مقدمه

در این فصل، نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها با هدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا، به تحلیل کلی خروجی‌های مدل‌ها و ارزیابی روند تغییرات در متغیرهای هیدرولوژیکی نظیر بارش و رواناب بین دوره پایه و دوره‌های آینده پرداخته می‌شود. در ادامه، فرآیند مدلسازی بارش–رواناب با استفاده از مدل مفهومی IHACRES انجام می‌گیرد که با بهره‌گیری از داده‌های هواشناسی و جریان رواناب، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه را شبیه‌سازی می‌کند. سپس، به مدلسازی منابع آب با استفاده از مدل WEAP پرداخته می‌شود که ابزاری قدرتمند در ارزیابی تعادل منابع و مصارف آب و تحلیل سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی است. در این فصل، کالیبراسیون، اعتبارسنجی و تحلیل نتایج هر دو مدل ارائه شده و اثرات تغییر اقلیم بر چرخه‌ی هیدرولوژیکی و وضعیت منابع آب در منطقه مورد مطالعه مورد بحث و تفسیر قرار می‌گیرد.

ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی استفاده شده در شبیه‌سازی دما، بارش

به منظور اطمینان از قابلیت اعتماد مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) در مطالعات اقلیمی آینده‌نگر، بررسی دقت این مدل‌ها در بازسازی داده‌های اقلیمی گذشته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه، عملکرد مدل GFDL-ESM4 در بازسازی پارامترهای اقلیمی شامل بارش ماهانه، دمای حداکثر و دمای حداقل ماهانه برای ایستگاه سینوپتیک سلیمان‌تنگه در دوره پایه ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تطبیق خروجی‌های مدل با شرایط اقلیمی محلی، داده‌های مدل GCM ابتدا با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG به مقیاس ایستگاهی تبدیل شدند. سپس به منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل، از سه شاخص آماری پرکاربرد و معتبر شامل R^2 ، RMSE و NES استفاده گردید. نتایج این ارزیابی، مبنایی برای تعیین میزان دقت و اعتبار مدل در بازنمایی اقلیم گذشته منطقه بوده و از این طریق امکان بهره‌برداری مناسب از خروجی‌های مدل در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده و تحلیل‌های مرتبط با منابع آب، از جمله شبیه‌سازی بارش-رواناب، فراهم می‌گردد. نتیجه‌گیری کلی از ارزیابی مدل گردش عمومی جو برای پارامترهای بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل در ایستگاه سینوپتیک سلیمان تنگه دوره پایه (۲۰۰۳-۲۰۲۰) به بدین صورت است که برای پارامتر بارش

با وجود اینکه مدل توانسته روند کلی بارش را تا حدی بازسازی کند R^2 برابر با ۰/۵۴، میزان خطای پیش‌بینی نسبتا بالا RMSE برابربا ۲۵/۲۵ و ضریب بهره‌وری منفیNES برابر با ۱/۶۵ نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی دقیق مقادیر بارش عملکرد مناسبی ندارد و نمی‌تواند به خوبی نوسانات بارش را پیش‌بینی کند. مدل در پیش‌بینی دمای حداکثر عملکرد قابل قبولی دارد، به گونه‌ای که ضریب تعیین بالا برابر با ۰/۹۳ و ضریب بهره‌وری مثبت و مطلوب NSE برابر با ۰/۲۶ نشان‌دهنده همبستگی قوی و دقت خوب مدل است. میزان خطای مدل در معیار

RMSE برابر با ۵/۳ نیز در حد قابل قبول قرار دارد. مدل برای دمای حداقل نیز عملکرد مناسبی ارائه می‌دهد، با ضریب تعیین بالا برابر با ۰/۹۲ و ضریب بهره‌وری مطلوب NSE برابر با ۰/۷۶، که نشان‌دهنده دقت خوب مدل در بازسازی روند دمای حداقل است. خطای متوسط RMSE برابر با ۲/۹۶ نیز بیانگر دقت مطلوب مدل است. مدل گردش عمومی جو در پیش‌بینی دما (حداکثر و حداقل) برای دوره پایه در ایستگاه سلیمان تنگه عملکرد مناسبی دارد و می‌توان به نتایج آن برای تحلیل تغییرات اقلیمی اعتماد کرد. با این حال، دقت مدل برای پیش‌بینی بارش ضعیف‌تر است و در تحلیل‌های مرتبط با بارش باید احتیاط بیشتری به خرج داد یا از مدل‌های کمکی و داده‌های تصحیح‌شده بهره گرفت که این به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامتر بارش می باشد.

جدول ۴-۱۰ نتایج عملکرد معیارهای ارزیابی پارامترهای بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر برای ایستگاه سینوپتیک سلیمان تنگه

متغیر / نمایه	ضریب تبیین (R^2)	مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب نش (Ns)
بارش	۰/۵۴	۲۵/۵۵	-۱/۶۵
دمای حداقل	۰/۹۲	۲/۹۶	۰/۷۶
دمای حداکثر	۰/۹۳	۵/۳۰	۰/۲۶

تحلیل نتایج داده‌های اقلیمی

در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و به‌ویژه عملکرد سد شهید رجایی، از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو GFDL-ESM4 تحت سه سناریوی اقلیمیSSP1-2.6 ، SSP2-4.5وSSP5-8.5 استفاده گردید. داده‌های بارش ماهانه برای این سناریوها با استفاده از مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس‌شده و با میانگین مشاهداتی دوره پایه مقایسه شدند.

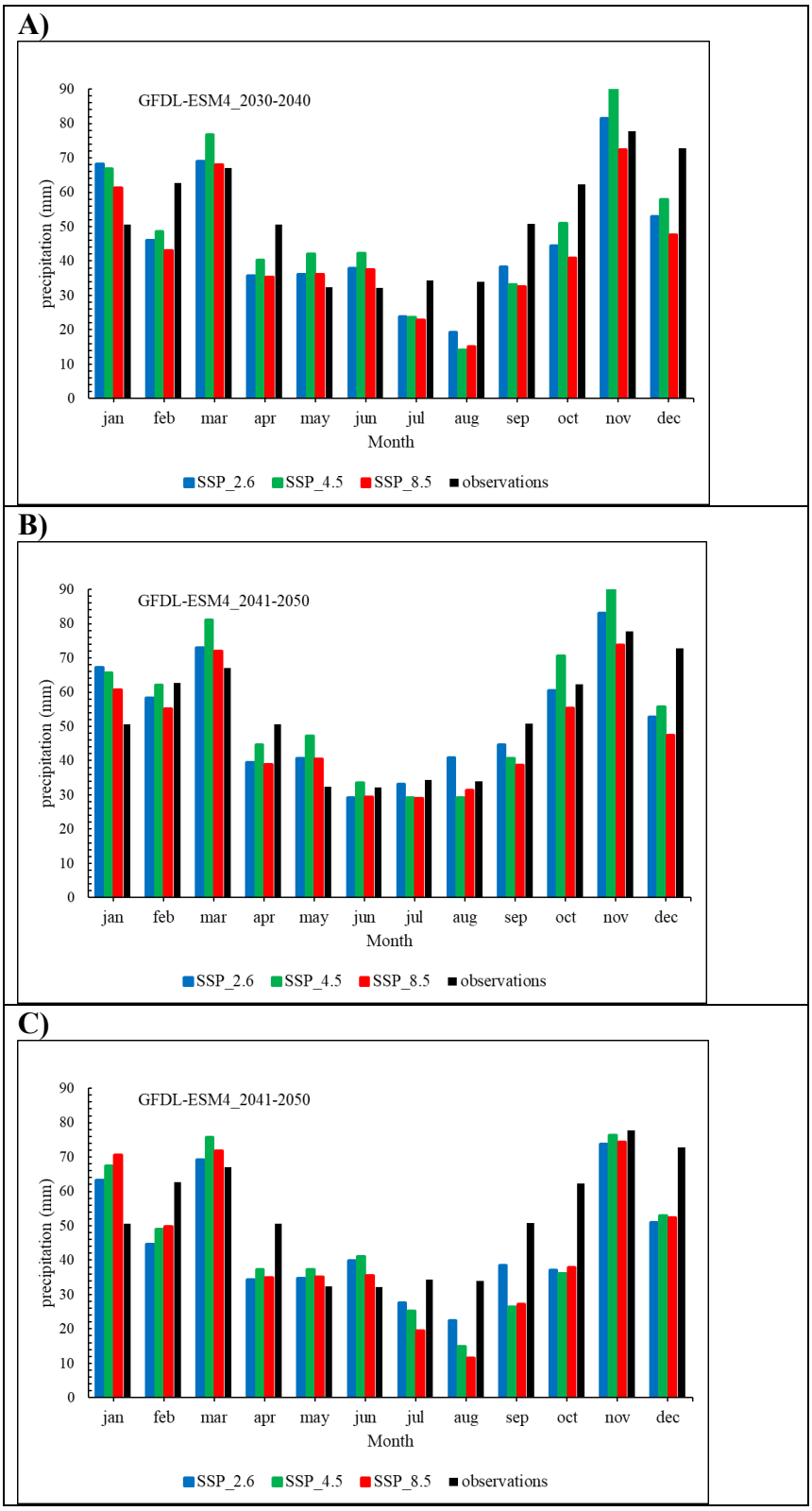
تحلیل تغییرات بارش در سناریوهای اقلیمی آینده

در این بخش روند تغییرات میانگین سالانه بارش برای مدل GFDL-ESM4 برای سه سناریوی اقلیمیSSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و برای سه دوره آینده (۲۰۳۰ -۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۵۰) و (۲۰۵۱-۲۰۶۰) در نمودار ۴-۱ ارائه گردیده است. میانگین سالانه بارش در دوره پایه برابر با ۵۲/۲۶ میلی‌متر گزارش شده است. تحلیل داده‌های بارش برای دوره‌های آتی تحت سه سناریوی اقلیمیSSP2.6 ، SSP4.5وSSP8.5 حاکی از کاهش قابل توجه میانگین بارش سالانه نسبت به دوره پایه می‌باشد. در بازه زمانی ۲۰۳۰–۲۰۴۰، میانگین بارش سالانه برای سناریوهایSSP2.6 ، SSP4.5وSSP8.5 به ترتیب برابر با ۴۶/۱۲، ۴۹/۶۲ و ۴۲/۷۲ میلی‌متر بوده است. این مقادیر نسبت به دوره پایه به ترتیب کاهش‌هایی معادل ۱۱/۷درصد، ۵/۱درصد و ۱۸/۳درصد را نشان می‌دهند. در دوره ۲۰۴۱–۲۰۵۰، شدت کاهش بارش سالانه در اغلب سناریوها اندکی کاهش یافته و میانگین‌های گزارش شده به ترتیب برابر با ۵۱/۹۳ میلی‌متر(SSP2.6) ، ۵۴/۹۹ میلی‌متر (SSP4.5) و ۴۷/۶۵ میلی‌متر (SSP8.5) می‌باشد. در این بازه، سناریوی میانه SSP4.5 افزایشی جزئی (حدود ۵/۲ درصد) نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. در دوره ۲۰۵۱–۲۰۶۰، بار دیگر روند کاهش بارش در سناریوهای مختلف شدت می‌گیرد. به‌طوری‌که در SSP2.6 و SSP4.5به‌ترتیب میانگین بارش به ۴۴/۷۴ و ۴۵/۰۱ میلی‌متر می‌رسد. سناریوی بدبینانه SSP8.5 نیز با مقدار ۴۳/۴۰ میلی‌متر، کاهش قابل توجه بارش را نسبت به دوره پایه حفظ کرده است. تحلیل تغییرات فصلی بارش که در نمودار ۴-۲ نشان داده شده است بدین صورت می‌باشد که در زمستان، بارش در اغلب سناریوها نسبتاً پایدار باقی مانده یا در برخی موارد، افزایش اندکی نیز تجربه شده است. به‌عنوان نمونه، در بهمن‌ماه از دوره ۲۰۴۱–۲۰۵۰، سناریوی SSP4.5 بارشی برابر با ۱۰۰/۲۷ میلی‌متر ثبت کرده است که به‌طور قابل توجهی از مقدار پایه (۷۷/۶۶ میلی‌متر) بالاتر است. در مقابل، سناریوی SSP8.5 گرچه همچنان کاهش‌هایی را در این فصل تجربه می‌کند، اما شدت آن نسبت به سایر فصل‌ها کمتر است. کاهش بارش در فصل بهار چشمگیر بوده و در اغلب دوره‌ها و سناریوها مشاهده می‌شود. این کاهش به‌ویژه در اردیبهشت و خردادماه، یعنی در آستانه فصل کشت و افزایش نیاز آبی، می‌تواند منجر به کاهش آبدهی منابع سطحی و بروز تنش‌های آبی در بخش کشاورزی شود.

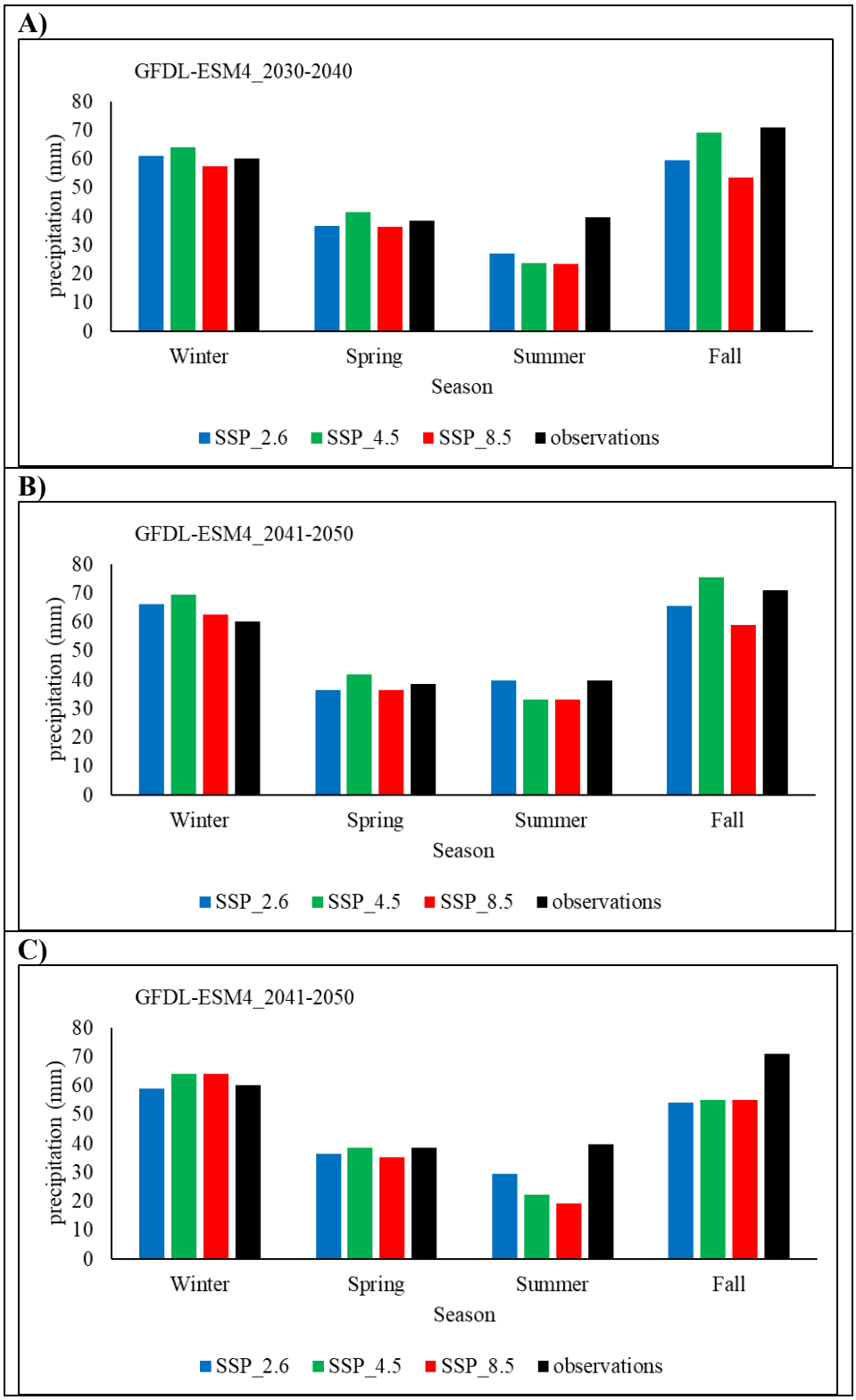
بیشترین میزان کاهش بارش مربوط به فصل تابستان است. در برخی ماه‌ها نظیر مرداد، مقدار بارش به کمتر از نیمی از دوره پایه کاهش یافته است. این کاهش هم‌زمان با اوج تقاضای آب در بخش‌های کشاورزی و شهری، چالش‌های جدی برای مدیریت منابع آب ایجاد خواهد کرد. در فصل پاییز، تغییرات بارش نوسانی است. در برخی ماه‌ها مانند آبان از دوره ۲۰۴۱–۲۰۵۰ تحت سناریویSSP4.5 ، افزایش‌های نسبی در بارش مشاهده شده است. با این حال، روند کلی نشان‌دهنده کاهش بارندگی در فصل پاییز می‌باشد. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که تغییر اقلیم منجر به کاهش کلی بارش و تغییرات قابل توجه فصلی خواهد شد. کاهش بارش در ماه‌های تابستان و بهار، زمانی که تقاضا برای آب بیشتر است، می‌تواند تامین منابع آبی سد شهید رجایی را با چالش مواجه سازد. همچنین افزایش ناپایداری بارش و تغییر الگوهای فصلی ممکن است خطر وقوع خشکسالی‌های متناوب و سیلاب‌های ناگهانی را افزایش دهد. در جدول ۴-۱ درصد تغییرات میانگین بارش نسبت به دوره پایه ارائه گردیده است.

جدول ۴-۱ جدول درصد تغییرات میانگین بارش نسبت به دوره پایه

دوره	سناریو	میانگین بارش (میلی‌متر)	درصد تغییر نسبت به دوره پایه (٪)
دوره پایه		۵۲/۲۶	۰
۲۰۳۰-۲۰۴۰	SSP2.6	۴۶/۱۲	- ۱۱/۷۸
۲۰۳۰-۲۰۴۰	SSP2.6	۴۹/۶۲	-۵/۰۵
۲۰۳۰-۲۰۴۰	SSP2.6	۴۲/۷۲	-۱۸/۲۷
۲۰۴۱-۲۰۵۰	SSP4.5	۵۱/۹۳	-۰/۶۳
۲۰۴۱-۲۰۵۰	SSP4.5	۵۴/۹۹	۵/۱۷
۲۰۴۱-۲۰۵۰	SSP4.5	۴۷/۶۵	-۸/۸۷
۲۰۵۱-۲۰۶۰	SSP8.5	۴۴/۷۴	-۱۴/۴۳
۲۰۵۱-۲۰۶۰	SSP8.5	۴۵/۰۱	-۱۳/۸۶
۲۰۵۱-۲۰۶۰	SSP8.5	۴۳/۴۰	-۱۶/۹۶



نمودار ۴-۱ تغییرات میانگین ماهانه بارش برای سه دوره آینده A) ۲۰۴۰-۲۰۳۰، B) ۲۰۵۰-۲۰۴۱ و C) ۲۰۶۰-۲۰۵۱ نسبت به دوره پایه



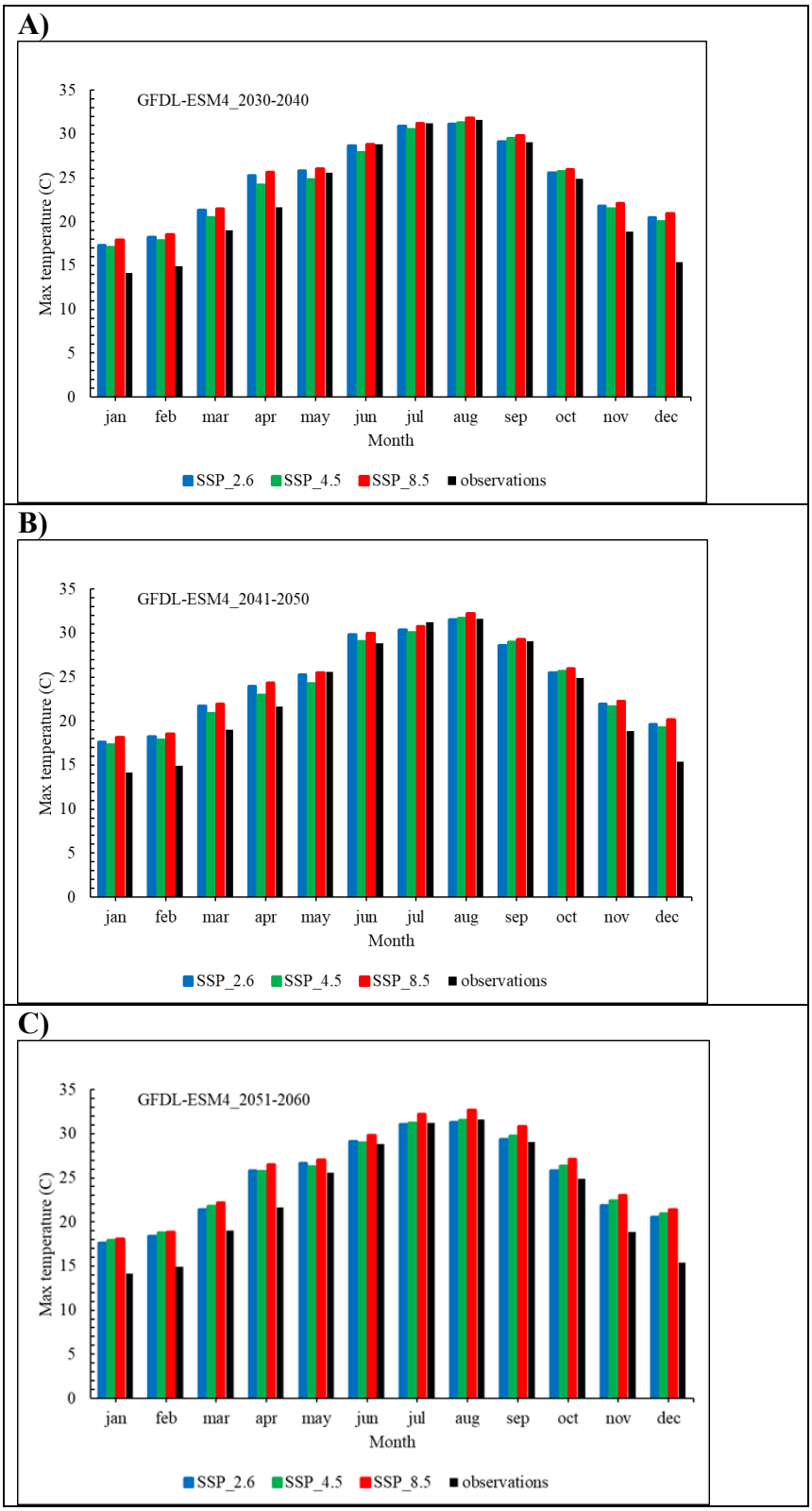
نمودار ۴-۴ تغییرات میانگین فصلی بارش برای سه دوره آینده A) ۲۰۴۰-۲۰۳۰، B) ۲۰۵۰-۲۰۴۱ و C) ۲۰۶۰-۲۰۵۱ نسبت به دوره پایه

تحلیل تغییرات دمای حداکثر تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

در این بخش به تحلیل تغییرات دمای حداکثر در دوره‌های آینده تحت تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5و SSP5-8.5 پرداخته شده است. داده‌های مورد استفاده، خروجی مدل اقلیمی GFDL-ESM4بوده و با استفاده از مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس شده‌اند. این داده‌ها برای سه دوره آینده شامل ۲۰۳۰-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۶۰ به‌دست آمده و با مقادیر مشاهداتی دوره پایه (با میانگین سالانه ۲۲/۹۳ درجه سانتی‌گراد) مقایسه شده‌اند (نمودار۴-۳). بررسی میانگین سالانه دمای حداکثر نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها و دوره‌های زمانی، افزایش دما نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود. این روند افزایشی در سناریوهای شدیدتر نظیر SSP5-8.5 واضح‌تر است. به‌طور مشخص، در دوره ۲۰۳۰–۲۰۴۰ دمای حداکثر در سناریوی SSP5-8.5به میانگین ۲۵/۰۴ درجه سانتی‌گراد رسیده که نشان‌دهنده افزایشی حدود ۹/۱۷ درصد نسبت به دوره پایه است. در دوره ۲۰۴۱–۲۰۵۰، دمای حداکثر در همین سناریو به ۲۴/۹۲درجه رسیده که بیانگر ۸/۶۵ درصد افزایش است. در نهایت، در دوره بلندمدت ۲۰۵۱–۲۰۶۰، دمای حداکثر در سناریوی SSP5-8.5 به ۲۵/۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که معادل ۱۲/۵۸ درصد افزایش نسبت به دوره پایه است. در سناریوی میانه SSP2-4.5 نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که در دوره اول (۲۰۳۰–۲۰۴۰) افزایش دما حدود ۵/۷۲ درصد، در دوره دوم (۲۰۴۱-۲۰۵۰) ۵/۲۰ درصد و در دوره سوم (۲۰۵۱-۲۰۶۰) ۹/۶۴ درصد گزارش شده است. سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2.6 نیز افزایش‌هایی به ترتیب ۷/۴۲ درصد، ۶/۹۱ درصد و ۸/۶۴ درصد را در سه دوره مذکور نشان می‌دهد.این افزایش دما به‌ویژه در ماه‌های گرم سال مانند تیر، مرداد و شهریور محسوس‌تر بوده است. در این ماه‌ها دمای حداکثر به‌صورت مستمر در حال افزایش است و در برخی موارد از میانگین مشاهداتی فاصله قابل توجهی گرفته است. چنین تغییراتی می‌تواند تأثیرات گسترده‌ای بر تبخیر-تعرق، نیاز آبی گیاهان، کیفیت آب، و همچنین میزان رواناب سطحی داشته باشد. در مجموع، تحلیل داده‌ها نشان‌دهنده روند افزایشی دمای حداکثر در آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است که در سناریوهای شدیدتر نمود بیشتری دارد. این تغییرات، به‌ویژه در دوره‌های گرم سال، پتانسیل افزایش فشار بر منابع آبی و نیاز به بازنگری در راهکارهای مدیریت منابع آب را برجسته می‌سازد. در جدول ۳-۲ نیز تغییرات دمای حداکثر نسبت به دوره پایه ارائه گردیده است.

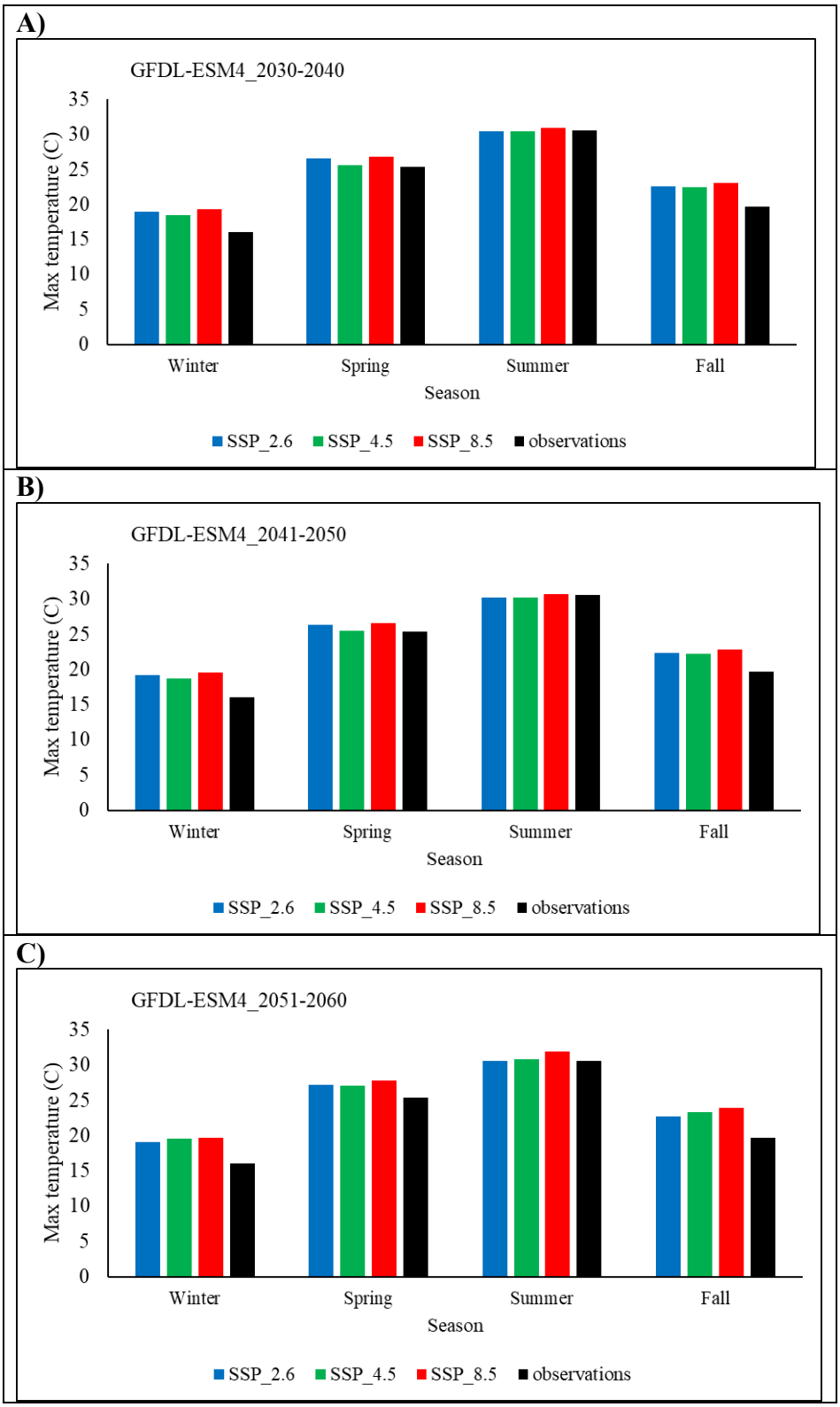
جدول ۳-۲ تغییرات دمای حداکثر نسبت به دوره پایه

دوره زمانی	SSP1-2.6	SSP1-4.5	SSP1-8.5
۲۰۳۰-۲۰۴۰	۷/۴۲	۵/۷۲	۹/۱۷
۲۰۴۱-۲۰۵۰	۶/۹۱	۵/۲۰	۸/۶۵
۲۰۵۱-۲۰۶۰	۸/۶۴	۹/۶۴	۱۲/۵۸



نمودار ۴-۳ تغییرات میانگین ماهانه دمای حداکثر برای سه دوره آینده A) ۲۰۳۰-۲۰۴۰، B) ۲۰۴۱-۲۰۵۰ و C) ۲۰۵۱-۲۰۶۰ نسبت به دوره پایه

تغییرات دمای حداکثر بصورت فصلی نیز در نمودار ۴-۴ ارائه گردیده است. در فصل زمستان افزایش دما در تمام سناریوها محسوس است، با تأثیر کمتر در مقایسه با تابستان. در فصل بهار دمای حداکثر در این فصل روند افزایشی داشته و در برخی ماه‌ها به بیش از ۲۶/۵ درجه می‌رسد که می‌تواند موجب افزایش تبخیر و کاهش رطوبت خاک شود. در فصل تابستان، دمای حداکثر به اوج خود می‌رسد. برای مثال در مردادماه ۲۰۵۱–۲۰۶۰ و سناریوی SSP8.5، مقدار دما به ۳۲/۷ درجه می‌رسد که از مقدار پایه ۳۱/۶۴ درجه بیشتر است. درفصل پاییز نیز افزایش دما در ماه‌های پاییزی نسبت به سایر فصول کمتر است اما همچنان روند صعودی در کلیه سناریوها مشاهده می‌شود.



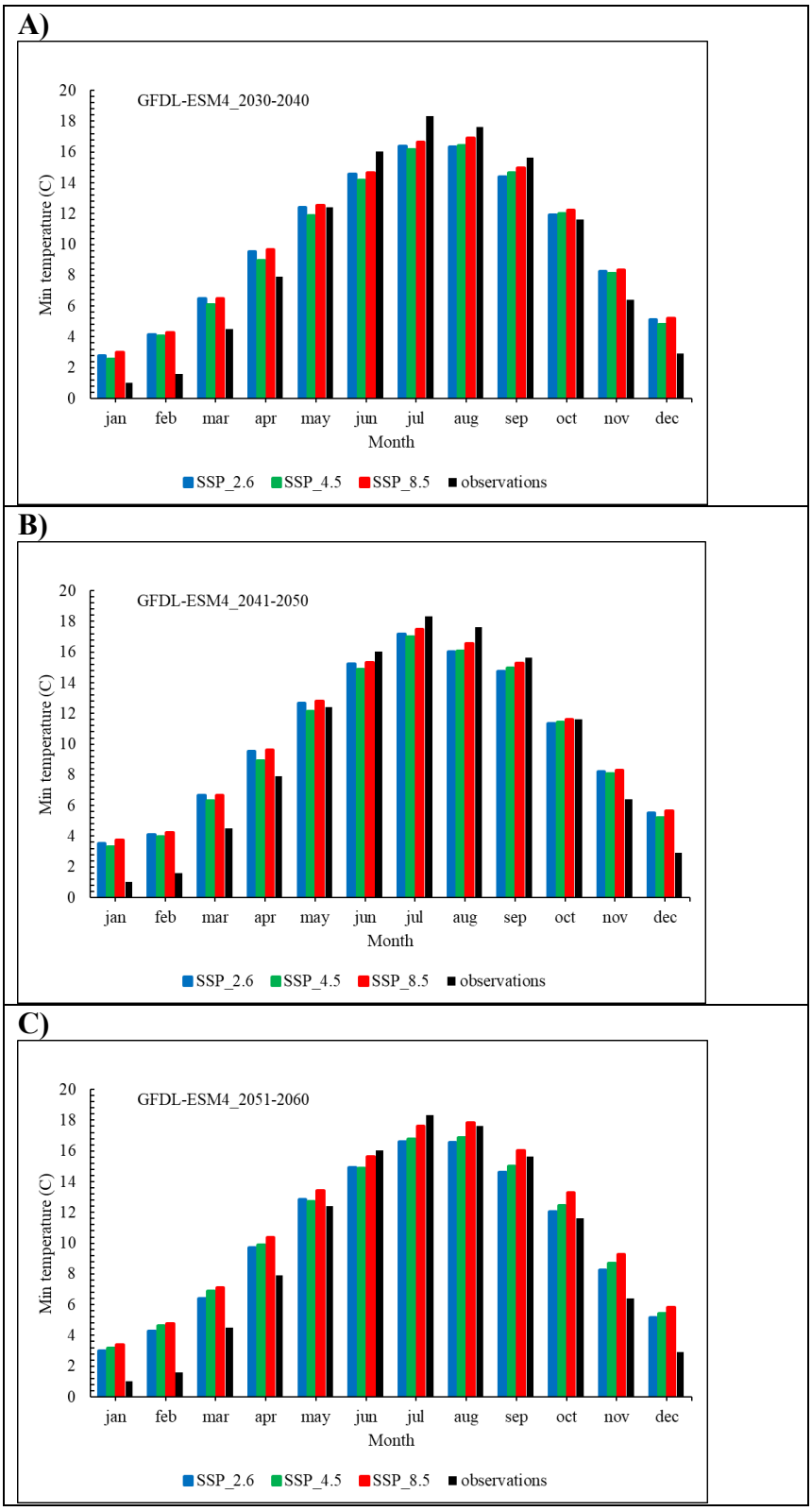
نمودار ۴-۴ تغییرات میانگین فصلی دمای حداکثر برای سه دوره آینده A) ۲۰۳۰-۲۰۴۰، B) ۲۰۴۱-۲۰۵۰ و C) ۲۰۵۱-۲۰۶۰ نسبت به دوره پایه

تحلیل تغییرات دمای حداقل تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

در این بخش به تحلیل تغییرات دمای حداقل در دوره‌های آینده تحت تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5و SSP5-8.5 پرداخته شده است. داده‌های مورد استفاده، خروجی مدل اقلیمی GFDL-ESM4 بوده و با استفاده از مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس شده‌اند. این داده‌ها برای سه دوره آینده شامل ۲۰۳۰-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۶۰ به‌دست آمده است. بر اساس داده‌های اقلیمی دوره پایه، میانگین دمای حداقل سالانه برابر با ۹/۶۶ درجه سلسیوس بوده است. با بررسی داده‌های حاصل از سناریوهای اقلیمی SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 در سه بازه زمانی آینده (۲۰۳۰–۲۰۴۰، ۲۰۴۱–۲۰۵۰، و ۲۰۵۱–۲۰۶۰)، روند افزایش دمای حداقل در تمامی سناریوها مشاهده می‌شود. در بازه زمانی ۲۰۳۰–۲۰۴۰، میانگین دمای حداقل سالانه در سناریوهای مذکور به ترتیب برابر با ۱۰/۲۰، ۱۰ و ۱۰/۴۱ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است که نسبت به دوره پایه، افزایشی در حدود ۵/۶ تا ۷/۸ درصد را نشان می‌دهد. در دوره میانی یعنی ۲۰۴۱–۲۰۵۰، این مقادیر به ۱۰/۴۰، ۱۰/۱۹ و ۱۰/۶۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته‌اند و به‌ترتیب افزایشی معادل ۷/۶، ۵/۵ و ۹/۸ درصد نسبت به دوره پایه داشته‌اند. در نهایت، در دوره بلندمدت (۲۰۵۱–۲۰۶۰)، میزان دمای حداقل سالانه در سناریو SSP2.6 برابر با ۱۳/۳۷ درجه سانتی‌گراد، در SSP4.5 برابر با ۱۰/۶۲ درجه سانتی‌گراد و در SSP8.5 برابر با ۱/۲۲ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شده است. سناریوی SSP8.5 در این بازه، بیشترین افزایش را با ۱۶/۱ درصد نسبت به دوره پایه ثبت کرده است. جدول ۴-۳ درصد تغییرات هر سناریو در دوره‌های زمانی مختلف نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. تغییرات دمای حداقل نسبت به دوره پایه نیز در نمودار ۴-۵ ارائه گردیده است.

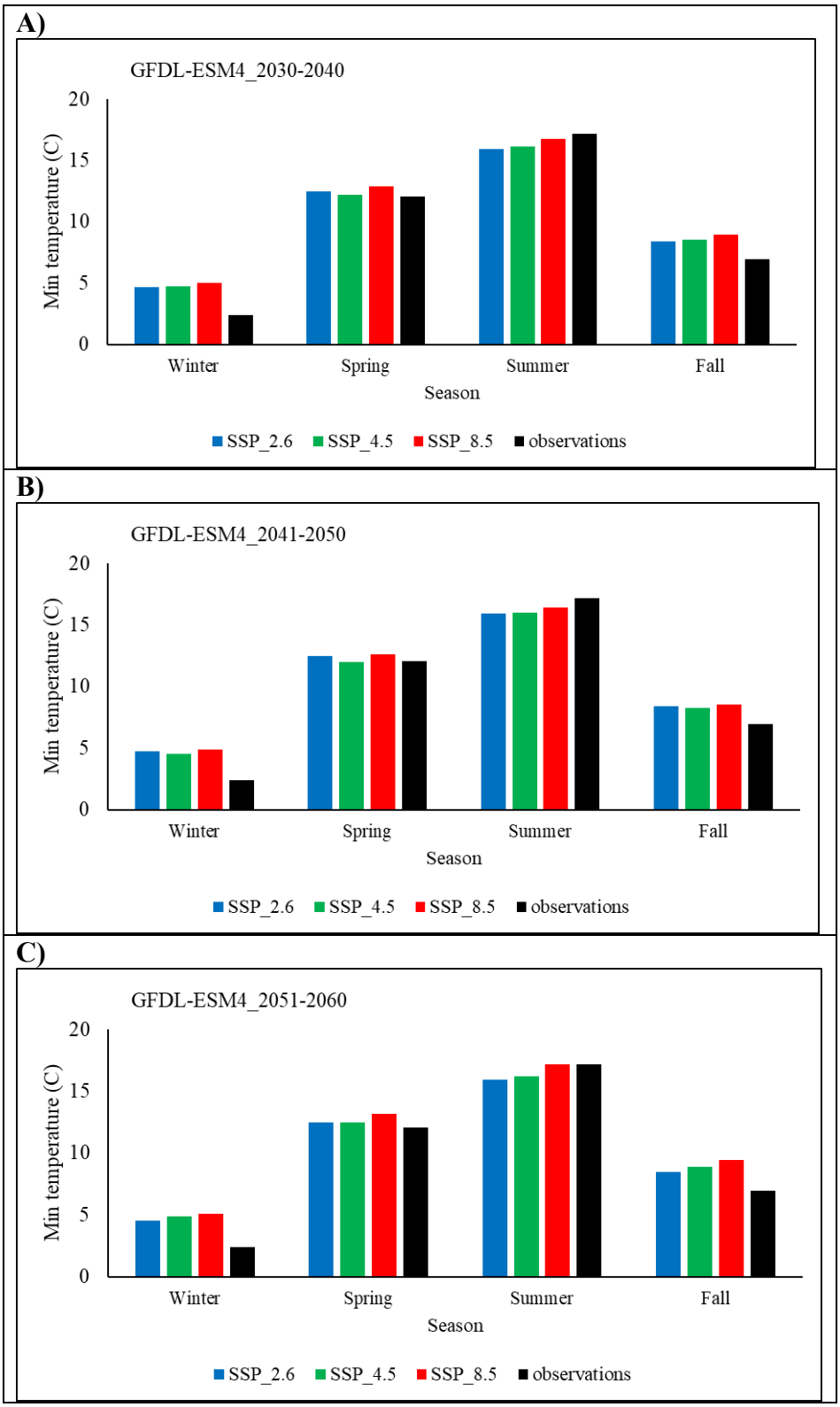
جدول ۴-۳ تغییرات دمای حداقل نسبت به دوره پایه

دوره زمانی	SSP1-2.6	SSP1-4.5	SSP1-8.5
۲۰۳۰-۲۰۴۰	۵/۵۷	۳/۴۴	۷/۷۵
۲۰۴۱-۲۰۵۰	۷/۶۳	۵/۴۵	۹/۷۸
۲۰۵۱-۲۰۶۰	۷/۳۰	۹/۸۹	۱۶/۱۰



نمودار ۴-۵ تغییرات میانگین ماهانه دمای حداقل برای سه دوره آینده A) ۲۰۳۰-۲۰۴۰، B) ۲۰۴۱-۲۰۵۰ و C) ۲۰۵۱-۲۰۶۰ نسبت به دوره پایه

با توجه به نمودار ۴-۶ تغییرات فصلی دمای حداقل را نشان می‌دهد در فصل زمستان، افزایش دمای حداقل در تمامی سناریوها به‌وضوح مشاهده می‌شود. برای مثال، در دی‌ماه دوره ۲۰۴۱–۲۰۵۰، دمای حداقل در سناریوی SSP8.5به ۳/۷۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که مقدار پایه تنها ۱/۰۱ درجه است. این افزایش، که بیش از ۲/۷ درجه است، می‌تواند بر کاهش احتمال یخبندان‌های شدید و الگوهای بارش جامد تأثیرگذار باشد. در فصل بهار نیز روند افزایشی در تمامی ماه‌ها ادامه دارد. دمای فروردین در دوره ۲۰۵۱–۲۰۶۰ و سناریوی SSP8.5 برابر با ۱۰/۳۸ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است که در مقایسه با مقدار پایه (۷/۸۹ درجه سانتی‌گراد)، بیش از ۲/۴ درجه افزایش داشته است. گرمایش بهاری می‌تواند منجر به شروع زودتر فصل رشد گیاهان شود. در فصل تابستان اگرچه دمای حداقل در تابستان نسبتاً بالاست، اما همچنان افزایش نسبی در داده‌های آینده دیده می‌شود. مردادماه در دوره ۲۰۵۱–۲۰۶۰ و سناریوی SSP8.5 دارای دمای حداقل ۱۷/۸۳ درجه است که نسبت به مقدار پایه (۱۷/۶۳ درجه سانتی‌گراد) افزایش یافته است. در فصل پاییز، افزایش دما در تمامی ماه‌ها ثبت شده است. به‌ویژه در آذرماه دوره ۲۰۵۱–۲۰۶۰ و سناریویSSP8.5 ، دمای حداقل به ۵/۸۳ درجه رسیده که نسبت به مقدار پایه (۲/۹۳درجه)، بیش از ۲.۹ درجه افزایش داشته است.



نمودار ۴-۶ تغییرات میانگین فصلی دمای حداقل برای سه دوره آینده A) ۲۰۳۰-۲۰۴۰، B) ۲۰۴۱-۲۰۵۰ و C) ۲۰۵۱-۲۰۶۰ نسبت به دوره پایه

نتایج مدل‌سازی بارش-رواناب با مدل IHACRES

به منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی و تحلیل پاسخ حوضه به الگوهای بارش و دما، از مدل نیمه‌توزیعی IHACRES استفاده گردید. این مدل که بر پایه‌ی شبیه‌سازی رابطه‌ی ورودی‌های اقلیمی (بارش، دما) و خروجی هیدرولوژیکی (رواناب) طراحی شده است، قابلیت مناسبی در بازسازی پاسخ‌های هیدرولوژیکی سیستم‌های آبخیز در دوره‌های مختلف زمانی دارد. در این بخش، ابتدا به کالیبراسیون و واسنجی مدل با استفاده از داده‌های دوره پایه پرداخته شده و سپس شبیه‌سازی رواناب برای دوره‌های آینده (بر اساس خروجی سناریوهای اقلیمی مختلف) ارائه شده است. تحلیل نتایج مدل‌سازی، روند تغییرات رواناب در مواجهه با تغییرات بارش و دما را آشکار ساخته و به درک بهتری از اثرات بالقوه تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه کمک خواهد کرد.

در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی دبی روزانه در حوضه‌ی آبریز تجن طی دوره‌های آینده ۲۰۳۰–۲۰۴۰، ۲۰۴۱–۲۰۵۰ و ۲۰۵۱–۲۰۶۰، از داده‌های بارش میانگین روزانه حوضه، دمای میانگین روزانه ایستگاه تبخیرسنجی سلیمان‌تنگه و دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری کردخیل (واقع در خروجی حوضه) استفاده شد. داده‌های مذکور پس از آماده‌سازی و کنترل کیفی، به‌عنوان ورودی به مدل IHACRES معرفی گردیدند. فرآیند واسنجی مدل در بازه‌ی زمانی ۰۷/۰۲/۲۰۰۴ تا ۱۸/۰۷/۲۰۰۵ انجام گرفت. تعیین این بازه بر اساس روش آزمون و خطای مکرر صورت پذیرفت؛ بدین ترتیب که در هر تکرار، دوره‌ای با طول آماری متفاوت انتخاب و مدل اجرا می‌شد تا در نهایت، بازه‌ای که بیشترین دقت و کارایی را در شبیه‌سازی ارائه می‌داد، به‌عنوان دوره‌ی نهایی واسنجی انتخاب گردد. پس از اتمام مرحله‌ی واسنجی، ارزیابی مدل در بازه‌ی زمانی ۱۹/۰۷/۲۰۰۵ تا ۲۲/۱۰/۲۰۱۸ انجام شد تا توانایی آن در بازتولید داده‌های مشاهده‌شده در دوره‌ای مستقل از واسنجی سنجیده شود. مقادیر بهینه‌ی پارامترهای به‌دست‌آمده از فرایند واسنجی در جدول ۴-۴ ارائه شده است که مبنای پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیکی حوضه در دوره‌های آتی قرار گرفت.

نتایج واسنجی مدل نشان داد که مقدار پارامتر Vs برابر با ۰/۸۲ برآورد گردید. این مقدار بیانگر سهم بالای جریان پایه در تشکیل جریان رودخانه است که مقدار زیاد آن را می‌توان ناشی از وجود پوشش جنگلی گسترده در بخش اعظم حوضه دانست. این یافته با نتایج زارعی و همکاران (۱۳۸۸) در حوضه‌های دارای پوشش جنگلی مطابقت دارد و بیشتر از مقادیر گزارش‌شده توسط لیتلوود و همکاران (۲۰۰۷) در حوضه‌هایی با پوشش غالب زراعت و مرتع است. همچنین، پارامتر 1c/1 که بیانگر سرعت واکنش حوضه نسبت به بارش می‌باشد، در این پژوهش مقدار نسبتاً بالایی به‌دست آمد که نشان‌دهنده واکنش آهسته حوضه به بارش است. مقدار برآورد شده این پارامتر بیش از مقادیر گزارش‌شده توسط زارعی و همکاران (۱۳۸۸) بوده و این تفاوت را می‌توان به پوشش جنگلی انبوه‌تر

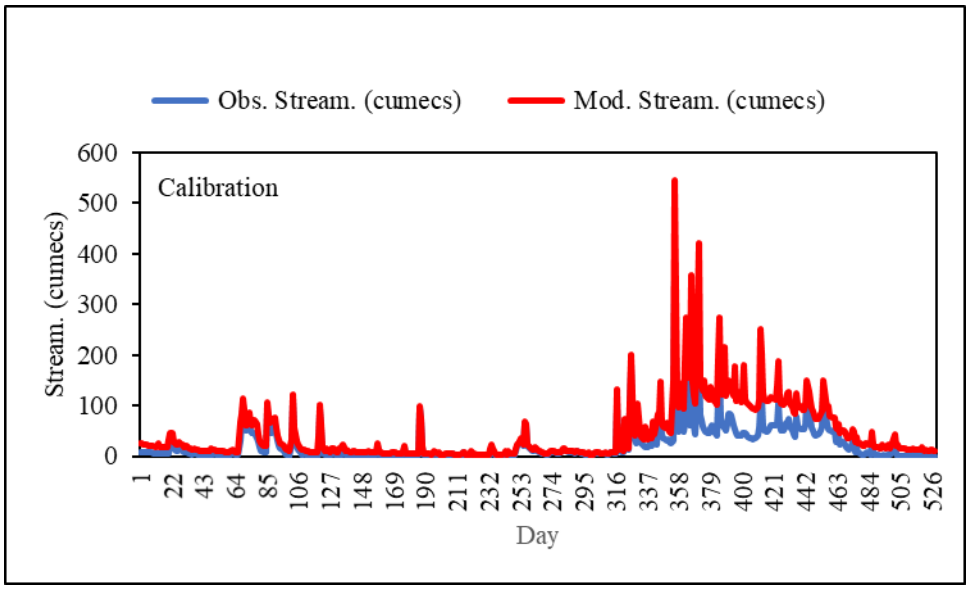
حوضه تجن نسبت داد؛ زیرا این پوشش سبب افزایش زمان تأخیر در رسیدن رواناب ناشی از بارش به جریان رودخانه می‌گردد. از سوی دیگر، مقایسه مقادیر پارامترهای τq و τs نشان داد که τq بیشتر از τs است. این امر بیانگر آن است که حوضه در بازه زمانی کوتاه‌تری به جریان سریع پاسخ می‌دهد، اما برای کاهش جریان آهسته مدت زمان بیشتری لازم است. این نتیجه با یافته‌های صادقی و همکاران (۱۳۹۴) نیز همخوانی دارد.

جدول ۴-۵ مقادیر پارامترهای به دست آمده از فرآیند واسنجی مدل IHACRES در دوره روزانه

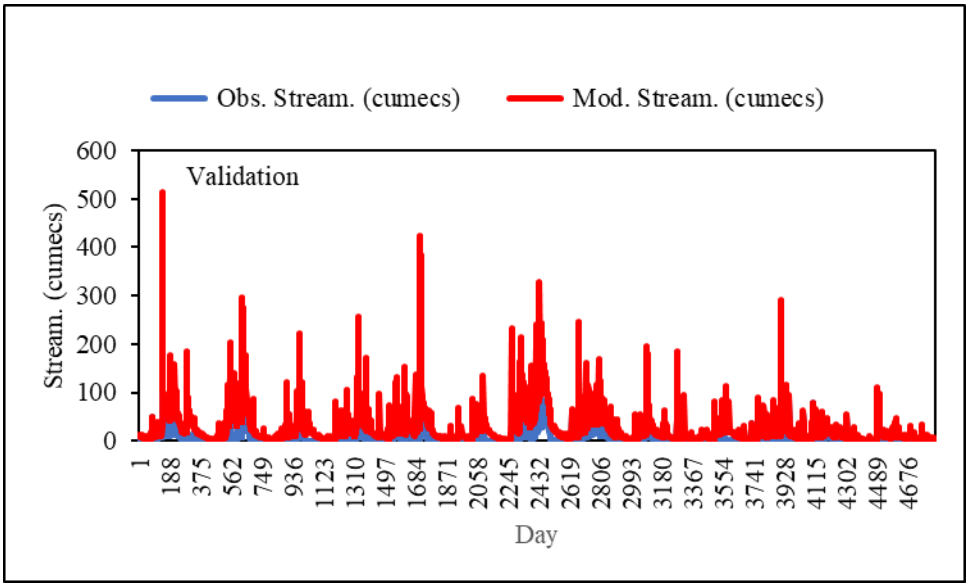
C(MM) ظرفیت ذخیره رطوبت	TW(day) زمان خشک شدن حوضه	F(C0-1) ضریب حرارت حوضه	I ضریب آستانه طوبت	P فاکتور واکنش غیرخطی
۰/۰۰۳۸	۵/۵	۳/۳	۰	۱
α^S ضریب خشکیدگی	β^S شاخص پیک	τ_S(day) زمان فروکش جریان آهسته	V^q نسبت حجمی جریان سریع	V^S نسبت حجمی جریان آهسته
-۰/۹۷	۰/۰۱۹	۴۱/۹۳	۰/۱۷۵	۰/۸۲۵

مقایسه نتایج دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دو مرحله واسنجی و ارزیابی در نمودارهای ۴-۷ و ۴-۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مدل در پیش‌بینی دبی اوج رودخانه عملکرد ضعیف‌تری دارد که این امر معمولاً به دلیل پیچیدگی و پویایی‌های بالای هیدرولوژیکی در زمان وقوع رویدادهای شدید بارش رخ می‌دهد. این محدودیت در توانایی مدل با یافته‌های امیری و رودباری موسوی (۱۳۹۵)، یعقوبی و مساح بوانی (۱۳۹۳) و سایر مطالعات مشابه هم‌راستا است. در مرحله ارزیابی، مقادیر کم بایاس بیانگر وجود اختلاف اندک و سیستماتیک بین دبی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل است، که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در بازتولید روند کلی جریان رودخانه می‌باشد.

همچنین، ضریب نش-ساتکلیف در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰/۶۱ و ۰/۵۹ برآورد شد (جدول ۴-۵ و ۴-۶). این مقادیر، هرچند کمتر از آستانه‌ی ۰/۷۵ است که به عنوان معیار عملکرد «خوب» شناخته می‌شود، اما در محدوده ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ قرار دارد که مطابق با دسته‌بندی‌های مرسوم نشان‌دهنده عملکرد «رضایت‌بخش» مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه می‌باشد. با توجه به ماهیت پیچیده فرآیندهای هیدرولوژیکی و تاثیر عوامل متعدد از جمله تنوع مکانی بارش، پوشش اراضی، و ویژگی‌های خاکی در حوضه، عملکرد مدل در این حد می‌تواند برای مطالعات پیش‌بینی و مدیریت منابع آب قابل قبول تلقی شود. این نتایج حاکی از قابلیت کاربرد مدل IHACRES در شبیه‌سازی روند جریان‌های رودخانه‌ای با دقت معقول است، اگرچه برای بهبود شبیه‌سازی مقادیر اوج جریان، استفاده از داده‌ها و مدل‌های مکمل پیشنهاد می‌شود.



نمودار ۴-۷ دبی متناظر مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مقایس روزانه دوره واسنجی ۲۰۰۴-۲۰۰۵



نمودار ۴-۸ دبی متناظر مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مقایس روزانه دوره صحت‌سنجی ۲۰۰۶-۲۰۱۸

جدول ۴-۵ ارزیابی عملکرد مدل در مقیاس روزانه بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دوره صحت‌سنجی

معیارهای ارزیابی	مقدار
R^2	۰/۶۲
NSE	۰/۶۱

جدول ۴-۶ ارزیابی عملکرد مدل در مقیاس روزانه بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دوره واسنجی

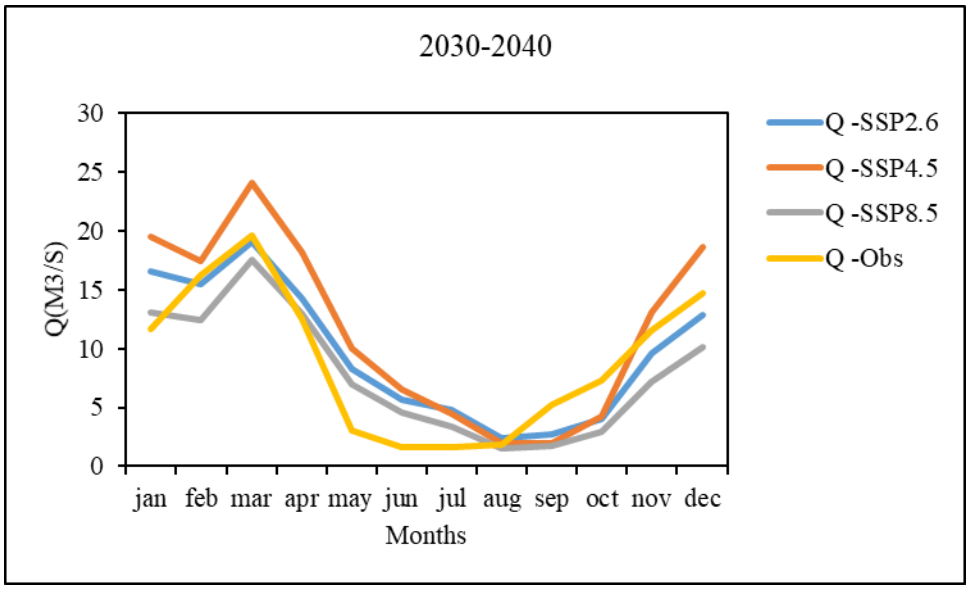
معیارهای ارزیابی	مقدار
R^2	۰/۶
NSE	۰/۵۹

شبیه‌سازی بارش رواناب برای دوره‌ی آینده در مدل IHACRES

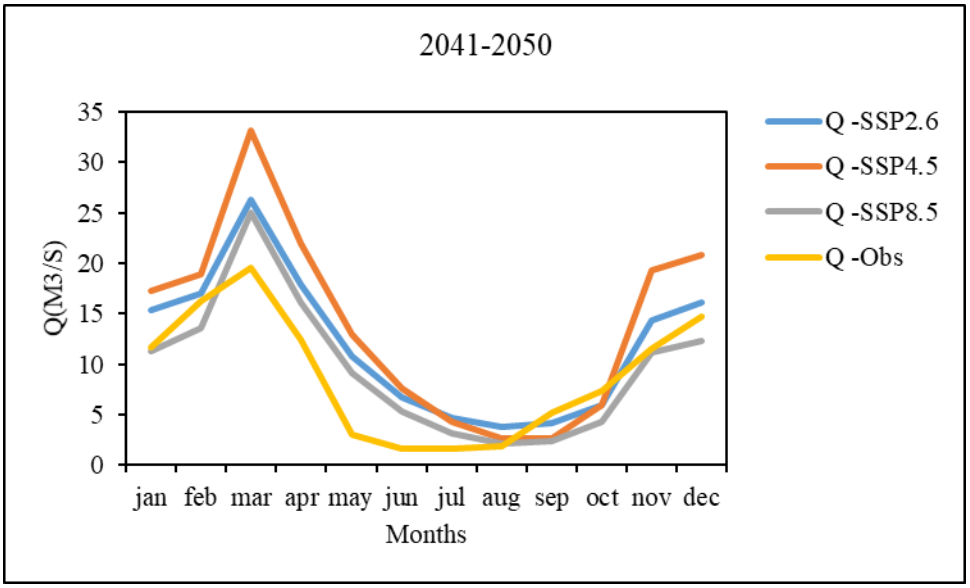
پس از واسنجی و ارزیابی مدل، داده‌های دبی ماهانه رودخانه برای دوره‌های ۲۰۳۰–۲۰۶۰ تحت سه سناریوی تغییر اقلیمSSP1-2.6 ، SSP2-4.5و SSP5-8.5 وارد تحلیل شدند. در این مطالعه از مدل گردش عمومی جو GFDL-ESM4 برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و از نرم‌افزار IHACRES برای شبیه‌سازی جریان رودخانه استفاده شده است. تحلیل جریان رودخانه با هدف بررسی تغییرات میانگین سالانه، الگوهای فصلی و نوسانات ماهانه انجام شد تا اثرات احتمالی تغییرات اقلیمی بر منابع آب و نیازهای مدیریتی حوضه شناسایی شود. نتایج نمودارهای ۴-۹ تا ۴-۱۱ نشان می‌دهد که در دوره ابتدایی ۲۰۳۰–۲۰۴۰، میانگین سالانه دبی در SSP1-2.6 برابر با ۹.۶۴ متر مکعب بر ثانیه، در SSP2-4.5 برابر با ۱۱.۶۷ و در SSP5-8.5 برابر با ۷.۸۶ بوده است. الگوهای فصلی مشابه داده‌های مشاهداتی باقی مانده‌اند؛ بیشینه جریان در زمستان و اوایل بهار و کمینه جریان در تابستان مشاهده می‌شود. سناریوی SSP2-4.5 نوسانات فصلی بیشتری دارد و SSP5-8.5 تابستان‌های خشک‌تر و کاهش شدید جریان تابستانه را برجسته می‌کند. در دوره میانی ۲۰۴۱–۲۰۵۰، میانگین سالانه دبی در تمامی سناریوها افزایش یافته و به ترتیب برابر با ۱۱.۹۲، ۱۳.۹۸ و ۹.۶۸ متر مکعب بر ثانیه درSSP1-2.6 ، SSP2-4.5وSSP5-8.5گزارش شده است. تابستان‌های خشک همچنان قابل توجه هستند و نوسانات فصلی در SSP2-4.5 افزایش یافته است. این افزایش میانگین سالانه در دوره میانی، به ویژه در SSP2-4.5 وSSP1-2.6 ، نشان‌دهنده احتمال افزایش دسترسی به منابع آب در زمستان و بهار است، اما تابستان‌ها همچنان تحت فشار کم‌آبی قرار دارند. در دوره انتهایی ۲۰۵۱–۲۰۶۰، میانگین سالانه دبی کاهش یافته و به ترتیب برابر با ۸.۴۶، ۸.۵۸ و ۷.۹۹ متر مکعب بر ثانیه درSSP1-2.6 ، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است. کاهش قابل توجه جریان در ماه‌های تابستان مشاهده می‌شود و نوسانات فصلی شدیدتر شده‌اند. این روند نشان می‌دهد که فشار بر منابع آب در ماه‌های گرم افزایش یافته و مدیریت فعال منابع آب، ذخیره‌سازی و برنامه‌ریزی برای مقابله با کم‌آبی تابستانی ضروری است. مقایسه دوره‌ها نشان می‌دهد که دوره میانی (۲۰۴۱–۲۰۵۰) بیشترین جریان سالانه را دارد، اما در دوره انتهایی (۲۰۵۱–۲۰۶۰) میانگین سالانه کاهش یافته و تابستان‌ها خشک‌تر شده‌اند. سناریوی SSP5-8.5 همواره فشار بیشتری بر منابع آب وارد می‌کند و کاهش جریان تابستانه در آن برجسته است، در حالی که SSP2-4.5 بیشترین نوسانات فصلی را دارد. به طور کلی، این تحلیل بر اهمیت مدیریت منابع آب، ذخیره‌سازی، و برنامه‌ریزی دقیق برای کاهش تأثیرات تغییرات اقلیمی بر جریان رودخانه تأکید می‌کند همچنین در جدول فلان مقایسه میانگین سالانه دبی رودخانه در دوره‌های ۲۰۳۰–۲۰۶۰ تحت سه سناریوی تغییر اقلیم ارائه گردیده است. همچنین مقایسه میانگین سالانه دبی رودخانه در دوره‌های ۲۰۳۰–۲۰۶۰ تحت سه سناریوی تغییر اقلیم در جدول ۴-۷ ارائه گردیده است.

جدول ۴-۷ مقایسه میانگین سالانه دبی رودخانه در دوره‌های ۲۰۳۰–۲۰۶۰ تحت سه سناریوی تغییر اقلیم

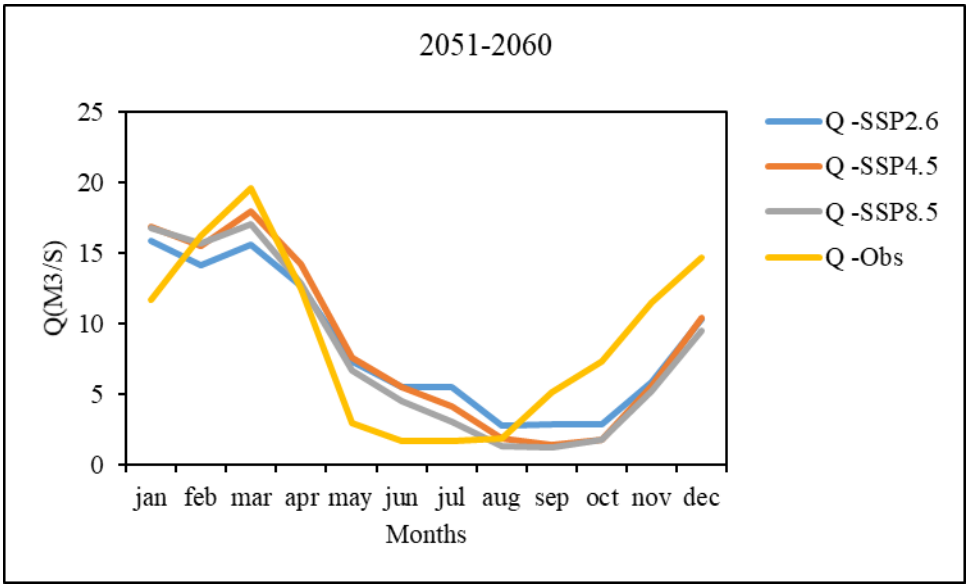
دوره	Q(m3/s) SSP2.6	Q(m3/s) SSP4.5	Q(m3/s) SSP8.5
۲۰۳۰-۲۰۴۰	۹/۶۴	۱۱/۶۷	۷/۸۶
۲۰۴۱-۲۰۵۰	۱۱/۹۲	۱۳/۹۸	۹/۶۸
۲۰۵۱-۲۰۶۰	۸/۴۶	۸/۵۸	۷/۹۹



شکل ۴-۹ تغییرات دبی شبیه‌سازی شده در آینده نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه برای سناریوهای مختلف



شکل ۴-۱۰ تغییرات دبی شبیه‌سازی شده در آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه برای سناریوهای مختلف



شکل ۴-۱۱ تغییرات دبی شبیه‌سازی شده در آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۶۰) نسبت به دوره پایه برای سناریوهای مختلف

مدلسازی منابع و مصارف حوضه تجن با مدل WEAP

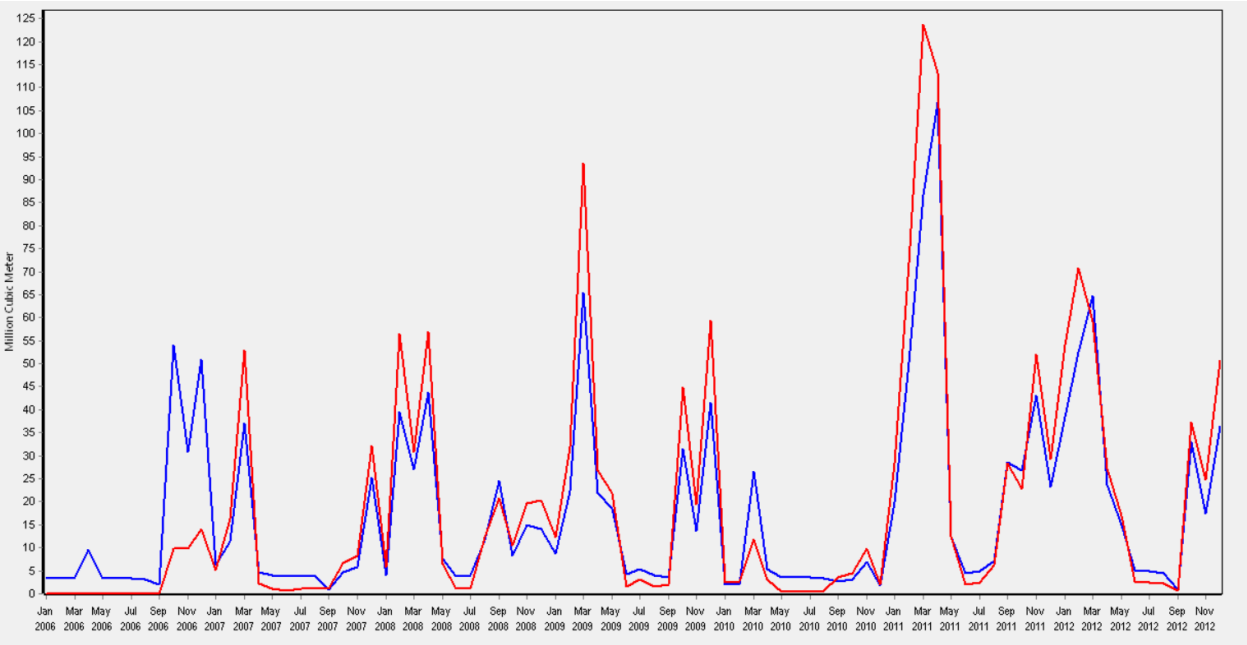
به‌منظور شبیه‌سازی سیستم منابع و مصارف آب حوضه تجن، مدل WEAP به‌عنوان ابزار اصلی تحلیل انتخاب شد. در این راستا، دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ به‌عنوان دوره پایه برای شبیه‌سازی وضعیت موجود و انجام واسنجی مدل در نظر گرفته شد و ماه اکتبر به‌عنوان آغاز سال آبی تعریف گردید. پس از تعیین بازه زمانی، شماتیک حوضه شامل اجزای اصلی منابع آب و مصارف مختلف طراحی شد. منابع آب دربرگیرنده رودخانه‌ها، منابع آب زیرزمینی و سد شهید رجایی بوده و بخش‌های مصرف شامل شرب و بهداشت شهری و روستایی، نیاز زیست‌محیطی، صنعت و کشاورزی در مدل لحاظ گردیدند.

در فرآیند تخصیص آب، اولویت تأمین نیازها به‌ترتیب به مصارف شرب و بهداشت، زیست‌محیطی، صنعت و در نهایت کشاورزی اختصاص داده شد که این اولویت‌بندی با توجه به ملاحظات مدیریتی و سیاست‌های رایج تخصیص منابع آب انجام گرفت. همچنین، میزان جریان‌های برگشتی ناشی از هر یک از مصارف، متناسب با نوع مصرف، به منابع آب سطحی و زیرزمینی اعمال شد. مقادیر جریان‌های ورودی و خروجی بین اجزای مختلف حوضه نیز بر اساس آمار آبدهی طبیعی ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و مطابق با گزارش DSS وارد مدل WEAP گردید.

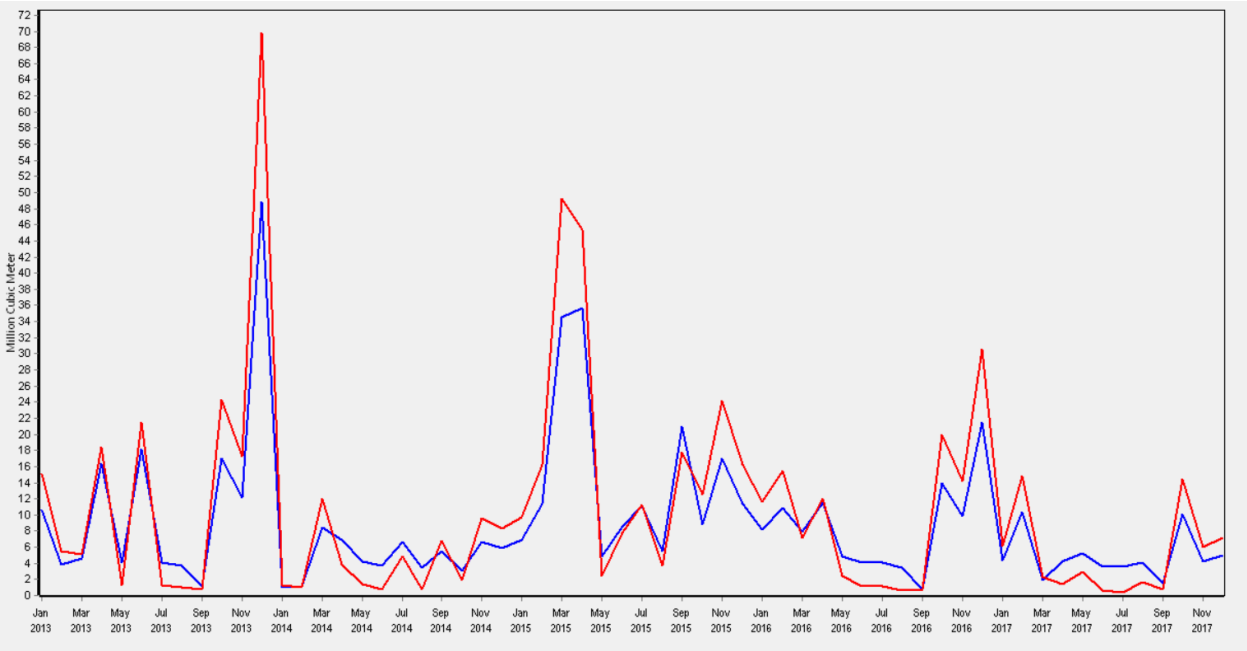
واسنجی مدل WEAP

در این تحقیق، به‌منظور اطمینان از قابلیت مدل WEAP در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه تجن، فرآیند واسنجی مدل برای یک دوره شش‌ساله (۲۰۰۶–۲۰۱۲) بر اساس داده‌های دبی ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه (ایستگاه کردخیل) انجام شد. تابع هدف واسنجی به‌گونه‌ای تعریف گردید که درصد خطای دبی شبیه‌سازی‌شده نسبت به مقادیر مشاهداتی در بازه زمانی مورد مطالعه در محدوده قابل قبول قرار گیرد.

در فرآیند واسنجی، با انجام تنظیمات پارامترهای مؤثر و به‌کارگیری روش سعی و خطا، در نهایت تطابق مناسبی بین مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده در بالادست ایستگاه مطالعاتی و داده‌های مشاهداتی ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری حاصل شد. پس از اتمام مرحله واسنجی، به‌منظور ارزیابی توان پیش‌بینی مدل، مرحله اعتبارسنجی برای دو سال پایانی دوره شبیه‌سازی (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) انجام گرفت. در این مرحله، دبی‌های محاسباتی مدل با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد که نتایج آن در شکل ۴-۱۶ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۲ دبی مشاهداتی و محاسباتی در مرحله واسنجی در مدل WEAP



شکل ۴-۱۳ دبی مشاهداتی و محاسباتی در مرحله صحت‌سنجی در مدل WEAP

نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل WEAP برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۷-۴ ارائه شده است. مقدار ضریب نش–ساتکلیف (NSE) در مرحله واسنجی برابر با ۰/۸۳ و در مرحله صحت‌سنجی برابر با ۰/۸۶ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین دبی‌های شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهداتی می‌باشد. همچنین مقادیر ضریب تعیین (R^2) به‌ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۰/۹۶ بوده که بیانگر توان بالای مدل در بازتولید تغییرات زمانی دبی جریان در ایستگاه خروجی حوضه است.

مقدار خطای میانگین مربعات (RMSE) در مرحله واسنجی برابر با ۱۱ و در مرحله صحت‌سنجی برابر با ۴/۸ می‌باشد که کاهش مقدار RMSE در مرحله صحت‌سنجی نسبت به واسنجی، حاکی از پایداری و قابلیت پیش‌بینی مناسب مدل در دوره مستقل از واسنجی است. به‌طور کلی، مقادیر شاخص‌های ارزیابی نشان می‌دهد که مدل WEAP از دقت و کارایی قابل قبولی در شبیه‌سازی دبی خروجی حوضه تجن برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای تحلیل سناریوهای مدیریتی و تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۴-۸ مقادیر شاخص ارزیابی عملکرد مدل WEAP

مرحله	NSE	R^2	RMSE
واسنجی	۰/۸۳	۰/۸۵	۱۱
صحت‌سنجی	۰/۸۶	۰/۹۶	۴/۸

برآورد و تحلیل نیاز آبی

برآورد دقیق نیاز آب بخش‌های مختلف مصرف، یکی از مراحل اساسی در مدلسازی سیستم‌های منابع آب و پیش‌نیاز تحلیل کمبود، پوشش تقاضا و ارزیابی عملکرد مدیریتی حوضه به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، نیاز آبی حوضه تجن با استفاده از قابلیت‌های مدل WEAP و بر اساس اطلاعات جمعیتی، الگوی مصرف، سطح زیر کشت و نیازهای زیست‌محیطی برآورد شد. نیاز آب برای بخش‌های مختلف شامل شرب و بهداشت شهری و روستایی، کشاورزی، صنعت و نیاز زیست‌محیطی به‌صورت ماهانه در دوره شبیه‌سازی محاسبه و در مدل اعمال گردید.

نتایج حاصل از این بخش، ضمن ارائه تصویری جامع از وضعیت تقاضای آب در حوضه، امکان شناسایی سهم هر یک از بخش‌های مصرف در نیاز کل آب و بررسی تغییرات زمانی نیاز آب را فراهم می‌سازد. همچنین، تحلیل نیاز آب مبنای ارزیابی میزان تأمین تقاضا، بروز کمبود آب و بررسی شاخص‌های اطمینان‌پذیری، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری سیستم منابع آب در مراحل بعدی مطالعه خواهد بود.

جدول ۴-۹ نشان‌دهنده تغییرات ماهانه نیاز آب بخش‌های مختلف مصرف در حوضه تجن است. تحلیل این داده‌ها نشان می‌دهد که بخش کشاورزی سهم غالب و تعیین‌کننده نیاز کل حوضه را تشکیل می‌دهد و بیشترین مصرف آن در ماه‌های فروردین تا تیر رخ می‌دهد؛ این دوره همزمان با دوره رشد محصولات کشاورزی و نیاز شدید به آبیاری است و به‌عنوان نقاط بحرانی سیستم منابع آب محسوب می‌شود. بخش روستایی دارای تغییرات فصلی قابل توجهی است و بیشترین مصرف آن در تابستان (تیر و مرداد) مشاهده می‌شود، در حالی که مصرف آن در زمستان کاهش می‌یابد. مصرف آب شهری نسبتاً ثابت و کم‌حجم است و سهم اندکی از کل نیاز حوضه دارد، اما به دلیل اهمیت تأمین شرب و بهداشت، همواره اولویت بالایی دارد. بخش صنعت نیز مصرف نسبتاً پایدار و کم‌تغییر دارد و نقش محدودی در تعیین پیک تقاضا و نقاط بحرانی کل حوضه ایفا می‌کند.

در مجموع، مصرف بخش کشاورزی ماهیت فصلی و غالب دارد و ماه‌های اردیبهشت تا تیر بیشترین فشار بر منابع آب را ایجاد می‌کنند. بخش‌های شهری و صنعتی سهم ثابتی دارند و بخش روستایی با الگوی فصلی مشخص اهمیت خود را نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل پایه‌ای برای ارزیابی شاخص‌های پوشش تقاضا، کمبود آب، اطمینان‌پذیری و تاب‌آوری سیستم منابع آب در حوضه تجن و طراحی سناریوهای مدیریتی و تغییر اقلیم فراهم می‌سازد.

تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که بخش کشاورزی با سهم تقریبی ۷۵٪ از کل نیاز آب حوضه، اصلی‌ترین مصرف‌کننده است و رفتار آن کاملاً فصلی است؛ مصرف در ماه‌های مهر تا اسفند تقریباً صفر است و از فروردین شروع به افزایش می‌کند، به‌طوری که ماه‌های اردیبهشت، خرداد و تیر بیش از ۶۰٪ مصرف سالانه این بخش را تشکیل می‌دهند و نقاط بحرانی سیستم منابع آب به شمار می‌آیند. بخش روستایی سهم متوسطی (حدود ۱۵–۲۰٪) دارد و مصرف آن در تابستان افزایش می‌یابد، به ویژه در تیر و مرداد که بیشترین فشار را بر منابع ایجاد می‌کند، در حالی که در پاییز و زمستان کاهش می‌یابد. بخش‌های شهری و صنعتی سهم کمی از کل مصرف حوضه>) ۵٪ (دارند و تغییرات فصلی آن‌ها محدود است؛ با این حال تأمین آب شهری و صنعتی به دلیل اهمیت شرب و فعالیت اقتصادی باید همیشه اولویت داشته باشد. در مجموع، مصرف کل حوضه در اردیبهشت تا تیر به بیشترین مقدار خود می‌رسد که ناشی از اوج مصرف کشاورزی است. این تحلیل عددی و درصدی نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب حوضه باید بر کنترل و بهینه‌سازی مصرف کشاورزی و آماده‌سازی ذخایر در ماه‌های پیک تمرکز داشته باشد، در حالی که بخش‌های روستایی، شهری و صنعتی نقش تکمیلی و ثانویه در فشار بر منابع ایفا می‌کنند.

جدول ۴-۹ تغییرات ماهانه نیاز آب بخش‌های مختلف مصرف در حوضه تجن (میلیون متر مکعب)

تقاضا	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
روستا	۱/۸۵	۱/۴۴	۱/۳۳	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۶۴	۱/۵۴	۱/۵۴	۱/۸۵	۲/۲۶	۲/۳۶
شهر	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
صنعت	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶
کشاورزی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۴/۹۸	۱۶۱/۲۲	۱۴۲/۱۷	۱۶۵/۴۸	۱۱۴/۷۳	۵/۶۳

برآورد و تحلیل نیاز آبی تامین نشده

در این بخش، میزان نیاز آب مصرفی که توسط منابع موجود قابل تأمین نبوده است، برآورد می‌شود. هدف شناسایی بخش‌ها و ماه‌هایی است که با کمبود آب مواجه هستند و تعیین فشارهای احتمالی بر منابع آب و مدیریت مصرف در حوضه تجن می‌باشد. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که تمام نیاز آبی تأمین نشده حوضه تجن به بخش کشاورزی تعلق دارد و مجموع کمبود این بخش در طول سال حدود ۴,۷۸۹ میلیون مترمکعب است. بخش‌های شهری، صنعتی و روستایی هیچ کمبودی ندارند و منابع موجود قادر به تأمین نیاز آن‌ها بوده است، بنابراین مدیریت منابع آب باید تمرکز ویژه‌ای بر بخش کشاورزی داشته باشد. الگوی ماهانه کمبود آب کاملاً فصلی است. در ماه‌های مهر تا فروردین کمبود تقریباً صفر است، اما با آغاز فصل گرم و نیاز به آبیاری، از اردیبهشت شروع به افزایش می‌کند. بیشترین کمبود در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد مشاهده می‌شود که بیش از ۶۵ درصد کل نیاز آبی تأمین نشده بخش کشاورزی را تشکیل می‌دهند و این ماه‌ها به عنوان ماه‌های بحرانی و پرتقاضا شناخته می‌شوند. شهریور نیز با کاهش کمبود همراه است، در حالی که در پاییز و زمستان کمبود قابل توجهی وجود ندارد. ماه‌های اردیبهشت تا مرداد به عنوان ماه‌های بحرانی و پرتقاضا در بخش کشاورزی شناسایی شده‌اند و مدیریت منابع آب حوضه تجن باید تمرکز ویژه‌ای بر این دوره‌ها داشته باشد.

بررسی نتایج مدل WEAP نشان می‌دهد که نیاز آبی تأمین‌نشده در حوضه تجن به‌طور کامل مربوط به بخش کشاورزی است و سایر بخش‌های مصرف شامل شهری، روستایی و صنعتی در دوره مورد مطالعه با کمبود آب مواجه نبوده‌اند. بیشترین میزان نیاز آبی تأمین‌نشده در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد مشاهده می‌شود، به‌طوری که ماه‌های اردیبهشت تا مرداد بیش از ۹۰ درصد کل کمبود سالانه بخش کشاورزی را به خود اختصاص می‌دهند.

اوج کمبود در ماه‌های اردیبهشت (۱۱۶۲ میلیون مترمکعب) و تیر (۱۱۶۴ میلیون مترمکعب) رخ داده است که همزمان با دوره اوج آبیاری محصولات کشاورزی و کاهش نسبی منابع در دسترس است. در ماه شهریور میزان کمبود به‌طور محسوسی کاهش یافته و به حدود ۲۴ میلیون مترمکعب می‌رسد که نشان‌دهنده پایان تدریجی فصل زراعی است. تمرکز کامل نیاز آبی تأمین‌نشده در بخش کشاورزی نشان می‌دهد که سیستم منابع آب حوضه تجن از نظر تأمین نیازهای شرب، صنعتی و روستایی دارای عملکرد قابل قبول است، اما در مواجهه با تقاضای بالای کشاورزی، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال، با محدودیت جدی مواجه می‌شود. این نتایج ضرورت توجه به مدیریت تقاضای آب کشاورزی، افزایش بهره‌وری آبیاری، اصلاح الگوی کشت و استفاده بهینه از ذخایر موجود را برجسته می‌کند. استفاده بهینه از ذخیره‌سازی، برنامه‌ریزی دقیق آبیاری و اولویت‌بندی تأمین آب می‌تواند به کاهش فشار بر منابع کمک کند. افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی و بهبود روش‌های آبیاری، نقش کلیدی در کاهش نیاز آبی تأمین نشده دارد و اطمینان‌پذیری و تاب‌آوری سیستم را افزایش می‌دهد. این اقدامات همچنین زمینه مناسبی برای طراحی سناریوهای مدیریتی و مقابله با تغییر اقلیم فراهم می‌کنند و اثرات منفی کمبود آب بر دیگر بخش‌ها و محیط زیست را کاهش می‌دهند. در جدول ۴-۱۰ نیاز آبی تأمین‌نشده ماهانه بخش‌های مختلف مصرف در حوضه تجن ارائه گردیده است.

جدول ۴-۱۰ نیاز آبی تأمین‌نشده ماهانه بخش‌های مختلف مصرف در حوضه تجن بر اساس مدلWEAP (میلیون متر مکعب)

تقاضا	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
روستا	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
شهر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
صنعت	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کشاورزی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۴۰/۳۴	۱۱۶۲/۳۹	۱۰۱۰/۷۶	۱۱۶۳/۷۱	۶۸۶/۷۷	۲۴/۳۸

تحلیل اطمینان‌پذیری (Reliability) سیستم منابع آب

این تحلیل توانایی سیستم منابع آب را در تأمین نیازهای مختلف مصرفی در طول زمان مورد ارزیابی قرار می‌دهد. اطمینان‌پذیری نشان‌دهنده درصد موفقیت سیستم در پاسخگویی به تقاضاها و نقاط ضعف احتمالی آن است. نتایج تحلیل اطمینان‌پذیری سیستم منابع آب حوضه تجن نشان می‌دهد که عملکرد سیستم در تأمین نیازهای بخش‌های مختلف مصرف یکنواخت نبوده و تفاوت قابل توجهی میان بخش کشاورزی و سایر مصارف وجود دارد. اطمینان‌پذیری بخش کشاورزی حدود ۵۲٫۰۸ درصد برآورد شده است که بیانگر آن است که در حدود نیمی از دوره زمانی مورد بررسی، سیستم قادر به تأمین کامل نیاز آبی این بخش نبوده است. این مقدار نسبتاً پایین، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای بخش کشاورزی در برابر کمبود منابع آب، به‌ویژه در ماه‌های گرم و پرتقاضا است. در مقابل، بخش شهری با اطمینان‌پذیری حدود ۹۷٫۹۲ درصد عملکرد بسیار مطلوبی داشته و تنها در تعداد محدودی از ماه‌ها با کاهش جزئی در تأمین نیاز مواجه بوده است. این موضوع نشان‌دهنده موفقیت سیاست اولویت‌بندی تأمین آب شرب در مدل WEAP و پایداری نسبی سیستم در پاسخگویی به نیازهای حیاتی انسانی است. همچنین، بخش‌های صنعتی و روستایی با اطمینان‌پذیری ۱۰۰ درصد در تمام دوره مورد مطالعه، بدون هیچ‌گونه کمبود آب تأمین شده‌اند که حاکی از کفایت منابع تخصیص‌یافته به این مصارف است. به‌طور کلی، نتایج تحلیل اطمینان‌پذیری نشان می‌دهد که چالش اصلی سیستم منابع آب حوضه تجن در بخش کشاورزی متمرکز است، در حالی که سایر بخش‌های مصرف از سطح اطمینان‌پذیری بالا و قابل قبولی برخوردارند. این یافته‌ها با نتایج تحلیل نیاز آبی تأمین‌نشده و پوشش تقاضا هم‌راستا بوده و بر ضرورت اتخاذ راهکارهای مدیریتی نظیر افزایش بهره‌وری مصرف آب کشاورزی، اصلاح الگوی کشت و مدیریت تقاضا در دوره‌های بحرانی تأکید می‌کند. این نتایج همچنین مبنای مناسبی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم و ارزیابی پایداری منابع آب در مواجهه با تغییر اقلیم فراهم می‌سازد. جدول ۴-۱۱ مقادیر اطمینان‌پذیری (Reliability) سیستم منابع آب حوضه تجن برای بخش‌های مختلف مصرف را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۱ مقادیر اطمینان‌پذیری (Reliability) سیستم منابع آب حوضه تجن برای بخش‌های مختلف مصرف

تقاضا	سناریو مرجع
روستا	۱۰۰
شهر	۹۷/۹۲
صنعت	۱۰۰
کشاورزی	۵۲/۰۸

تحلیل پوشش تقاضا(Demand Coverage)

در این بخش، درصد تأمین نیاز بخش‌های مصرفی مختلف بررسی می‌شود. تحلیل پوشش تقاضا نشان می‌دهد که سیستم تا چه حد قادر است تقاضای آب روستایی، شهری، صنعتی و کشاورزی را برآورده کند و نقاط کمبود احتمالی را مشخص می‌سازد. نتایج تحلیل پوشش تقاضا نشان می‌دهد که عملکرد سیستم منابع آب حوضه تجن از نظر تأمین نیازهای شهری، روستایی و صنعتی در اغلب ماه‌های سال بسیار مطلوب است. پوشش تقاضای این بخش‌ها تقریباً در تمام ماه‌ها نزدیک به ۱۰۰ درصد بوده و تنها در بخش شهری، کاهش جزئی پوشش در ماه‌های خرداد و تیر مشاهده می‌شود که به ترتیب به حدود ۹۸٫۸۶ و ۹۴٫۸۳ درصد می‌رسد. با این حال، این کاهش محدود بوده و نشان‌دهنده پایداری سیستم در تأمین نیازهای شرب و مصارف حیاتی است. در مقابل، بخش کشاورزی دارای نوسانات قابل توجهی در پوشش تقاضا است. در ماه‌های مهر تا اسفند و همچنین دی تا اسفند، پوشش تقاضای کشاورزی برابر با ۱۰۰ درصد بوده که نشان‌دهنده عدم وجود کمبود آب در دوره رکود فعالیت‌های زراعی است. با شروع فصل زراعی، پوشش تقاضا از فروردین به بعد به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. کمترین میزان پوشش تقاضای کشاورزی در ماه‌های اردیبهشت، خرداد و تیر مشاهده می‌شود، به‌طوری که مقدار آن در این ماه‌ها به حدود ۴۲ تا ۴۶ درصد کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که در دوره اوج مصرف آب کشاورزی، بیش از نیمی از نیاز آبی این بخش تأمین نمی‌شود و فشار اصلی کمبود آب متوجه فعالیت‌های کشاورزی است. در ماه مرداد پوشش تقاضا به حدود ۵۰ درصد افزایش یافته و در شهریور نیز روند بهبود ادامه پیدا می‌کند که همزمان با کاهش تدریجی نیاز آبی محصولات است. به‌طور کلی، نتایج تحلیل پوشش تقاضا نشان می‌دهد که سیستم منابع آب حوضه تجن از نظر تأمین نیازهای شرب، صنعتی و روستایی دارای اطمینان‌پذیری بالا است، اما در مواجهه با تقاضای بالای کشاورزی در ماه‌های گرم سال با محدودیت جدی روبه‌رو می‌شود. این یافته‌ها بر ضرورت مدیریت تقاضای آب کشاورزی، اصلاح الگوی کشت، افزایش بهره‌وری آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق در ماه‌های بحرانی تأکید می‌کند و ارتباط مستقیمی با نتایج تحلیل نیاز آبی تأمین‌نشده و شاخص‌های اطمینان‌پذیری و تاب‌آوری سیستم دارد. در جدول ۴-۱۱ درصد پوشش تقاضای ماهانه بخش‌های مختلف مصرف در حوضه تجن ارائه گردیده است. همچنین در نمودار ۴-۱۴ درصد پوشش تقاضای ماهانه بخش‌های مختلف مصرف نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۱ درصد پوشش تقاضای ماهانه بخش‌های مختلف مصرف در حوضه تجن بر اساس مدل WEAP

تقاضا	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
روستا	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
شهر	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸/۸۶	۹۴/۸۳	۹۹/۲۵	۱۰۰
صنعت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
کشاورزی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۶/۸۸	۴۰/۸۴	۴۲/۰۱	۴۲/۱۶	۵۰/۹۶	۵۱/۹۲

نمودار ۴-۱۴ درصد پوشش تقاضای ماهانه بخش‌های مختلف مصرف در حوضه تجن بر اساس مدل WEAP

تحلیل جریان زیست‌محیطی(Environmental Flow)

این تحلیل میزان آب مورد نیاز برای حفظ کیفیت اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و حمایت از حیات آبزیان را مورد بررسی قرار می‌دهد. جریان زیست‌محیطی نقش مهمی در ارزیابی تأثیر مدیریت منابع آب بر محیط زیست و پایداری اکوسیستم حوضه دارد. در این بخش، نتایج تحلیل سیستم منابع آب حوضه تجن با استفاده از مدل WEAP بررسی می‌شود. شاخص‌های مورد مطالعه شامل کمبود آب، نیاز آبی تأمین نشده،جریان زیست‌محیطی، درصد پوشش و اطمینان‌پذیری (Reliability) هستند. نتایج عددی این شاخص‌ها در جدول ۴-۱۲ ارائه شده است. تحلیل سیستم منابع آب حوضه تجن با استفاده از مدل WEAP نشان می‌دهد که توانایی سیستم در تأمین نیازهای مختلف مصرف‌کنندگان و اکوسیستم‌ها متفاوت است. بررسی شاخص‌های کمبود آب، نیاز آبی تأمین نشده، جریان زیست‌محیطی، درصد پوشش و اطمینان‌پذیری (Reliability) نشان می‌دهد که بخش کشاورزی بیشترین سهم از کمبود آب را دارد و در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد با کاهش شدید پوشش تقاضا مواجه است، در حالی که بخش‌های شهری، صنعتی و روستایی تقریباً با درصد پوشش ٪۱۰۰ تأمین می‌شوند. جریان زیست‌محیطی پایین‌دست سد شهید رجایی (Req1) با درصد پوشش ۹۱٫۶۷ تا ٪۱۰۰ و اطمینان‌پذیری ٪۹۶٫۵۳ تأمین می‌شود و فشار محدودی بر اکوسیستم پایین‌دست (Req2) وارد می‌شود، اما جریان زیست‌محیطی انتهای حوضه در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور تنها ۳۹–٪۵۶ تأمین شده و اطمینان‌پذیری آن ٪۵۵٫۵۶ است که نشان‌دهنده تنش شدید اکولوژیک و تأثیر محدودیت منابع آب بر این بخش از حوضه است. ماه‌های بحرانی همزمان با اوج برداشت آب کشاورزی هستند و فشار همزمان بر منابع آب سیستم، هم بخش کشاورزی و هم اکوسیستم انتهای حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این نتایج ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب، اولویت‌بندی مناسب تأمین نیازهای زیست‌محیطی، اصلاح الگوی کشت و زمان‌بندی برداشت آب، و استفاده از سناریوهای بهره‌وری و تغییر اقلیم را نشان می‌دهد تا تاب‌آوری سیستم افزایش یافته و کمبود آب و فشار اکولوژیک کاهش یابد.

جدول ۴-۱۲ شاخص‌های منابع آب و جریان زیست‌محیطی حوضه تجن شامل نیاز زیست‌محیطی ، نیاز آبی تأمین نشده، درصد پوشش و اطمینان‌پذیری (میلیون متر مکعب و درصد)

شاخص	نیاز زیست‌محیطی		نیاز آبی تأمین نشده		درصد پوشش		اطمینان‌پذیری	
	Req1	Req2	Req1	Req2	Req1	Req2	Req1	Req2
ماه								
مهر	۱/۶۸	۳/۶۴	۰	۰/۰۸	۱۰۰	۹۷/۶۷		
آبان	۱/۶۲	۳/۵۳	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰		
آذر	۱/۶۸	۳/۶۴	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰		
دی	۱/۶۸	۳/۶۴	۰	۰/۳۶	۱۰۰	۹۰/۲۵		
بهمن	۱/۵۳	۳/۳۲	۰	۰/۲۸	۱۰۰	۹۱/۵۶		
اسفند	۱/۶۸	۳/۶۴	۰	۰/۱۴	۱۰۰	۹۶/۱۷		
فروردین	۴/۸۹	۱۰/۵۷	۰	۱/۸۵	۱۰۰	۸۲/۴۷		
اردیبهشت	۵/۰۵	۱۰/۹۲	۰/۴۲	۴/۷۱	۹۱/۶۷	۵۶/۸۵		
خرداد	۵/۰۵	۱۰/۵۷	۰/۴۱	۵/۶۸	۹۱/۶۷	۴۶/۲۲		
تیر	۵/۰۵	۱۰/۹۲	۰/۴۲	۵/۹۳	۹۱/۶۷	۴۵/۷۱		
مرداد	۵/۰۵	۱۰/۹۲	۰/۴۲	۶/۱۴	۹۱/۶۷	۴۳/۷۸		
شهریور	۴/۸۹	۱۰/۵۷	۰/۴۱	۶/۳۵	۹۱/۶۴	۳۹/۹۳		
مرجع							۹۶/۵۳	۵۵/۵۶

مدلسازی تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه تجن با استفاده از مدل WEAP

در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب سطحی و عملکرد سد شهید رجایی، از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو GFDL-ESM4 استفاده شد. تحلیل بر اساس سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 صورت گرفت تا اثرات تغییرات آتی اقلیمی با شدت‌های متفاوت بر دبی رودخانه‌ها، نیازهای آبی بخش‌های مصرف و جریان زیست‌محیطی ارزیابی گردد. همچنین، برای سه دوره آینده شامل ۲۰۳۰–۲۰۴۰، ۲۰۴۱–۲۰۵۰ و ۲۰۵۱–۲۰۶۰، تغییرات احتمالی منابع آب و عملکرد سد شبیه‌سازی شد. نتایج این سناریوها امکان شناسایی ماه‌ها و بخش‌های حساس به تغییرات آب و هوایی و طراحی سیاست‌های مدیریتی بهینه جهت افزایش تاب‌آوری سیستم منابع آب را فراهم می‌آورد.

تأثیر تغییر اقلیم بر نیازهای آبی بخش‌های مصرف

در این بخش، اثرات تغییر اقلیم بر تأمین آب بخش کشاورزی، شهری، صنعتی و روستایی بررسی می‌شود. تحلیل شامل بررسی تغییرات در درصد پوشش تقاضا، میزان کمبود آب و توزیع ماهانه نیازها است تا مشخص شود کدام بخش‌ها در هر سناریو و دوره زمانی بیشترین آسیب‌پذیری را دارند.

تحلیل یکپارچه تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی تأمین‌نشده بخش‌های مختلف مصرف

به‌منظور ارزیابی اثر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر عملکرد سیستم منابع آب حوضه تجن، تغییرات نیاز آبی تأمین‌نشده برای بخش‌های کشاورزی، شهری، روستایی و صنعتی تحت سناریوهای SSP1-2.6 ، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و مقایسه با دوره مرجع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل‌ها در جدول ۴- ۱۳ و ۴-۱۴ ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که بخش کشاورزی بیشترین سهم از کمبود آب را در تمامی سناریوها به خود اختصاص می‌دهد .در دوره مرجع، مجموع نیاز آبی تأمین‌نشده کشاورزی) مجموع دو زیرحوضه agri in و (agri out برابر با 403.55میلیون مترمکعب بوده است. این مقدار تحت سناریوی SSP1-2.6 به حدود 355.05میلیون مترمکعب، در سناریوی SSP2-4.5 به 348.02میلیون مترمکعب و در سناریوی SSP5-8.5 به 365.71میلیون مترمکعب کاهش یافته است. این کاهش نسبی کمبود در سناریوهای اقلیمی، به‌ویژه در سناریوی خوش‌بینانهSSP1-2.6 ، می‌تواند ناشی از تغییر الگوی زمانی رواناب‌ها و افزایش نسبی جریان‌های فصلی در دوره آبیاری باشد، هرچند همچنان مقادیر کمبود قابل‌توجه باقی مانده است. از نظر توزیع زمانی، کمبود آب کشاورزی عمدتاً در ماه‌های فروردین تا شهریور متمرکز است که هم‌زمان با دوره اوج نیاز آبی محصولات زراعی می‌باشد. بیشترین مقدار کمبود در تمامی سناریوها مربوط به ماه‌های اردیبهشت، خرداد و تیر است که نشان‌دهنده فشار بالای تقاضای آبی در این دوره و محدودیت ظرفیت تأمین منابع آب سطحی به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم است. در مقابل، بخش شهری که داده‌های آن بر حسب هزار مترمکعب ارائه شده است، در دوره مرجع دارای کمبود سالانه‌ای معادل 4.81هزار مترمکعب بوده که نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم در تأمین آب شرب است. تحت سناریوهای تغییر اقلیم، کمبود آب شهری به‌طور محسوسی کاهش یافته و به مقادیری ناچیز (کمتر از ۰.۱ هزار مترمکعب در سال) محدود شده است. این موضوع بیانگر اولویت بالای تأمین آب شرب در ساختار تخصیص مدل WEAP و تاب‌آوری مناسب این بخش در برابر تغییرات اقلیمی می‌باشد. در بخش‌های روستایی و صنعتی، نتایج نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها، از جمله دوره مرجع، هیچ‌گونه کمبود آبی ثبت نشده است .این امر حاکی از آن است که نیاز آبی این بخش‌ها در مقایسه با ظرفیت منابع موجود و سیاست‌های تخصیص آب، به‌طور کامل تأمین شده و تغییر اقلیم

تأثیر معناداری بر تأمین آب این بخش‌ها نداشته است. به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که تغییر اقلیم بیشترین تأثیر خود را بر بخش کشاورزی اعمال می‌کند و حتی در سناریوهای خوش‌بینانه نیز کمبود آب این بخش به‌طور کامل برطرف نمی‌شود. این موضوع ضرورت بازنگری در الگوی کشت، افزایش بهره‌وری مصرف آب، و اتخاذ راهکارهای مدیریتی تطبیقی را در شرایط آینده اقلیمی حوضه تجن بیش از پیش آشکار می‌سازد، در حالی که بخش‌های شرب و صنعت از پایداری و اطمینان‌پذیری بالاتری برخوردار هستند.

جدول ۴-۱۳ نیاز آبی تأمین نشده بخش کشاورزی در ماه‌های مختلف برای سناریوهای تغییر اقلیم (میلیون متر مکعب)

شاخص	نیاز آبی تأمین نشده			
سناریو	Reference	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
ماه	۰	۰	۰	۰
مهر	۰	۰	۰	۰
آبان	۰	۰	۰	۰
آذر	۰	۰	۰	۰
دی	۰	۰	۰	۰
بهمن	۰	۰	۰	۰
اسفند	۰	۰	۰	۰
فروردین	۶۸/۶۱	۴۶/۱۵	۳۵/۸۶	۴۸/۹۷
اردیبهشت	۹۶/۵۱	۷۹/۹۳	۷۸/۸۸	۸۳/۴۳
خرداد	۸۳/۴۸	۷۷/۰۹	۷۸/۲۹	۷۷/۸۶
تیر	۹۶/۰۵	۹۵/۶۶	۹۵/۹۳	۹۶/۴۳
مرداد	۵۶/۱۸	۵۶/۵۳	۵۶/۳۶	۵۶/۳
شهریور	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱

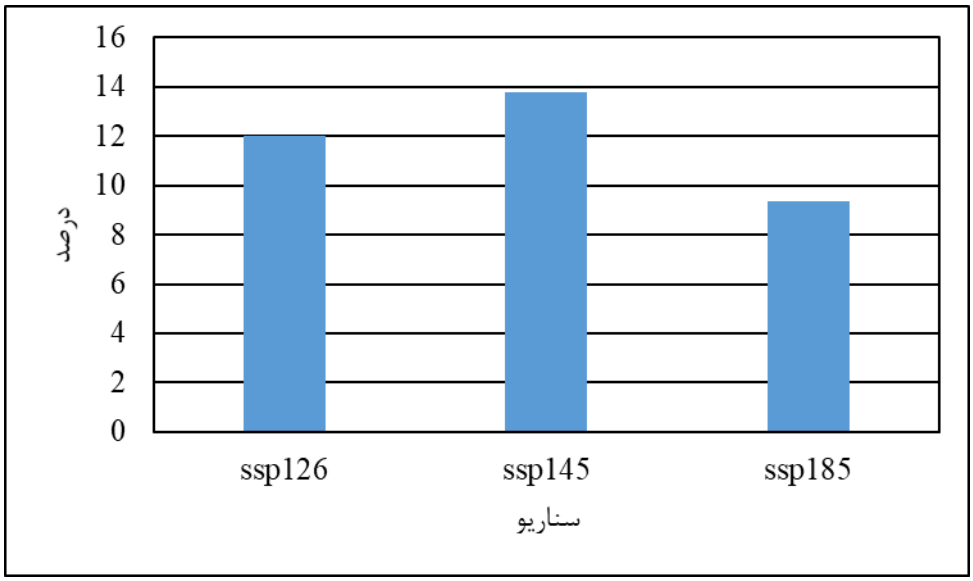
جدول ۴-۱۴ نیاز آبی تأمین نشده بخش شهری در ماه‌های مختلف برای سناریوهای تغییر اقلیم (هزار متر مکعب)

شاخص	نیاز آبی تأمین نشده			
سناریو	Reference	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
ماه				
مهر	۰/۴۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
آبان	۰/۳۲	۰	۰	۰
آذر	۰/۲۹	۰	۰	۰
دی	۰/۲۳	۰	۰	۰
بهمن	۰/۲۹	۰	۰	۰
اسفند	۰/۴۲	۰	۰	۰
فروردین	۰/۳۳	۰	۰	۰
اردیبهشت	۰/۳۱	۰	۰	۰
خرداد	۰/۴۶	۰	۰	۰

تیر	۰/۵۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
مرداد	۰/۵۷	۰	۰/۰۱	۰/۰۱
شهریور	۰/۶۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱

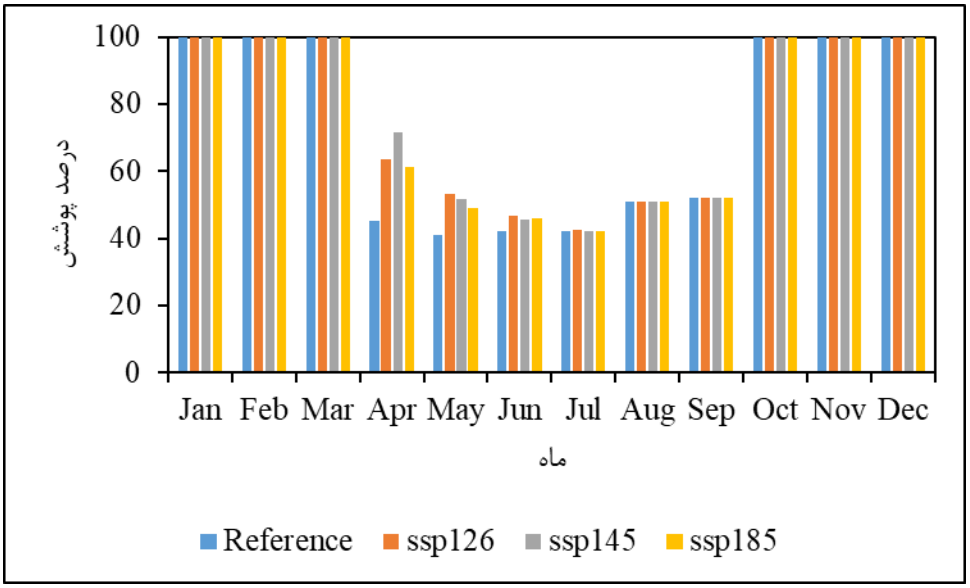
همچنین نتایج نشان می‌دهد (شکل ۴-۱۵) که بخش کشاورزی بیشترین فشار کمبود آب را دارد و حتی در سناریوهای خوش‌بینانه نیز بخشی از تقاضای آبی تأمین نشده باقی می‌ماند. مقادیر سالانه کمبود کشاورزی در سناریوهای مختلف به شرح زیر است Reference: 403.55 :میلیون مترمکعب، SSP1-2.6: 355.05میلیون مترمکعب (کاهش ۱۲٪)، SSP2-4.5: 348.02میلیون مترمکعب (کاهش ۱۴٪)، SSP5-8.5: 365.71میلیون مترمکعب (کاهش ۹٪). کمبود عمدتاً در ماه‌های فروردین تا شهریور مشاهده می‌شود، هم‌زمان با اوج نیاز آبی محصولات زراعی. بخش شهری در دوره مرجع کمبود سالانه‌ای برابر با ۴.۸۱ هزار مترمکعب داشته و تحت سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر ناچیز 0.1> (هزار مترمکعب) کاهش یافته است، که نشان‌دهنده تاب‌آوری بالای سیستم در تأمین شرب است. بخش‌های روستایی و صنعتی هیچ کمبودی نداشته و تغییر اقلیم اثر معناداری بر آن‌ها نداشته است.

بنابراین، سناریوهای تغییر اقلیم بیشترین اثر خود را بر بخش کشاورزی اعمال می‌کنند، و حتی در سناریوهای خوش‌بینانه نیز نیاز به اقدامات مدیریتی و سازگاری با شرایط آینده احساس می‌شود .پیامدهای مدیریتی شامل اصلاح الگوی کشت، افزایش بهره‌وری آبیاری و تخصیص منابع با اولویت تأمین شرب و صنعت است.

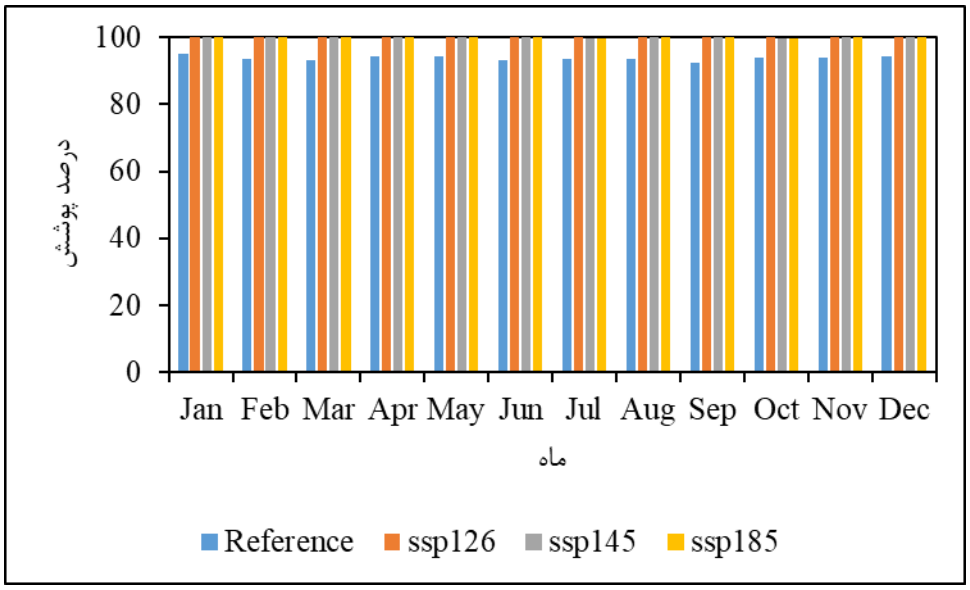


نمودار ۴-۱۵ درصدی کمبود آب کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم

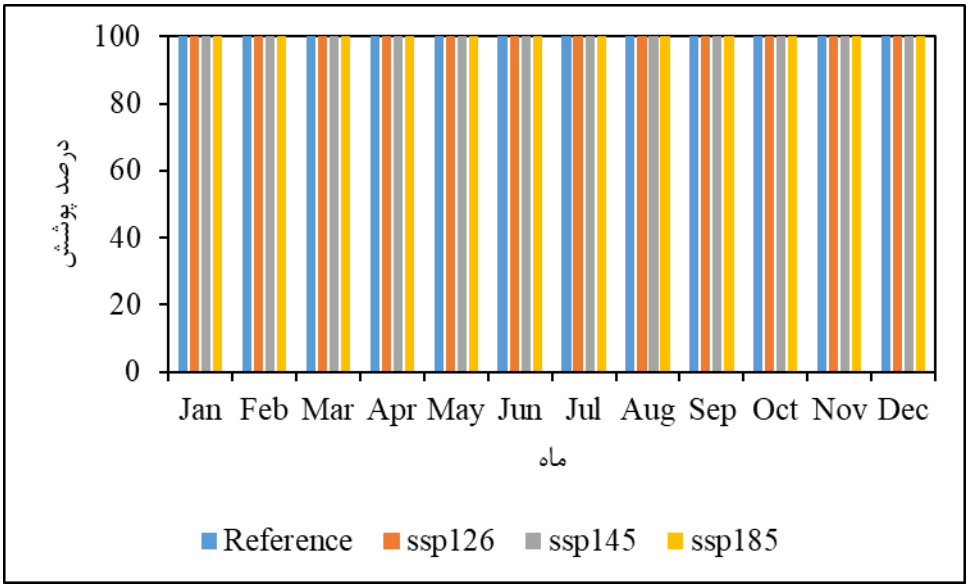
در این مطالعه، درصد پوشش تقاضای بخش‌های کشاورزی، شهری، روستایی و صنعت در حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیمSSP1-2.6 ، SSP2-4.5و SSP5-8.5 با دوره مرجع مقایسه شد تا تأثیر تغییرات اقلیمی بر تأمین آب مشخص شود. نتایج نشان داد که بخش روستایی و صنعتی در تمامی ماه‌های سال و تحت تمام سناریوها ٪100درصد پوشش تقاضا دارند. این امر بیانگر پایداری کامل و تاب‌آوری بالا این بخش‌ها در برابر تغییرات منابع آب است و نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر آنها ندارد. از نظر مدیریتی، حفظ وضعیت موجود و مدیریت نگهداری منابع برای استمرار تأمین کافی آب کافی خواهد بود. در بخش شهری، درصد پوشش تقاضا در دوره مرجع بین ٪92.5تا ٪۹۴.۹ قرار داشت که بیانگر کمبود جزئی در برخی ماه‌ها بود. با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، درصد پوشش نزدیک به ٪100شد. این افزایش نشان می‌دهد که بخش شهری با ظرفیت موجود می‌تواند نیازهای آبی خود را در شرایط تغییر اقلیم تأمین کند و از تاب‌آوری مناسبی برخوردار است. بخش کشاورزی بیشترین آسیب‌پذیری را نشان داد. در دوره مرجع، درصد پوشش در ماه‌های اوج مصرف (فروردین تا شهریور) بین ٪40تا ٪۵۲ بود و سناریوهای تغییر اقلیم، بسته به شدت سناریو، این مقدار را بین ٪41تا ٪۷۱ تغییر دادند. بهبود جزئی در سناریوهای معتدل SSP1-2.6) و (SSP2-4.5 و کاهش جزئی در سناریوی شدیدتر SSP5-8.5مشاهده شد. ماه‌های غیر اوج، درصد پوشش ٪۱۰۰ بود، بنابراین کمبود آب عمدتاً در فصل رشد و اوج آبیاری رخ می‌دهد. این وضعیت نشان می‌دهد که بخش کشاورزی آسیب‌پذیرترین بخش حوضه است و نیازمند مدیریت هدفمند آب، اصلاح روش‌های آبیاری و انتخاب کشت‌های کم‌آب‌بر است. مقایسه بین بخش‌ها نشان می‌دهد که کشاورزی تنها بخشی است که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی دچار کمبود قابل توجه می‌شود، در حالی که بخش‌های شهری، روستایی و صنعتی تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند. این تحلیل تأکید می‌کند که برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب آینده باید تمرکز ویژه بر تأمین آب کشاورزی و مدیریت کمبود در ماه‌های اوج مصرف داشته باشد تا تاب‌آوری کلی سیستم حفظ شود. نمودارهای ۴-۱۶ تا ۴-۱۸ مرتبط با روند ماهانه برای نمایش مقایسه بین بخش‌ها و سناریوهای تغییر اقلیم ترسیم شده‌اند.



نمودار ۴-۱۶ درصد پوشش تقاضای آب بخش کشاورزی در حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم



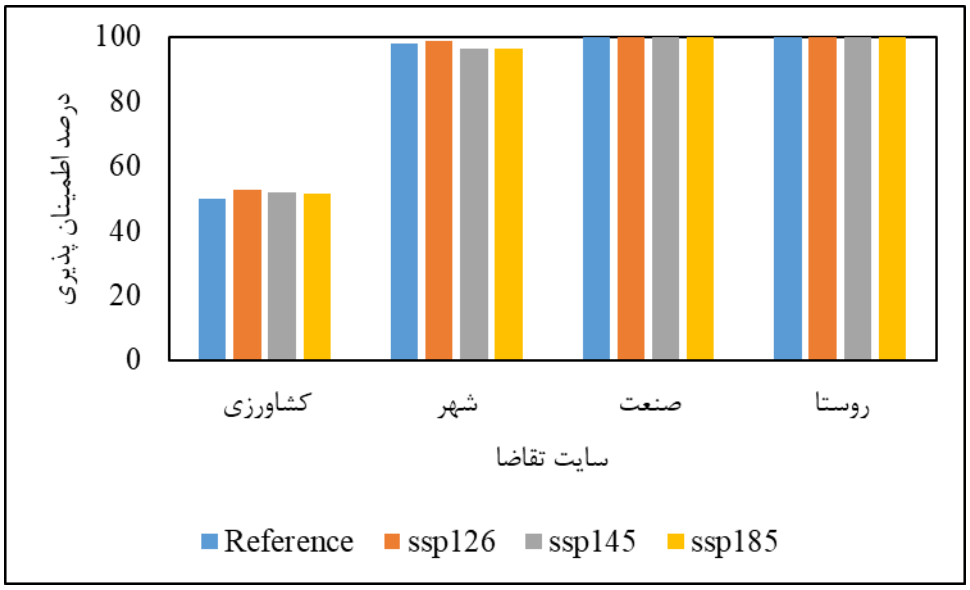
نمودار ۴-۱۷ درصد پوشش تقاضای آب بخش شهری در حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم



نمودار ۴-۱۸ درصد پوشش تقاضای آب بخش روستا و صنعت در حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم

اطمینان‌پذیری سیستم منابع آب، توانایی تأمین نیازهای بخش‌های مختلف مصرفی را نشان می‌دهد و یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم است. نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های مختلف حوضه تحت سناریوهای تغییر اقلیمSSP1-2.6 ، SSP2-4.5وSSP5-8.5 ، رفتار متفاوتی از نظر تأمین پایدار آب دارند. در بخش کشاورزی، اطمینان‌پذیری در دوره مرجع حدود ٪50است، که نشان‌دهنده کمبود قابل توجه منابع آب برای تأمین نیازهای این بخش در ماه‌های اوج مصرف می‌باشد. با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، این شاخص تغییر جزئی داشت؛ در سناریوی معتدل SSP1-2.6 به ٪52.56، در SSP2-4.5 به ٪52.15و در سناریوی شدیدتر SSP5-8.5 به ٪51.75رسید. این نتایج نشان می‌دهد که کشاورزی همچنان آسیب‌پذیر است و مدیریت هدفمند منابع آب، بهینه‌سازی روش‌های آبیاری و برنامه‌ریزی ذخیره‌سازی آب برای افزایش اطمینان‌پذیری ضروری است. در مقابل، بخش شهری در دوره مرجع اطمینان‌پذیری بالای ٪97.92داشته و تحت سناریوهای تغییر اقلیم بین ٪96.5تا ٪۹۸.۶۶ قرار گرفت. این امر نشان می‌دهد که تأمین آب شهری با ظرفیت موجود تقریباً کامل و پایدار است و تغییرات اقلیمی تأثیر منفی قابل توجهی بر آن ندارد. همچنین، بخش‌های روستایی و صنعتی در تمامی سناریوها اطمینان‌پذیری ٪100دارند، به این معنی که نیازهای آبی این بخش‌ها همواره تأمین می‌شوند و سیستم منابع آب در برابر تغییرات اقلیمی دارای تاب‌آوری بسیار بالا است. مقایسه بین بخش‌ها نشان می‌دهد که کشاورزی تنها بخشی است که با کمبود و نوسانات اطمینان‌پذیری مواجه است، در حالی که سایر بخش‌ها پایدار و مقاوم هستند. بنابراین از منظر مدیریتی، تمرکز اصلی باید روی افزایش اطمینان‌پذیری بخش کشاورزی باشد، به‌ویژه در ماه‌های

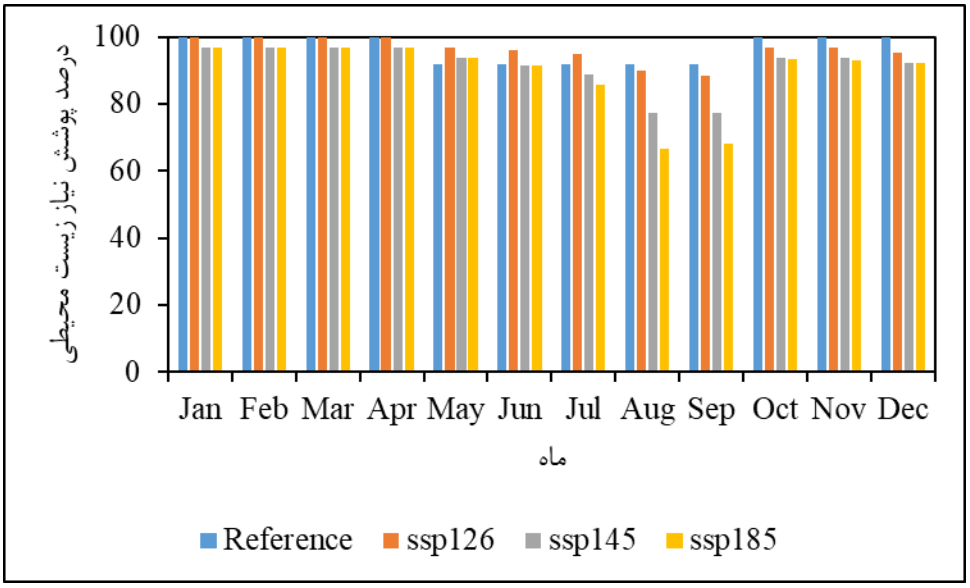
اوج مصرف و شرایط تغییر اقلیم شدید، تا تاب‌آوری کل سیستم حفظ شود. در نمودار ۴-۱۹ مقایسه بین بخش‌ها و سناریوهای مختلف مرتبط اطمینان‌پذیری سیستم منابع آب با ارائه گردیده است.



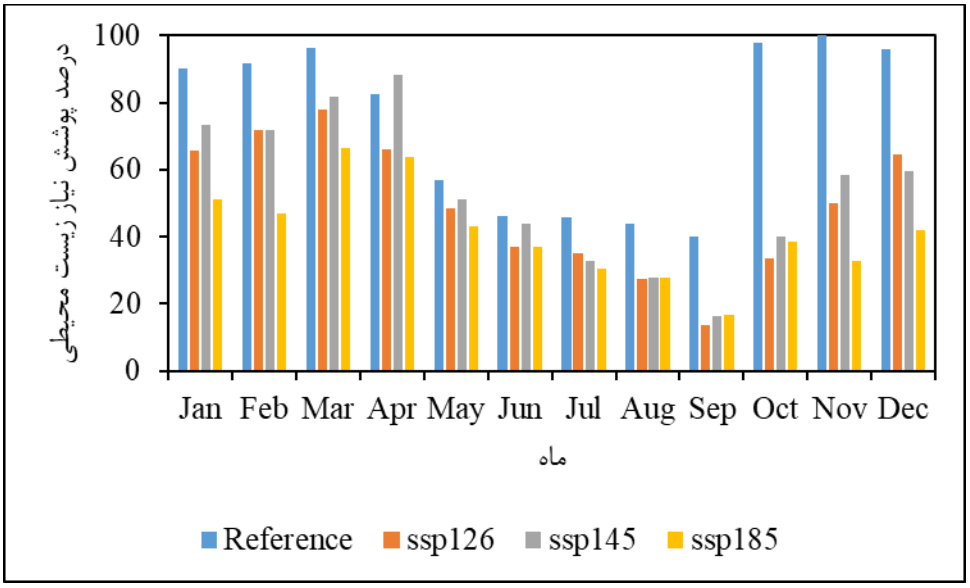
نمودار ۴-۱۹ درصد اطمینان پذیری سایت‌های تقاضای آب در حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم

تأثیر تغییر اقلیم بر جریان زیست‌محیطی

تغییرات اقلیمی می‌تواند فشار قابل توجهی بر جریان‌های زیست‌محیطی پایین‌دست سد و انتهای حوضه وارد کند. در این بخش، درصد پوشش و اطمینان‌پذیری جریان زیست‌محیطی تحت هر سناریو مورد بررسی قرار گرفته تا اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های آبی شناسایی شود. جریان زیست‌محیطی یکی از مؤلفه‌های حیاتی برای حفظ اکوسیستم‌های آبی حوضه و تالاب‌های پایین‌دست است و درصد پوشش جریان نشان‌دهنده توانایی سیستم در تأمین حداقل نیازهای اکولوژیکی می‌باشد. نتایج حاصل از مدل WEAP نشان می‌دهد که وضعیت جریان زیست‌محیطی در دو موقعیت کلیدی حوضه، یعنی پایین‌دست سد شهید رجایی و انتهای حوضه تجن، تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیمSSP1-2.6 ، SSP2-4.5و SSP5-8.5 تفاوت قابل توجهی دارد. در پایین‌دست سد شهید رجایی، درصد پوشش جریان زیست‌محیطی در دوره مرجع نزدیک به ۱۰۰٪ بوده و کمترین مقدار در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور حدود ۹۱.۷٪ است. با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، درصد پوشش جریان کاهش جزئی نشان داده و بسته به شدت سناریو، حداقل مقادیر در ماه‌های تابستان بین ۶۶.۶٪ تا ۹۶.۸٪ قرار گرفت. این نشان می‌دهد که جریان زیست‌محیطی پایین‌دست سد نسبتاً پایدار باقی می‌ماند و تاب‌آوری اکوسیستم‌های پایین‌دست سد در برابر تغییرات اقلیمی نسبتاً بالاست، هرچند در ماه‌های گرم و خشک کاهش جریان مشاهده می‌شود که ممکن است اثراتی بر اکوسیستم‌های وابسته داشته باشد. در مقابل، در انتهای حوضه تجن، درصد پوشش جریان زیست‌محیطی در دوره مرجع پایین‌تر بوده و حتی در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور به حدود ۳۹.۹٪ کاهش می‌یابد، که بیانگر کمبود طبیعی جریان در این بخش حوضه است. تحت سناریوهایSSP1-2.6 ، SSP2-4.5وSSP5-8.5 ، درصد پوشش جریان به شدت کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که در سناریوی شدیدترSSP5-8.5 ، این مقدار در ماه‌های اوج تابستان و پاییز به ۱۶.۹٪ تا ۵۱.۲٪ رسید. این کاهش شدید نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای اکوسیستم‌های آبی انتهای حوضه در مواجهه با تغییرات اقلیمی است و تأکید می‌کند که مدیریت جریان زیست‌محیطی و تخصیص آب ذخیره شده از سدها برای تأمین حداقل جریان اکولوژیکی در این بخش ضروری می‌باشد. پیامدهای مدیریتی این تحلیل نشان می‌دهد که اکوسیستم‌های پایین‌دست سد شهید رجایی به دلیل تاب‌آوری نسبی، کمتر در معرض خطر کاهش جریان هستند، اما اکوسیستم‌های انتهای حوضه بسیار آسیب‌پذیر بوده و نیازمند سیاست‌های مدیریت هدفمند از جمله برنامه‌ریزی ذخیره‌سازی، تخصیص جریان حداقلی و حفاظت اکولوژیکی می‌باشند. این نتایج بیانگر اهمیت توجه ویژه به انتهای حوضه در برنامه‌ریزی‌های منابع آب تحت شرایط تغییر اقلیم است. نمودارهای ۴-۲۰ و ۴-۲۱ به ترتیب درصد پوشش نیاز زیست محیطی پایین دست سد شهید رجایی و انتهایی حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم را نشان می‌دهد.

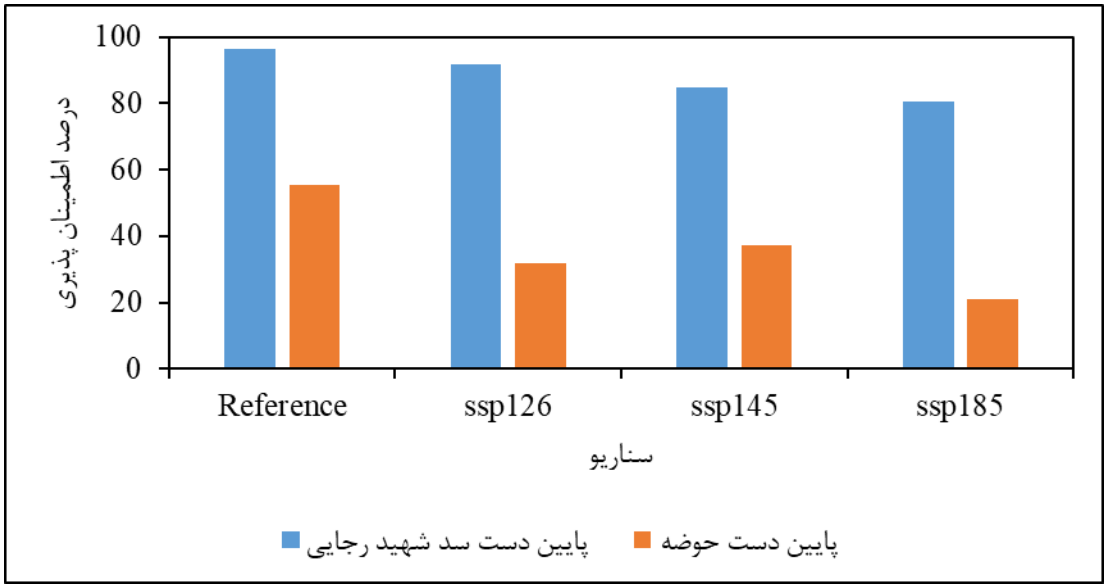


نمودار ۴-۲۰ درصد پوشش نیاز زیست محیطی پایین دست سد شهید رجایی در حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم



نمودار ۴-۲۱ درصد پوشش نیاز زیست محیطی انتهای حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم

در پایین‌دست سد شهید رجایی، درصد پوشش جریان زیست‌محیطی در دوره مرجع نزدیک به ۱۰۰٪ بوده و اطمینان‌پذیری جریان حدود ۹۶.۵٪ است که بیانگر تأمین مناسب حداقل نیاز اکولوژیکی می‌باشد. با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، درصد پوشش جریان کاهش جزئی نشان می‌دهد؛ به‌طوری که حداقل مقادیر در ماه‌های تابستان بین ۶۶.۶٪ تا ۹۶.۸٪ قرار گرفته و اطمینان‌پذیری نیز به ۸۰.۶۵٪ در شدیدترین سناریو SSP5-8.5 کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که جریان زیست‌محیطی پایین‌دست سد شهید رجایی نسبتاً پایدار و تاب‌آور است، اما در ماه‌های خشک و گرم، کاهش جریان ممکن است بر اکوسیستم‌های وابسته اثرگذار باشد. در مقابل، در انتهای حوضه تجن، درصد پوشش جریان زیست‌محیطی در دوره مرجع پایین‌تر و بین ۳۹.۹٪ تا ۱۰۰٪ متغیر است و اطمینان‌پذیری جریان تنها ۵۵.۵۶٪ می‌باشد، که بیانگر کمبود طبیعی جریان در این بخش است. تحت سناریوهای تغییر اقلیم، درصد پوشش جریان به شدت کاهش یافته و در سناریوی شدید SSP5-8.5 به محدوده ۱۶.۸۵٪ تا ۵۱.۲٪ می‌رسد، در حالی که اطمینان‌پذیری جریان به ۲۰.۹۷٪ کاهش می‌یابد. این کاهش شدید، آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های انتهای حوضه را در مواجهه با تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد و تأکید می‌کند که مدیریت جریان زیست‌محیطی، تخصیص حداقل جریان از سدها و حفاظت اکولوژیکی در این بخش ضروری است. مقایسه دو موقعیت حوضه بیانگر آن است که پایین‌دست سد شهید رجایی از تاب‌آوری نسبی برخوردار است و حتی در شدیدترین سناریو بیش از ۸۰٪ اطمینان‌پذیری حفظ می‌شود، در حالی که اکوسیستم‌های انتهای حوضه بسیار آسیب‌پذیر بوده و در شرایط تغییر اقلیم شدید، اطمینان‌پذیری به کمتر از ۲۵٪ می‌رسد. این نتایج اهمیت تمرکز مدیریتی ویژه بر انتهای حوضه برای حفظ جریان زیست‌محیطی و کاهش ریسک تهدید اکوسیستم‌ها را نشان می‌دهد. نمودار ۴-۲۲ درصد اطمینان‌پذیری نیاز زیست محیطی پایین دست سد شهید رجایی و انتهایی حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم را نشان می‌دهد.



نمودار ۴-۲۲ درصد اطمینان‌پذیری نیاز زیست محیطی پایین‌دست سد شهید رجایی و انتهای حوضه تجن تحت سناریوهای تغییر اقلیم

فصل نتیجه گیری

نتیجه‌گیری کلی از تحلیل تغییر اقلیم برای پارامترهای اقلیمی

بر اساس تحلیل داده‌های اقلیمی حاصل از سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ایSSP2.6 ، SSP4.5، SSP8.5 و مقایسه آن با دوره پایه، نتایج زیر به‌صورت موردی قابل ارائه است:

بارش

- میانگین سالانه بارش در تمامی سناریوها و دوره‌های آینده کاهش یافته است.
- بیشترین کاهش در سناریوی SSP8.5 و دوره ۲۰۳۰–۲۰۴۰ مشاهده شد (حدود ۱۸.۳ درصد).
- کاهش بارش در فصل تابستان نسبت به سایر فصول شدیدتر بوده و می‌تواند خطر خشکسالی تابستانه را افزایش دهد.
- در فصل زمستان، گاهی افزایش‌های موضعی بارش مشاهده شده، اما این افزایش‌ها محدود و غیرپایدار هستند.
- روند کلی کاهش بارش می‌تواند منابع آب سطحی و زیرزمینی را در معرض فشار بیشتری قرار دهد.

دمای حداکثر

- دمای حداکثر سالانه در تمام دوره‌های آتی و تحت هر سه سناریو افزایش نشان داده است.
- میانگین افزایش دمای حداکثر در سناریوی SSP8.5 در دوره ۲۰۵۱–۲۰۶۰ به بیش از ۱۲.۷ درصد رسید.
- افزایش دمای حداکثر به‌ویژه در ماه‌های گرم سال (تیر تا شهریور) شدیدتر بوده و می‌تواند منجر به تشدید پدیده‌های موج گرما و افزایش تبخیر شود.
- این روند افزایشی می‌تواند پیامدهایی همچون افزایش مصرف انرژی برای سرمایش، کاهش بهره‌وری محصولات زراعی و آسیب به سلامت انسان داشته باشد.

دمای حداقل

- دمای حداقل نیز در تمامی سناریوها و دوره‌های زمانی آینده روند افزایشی داشته است.

- سناریوی شدید SSP8.5 در دوره ۲۰۵۱–۲۰۶۰ بیشترین افزایش دمای حداقل را با بیش از ۱۶ درصد نسبت به دوره پایه ثبت کرده است.
- افزایش دمای حداقل در فصل زمستان می‌تواند منجر به کاهش تعداد روزهای یخبندان و افزایش دمای شبانه شود.
- این تغییر می‌تواند بر دوره رشد گیاهان، ذوب برف‌ها و انتشار آفات تاثیرگذار باشد.

جمع‌بندی نهایی:

روند کلی تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه حاکی از کاهش بارش و افزایش دما (حداکثر و حداقل) است که می‌تواند اثرات متقابل و پیچیده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست و سلامت انسان داشته باشد .شدت این تغییرات در سناریوی SSP8.5 به‌مراتب بیشتر است و می‌تواند هشداردهنده باشد. بنابراین، برنامه‌ریزی‌های سازگار با تغییر اقلیم، پایش مستمر و تدوین راهبردهای سازگاری و کاهش مخاطرات اقلیمی ضروری به‌نظر می‌رسد.

دبی

تحلیل پیش‌بینی دبی رودخانه دبی برای دوره‌های ۲۰۳۰–۲۰۶۰ تحت سه سناریوی تغییر اقلیمSSP1-2.6 ، SSP2-4.5و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر جریان رودخانه دارد. در دوره ابتدایی (۲۰۳۰–۲۰۴۰)، میانگین سالانه دبی در SSP2-4.5 بیشترین مقدار و در SSP5-8.5 کمترین مقدار را داشته است و الگوهای فصلی مشابه داده‌های مشاهداتی باقی مانده‌اند؛ بیشینه جریان در زمستان و اوایل بهار و کمینه در تابستان مشاهده شد.

در دوره میانی (۲۰۴۱–۲۰۵۰)، میانگین سالانه دبی در تمامی سناریوها افزایش یافته و تابستان‌های خشک همچنان قابل توجه هستند. نوسانات فصلی در SSP2-4.5 بیشتر شده و SSP5-8.5 تابستان‌های خشک‌تر را نشان می‌دهد، که اهمیت مدیریت منابع آب و ذخیره‌سازی برای مقابله با نوسانات فصلی را برجسته می‌کند.

در دوره انتهایی (۲۰۵۱–۲۰۶۰)، میانگین سالانه دبی کاهش یافته و فشار بر منابع آب در ماه‌های گرم شدیدتر شده است. تابستان‌های خشک‌تر و کاهش جریان در SSP5-8.5 و SSP2-4.5 تأکید بر ضرورت برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت مصرف آب و مقابله با کم‌آبی دارد.

مقایسه دوره‌ها نشان می‌دهد که دوره میانی بیشترین جریان سالانه را دارد، اما در دوره انتهایی کاهش قابل توجه جریان و شدت گرفتن تابستان‌های خشک مشهود است. سناریوی SSP5-8.5 همواره بیشترین فشار را بر منابع آب وارد می‌کند، در حالی که SSP2-4.5 بیشترین نوسانات فصلی را نشان می‌دهد. به طور کلی، این نتایج بر اهمیت مدیریت فعال منابع آب، ذخیره‌سازی و برنامه‌ریزی دقیق برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی بر جریان رودخانه تأکید دارند و می‌توانند راهنمایی ارزشمند برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب باشند.

تحلیل جامع مدلسازی WEAP برای حوضه تجن

در این مطالعه، مدل WEAPبه منظور شبیه‌سازی مدیریت منابع آب حوضه تجن و بررسی پاسخ سیستم در برابر تغییرات اقلیمی و الگوهای مصرف آب توسعه یافت. مدل شامل بخش‌های کشاورزی، شهری، صنعتی و روستایی بود و داده‌های ورودی شامل دبی رودخانه‌ها، ذخایر سدها، نیاز آبی بخش‌های مصرف‌کننده، تبخیر و بارش ماهانه بود. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌هایNSE ، R^2و RMSE انجام شد و نتایج نشان داد که مدل دقت قابل قبولی در بازتولید جریان‌های تاریخی و تأمین نیازهای آبی حوضه دارد.

تحلیل نیاز آب تأمین نشده نشان داد که بخش‌های شهری، صنعتی و روستایی تقریباً بدون کمبود باقی می‌مانند، در حالی که کشاورزی بیشترین میزان تأمین نشده را دارد. مجموع کمبود آب کشاورزی در دوره مرجع حدود ۴,۷۸۸ میلیون متر مکعب بود و ماه‌های اردیبهشت تا شهریور بیشترین کمبود را تجربه می‌کنند. این بخش بیشترین آسیب‌پذیری را در مواجهه با کم‌آبی دارد و نیازمند مدیریت بهینه و اولویت‌بندی منابع آب است.

تحلیل درصد پوشش تقاضا نیز نشان داد که بخش‌های شهری و صنعتی تقریباً ۱۰۰٪ نیازهای خود را تأمین می‌کنند و بخش روستایی نیز کاملاً تأمین می‌شود. اما بخش کشاورزی در ماه‌های گرم و خشک درصد پوشش پایین‌تری دارد که نشان‌دهنده محدودیت منابع و رقابت بین مصارف مختلف آب است. با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، درصد پوشش تقاضای کشاورزی در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد افزایش نسبی یا کاهش جزئی نشان می‌دهد که مدیریت انعطاف‌پذیر و زمان‌بندی تأمین آب اهمیت بالایی دارد.

تحلیل اطمینان‌پذیری سیستم (Reliability) نشان داد که بخش‌های شهری، صنعتی و روستایی حوضه تاب‌آوری بالایی دارند، اما اطمینان‌پذیری تأمین آب کشاورزی حدود ۵۰–۵۲٪ باقی می‌ماند که نشان‌دهنده نیاز به سیاست‌های مدیریت ریسک و بهینه‌سازی تخصیص منابع است. همچنین اطمینان‌پذیری جریان زیست‌محیطی در پایین‌دست سد شهید رجایی بالای ۸۰٪ حفظ می‌شود، اما در انتهای حوضه تجن تحت سناریوهای شدید

تغییر اقلیم به کمتر از ۲۵٪ کاهش می‌یابد. این کاهش، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های انتهای حوضه محسوب می‌شود.

در تحلیل تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم، نتایج نشان داد که سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بیشترین اثر را بر کاهش جریان زیست‌محیطی و افزایش کمبود آب در بخش کشاورزی دارند. بخش شهری و صنعتی تقریباً تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار نمی‌گیرند و درصد پوشش تقاضای آنها نزدیک به ۱۰۰٪ باقی می‌ماند. این تفاوت نشان‌دهنده تاب‌آوری طبیعی این بخش‌ها و آسیب‌پذیری بالای کشاورزی و اکوسیستم‌های انتهای حوضه است.

به طور خلاصه، مدلسازی WEAP برای حوضه تجن نشان داد که:

کشاورزی و جریان زیست‌محیطی انتهای حوضه آسیب‌پذیرترین بخش‌ها در برابر تغییرات اقلیمی هستند.

بخش‌های شهری، روستایی و صنعتی دارای تاب‌آوری بالایی بوده و تقریباً تأمین آب آن‌ها همواره تضمین شده است.

مدیریت منابع آب باید بر تأمین حداقل جریان زیست‌محیطی و اولویت‌بندی تخصیص به کشاورزی در ماه‌های کم‌آبی تمرکز کند.

سناریوهای شدید تغییر اقلیم، کاهش اطمینان‌پذیری و درصد پوشش تقاضا را نشان می‌دهند که ضرورت اتخاذ سیاست‌های ذخیره‌سازی، بهینه‌سازی مصرف و کاهش اتلاف آب را برجسته می‌کند.

در نتیجه، مدل WEAP ابزار مناسبی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب در حوضه تجن محسوب می‌شود و می‌تواند پایه‌ای برای تدوین استراتژی‌های توسعه پایدار و حفاظت از اکوسیستم‌ها باشد.

نتیجه‌گیری: اثر تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه تجن

تحلیل نتایج مدل WEAP نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی در دوره‌های آینده (۲۰۳۰–۲۰۴۰، ۲۰۴۱–۲۰۵۰ و ۲۰۵۱–۲۰۶۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6 ، SSP2-4.5و SSP5-8.5 تأثیر قابل توجهی بر تقاضای آب بخش‌های مختلف، تأمین آب و جریان زیست‌محیطی حوضه تجن خواهد داشت.

در بخش **مصرف شهری و روستایی**، تأثیر تغییر اقلیم بر نیازهای تأمین نشده تقریباً ناچیز است و درصد پوشش تقاضا در همه سناریوها نزدیک ۱۰۰٪ باقی می‌ماند. بخش **صنعت** نیز تحت همه سناریوها بدون کمبود باقی می‌ماند و اطمینان‌پذیری آن ۱۰۰٪ است. این نشان‌دهنده تاب‌آوری بالای بخش‌های شهری، روستایی و صنعتی در مواجهه با تغییرات اقلیمی است و تأکید می‌کند که اولویت مدیریتی باید به بخش‌های آسیب‌پذیرتر اختصاص یابد.

در مقابل، بخش **کشاورزی** بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که درصد پوشش تقاضای کشاورزی تحت سناریوهای شدیدتر تغییر اقلیم در ماه‌های گرم و خشک به کمتر از ۴۲٪ می‌رسد، در حالی که در سناریوی مرجع حدود ۴۵–۵۰٪ بوده است. مجموع کمبود آب کشاورزی در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب حدود ۳۵۵ و ۳۶۶ میلیون متر مکعب است، که کاهش قابل توجهی نسبت به دوره مرجع (۴۰۳ میلیون متر مکعب) را نشان می‌دهد. اطمینان‌پذیری تأمین آب کشاورزی نیز کاهش اندکی دارد، ولی همچنان حدود ۵۱–۵۲٪ باقی می‌ماند، که بیانگر نیاز به مدیریت بهینه منابع آب و برنامه‌ریزی دقیق در تأمین نیازهای کشاورزی در شرایط آینده است.

اثر تغییر اقلیم بر **جریان زیست‌محیطی** حوضه، به ویژه در **انتهای حوضه تجن** بسیار شدید است. درصد پوشش جریان زیست‌محیطی در سناریوهای شدید کاهش یافته و اطمینان‌پذیری جریان در SSP5-8.5 تنها به حدود ۲۱٪ می‌رسد، در حالی که در پایین‌دست سد شهید رجایی این شاخص از ۹۶٪ دوره مرجع به ۸۱٪ کاهش می‌یابد. این تفاوت نشان‌دهنده آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های انتهای حوضه نسبت به کاهش جریان و لزوم اتخاذ سیاست‌های مدیریتی ویژه برای حفاظت از محیط زیست است.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که:

۱. بخش‌های شهری، روستایی و صنعتی حوضه تاب‌آوری بالایی در برابر تغییرات اقلیمی دارند.

۲. کشاورزی و اکوسیستم‌های انتهای حوضه آسیب‌پذیرترین بخش‌ها هستند و تحت سناریوهای شدید، تأمین آب و جریان زیست‌محیطی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۳. مدیریت منابع آب باید با تمرکز بر تأمین جریان زیست‌محیطی و پشتیبانی از کشاورزی در ماه‌های خشک و گرم، برنامه‌ریزی شود.

٤. استفاده از ذخیره‌سازی، بهینه‌سازی تخصیص آب و سیاست‌های کاهش مصرف می‌تواند تاب‌آوری حوضه را در مواجهه با تغییرات اقلیمی افزایش دهد.

در نتیجه، اثرات تغییر اقلیم بر حوضه تجن، به ویژه بر **کشاورزی و جریان زیست‌محیطی انتهای حوضه**، بسیار ملموس است و برنامه‌ریزی بلندمدت برای **توسعه پایدار منابع آب و حفاظت از اکوسیستم‌ها** امری ضروری است.