۹۱-۲۰۱۰ با شدت تنش خشکی در مرحله فراوری^۹ محصولات اکثر مناطق می‌باشد. اوایل و اواسط مرحله فراوری محصول، نقش مهم‌تری نسبت به سایر مراحل دارد، بنابراین تنش شدید خشکی در این مراحل به‌طور قابل ملاحظه‌ای با کاهش عملکرد مشاهده شده، ارتباط دارد. همچنین عملکرد در دوره بلندمدت شبیه‌سازی در مناطق ذکر شده با توجه به تنش خشکی به ترتیب ۸/۱، ۱۷/۵، ۱۵/۲ و ۹/۷ درصد کاهش را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ای در هندوستان با استفاده از مدل SWAT به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تولید، تبخیر-تعرق و نیاز آبی برنج و گندم در حوضه‌آبریز گوماتی^{۱۱} پرداخته شد. در این مطالعه تغییرات دما و بارش از مدل اقلیمی جهانی MIROC^{۱۲} استخراج و به مدل شبیه‌سازی معرفی گردید. نتایج شبیه‌سازی بیانگر افزایش عملکرد سالانه برنج در دهه‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ به ترتیب با دامنه مقادیر ۵/۵ تا ۶/۷، ۱۶/۲ تا ۲۰/۲ و ۲۶ تا ۳۳/۴ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. همچنین عملکرد متوسط سالانه گندم با دامنه مقادیر ۱۳/۹ تا ۱۵/۴، ۲۳/۶ تا ۲۵/۶ و ۲۵/۲ تا ۲۷/۹ کیلوگرم در هکتار به ترتیب در دوره‌های ذکر شده افزایش یافته است. همچنین تبخیر-تعرق گندم و برنج به ترتیب در دامنه‌های سه تا ۹/۶ و ۷/۸ تا ۱۶/۳ افزایش می‌یابد. از طرف دیگر نتایج بیانگر آن است که با افزایش بارش در دوره رشد گندم، آب تخصیصی برای برنج احتمالاً کمتر شده اما از طرفی آب تخصیصی برای گندم ۱۷ تا ۴۵/۳ افزایش می‌یابد (Abeysingha et al., 2016).

Makar et al. (2022) پژوهشی با هدف ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر نیاز آبی آبیاری در استان البحیره مصر ارائه داده است. با استفاده از ترکیب سنجش از دور، GIS، و مدل CROPWAT 8، نیاز آبی محصولات عمده شامل گندم و مرکبات محاسبه گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های جوی با کدنویسی پایتون و نقشه‌برداری پوشش زمین از داده‌های Sentinel-2 انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که تحت سناریوی خوش‌بینانه اقلیمی برای ۳۰ سال آینده، نیاز آبی آبیاری تا چهار درصد در شرایط فعلی و تا ۱۳٪ در صورت حذف تلفات مزرعه‌ای افزایش خواهد یافت.

در مطالعه دیگری پویایی مکانی و زمانی تغییر اقلیم بر آبیاری محصولات شالیزاری در حوضه ماهانادی هند، با استفاده از آخرین مدل‌های گردش عمومی CMIP6 و دو سناریو انتشار SSP585 و SSP370 مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌ها تغییرات اقلیمی برای سه افق زمانی کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت ۲۵ ساله از ۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ برای دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۴) مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات مکانی-زمانی در بارندگی، دما و نیازهای آب آبیاری در منطقه بررسی شد. در هر دو سناریو، میانگین بارش فصلی آینده افزایش می‌یابد. افزایش ۲۳/۷٪ در حداقل بارندگی و افزایش ۲۸/۹٪ در حداکثر بارندگی بارندگی پیش‌بینی شد. از سوی

دیگر، کاهش ۹/۵۳٪ در حداکثر نیاز آبیاری پیش‌بینی گردید. هر دو سناریو افزایش دمای سه تا چهار درجه سانتیگراد را در آینده دور پیش‌بینی می‌کنند. (Kumari et al. 2024).

اثرات تغییر اقلیم بر بیلان آب مخزن و نیاز آبی شبکه در مطالعات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (Dehghan et al., 2019; Prez et al. 2010; Gorguner & Kavvas, 2020). یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری در شرایط فعلی و آینده، شاخص کفایت آبیاری (Adequacy) است که بیانگر نسبت حجم آب تحویلی به حجم تقاضای خالص آبیاری در واحدهای بهره‌برداری است. در سال‌های اخیر، مطالعاتی در سطوح ملی و بین‌المللی به استفاده از این شاخص برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد شبکه‌های آبیاری پرداخته‌اند. در پژوهشی، تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد کانال شرقی شبکه آبیاری عقیلی بررسی شده است. داده‌های اقلیمی پایه (۱۹۹۴-۲۰۱۷) با آزمون من-کندال تحلیل و تغییرات آبی دما و بارش با مدل HadGEM2-ES و مولد آب‌وهوای LARS-WG تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ شبیه‌سازی شد. با استفاده از مدل CROPWAT8، نیاز آبی محصولات و هیدرومدول محاسبه و جریان خروجی کانال ارزیابی شد. نتایج نشان داد افزایش دما (تا ۳/۷ درجه)، تبخیر و تعرق (۱/۴۵ میلی‌متر در روز) و دبی خروجی (۳۹ لیتر بر ثانیه) موجب کاهش کفایت کانال از ۰/۹۸۶ به ۰/۷۶۸ و افزایش نیاز آبی سالانه تا ۱۵/۱ میلیون مترمکعب تحت سناریوی بدبینانه می‌شود (Mohebbi et al., 2024).

مطالعه‌ای در جنوب شرق اسپانیا با استفاده از مدل هیدرولیکی EPANET و سناریوهای اقلیمی A2 و B2 مدل HadCM3، نشان داد که شاخص کفایت آبیاری در سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۸۰ به‌طور متوسط تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد. علت اصلی این کاهش، افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل، کاهش منابع آب ورودی و افت فشار در شبکه‌های پایین‌دست گزارش شد (Pérez et al., 2010).

همچنین، مطالعه‌ای در نپال با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی CMIP6 تحت سناریوهای RCP، کفایت آبیاری شبکه‌های کانالی را در بازه‌های مختلف زمانی آینده ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که در سناریو RCP 8.5 شاخص کفایت به حدود ۰/۶۵ کاهش می‌یابد و نواحی بحرانی کمبود آب افزایش می‌یابد. این مطالعه بدون مدل‌سازی هیدرولیکی، صرفاً با تحلیل نیاز آبی و منابع تأمین به ارزیابی عملکرد شبکه پرداخته بود (Sharma et al., 2024).

بررسی پیشینه مطالعاتی بیانگر توجه ویژه به مباحث تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب و کشاورزی می‌باشد. بخش کشاورزی به علت ارتباط بسیار نزدیک با شرایط آب و هوایی، تأثیرات بسیاری را در اثر تغییر در دما و بارندگی و تغییر در آب در دسترس و نیازآبی محصولات متحمل می‌شود. از این‌رو بخش کشاورزی یکی از وابسته‌ترین بخش‌ها به تغییر اقلیم است (Bajracharya et al., 2020; Li et al. 2010; Liao et al. 2020). تغییر اقلیم ناشی از تغییر در میزان گازهای گلخانه‌ای می‌تواند عملکرد و تولید محصولات کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد. افزون بر این با افزایش دما و تغییر در رژیم بارندگی که منجر به افزایش نیاز آبی گیاهان می‌شود، میزان عرضه و تقاضای آب در بخش کشاورزی نیز دست‌خوش تغییرات خواهند شد (Zhang et al., 2013; Uniyal, and Verma, 2015; Bajracharya et al., 2018). از این‌رو، آگاهی از آثار تغییرات اقلیم بر بخش کشاورزی برای مدیریت آبیاری ضروری است و نقش مؤثری در کاهش خسارات احتمالی این پدیده خواهد داشت (Opoku Darko et al, 2025). برای نیل به این هدف اقدامات مختلف در سراسر جهان صورت گرفته است اما آنچه تدقیق مطالعات را منجر می‌شود، بررسی این اثرات در مقیاس محلی با سناریوهای تازه منتشر شده SSP^{۱۳} است، چرا که این امر سنجش تغییرات هر یک از مؤلفه‌های آبی و کشاورزی یک منطقه و به تبع آن اقدامات مدیریتی مورد نظر را تسهیل می‌نماید. در این میان، مطالعات بیانگر مطلوبیت مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG^{۱۴} در انتقال تغییرات در مقیاس محلی است.

با توجه به روند تشدید تغییرات اقلیمی و نقش محوری نیاز آبی در مدیریت پایدار منابع آب کشاورزی، سؤال اصلی این تحقیق آن است که نیاز آبی محصولات و نیاز خالص آبیاری در آینده چگونه تغییر خواهد کرد و دامنه اطمینان به نتایج تحقیقات چقدر خواهد بود. در این راستا، پژوهش حاضر با استفاده از خروجی‌های مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6) و سناریوهای SSP و براساس روش FAO56، چشم اندازی از تغییرات نیاز آبی محصولات عمده و اثرات آن بر عملکرد شبکه آبیاری مغان ارائه می‌دهد علاوه بر این بررسی و تحلیل عدم قطعیت فصلی نتایج، از جمله نقاط تمایز این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین به شمار می‌روند.

۲. مواد و روش‌ها

مطالب این بخش در شش قسمت ارائه شده است. در قسمت اول منطقه مطالعاتی مورد نظر معرفی شده، سپس مدل‌های جفت شده گردش عمومی جوی-اقیانوسی مختصراً معرفی می‌شوند. در ادامه سناریوهای انتشار (SSP) معرفی شده و روش ریزمقیاس نمایی ارائه شده و در انتها نحوه برآورد اثر تغییر اقلیم بر نیاز آبی، و نحوه بررسی عدم قطعیت معرفی شده است.

۱.۲. منطقه مطالعاتی

مغان جلگه وسیعی است که در شمال استان اردبیل و در غرب دریای خزر بر روی مدار ۴۸-۴۷/۵ درجه شرقی و ۳۹/۲۰ - ۳۹/۴۲ درجه نصف النهار شمالی واقع شده و به واسطه عبور رودخانه مرزی ارس این دشت به دو قسمت مغان ایران و میل جمهوری آذربایجان تقسیم گردیده است. مساحت منطقه‌ای که دشت مغان اطلاق می‌شود در حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ هزار هکتار برآورد گردیده است. دشت مغان در ساحل راست رودخانه ارس واقع شده که از شمال به رود ارس و دشت میل در جمهوری آذربایجان و از شرق در امتداد خط مرزی به جمهوری آذربایجان، از جنوب به شهرستان گرمی و مشگین شهر و دامنه‌های رشته جبال سبلان و از غرب به شهرستان اهر محدود می‌باشد. مطالعات شبکه آبیاری مغان در سطح ۹۰ هزار هکتار از سال ۱۳۴۵ شروع و قسمتی از آن که اراضی شبکه‌های A، T و A برگشتی و اراضی تراس بالاتر را شامل می‌شد از سال ۱۳۵۳ به بهره‌برداری رسید. آبیگری کانال اصلی شبکه از سد انحراف آب میل مغان پس از حوضچه رسوبگیر سد توسط هشت دریچه کشویی انجام می‌گیرد که در مجموع می‌تواند ۸۰ مترمکعب در ثانیه آب وارد شبکه نماید (شکل ۱). محصولات عمده کشاورزی محدوده طرح شامل گندم، یونجه، بادام زمینی، پنبه، غلات، سبزیجات و حبوبات طبق جدول ۱ می‌باشد. آمار و اطلاعات هواشناسی لازم برای دوره پایه ۱۹۸۵-۲۰۱۴ از ایستگاه پارس و اطلاعات مربوط به الگو و سطح زیر کشت عمده محصولات در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین تقویم زراعی نیز براساس اطلاعات محلی تهیه شد (جدول ۲).

۲.۲. مدل‌های AOGCM

اصلی‌ترین ابزاری که در حال حاضر برای پایش اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب و هوای کره زمین وجود دارد، مدل‌های جفت شده گردش عمومی جوی-اقیانوس (AOGCM) می‌باشد که توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) ارائه می‌شود. در این مدل‌ها، روابط توصیف‌کننده رفتار جو بر مبنای شبکه‌ای سه بعدی که نشان‌دهنده سطح افقی کره زمین و ارتفاع عمودی جو است، حل می‌شوند (IPCC, 2013). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در ششمین دوره فعالیت خود (۲۰۲۲-۲۰۱۶)، تهیه گزارش ششم جامع ارزیابی تغییر اقلیم AR6 را در دستور کار قرار داده است. مجموع این تلاش‌ها منجر به شکل‌گیری مدل‌های CMIP6 در گزارش ششم IPCC شد (Jiang et al. 2020; Tebaldi et al., 2021). بنابراین مدل‌های CMIP6 در حال حاضر به‌روزترین ابزار برای تحلیل تغییرات اقلیم در دوره‌های آتی می‌باشند.

در این تحقیق از خروجی مدل‌های MPI-ESM1-2-LR، ACCESS-CM2، ACCESS-ESM1-5، MIRCO6 و MRI-ESM2-0 از گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (جدول ۳)، تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شده است (IPCC, 2013).

Table 1. Total cultivated area of each crop in the Moghan irrigation network (Moghan Irrigation and Drainage Networks Operation Company-1400)

Crop	Wheat	Alfalfa	Cotton	Peanut	Barley	Seed Corn	Fodder Corn	Corn Kernels	Vegetable Garden	Tomato	Autumn Beets	Garlic	Soybean
Cultivated area (hectars)	26848	8538	3467	2914	2615	2740	1818	1598	2625	1816	1759	916	645

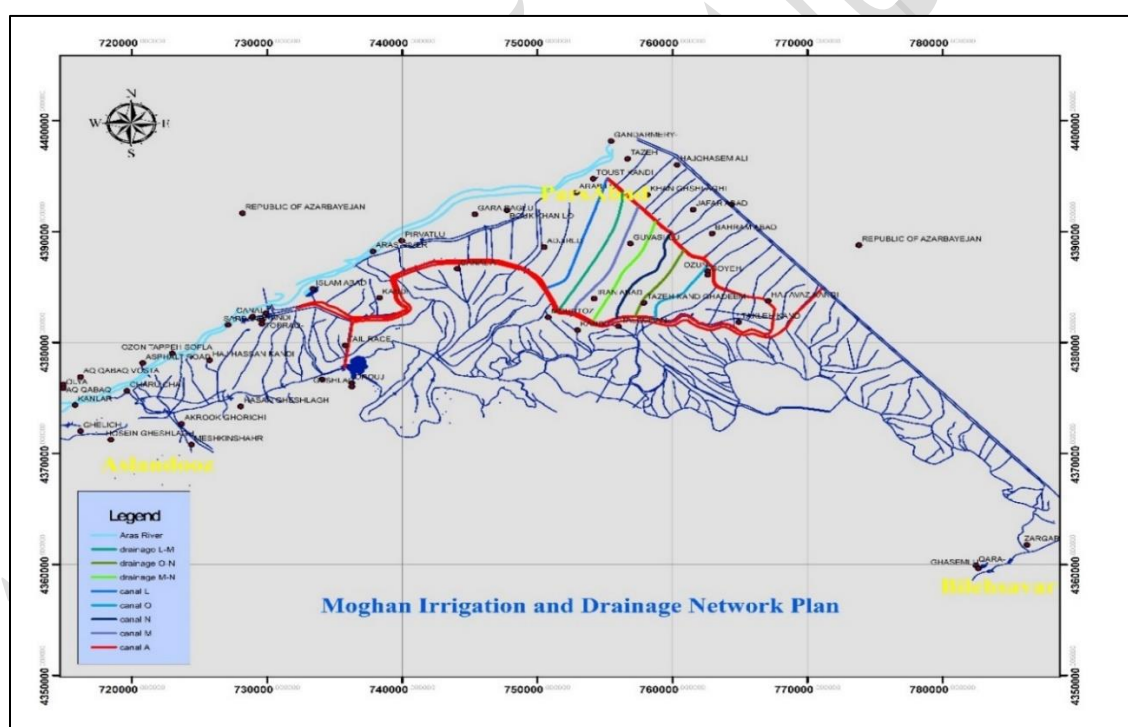


Figure 1. Location of the Moghan irrigation network in Ardabil Province, Iran

Table 2. Crop calendar of crops in the Moghan irrigation network

Crop	month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
w heat												
barely												
canola												
garlic												
autumn beet												
alfalfa												
cotton												
seed corn												
fodder corn												
soy												
kitchen garden												
tomato												
peanut												

■ Sowing ■ Growing ■ Harvesting

Table 3. Climate models used in the present study

No.	Model	Institution	Resolution
1	ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)	1.875°*1.25°
2	ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)	1.875°*1.25°
3	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	1.875°*1.875°
4	MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japan)	1.41°*1.41°
5	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency (Japan)	1.125°*1.125°

۳.۲. سناریوهای SSP

هیئت بین‌المللی تغییر آب و هوا در سال ۲۰۱۸، مجموعه جدیدی از سناریوهای انتشار را تحت عنوان SSP ایجاد کرد تا در ششمین گزارش ویژه در مورد سناریوهای انتشار ارائه شود. در مدل‌های اقلیمی فاز ششم (CMIP6) از ادغام مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک به همراه مسیرهای معرف غلظت گازهای گلخانه‌ای برای تجزیه و تحلیل بازخورد بین تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی-اقتصادی مانند رشد جمعیت جهانی، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فن‌آوری استفاده می‌شود. سناریوهای موجود شامل هشت سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP4-6، SSP5-8.5 و SSP4-3.4 است. این سناریوها بخشی از چارچوب جدید تغییرات جهانی هستند که بر اساس آن تحلیل‌های یکپارچه اثرات آب و هوا و آسیب‌پذیری‌ها، سیاست‌های مربوط به سازگاری و تعدیل را ارائه می‌کنند (Fram et al., 2018). این سناریوها امکان یافتن چالش‌های مربوط به سیاست‌های سازگاری و تعدیل‌های احتمالی آینده را فراهم می‌کنند (O'Neill et al, 2016; Riahi et al., 2017). در واقع سناریوهای SSP براساس پنج رویکرد اساسی توسعه پایدار، رقابت منطقه‌ای، نابرابری، توسعه سوخت‌های فسیلی و توسعه مبتنی بر سیاست‌های میانی توصیف می‌شوند. این سناریوها در پنج دسته قرار گرفتند که به SSP1 تا SSP5 معروف هستند (جدول ۴).

سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به دلیل پوشش گسترده‌ای که از شرایط مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه می‌دهند، به طور گسترده‌ای در تحقیقات استفاده می‌شوند. این سناریوها به ترتیب نمایانگر مسیرهای پایدار، میانه و توسعه‌یافته با استفاده از سوخت‌های فسیلی هستند. انتخاب این سناریوها به محققان امکان می‌دهد تا طیف وسیعی از نتایج ممکن را بررسی کنند و تأثیرات مختلف تغییرات اقلیمی را بهتر درک کنند (IPCC, 2021). در واقع مسیر پایدار، نمایانگر جهانی است که در آن تلاش‌های گسترده‌ای برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست انجام می‌شود. در این مسیر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش می‌یابد و سیاست‌های زیست‌محیطی قوی‌تری اجرا می‌شود. این سناریو به کاهش دمای جهانی کمک می‌کند و تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی را کاهش می‌دهد. مسیر میانه، نمایانگر جهانی است که در آن تغییرات اقتصادی و زیست‌محیطی به صورت متعادل و متوسط رخ می‌دهد. در این مسیر، تلاش‌هایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام می‌شود، اما این تلاش‌ها به اندازه سناریوی SSP1-2.6 قوی نیستند. این سناریو نشان‌دهنده یک مسیر میانه بین توسعه پایدار و استفاده از سوخت‌های فسیلی است. سناریو توسعه یافته، نمایانگر جهانی است که در آن استفاده از سوخت‌های فسیلی به طور گسترده ادامه می‌یابد و تلاش‌های کمی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام می‌شود. در این مسیر، رشد اقتصادی سریع است، اما تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی به شدت افزایش می‌یابد. به‌طور کلی این سناریوها به محققان کمک می‌کنند تا تأثیرات مختلف تغییرات اقلیمی و سیاست‌های مختلف را بر آینده جهان بررسی کنند و راهکارهای مناسبی برای مقابله با این تغییرات ارائه دهند. بنابراین در این پژوهش از سه سناریوی مذکور استفاده گردید.

Table 4. Characteristics of SSP emission scenarios from the IPCC Sixth Assessment Report (Van Vuuren et al., 2011)

scenarios	Forced group	Forced 2100(w/m ²)
SSP5-8.5	High	8.5
SSP3-7.0	High	7
SSP2-4.5	Medium	4.5
SSP1-2.6	Low	2.6
SSP4-6.0	Medium	6
SSP4-3.4	Low	3.4

۴.۲. ریزمقیاس نمایی

ریزمقیاس نمایی شکاف اطلاعاتی مابین مدل‌های گردش عمومی جو و داده‌های مقیاس محلی با تفکیک‌پذیری بالا را پر می‌نماید (Dessu and Melesse, 2013; Sha, et al., 2019). برای این امر از روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی از جمله مولدهای آب و هوا (WG)^{۱۰} استفاده می‌شود. تکنیک‌های ریزمقیاس‌سازی مبتنی بر WG، به دلیل وجود ارتباط بین متغیرهای مقیاس محلی با متغیرهای جوی بزرگ مقیاس تولید شده توسط مدل‌های گردش عمومی جو، می‌تواند نمایانگر اثرات تغییر اقلیم در مقیاس محلی باشد (Vesely et al., 2019).

LARS-WG^{۱۱} و SDSM^{۱۲} دو مدل شناخته شده ریزمقیاس‌سازی آماری است که به‌طور عمده در سراسر جهان برای ریزمقیاس کردن خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو مورد استفاده قرار می‌گیرد (Huang et al., 2011; Gulacha and Mulungu, 2017; Meaurio et al., 2017). با این حال مطالعات متعدد بیانگر این است که شبیه‌سازی طول دوره‌های خشک و تر توسط LARS-WG در مقایسه با SDSM مطلوب‌تر می‌باشد (Saddique et al., 2019). همچنین مدل LARS-WG توانایی قابل توجهی برای حفظ سازگاری در میان ویژگی‌های آماری کلیدی در سری‌های مصنوعی و مشاهده شده را دارا می‌باشد و قادر به تکرار شرایط آب و هوایی منطقه به شکل سری‌های زمانی روزانه برای مجموعه‌ای از متغیرهای آب و هوایی است (Sha, Li and Wang, 2019). بنابراین در این پژوهش از مدل LARS-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی منطقه مورد مطالعه استفاده گردید.

مدل LARS-WG از یک توزیع نیمه تجربی^{۱۸} براساس داده‌های مشاهداتی برای فرآیند واسنجی و در نهایت تولید سری زمانی منطقه مورد نظر، استفاده می‌کند (Wilks, 1999; Sarkar et al., 2015; Sharma et al., 2018). به‌طوری‌که برای هر متغیر اقلیمی v ، مقدار منطبق با احتمال به صورت رابطه ۱ می‌شود (Semenov, and Bengtsson, 2002).

$$v_i = \min\{v - P(v_{obs} \leq v)\} \geq P_i, i=0, \dots, n \quad (1)$$

در اینجا P احتمال بر پایه داده‌های مشاهده شده $\{v_{obs}\}$ را مشخص می‌کند. برای هر متغیر اقلیمی، دو مقدار P_0 و P_n به ترتیب برابر صفر و یک است و مقادیر متناظر $v_n = \min\{v_{obs}\}$ و $v_n = \max\{v_{obs}\}$ ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در تقریب مقادیر حدی متغیرهای اقلیمی، برای مقادیر حداقل، متغیر نزدیک به صفر و برای مقادیر حداکثر، متغیر نزدیک به یک تعیین‌کننده است. مقادیر باقی‌مانده به‌طور هموار بر روی مقیاس احتمال، توزیع شده است.

۵.۲. نحوه برآورد اثر تغییر اقلیم بر نیاز آبی

تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0)، یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعات منابع آب و همچنین مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تخمین آن وجود دارد. اما عملکرد این معادلات در شرایط اقلیمی مختلف، متفاوت می‌باشد. بیش از یک دهه است که روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان یک روش استاندارد جهانی برای تخمین ET_0 توسعه داده شده است. در بعضی شرایط، استفاده از این روش به دلیل عدم وجود متغیرهای ورودی، دارای محدودیت می‌باشد. بر این اساس Allen et

al.(1998) روشی را برای تخمین متغیرهای اقلیمی مفقود مانند تابش خالص، کمبود فشار بخار و سرعت باد در نشریه شماره ۵۶ فائو پیشنهاد کردند (FAO 1998, FAO 2016):

تابش خالص (R_n)

در این مورد R_n با استفاده از روابط ارائه شده توسط Allen et al.(1998) برآورد می‌گردد. با این تفاوت که تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های درجه حرارت حداقل و حداکثر و تابش فرازمینی به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$R_s = K_{Rs} \sqrt{T_{max} - T_{min}} R_a \quad (2)$$

که در آن K_{Rs} ضریب تجربی است و مقدار آن بین ۰/۱۶ تا ۰/۱۹ می‌باشد. در این مطالعه براساس شرایط محلی، داده‌های موجود و همچنین تجربیات و مطالعات قبلی، مقدار این ضریب ۰/۱۶ در نظر گرفته شده است.

سرعت باد (U_2)

وقتی که داده‌های سرعت باد موجود نباشند، بر طبق دستورالعمل ارائه شده توسط Allen et al.(1998) بهترین روش، استفاده از داده‌های سرعت باد نزدیک‌ترین ایستگاه مورد نظر در منطقه می‌باشد. از طرفی اثر سرعت باد بر ET_0 نسبتاً کم (به‌جز مناطق بسیار خشک و بادخیز) بوده و این فرض توسط محققین نیز پذیرفته شده است (Popova et al., 2006). در این مطالعه، از اطلاعات میانگین سرعت باد ماهانه در ایستگاه پارس آباد استفاده شده است.

کمبود فشار بخار (Δe)

هنگامی که داده‌های رطوبت هوا موجود نباشند، کمبود فشار بخار را می‌توان از داده‌های درجه حرارت تخمین زد. فشار بخار واقعی با فرض مساوی بودن دمای نقطه شبنم با دمای حداقل، از معادله ۳ به‌دست می‌آید:

$$e_a = 0.611 \exp \left(\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right) \quad (3)$$

لذا جهت برآورد نیاز آبی محصولات موجود در شبکه آبیاری مغان از جمله گندم، یونجه، بادام زمینی، پنبه، غلات، سبزیجات و حبوبات، ابتدا با استفاده از روش توصیه شده نشریه فائو ۵۶ برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع در شرایط فقدان اطلاعات، تبخیر تعرق مرجع براساس مدل‌ها و سناریوهای مذکور محاسبه شد. در نهایت با توجه به بارش مؤثر روزانه، نیاز آبی محصولات برآورد گردید. سپس با فرض عدم تغییر الگوی کشت و سطح زیر کشت، نیاز خالص آبیاری شبکه محاسبه شد.

۵.۲. نحوه بررسی عدم قطعیت

بررسی عدم قطعیت برای درک بهتر قابلیت اعتماد نتایج، به‌ویژه در تصمیم‌سازی‌های بلندمدت در حوزه منابع آب کشاورزی انجام شده است. تحلیل عدم قطعیت از طریق رویکرد ترکیبی بین مدلی و سناریومحور صورت گرفت؛ (IPCC, 2021; Giorgi & Mearns, 2002). به‌طور مشخص، دو سطح مختلف از عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- (۱) عدم قطعیت بین مدلی (Inter-model Uncertainty): در این رویکرد با استفاده از خروجی چندین مدل اقلیمی از نسل ششم (CMIP6)، تفاوت در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی (دما، بارش) مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه به شناسایی دامنه تغییرات خروجی‌ها و میزان انطباق یا اختلاف بین مدل‌ها توصیه شده است (Knutti et al. 2010).
- (۲) عدم قطعیت سناریومحور (Scenario-based Uncertainty): در این رویکرد با اجرای شبیه‌سازی‌ها تحت سه سناریوی انتشار متفاوت (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)، تأثیر تفاوت مفروضات اجتماعی-اقتصادی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بر برآورد نیاز

آبی محصولات بررسی شد. این سناریوها نمایانگر سطوح مختلف مداخله و گرمایش جهانی هستند و تحلیل تفاوت نتایج آنها، بخش مهمی از تحلیل عدم قطعیت را تشکیل می‌دهد.

در شکل ۲، نمودار گردشی روش‌شناسی تحقیق ارائه شده است.

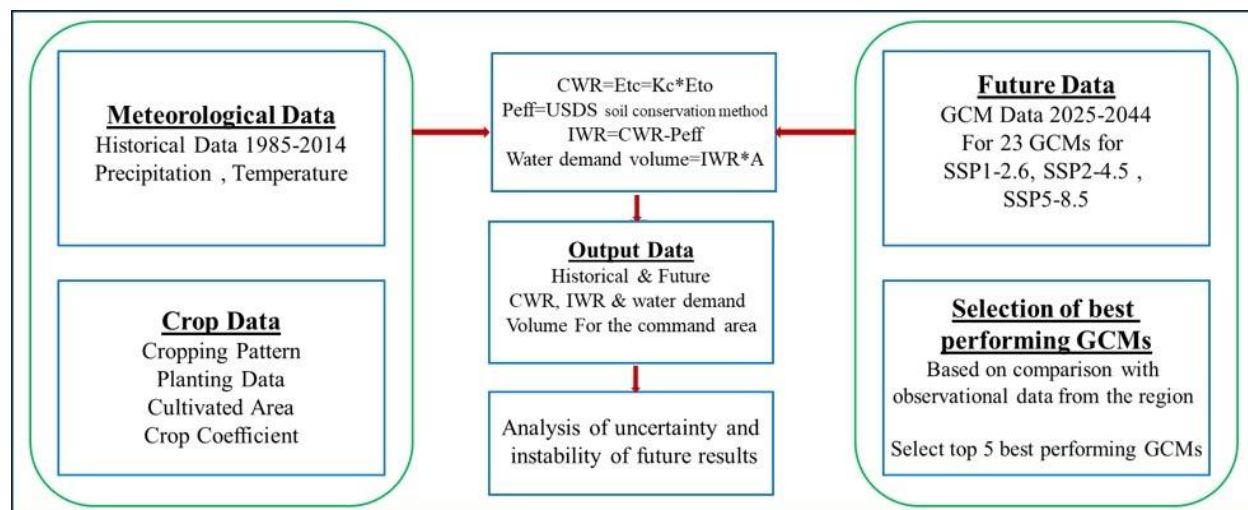


Figure 2. Flowchart of the methodology in the study

۳. نتایج و بحث

۱.۳. ریزمقایس‌نمایی داده‌های اقلیمی دوره آتی

۱.۱.۳. چشم‌انداز دما

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان‌دهنده روند افزایشی دما در منطقه مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در دوره زمانی ۲۰۲۵-۲۰۴۴ است. تحلیل مدل‌های اقلیمی نشان داد که دمای حداکثر بین ۰/۶۸ تا ۲/۰۵ درجه سانتی‌گراد و دمای حداقل بین ۱/۲۱ تا ۳/۱۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (جدول ۵ و ۶). این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های مشابه مانند IPCC (2021) و یا محبی و همکاران (Mohebbi et al., 2024) هم‌راستا بوده و نشان‌دهنده تأثیر ملموس تغییرات اقلیمی در مناطق نیمه‌خشک ایران است.

بررسی سناریوهای مختلف اقلیمی نشان می‌دهد سناریوی SSP5-8.5، که بیانگر ادامه روند فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای است، بیشترین میزان افزایش دما را در پی دارد. در مقابل، سناریوی SSP1-2.6، که مبتنی بر کاهش انتشار و توسعه پایدار است، کمترین میزان افزایش دما را خواهد داشت (شکل‌های ۳ و ۴). این تفاوت قابل توجه میان سناریوها، اهمیت سیاست‌گذاری‌های اقلیمی در مقیاس ملی و بین‌المللی را برجسته می‌سازد. افزایش دما در فصل تابستان بیشترین مقدار را دارد، که این موضوع می‌تواند اثرات مستقیمی بر تبخیر و تعرق گیاهان، راندمان آبیاری، و نیاز آبی محصولات کشاورزی داشته باشد. از سوی دیگر، افزایش دما در زمستان اگرچه نسبتاً کمتر است، اما ممکن است چرخه رشد محصولات زمستانه را تغییر داده و زمان‌بندی کشت را تحت تأثیر قرار دهد (شکل‌های ۵ و ۶).

تحلیل عدم قطعیت‌ها نشان می‌دهد که مدل‌ها در پیش‌بینی دمای فصول گرم سال (تابستان و پاییز) از همگرایی بیشتری برخوردارند. این نکته از نظر برنامه‌ریزی منابع آبی و تصمیم‌سازی برای فصل‌های بحرانی بسیار حائز اهمیت است، چراکه اعتماد به پیش‌بینی‌های اقلیمی در این فصول می‌تواند مبنای اقدامات مدیریتی موثر قرار گیرد.

به‌طور کلی، افزایش دما در منطقه مورد مطالعه می‌تواند منجر به افزایش نیاز آبی آبیاری شود که این موضوع فشار مضاعفی بر منابع آبی موجود وارد می‌کند. در نتیجه، لازم است راهبردهای مدیریتی نظیر اصلاح الگوی کشت، ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آبیاری و توسعه سامانه‌های پیش‌آگاهی اقلیمی در دستور کار قرار گیرند. افزون بر این، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای مدل‌سازی‌های آینده‌نگر دقیق‌تر مورد استفاده قرار گیرد و به سیاست‌گذاران در اتخاذ تصمیمات آگاهانه برای سازگاری با تغییرات اقلیمی یاری رساند.

Table 5. Maximum temperature from AOGCM models

Time Period	Scenarios	Baseline	ACCESS-ESM1-5	MIROC6	MRI-ESM2-0	ACCESS-CM2	MPI-ESM1-2-LR
1985-2014	-	20.42	-	-	-	-	-
2025-2044	SSP1-2.6	-	22.2	21.8	22.33	22.28	21.16
	SSP2-4.5	-	21.94	22.08	21.93	22.26	21.67
	SSP5-8.5	-	22.47	21.1	21.47	22.26	21.59
% Increase	SSP1-2.6	-	8.72	6.76	9.35	9.11	3.62
	SSP2-4.5	-	7.44	8.13	7.39	9.01	6.12
	SSP5-8.5	-	10.04	3.33	5.14	9.01	5.73

Table 6. Minimum temperature from AOGCM models (°C)

Time Period	Scenarios	Baseline	ACCESS-ESM1-5	MIROC6	MRI-ESM2-0	ACCESS-CM2	MPI-ESM1-2-LR
1985-2014	-	9.22	-	-	-	-	-
2025-2044	SSP1-2.6	-	11.14	11.05	11.21	11.43	10.43
	SSP2-4.5	-	11.12	11.29	11	11.42	10.77
	SSP5-8.5	-	11.52	11.28	11.2	11.42	12.34
% Increase	SSP1-2.6	-	20.82	19.85	21.58	23.97	13.12
	SSP2-4.5	-	20.61	22.45	19.31	23.86	16.81
	SSP5-8.5	-	24.95	22.34	21.48	23.86	33.84

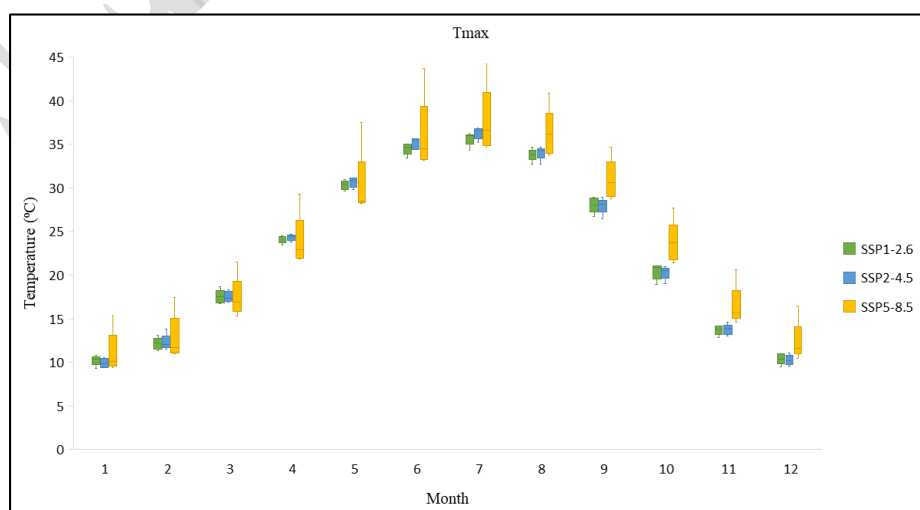


Figure 3. Projected month changes in maximum temperature of AOGCM models under SSP scenarios in 2025-2044

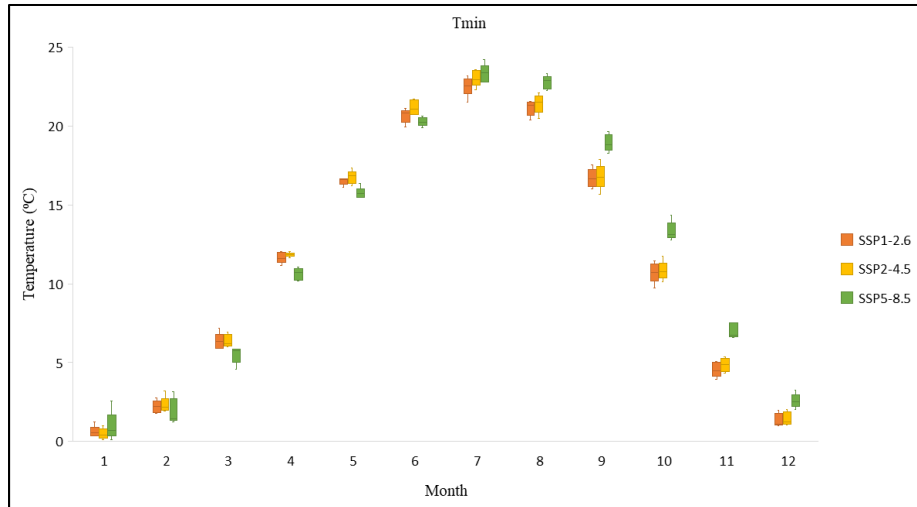


Figure 4. Projected month changes in minimum temperatures of AOGCM models under SSP scenarios in 2025-2044

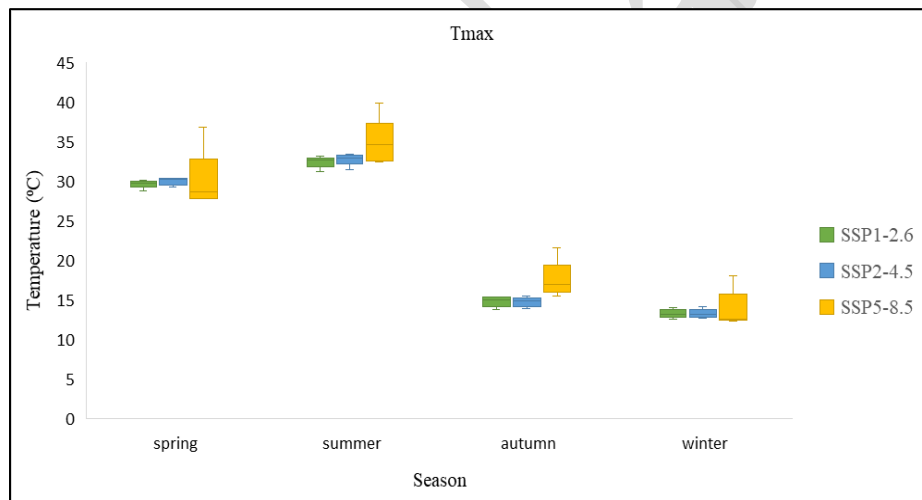


Figure 5. Projected month changes in maximum temperature of AOGCM models under SSP scenarios in 2025-2044

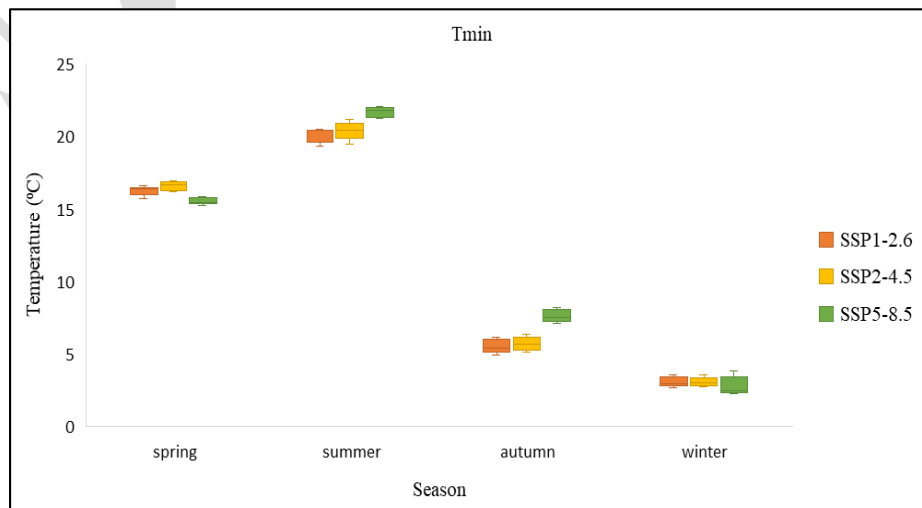


Figure 6. Projected season changes in minimum temperature of AOGCM models under SSP scenarios in 2025-2044

۲.۱.۳. چشم‌انداز بارش

به‌طور کلی، تحلیل چشم‌انداز تغییرات بارش بر اساس خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) و سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، نشان‌دهنده نوسانات قابل توجه در الگوهای بارندگی آینده است. نتایج حاصل از این مدل‌ها نمایانگر افزایش ناپایداری اقلیمی در منطقه مورد مطالعه بوده، به‌ویژه آنکه برخی سناریوها ثبات نسبی در الگوی بارش را نشان می‌دهند، در حالی که برخی دیگر افزایش شدید نوسانات را پیش‌بینی می‌کنند. این روند، بیانگر افزایش احتمال وقوع پدیده‌های حدی مانند بارش‌های شدید و متمرکز، از یک‌سو، و خشکسالی‌های طولانی‌مدت، از سوی دیگر است؛ شرایطی که مستقیماً بر پایداری منابع آب و عملکرد محصولات کشاورزی تأثیرگذار خواهد بود.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۷، تغییرات بارندگی برای دوره‌ی ۲۰۲۵-۲۰۴۴ در مقایسه با دوره پایه، در بازه‌ای بین ۲۱/۰۶- درصد تا ۱۴/۲۷+ درصد نوسان دارد. بیشترین افزایش بارندگی متعلق به مدل ACCESS-CM2 تحت سناریوی SSP5-8.5 است که سناریویی بدبینانه و مبتنی بر تداوم روند فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. در مقابل، کمترین میزان بارندگی در مدل ACCESS-ESM1-5 و در سناریوی میانه SSP2-4.5 گزارش شده است. این اختلاف در نتایج مدل‌ها، گویای وجود عدم قطعیت‌های ذاتی در پیش‌بینی‌های اقلیمی است که لزوم استفاده از طیف متنوعی از مدل‌ها و سناریوها را در مطالعات آینده‌نگر توجیه می‌کند. بررسی تغییرات ماهانه و فصلی بارش (شکل‌های ۷ و ۸) نیز نشان می‌دهد که نوسانات بارش در سراسر سال تداوم خواهد داشت. در این میان، بیشترین افزایش بارندگی در فصل زمستان و تحت سناریوی SSP5-8.5 مشاهده می‌شود؛ امری که می‌تواند منجر به افزایش خطر سیلاب‌های فصلی و چالش‌های مدیریتی در ذخیره و بهره‌برداری از منابع آبی شود. در نقطه مقابل، کمترین افزایش بارندگی در فصل تابستان و تحت سناریوی SSP1-2.6 رخ می‌دهد، که احتمال تشدید تنش آبی در زمان اوج نیاز آبی گیاهان را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، ارزیابی عدم قطعیت مدل‌ها در پیش‌بینی تغییرات فصلی بارش حاکی از آن است که در فصول تابستان و بهار، همگرایی مدل‌ها نسبتاً بیشتر و عدم قطعیت کمتر است. این ویژگی می‌تواند به عنوان مبنای قابل اتکاتری برای برنامه‌ریزی منابع آب در فصول بحرانی استفاده شود. در مقابل، در فصول پاییز و زمستان، پراکندگی بین مدل‌ها بیشتر بوده و برآوردها از دقت کمتری برخوردار است؛ موضوعی که در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی باید مد نظر قرار گیرد.

در مجموع، نتایج مطالعه نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب در آینده نه تنها باید به کمیت بارش توجه کند، بلکه باید به تغییرات زمانی و فضایی آن نیز حساس باشد. این شرایط ایجاب می‌کند که راهبردهای انعطاف‌پذیرتر و سازگار با شرایط متغیر اقلیمی، مانند توسعه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی، بهبود بهره‌وری مصرف آب و به‌کارگیری سامانه‌های هشدار سریع، در دستور کار قرار گیرد.

Table 7. Precipitation from AOGCM models (mm)

Time Period	Scenarios	Baseline	ACCESS-ESM1-5	MIROC6	MRI-ESM2-0	ACCESS-CM2	MPI-ESM1-2-LR
1985-2014	-	292.8	-	-	-	-	-
2025-2044	SSP1-2.6	-	274.23	291.45	259.87	281.58	292.84
	SSP2-4.5	-	231.15	279.4	284.7	281.65	274.59
	SSP5-8.5	-	293.09	285	308.37	334.57	280.76
% Variation	SSP1-2.6	-	-6.34	-0.46	-11.25	-3.83	0.01
	SSP2-4.5	-	-21.06	-4.58	-2.77	-3.81	-6.22
	SSP5-8.5	-	0.10	-2.66	5.32	14.27	-4.11

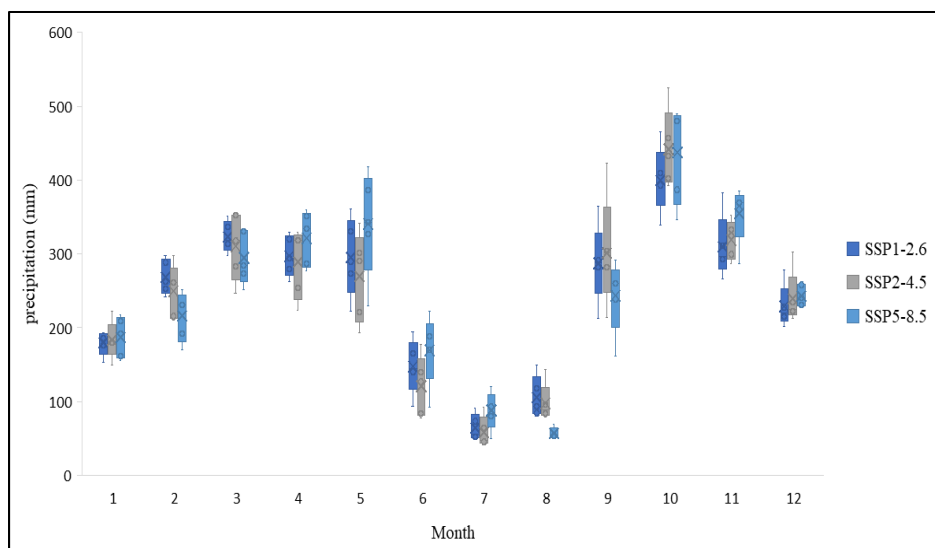


Figure 7. Project month changes in precipitation predicted by AOGCM models under SSP scenarios in 2025-2044

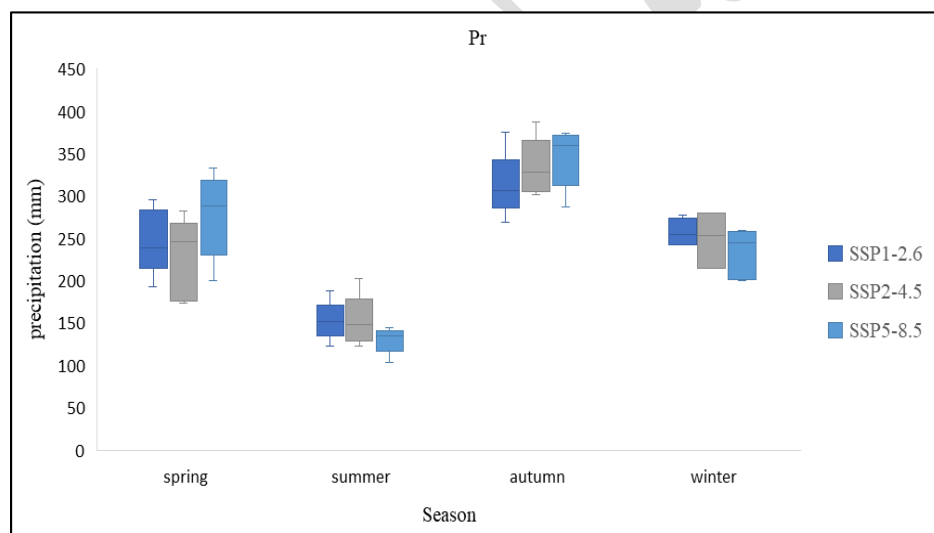


Figure 8. Project season changes in precipitation predicted by AOGCM models under SSP scenarios in 2025-2044

۲.۳. تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصول

۱.۲.۳. نیاز آبی محصول

به طور کلی، نتایج حاصل از ارزیابی تغییرات نیاز آبی محصولات کشاورزی براساس خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) و سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSPs)، نشان‌دهنده روندی فزاینده در نیاز آبی محصولات در منطقه مورد مطالعه است. این افزایش در نیاز آبی، ارتباط مستقیمی با افزایش دما و تغییر در الگوهای بارش دارد که از ویژگی‌های بارز تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود. به عبارت دیگر، با گرم‌تر شدن جو و کاهش یا تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارندگی، تبخیر و تعرق افزایش یافته و در نتیجه، تقاضای آبی گیاهان برای رشد و نمو کامل بیشتر خواهد شد.

در جدول ۸، تغییرات سالانه مجموع نیاز آبی محصولات کشاورزی در منطقه تحت پوشش شبکه آبیاری مغان، در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۴)، برای سه سناریوی اقلیمی مختلف SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ارائه شده است.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بیشترین افزایش نیاز آبی تحت مدل ACCESS-CM2 و سناریوی SSP5-8.5 رخ داده است. این سناریو، نمایانگر شرایطی است که در آن تداوم روند فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و عدم موفقیت در مهار گرمایش جهانی پیش‌بینی شده است. از سوی دیگر، کمترین میزان نیاز آبی مربوط به مدل MIROC6 تحت سناریوی میانه SSP2-4.5 است که نشان می‌دهد تحت شرایط کنترل نسبی انتشار، افزایش نیاز آبی می‌تواند تا حدی محدود شود.

نتایج تحلیل‌های ماهانه و فصلی (شکل‌های ۹ و ۱۰) حاکی از آن است که افزایش نیاز آبی محصولات در تمام طول سال مشاهده می‌شود. این افزایش در فصل تابستان - که هم‌زمان با اوج نیاز آبی گیاهان و کمترین میزان بارندگی در اقلیم‌های نیمه‌خشک است - به‌ویژه در سناریوی SSP5-8.5، بیش از سایر فصول است. این امر می‌تواند فشار مضاعفی بر منابع آب منطقه وارد کرده و لزوم بازنگری در برنامه‌ریزی‌های آبیاری و تقویم زراعی را نشان دهد. در مقابل، کمترین میزان افزایش نیاز آبی در فصل زمستان و تحت سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2.6 مشاهده می‌شود که بیانگر نقش مثبت سیاست‌های اقلیمی مؤثر در کاهش تبعات گرمایش جهانی است.

بررسی عدم قطعیت مدل‌ها نیز بخش مهمی از تحلیل‌ها را تشکیل می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که در فصول تابستان و پاییز، همگرایی بیشتری بین مدل‌ها وجود دارد و عدم قطعیت در برآورد نیاز آبی محصولات کمتر است. این ویژگی، اعتبار پیش‌بینی‌ها در این بازه‌های زمانی را افزایش داده و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر در مدیریت آبیاری و منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، در فصول بهار و زمستان، مدل‌ها پراکندگی بیشتری نشان داده‌اند که حاکی از وجود عدم قطعیت بالاتر در این بازه‌ها است. این مسئله ضرورت به‌کارگیری رویکردهای احتیاطی و انطباق‌پذیر را در سیاست‌گذاری‌ها و اقدامات اجرایی برجسته می‌سازد.

در مجموع، یافته‌های این بخش تأکید می‌کنند که تداوم روند تغییرات اقلیمی می‌تواند به افزایش معنی‌دار نیاز آبی محصولات کشاورزی در منطقه بیانجامد و این موضوع، پایداری کشاورزی را با چالش‌های جدی مواجه خواهد کرد. بر این اساس، تدوین و اجرای راهبردهای سازگار با اقلیم، بهینه‌سازی الگوهای کشت، افزایش بهره‌وری آبیاری و استفاده از فناوری‌های نوین مدیریت آب، برای پاسخگویی به این چالش‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

Table 8. Water demand from AOGCM models (mm/d)

Time Period	Scenarios	Baseline	ACCESS-ESM1-5	MIROC6	MRI-ESM2-0	ACCESS-CM2	MPI-ESM1-2-LR
1985-2014	-	532.44	-	-	-	-	-
2025-2044	SSP1-2.6	-	555.27	545.50	557.05	545.50	545.50
	SSP2-4.5	-	555.77	548.69	548.81	548.81	548.81
	SSP5-8.5	-	552.63	558.19	551.07	568.23	558.21
% Increase	SSP1-2.6	-	4.29	2.45	4.62	2.45	2.45
	SSP2-4.5	-	4.38	3.05	3.07	3.07	3.07
	SSP5-8.5	-	3.79	4.84	3.50	6.72	4.84

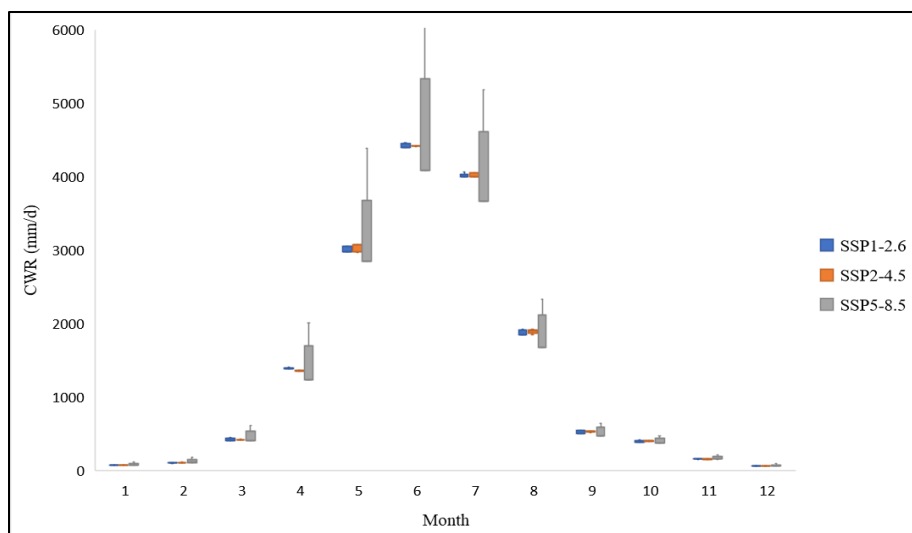


Figure 9. Monthly water demand from AOGCM models under scenarios SSP126, SSP245, SSP585

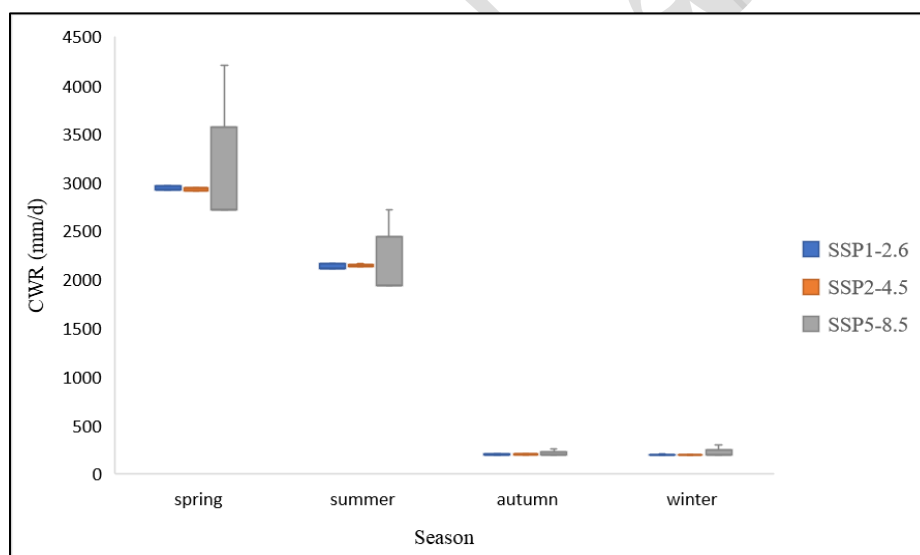


Figure 10. Season water demand from AOGCM models under scenarios SSP126, SSP245, SSP585

۲.۲.۳. نیاز آب آبیاری و تقاضای آب

پس از محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) و بارندگی مؤثر (P_e) به صورت روزانه، و با فرض ثبات در الگوی کشت و مرحله رشد محصولات اصلی شبکه آبیاری مغان، نیاز خالص آبیاری که به عنوان تفاضل بین تبخیر و تعرق مرجع و بارندگی مؤثر تعریف می شود، برای هر یک از محصولات محاسبه گردید. در ادامه، با در نظر گرفتن سطح زیر کشت محصولات عمده، حجم کل آب مورد نیاز (حجم تقاضای آبیاری) برای تأمین نیاز خالص آبیاری شبکه برآورد شد.

نتایج به دست آمده از تحلیل تغییرات نیاز خالص آبیاری محصولات کشاورزی در دو دوره زمانی مختلف - دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۴۴) - و تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، نشان دهنده روندی افزایشی در این پارامتر در منطقه مورد مطالعه است (جدول ۹). این افزایش با توجه به تغییرات اقلیمی پیش بینی شده، عمدتاً ناشی از افزایش دما، کاهش یا تغییر در توزیع مکانی و زمانی بارندگی و افزایش شدت تبخیر و تعرق می باشد.

جالب توجه است که برخلاف بسیاری از مطالعات که مدل ACCESS-CM2 را در سناریوی SSP5-8.5 به عنوان برآوردکننده حداکثر نیاز آبی معرفی می کنند، در این پژوهش، بیشترین مقدار نیاز خالص آبیاری مربوط به مدل MIROC6 تحت همین سناریو بوده است. این اختلاف می تواند ناشی از ویژگی های خاص مدل MIROC6 در شبیه سازی رفتار اقلیمی منطقه، به ویژه در رابطه با بارندگی مؤثر، باشد. از سوی دیگر، کمترین نیاز خالص آبیاری در همین سناریو و برای مدل ACCESS-CM2 گزارش شده که این موضوع می تواند بازتاب تفاوت های ساختاری مدل ها در تخمین پارامترهای اقلیمی، از جمله بارش و رطوبت خاک باشد.

تحلیل روندهای ماهانه و فصلی نیاز خالص آبیاری (شکل های ۱۱ و ۱۲) نیز بیانگر افزایش آن در کلیه ماه های سال است. این افزایش در فصل تابستان - که مصادف با دمای بالا، تابش شدید و کاهش نسبی بارش است - شدیدتر بوده و بیشترین تأثیر را تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 دارد. در مقابل، کمترین افزایش مربوط به فصل زمستان و سناریوی خوش بینانه SSP1-2.6 است که می تواند نتیجه مداخلات موفق در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و پایداری نسبی شرایط جوی در این بازه زمانی باشد.

از سوی دیگر، بررسی میزان عدم قطعیت در برآوردهای فصلی نیاز خالص آبیاری نشان می دهد که مدل ها در فصول تابستان و پاییز همگرایی بیشتری در نتایج خود دارند، به طوری که تغییرات بین مدل ها در این فصول کمتر بوده و می توان با اطمینان بیشتری به برنامه ریزی های آبیاری در این بازه ها پرداخت. در مقابل، فصول بهار و زمستان دارای بیشترین پراکندگی در نتایج مدل ها هستند، که بیانگر ضرورت در نظر گرفتن سناریوهای مختلف و رویکردهای مدیریتی منعطف برای مقابله با پیامدهای احتمالی این نوسانات اقلیمی است.

به طور کلی، این نتایج بر لزوم بازنگری در راهبردهای مدیریت منابع آب در منطقه مغان تأکید دارد. افزایش نیاز خالص آبیاری در سال های آتی، در صورت عدم اتخاذ تدابیر مناسب، می تواند به تشدید فشار بر منابع آبی موجود منجر شود. بنابراین، توصیه می شود که اقداماتی نظیر بهبود راندمان آبیاری، اصلاح الگوی کشت، بهره گیری از ارقام مقاوم به خشکی و توسعه روش های نوین آبیاری تحت فشار در دستور کار قرار گیرد تا از پایداری سیستم های کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی اطمینان حاصل شود.

Table 9. Net irrigation requirement from AOGCM models (mm/d)

Time Period	Scenarios	Baseline	ACCESS-ESM1-5	MIROC6	MRI-ESM2-0	ACCESS-CM2	MPI-ESM1-2-LR
1985-2014	-	440.85	-	-	-	-	-
2025-2044	SSP1-2.6	-	509.65	499.57	509.30	501.89	506.49
	SSP2-4.5	-	518	501.69	503.81	513.95	518.44
	SSP5-8.5	-	507.13	532.08	504.90	496.18	511.71
% Increase	SSP1-2.6	-	15.61	13.32	15.53	13.85	14.89
	SSP2-4.5	-	17.50	13.80	14.28	16.58	17.60
	SSP5-8.5	-	15.03	20.69	14.53	12.55	16.07

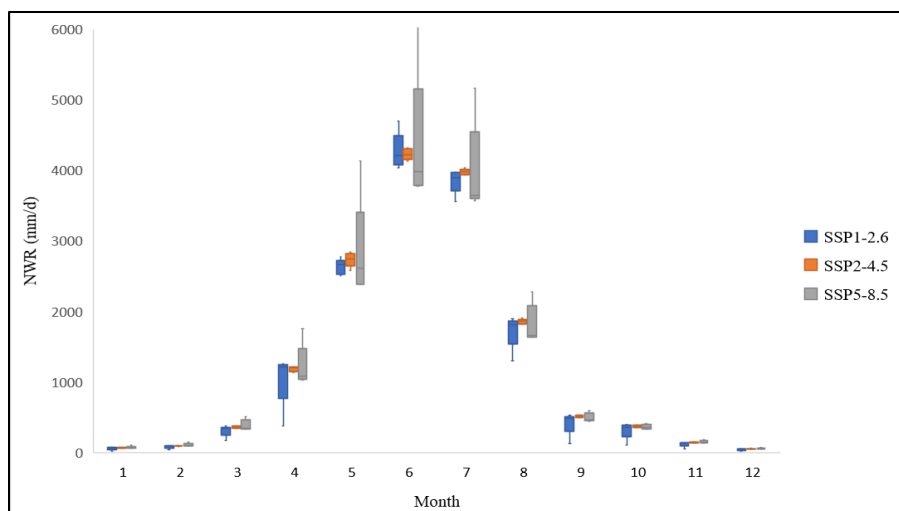


Figure 11. Monthly net irrigation requirement from AOGCM models under scenarios SSP126, SSP245, SSP585

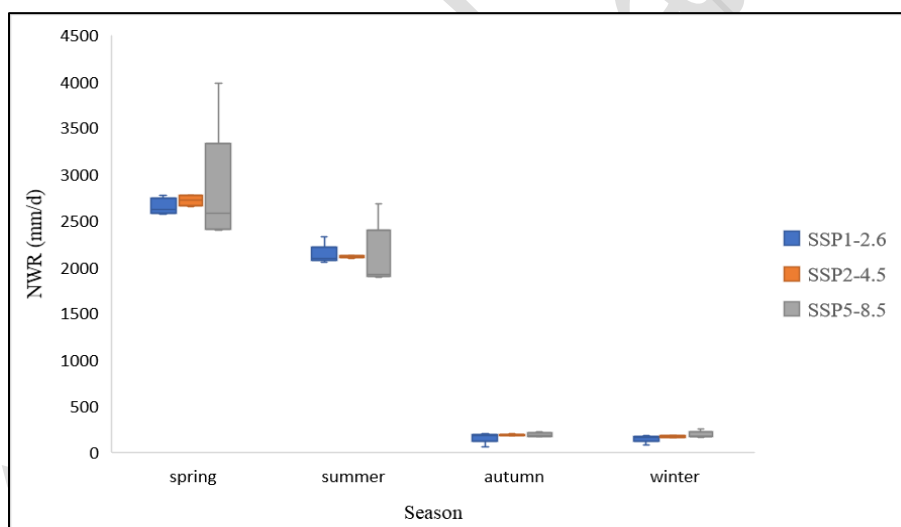


Figure 12. Season net irrigation requirement from AOGCM models under scenarios SSP126, SSP245, SSP585

۳.۲.۳. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شبکه آبیاری

در این پژوهش، ابتدا روند تغییرات اقلیمی در شبکه آبیاری مغان مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور، داده‌های تاریخی و پیش‌بینی‌شده دما، بارش و تبخیر و تعرق مورد بررسی قرار گرفته و همچنین حجم آب ورودی به شبکه از طریق چهار کانال درجه دو محاسبه شده است. در ادامه، نیاز آبی گیاهان با استفاده از تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) و بارش مؤثر (Pe) و با در نظر گرفتن الگوی کشت فعلی منطقه برآورد شده و تقاضای خالص آبیاری برای دوره‌های مختلف و تحت سناریوهای اقلیمی گوناگون استخراج گردیده است. روند تغییرات حجم آب مورد نیاز به تفکیک کانال‌های درجه دو و سناریوهای مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد شبکه از شاخص کفایت آبیاری (Adequacy) استفاده شده است که امکان بررسی میزان تطابق بین حجم آب تحویلی و تقاضای آبیاری را در بازه‌های زمانی مختلف فراهم می‌سازد. این شاخص به صورت نسبت حجم آب تحویلی به حجم تقاضای آب تعریف می‌شود و مقدار آن می‌تواند تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی را بر عملکرد شبکه آبیاری

نشان دهد. با در نظر گرفتن داده‌های دبی کانال‌ها، حجم تحویلی، و برآورد نیاز آبی بر اساس تبخیر-تعرق و سطح زیر کشت، کفایت آبیاری برای کانال‌های درجه دو و سناریوهای مورد بررسی محاسبه شده (جدول ۱۰).

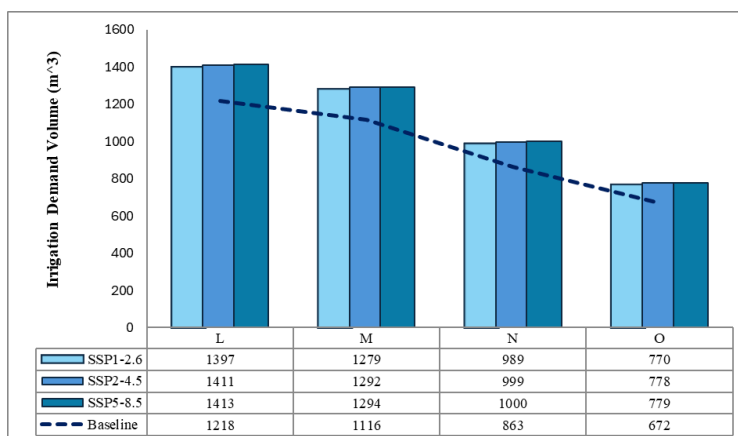


Figure 13. Irrigation demand volume in Moghan network canals under SSP scenarios

Table 10. Irrigation demand volume and Irrigation adequacy of Moghan Irrigation and drainage network

Parameters	Canals	Based line	SSP1-2.6	SSp2-4.5	SSP85-8.5
IWR (mm)	—	440.85	505.38	510.4	511.18
A (ha)	L	2763.8	2763.8	2763.8	2763.8
	M	2530.5	2530.5	2530.5	2530.5
	N	1956.5	1956.5	1956.5	1956.5
	O	1524.5	1524.5	1524.5	1524.5
Irrigation demand volume (m ³)	L	1218.42	1396.77	1410.64	1412.80
	M	1115.57	1278.86	1291.57	1293.54
	N	862.52	988.78	998.60	1000.12
	O	672.08	770.45	778.10	779.29
Irrigation adequacy %	L	0.43	0.37	0.37	0.37
	M	0.46	0.40	0.38	0.39
	N	0.52	0.45	0.45	0.45
	O	0.43	0.37	0.37	0.37

نتایج محاسبه شاخص کفایت آبیاری در شبکه آبیاری مغان نشان می‌دهد که مقدار این شاخص تحت سناریوهای انتشار در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۴۴) بمراتب کمتر از یک خواهد بود. شاخص کفایت بین ۱۳ تا ۱۵ درصد برای کانال‌های مختلف در سناریوهای مورد بررسی کاهش خواهد یافت. این مقادیر بیانگر آن است که حجم آب تحویلی از طریق کانال‌های درجه دوم به واحدهای بهره‌برداری، پاسخگوی حجم تقاضای خالص آبیاری برآوردشده نخواهد بود. عامل اصلی کاهش شاخص کفایت افزایش نیاز آبی است. بر اساس تحلیل روند اقلیمی، افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_o) در بازه مورد مطالعه، به افزایش تقاضای آبیاری انجامیده است. کمبود آب با کاهش بارش مؤثر نیز تشدید می‌شود. کفایت پایین می‌تواند منجر به وقوع تنش آبی، کاهش عملکرد محصولات، و افزایش آسیب‌پذیری بهره‌برداران در مواجهه با تنش‌های اقلیمی شود. استمرار چنین وضعیتی در سناریوهای آینده

اقلیمی ممکن است کارایی و تاب‌آوری شبکه را کاهش دهد و لزوم بازنگری در تخصیص آب، اصلاح الگوی کشت، و ارتقاء بهره‌وری سامانه‌های توزیع را برجسته می‌سازد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که شاخص کفایت آبیاری در شبکه آبیاری و زهکشی مغان در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۴ تحت سناریوهای مختلف انتشار بمراتب کمتر از یک است که بیانگر ناکافی بودن حجم آب تحویلی نسبت به تقاضای خالص آبیاری می‌باشد. این کمبود ناشی از افزایش نیاز آبی به دلیل افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET₀)، و کاهش منابع باران موثر است. از سوی دیگر، استفاده از پنج مدل اقلیمی معتبر (ACCESS-ESM1-5، ACCESS-CM2، MPI-ESM1-2-LR، MRI-ESM2-0 و MIROC6) و سه سناریوی انتشار خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) نشان می‌دهد که دما به‌طور معناداری افزایش یافته و بارندگی سالانه نوسانات قابل توجهی دارد که ناپایداری اقلیمی و بروز خشکسالی و سیل را افزایش می‌دهد. با فرض ثابت بودن الگوی کشت، نیاز خالص آبیاری شبکه بین ۱۲/۷۷ تا ۱۳/۷۶ درصد افزایش خواهد داشت که فشار مضاعفی بر منابع آب محدود وارد می‌کند.

برای مقابله با این چالش‌ها، سیاست‌های پایدار شامل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدیریت هوشمند منابع آب، توسعه کشاورزی مقاوم به خشکسالی و حفاظت از منابع طبیعی ضروری است. بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی با راهکارهایی مانند انتخاب محصولات کم‌آب‌بر، اصلاح الگوی کشت و تقویم زراعی، تغییر زمان کاشت و افزایش راندمان آبیاری اهمیت بالایی دارد. ارزیابی اثرات ترکیبی این رویکردها برای برنامه‌ریزی پایدار مدیریت آب در منطقه حیاتی است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Crop Water Requirement
3. Representative Concentration Pathway
4. Atmosphere-Ocean General Circulation Model
5. Boone
6. Woodbury
7. Modison
8. Mason
9. Reproductive
10. Soil and Water Assessment Tool
11. Gomati
12. Model of interdisciplinary research on Climate Change
13. Shared Socioeconomic Pathways
14. Long Ashton Research Generator-Weather Station
15. Weather Generator
16. Long Ashton Research Station Weather Generator
17. Statistical Downscaling Model
18. Semi-Empirical Distribution

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

- Abeysingha, N. S., Singh, M., Islam, A., & Sehgal, V. K. (2016). Climate change impacts on irrigated rice and wheat production in Gomti river basin of India: A case study. *SpringerPlus*, 5, 1250.
- Adnan, N. A., & Atkinson, P. M. (2011). Exploring the impact of climate and land use changes on stream flow trends in a monsoon catchment. *International Journal of Climatology*, 31, 815–831.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization.
- Andrade, C. W. L., Montenegro, S. M. G. L., Montenegro, A. A. A., de Lima, J. R. S., Srinivasan, R., & Jones, C. A. (2021). Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, 41(S1), e2630–e2645.
- Ashofteh, P., Haddad, O., & Marino, M. (2015). Risk analysis of water demand for agricultural crops under climate change. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(10), 05015006.
- Bajracharya, A. R., et al. (2018). Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*, 625, 837–848.
- Battude, M., Bitar, A. A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Sicre, C. M., Dantec, V. L., & Demarez, V. (2016). Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2-like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 184, 668–681.
- Bishet, D. S., Mohite, A. R., Jena, P. P., Khatun, A., Chatterjee, C., Raghuwanshi, N. S., Singh, R., & Sahoo, B. (2020). Impacts of climate change on streamflow regime of a large Indian river basin using a novel monthly hybrid bias correction technique and a conceptual modeling framework. *Journal of Hydrology*, 590, 125448.
- Dehghan, Z., Fathian, F., & Eslamian, S. (2019). Climate Change Impact on Agriculture and Irrigation Network, Book Chapter, *Climate Change-Resilient Agriculture and Agroforestry*, 333–354, Springer.
- Dessu, S. B., & Melesse, A. M. (2013). Impact and uncertainties of climate change on the hydrology of the Mara River basin, Kenya/Tanzania. *Hydrological Processes*, 27(20), 2973–2986.
- Dhange, N. R., Badar, A. M., & Baiswary, N. Z. (2008). Crop water requirement by modified Penman method using HYMOS. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 14, 28–42.
- FAO. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization.
- FAO. (2016). *Revised FAO methodology for crop water requirements*. www.fao.org/nr/water/docs/revised-fao-methodology-cropwaterrequirements.pdf
- Frame, B., Lawrence, J., Ausseil, A. G., Reisinger, A., & Daigneault, A. (2018). Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. *Climate Risk Management*, 21, 39–51.
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “reliability ensemble averaging” (REA) method, *Journal of Climate*, 15 (10), 1141–1158.
- Gorguner M., & Kavvas, M. L. (2020). Modeling impacts of future climate change on reservoir storage and irrigation water demands in a Mediterranean basin, *Science of the Total Environment* 748–768.
- Gulacha, M. M., & Mulungu, D. M. M. (2017). Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu River Basin Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 62–72.
- Huang, J., Zhang, J., Zhang, Z., Xu, C., Wang, B., & Yao, J. (2011). Estimation of future precipitation change in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 781–792.
- IPCC, (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:[10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).
- Islam, R., Islam, M. M., Islam, M. N., Islam, M. N., Sen, S., & Faisal, R. F. (2020). Climate change adaptation strategies: A prospect toward crop modeling and food security management. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 769–777.
- Jiang, T., Lü, Y., Huang, J. L., Wang, Y. L., Su, B. D., & Tao, H. (2020). New scenarios of CMIP6 model (SSP–RCP) and its application in the Huaihe River Basin. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 10(5), 102–109.
- Koudahe, K., Djaman, K., & Adewumi, J. K. (2018). Evaluation of the Penman–Monteith reference evapotranspiration under limited data and its sensitivity to key climatic variables under humid and semiarid conditions. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 1239–1257.

- Knox, J. W., Rodríguez Díaz, J. A., Nixon, D. J., & Mkhwanazi, M. (2009). A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agricultural Systems*, 103(3), 63–72.
- Knutti, R., Furrer, R. Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models, *Journal of Climate*, 23 (10), 2739–2758
- Kumari, P., Jaiswalb, R. K., and Singh, H. P. (2024). Assessing climate change impacts on irrigation water requirements in the Lower Mahanadi Basin: A CMIP6-based spatiotemporal analysis and future projections, *Journal of Water and Climate Change*, 15 (7), 3328-3346.
- Liao, W., Liu, X., Xu, X., Chen, G., Liang, X., Zhang, H., & Li, X. (2020). Projections of land use changes under the plant functional type classification in different SSP–RCP scenarios in China. *Science Bulletin*, 65(22), 1935–1947.
- Li, Y., Yang, X., Dai, S., & Wang, W. (2010). Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in middle and lower reaches of Yangtze River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 2912–2921.
- Liu, S., Mo, X., Lin, Z., Xu, Y., Ji, J., Wen, G., & Richey, J. (2010). Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agricultural Water Management*, 97(4), 1195–1209.
- Makar, R. S., Shahin, S. A., El-Nazer, M., Wheida, A., & Abd El-Hady, M. (2022). Evaluating the impacts of climate change on irrigation water requirements. *Sustainability*, 14(22), 14833.
- Massah Bavani, A.R., & Morid, S. (2005). The Impacts of Climate Change on Water Resources and Agricultural Production. *Water Resources Research*, 1, 40–47.
- Meaurio, M., Boithias, L., Epelde, A. M., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J. M., Srinivasan, R., & Antigüedad, I. (2017). Assessing the hydrological response from an ensemble of CMIP5 climate projections in the transition zone of the Atlantic region (Bay of Biscay). *Journal of Hydrology*, 548, 46–62.
- Mohebbi, H., Ghodousi, H., & Shahverdi, K. (2024). Evaluating the impact of climate change on irrigation canal performance. *Irrigation and Drainage*, 73(3), 961–973.
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J. and Meehl, G.A. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), pp.3461-3482.
- Opoku Darko, R., Odoi Yorke, F., Abeley Abbey, A., Afutu, E., & Danso Owusu Sekyere, J. (2025). A review of climate change impacts on irrigation water demand and supply: A detailed analysis of trends, evolution, and future research directions. *Water Resources Management*, 39, 17–45.
- Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Richard, N. Palmer, R. N., & Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the Effects of Climate Change on the Water Resources of the Columbia River Basin, *Climatic Change*, 62: 233–256.
- Perez, U., L., Smout, I. k., Rodríguez Díaz, J. A., Carrillo Cobo, M. T. (2010). Irrigation Distribution Networks' Vulnerability to Climate Change, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(7) 486-493.
- Popova, Z., Kercheva, M., & Pereira, L. S. (2006). Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data: Application to South Bulgaria. *Irrigation and Drainage*, 55, 201–215.
- Rehana, S., & Mujumdar, P. (2012). Climate change induced risk in water quality control problems. *J. Hydrology*, 444, 63–77.
- Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O. and Lutz, W. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, pp.153-168.
- Rogelj, J., et al. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534(7609), 631–639.
- Rosenzweig, C., Strzepek, K. M., Major, D. C., Iglesias, A., Yates, D. N., McCluskey, A., & Hillel, D. (2004). Water resources for agriculture in a changing climate: International case studies. *Glob. Environ. Change A*, 14, 345-360, doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.09.003.
- Saddique, N., Bernhofer, C., Kronenberg, R., & Usman, M. (2019). Downscaling of CMIP5 models output by using statistical models in a data scarce mountain environment (Mangla Dam Watershed), Northern Pakistan. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55, 719-735.
- Sarkar, J., Chicholikar, J. R., & Rathore, L. S. (2015). Predicting future changes in temperature and precipitation in arid climate of Kutch, Gujarat: analyses based on LARS-WG model. *Current science*, 2084-2093.
- Semenov, V., & Bengtsson, L. (2002). Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 19, 123-140.
- Sha, J., Li, X., & Wang, Z. L. (2019). Estimation of future climate change in cold weather areas with the LARS-WG model under CMIP5 scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 3027-3039.
- Sharma, R., Thapa, B., & Aryal, S. (2024). Future climate change impacts on irrigation adequacy in semi-arid canal networks of Nepal. *Water*, 16(2), 253.

- Sharma, T., Vittal, H., Chhabra, S., Salvi, K., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2018). Understanding the cascade of GCM and downscaling uncertainties in hydro-climatic projections over India. *International Journal of Climatology*, e178-e190.
- Tebaldi, C., et al. (2021). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253–293.
- Tukimat, N., Harun, S. & Shahid, S. (2017). Modeling irrigation water demand in a tropical paddy cultivated area in the context of climate change. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 143 (7) 050170031-050170038.
- Uniyal, B., Jha, M. K., & Verma, A. K. (2015). Assessing climate change impact on water balance components of a river basin using SWAT model. *Water resources management*, 29, 4767-4785.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., & Lamarque, J. F. (2011). The representative concentration pathways: an overview *Clim. Change*, 109, 5-31.
- Vesely, F. M., Paleari, L., Movedi, E., Bellocchi, G., & Confalonieri, R. (2019). Quantifying uncertainty due to stochastic weather generators in climate change impact studies. *Scientific reports*, 9(1), 9258.
- Wilks, D. S. (1999). Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. *Climate research*, 11(2), 125-136.
- Wang, J., Vanga, S. K., Saxena, R., Orsat, V., & Raghavan, V. (2018). Effect of climate change on the yield of cereal crops: A review. *Climate*, 6(2), 41.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17, 145–157.
- Xiong, W., Conway, D., Lin, E., & Holman, I. (2009). Potential impacts of climate change and climate variability on China's rice yield and production. *Climate Research*, 40(1), 23-35.
- Zhang, X., & Cai, X. (2013). Climate change impacts on global agricultural water deficit. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1111-1117.
- Zhou, T., Wu, P., Sun, S., Li, X., Wang, Y., & Luan, X. (2017). Impact of future climate change on regional crop water requirement: A case study of Hetao irrigation district, China. *Water*, 9, 429.

The Impact of Climate Change on Crop Water Requirements Using Climate Models in Moghan Irrigation Network

Sepideh Rahmati¹, Mohammad Javad Monem^{2*2}, Majid Delavar³

1. Ph. D. Candidate, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, the University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.
2. Professor Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, the University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.
3. Associate Professor Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, the University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

Abstract

The impact of climate change on crop water requirement and irrigation water demand is crucial for evaluating agricultural productivity especially in semi-arid regions. This study investigates crop water requirement (CWR) and irrigation water requirement (IWR) in Moghan irrigation network, focusing on forecasting future irrigation water demands. Daily temperature and precipitation data from climate models under three scenarios (optimistic, intermediate, and pessimistic) were downscaled. Model results indicate that in the future, maximum temperature will increase by 0.68 to 2.05 °C, minimum temperature by 1.21 to 3.12 °C, and annual precipitation will change between -21.06% and +27.14%. These changes will increase seasonal climate variability and instability in the region. Crop water requirements and net irrigation needs will rise in all seasons. Uncertainty in model estimates for seasonal changes in crop water requirement and net irrigation demand is lower in summer and autumn compared to spring and winter. This study estimated water requirements for main crops in the Moghan network—including wheat, alfalfa, peanut, cotton, and vegetables—using the FAO 56 method. Results show that irrigation water needs and total water demand will increase by 12.77% to 13.76%. The irrigation adequacy index in the Moghan network for the 2025–2044 period will be decreased by 15%, and is far below one, indicating that the volume of water delivered to farms will be insufficient to meet estimated net irrigation demand. This shortage is driven by increased water demand due to higher temperatures and evapotranspiration, and reduced effective rainfall. Consequently, water stress, reduced crop yields, and increased vulnerability of farmers are expected. This situation highlights the need to revise water allocation, modify cropping patterns, and improve irrigation network efficiency for sustainable agricultural water management.

Keywords: AOGCM models, Downscaling, SSP scenarios, Water demand volume.

2* Corresponding Author : monem_mj@modares.ac.ir