

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده عمران

گروه مهندسی آب و محیط‌زیست

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی سناریوهای تخصیص منابع آب در شرایط تغییر اقلیم

(مطالعه موردی: حوضه آبریز سد لتیان)

پژمان یاوری

اساتید راهنما

دکتر سعید گلیان

دکتر امید بزرگ حداد

استاد مشاور

دکتر حسین زینی‌وند

شهریور ۱۳۹۴

دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی عمران
گروه مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای پژمان یاوری
تحت عنوان: ارزیابی سناریوهای تخصیص منابع آب در شرایط تغییر اقلیم
(مطالعه موردی: حوضه آبریز سد لتیان)

در تاریخ ۱۳۹۴/۶/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: دکتر حسین زینی وند		نام و نام خانوادگی: دکتر سعید گلیان
			نام و نام خانوادگی: دکتر امید بزرگ حداد

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر مهدی عجمی		نام و نام خانوادگی: دکتر سید فضل الله ساغروانی
			نام و نام خانوادگی: دکتر جعفر یزدی

تقدیم به آنان که:

با هستی خویش، راه را برایم گشودند...

پدرم، به پاس دست‌هایش که فریادرس است و نو میدی در پناهِش به امید می‌گراید

مادرم، به پاس مهرش که عشق را در وجودم پروراند و دامنش سجده‌گاه مهربانی است

برادران و خواهرانم که خورشید محبتشان را غروب‌ی نیست

و با پاس خالصانه از هم‌سرم که حضورش شمع راه من بود، قلم را آرام، ذهنم را پر جوش و انگیزه‌ام را

متعالی کرد...

تقدیم سپاس

سپاس خدایی را که به قلم جان داد تا نوشتن بیاموزم، سپاس پدری را که سایه بلندش را استوار داشت،

سپاس مادری را که آغوش پر مهرش را دریغ نداشت و سپاس استادی را که مرانده خویش ساخت.

امروز که بر شانه گذشتگان ایستاده‌ام و به افق‌های دانش می‌نگرم، بر خود واجب می‌دانم تا از زحمات

تامی عزیزانی که مراد عرصه علم آموزی یاری نمودند تقدیر کنم. ارادت خالصانه من تقدیم به اساتید

کران قدردم جناب آقایان دکتر سعید گلپیان، دکتر امید بزرگ حداد و دکتر حسین زنی و ندکه برادرانه و دلسوزانه

رهنمودهایشان چراغ روشنی در مسیر این پژوهش بود و سپاس ویژه از جناب آقای دکتر حسین رحمتی،

جناب آقای مهندس عرفان ناصری، سرکار خانم دکتر سمانه سیف‌اللمی، جناب آقای دکتر رضا زمانی،

سرکار خانم دکتر پریناسادات آشفته و تامی دوستان عزیز به ویژه آقای مهندس حسین رویگر که با

مشورت‌های ارزنده و حمایت‌های بی‌دریغشان، همواره در کنار بنده بودند و دوستانه و مسؤلاً بنده را مساعدت

فرمودند؛ با تشکر از اداره‌ی آب منطقه‌ای تهران، برویژه جناب آقای مهندس حمیدرضا حسینی،
مدیرعامل اداره‌ی منابع آب شرق استان تهران که در تهیه اطلاعات این پژوهش مرایاری رسانند؛
پنجمین از سایر اساتید محترم گروه مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود از جمله جناب آقای
دکتر احمد احمدی و جناب آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی که علی رغم کمبودها و دشواری‌های موجود، طی
دوران تحصیل این جانب زحمات زیادی جهت ارتقاء سطح علمی دانشجویان این دانشکده کشیدند و از
اساتید فرزانه و دلسوز؛ آقایان دکتر جعفر یزدی و دکتر سید فضل الله ساغروانی که زحمت داوری این پایان-
نامه را متقبل شدند؛ با تقدیر از نماینده محترم تحصیلات تکمیلی، جناب آقای دکتر مهدی عجمی که با سنگینی
این مسؤلیت را پذیرفتند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم و در نهایت برای تمامی این عزیزان آرزوی
تندرستی و توفیق الهی را از دگاه باری تعالی متدعی، مسم.

پشمان یآوری

تعهدنامه

اینجانب **پژمان یآوری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران** - آب دانشکده **مهندسی عمران** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارزیابی سناریوهای تخصیص منابع آب در شرایط تغییر اقلیم در حوضه بالادست سد لتیان** تحت راهنمایی **دکتر سعید گلپان** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج بانام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا یافته های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب و هوا تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر چرخه‌ی هیدرولوژیکی دارد. در این تحقیق، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی حوضه بالادست سد لتیان در دوره‌ی ۲۰۱۰-۲۱۰۰ بررسی شده است. در راستای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب خروجی از ایستگاه آب‌سنجی رودک، مدل HadCM3 انتخاب شد و به کمک مدل LARS-WG تحت سناریوهای اقلیمی A1B، A2 و B1 برای سه دوره‌ی زمانی آینده (۲۰۳۹-۲۰۶۹، ۲۰۴۰-۲۰۷۰) ریزمقیاس گردید. در نهایت نتایج بررسی‌ها حاکی از کاهش متوسط رواناب سالانه در همه‌ی سناریوها و افق‌های زمانی است به‌نحوی که بیشترین کاهش مربوط به سناریوی بدبینانه‌ی A2 در گام زمانی ۲۰۷۰s و کمترین کاهش مربوط به سناریوی B1 در اولین گام زمانی (۲۰۲۰s) می‌باشد. در این حوضه بر اثر تغییر اقلیم، متوسط رواناب ماهانه با افزایش افق زمانی در هر سناریو برای ماه‌های سرد سال (Jun, Feb, Mar و Dec) افزایش و در سایر ماه‌های سال کاهش می‌یابد ولی مشابه متوسط رواناب سالانه به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها، متوسط رواناب ماهانه نیز روند کاهشی دارد. در ادامه‌ی این پژوهش به اجرای مدل WEAP برای شبیه‌سازی تخصیص‌ها در شرایط تغییر اقلیم پرداخته شد و چگونگی تأمین هریک از نیازها و تغییرات ذخیره مخزن سد لتیان در شرایط منابع متغیر و مصارف ثابت بررسی شد. با مقایسه‌ی وضعیت درصد ذخیره‌ی مخزن با درصدهای تأمین برای هرکدام از سناریوها و افق‌های زمانی به علت تغییرات میزان نوسان تأمین‌ها پی خواهیم برد، به‌این ترتیب در ماه‌هایی که مخزن خالی است درصد تأمین نسبت به زمان‌هایی که مخزن دارای حجم ذخیره بالاتری است کمتر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، HadCM3، LARS-WG، WetSpa، تخصیص منابع آب، WEAP

لیست مقالات:

- یاوری، پ.، گلیان، س.، بزرگ حداد، ا.، زینی‌وند، ح.، " آشکارسازی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص - های اقلیمی حدی با استفاده از خروجی‌های ریزمقیاس نمایی مدل LARS-WG"، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و زیرساخت‌های شهری، ۷ و ۸ مردادماه ۱۳۹۴، تبریز.
- یاوری، پ.، گلیان، س.، بزرگ حداد، ا.، زینی‌وند، ح.، " آشکارسازی اثرات تغییر اقلیم بر دما با استفاده از خروجی‌های ریزمقیاس نمایی مدل LARS-WG"، نخستین کنفرانس بین‌المللی محیط زیست و منابع طبیعی، ۱۶ شهریور ۱۳۹۴، شیراز.
- Yavari.P, Golian.S, Zeinivand.H, Bozorg Haddad.O. (2015). **Evaluation of stream flow predictions using WetSpa rainfall-runoff model under climate change scenarios, a case study of. Jajrood watershed, Iran.** Hydrology Research (Submit).

فهرست مطالب

فصل اول) مقدمه و کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت تحقیق ۴

۱-۳- سؤال‌های اساسی تحقیق ۵

۱-۴- فرضیات تحقیق ۵

۱-۵- اهداف ۶

۱-۶- نوآوری‌های تحقیق ۷

۱-۷- معرفی فصل‌های پایان‌نامه ۷

فصل دوم) بررسی منابع ۹

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- بررسی تأثیرات تغییر اقلیم ۱۱

۲-۳- روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و مطالعات مرتبط ۱۴

۲-۴- مدل بارش- رواناب WetSpa ۱۸

۲-۵- مطالعه مدیریت منابع آب و یافتن الگوی بهینه تخصیص ۲۲

فصل سوم) منطقی تحقیق و اطلاعات مورد استفاده ۲۷

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- منطقه مورد مطالعه ۲۸

۳-۳- تغییر اقلیم و اثرات آن ۳۵

۱-۳-۳- مدل‌های AOGCM ۳۶

۲-۳-۳- سناریوهای انتشار ۳۷

فصل چهارم) روش تحقیق ۴۳

۱-۴- مقدمه ۴۳

۲-۴- ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی هوا ۴۴

۱-۲-۴- ساختار مدل LARS-WG 5.5 ۴۵

۲-۲-۴- همگنی و نرمال بودن نتایج مدل لارس ۴۷

۳-۴- عدم قطعیت در تغییر اقلیم ۴۹

۴-۴- شبیه‌سازی بارش-رواناب ۵۰

۱-۴-۴- مدل بارش رواناب WetSpa ۵۱

۱-۱-۴-۴- تشریح مدل WetSpa ۵۲

۲-۱-۴-۴- ورودی‌های مدل WetSpa ۵۷

۳-۱-۴-۴- ساختار مدل WetSpa ۵۸

۴-۱-۴-۴- پارامترهای عمومی ۵۹

۵-۱-۴-۴- خروجی‌های مدل ۶۰

۶-۱-۴-۴- واسنجی و ارزیابی مدل ۶۰

۵-۴- مدل‌سازی تخصیص ۶۵

۱-۵-۴- مدل شبیه‌سازی- WEAP ۶۸

۱-۱-۵-۴- تشریح مدل WEAP ۶۸

۲-۱-۵-۴- فرمولاسیون مدل برنامه‌ریزی خطی ۷۲

۳-۱-۵-۴- الگوریتم محاسباتی ۷۲

۴-۱-۵-۴- رویکرد WEAP ۷۳

فصل پنجم (نتیج) ۷۵

- ۷۶ ۱-۵ مقدمه
- ۷۶ ۲-۵ بررسی اطلاعات اقلیمی منطقه
- ۷۹ ۳-۵ ریزمقیاس نمایی به وسیله مدل اقلیمی لارس و تغییر اقلیم
- ۸۱ ۱-۳-۵ بررسی تغییرات دمای حداکثر
- ۸۳ ۲-۳-۵ بررسی تغییرات دمای حداقل
- ۸۵ ۳-۳-۵ شاخص روزهای بسیار گرم
- ۸۶ ۴-۳-۵ شاخص تعداد روزهای یخبندان
- ۸۷ ۴-۳-۵ شاخص بارش‌های سهمگین
- ۸۸ ۴-۳-۵ شاخص تعداد روزهای خشک سالانه
- ۹۰ ۴-۵ برآورد رواناب با استفاده از مدل WetSpa
- ۹۰ ۲-۴-۵ انتخاب دوره آماری و اجرای مدل
- ۹۰ ۱-۲-۴-۵ واسنجی مدل
- ۹۳ ۲-۲-۴-۵ ارزیابی مدل
- ۹۴ ۲-۲-۴-۵ نتایج حاصل از تعیین مقادیر شاخص‌های کارایی مدل برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی
- ۹۵ ۳-۴-۵ شبیه‌سازی رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم
- ۱۰۱ ۵-۵ تخصیص منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم
- ۱۰۱ ۱-۴-۵ شبیه‌سازی چگونگی تخصیص منابع آب
- ۱۰۲ ۱-۱-۴-۵ درصد تأمین نیازهای منطقه
- ۱۱۶ ۲-۱-۴-۵ تغییرات ذخیره‌ی مخزن سد لتیان
- ۱۱۸ ۶-۵ جمع‌بندی

فصل ششم) نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۱۹

- ۱-۶- مقدمه ۱۲۰
- ۲-۶- بحث پیرامون نتایج حاصل از تحقیق ۱۲۰
- ۱-۲-۶- نتایج مربوط به تغییر اقلیم ۱۲۰
- ۲-۲-۶- نتایج مربوط به مدل سازی بارش-رواناب ۱۲۲
- ۳-۲-۶- نتایج مربوط به تخصیص منابع آب ۱۲۴
- ۳-۶- نتیجه گیری ۱۲۶
- ۴-۶- پیشنهادها ۱۲۷

فهرست منابع ۱۳۱

پیوست ۱۴۳

پیوست الف- نتایج کامل تغییر اقلیم ۱۴۴

- الف-۱- بررسی تغییرات دمای حداکثر ۱۴۴
- الف-۲- بررسی تغییرات دمای حداقل ۱۴۸
- الف-۳- شاخص روزهای بسیار گرم ۱۵۱
- الف-۴- شاخص تعداد روزهای یخبندان ۱۵۲
- الف-۵- شاخص بارش های سهمگین ۱۵۳
- الف-۶- شاخص تعداد روزهای خشک سالانه ۱۵۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۳) - موقعیت حوضه سد لتیان در ایران و نقشه توپوگرافی زیر حوضه بالادست ایستگاه رودک ۲۹
- شکل (۲-۳) - نقشه شیب حوضه جاجرود ۲۹
- شکل (۳-۳) - نقشه کاربری اراضی حوضه جاجرود ۳۰
- شکل (۴-۳) - نقشه بافت خاک حوضه جاجرود ۳۱
- شکل (۵-۳) - پیکربندی سیستم منابع و مصارف سد لتیان ۳۲
- شکل (۶-۳) - نقشه‌ی موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در داخل حوضه آبریز سد لتیان ۳۴
- شکل (۱-۴) - مراحل اجرا و اعتبارسنجی مدل بارش-رواناب ۵۱
- شکل (۲-۴) - ساختار مدل WetSpa ۵۴
- شکل (۳-۴) - تهیه نقشه‌های پارامترهای توزیعی مدل بر اساس سه نقشه پایه (توپوگرافی، کاربری، خاک) ۵۷
- شکل (۴-۴) - ساختار مدل WetSpa در مقیاس پیکسل ۵۸
- شکل (۵-۴) - مراحل شبیه‌سازی تخصیص منابع ۶۷
- شکل (۱-۵) - متوسط ۳۰ ساله‌ی بارش ماهانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه ۷۷
- شکل (۲-۵) - میانگین ۳۰ ساله‌ی حداقل متوسط دمای ماهانه در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه ۷۸
- شکل (۳-۵) - میانگین ۳۰ ساله‌ی حداکثر متوسط دمای ماهانه در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه ۷۸
- شکل (۴-۵) - مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A1B ۸۱
- شکل (۵-۵) - مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A2 ۸۲
- شکل (۶-۵) - مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی B1 ۸۲
- شکل (۷-۵) - مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A1B ۸۳
- شکل (۸-۵) - مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A2 ۸۴
- شکل (۹-۵) - مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی B1 ۸۴
- شکل (۱۰-۵) - تغییرات شاخص تعداد روزهای بسیار گرم سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف ۸۷
- شکل (۱۱-۵) - تغییرات شاخص تغییرات تعداد روزهای یخبندان سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف ۸۷
- شکل (۱۲-۵) - تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف ۸۸
- شکل (۱۳-۵) - تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف ۸۹
- شکل (۱۴-۵) - مقایسه بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه حوضه جاجرود در دوره واسنجی ۹۲
- شکل (۱۵-۵) - مقایسه بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ماهانه حوضه جاجرود در دوره واسنجی ۹۲
- شکل (۱۶-۵) - مقایسه بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه حوضه جاجرود در دوره ارزیابی ۹۳

- شکل (۵-۱۷) - مقایسه بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ماهانه حوضه جاجرود در دوره ارزیابی ۹۳
- شکل (۵-۱۸) - متوسط آبدهی سالانه حوضه جاجرود (ایستگاه آب‌سنجی رودک) ۹۶
- شکل (۵-۱۹) - درصد کاهش متوسط آبدهی سالانه حوضه جاجرود (ایستگاه آب‌سنجی رودک) ۹۷
- شکل (۵-۲۰) - متوسط آبدهی ماهانه در ایستگاه آب‌سنجی رودک (خروجی نهایی حوضه) ۹۸
- شکل (۵-۲۱) - درصد کاهش متوسط آبدهی ماهانه در ایستگاه آب‌سنجی رودک (خروجی حوضه) ۹۸
- شکل (۵-۲۲) - نمای شماتیک بهره‌برداری از رودخانه‌ی جاجرود ۱۰۳
- شکل (۵-۲۳) - درصد تأمین متوسط سالانه برای سناریوی انتشار A1B ۱۰۴
- شکل (۵-۲۴) - درصد تأمین متوسط سالانه برای سناریوی انتشار A2 ۱۰۴
- شکل (۵-۲۵) - درصد تأمین متوسط سالانه برای سناریوی انتشار B1 ۱۰۵
- شکل (۵-۲۶) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B ۱۰۶
- شکل (۵-۲۷) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2 ۱۰۷
- شکل (۵-۲۸) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار B1 ۱۰۷
- شکل (۵-۲۹) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B ۱۰۸
- شکل (۵-۳۰) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2 ۱۰۸
- شکل (۵-۳۱) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار B1 ۱۱۰
- شکل (۵-۳۲) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B ۱۱۱
- شکل (۵-۳۳) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2 ۱۱۱
- شکل (۵-۳۴) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار B1 ۱۱۲
- شکل (۵-۳۵) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B ۱۱۲
- شکل (۵-۳۶) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2 ۱۱۳
- شکل (۵-۳۷) - درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2 ۱۱۳
- شکل (۵-۳۸) - درصد متوسط سالانه ذخیره مخزن سد لتیان ۱۱۴
- شکل (۵-۳۹) - درصد متوسط ماهانه‌ی ذخیره مخزن سد لتیان در سناریوی A1B ۱۱۷
- شکل (۵-۴۰) - درصد متوسط ماهانه‌ی ذخیره مخزن سد لتیان در سناریوی A2 ۱۱۸
- شکل (۵-۴۱) - درصد متوسط ماهانه‌ی ذخیره مخزن سد لتیان در سناریوی B1 ۱۱۸
- شکل (الف-۱) - مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A1B ۱۴۵
- شکل (الف-۲) - مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A2 ۱۴۵
- شکل (الف-۳) - مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی B1 ۱۴۶
- شکل (الف-۴) - مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A1B ۱۴۶

- شکل (الف-۵)- مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A2.....۱۴۶
- شکل (الف-۶)- مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی B1.....۱۴۷
- شکل (الف-۷)- مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A1B.....۱۴۸
- شکل (الف-۸)- مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A2.....۱۴۸
- شکل (الف-۹)- مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی B1.....۱۴۹
- شکل (الف-۱۰)- مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A1B.....۱۵۰
- شکل (الف-۱۱)- مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A2.....۱۵۰
- شکل (الف-۱۲)- مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی B1.....۱۵۱
- شکل (الف-۱۳)- تغییرات شاخص تعداد روزهای بسیار گرم سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی.....۱۵۲
- شکل (الف-۱۴)- تغییرات شاخص تعداد روزهای بسیار گرم سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد.....۱۵۲
- شکل (الف-۱۵)- تغییرات شاخص تغییرات تعداد روزهای یخبندان سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی .. ۱۵۳
- شکل (الف-۱۶)- تغییرات شاخص تغییرات تعداد روزهای یخبندان سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد.. ۱۵۳
- شکل (الف-۱۷)- تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی.....۱۵۴
- شکل (الف-۱۸)- تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد.....۱۵۴
- شکل (الف-۱۹)- تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودک.....۱۵۵
- شکل (الف-۲۰)- تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودبار قصران.....۱۵۵
- شکل (الف-۲۱)- تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه فشم.....۱۵۶
- شکل (الف-۲۲)- تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه آهار.....۱۵۶
- شکل (الف-۲۳)- تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه شمشک.....۱۵۷
- شکل (الف-۲۴)- تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی.....۱۵۷
- شکل (الف-۲۵)- تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد.....۱۵۸
- شکل (الف-۲۶)- تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودک.....۱۵۸
- شکل (الف-۲۷)- تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودبار قصران.....۱۵۹
- شکل (الف-۲۸)- تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه فشم.....۱۵۹
- شکل (الف-۲۹)- تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه آهار.....۱۶۰
- شکل (الف-۳۰)- تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه شمشک.....۱۶۰

فهرست جداول

- جدول (۱-۳) - اطلاعات ایستگاه‌های اقلیمی و باران‌سنجی مورداستفاده در حوضه لتیان ۳۴
- جدول (۲-۳) - خلاصه ویژگی‌های سناریوهای تغییر اقلیم ۴۰
- جدول (۳-۳) - ویژگی‌های سناریوهای انتشار ۴۱
- جدول (۱-۴) - قالب پارامترهای جهانی در فایل input.txt ۶۰
- جدول (۲-۴) - دسته‌بندی کارایی مدل WetSpa ۶۴
- جدول (۱-۵) - معیارهای مورداستفاده برای ارزیابی مدل LARS-WG در هریک از ایستگاه‌ها در دوره‌ی پایه ۷۹
- جدول (۲-۵) - مقادیر پارامترهای عددی واسنجی شده ۹۱
- جدول (۳-۵) - مقادیر شاخص‌های کارایی مدل در دوره واسنجی و ارزیابی ۹۴
- جدول (۴-۵) - میزان تقاضای هریک از مصرف‌کننده‌ها از رودخانه‌ی جاجرود ۱۰۲
- جدول (۵-۵) - اطمینان‌پذیری تأمین نیاز هریک از مصرف‌کننده‌های جریان رودخانه‌ی جاجرود ۱۱۵

فصل اول

مقدمہ و کلیات

به شرایط پیوسته آب و هوایی یک ناحیه از کره زمین که نشان‌دهنده تغییرات هواشناختی در آن منطقه می‌باشد اقلیم^۱ گفته می‌شود. اقلیم در سراسر زمان متغیر بوده و از نظر جغرافیایی از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است (ناصری، ۱۳۹۳). رشد صنایع و کارخانه‌ها پس از انقلاب صنعتی از یک‌سو و جنگل‌زدایی و تخریب محیط‌زیست از سوی دیگر منجر به افزایش روزافزون غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو کره زمین گردیده است. به طوری که این مسأله باعث برهم خوردن اقلیم کره زمین شده است که از آن به عنوان تغییر اقلیم^۲ یاد می‌شود (IPCC^۳، ۲۰۰۷).

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر و مواجهه بیشتر امواج حرارتی (طول موج بلند) با موانع جوی، خروج گرما از سطح کره زمین را با دشواری روبرو ساخته که در نتیجه افزایش دمای جو زمین را در پی داشته است؛ به طوری که بر اساس مطالعات صورت گرفته، دمای کره زمین نسبت به سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۱۰۰ با افزایشی ۱/۴ تا ۵/۸ درجه‌ای (در مقیاس سلسیوس) مواجه خواهد شد (IPCC، ۲۰۰۱). افزایش این گازها و به تبع آن افزایش دما طی دوره‌های آتی می‌تواند پدیده تغییر اقلیم را تشدید نماید (مساح بوانی و همکاران، ۱۳۸۹). تغییر اقلیم و به تبع آن ذوب شدن یخچال‌های قطبی، برهم خوردن نظم دوره‌های بارش، مرگ‌ومیر برخی از جانداران آبی و از بین رفتن شماری از میکرواقلیم‌ها یا اکوسیستم‌ها چندی از این پیامدها است. از دیگر تبعات تغییر اقلیم می‌توان به تأثیرگذاری آن بر پدیده‌های حدی جوی و اقلیمی نظیر طوفان، سیل، تگرگ، خشکسالی، امواج گرمایی و سرماهای نا به هنگام اشاره نمود (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸).

تغییر غلظت گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسید کربن در جو، نه تنها بر دمای اتمسفر مؤثر است، بلکه سایر متغیرهای اقلیمی را نیز دستخوش تغییرات می‌سازد (کمال و همکاران، ۱۳۸۹). کشور پهناور ما، ایران نیز از چنین اختلالاتی در امان نیست، زیرا سامانه جوی زمین دارای محیطی پیوسته

^۱Climate

^۲Climate Change

^۳Intergovernmental panel of climate change

بوده و با چرخش بر فراز سطح زمین موجب جا به جا شدن توده‌های هوا می‌گردد، بنابراین می‌توان ریشه برخی از مشکلات هیدرولوژیکی یادشده را در مباحث مرتبط با تغییر اقلیم جست‌وجو کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در چند دهه اخیر ایران نیز دستخوش تغییر اقلیم شده و از بروز رویدادهای حدی صورت گرفته بی‌نصیب نبوده است (ترک‌زاد، ۱۳۹۰).

از آنجاکه گرمایش جهانی اثرات قابل توجهی بر چرخه هیدرولوژی و سامانه‌های آبی دارد، می‌توان از آن به‌عنوان تهدیدی بزرگ برای این سامانه‌ها یاد کرد؛ بنابراین نمی‌توان انتظار داشت تنها با تلاش یک یا چند کشور مانع وقوع آن شد و یا به‌سرعت اثرات مخرب آن را از چهره زمین زدود، بلکه گزینه منطقی و کاربردی توجه به راهکارهای مدیریتی برای کاهش اثرات آن یا اتخاذ برنامه‌ای مدون جهت سازگاری با اثرات این پدیده جهانی است. این موضوع مستلزم دسترسی به اطلاعات جامعی از حوضه‌های مورد مطالعه است. کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان نظیر ایران همواره از لحاظ وجود اطلاعات پایه به‌ویژه در حوضه‌های کوهستانی و صعب‌العبور دچار کمبود بوده‌اند که این موضوع هرگونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی در این مناطق را دشوار نموده و یا حتی با شکست مواجه می‌سازد (ناصری، ۱۳۹۳).

همان‌طور که اشاره شد یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم وقوع رویدادهای حدی نظیر باران‌های سیل‌آسا یا خشکسالی است و این مسأله به‌طور مستقیم با میزان آب موجود در هر سرزمین مرتبط است، به‌عبارت دیگر سازگاری با خشکسالی‌ها یا استفاده بهینه از بارش‌های سهمگین نیازمند مدیریتی هوشمندانه و مدبرانه است تا بتوان به کمک آن مانع از آسیب رسیدن به منابع طبیعی و سرمایه‌های ملی شد و بستری جهت توسعه کشور ایجاد نمود؛ به همین دلیل ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب جهت کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها و استفاده از آب سیلاب‌ها جهت مصارف مختلف در دوره‌های تر یکی از بهترین گزینه‌های پیش رو است (رحمتی، ۱۳۹۲).

هیدرولوژیست‌ها و متخصصین علوم آبخیزداری راه‌حل‌های گوناگونی نظیر فرمول‌های تجربی و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری عرضه کرده‌اند تا دشواری ناشی از کمبود اطلاعات پایه را بهبود بخشند.

از این رو توسعه و تکمیل مدل‌های هیدرولوژیکی برای فهم اثرات متقابل بین اقلیم و سامانه‌های آبی به منظور بررسی طیف وسیعی از مشکلات زیست‌محیطی و منابع آب ضروری به نظر می‌رسد.

از سویی دیگر، مدیریت اصولی و بهینه منابع فعلی و پیش‌بینی شرایط اقلیمی یک منطقه در آینده جهت برآورد میزان عرضه و تقاضای آب در دوره‌های آتی، مستلزم داشتن آگاهی و تسلط بر دانش مدیریت منابع آب و به‌ویژه مبحث تخصیص منابع است. به عبارت بهتر تخصیص منابع آب اولویت‌های مصرف در هر بخش از قبیل شرب، صنعت یا کشاورزی را به ما گوشزد می‌کند. در این راستا، استفاده از راهکارهای سودمند و مؤثر جهت کمک به یافتن تخصیص بهینه منابع آب در بین فعالیت‌های مختلف انسانی و شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری در امر اولویت‌بندی برای توسعه و استفاده پایدار از منابع آب و خاک موجود، امری ضروری به نظر می‌رسد (شوریان و موسوی، ۱۳۹۰).

۱-۲- ضرورت تحقیق

مسأله گرم شدن کره زمین، تغییر اقلیم و پیرو آن اختلالات هیدرولوژیکی صورت گرفته نیازمند راهکارهای علمی و اصولی جهت مقابله با آن است. این امر نه تنها بسیار دشوار و پرهزینه است بلکه مستلزم اتحاد تمامی کشورها در سراسر کره زمین است که با توجه به شرایط موجود عملاً امکان‌پذیر نیست، لذا راه‌حل دیگر و منطقی‌تر سازگاری با شرایط موجود و تعیین برنامه‌هایی مدون و راهبردی برای دوره‌های آتی است. از این رو در این پژوهش به راه‌حل دوم یا سازگاری به کمک شیوه‌های مدیریتی پرداخته شده است و سعی بر آن است تا با مطالعه پدیده تغییر اقلیم، نگرشی از وضعیت اقلیمی منطقه مورد مطالعه در شرایط فعلی و آتی ایجاد شود و با برآورد معیارهای اقلیمی در این دوره‌ها الگویی بهینه به منظور تخصیص منابع آب در آینده ارائه شود تا به کمک آن رویکردی جدید از مسأله توسعه پایدار این منطقه در نتایج و پیشنهادهای دخیل گردد.

با توجه به وضعیت اقلیمی و میزان منابع آبی حوضه آبریز سد لتیان در آینده و همچنین با در نظر گرفتن نیازهای آتی منطقه بحث تخصیص اصولی این منابع محدود امری ضروری است؛ چراکه این

حوضه به دلیل تأمین بخش قابل توجهی از نیاز شرب شهر تهران (سد لتیان به تنهایی ۳۰ درصد از نیاز شرب شهر تهران را تأمین می‌کند) دارای اهمیت استراتژیک می‌باشد و با توجه به این مسأله انتظار می‌رود تا با مطالعه دقیق، برنامه‌ای مدون برای استفاده و برداشت بهینه از منابع در نظر داشت تا ضمن حفظ منافع ملی و منابع موجود، نیاز آیندگان را به مسأله تأمین آب سالم پاسخ گفت.

۱-۳- سؤال‌های اساسی تحقیق

- ۱- آیا می‌توان از مدل WetSpa برای شبیه‌سازی جریان حوضه آبریز لتیان استفاده نمود؟
- ۲- میزان کارایی مدل در پیش‌بینی هیدروگراف جریان در خروجی حوضه چقدر است؟
- ۳- آیا تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی آبی بر میزان منابع آب منطقه مورد مطالعه تأثیر می‌گذارد و این تأثیر به چه مقدار است؟
- ۴- با توجه به وضعیت منابع آب در آینده در منطقه مورد بحث، تخصیص منابع آب باید چگونه باشد؟

۱-۴- فرضیات تحقیق

- ۱- تغییر اقلیم به صورت مستقیم بر منابع آب تأثیرگذار خواهد بود.
- ۲- مدل اقلیمی LARS-WG^۴ نتایج قابل قبولی برای ریزمقیاس نمایی داده‌های اقلیمی در حوضه آبریز لتیان می‌دهد.
- ۳- مدل توزیعی مکانی WetSpa توانایی شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه آبریز لتیان را با دقت خوبی دارد.
- ۴- نرم‌افزار WEAP قادر است با ایجاد بستری مناسب کمک شایانی برای سهولت در برنامه‌ریزی خطی جهت دستیابی تخصیص بهینه فراهم آورد.

⁴Long Ashton Research Station Weather Generator

۱-۵- اهداف

میزان متوسط بارش در ایران کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال بوده که این رقم کمتر از یک‌سوم متوسط جهانی است. به‌علاوه میزان متوسط تبخیر-تعرق در کشور ما ۳ برابر متوسط جهانی است که با قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی کمبود منابع آبی را به‌عنوان یک محدودیت ذاتی دوچندان می‌نماید. به‌طوری‌که امروزه سرانه آب تجدید پذیر هر ایرانی به کمتر از ۱۷۰۰ مترمکعب در سال رسیده و پیش‌بینی می‌شود این رقم تا سال ۱۴۰۰ به کمتر از ۱۳۰۰ مترمکعب برای هر نفر در سال برسد (وزارت نیرو، ۱۳۹۳). این رقم هشدار جدی برای متخصصین عرصه منابع آب بوده و با توجه به رشد جمعیت و فرهنگ کنونی مصرف آب به‌زودی مشکلات موجود بیشتر خواهد شد، از این‌رو می‌باید با مطالعه دقیق و اصولی چاره‌ای بنیادین جهت استفاده هر چه بهتر از همین منابع محدود نمود. به این منظور، سعی بر آن است تا با ارائه سناریوهای مختلف انتشار، در این تحقیق ضمن ترسیم شرایط اقلیمی حوضه مورد مطالعه در آینده، وضعیت منابع آبی دوره‌های آتی نیز از طریق شبیه‌سازی مشخص شود و همچنین میزان آب سطحی در دسترس به ازای هر سناریو محاسبه گردد تا بر اساس احتمال وقوع آورد رودخانه‌های موجود در حوضه، الگوی تخصیص مناسب برای موارد مصرف متعدد به دست آید؛ بنابراین اهداف این پژوهش به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- بررسی شرایط اقلیمی حوضه مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی برای دوره‌های آتی.
- شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه و تخمین میزان رواناب خروجی برای دوره‌های آتی.
- تعیین میزان کارایی مدل در پیش‌بینی هیدروگراف جریان حوضه آبریز لتیان.
- برآورد میزان منابع آب سطحی.
- بررسی تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی بر منابع آب سطحی حوضه.
- بررسی حالت‌های مختلف تخصیص، سازگار با شرایط تغییر اقلیم.
- تحلیل و ارزیابی سناریوهای مختلف تخصیص منابع آب.

۱-۶- نوآوری‌های تحقیق

- ۱- افزایش تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی و دوره آماری اطلاعات مورد استفاده جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی.
- ۲- تغییر روش ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی هوا از رگرسیونی به مولد اقلیمی.
- ۳- مقایسه‌ی میزان رواناب و چگونگی تخصیص منابع آبی حاصل از آن در زمان حال و آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم.
- ۴- انجام همزمان شبیه‌سازی رواناب و تخصیص منابع با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم بر آن‌ها در یک پژوهش.

۱-۷- معرفی فصل‌های پایان‌نامه

در روند نگارش این پایان‌نامه سعی بر آن است تا ضمن پیوستگی مطالب ارائه‌شده در هر فصل ارتباط موضوعی با سایر فصل‌ها نیز حفظ شود. بدین منظور در فصل اول مقدمه‌ای در مورد اهمیت موضوع و ضرورت مطالعه پیرامون آن بیان شده است. سپس به اهمیت موضوع در منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. در ادامه سؤالات تحقیق و فرضیات مرتبط با آن مطرح و در نهایت اهداف تحقیق و نوآوری‌های آن آورده شده است.

در فصل دوم به مرور منابع به‌عنوان یکی از بخش‌های مهم در هر تحقیق، پرداخته خواهد شد. در این فصل به پژوهش‌هایی که در آن‌ها به تغییر اقلیم و اثرات آن، چگونگی ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی و همچنین کاربرد مدل WetSpa در ایران و جهان در راستای تحقیق حاضر اشاره شده است. در آخر نیز به بررسی منابع مربوط به تحلیل سیستم‌های منابع آب و شبیه‌سازی تخصیص پرداخته شده است.

در فصل سوم منطقه مورد مطالعه به لحاظ موقعیت جغرافیایی، کاربری اراضی، بافت خاک، ویژگی- های فیزیکی سد لتیان، اطلاعات لازم برای انجام هریک از مراحل پژوهش و اطلاعات حاصل از مدل- های GCM تحت سناریوهای مختلف برای بررسی اثر تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفته شده است. در فصل چهارم ماهیت نرم افزار LARS و ساختار مدل های WetSpa و WEAP و همچنین مسیر انجام تحقیق جهت اخذ نتایج مورد نظر بررسی شده است. این مراحل شامل اعمال سناریوهای تغییر اقلیم بر روی اطلاعات، واسنجی مدل WetSpa برای حوضه و همچنین اجرای مدل شبیه سازی تخصیص WEAP می باشد.

ارائه نتایج مطالعه حاضر در فصل پنجم، به صورت جداول و نمودارهای حاصل از مراحل کار بیان می گردد. ارزیابی معیارهای خطا در مورد نتیجه ی پیش بینی اثر تغییر اقلیم به روی اطلاعات دما و بارش، نتایج اجرای مدل WetSpa و در نهایت ارائه ی نتایج شبیه سازی تخصیص های صورت گرفته برای هریک از سناریوها و گام های زمانی مورد مطالعه از مواردی است که در این فصل بدان پرداخته شده است.

پس از اخذ نتایج در فصل پنجم، در فصل ششم، نتایج به دست آمده با توجه به اهداف و فرضیه های در نظر گرفته شده بررسی و با نتایج تحقیقات مشابه مقایسه شده است. در نهایت جمع بندی کلی از نتایج به دست آمده صورت می گیرد. در پایان با توجه به نتایج تحقیق، پیشنهادهایی در جهت کمک به پژوهش های آینده ذکر می شود. در پیوست نیز نتایج کامل بررسی تغییر اقلیم در منطقه آورده شده است.

فصل دوم

بررسی منابع

مشاهده روند تدریجی گرم شدن کره زمین و ناهنجاری پیش‌آمده در روند طبیعی رویدادهای هیدرولوژیکی به‌ویژه در چند دهه اخیر، بشر را بر آن داشت تا با بررسی و ریشه‌یابی علل این دست از مسائل، تدبیری جهت کنترل و سازگاری با چنین ناهنجاری‌هایی بیندیشد. نتایج تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مهم‌ترین عامل افزایش دمای جو زمین بوده و این مسأله منجر به برهم خوردن تعادل سامانه اقلیمی کره زمین شده و تغییرات اقلیمی گسترده‌ای را در اغلب نواحی کره زمین موجب گردیده است (بید و همکاران^۵، ۲۰۰۱). تغییر اقلیم در عصر حاضر به‌عنوان تهدیدی جدی برای توسعه پایدار مطرح است، که به منابع طبیعی، محیط‌زیست، سلامت انسان، امنیت غذایی، فعالیت‌های اقتصادی و غیره آسیب می‌رساند. این مبحث مهم، در دهه ۷۰ میلادی در پی افزایش میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های انسانی مورد توجه قرار گرفت (ویژه‌نامه تغییر اقلیم، ۱۳۸۸).

بررسی‌های صورت گرفته حکایت از آن دارد که کمترین تغییر در میزان بارش و درجه حرارت می‌تواند آسیب‌های ناگواری به بخش‌های گوناگون کشاورزی و اقتصادی وارد نماید (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹). این سرزمین پهناور با وجود منابع طبیعی غنی و قابلیت‌های بالقوه، همواره با مشکل کمبود آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه مواجه بوده است (علیزاده، ۱۳۸۶). کشور ایران علاوه بر کمبود آب، هر ساله به علت عدم کنترل رواناب‌های سطحی شاهد خسارت‌های جبران‌ناپذیری است که در بخش‌های گسترده‌ای روی می‌دهد. لذا، می‌توان با مهار رواناب‌های سطحی و به‌کارگیری و استفاده بهینه از ریزش‌های جوی علاوه بر تأمین آب موردنیاز مصارف کشاورزی، صنعتی و آشامیدنی از اثرات مخرب و زیان‌های ناشی از سیلاب‌های حاصل نیز کاست (فخری و همکاران^۶، ۲۰۱۲).

⁵Baede et al.

⁶Fakhry et al.

بنابراین، توجه به وضعیت اقلیمی و میزان منابع آبی کشور در آینده و تخصیص بهینه این منابع محدود با در نظر گرفتن نیازهای آبی جوامع، امری ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا مدل‌های شبیه‌سازی حوضه آبریز به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه اندرکنش‌های بین مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژی به کار می‌روند، به‌طوری‌که پس از واسنجی شاخص‌های مورد مطالعه برای منطقه تحت بررسی، مدل‌های مزبور امکان ارزیابی اثرات تغییرات طبیعی یا تغییرات مدیریتی را (زمانی که امکان مطالعه حالت واقعی و مشاهده‌ای مستقیم در حوضه وجود ندارد) میسر می‌سازند. لذا، از این طریق می‌توان سناریوهای مختلف را پیش از اجرا مورد ارزیابی قرار داد و یا از پیامدهای ناخواسته احتمالی جلوگیری نمود (شفیعی و همکاران، ۱۳۸۹).

در این فصل، به‌صورت جداگانه مروری اجمالی بر تحقیقاتی که در چند سال اخیر در داخل و خارج از کشور در حیطه‌ی تغییر اقلیم و سناریوهای انتشار، روش‌های ریزمقیاس نمایی خروجی‌های GCM، مدل بارش-رواناب WetSpa و روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مختلف با کمک نرم-افزارهای مختلف به‌ویژه WEAP پرداخته می‌شود.

۲-۲- بررسی تأثیرات تغییر اقلیم

امروزه پدیده تغییر اقلیم به‌ویژه تغییرات دما و بارش یکی از مهم‌ترین مباحث مطرح‌شده پیرامون علوم محیطی است. این پدیده به دلیل اثرات محیطی، اقتصادی و اجتماعی آن دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا سامانه‌های انسانی وابسته به عناصر اقلیمی نظیر کشاورزی، صنایع و امثال آن بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده و عمل می‌کنند (کمال و همکاران، ۱۳۸۹)؛ بنابراین مهم‌ترین انگیزه پژوهشگران از پیش‌بینی شرایط اقلیمی در آینده تعیین وضعیت منابع آبی است تا بتوان به کمک آن الگویی بهینه جهت تخصیص منابع آبی موجود یافت و موجب گسترش آبادانی و سازگاری با این بحران شود. بدین منظور پژوهشگران با استفاده از روند فوق اقدام به مطالعات متعددی در این زمینه نموده‌اند که در ادامه به گوشه‌ای از آن‌ها اشاره شده است:

برکثوت و همکاران (۲۰۰۲)، بامطالعه ساختار کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه در برخورد با مبحث تغییر اقلیم، اقدام به شناسایی موانع موجود در اجرای برنامه‌های مقابله با اثرات تغییر اقلیم نمودند. بر اساس مطالعه ایشان در شناسایی اثرات تغییر اقلیم و ایجاد ابزارهایی جهت کنترل سیستم‌های اقتصادی نیازمند احتساب سیستماتیک شرایط اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی در دوره‌های آتی هستیم. طبق نتایج پژوهش ایشان تحلیل سناریوهای اقتصادی آینده جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم ضروری به نظر می‌رسد.

بابائیان و همکاران (۱۳۸۶)، بامطالعه میزان بارش‌های روزانه در ۴۳ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کشور و با استفاده از تکنیک ریزمقیاس نمایی آماری مدل LARS-WG اقدام به مدل‌سازی اقلیم ایران در دوره (۲۰۳۹-۲۰۱۰) نمودند. نتیجه کار ایشان حاکی از آن است که برای دهه ۲۰۲۰ بارش در کشور به میزان ۹٪ کاهش خواهد یافت در حالی که متوسط دمای سالانه ۰/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که در آن بیشترین افزایش ماهانه دما مربوط به ماه‌های سرد سال است.

عباسپور و همکاران^۷ (۲۰۰۹)، در تحقیقی با بررسی چشم‌انداز منابع آب ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم، دریافتند که امکان دارد در بخش غربی ایران به‌ویژه در ناحیه رشته‌کوه زاگرس احتمال وقوع سیل به علت تغییر در الگوی بارش افزایش پیدا کند. به‌عبارت‌دیگر وقوع سیل‌هایی متناوب با شدت بیشتر در نواحی شمالی و غربی ایران افزایش خواهد یافت که این موضوع به‌طور مستقیم به نحوه الگوی بارش در آینده وابسته است.

ذهبیون و همکاران (۱۳۸۹)، در یک مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر جریان خروجی حوضه قره‌سو در دوره آتی با مدل HadCM3 از مدل‌های AOGCM تحت سناریو A2 انجام و مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بر اساس این مدل هواشناسی و سناریو مذکور دمای این منطقه در ماه‌های مختلف بین ۱ تا ۴ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه گرم‌تر خواهد شد. میزان بارش نیز به‌جز در ماه‌های بدون

⁷Abbaspour et al

بارش، تغییری ۳۰ درصدی خواهد داشت. این مسأله می‌تواند بر مقدار کلی آب قابل‌دسترس، زمان دبی پیک و وقوع رویدادهای حدی اثرگذار باشد.

علیزاده و همکاران (۱۳۸۹)، حوضه آبریز کشف‌رود از توابع استان خراسان رضوی را در شرق کشور مورد بررسی قراردادند و با به کار بستن تکنیک ریزمقیاس نمایی آماری، خروجی‌های مدل گردش عمومی هوا HadCM3 را مورد استفاده قراردادند و به کمک سناریو A2 تأثیرات تغییر اقلیم بر دما و بارش را برای دوره‌های (۲۰۱۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و (۲۰۷۰-۲۰۹۹) برآورد نمودند. بر اساس پیش‌بینی صورت گرفته، دما در هر سه دوره مذکور نسبت به دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) دچار افزایش خواهد شد. این در حالی است که میانگین بارش سالیانه تفاوت معنی‌داری پیدا نخواهد کرد و تنها الگوی توزیع بارش در طی سال دستخوش تغییر خواهد شد.

دنیز و همکاران^۸ (۲۰۱۱)، با مطالعه تغییرات مکانی شاخص‌های اقلیمی به‌وسیله بررسی ۲۹۹ ایستگاه در ترکیه و ارزیابی میانگین ماهانه دما و بارش در طول دوره ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۶ دریافتند که تغییرات فصلی در ۲۵٪ از سطح کشور چشمگیر بوده و بیشترین تغییرات در شرق آناتولی مشاهده شد. به‌طوری‌که این موضوع منجر به گسترش واحدهای اقلیمی نیمه‌خشک در دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۶ نسبت به دوره پایه (۱۹۶۰-۱۹۹۱) شده است.

خزایی و همکاران (۲۰۱۱)، با واسنجی مدل مولدهای آب و هوایی (WGs) برای دوره ۲۷ ساله (۱۹۷۴-۲۰۰۰) سری‌های بارش مشاهداتی در ایستگاه‌های یاسوج اقدام به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روی رویدادهای حدی نظیر سیل نمودند. ایشان با شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب به‌صورت پیوسته و ریزمقیاس نمودن متغیرهای اقلیمی، میزان سیلاب‌های احتمالی در آینده را تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 برای دوره‌های (۲۰۰۷-۲۰۳۳)، (۲۰۳۷-۲۰۶۳) و (۲۰۳۶۷-۲۰۹۳) پیش‌بینی نمودند. نتایج این مطالعه از افزایش ۵۳، ۵۵ و ۴۸ درصدی نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۴) برای هر یک از سناریوهای (A1B، A2 و B1) در حوضه پتاوه یاسوج حکایت دارد.

^۸Deniz et al.

اشرف واقفی و همکاران (۲۰۱۳)، دریافتند که با سناریو B1 در ناحیه شمالی حوضه آبریز کرخه، موجودیت آب شیرین از ۱۷۱۶ به ۲۶۷۰ مترمکعب بر نفر در سال افزایش خواهد یافت، درحالی که جمعیت این ناحیه با رشدی معادل ۲۸٪ روبرو خواهد بود و در بخش شمالی (مکانی که اکثر اراضی کشاورزی واقع گردیده‌اند) موجودیت آب شیرین به‌طور متوسط به کمتر از ۴۴٪ خواهد رسید. بااین حال بر اساس میانگین بلندمدت عملکرد گندم آبی، در ناحیه جنوبی از ۱/۲٪ تا ۲۱٪ در زیر حوضه‌های مختلف افزایش خواهد یافت که این ارقام برای گندم دیم از ۴ تا ۳۸٪ متغیر است.

طی تحقیقی که نصوحیان و همکاران (۱۳۹۲)، بر روی دما و بارش دشتهای شهرکرد و بروجن ترتیب دادند، به این نتیجه رسیدند که دمای مناطق مورد مطالعه نسبت به دوره پایه در تمامی فصول گرم‌تر خواهد بود. همچنین این محققان نشان دادند که میزان افزایش دما در دو فصل بهار و تابستان نسبت به فصل‌های پاییز و زمستان بیشتر خواهد بود. این تحقیق بیان‌گر آن است که میزان افزایش دما در دوره ۲۰۳۰ نسبت به دوره پایه در شهرکرد ۱/۷ درجه سلسیوس خواهد بود و دمای حداقل بیش از دمای حداکثر افزایش خواهد یافت. نتایج به‌دست‌آمده در مورد بارش تغییرات متفاوتی را نمایش می‌دهند به‌طوری‌که به غیر از HadCM3-A2 که کاهش بارش را نشان می‌دهد در سایر حالت‌ها افزایش بارندگی مشاهده می‌شود، این در حالی است که در بروجن تمامی مدل‌ها کاهش بارش را طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۹ نشان می‌دهند.

۲-۳- روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و مطالعات مرتبط

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر سامانه‌های مختلف استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های سه‌بعدی جفت شده جوی-اقیانوسی موسوم به AOGCM^۹ است. این مدل‌ها قادرند پارامترهای جوی و اقیانوسی را برای یک دوره طولانی مدت با استفاده از سناریوهای تأییدشده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^{۱۰} (IPCC) مدل‌سازی نمایند

^۹ Atmospheric Ocean General Circulation Models

^{۱۰} Intergovernmental Panel of Climate Change

(ویلیبی^{۱۱}، ۲۰۰۷). اما قدرت تفکیک مکانی پایین و ساده‌سازی‌هایی که برای فرآیندهای اقلیمی در نظر می‌گیرند دو ضعف عمده این مدل‌ها می‌باشند. لذا، به‌منظور بهبود قدرت تفکیک پایین لازم است خروجی این مدل‌ها پیش از استفاده در مطالعات ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، ریزمقیاس شوند.

ریزمقیاس‌نمایی را می‌توان به ۲ روش دینامیکی و آماری انجام داد (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸). در روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCMs) استفاده می‌شود و خروجی‌ها مدل‌گردش عمومی هوا به‌عنوان شرایط مرزی تعیین می‌گردند و فرآیندهای جوی را برای محدوده‌ای معین با دقتی بالاتر (معمولاً در مقیاس روزانه و با دقت مکانی ۵۰ کیلومتر) تولید می‌کنند (پرودهام و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۳). در روش اخیر معادلات حاکم بر بسته هوا در شبکه‌های ریزتری از شبکه مدل‌گردش عمومی جو با استفاده از روش‌های تحلیل عددی از قبیل تفاضل محدود حل می‌شوند که در صورت استفاده از این روش می‌توان به نقیصه دوم مدل‌های گردش عمومی جو، یعنی ساده‌سازی فرآیندهای جوی نیز فائق آمد. با این حال استفاده از این مدل‌ها هزینه‌بر بوده و عموماً خروجی‌های آن برای مناطق و سناریوهای بسیاری موجود نمی‌باشد (پرودهام و همکاران، ۲۰۰۳). این در حالی است که ریزمقیاس‌نمایی آماری ارزان بوده و برای پاسخ‌های تقریبی سریع به اثرات ناحیه‌ای تغییر اقلیم مناسب‌تر است (ویلیبی، ۲۰۰۷). روش‌های آماری متعددی جهت ریزمقیاس نمودن خروجی‌های مدل‌های GCM^{۱۳} جهت دستیابی به دقت بیشتر توسعه یافته‌اند. در این بین، می‌توان به روش ضرایب تغییر^{۱۴} و مولدهای اقلیمی (WGs) که همبستگی بین متغیرهای ریزمقیاس شده را حفظ می‌نماید اشاره نمود (پرودهام و همکاران، ۲۰۰۲). در این روش، اختلافات بین میانگین برون‌دادهای مدل‌های GCM جهت نرمال بودن کنترل می‌گردد و چشم‌انداز دوره‌های آتی برای هر سری از داده‌های مشاهداتی پایه ترسیم می‌گردد (ناصری، ۱۳۹۳).

¹¹ Wilby

¹² Prudhomme et al.

¹³ General Circulation Models

¹⁴ Change Factors

مدل مولد اقلیمی لارس^{۱۵} یکی از مشهورترین مدل‌های مولد هواشناسی است که به‌منظور تولید داده‌های روزانه نظیر بارش، تابش، دمای حداکثر و دمای حداقل به‌صورت روزانه برای سری زمانی گذشته و آینده تحت شرایط اقلیمی مختلف به کار می‌رود. اولین نسخه این مدل در سال ۱۹۹۰ به‌عنوان ابزاری جهت ریزمقیاس کردن آماری در کشور مجارستان ابداع شد (راسکو^{۱۶}، ۱۹۹۱). از این مدل برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی و توزیع‌های آماری پیچیده استفاده می‌شود. مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش، توزیع نیمه تجربی^{۱۷} می‌باشد. این مدل مورد تأیید هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم بوده، لذا حاوی ۱۵ خروجی از مدل‌های گردش عمومی هوا برای دوره‌های مختلف و سناریوهای انتشار^{۱۸} متفاوت است (یعقوبی و مساح بوانی، ۱۳۹۳). تاکنون در سراسر دنیا از این مدل استفاده‌های بسیاری صورت گرفته است که در ادامه به بخشی از آن‌ها اشاره می‌شود:

خان و همکاران (۲۰۰۶)، طی تحقیقی بر روی حوضه کات‌دودی ابل^{۱۹} که در کشور کانادا واقع می‌باشد، اقدام به بررسی عدم قطعیت سه مدل ریزمقیاس نمایی SDSM، LARS-WG و ANN نمودند. نتایج نشان داد که مدل SDSM و مدل LARS-WG نتایج قابل قبولی داشته و مدل ANN دارای دقت کم‌تری بود.

فیس‌ها و همکاران^{۲۰} (۲۰۱۲)، طی پژوهشی اقدام به مقایسه دو روش ریزمقیاس نمایی رگرسیون خطی^{۲۱} SDSM و ریزمقیاس نمایی با استفاده از مدل لارس نمودند. در این مطالعه که از خروجی مدل HadCM3 استفاده شد، حوضه تیبر^{۲۲} از توابع کشور ایتالیا تحت دو سناریو A2 و B1 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق حکایت از افزایش بارش با روش SDSM دارد، حال آن‌که روش آماری

¹⁵LARS-WG

¹⁶Rasco

¹⁷Semi Emperical Disterbution

¹⁸Special Report on Emission Scenario

¹⁹Kat du diable

²⁰Fise ha et al.

²¹Statistical DownScaling Model

²²Tiber

لارس بیان گر کاهش بارش تا سال ۲۱۰۰ می باشد. با این حال هر دو مدل در افزایش دمای حداقل و حداکثر نتایج مشابهی را ارائه می دهند. به علاوه نتایج به دست آمده توسط مدل LARS-WG با نتایج مطالعات قبلی حاصل از گزارش ارزیابی AR4 شباهت بسیاری دارد.

اشرف و همکاران (۱۳۹۰)، با به کارگیری مدل HadCM3 که به روش آماری ریزمقیاس شده بود اقدام به پیش بینی تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی برای ۲۰ سال آتی نمودند. در این تحقیق داده های مدل مذکور توسط مدل LARS-WG تحت ۳ سناریو A1B، A2، B1 ریزمقیاس شدند و تغییرات فصلی بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی خراسان رضوی در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که میزان بارش در ۳ فصل پاییز، زمستان، بهار در تمامی شهرهای استان به استثنای تربت جام که در هر سه فصل یادشده و نیز کاشمر که در فصل پاییز دارای روند کاهشی می باشند، افزایش خواهد یافت. طبق این پژوهش بیشترین میزان افزایش بارندگی مربوط به شهر قوچان و کمترین آن متعلق به ایستگاه سرخس است. به طور خلاصه طبق نتایج این مطالعه، شرایط اقلیمی استان خراسان رضوی در ۲۰ سال آتی تفاوت محسوسی با شرایط فعلی خواهد داشت و برنامه ریزی های بلندمدت و استراتژیک برای مدیریت این شرایط، الزامی است.

ناصری و همکاران (۱۳۹۳)، در راستای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب خروجی از ایستگاه های آبسنجی واقع در حوضه آبریز بهشت آباد کارون شمالی، خروجی یکی از مدل های معتبر گردش عمومی هوا (HadCM3) را انتخاب و به کمک مدل LARS-WG تحت سناریوهای اقلیمی A1B، A2 و A1B برای دوره های (۲۰۲۰s)، (۲۰۵۰s) و (۲۰۸۰s) ریزمقیاس کردند. نتایج نشان داد که ممکن است طی دوره ها آتی در تمامی سناریوها میانگین دما سالانه افزایش یافته و میزان رواناب به استثنای سناریو B1 برای دوره های آتی نزدیک و دور کاهش چشمگیری پیدا کند. به طوری که تحت سخت ترین شرایط امکان دارد تا سال ۲۱۰۰ میزان رواناب خروجی از حوضه بهشت آباد برای سناریوی A2 تا ۴۵ درصد کاهش بیابد. به علاوه با توجه به بهینه سازی صورت گرفته، میزان آبدهی در اکثر سناریوها به

قدری پایین است که تنها قادر به تأمین پایین‌ترین سطح زیر کشت بهینه برای محصولات یادشده خواهد بود.

یعقوبی و مساح بوانی (۱۳۹۳)، با استفاده از مدل لارس خروجی‌های ۱۵ مدل گردش عمومی جو را برای کلیه سناریوها مستخرج شامل A1B، A2 و B1 برای حوضه هرات از توابع استان یزد بررسی نمودند. این تحقیق نشان داد که دمای هوا در اکثر ماه‌های سال به‌جز آوریل، ژولای، سپتامبر و دسامبر کاهش خواهد یافت. همچنین بر اساس نتایج موجود دما در دوره (۲۰۱۵-۲۰۳۰) افزایشی معادل ۰/۵ تا ۶/۱ درجه سلسیوس خواهد داشت.

۲-۴- مدل بارش - رواناب^{۲۳} WetSpa

به‌کارگیری مدل‌های مختلف اقلیمی و هیدرولوژیکی به‌منظور برآورد میزان جریان رودخانه و محاسبه میزان فرسایش جهت ارزیابی موجودیت منابع آبی و چالش‌های پیش رو چه در زمینه مسائل زیست‌محیطی و یا در مسائل حفاظتی آب‌و‌خاک از اهمیت بسزایی برخوردار است. مدل‌ها ابزاری عملی هستند که می‌توان به کمک آن‌ها به درکی از واقعیت دست‌یافت. مدل‌های بارش - رواناب یکی از روش‌های تخمین رواناب و ابزاری مناسب برای مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی و منابع آب می‌باشند. دو کاربرد مهم مدل‌های بارش - رواناب، شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و پیش‌بینی سیلاب است. عکس‌العمل حوضه در برابر پدیده بارندگی به علت وجود عوامل هیدرولوژیکی گوناگون بسیار پیچیده است. رواناب به پوشش گیاهی، تیپ خاک و خصوصیات اقلیمی حوضه مانند بارش و دما بستگی دارد. تأثیر هر یک از این عوامل در تولید رواناب غیریکنواخت است. در چند سال اخیر بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) باعث گسترش چشم‌گیر مدل‌های توزیعی بوده است (ناصری، ۱۳۹۳). به علت کارایی بالای مدل‌های توزیعی در مباحث هیدرولوژی، امروزه در سراسر دنیا

²³.Water and Energy Transfer Between Soil, Plants and Atmosphere

به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه به شماری از مطالعات صورت گرفته با مدل WetSpa اشاره شده است:

ونگ و همکاران (۱۹۹۶)، مدل توزیعی WetSpa را برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر برای اولین بار در سطح حوضه آبریز توسعه دادند. آن‌ها به منظور اعمال اثر متقابل رواناب سطحی و آب زیرزمینی، مدلی را نیز برای آب زیرزمینی ارائه نمودند. رواناب سطحی مدل بر اساس معادله استدلالی اصلاح‌شده (روش ضریب رواناب اصلاح‌شده) محاسبه گردید. بدین منظور ابتدا ضریب رواناب پتانسیل حوضه در GIS به صورت توزیعی در قالب نقشه تهیه گردید، سپس ضریب رواناب پتانسیل با توجه به رطوبت خاک اصلاح گردید. مدل در حوضه آبریز ترک‌لپ-مولن‌بیک در بلژیک اجرا شد. نتایج بیانگر این بود که مدل به خوبی قابلیت پیش‌بینی رواناب سطحی را داراست. علاوه بر این نتایج نشان دادند ترکیب مدل‌سازی توزیعی و GIS بسیار سودمند می‌باشد.

لیو و همکاران (۲۰۰۳)، در مقاله‌ای تحت عنوان تعیین عملکرد روش انتقال پخشی جریان بر اساس مدل‌سازی سیلاب و GIS، در حوضه آلتزیت در لوگزامبورگ، مدل را با داده‌های رواناب ساعتی مشاهده‌شده در ۳۰ ماه مورد آزمون قرار دادند. روند یابی جریان سطحی و زیرسطحی از روش معادلات تقریب موج پخشی سنت و نانت و در مقیاس سلول صورت گرفت. نتایج حاصل از روش WetSpa، برای توزیع مکانی هیدرولوژیکی و خصوصیات ژئوفیزیکی حوزه نشان داد که این مدل توانایی بالایی جهت بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی یا پوشش خاک بر روی رفتار هیدرولوژی رودخانه دارد.

لیو و همکاران (۲۰۰۴)، به منظور شبیه‌سازی کاهش سیلاب با استفاده از اصلاح طبیعی رودخانه از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa، استفاده نموده و آن‌ها نشان دادند که پس از اصلاح طبیعی رودخانه، دبی پیک ۱۴٪ کاهش یافته و زمان تمرکز ۲ ساعت به تأخیر افتاد.

بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۵)، شبیه‌سازی جریان رودخانه را با استفاده از مدل WetSpa، در رودخانه هورنارد حوضه اسلواکی مورد بررسی قرار دادند. رواناب سطحی مدل بر اساس معادله استدلالی اصلاح‌شده ضریب رواناب محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در خروجی حوضه و در زیر حوضه‌های

اصلی، انطباق خوبی بین هیدروگراف حاصل از مدل با هیدروگراف مشاهده‌ای وجود دارد و مدل با توجه به معیار ناش - ساتکلیف هیدروگراف‌های روزانه را با دقت ۸۵-۷۵٪ پیش‌بینی می‌کند.

بهره‌مند و دسمت (۲۰۰۶)، در مقاله‌ای تحت عنوان آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل شبیه‌سازی سیل WetSpa را بر اساس GIS و با استفاده از PEST موردبررسی قرار دادند. این مطالعه در حوضه آبریز توریسا در اسلواکی انجام شد. نتایج مطالعه نشان داد که مدل WetSpa دبی روزانه را با توجه به معیار ناش - ساتکلیف با دقت حدود ۷۳٪ پیش‌بینی می‌کند. همچنین فاکتور تصحیح برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر پتانسیل بیشترین حساسیت نسبی را دارا بوده است.

ریتابول و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa به پیش‌بینی رواناب در رودخانه سیمو، در محدوده دریاچه ویکتوریا در تانزانیا پرداختند. نتایج حاصل از تست مدل نشان داد که مدل به‌خوبی قابلیت روند یابی جریان در رودخانه را دارد. در این حوضه رواناب سطحی و زیر-سطحی هر یک به ترتیب ۳۸/۶٪ و ۶۷/۴٪ از کل رواناب را شامل می‌شود.

بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۷ a)، به‌منظور بررسی اثرات تغییر کاربری بر میزان رواناب سطحی و هیدروگراف سیل، مدل WetSpa را در حوضه آبریز مارگسانی - هورنارد در اسلواکی به اجرا درآوردند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل از توانایی بسیار خوبی در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های ساعتی جریان رودخانه برخوردار می‌باشد و همچنین جنگل‌کاری و احیای اراضی، دبی پیک را تا ۱۲٪ کاهش داده و زمان رسیدن به اوج ۱۴ ساعت بیشتر از زمان تا اوج وضعیت قبلی می‌گردد. همچنین تأثیر پوشش زمین بر روی میزان سیل به‌طور شدیدی به خصوصیات سیلاب و رطوبت پیشین خاک بستگی دارد.

بهره‌مند و دسمت (۲۰۰۷ b)، مدل‌سازی هیدرولوژیکی توزیعی و آنالیز حساسیت، با استفاده از PEST در حوضه آبریز توریسا در اسلواکی را موردبررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این بودند که فاکتور تصحیح برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر پتانسیل بیشترین حساسیت نسبی و پارامتر K_{gm} که میزان تبخیر و تعرق از آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند، کمترین حساسیت را دارد؛ و با توجه به معیار ناش - ساتکلیف مدل WetSpa دبی روزانه را با دقت حدود ۷۳٪ پیش‌بینی می‌کند.

زینی‌وند و دسمت (۲۰۰۹a)، با استفاده از مدل WetSpa و رویکرد تعادل فیزیکی آب و توده برف در رودخانه هورنارد به پیش‌بینی سیل ناشی از ذوب برف پرداختند. این تحقیق در کوهستان کارپیتین واقع در اسلواکی انجام شده است. آن‌ها در این مطالعه به نتایج موفقیت‌آمیزی در زمینه شبیه‌سازی فرآیندهای ذوب برف رسیدند.

صفری و همکاران (۲۰۰۹)، کاربرد مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa را برای پروژه‌ای در آمریکا DMIP2 موردبررسی قراردادند. در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد مدل از معیار جمعی که نشان‌دهنده میزان اختلاف شکل، اندازه و حجم هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده و محاسبه‌ای می‌باشد، استفاده کرده‌اند. نتایج واسنجی برای پنج رودخانه حوضه، به جز رودخانه بلو، عالی تا خیلی خوب و نتایج برای کل دوره ارزیابی، خوب تا خیلی خوب می‌باشد که نشان می‌دهد مدل قادر است فرآیندهای هیدرولوژیکی مربوطه را با دقت شبیه‌سازی کند.

بهره‌مند و دسمیت (۲۰۱۰)، آنالیز پیش‌بینی و عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل WetSpa را در حوضه توریسا بررسی کردند. برآورد پارامترها، آنالیز حساسیت و پیش‌بینی پارامترها با استفاده از مدل PEST نشان می‌دهد که ضریب اصلاحی داده‌های تبخیر اندازه‌گیری شده، بیشترین حساسیت را داراست. تعیین مجموعه پارامترهای مناسب و دلایل عدم قطعیت پارامترها با استفاده از آنالیز پیش-بینی و عدم قطعیت پارامترها نشان می‌دهد، عدم قطعیت پارامترهای مدل منجر به عدم قطعیت قابل‌توجه در نتایج مدل و پیش‌بینی نخواهد شد.

مرادی‌پور و همکاران (۱۳۹۰) به شبیه‌سازی توزیعی- مکانی سیل در حوضه طالقان با استفاده از مدل WetSpa پرداختند که در نتیجه به تطابق بسیار خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی دست پیدا کردند و به دقت بالای ۸۴٪ در شبیه‌سازی بر اساس ضریب نش-شاتکلیف رسیدند.

رحمتی (۱۳۹۲)، در پژوهشی به شبیه‌سازی جریان در حوضه آبریز اریه واقع در استان خراسان به کمک مدل WetSpa پرداخت که در نهایت با مقایسه‌ی جریان مشاهداتی با شبیه‌سازی‌شده به معیارهای خطای قابل قبولی دست‌یافت که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان انحراف مدل برای تعادل حجم

جریان (Bias) در دوره‌ی واسنجی ۰,۰۲۳- و در دوره‌ی ارزیابی ۰,۰۲۴ و نش-شاتکلیف در دوره‌ی واسنجی ۰,۵۰۳٪ و در دوره‌ی ارزیابی ۰,۵۷٪ را برشمرد.

۲-۵- مطالعات مدیریت منابع آب و یافتن الگوی بهینه تخصیص

از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی و به موازات پیشرفت تکنولوژی در علوم گوناگون، توجه به مدل‌سازی تخصیص منابع آب شدت گرفت. تخصیص آب مجموعه فعالیت‌هایی است که مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد تا آب را جهت مصارف موجه مطابق با قوانین و اولویت‌های مدنظر در منطقه مورد استفاده قرار دهند (UNESCAP^{۲۴}، ۲۰۰۰). از این‌رو، محققین بسیاری در سراسر جهان به شیوه‌های مختلف اقدام به توسعه مدل‌های گوناگون در زمینه‌های مرتبط با بحث تخصیص منابع آب نموده‌اند که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

بابل و همکاران (۲۰۰۵)، اقدام به ارائه مدل جالب و ساده‌ای جهت تخصیص منابع آب نمودند. نتیجه مطالعه آن‌ها باعث ایجاد مدل تخصیص آب یکپارچه متقابل ساده^{۲۵} شد. این مدل می‌تواند به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران در تخصیص بهینه آب موجود در پشت سد برای کاربری‌های مختلف نظیر اقتصادی- اجتماعی، فنی و زیست‌محیطی مساعدت نماید. مدل IWAM اقدام به مقایسه سه روش مدل عملکرد مخزن^{۲۶}، مدل تحلیل اقتصادی^{۲۷} و مدل تخصیص آب^{۲۸} می‌کند. این مدل می‌تواند مسأله تخصیص منابع آب را به صورت دو هدفه بهینه کند. دو هدف جداگانه که شامل مدل بیشینه-سازی رضایت‌بخشی و بیشینه‌سازی سود اقتصادی شبکه توسط بخش‌های نیازمند است. در این مطالعه از تکنیک وزن‌دهی یا تکنیک شبیه‌سازی تساوی قیود جهت تبدیل مسائل چندهدفه به تابع یک هدفه استفاده شده است. ویژگی مهم این مسأله این است که پاسخ تک هدفه به راحتی به کمک برنامه‌ریزی خطی قابل حل است.

²⁴. United Nation Economical and Social Comission for Asia and the Pacific

²⁵. IWAM

²⁶. ROM

²⁷. EAM

²⁸. WAM

خلقی و حافظ پرست در سال ۱۳۸۵ به بررسی حوضه آبریز رودخانه حبله رود پرداختند که نتایج استفاده از مدل WEAP در مدیریت منابع آب این بخش از حوضه حبله رود نشان می‌دهد که اراضی داخل شبکه آبیاری دشت گرمسار مشکل کمبود آب دارند و در شرایط حاضر میزان متوسط کمبود سالانه اراضی بیشتر از ۶٪ می‌باشد که باید کمتر شود و سطح زیر کشت کاهش یابد و یا با افزایش راندمان آبیاری، توسعه طرح‌های آبیاری تحت فشار، افزایش راندمان انتقال آب و یا ایجاد منابع جدید مثل احداث سد از این امر جلوگیری شود و اراضی خارج از دشت قابل توسعه می‌باشد.

اریک آنسینک و آرچان رویجس^{۲۹} (۲۰۰۸)، در تحقیقی با عنوان تغییر اقلیم و پایداری در راستای تخصیص منابع آب، سازش در تخصیص آب از رودخانه را در بین کشورهایی که در امتداد ساحل رودخانه قرار دارند مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از نظریه بازی^{۳۰} برای مدل کردن تخصیص منابع آب استفاده شده است. تغییر اقلیم و اثرات آن بر ثبات در تخصیص منابع آب و انتخاب قوانین در این پژوهش لحاظ گردید. نتایج نشان داد که کاهش در میانگین جریان رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم، سازش در تخصیص منابع آب رودخانه را کاهش داده است.

فرهنگی و بزرگ حداد (۱۳۸۹)، جهت ارزیابی معیارهای تخصیص در مدل‌های مدیریت سیستم مخازن حوضه کارون اقدام به مقایسه دو مدل شبیه‌سازی WEAP و MODSIM با مدل بهینه‌سازی غیرخطی Lingo نمودند. نتایج تحقیقات ایشان حاکی از آن است که در بهره‌برداری تک مخزن چنانچه هدف رسیدن به اعتمادپذیری مطلوب باشد، می‌توان از مدل‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. به عبارت دیگر استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی منجر به افزایش ۳۸ درصدی معیار کمبود نسبی می‌شود، حال آن‌که مقدار معیارهای اعتمادپذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری یک سیستم در مدل‌های شبیه‌سازی اختلاف زیاد دو برابری با مدل بهینه‌سازی نشان دادند.

هلقی و وفایی جوان (۱۳۸۹) به مطالعه حوضه آبریز رامیان در استان گلستان پرداختند. در این تحقیق از برنامه‌ریزی خطی برای برآورده کردن حداکثر نیازها و حداکثر جریان‌های موردنظر

²⁹Erik Ansink & Arjan Ruijs

³⁰Games Theory

رودخانه‌ای با در نظر گرفتن اولویت‌بندی نیازها، درجه برتری منابع موجود استفاده و بر اساس رابطه بیلان آبی و سایر محدودیت‌ها، برنامه‌ریزی منابع آب حوضه رامیان در محیط نرم‌افزار WEAP انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد ضمن کارایی بالای این نرم‌افزار، حداقل حجم مفید موردنیاز برای تأمین نیازهای حوضه رامیان ۱۶ میلیون مترمکعب با حجم تنظیمی ۳۲/۹ میلیون مترمکعب می‌باشد. درنهایت حجم آب اختصاص‌یافته برای شرب با معیار تأمین ۹۵٪ از مواقع سال ۱۷ میلیون مترمکعب توصیه می‌شود و متوسط مجموع حجم آب رهاشده در رودخانه یعنی مجموع آب کشاورزی، ۳۳ میلیون مترمکعب و محیط‌زیست و سرریزی از مخزن ۳۳/۴ میلیون مترمکعب می‌باشد.

جانسون و همکاران (۲۰۱۱) برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و توسعه‌ی سناریوهای مدیریتی، از مدل WEAP، به‌منظور بررسی پتانسیل آینده‌ی آب در یک حوضه‌ی خشک در جنوب بریتیش کلمبیا در کشور کانادا استفاده کردند. از یافته‌های تحقیق، این مسأله را می‌توان مشاهده کرد که یک استراتژی "کسب و کار معمولی" اجازه نخواهد داد تا کل تقاضای آب در این حوضه در آینده برآورده شود. این تحقیق فراتر از کاربردهایش برای منطقه‌ی مورد مطالعه، همچنین یک روش استفاده از ابزار مدل‌سازی قابل دسترس را نشان می‌دهد که با آن می‌توان دانش و اطلاعات را از زمینه‌های مختلف: علوم آب‌وهوا، هیدرولوژی جنگل، مدیریت سیستم‌های آبی و اکولوژی رود جهت کمک به تصمیم‌گیری در مورد زمین و آب یکپارچه نمود. روش‌هایی که در این تحقیق بسط داده شده است مربوط به مدیران آب در دیگر نقاط کانادا و جهان هم هست که با توجه به افزایش رقابت بر سر منابع آب، به‌عنوان جابجایی رژیم‌های جریان‌ی با تغییرات استفاده از زمین و آب‌وهوا، با چالش‌های مشابهی مواجه‌اند.

شوریان و موسوی (۱۳۹۰)، با استفاده از الگوریتم PSO که در آن مدل یکپارچه مدیریت حوضه آبریز MODSIM به‌عنوان موتور شبیه‌ساز مورد استفاده قرار گرفته است، مسأله طراحی و بهره‌برداری از یک سیستم منابع آب با المان‌های ذخیره، پمپاژ و انتقال مورد بررسی قراردادند. هدف در این تحقیق کمینه نمودن هزینه خالص کل تحلیل شده است. این مطالعه که برای غرب کشور، یعنی

حوضه دهگلان-قروه صورت گرفته است انتظارات کلی در زمینه سیستم‌های منابع در سطح حوضه را برآورده نموده است.

دروگوز و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله‌ای به بررسی منابع آبی و تخصیص آن‌ها در منطقه MENA پرداختند. نتایج این تحقیق به روشنی نشان می‌دهد که برای منطقه‌ی تحت مطالعه تغییرات اقلیم در پیش‌بینی کمبود آب در دهه‌های آینده عامل کوچکی است. اگرچه باوجود کمبود آب شدید در منطقه این جزء اقلیمی باید در فرآیند طراحی مورد استفاده قرار گیرد. تقاضا چیزی در حدود ۵۰٪ و تقاضای برآورد نشده نیز در حدود ۳۷٪ در حال افزایش است.

زارع‌زاده و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهشی بر روی حوضه قزل‌اوزن (رودخانه سفیدرود)، به بررسی تخصیص منابع آب تحت اثر تغییر اقلیم پرداختند. بر اساس این مطالعه که به کمک نرم‌افزار WEAP صورت گرفت، اطلاعات فعلی حوضه تحت سناریوهای مختلف به کمک مدل مذکور اجرا گردید و نتایج آن برای بالادست در دوره‌های آینده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که با توجه به تغییرات اقلیمی مورد انتظار در آینده آب‌بران در شهرستان‌های پایین‌دست، دچار آسیب‌پذیری بالایی خواهند شد. ازاین‌رو جهت کاهش پتانسیل منازعات پیش‌بینی‌شده، اقدام به ارائه روشی جهت تخصیص عادلانه نمودند.

قزلباش (۱۳۹۲) با مطالعه در حوضه آبریز سد مهاباد و مدل‌سازی این حوضه در WEAP درنهایت به این نتیجه رسید که سناریوی ترکیبی افزایش جمعیت شهر مهاباد طی سال‌های آتی با سرانه مصرف کمتر نسبت به سناریوی مرجع و کاهش سطح زیر کشت محصولات باغی و تخصیص آن به محصولات زراعی و افزایش راندمان به دلیل بالاتر بودن درصد تأمین بالا بهترین گزینه می‌باشد.

فصل سوم

منطقه‌ی تحقیق و اطلاعات مورد استفاده

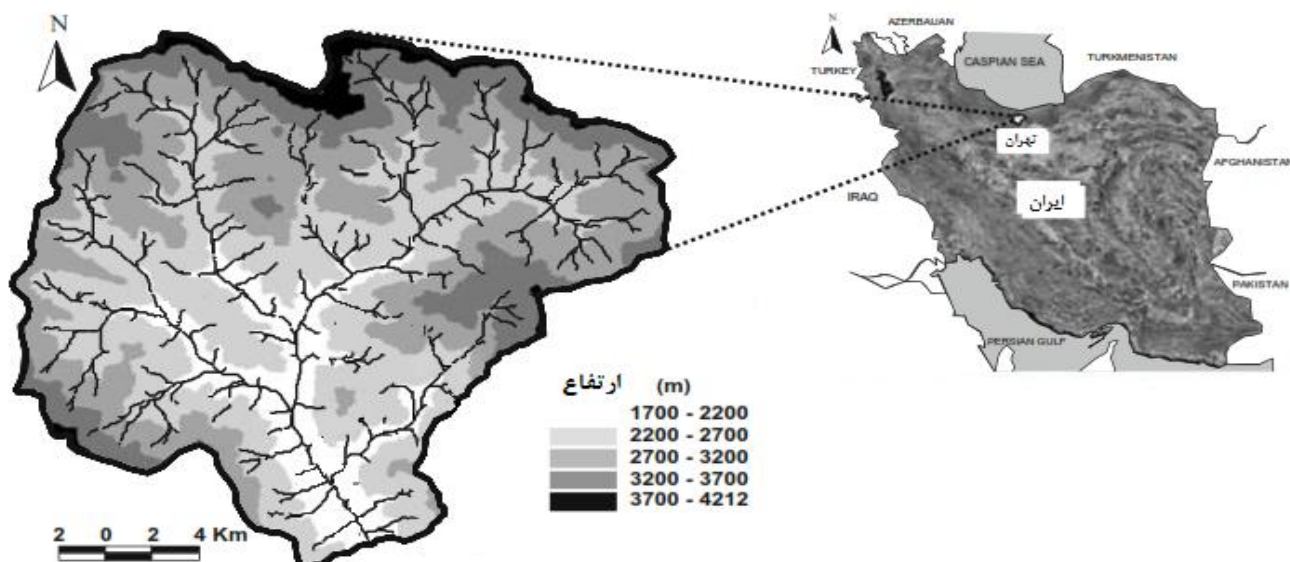
در این فصل ابتدا به معرفی حوضه مورد مطالعه پرداخته خواهد شد. سپس در مورد اطلاعات مورد نیاز برای انجام این پژوهش و همچنین مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار مطالبی آورده شده است.

۳-۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد لتیان از لحاظ تقسیمات کشوری در شمال شرقی شهر تهران در حدفاصل طول-های شرقی ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۵ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه می‌باشد و به‌طور کامل در محدوده فرمانداری شهرستان شمیرانات است که با پنج شهرستان نور، آمل، دماوند، کرج و تهران مرز مشترک دارد و از دو بخش (لواسان و رودبار قصران) و سه دهستان (لواسان بزرگ- لواسان کوچک- رودبار قصران) تشکیل شده است. این حوضه از شمال به حوضه آبریز سد لار، از غرب به حوضه آبریز کرج، از جنوب به حوضه آبریز شمال تهران و از شرق به حوضه آبریز دماوند محدود می‌شود. این حوضه بر اساس اهمیت شکل‌گیری رود-های آن عموماً در مطالعات آبخیزداری به ۹ زیر حوضه تقسیم شده است.

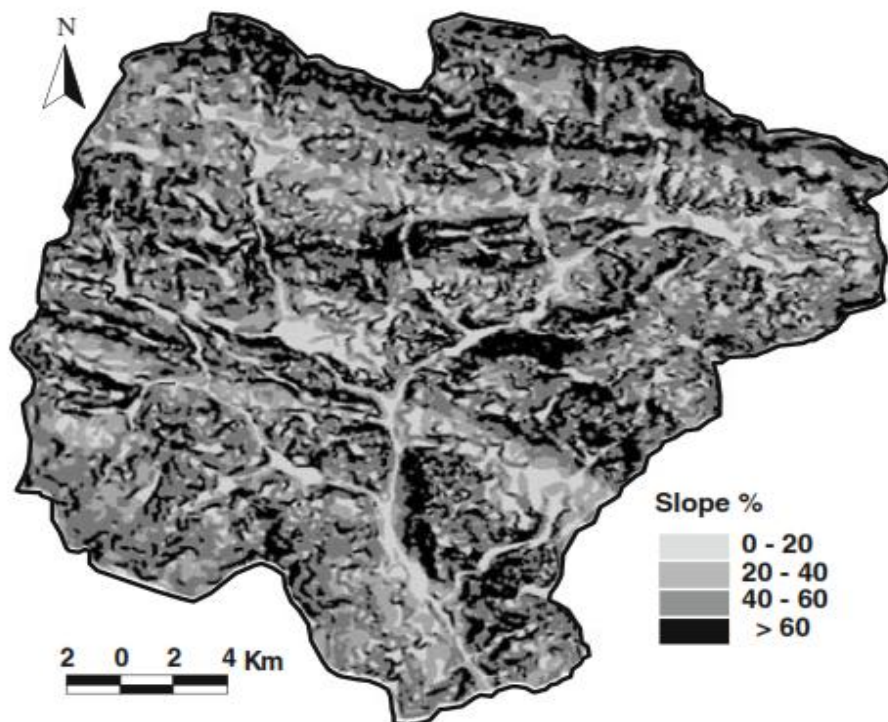
حوضه رودخانه جاجرود به‌عنوان یکی از زیر حوضه‌های سد لتیان در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است. مساحت منطقه بالادست ایستگاه هیدرومتری رودک در ورودی مخزن سد لتیان، در حدود ۴۳۵/۵ کیلومتر مربع می‌باشد. مدل رقوم ارتفاعی^{۳۱} حوضه از نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ که توسط سازمان ملی جغرافیایی ایران در سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۸۷ و ۱۹۹۳ تهیه شده بود، به دست آمد. سپس به شبکه‌های ۵۰ متری تبدیل شد. شکل (۳-۱) موقعیت حوضه لتیان در ایران و نقشه دقیق حوضه بالادست رودک، همراه با توپوگرافی و شبکه آبراهه‌های آن را نشان می‌دهد.

³¹. DEM

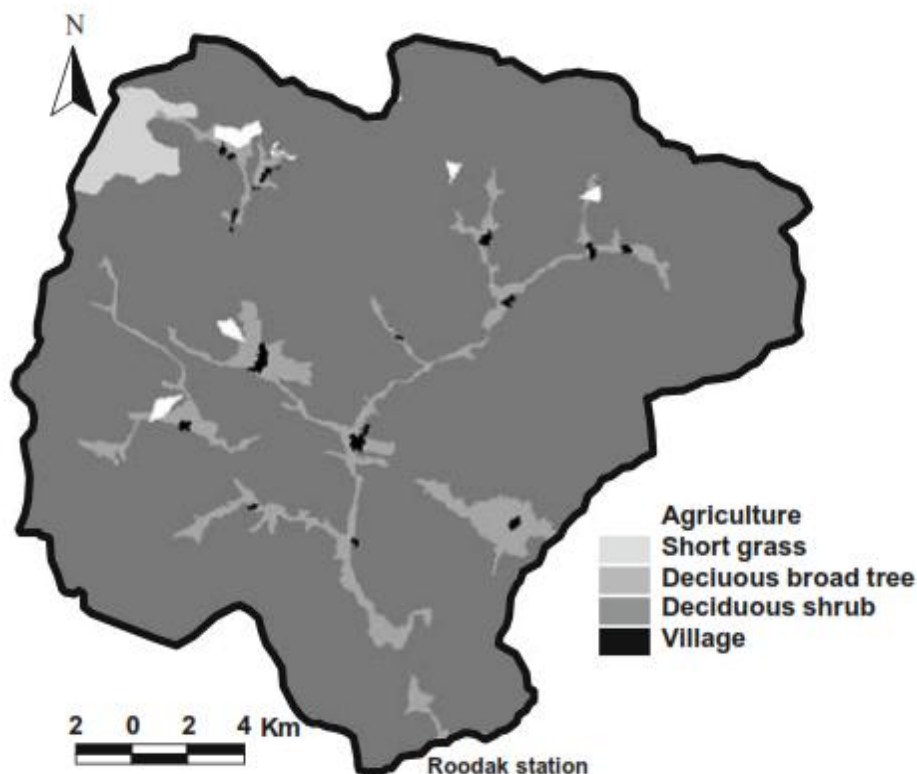


شکل (۱-۳) موقعیت حوضه سد لتیان در ایران و نقشه توپوگرافی زیر حوضه بالادست ایستگاه رودک (زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۹b)

این حوضه کوهستانی است و ارتفاع آن از ۱۷۰۰ متر تا ۴۲۱۲ متر تغییر می‌کند. ارتفاع متوسط حوضه ۲۸۳۰ متر و شیب متوسط آن همان‌طور که در شکل توزیع شیب (۲-۳) نشان داده شده است در حدود ۴۵/۶٪ می‌باشد. طول بلندترین آبراهه در این حوضه ۳۲/۵ کیلومتر است.

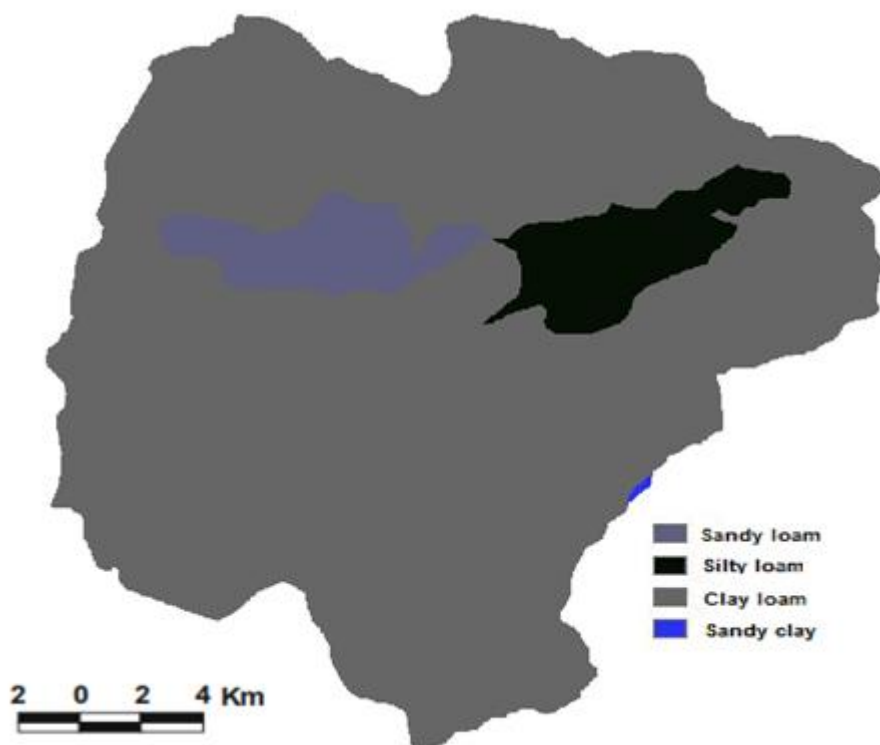


شکل (۲-۳) نقشه شیب حوضه جاجرود (زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۹b)



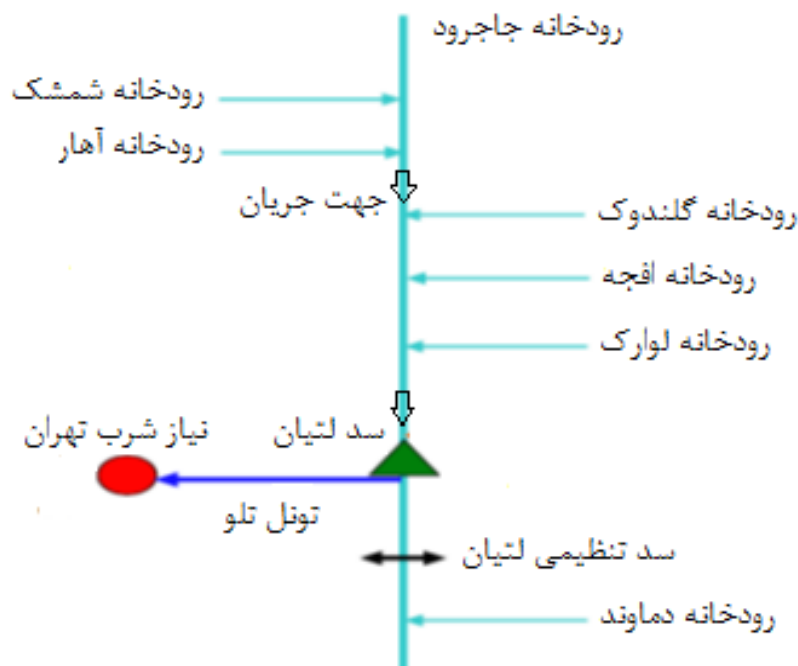
شکل (۳-۳) نقشه کاربری اراضی حوضه جاجرود (زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۹b)

اطلاعات پوشش اراضی منطقه نیز از موسسه تحقیقات حفاظت خاک و مدیریت منابع آب ایران (SCWMRI) (۲۰۰۶) و اطلاعات فتاحی آرکادانی و همکاران (۲۰۰۰) تهیه شد. آخرین نقشه کاربری اراضی منطقه با شبکه‌های ۵۰ متری از ۵ گونه متفاوت پوشش اراضی تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل (۳-۳) نیز نشان داده شده است ۹۱٪ حوضه از درختچه‌های برگ‌ریز، ۶/۲٪ از درختان پهن‌برگ‌ریز، ۱/۱۸٪ از چمن کوتاه و ۱٪ باقی‌مانده نیز از زمین‌های کشاورزی و مناطق غیرقابل نفوذ که بیشتر شامل روستاها می‌باشد، پوشیده شده است. همان‌طور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده، خاک حوضه از سه بافت عمده‌ی متفاوت تشکیل شده است. خاک غالب آن رسی لومی است که حدود ۸۹/۴٪ از سطح حوضه را پوشانده است، سیلتی لومی ۵/۶٪ و شنی لومی ۴/۸٪ از حوضه را در بر گرفته است (زینی‌وند و دسمیت، ۲۰۰۹b).



شکل (۳-۴) نقشه بافت خاک حوضه جاجرود (زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۹b)

علاوه بر رودخانه جاجرود، چندین جریان سرشاخه‌ای دیگر نیز به مخزن سد لتیان وارد می‌شود. سد لتیان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شهر تهران به شمار می‌آید. سد لتیان از نوع بتنی، وزنی و پایه‌دار و به‌منظور کنترل و مهار آب رودخانه جاجرود و لوآرک بوده که در سال ۱۳۴۰ کار احداث آن آغاز و در اردیبهشت سال ۱۳۴۶ به بهره‌برداری رسید. اهداف ساخت این سد عبارت‌اند از: تأمین آب شرب، تأمین و تنظیم آب کشاورزی و تولید نیروی برق آبی. گنجایش دریاچه این سد در زمان احداث ۹۵ میلیون مترمکعب و حجم آن در حال حاضر ۷۳ میلیون مترمکعب است. دو واحد نیروگاه برق آبی به قدرت ۴۵ مگاوات نیز در محل سد احداث شده است. آب از طریق تونل تلو به قطر ۲/۷ متر با طول ۹ کیلومتر از سد لتیان به تصفیه‌خانه‌های شماره ۳ و ۴ تهران پارس انتقال می‌یابد و پس از تصفیه وارد شبکه آب‌رسانی شهری می‌گردد (حسینی، ۱۳۹۲). پیکربندی سیستم منابع و مصارف آب سد لتیان در شکل ۳-۵ ارائه شده است.



شکل (۳-۵) پیکربندی سیستم منابع و مصارف سد لتیان

ارتفاع متوسط سد لتیان ۱۰۷ متر می‌باشد. طبق محاسبات اولیه، این سد قادر بوده است ۸۰ میلیون مترمکعب از آب مصرفی تهران و ۷۵ میلیون کیلووات ساعت برق و ۱۶۰ میلیون مترمکعب آب آبیاری دشت ورامین و گرمسار را تأمین نماید. بر اساس مطالعات انجام‌شده، کل رسوبات سد از شروع بهره‌برداری تا سال ۵۲-۵۱ برابر ۸/۸۲۰ میلیون تن برآورد شده است و طبق گزارش مقامات مسئول سد، ظرفیت دریاچه‌های تخلیه‌کننده رسوبات به نحوی است که سالیانه به‌طور متوسط ۲۰ درصد از رسوبات به کمک این دریاچه‌ها تخلیه می‌گردد، با این حساب رسوبات جمع شده در پشت سد در ۶ سال قبل از سال آبی ۵۲-۵۱ برابر ۷/۰۵۶ میلیون تن می‌باشد، با این رقم، متوسط رسوبات سالیانه ورودی به سد ۱/۴۷ میلیون تن و متوسط سالیانه تجمع رسوبات در پشت سد ۱/۱۷۶ میلیون تن برآورد شده است. طبق نظر کارشناسی فوق تاکنون می‌بایست بیش از ۴۰ میلیون تن رسوب در پشت سد جمع شده باشد و این موضوع یعنی تخلیه ۴۰ میلیون تن خاک ارتفاعات و آبخیز حوضه لتیان، کاهش پوشش گیاهی، کاهش نفوذپذیری خاک در مقابل برف و باران،

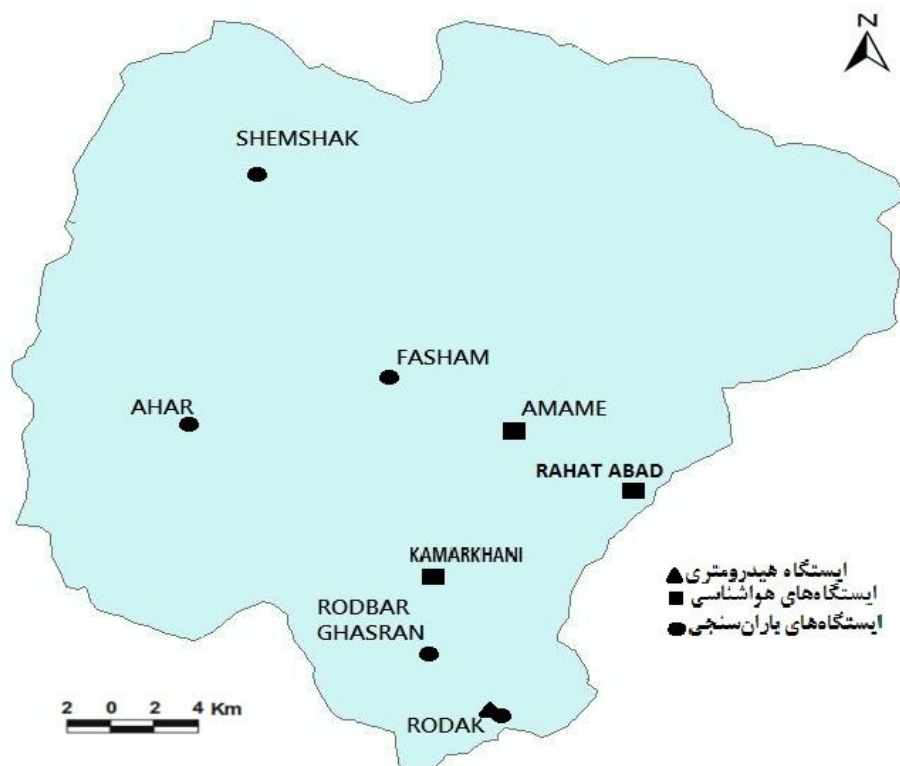
بالا رفت شدت تخریب و فرسایش، خشک شدن بسیاری از چشمه‌ها و ... (گزارش مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف).

حوضه لتیان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز تهران است و در حال حاضر آب مورد نیاز بخش عظیمی از ساکنان تهران متکی به این حوضه است که با توجه به عواملی نظیر توسعه‌ی فزاینده و بدون کنترل تهران به سمت آبخیزها، گرایش به ویلا سازی در نقاط کوهستانی، از بن بست خارج شدن راه‌های ارتباطی حوضه نظیر راه آهار به شهرستانک در حوضه کرج (از زیر پروژه‌های طرح مخرب آزادراه تهران- شمال)، کوتاه شدن عمر مفید سد به علت میزان بالای رسوبات ورودی، اجرای طرح‌های گردشگری بدون توجه به ظرفیت و توان حوضه، چرای دام، وجود کارخانه‌های آلوده‌ساز نظیر کارخانه گچ تهران در مجاورت سد، معادن گچ و زغال سنگ و غیره شدیداً در معرض تهدید می‌باشد (گزارش وضعیت حریم رودخانه فشم - اداره آب شهرستان فشم، ۱۳۸۲).

به‌منظور اجرای برنامه‌های مدیریتی مختلف داشتن چشم‌اندازی روشن تحت تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه امری ضروری به شمار می‌رود. لذا، در این تحقیق سعی بر آن است تا با بررسی تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه به تأثیر آن بر رواناب و موجودیت آب سطحی در دوره‌های آتی پرداخته شود و بر اساس این تغییرات، سناریوهای مدیریتی برای آینده در بحث تخصیص منابع آب لحاظ گردد. از این رو سعی شد تا با استفاده از کامل‌ترین مجموعه آماری موجود، شبیه‌سازی به صورت هر چه بهتر صورت پذیرد. در جدول (۳-۱) مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی استفاده‌شده در تحقیق مشاهده می‌شود که میانگین دما و بارش آورده شده در این جدول به صورت متوسط روزانه ۳۰ سال اخیر است.

جدول (۱-۳) اطلاعات ایستگاه‌های اقلیمی و باران‌سنجی مورد استفاده در حوضه آبریز لتیان

نام ایستگاه	مختصات ایستگاه		ارتفاع ایستگاه (m)	میانگین دما روزانه (°C)	میانگین بارش روزانه (mm)	طول دوره آماری (سال)	نوع ایستگاه
	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی					
امامه	۳۵-۵۴-۰۰	۵۱-۳۴-۰۰	۲۲۴۸	۱۰,۴۹	۱,۸۲	۴۴	تبخیرسنجی
آهار	۳۵-۵۶-۰۰	۵۱-۲۸-۰۰	۲۱۰۰	---	۱,۸۵	۴۱	باران‌سنجی
راحت آباد	۳۵-۵۴-۰۰	۵۱-۳۷-۰۰	۲۴۰۰	۹,۹۱	۱,۸۷	۴۲	تبخیرسنجی
رودبار قصران	۳۵-۵۲-۰۰	۵۱-۳۲-۰۰	۱۸۹۹	---	۱,۶۹	۴۰	باران‌سنجی
رودک	۳۵-۵۰-۰۰	۵۱-۳۳-۰۰	۱۶۹۰	---	۱,۵۸	۴۴	باران‌سنجی
شمشک	۳۶-۰۰-۰۰	۵۱-۳۰-۰۰	۲۷۰۰	---	۱,۸۸	۳۷	باران‌سنجی
فشم	۳۵-۵۶-۰۰	۵۱-۳۲-۰۰	۱۹۴۰	---	۱,۸۹	۳۹	باران‌سنجی
کمرخانی	۳۵-۵۳-۰۰	۵۱-۳۲-۰۰	۱۹۰۰	۱۰,۹۲	۱,۵۲	۵۰	تبخیرسنجی



شکل (۳-۶) نقشه‌ی موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در داخل حوضه آبریز سد لتیان

به‌طور کلی در انجام این پژوهش به‌منظور بررسی تغییر اقلیم به اطلاعاتی از جمله دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعت آفتابی در مقیاس روزانه در ۳۰ سال دوره زمانی پایه، در قسمت مدل‌سازی بارش رواناب به اطلاعات دمای متوسط، بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و دبی به صورت روزانه و برای شبیه‌سازی تخصیص منابع برآورد شده به اطلاعات ماهانه‌ی تخصیص‌ها، آمار ورودی آبدهی، پارامترهای هیدرولوژی و روابط هندسی سد لتیان نیاز است.

۳-۳- تغییر اقلیم و اثرات آن

به تغییرات بلندمدت در الگوی رفتاری متوسط آب‌وهوای یک منطقه که ناشی از عوامل طبیعی و دخالت بشر در طبیعت می‌باشد، تغییر اقلیم گفته می‌شود (آلن و همکاران^{۳۲}، ۲۰۰۰). تنها عاملی که به‌صورت غیرطبیعی بر سامانه اقلیم کره زمین مؤثر است، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. مطالعات حاکی از آن است که پس از انقلاب صنعتی، به دلیل افزایش روزافزون صنایع و افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، تعادل میزان گازهای گلخانه‌ای در جو زمین برهم‌خورده و مقادیر آن به‌ویژه میزان گاز دی‌اکسید کربن افزایش یافته است. با افزایش این گازها، امواج مادون‌قرمز بازتاب شده از سطح زمین بیش‌ازپیش توسط گازهای گلخانه‌ای جذب‌شده و افزایش دمای جو زمین را در پی خواهد داشت. گرم‌تر شدن جو کره زمین بر وضعیت سایر اجزای سامانه اقلیمی کره زمین تأثیر گذاشته و پدیده تغییر اقلیم را موجب می‌گردد (بید و همکاران، ۲۰۰۱).

باوجود عدم قطعیت‌های بسیار تغییر اقلیم و اثرات آن، ۳ اثر عمده تغییر اقلیم بر منابع آب جهانی تعیین شده است. این اثرات بر گردش عمومی هوا، بارش و دما گزارش شده‌اند (آرنل^{۳۳}، ۱۹۹۹). از این‌رو، دانشمندان اطمینان دارند که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای منجر به افزایش میانگین دمای سطح جو کره زمین در دوره‌های آتی خواهد شد (زارع‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). به علت نامشخص

³².Allen et al

³³.Arnell

بودن چگونگی تغییرات متغیرهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای، ترسیم چشم‌اندازی روشن برای وضعیت‌های محتمل در آینده دشوار بوده، بنابراین تعیین وضعیت‌های ممکن در دوره‌های آتی راه‌حلی جایگزین می‌باشد که به آن سناریو گفته می‌شود. با این حال باید توجه داشت که یک سناریوی اقلیمی یک پیش‌بینی کننده آب‌وهوا نیست (IPCC-TGCIا، ۱۹۹۹).

۳-۳-۱- مدل‌های AOGCM^{۳۴}

این مدل‌ها بر اساس قوانین فیزیکی که توسط روابط ریاضی بیان می‌شوند، استوار می‌باشد. این روابط در یک شبکه سه‌بعدی در سطح کره زمین حل شده و به‌منظور شبیه‌سازی اقلیم کره زمین، مؤلفه‌های اصلی سامانه اقلیمی (جو، سنگ‌کره، زیست‌کره، آب‌کره) در مدل‌های فرعی جداگانه جفت شده و مدل‌های AOGCM را تشکیل می‌دهند (زارع‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). اصل بنیادین در این‌گونه مدل‌ها، فهم و شناسایی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر سامانه اقلیمی و تأثیر تغییرات اجتماعی و اقتصادی جوامع بر آن‌ها است که بر اساس توصیه هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^{۳۵}، معتبرترین مدل‌ها جهت شبیه‌سازی فرآیندهای موجود در یک سامانه اقلیمی بر مبنای افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌باشند (مساح بوانی و مرید، ۱۳۸۵).

مدل‌های چرخش عمومی هوا GCM می‌توانند بهترین اطلاعات درباره پاسخ جو به افزایش تمرکز گازهای گلخانه‌ای را فراهم کنند. این مدل‌ها وابسته به زمان و دارای شبیه‌سازی‌های عددی سه‌بعدی شامل حرکات جوی، تبادلات گرمایی و اندرکنش‌های یخ، اقیانوس و خشکی است (دراکاپ و ویکونا، ۲۰۰۵). دقت مکانی افقی این مدل‌های اقلیمی در سطح خشکی‌های کره زمین ۲۵۰ کیلومتر و دقت مکانی قائم آن برابر ۱ کیلومتر می‌باشد. این در حالی است که دقت مکانی قائم آن در اقیانوس‌ها ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر و دقت مکانی افقی برابر ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد (فرزانه، ۱۳۸۹).

³⁴ Atmospheric Ocean General Circulation Model

³⁵ IPCC

هم‌اکنون بیش از ۴۰ سازمان مختلف در جهان مدل‌های گردش عمومی مختلفی را برای کره زمین توسعه داده‌اند. برخی از این مدل‌ها عبارت‌اند از: مدل‌های CSIRO^{۳۶} از مرکز تحقیقاتی CSIRO در استرالیا، CGCM^{۳۷} از مرکز CCCMA^{۳۸} کشور کانادا، GFDL-R30^{۳۹} از آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیک آمریکا و HadCM3^{۴۰} از مرکز تحقیقاتی UKMHC^{۴۱} کشور انگلستان (IPCC-TGCIA). (۲۰۰۷).

در این پژوهش مدل اقلیمی مورد استفاده مدل HadCM3 می‌باشد که توسط مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم Hadley انگلستان توسعه یافته است. در این مدل‌ها جهت شبیه‌سازی سناریوهای مختلف انتشار از ۸ متغیر اقلیمی سطح کره زمین از قبیل میزان بارش، متوسط فشار سطح دریاها، تابش خورشیدی، میانگین دمای هوا، دمای نقطه شبنم، سرعت باد (در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین)، حداقل دمای هوا و حداکثر دمای هوا تا سال ۲۱۰۰، استفاده شده است (IPCC-DDC). (۱۹۹۸).

۳-۳-۲- سناریوهای انتشار

از آنجاکه تغییرات اقلیمی آینده به شدت به فعالیت‌های بشری در سال‌های آتی بستگی دارد، لذا مدل‌های اقلیمی با استفاده از داده‌های سناریوهای انتشار اجرا می‌شوند. نخستین سری از مجموعه سناریوهای انتشار موسوم به (IS92a - IS92f) در سال ۱۹۹۲ توسط IPCC ارائه گردید که بیان‌گر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای با نرخ ثابت تا سال ۲۱۰۰ بود. در سال ۱۹۹۶ به منظور به‌روزرسانی، سری جدید سناریوهای انتشار موسوم به SRES^{۴۲} در یک گزارش ویژه توسط IPCC ارائه شد. در این گزارش، ۴۰ سناریو برای آینده جهان ارائه شده است که در ۴ گروه اصلی یا خانواده

³⁶ Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

³⁷ Coupled Global Climate Model

³⁸ Canadian Center for Climate Modeling and Ananysing

³⁹ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

⁴⁰ HADley Center Model

⁴¹ United Kingdom Met Office Hadley Center

⁴² Special Report on Emission Scenario

سناریوهای A1، A2، B1، B2 قرار می‌گیرند (IPCC، ۲۰۰۱). اساس تقسیم‌بندی این سناریوها، پیشرفت‌های اقتصادی-اجتماعی، تجمع گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق می‌باشد (IPCC، ۲۰۰۱).

این سناریوها بیشتر افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی را در نظر می‌گیرند؛ البته در برخی شاخه‌های سناریوهای خانواده B1 مصرف سوخت‌های فسیلی در سال ۲۱۰۰ از سال ۱۹۹۰ کمتر در نظر گرفته شده است. خانواده سناریوهای انتشار به سناریوهایی اطلاق می‌شود که دارای موضوع و زمینه مشترکی هستند. در گزارش‌های سوم و چهارم IPCC بر روی شش خانواده از سناریوهای انتشار بحث شده است که عبارت‌اند از: A1FI، A1B، A1T، A2، B1 و B2. مطابق آنچه در این گزارش‌ها آمده است، تعاریف برخی از این سناریوهای انتشار به این شرح می‌باشد:

الف - سناریوی A1

در این سناریو جهان یکپارچه در نظر گرفته می‌شود. مشخصات خانواده A1 به این شرح می‌باشد:

- ۱- رشد اقتصادی سریع.
- ۲- جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ به ۹ میلیارد نفر رسیده و پس از آن به تدریج کاهش می‌یابد.
- ۳- گسترش سریع فناوری‌های جدید و کارآمد.
- ۴- در دنیای همگرا درآمد و روش زندگی در بین مناطق باهم همگرا می‌شوند. گسترش سریع تعاملات اجتماعی و فرهنگی در دنیا.

بر مبنای تأکید بر فناوری، سه زیرمجموعه برای خانواده A1 وجود دارند که عبارت‌اند از:

A1FI- تأکید بر استفاده از سوخت‌های فسیلی.

A1B- تأکید بر استفاده متعادل از انواع منابع انرژی.

A1T- تأکید بر استفاده از منابع انرژی غیر فسیلی.

ب- سناریوی A2

یکی از مشخصات سناریوی A2 آن است که برخلاف سناریوی A1، در آن دنیا همگرا در نظر گرفته نمی‌شود و مشخصه‌های مهم این سناریو موارد زیر می‌باشند:

۱- دنیایی که در آن کشورها به‌طور مستقل عمل کرده و به خود متکی هستند.

۲- جمعیت دنیا به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد.

۳- توسعه اقتصادی، منطقه محور است.

ج- سناریوی B1

سیر خانواده سناریو B1 همچون سناریوی A1 یک جهان همگرا با رشد پایین جمعیت، اما با تغییرات سریع در ساختارهای اقتصادی جهت ارائه خدمات و اطلاعات اقتصادی، کاهش در فزونی کالا و معرفی منابع پاک و کارآمد فن‌آوری، ترسیم می‌کند. در این سناریو بر روی راه‌حل‌های جهانی جهت پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، از جمله بهبود دارایی خالص، بدون طرح‌های اقلیمی ویژه، تأکید شده است.

د- سناریوی B2

در سناریوی B2 دنیا همانند سناریوی A2 واگرا بوده با این تفاوت که دوستدار محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود. مشخصات این سناریو به شرح ذیل می‌باشند:

۱- جمعیت به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، اما سرعت رشد آن نسبت به A2 کمتر است.

۲- تأکید بر راه‌حل‌های محلی به‌جای در نظر داشتن راه‌حل‌های جهانی برای ثبات اقتصادی،

اجتماعی و زیست‌محیطی.

۳- توسعه اقتصادی در حد متوسط.

۴- تغییرات تکنولوژیکی سریع بوده اما نسبت به A1 و B1 کمتر و پراکنده‌تر خواهد بود.

اگر بخواهیم مطالب بالا را به‌طور خلاصه ارائه دهیم، می‌توان آن را به‌صورت جدول (۲-۳) خلاصه

کرد:

جدول (۳-۲) خلاصه ویژگی‌های سناریوهای تغییر اقلیم

تأکید بیشتر بر جنبه‌های زیست‌محیطی	تأکید بیشتر بر جنبه‌های اقتصادی	
B1 توسعه پایدار زیست‌محیطی افزایش دما (۱/۱ تا ۲/۹ درجه سلسیوس)	A1 رشد اقتصادی سریع (A1FI, A1T و A1B) افزایش دما (۱/۴ تا ۶/۴ درجه سلسیوس)	دنیای همگرا (جهانی‌سازی)
B2 توسعه پایدار زیست‌محیطی محلی افزایش دما (۱/۴ تا ۳/۸ درجه سلسیوس)	A2 توسعه اقتصادی منطقه محور افزایش دما (۲ تا ۵/۴ درجه سلسیوس)	دنیای واگرا (منطقه محوری)

(بابائیان، ۱۳۹۱).

نخستین مرحله در انتخاب سناریو، شناسایی متغیرهای اقلیمی موردنیاز و سپس تعیین سناریوهایی است که پاسخگوی نیازها باشند. پس از انجام این مرحله، چنانچه زمان استفاده از تمام سناریوها، جهت برآوردن نیازها موجود نباشد، می‌توان سناریویی را که بیان‌گر حداکثر و متوسط تغییرات است را برگزید. در این تحقیق نیز سعی بر آن است تا جای ممکن انتخاب سناریوها بر اساس مطالب فوق باشد که بتواند طیف وسیعی از تغییرات دوره‌های آتی را به‌خوبی منعکس نماید.

سناریوهای منتخب در این مطالعه عبارت‌اند از: A1B، A2 و B1. گزینش این سناریوها و استفاده از آنها به‌موازات یکدیگر، این امکان را فراهم می‌آورد تا عدم قطعیت ناشی از نتایج مدل را تحت تأثیر هر یک از سناریوها با یکدیگر مقایسه کرده و به تحلیلی جدید از منابع عدم قطعیت دست‌یافت. در جدول (۳-۳) به‌اختصار ویژگی هر یک از این سناریوها آورده شده است.

جدول (۳-۳) ویژگی‌های سناریوهای انتشار

A1F1	A1B	A2	A1T	B1	B2	گروه سناریو
پایین	پایین	پایین	بالا	پایین	متوسط	رشد آلودگی
خیلی بالا	خیلی بالا	خیلی بالا	متوسط	بالا	متوسط	رشد تولید ناخالص ملی ^{۴۳}
خیلی بالا	خیلی بالا	بالا	متوسط رو به بالا	پایین	متوسط	مصرف انرژی
متوسط به پایین	پایین	پایین	پایین	بالا	متوسط	تغییر کاربری اراضی
بالا	متوسط	متوسط	پایین	پایین	متوسط	منابع نفتی و گازی موجود
سریع	سریع	سریع	کند	متوسط	متوسط	تغییرات فن آوری
زغال سنگ، نفت و گاز	متعادل	سوخت غیر فسیلی	منطقه‌ای	راندمان	پویا به‌طور معمول	تغییرات همراه

⁴³. GDP

فصل ہمارم

روش تحقیق

در این فصل با توجه به مراحل تحقیق، مبانی نظری مرتبط با هر بخش اعم از روش‌های ریزمقیاس نمایی خروجی‌های GCM، مدل ریزمقیاس نمایی لارس، مدل بارش رواناب و همچنین مدل شبیه‌سازی تخصیص مورد استفاده در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی هوا

از آنجاکه خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی هوا جهت دستیابی به چشم‌اندازهای دوره آتی و ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای به‌طور مستقیم قابل‌استفاده نیست، لذا نیازمند ریزمقیاس با توجه به رفتار اقلیمی مشاهداتی منطقه مورد مطالعه هستند. به‌طور کلی به‌منظور ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل‌های گردش عمومی هوا دو روش اصلی وجود دارد:

۱- روش‌های دینامیکی

۲- روش‌های آماری

در روش نخست معادلات حرکت هوا در شبکه‌های منظم افقی و قائم از عمق سطح زمین تا ارتفاعی نزدیک به استراتوسفر حل می‌شوند. این معادلات شامل معادلات مومنتم، بقای جرم، قانون عمومی گازها، قوانین ترمودینامیک و شناوری می‌باشند. ریزمقیاس نمایی به روش دینامیکی مستلزم برخورداری از سامانه‌های پردازشی پرسرعت و صرف وقت و هزینه بسیار است. به‌عنوان مثال، مدل‌سازی یک دوره ۱۰ ساله در محدوده کشوری به‌وسیله رایانه‌های معمولی حدود ۳ ماه زمان نیاز دارد. این روش بی‌نیاز از رفتار اقلیمی دوره مشاهداتی ایستگاه بوده و شرط اصلی برقراری روابط یادشده بر روی نقاط شبکه محاسباتی است (بابائیان، ۱۳۹۱).

دومین روش، روش ریزمقیاس نمایی آماری است که به زیرشاخه‌هایی نظیر مولدهای هواشناسی و مدل‌های رگرسیونی تقسیم می‌گردد. مدل‌های رگرسیونی اصولاً یا به‌صورت خطی و یا غیرخطی

ارتباطات بین شبیه‌سازی شونده‌ها و شبیه‌سازی کننده‌ها را نشان می‌دهد. این روش شامل زیرمجموعه‌هایی مانند رگرسیون خطی، آنالیز همبستگی کانونی^{۴۴}، شبکه عصبی و روش کریجینگ است. این روش‌ها اکثراً با ایجاد روابط رگرسیونی بین متغیرها، تعریف می‌شوند و در واقع معتبرترین ابزار جهت کوچک‌مقیاس کردن در کشور ما می‌باشند (اسپنانی، ۱۳۹۱)؛ بنابراین می‌توان گفت روش‌های آماری در ایران گزینه بهتری نسبت روش‌های دینامیکی است. روش‌های آماری دو وجه تمایز عمده با روش دینامیکی دارند: اول این‌که نیازمند رفتار مشاهداتی (گذشته) ایستگاه مورد مطالعه هستند و دوم، مدل‌سازی در یک دوره حدود ۲ تا ۳ دهه در کسری از ثانیه انجام می‌شود. حال اگر بخواهیم یکی از زیرمجموعه‌های این روش را انتخاب کنیم، می‌توانیم به روش مولدهای هواشناسی اشاره کنیم که مدل LARS-WG یکی از نرم‌افزارهایی است که بر آن اساس کار می‌کند. مدل به‌کاررفته در این تحقیق، مدل مولد اقلیمی لارس (نسخه ۵,۵) می‌باشد، لذا در ادامه به معرفی این مدل پرداخته شده است.

۴-۲-۱- ساختار مدل LARS-WG 5.5

مدل LARS-WG نخستین بار توسط راسکو^{۴۵} و همکاران (۱۹۹۱) ارائه، بازنگری و تعدیل گردید. سپس توسط زمنوف^{۴۶} و همکاران (۱۹۹۸) توسعه یافت. تاکنون نسخه‌های متعددی از این مدل ارائه گردیده است که در این مطالعه از آخرین نسخه‌ی این مدل (۵,۵) استفاده شده است. به‌طور کلی این مدل از توزیع‌های نیمه تجربی $Emp = \{a_0, a_i; h_i, i = 1, \dots, 10\}$ جهت شبیه‌سازی طول دوره‌ی خشک، تر، بارندگی و تابش روزانه خورشید استفاده می‌کند که هیستوگرامی شامل ۱۰ طبقه است و هریک از طبقات آن در فاصله $[a_{i-1}, a_i]$ تعریف می‌شود به‌طوری‌که $a_i < a_{i-1}$ و h_i فراوانی پدیده‌های مشاهداتی در طبقه i ام می‌باشد. برای تولید مقادیر متغیرهای تصادفی وضع هوا با استفاده از یک

⁴⁴. CCA

⁴⁵. Racsko et al

⁴⁶. Semenov et al

توزیع نیمه تجربی، ابتدا یکی از طبقات ده گانه به تصادف انتخاب می‌شود. سپس، با فرض تبعیت داده-ها از توزیع یکنواخت در طبقه موردنظر، یک مقدار در آن فاصله برای متغیر انتخاب می‌شود. این توزیع نیمه تجربی، انعطاف‌پذیر است زیرا با تغییر فواصل $[a_{i-1}, a_i]$ شکل توزیع فراوانی نیز تغییر می‌کند. فواصل بر اساس ویژگی‌های مورد انتظار داده‌های وضع هوا انتخاب می‌شوند. در مورد تابش خورشید، این فاصله بین حداکثر و حداقل داده‌ها، به قسمت مساوی تقسیم می‌شود، اما در مورد طول سری‌های خشک و تر و مقدار بارندگی، اندازه فاصله با افزایش شماره طبقه (i) افزایش می‌یابد. دلیل انعطاف‌پذیری فواصل در مورد ۲ متغیر اخیر آن است که معمولاً فراوانی مقادیر کم آن‌ها، بیشتر از فراوانی مقادیر بزرگ آن‌ها است و در صورتی که فواصل به صورت یکسان انتخاب شوند، ممکن است بخش اعظم فراوانی‌ها در یک فاصله قرار گیرد و کارایی مدل کاهش یابد. دماهای حداکثر و حداقل روزانه به عنوان فرآیندهای استوکاستیک تلقی می‌شوند که میانگین و انحراف معیار آن‌ها به وضعیت تر یا خشک بودن روز موردنظر مربوط شده است. مولد LARS-WG در شبیه‌سازی دماهای حداکثر و حداقل از الگوریتمی مشابه مولد ClimGen استفاده می‌کند، با این تفاوت که در این مدل، میان‌یابی روزانه پارامترهای ماهانه با استفاده از سری فوریه محدود (مرتبه ۳) صورت می‌پذیرد. این مدل توانایی مدل‌سازی دوره گذشته و آینده را دارد، اما برای هرگونه مدل‌سازی نیازمند یک سناریوی اقلیمی ویژه می‌باشد (ناصری، ۱۳۹۳).

از این مدل می‌توان جهت مدل‌سازی داده‌های گم‌شده و خلأهای آماری نیز استفاده نمود. از آنجاکه هدف این پژوهش مدل‌سازی دوره‌های آتی است، در ادامه به این بحث پرداخته خواهد شد. به منظور مدل‌سازی دوره‌های آتی، مدل بایستی در ابتدا آگاهی و شناخت کافی از رفتار آماری دوره دیدبانی داشته باشد. این شناخت با فراخوانی داده‌های روزانه مشاهداتی به مدل در بخش تحلیلی^{۴۷} مدل صورت می‌گیرد. گام بعدی در مدل‌سازی آینده انتخاب سناریوی اقلیمی ناشی از سناریوی انتشار منتخب است. برای این کار خروجی مدل گردش عمومی با سناریوی انتشار مورد مطالعه (که در این

⁴⁷. Analysis

تحقیق HadCM3 تحت سناریوهای A_2 ، B_1 و A_1B می‌باشد) از بخش مولد⁴⁸ انتخاب شده و مدل برای دوره موردنظر آینده (که در این مطالعه دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ می‌باشد) اجرا می‌گردد.

۴-۲-۲- همگنی و نرمال بودن نتایج مدل لارس

پس از بررسی‌های اولیه طول دوره آماری از نظر کفایت داده‌ها و پیش از اجرای مدل، نرمال بودن و همگنی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای استفاده از تکنیک‌های آماری ابتدا باید مشخص شود که داده‌های جمع‌آوری شده از توزیع نرمال برخوردار است یا غیر نرمال، چون در صورت نرمال بودن توزیع داده‌ها برای آزمون فرضیه‌ها می‌توان از آزمون‌های پارامتریک استفاده نمود و در غیر این صورت از آزمون‌های ناپارامتریک باید استفاده کرد. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نرمال بودن توزیع داده‌ها را نشان می‌دهد، یعنی اینکه توزیع یک صفت در نمونه را با توزیعی که برای کل داده‌ها مفروض است مقایسه می‌کند، اگر داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند امکان استفاده از آزمون پارامتریک وجود دارد و چنانچه پس از تحلیل نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف آزمون معنی‌دار بود یعنی مقدار آماره کوچک‌تر از ۰,۰۵ بود، به معنی این است که توزیع نرمال نیست و باید از آزمون ناپارامتریک استفاده کنیم (بهبودیان، ۸۴).

در مدل لارس از آزمون پارامتریک t استفاده می‌شود، پس لازمی استفاده از این مدل پیروی داده‌ها از توزیع نرمال است. مدل لارس علاوه بر محاسبه‌ی آماره‌ی کولموگروف-اسمیرنوف، آماره‌ی p -مقدار (p -value) را نیز به صورت ماهانه و فصلی محاسبه می‌کند. نتایج این مرحله در جدول (۵-۱) ارائه شده است. برای اطمینان از ریزمقیاس نمایی توسط لارس دو آماره‌ی ضریب تبیین و نش - ساتکلیف نیز با استفاده از میانگین داده‌های مشاهداتی ماهانه و میانگین داده‌های محاسباتی ماهانه

⁴⁸. Generator

محاسبه گردید و نتایج آن‌ها نیز در جدول (۵-۱) آورده شده است که همه‌ی این آماره‌ها حاکی از اطمینان بالای مدل لارس در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های موردنظر در این پژوهش می‌باشد.

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_o - X_s)^2}{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X})^2} \right) \quad (۱-۴)$$

$$R = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)(X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_s - \bar{X}_s)^2}} \right] \quad (۲-۴)$$

که در آن‌ها X_o مقدار مشاهداتی، X_s مقدار متغیر شبیه‌سازی‌شده، \bar{X} میانگین مقادیر مشاهداتی یا شبیه‌سازی‌شده می‌باشد.

شاخص ناش-ساتکلیف که میزان رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی ماهانه را نشان می‌دهد در بازه $-\infty$ تا 1 تغییر می‌کند، نزدیکی این شاخص به 1 نشان‌دهنده رابطه قوی بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده است. همچنین برای یافتن بهترین نتایج پیش‌بینی باید مقدار ضریب تبیین (R) به 1 نزدیک باشد. مقدار آماره‌ی P value می‌تواند در محدوده‌ی $0,05$ تا 1 باشد (برای سطح احتمال 95 درصد) که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد حاکی از بهتر بودن نتیجه‌ی ارزیابی است و آماره-ی کولموگروف-اسمیرنوف نیز در صورتی که بیشتر از $0,05$ باشد قابل قبول است و هرچه مقدار آن به $0,05$ نزدیک‌تر باشد، نتایج بهتر است (بهبودیان، ۸۴).

۴-۳- عدم قطعیت در تغییر اقلیم

در مطالعات تغییر اقلیم همواره در تمامی مراحل شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی توسط مدل‌های AOGCM و نیز در تصحیح خروجی این مدل‌ها، منابع عدم قطعیت مختلفی وجود دارد. این منابع عدم قطعیت عبارت‌اند از: عدم قطعیت مربوط به شبیه‌سازی مدل‌های AOGCM در سطوح منطقه‌ای، عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، عدم قطعیت در استفاده از روش‌های مختلف کوچک‌مقیاس کردن خروجی مدل‌های AOGCM، عدم قطعیت در تبدیل میزان گازهای گلخانه‌ای به غلظت اتمسفریک و نیروی تابشی و عدم قطعیت مربوط به حساسیت مدل‌های مختلف AOGCM به نیروی تابشی یکسان (کمال و مساح بوانی، ۱۳۹۰).

همان‌طور که ذکر شد هر یک از روش‌های مختلف ریزمقیاس نمودن داده‌های هیدرولوژیکی نیز به‌طور ذاتی دارای عدم قطعیت هستند، عدم قطعیت موجود در هر روش موجب ارائه نتایج متفاوتی در مطالعات اقلیمی خواهد شد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که عدم قطعیت موجود در مطالعات تغییر اقلیم می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر تعیین پارامترهای هواشناسی یک منطقه در آینده داشته باشد، بنابراین لازم است تا این عدم قطعیت در محاسبات مربوطه لحاظ گردد (ترک‌زاد، ۱۳۹۰).

باید توجه داشت که منابع عدم قطعیت اغلب منطقه‌ای (وابسته به ایستگاه‌ها) بوده و از موضوعات اصلی در تغییر اقلیم می‌باشند، به‌طوری‌که اثر تخمین و روش‌های برآورد آن‌ها جهت کاهش اثرات عدم قطعیت در نتایج، امری بسیار مهم است؛ بنابراین به‌طور خلاصه می‌توان از استفاده از مدل‌های یادشده و سناریوهای انتشار به‌عنوان منابع اصلی عدم قطعیت در پیش‌بینی وضعیت اقلیمی برای دوره‌های آتی نام برد (فخری و همکاران، ۲۰۱۲).

۴-۴- شبیه‌سازی بارش-رواناب

قبل از آنکه اقدامی جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها صورت گیرد لازم است آمار موجود از نظر صحت و دقت مورد بررسی قرار گیرند. بدین منظور آمار هیدرومتری و هواشناسی ایستگاه‌های موجود در حوضه مورد مطالعه و برخی ایستگاه‌های مجاور گردآوری شد. مقایسه داده‌های هواشناسی ایستگاه-های داخل حوضه با ایستگاه‌های مجاور همبستگی مطلوبی نشان داد، همچنین صحت داده دبی با توجه به داده بارش موجود مورد بررسی قرار گرفت.

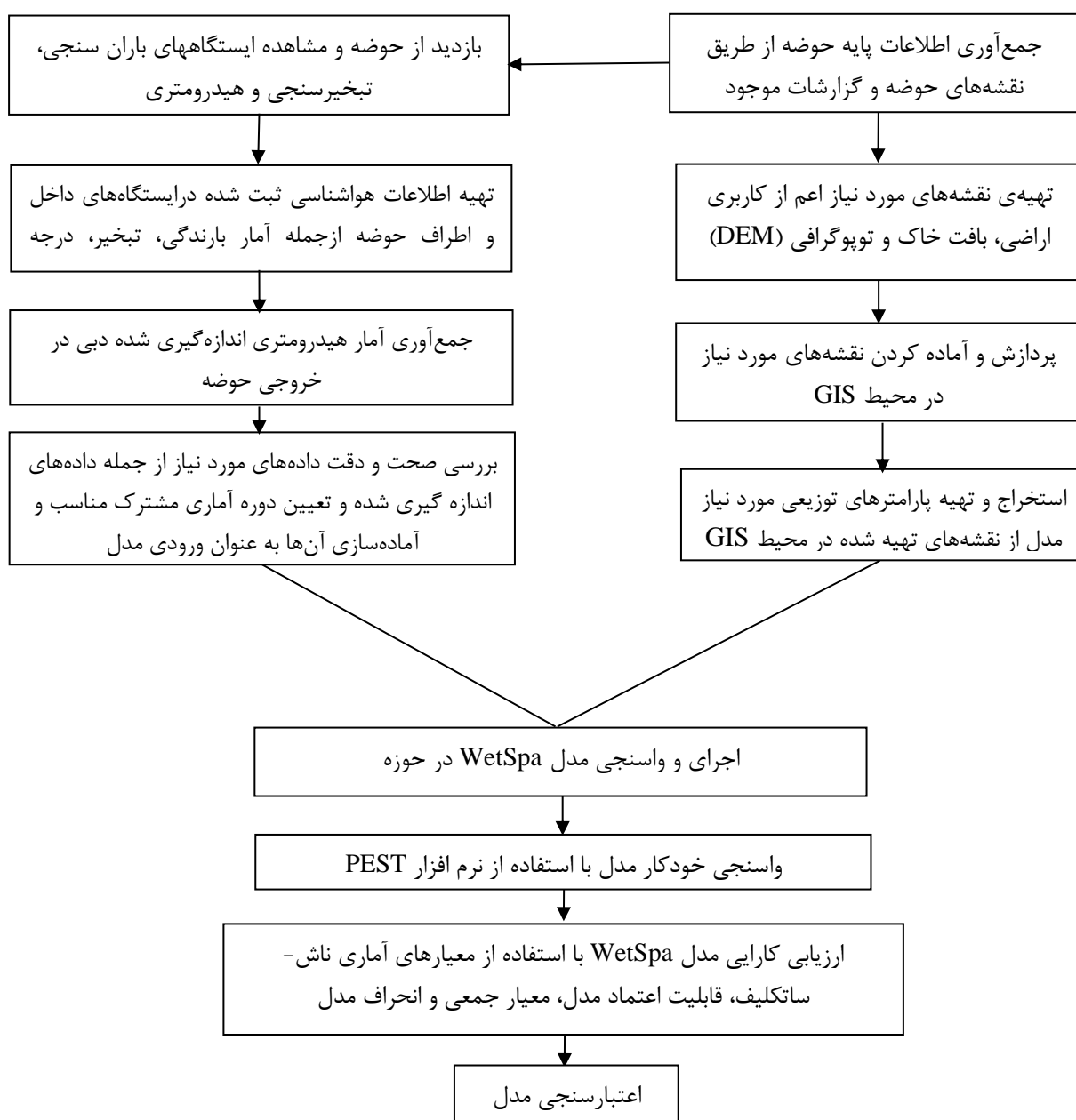
پس از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما و بارش تحت سناریوهای A2، B1 و A1B برای دوره‌های زمانی ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ داده‌های اولیه مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب فراهم گردید و جهت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه و تخمین میزان منابع آب سطحی طی دوره‌های آتی به مدل شبیه‌ساز معرفی شدند.

WetSpa - ۱-۴-۴ مدل بارش رواناب

طرح تحقیق

با بررسی و مرور منابع مختلف علمی طرح تحقیق حاضر انتخاب گردید، مراحل انجام

تحقیق در این بخش به تفصیل بیان می گردد.

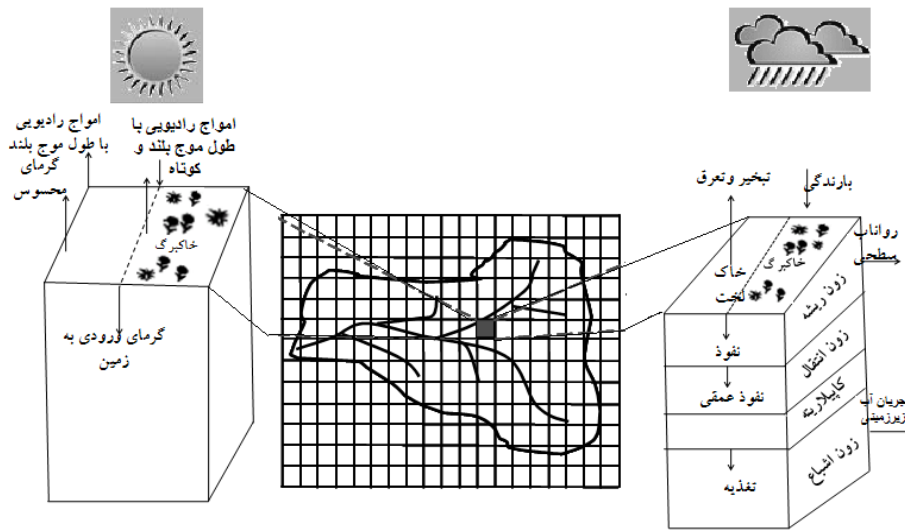


شکل (۱-۴) مراحل اجرا و اعتبارسنجی مدل بارش-رواناب

۴-۴-۱-۱- تشریح مدل WetSpa

مدل WetSpa، یک مدل هیدرولوژیکی، کاملاً توزیعی- مکانی برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر می‌باشد که بر پایه GIS استوار است و برای پیش‌بینی سیلاب و شبیه‌سازی تعادل آب در مقیاس ناحیه‌ای یا حوضه کاربرد دارد و بر پایه گام زمانی روزانه و ساعتی استوار می‌باشد. این مدل توسط ونگ^{۴۹} و همکاران (۱۹۹۷) در دانشگاه بروکسل^{۵۰} بلژیک توسعه یافت و سپس به‌منظور پیش‌بینی سیلاب توسط دسمت و همکاران (۲۰۰۰) و لیو^{۵۱} (۲۰۰۴) توسعه یافت. برای غلبه بر ناهمگونی‌های موجود، حوضه به تعدادی سلول‌های شبکه‌ای تقسیم‌بندی می‌گردد. در مدل برای هر شبکه سلولی، ۴ لایه در جهت عمودی در نظر گرفته می‌شود که عبارت‌اند از: لایه تاج پوشش، منطقه ریشه، منطقه انتقال و منطقه اشباع. علاوه بر آن هر سلول خود شامل خاک لخت و خاک دارای پوشش می‌باشد که دارای تعادل آب و انرژی می‌باشند. فرآیندهای هیدرولوژیکی مدل شامل بارش، برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب است (دسمت و همکاران، ۲۰۰۰). در شکل (۴-۲)، فرآیندهای هیدرولوژیکی مدل WetSpa نشان داده شده است.

⁴⁹. Wang
⁵⁰. VUB
⁵¹. Liu



شکل (۴-۲) ساختار مدل WetSpa

با استفاده از این مدل می‌توان هیدروگراف جریان را در خروجی حوضه و یا هر نقطه‌ای از حوضه که در آن جریان به هم می‌پیوندد، با گام‌های زمانی متفاوت تخمین زد (دسمت و همکاران، ۲۰۰۰، لیو و همکاران، ۱۹۹۹، ۲۰۰۳). هدف این مدل علاوه بر پیش‌بینی سیلاب، بررسی عوامل ناشی از آن نیز می‌باشد که از آن جمله می‌توان به بررسی توزیع مکانی توپوگرافی، کاربری اراضی و نوع خاک اشاره نمود (لیو و همکاران، ۲۰۰۲).

به هنگام انتخاب مدل در هر منطقه باید به فرضیات به کار رفته در مدل، قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل آگاهی کامل داشت تا انتخاب مدل با توجه به هدف مورد نظر و اطلاعات در دسترس به خوبی صورت پذیرد لذا در ادامه به برخی از مهم‌ترین فرضیات، قابلیت‌ها و محدودیت‌های موجود در مدل که توسط لیو و همکاران (لیو و همکاران، ۱۹۹۹، ۲۰۰۲، ۲۰۰۳) ارائه شده است اشاره می‌شود:

۱- فرضیات مدل

- ۱) ویژگی‌های خاک و زمین در هر سلول شبکه، مشابه و همگون در نظر گرفته می‌شود.
- ۲) تاج پوشش و پوشش زمین برای هر سلول رستری مشابه در نظر گرفته می‌شود.
- ۳) توزیع مکانی بارش در هر سلول رستری یکسان می‌باشد.
- ۴) رواناب سطحی هورتونی برای اکثر مناطق دارای اعتبار می‌باشد.

۵) تبخیر و تعرق در طول رگبار و همچنین زمانی که رطوبت موجود در خاک کمتر از رطوبت باقیمانده خاک می‌باشد، قابل صرف‌نظر کردن است.

۶) تبخیر و تعرق عمیق زمانی که خاک خشک است و ذخیره مؤثر آب زیرزمینی کم باشد، خیلی کم است.

۷) محتوای رطوبتی خاک در یک سلول منفرد یکسان می‌باشد، درحالی‌که توزیع ذخیره آب زیرزمینی در سطح زیر حوضه‌های کوچک یکسان در نظر گرفته می‌شود.

۸) آب در طول مسیر خود از یک سلول به سلول بعدی جریان می‌یابد و نمی‌تواند به بیشتر از یک سلول همسایه انشعاب یابد.

۹) روش معادلات خطی موج پخشی برای روند یابی هر دو جریان سطحی و جریان کانالی معتبر است.

۱۰) شعاع هیدرولیکی وابسته به مکان می‌باشد و با فرکانس سیلاب تغییر می‌کند اما در طول یک واقعه سیلاب ثابت باقی می‌ماند.

۱۱) جریان زیرسطحی زمانی به وقوع می‌پیوندد که محتوای رطوبت خاک بالاتر از ظرفیت مزرعه باشد، همچنین میزان آن از قانون داری و معادله موج سینماتیکی تخمین زده می‌شود.

۱۲) بخشی از آب طی جریان سطحی و جریان کانالی تلف می‌شود و همچنین تلفات عمقی مهم تلقی نمی‌شود و صرف‌نظر می‌گردد.

۲- قابلیت‌ها و اهداف مدل

۱) ارائه یک روش مفهومی بر پایه GIS، برای پیش‌بینی سیلاب و مدیریت آبخیز در مقیاس حوضه که قابلیت مطابقت با تکنولوژی GIS و اطلاعات سنجش‌ازدور را داراست.

۲) قابلیت شبیه‌سازی توزیع مکانی فرایندهای هیدرولوژیک در حوضه از قبیل رواناب، رطوبت خاک و تغذیه آب زیرزمینی را دارد.

۳) قادر به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و آب و هوایی بر فرآیندهای هیدرولوژیک است.

۴) قادر به فراهم نمودن یک مدل توزیعی است که بتواند در مقیاس سلولی و با گام زمانی متغیر عمل نموده و همچنین به صورت نیمه توزیعی در سطح زیر حوضه اجرا گردد.

۳- محدودیت‌های مدل

موارد زیر محدودیت‌های اصلی مدل محسوب می‌شوند:

۱) مدل WetSpa، با سری داده‌های پیوسته اجرا می‌گردد، بنابراین در مرحله آماده‌سازی داده‌ها بایستی پیوستگی و قابلیت اطمینان داده‌ها کنترل گردد.

۲) در طبقه‌بندی‌ها، دسته‌های کاربری اراضی به صورت گروهی ارائه شده‌اند، به طوری که برخی از طبقه‌ها تا حدی دارای ابهام می‌باشند. به عنوان مثال طبقه‌بندی کشاورزی ممکن است دربرگیرنده مزارع و ساختمان‌های مجاور آن، چمن‌زارها، زمین‌های رها شده بوده و یا سایر کاربری‌هایی را در برگیرد که به عنوان یکی از طبقه‌های مشخص، شناخته شده نیستند.

۳) مقادیری که برای هر سلول رستری یا شبکه‌ای تعیین می‌گردد، مقدار متوسط در سطح آن سلول می‌باشد که در استفاده از مقادیر متوسط هر چه تغییرات موجود در سطح سلول بیشتر باشد، باعث ایجاد خطای بیشتری می‌گردد.

۴) تفکیک زمانی بایستی به خوبی صورت گیرد. به عنوان مثال در یک حوضه بسیار کوچک پیش‌بینی سیلاب با مقیاس روزانه و ساعتی امکان‌پذیر نیست زیرا که ممکن است در اولین گام زمانی آب مازاد به خارج از حوضه برسد. در این گونه موارد، بایستی در صورت وجود آمار گام زمانی کوتاه‌تری انتخاب گردد.

۵) برای مدل کردن تجمع و ذوب برف از یک روش ساده بنام ضریب روز- درجه استفاده می‌گردد که در این روش، توزیع پشته برف، تأثیر جهت شیب، شیب محل، کاربری دخالت داده نشده است.

۶) رواناب سطحی در مدل WetSpa، با استفاده از روش ضریب رواناب اصلاح‌شده (روش استدلالی) که یک روش تجربی می‌باشد محاسبه می‌گردد (به‌جای اینکه از سایر معادلات که فرایندهای فیزیکی را بهتر ارائه می‌نماید استفاده شود) اما با وجود این محدودیت، استفاده از این روش مزایایی چون ارتباط نزدیک رواناب با خصوصیات مختلف سلول مثل شیب، کاربری اراضی، نوع خاک و محتوای رطوبتی را داشته و دارای پتانسیل بالایی در پیش‌بینی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر رفتار هیدرولوژیکی آبخیز می‌باشد.

۷) درصد اراضی غیر قابل نفوذ برای مناطق شهری، با توجه به اندازه سلول تعیین گشته است و در این مورد اندازه‌گیری دقیق وجود ندارد.

۸) در مدل WetSpa پارامترهای قراردادی متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرد که با توجه به انترپولاسیون مقادیر موجود در منابع حاصل شده‌اند و در مورد همه حوضه‌ها به‌طور یکسان به کار می‌روند. این در صورتی است که پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی و ضریب زبری دارای محدوده نوسان زیادی می‌باشند و زمانی که برای سایر مناطق با شرایط محیطی کاملاً متفاوت بکار برده شوند ممکن است تغییرات زیادی از خود نشان دهند.

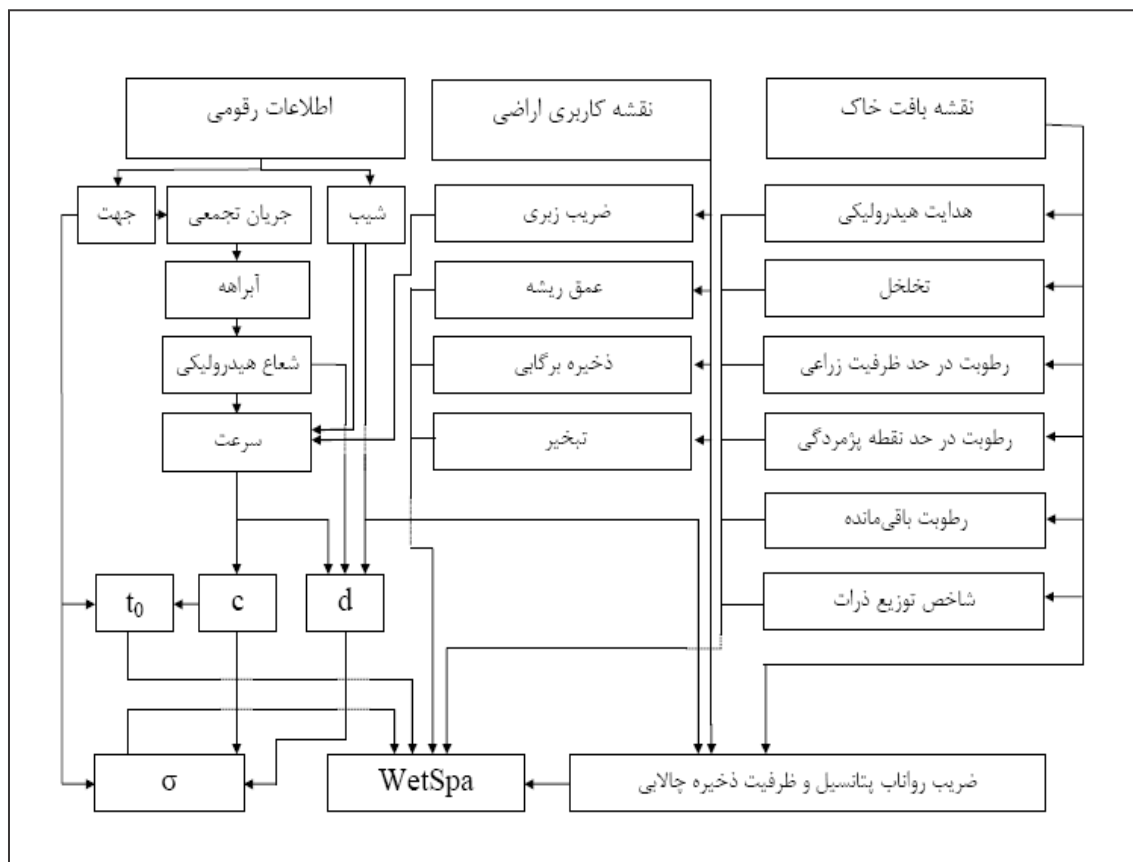
۹) در مدل WetSpa، جریان آب زیرزمینی در مقیاس زیر حوضه شبیه‌سازی می‌گردد. در این مدل جریان آب زیرزمینی و ذخیره آب زیرزمینی در هر گام زمانی برای زیر حوضه‌های کوچک تعیین می‌گردد؛ اما مدل قادر نیست توزیع مکانی سفره آب زیرزمینی را به همراه تغییراتش در طول دوره شبیه‌سازی پیش‌بینی نماید.

۴-۱-۲-۴-۲- ورودی مدل WetSpa

ورودی‌های اصلی موردنیاز در مدل WetSpa، شامل نقشه‌های رستری (توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک) و آمار هواشناسی- هیدرولوژیکی منطقه می‌باشد.

نقشه‌های رقومی توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک سه نقشه اصلی مورد استفاده در مدل می‌باشند و سایر پارامترهای هیدرولوژیکی موردنیاز در مدل بر اساس این سه نقشه مطابق شکل (۳-۴) تهیه می‌شوند. سایر اطلاعات رقومی بسته به در دسترس بودن، هدف پروژه و میزان دقت آن به صورت اختیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اطلاعات هواشناسی پایه موردنیاز شامل بارندگی و تبخیر می‌باشد که در صورت شبیه‌سازی ذوب برف، بایستی آمار درجه حرارت را نیز به مدل وارد نمود.

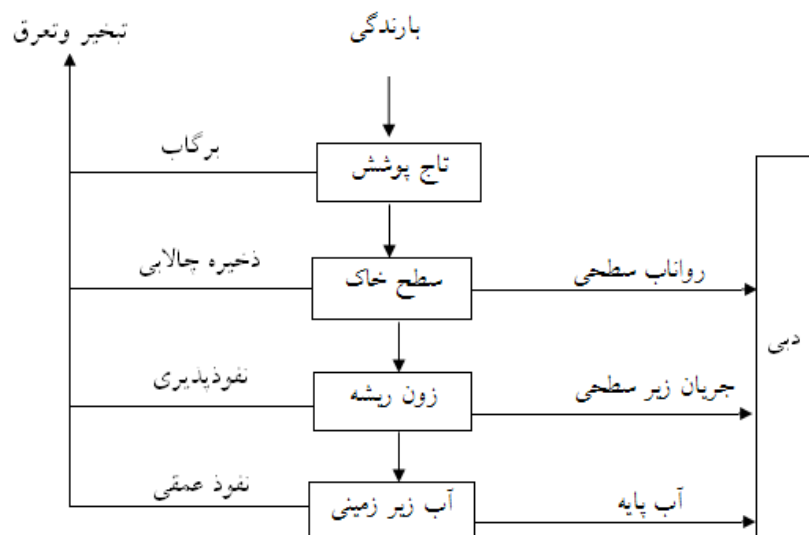


شکل (۳-۴) تهیه نقشه‌های پارامترهای توزیعی مدل بر اساس سه نقشه پایه (توپوگرافی، کاربری، خاک)

۴-۱-۳- ساختار مدل

مدل برای بیان تعادل آب و انرژی در هر شبکه سلولی از چندین لایه استفاده می‌نماید و هر یک از فرایندهای بارش، ذخیره برگابی، ذوب برف، ذخیره چالابی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی را در بر دارد. شکل (۴-۴)، به‌طور شماتیک ساختار مدل را در سطح پیکسل نمایش می‌دهد و تأکید آن بر پارامترهای ناحیه ریشه می‌باشد. تخمین رواناب مازاد، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، جریان زیرسطحی و نفوذ عمقی به‌صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد. شیب، کاربری و خصوصیات خاک متفاوت در شبکه‌های مختلف یک حوضه، باعث ایجاد رواناب‌های مختلف با میزان بارش ثابت می‌گردد (لیو و دسمیت، ۲۰۰۴).

روند یابی رواناب از سلول‌های مختلف به سمت خروجی حوضه، به سرعت جریان و ضریب موج پخشی بستگی داشته و با استفاده از روش تخمین موج پخشی صورت می‌گیرد. با وجود اینکه تغییرات کاربری اراضی، خاک و خصوصیات توپوگرافی حوضه در مدل به‌صورت مکانی در نظر گرفته می‌شوند، اما مدل‌سازی پاسخ آب زیرزمینی در مقیاس زیر حوضه‌های کوچک صورت می‌گیرد تا شبیه‌سازی آن راحت صورت گیرد (لیو و دسمیت، ۲۰۰۴).



شکل (۴-۴) ساختار مدل WetSpa در مقیاس پیکسل

۴-۱-۴-۴- پارامترهای عمومی

برای آسان‌سازی واسنجی پارامترها، ۱۱ پارامتر قراردادی در مدل WetSpa مورداستفاده قرار گرفته است که عبارت‌اند از فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل، فاکتور تصحیح جریان زیرسطحی، ضریب افت آب زیرزمینی، رطوبت اولیه خاک، ذخیره آب زیرزمینی اولیه، حداکثر ذخیره آب زیرزمینی، درجه حرارت پایه برای ذوب برف، ضریب روز-درجه حرارت، ضریب روز-درجه بارش، توان رواناب سطحی و شدت بارش مربوط $a=1$ می‌باشد. انتخاب پارامترهای واسنجی بر اساس مطالعات قبلی از مدل WetSpa می‌باشد (لیو، ۲۰۰۴). این پارامترها دارای تعاریف فیزیکی بوده و در کنترل رواناب و هیدروگراف خروجی حوضه نقش مهمی دارند؛ اما تعیین آن‌ها در مقیاس شبکه سلولی مشکل می‌باشد. بنابراین برای تطبیق بهتر پارامترها در مدل توزیعی، واسنجی این پارامترها در مقابل داده‌های رواناب مشاهده‌ای ترجیح داده می‌شود.

قبل از اجرای مدل WetSpa، بایستی فایل پارامتر کلی آماده شود که در هر شبکه سلولی یا زیر حوضه به کار برده شود. جدول (۴-۱)، قالب پارامترهای عمومی را در فایل input.txt نمایش می‌دهد؛ که dt گام زمانی (ساعت) و ارزش آن در ردیف دوم جدول برحسب ساعت نوشته می‌شود. البته داده‌های تحقیق حاضر در مقیاس روزانه است که میزان dt برابر ۲۴ ساعت است و اگر داده‌ها در مقیاس ساعت باشند برابر با ۱ می‌باشد. k_i فاکتور مقیاس رواناب زیرسطحی که منعکس‌کننده مواد آلی و مواد ریشه در لایه خاک سطحی و در هدایت هیدرولیکی افقی است. k_g ضریب ذخیره جریان آب زیرزمینی که منعکس‌کننده رژیم ذخیره آب زیرزمینی برای کل حوضه آبریز است. K_{-ss} ، رطوبت نسبی باقیمانده خاک نسبت به ظرفیت زراعی است و جهت تنظیم محتوی رطوبت اولیه خاک می‌باشد. k_{-ep} فاکتور تصحیح برای تبخیر و تعرق پتانسیل، G_0 ذخیره آب زیرزمینی در عمق ریشه (میلی‌متر)، G_{max} حداکثر ذخیره آب زیرزمینی در عمق ریشه (میلی‌متر)، T_0 دمای ذوب برف برحسب درجه سانتی‌گراد، K_{-snow} ضریب روز-درجه حرارت مربوط به ذوب برف (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد بر روز)، K_{-rain} ضریب روز-درجه بارش مربوط به ذوب برف ناشی از باران برحسب

میلی‌متر بر میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد بر روز می‌باشد. قابل توجه است که اگر در حوضه انباشت برف موجود نباشد، در مطالعه حوضه آبریز T_0 ، K -rain و K -snow، ارزش منفی داده می‌شود. k -run توانی است که منعکس‌کننده اثر شدت بارش بر روی ضریب رواناب واقعی است. p -max آستانه شدت بارش (میلی‌متر در روز) است (لیو، ۲۰۰۴).

جدول (۱-۴) قالب پارامترهای جهانی در فایل input.txt

dt(h)	ki	Kg	K_ss	K_ep	g0	g_max	T0	k_snow	k_rain	k_run	P_max
24	0.335	2.18E-04	1.531	0.04	0.858	9800	-0.042	1.095	1.00E-06	7.092	700

۴-۱-۴-۵- خروجی‌های مدل

در مدل WetSpa، انواع فایل‌های خروجی، با توجه به گزینه‌های انتخاب شده در طول اجرای شبیه‌سازی تولید می‌شوند. خروجی‌های اصلی شامل پیش‌بینی هیدروگراف در خروجی حوضه یا در خروجی زیر حوضه‌های انتخاب‌شده و مؤلفه‌های بیلان آب به صورت گام‌های زمانی متناسب با اطلاعات ورودی برای کل حوضه در طول دوره شبیه‌سازی است. سایر فایل‌های خروجی شامل اطلاعاتی راجع به توزیع فضایی شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در دوره پیش‌بینی می‌باشند.

۴-۱-۴-۶- واسنجی و ارزیابی مدل

در مدل WetSpa جهت واسنجی، اطلاعات مشاهده‌ای به دو گروه تقسیم می‌شوند. پارامترهای مدل با یک گروه از اطلاعات، واسنجی می‌گردد. سپس ارزیابی مدل با پارامترهای بهینه‌شده برای گروه دوم اطلاعات انجام می‌شود و در نهایت هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده با هیدروگراف مشاهده‌ای مقایسه می‌شود.

۱- واسنجی مدل و بهینه‌سازی نتایج

نتایج حاصل از اجرای مدل توسط فرایندی به نام واسنجی قابل بهینه‌سازی می‌باشد. در شروع عملیات بهینه‌سازی لازم است برای تمام پارامترهای بکار رفته در مدل مقادیر اولیه‌ای اختیار گردد، عملیات بهینه‌سازی با حصول بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌شده به اتمام می‌رسد (موسی ندوشنی و داننده مهر، ۱۳۸۴). فرایند واسنجی به دو صورت دستی (سعی و خطا) و خودکار انجام می‌پذیرد:

الف - روش کاملاً دستی با استفاده از قضاوت مهندسی به روش تصحیح مکرر پارامترها و محاسبه بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه‌شده و مشاهده‌ای و همچنین بررسی معیارهای ارزیابی انجام می‌پذیرد. بهترین واسنجی زمانی حاصل می‌شود که مقادیر پارامترهای به‌کاررفته در مدل، بهترین و نزدیک‌ترین هیدروگراف را به هیدروگراف مشاهده‌شده تولید کند و معیارهای ارزیابی در حد مطلوب باشند. در این صورت پارامترهای به‌کاررفته در مدل دارای مقادیر بهینه خواهند بود.

ب - استفاده از نرم‌افزار برای واسنجی خودکار

واسنجی خودکار توسط نرم‌افزارهای متفاوتی مانند PEST، Glue و Solver صورت می‌گیرد. در فرآیند واسنجی خودکار به وسیله PEST تابع هدف مجموع مربعات می‌باشد و سعی می‌کند این خطا را به صفر برساند. PEST، در تمام علوم کاربرد دارد و با دیگر نرم‌افزارها لینک می‌شود و دارای قابلیت‌هایی مانند واسنجی خودکار، بهینه‌سازی پارامترها، آنالیز حساسیت، آنالیز عدم قطعیت است. PEST^{۵۲} نرم‌افزاری است برای بهینه‌سازی و ارزیابی پارامترهای غیرخطی که بر اساس روش جستجوی محلی به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل پیشنهادهایی را ارائه می‌دهد (دوهرتی، ۱۹۹۴). PEST، توسط حداقل کردن مجموع مربعات تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی، بهترین مقادیر از پارامترهای مدل را تخمین می‌زند.

⁵². Model-independent parameter estimato

۲- معرفی معیارهای کارایی و ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa در تولید هیدروگراف مشاهده‌ای، یک سری روش‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر مقایسه کیفی نتایج، جهت ارزیابی بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه‌شده و مشاهده‌ای، معیارهای ارزیابی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اندازه‌گیری‌های آماری، یک ارزیابی کمی از میزان برازش مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده ارائه داده و نمایانگر درجه انطباق مشاهدات و پیش‌بینی می‌باشد. بر مبنای نتایج حاصل، قابلیت پیش‌بینی مدل تعیین می‌گردد. در زیر به معیارهای ارزیابی مورد استفاده در این پژوهش اشاره می‌گردد:

(۱) انحراف مدل^{۵۳}

انحراف مدل را می‌توان به صورت تفاوت میانگین نسبی بین جریان مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده در یک نمونه بزرگ شبیه‌سازی بیان نمود؛ که انعکاس‌دهنده قابلیت تعیین تعادل آب بوده و شاید در عمل مهم‌ترین عامل برای مقایسه کارایی مدل باشد. این معیار به صورت معادله زیر بیان می‌گردد:

$$MB = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^N Q_{oi}} \right] \quad (۳-۴)$$

که طبق معادله فوق MB: انحراف مدل، Q_{oi}, Q_{si} : جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، N : تعداد گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی است. مقادیر MB پایین نشان‌دهنده برازش بهتر و میزان صفر نمایانگر شبیه‌سازی کامل میزان جریان مشاهده‌ای می‌باشد.

⁵³. Model bias

۲) کارایی ناش - ساتکلیف^{۵۴}

معیار ناش-ساتکلیف، نشان می‌دهد که دبی‌های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه‌سازی شده‌اند. معادله آن به شرح زیر می‌باشد:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (۴-۴)$$

NS: شاخص کارایی ناش - ساتکلیف که برای ارزیابی توانایی شبیه‌سازی جریان رودخانه بکار می‌رود، مقدار NS از یک مقدار منفی تا ۱ در تغییر است و زمانی که میزان آن ۱ باشد، نمایانگر انطباق کامل بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده می‌باشد.

۳) معیار کارایی ناش - ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی جریان‌های پایین^{۵۵}

معیار ناش - ساتکلیف لگاریتمی در معادله (۴-۵)، ارائه شده است که تأکید آن بر ارزیابی شبیه‌سازی جریان‌های کم می‌باشد (اسماختین^{۵۶} و همکاران، ۱۹۹۸).

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{si}) - \ln(Q_{oi})]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{oi}) - \ln(\bar{Q}_{oi})]^2} \quad (۵-۴)$$

NSL: ضریب کارایی ناش ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی دبی‌های پایین است. در یک شبیه‌سازی کامل، میزان NSL برابر با یک خواهد بود.

⁵⁵. Nash-Sutcliffe

⁵⁶. Nash-Sutcliffe Low

⁵⁷. Smakhtin

۴) معیار کارایی ناش - ساتکلیف برای ارزیابی دبی‌های بالا^{۵۷}

معیار ناش - ساتکلیف برای ارزیابی دبی‌های بالا در معادله (۴-۶) ارائه شده است. برای ارزیابی توانایی شبیه‌سازی جریان شدید بکار می‌رود و همان‌طور که در فرمول نیز مشاهده می‌گردد به دبی‌های بالا وزن بیشتری داده می‌شود. میزان شبیه‌سازی کامل NSH یک می‌باشد.

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} + \bar{Q}_o)(Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} + \bar{Q}_o)(Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (۴-۶)$$

۵) ضریب همبستگی اصلاح‌شده^{۵۸}

نشان‌دهنده تفاوت اندازه هیدروگراف و شکل آن می‌باشد (مک‌کویین^{۵۹} و اشنایدر^{۶۰}، ۱۹۷۵).

$$r_{\text{mod}} = \left[\frac{\min\{\delta_o, \delta_s\}}{\max\{\delta_o, \delta_s\}} \times r \right] \quad (۴-۷)$$

طبق رابطه فوق σ_o و σ_s به ترتیب انحراف استاندارد زمان جریان دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی، r ضریب همبستگی بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی و N تعداد مشاهدات در دوره موردنظر است.

۶) معیار جمعی^{۶۱}

نشان‌دهنده میزان تفاوت‌هایی از قبیل اندازه، شکل و حجم، بین هیدرو گراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است که حدود مقادیر آن برای نشان دادن کارایی مدل در جدول (۴-۲) آورده شده - است.

$$AM = \frac{r_{\text{mod}} + NS + (1 - |MB|)}{3} \quad (۴-۸)$$

⁵⁸. Nash-Sutcliffe High

⁵⁸. Modified Correlation Coefficient

⁵⁹. McCuen

⁶⁰. Snyder

⁶¹. Aggregated Measure

برای هر دو معیار جمعی و ضریب همبستگی اصلاح شده مقدار یک، نشان دهنده تطابق کامل دو هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است.

جدول (۲-۴) دسته‌بندی کارایی مدل WetSpa

دسته‌بندی	عالی	خیلی خوب	خوب	ضعیف	خیلی ضعیف
معیار جمعی	$>0/85$	$0/7-0/85$	$0/55-0/7$	$0/4-0/55$	$<0/4$

۱: آندرسون و همکاران، ۲۰۰۲، ۲۰۰۱، ۲: هنریکسن و همکاران، ۲۰۰۳

۴-۵- مدل‌سازی تخصیص

رشد جمعیت، توسعه صنعتی و پیدایش سریع فن‌آوری‌های جدید، جهان را تغییر می‌دهند. افزایش تقاضای آب برای مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی، رقابت بر سر تخصیص منابع محدود آب را بین مناطق مختلف و انواع مصرف‌کنندگان تشدید می‌کند. کمبود منابع آب شیرین، یکی از بزرگ‌ترین مسائلی است که به‌طور روزافزون، جهان در حال توسعه با آن مواجه است. شور شدن و آلودگی آب فشارهایی را به کیفیت آب و زمین اعمال می‌نماید که این مسئله اغلب از مصرف زیاد آب جهت مصارف کشاورزی و آبیاری ناشی می‌شود (لاکس و همکاران، ۲۰۰۵).

مدیریت منابع آب به‌عنوان اصلی‌ترین راهکار ممکن برای رفع مشکلات ناشی از کاهش کمیت و افت کیفیت آب مطرح است. عدم توجه به مدیریت آب در سطح حوضه باعث ایجاد مسائلی از قبیل تأثیرات نامناسب مصارف بالادست بر مصرف‌کنندگان پایین، عدم رعایت عدالت اجتماعی و بروز نابرابری‌ها، تأمین نشدن حداقل نیازهای زیست‌محیطی و تخریب محیط‌زیست و بهینه نبودن برآیندهای اقتصادی می‌شود. مدیریت کارایی آب در سطح حوزه آبریز با اهداف افزایش بهره‌وری آب و تولید غذا، عدالت اجتماعی و حفاظت اکوسیستم‌ها و محیط‌زیست مستلزم شناخت و درک مجموعه‌ای از واکنش‌های مرتبط با آب در سطوح مختلف مکانی و زمانی و در نقاط مختلف حوضه است. عدم شناخت این واکنش‌ها و نبود ساختار کارایی مدیریت آب که بتواند این درک و شناخت را در تدوین

سیاست‌ها، استراتژی‌ها، تصمیمات و اقدامات مدیریتی لحاظ کند، مسئله اصلی در بسیاری از حوضه‌ها است (علیزاده، ۱۳۸۵).

امروزه با توسعه ابزارهای محاسباتی و پیچیده‌تر شدن مسائل، برنامه‌ریزی منابع آب به مدل‌های کامپیوتری بسیار وابسته شده است. نقش این مدل‌ها تعیین روش‌های گوناگون موجود جهت رسیدن به اهداف برنامه‌ریزی و مدیریت و ارزیابی تأثیرات آن‌ها می‌باشد. در حقیقت مدل‌ها تصمیم‌گیران را از عواقب تصمیم‌هایشان آگاه می‌سازند، به طوری که راهی را فراهم می‌نمایند تا برنامه‌ریزان و مدیران رفتار هر سیاست مدیریتی یا طراحی سیستم منابع آب پیش رو را قبل از اجرای آن پیش‌بینی نمایند؛ بنابراین نقش مدل‌ها تولید اطلاعات است نه تولید تصمیم، اطلاعاتی که بر اساس آن تصمیم‌گیران می‌توانند تصمیماتی آگاهانه‌تر اتخاذ نمایند. نکته حائز اهمیت آن است که فرآیند مدیریت و مدیریت یکپارچه منابع آب فرآیند پیچیده‌ای است که اجزای متعددی دارد و مدل‌سازی تنها بخشی از آن است، بنابراین نمی‌توان با مدل‌سازی تمامی مسائل مرتبط با آب را حل نمود. ضمناً مدل‌سازی امکان اشتباه را از بین نمی‌برد بلکه آن را کاهش می‌دهد (لاکس و همکاران ۲۰۰۵).

مدل‌های شبیه‌ساز رایانه‌ای در اواخر دهه ۱۹۴۰ و اوایل ۱۹۵۰ در عرصه مدیریت منابع آب ظاهر شدند و در حقیقت مهم‌ترین و کاراترین پیشرفت در برآورد تأثیرات هیدرولوژیکی، اقتصادی، زیست-محیطی و راهکارهای مختلف مدیریتی منابع آب به حساب می‌آیند. در هر شبیه‌سازی از یک سیستم پیچیده هیدرولوژیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی، فرضیات متعددی صورت می‌گیرد. با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رایانه‌ای، اعمال چنین فرضیاتی و نتیجه‌گیری حاصل از آن‌ها بسیار آسان گشته و مدیریت و پردازش آن‌ها دقیق‌تر، کامل‌تر و با سرعت فزون‌تری صورت می‌پذیرد.

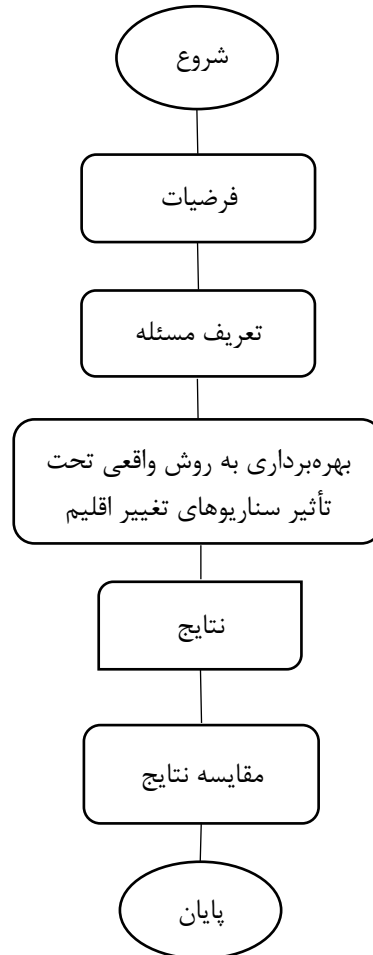
امروزه مدل‌های شبیه‌سازی متعددی برای بررسی مسائل مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب وجود دارند که علاوه بر دارا بودن رابط کاربر گرافیکی، قابلیت استفاده برای اشتراک و مداخله کاربران را در امور منابع آب تسهیل می‌نمایند. از این بین می‌توان به مدل‌های شناخته‌شده‌ای همچون RIBASIM، MIKEBASIN، WEAP و MODSIM اشاره کرد. هر یک از این مدل‌ها در گوشه‌ای از دنیا

طراحی شده و توسعه یافته‌اند اما همگی هدف مشترکی دارند و آن تولید ابزاری جهت درک بیشتر واقعیات موجود در سطح محدوده مورد مطالعه است، به طوری که بتوان با کمک این ابزار به مدیریت و برنامه‌ریزی هرچه بهتر و البته پایدار منابع و مصارف آب پرداخت. وجوه اشتراک این مدل‌ها در برقراری ارتباط بین بخش عرضه و تقاضا است، اما هر چه به جزئیات نزدیک‌تر شویم، مسیر نگرش آن‌ها به هر یک از اجزای یک سیستم آبی متفاوت‌تر می‌گردد (اسپنانی، ۱۳۹۱).

برنامه‌ریزی خطی جزو روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی بوده و در حل مسائلی که روابط بین متغیرها کاملاً متناسب و مستقیم می‌باشد، کاربرد بسیاری دارد. در این قبیل مسائل تابع هدف و توابع قید، همگی توابعی خطی از متغیرهای طراحی هستند. یکی از ویژگی‌ها و مزیت‌های مهم این روش آن است که یک جواب کمینه یا بیشینه موضعی در آن، یک پاسخ سراسری است. حال چنانچه تابع هدف و توابع قیده‌ها، توابعی غیرخطی از متغیرهای طراحی باشند، برنامه‌ریزی از نوع غیرخطی خواهد بود که روش بهینه‌سازی خطی به سهولت قادر به یافتن پاسخی سراسری برای آن نخواهد بود (مقدسی و همکاران، ۱۳۸۷). از آنجاکه مدل‌های بهینه‌سازی یادشده در محیط نرم‌افزار WEAP اجرا گردیدند، در ادامه به‌طور مختصر به معرفی این نرم‌افزار پرداخته شده است.

۴-۵-۱- مدل شبیه‌سازی - WEAP

با بررسی و مرور منابع مختلف علمی طرح تحقیق حاضر انتخاب گردید.



شکل (۴-۵) مراحل شبیه‌سازی تخصیص منابع

۴-۵-۱-۱- تشریح مدل WEAP

در طول دهه اخیر نگرش یکپارچه در توسعه طرح‌های منابع آب افزایش یافته است و نیازها، مسائل کیفی، مسائل اقتصادی و سایر موارد مربوط به منابع آب در کنار هم مورد توجه قرار گرفته‌اند. WEAP نیز این مسائل را همراه یکدیگر در یک ابزار کاربردی برای برنامه‌ریزی منابع آب و تحلیل سیاست‌ها بکار می‌گیرد. مؤسسه محیط‌زیست استکهلم حمایت اصلی را از توسعه WEAP انجام داده

است. مرکز مهندسی هیدرولوژی جامعه مهندسين ارتش آمريکا^{۶۲} بودجه زيادی را برای پيشرفت کار تخصيص داده است. تعدادی از نهادها از جمله بانک جهانی، USAID و صندوق زيربنای جهانی ژاپن از اين طرح حمايت کرده‌اند. WEAP در ارزيابی آب در چندین کشور از جمله آمريکا، مکزيک، برزیل، آلمان، غنا، بورکینافاسو، کنیا، آفريقای جنوبي، موزامبيک، مصر، عمان، آسیای میانه، سريلانکا، هند، نپال، چین، کره جنوبي و تایلند بکار گرفته شده است.

نرم‌افزار WEAP یک مدل برنامه‌ريزی خطی (LP) است و بر اساس اصل مقدماتی موازنه آب عمل می‌کند و می‌توان آن را در سامانه‌های شهری، کشاورزی در یک حوزه آبریز یا در چندین سامانه حوضه رودخانه‌ای مورد استفاده قرار داد. مدل WEAP قادر است مسائل مربوط به مصارف از قبیل الگوهای مصرف آب، بازده اقتصادی، راهبردهای استفاده مجدد از آب، هزینه‌ها و الگوهای تخصيص آب و همچنین مسائل مربوط به منابع از قبیل جریان رودخانه، منابع آب زیرزمینی، مخازن و خطوط انتقال آب را شبیه‌سازی کند. WEAP اين امکان را فراهم کرده است که مؤلفه‌های طبیعی شامل نیازهای تبخیر و تعرق، رواناب، دبی پایه و غیره و همچنین مؤلفه‌های ساخته شده شامل سدها، پمپ-های آب زیرزمینی و غیره در سیستم‌های آبی شبیه‌سازی شود و به برنامه‌ريز اجازه می‌دهد که به محدوده وسیعی از عوامل و مؤلفه‌های مهم در مدیریت منابع آب دسترسی پیدا کند. حاصل این کار، ابزاری کارآمد برای آزمایش گزینه‌های مدیریتی توسعه منابع آب است (WEAP، ۲۰۱۲).

این مدل دارای قابلیت مدل‌سازی تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی است و امکان شبیه‌سازی برقابی در آن وجود دارد. علاوه بر این امکان اعمال منحنی فرمان برای بهره‌برداری از مخازن وجود دارد. از دیگر قابلیت‌های این مدل می‌توان به امکان تعريف سناریوهای مختلف و مشاهده نتایج به‌طور همزمان اشاره نمود.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی که باعث برتری WEAP بر مدل‌های مشابه آن می‌شود، قابلیت تعیین تاریخ توسط کاربر است. بدین معنا که کاربر قادر است ماه‌ها را به‌طور مثال به‌صورت ماه‌های

⁶². HEC

شمسی در مدل وارد کرده و تعداد روزهای همراه را نیز مشخص سازد. این مزیت بخصوص در طرح-های برنامه‌ریزی منابع آب در کشور ما مهم است. در مدل‌هایی که انعطاف لازم را برای تبدیل ماه‌ها ندارند، برای مواردی همچون تبخیر و یا آبدهی مخزن، ناچار از ضرایبی برای تبدیل استفاده می‌شود که علاوه بر عدم دقت، زمان‌بر است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های WEAP، امکان استفاده از توابع داخلی سیستم می‌باشد. این توابع با استفاده از Expression Builder مورد استفاده قرار می‌گیرند. توابع را می‌توان هم بر روی اعداد و هم بر روی سایر متغیرهای سیستم تعریف نمود. جهت تخصیص آب از منابع مختلف به نیازهای تعریف‌شده در حوضه بر اساس اولویت‌های تعریف‌شده، در هر گام زمانی یک بهینه‌ساز خطی حل می‌شود (Raskin et al, 1992).

هم‌اکنون این نرم‌افزار به‌طور گسترده در مطالعات سیستمی در کشورهای مختلف جهان استفاده شده است. علاوه بر استفاده در مطالعات یکپارچه حوضه این مدل برای تهیه سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS) در برنامه‌ریزی منابع آب پایدار برای مصارف همگانی در ایالات‌متحده در سال-های ۲۰۰۲-۲۰۰۵ استفاده شده است. WEAP بخش مرکزی این سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری بوده و در واقع چهارچوبی برای برنامه‌ریزان راهبردی، مسئولان ذینفع و تصمیم‌گیران فراهم کرده است (WEAP, ۲۰۱۲).

در زیر برخی دلایل انتخاب این مدل، قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن به‌اختصار بیان شده است (WEAP, ۲۰۱۲):

۱- دلایل انتخاب مدل

- وارد ساختن اجزای تشکیل‌دهنده این مدل بسیار ساده است.
- این مدل در عین جامع بودن، بسیار کاربر دوست است.
- استفاده از این مدل نیازی به آشنایی با سایر نرم‌افزارهای موجود ندارد و هر کاربری به‌راحتی می‌تواند از آن استفاده کند.
- در این مدل، امکان تعریف تاریخ و گام‌های زمانی مختلف وجود دارد.

- این مدل، می‌تواند داده‌ها را هم به صورت مستقیم و هم از طریق فایل‌های متنی یا Excel دریافت کند. همچنین نتایج خروجی مدل را به صورت نمودارهایی که بر اساس خواسته‌های کاربر تنظیم می‌شود و یا به صورت جداولی که به راحتی قابل ارسال به Excel هستند، نشان داده می‌شود.

۲- قابلیت‌های مدل

- به وسیله قابلیت‌ها و امکاناتی که در نرم‌افزار وجود دارد کاربر می‌تواند مدل واقعی و یا طرح موردنظر خود را برای نرم‌افزار تعریف نماید. برخی از این قابلیت‌ها عبارت‌اند از:
شماتیک طرح (شامل مناطق نیاز، منابع آب، خطوط انتقال، خطوط جریان بازگشتی و...).

- اولویت‌بندی تخصیص آب.
- شبیه‌سازی مؤلفه‌های کیفی آب.
- قابلیت‌های زمانی مدل.
- قابلیت مقایسه گزینه‌های مختلف.
- قابلیت مدل‌سازی نیازها و بررسی کیفیت آب در نقاط نیاز.
- قابلیت مدل‌سازی برقایی.
- قابلیت مدل‌سازی اقتصادی.

۳- محدودیت‌های مدل

- علاوه بر وجود قابلیت‌های مختلف، مدل دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. برخی از این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

- عدم یکپارچگی با نرم‌افزارهای GIS.
- عدم انتقال از مخزن به مخزن.
- عدم بررسی تأثیر مسائل اقتصادی و مدیریتی بر نیازها.
- عدم قابلیت تنظیم مستقیم سد بالادست برای نیازهای پائین دست.
- عدم امکان ارتباط با مدل‌های بهینه‌سازی.

۴-۵-۱-۲- فرمولاسیون مدل برنامه‌ریزی خطی

همان‌گونه که گفته شد، یک مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) برای حداکثر کردن پوشش نیازهای مناطق مصرف مورد استفاده قرار می‌گیرد و قیود این مدل شامل اولویت‌های نیاز، اولویت‌های تأمین آب، تعادل جرم و سایر قیود است.

تابع هدف این مدل برنامه‌ریزی خطی، حداکثر کردن میزان پوشش نهایی نقاط نیاز است. در هنگام حل معادلات برنامه‌ریزی خطی، در ابتدا تنها نقاطی که دارای اولویت اول هستند در نظر گرفته می‌شوند. سپس نقاط با اولویت ۲ و به همین ترتیب سایر نقاط در محاسبات مدل برنامه‌ریزی خطی لحاظ می‌شوند. در حالتی که آب کافی برای تأمین نقاط نیاز با اولویت یکسان در دسترس نیست، این مدل تلاش می‌کند تا تمام نیازها به صورت یکسان پوشش داده شوند. به‌طور کلی در این مدل از رابطه پیوستگی جرم در مخزن استفاده می‌شود. به بیان دیگر تغییرات ذخیره مخزن در هر دوره برابر اختلاف ورودی‌ها و خروجی‌ها در همان دوره است (معادله ۳-۱۰) (WEAP، ۲۰۱۲).

$$(\Delta Storage)_t = (Input)_t - (Output)_t \quad (9-4)$$

۴-۵-۱-۳- الگوریتم محاسباتی

در WEAP معادلات بیلان جرم آب و آلودگی در هر گره و در تمام خطوط انتقال با گام زمانی مشخص شده صورت می‌گیرد. آب به تمام نقاط داخل رودخانه‌ها و کانال‌ها و نقاط مصرف انتقال می‌یابد و محدودیت‌هایی از قبیل اولویت‌های نیاز، اولویت‌های تخصیص، تعادل جرم و سایر قیود در شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. بارهای نقطه‌ای آلودگی و وضعیت پارامترهای کیفی مشخص شده آب نیز در صورت لزوم مورد محاسبه قرار می‌گیرند (WEAP، ۲۰۱۲).

۴-۵-۱-۴- رویکرد WEAP

تحلیلگر، سیستم را به صورت اجزای مختلف منابع تأمین، برداشت، انتقال، تجهیزات تصفیه فاضلاب، نیازهای اکوسیستم، نیازهای آبی و تولید آلودگی ارائه می‌دهد. ساختار داده‌ها و سطح جزئیات را می‌توان به سادگی به شکل دلخواه درآورد تا نیازهای یک تحلیل خاص را برآورده کرده و محدودیت‌های ناشی از کمبود داده‌ها را نشان دهند.

کار با WEAP معمولاً شامل چندین گام است. در تعریف مطالعه، چهارچوب زمانی، مرزهای مکانی، اجزای سیستم و تنظیمات مسئله انجام می‌شود. وضع موجود که از آن می‌توان به عنوان گام واسنجی مدل در شرایط توسعه استفاده کرد، یک تصویر کلی از نیازهای آبی واقعی، بارهای آلودگی، منابع و تأمین سیستم نشان می‌دهد. در شرایط موجود، فرضیات کلیدی برای بیان سیاست‌ها، هزینه‌ها و عواملی که بر نیاز، آلودگی، تأمین و هیدرولوژی مؤثرند، تعریف می‌شود. سناریوها در شرایط موجود ساخته می‌شوند و با استفاده از آن‌ها می‌توان اثر فرضیات یا سیاست‌های مختلف را بر میزان دسترسی و مصرف آب در آینده بررسی کرد. نهایتاً سناریوها با توجه به میزان آب، هزینه‌ها و سودها، سازگاری با اهداف زیست‌محیطی و حساسیت به عدم قطعیت در متغیرهای کلیدی ارزیابی می‌شوند (WEAP، ۲۰۱۲).

فصل پنجم

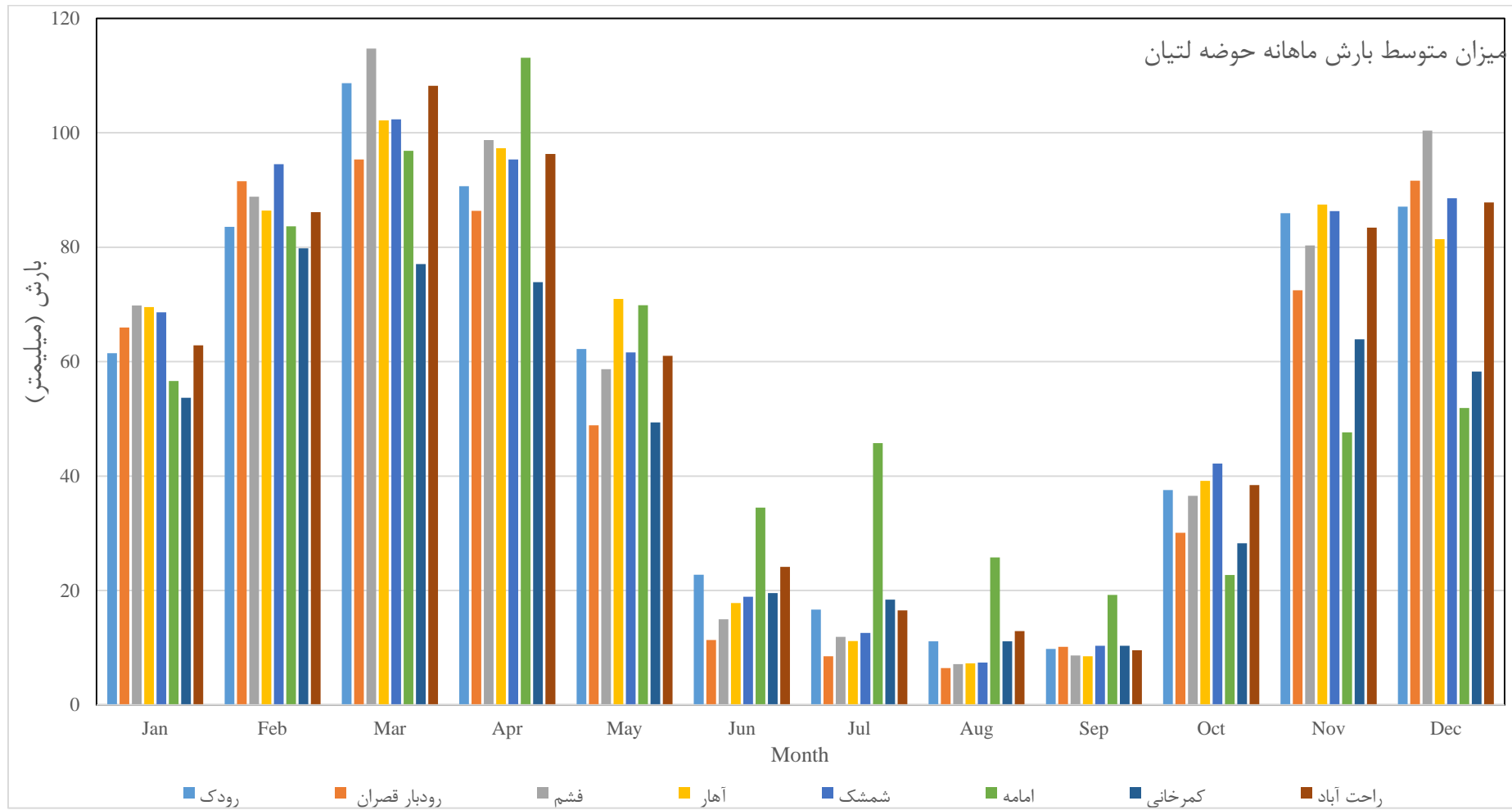
نتیجہ

۵-۱- مقدمه

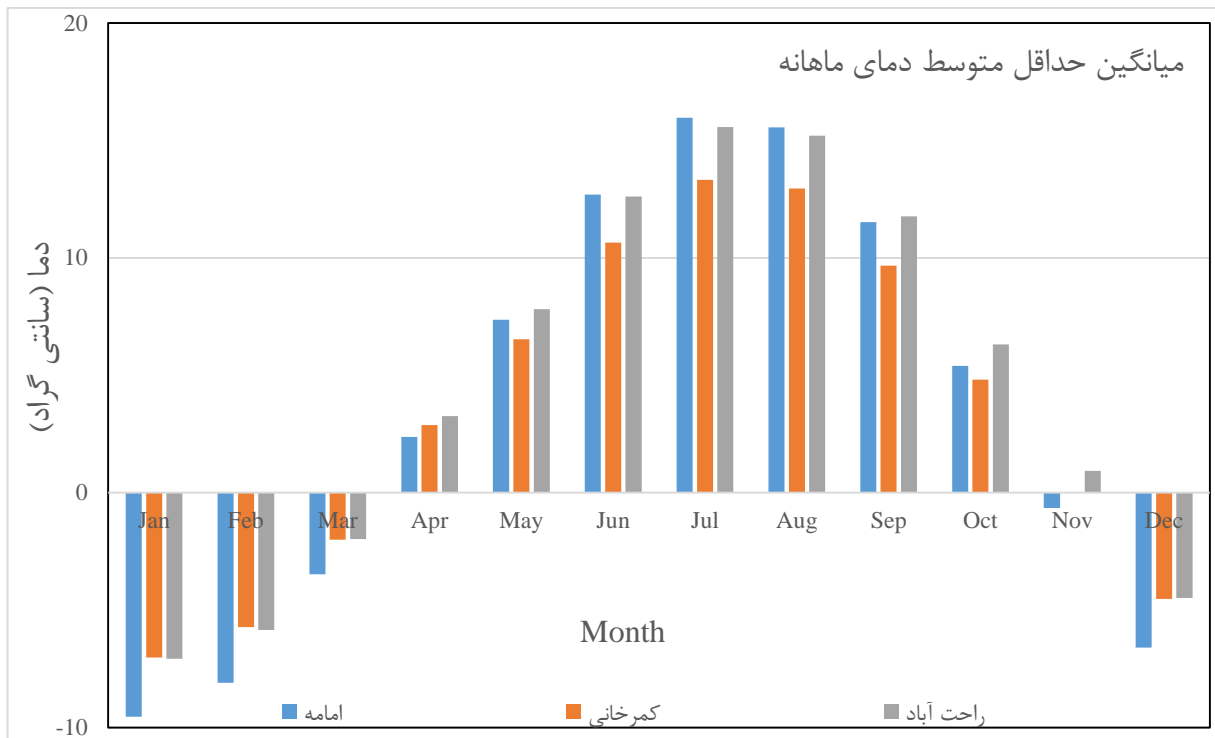
این مطالعه به بررسی موضوعاتی از قبیل تغییر اقلیم، مدل‌سازی بارش-رواناب و شبیه‌سازی تخصیص منابع آب برای دوره‌های آتی با رویکردی جدید، در حوضه لتیان، زیر حوضه جاجرود پرداخته است. نتایج این پژوهش به ترتیب اشاره‌شده در فصل‌های قبل در ادامه بیان می‌شود، به‌این ترتیب که در ابتدا با معرفی چند شاخص اقلیمی به مقایسه‌ی وضعیت اقلیمی منطقه در دوره-های زمانی آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم پرداخته می‌شود، سپس نتایج واسنجی و ارزیابی مدل بارش-رواناب به‌صورت گرافیکی (کیفی) و همچنین ارائه معیارهای خطا (کمی) گزارش می‌شود و در نهایت درباره‌ی چگونگی تخصیص منابع آب با توجه به هریک از سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی 2020S، 2050S، 2080S بحث می‌شود.

۵-۲- بررسی اطلاعات اقلیمی منطقه

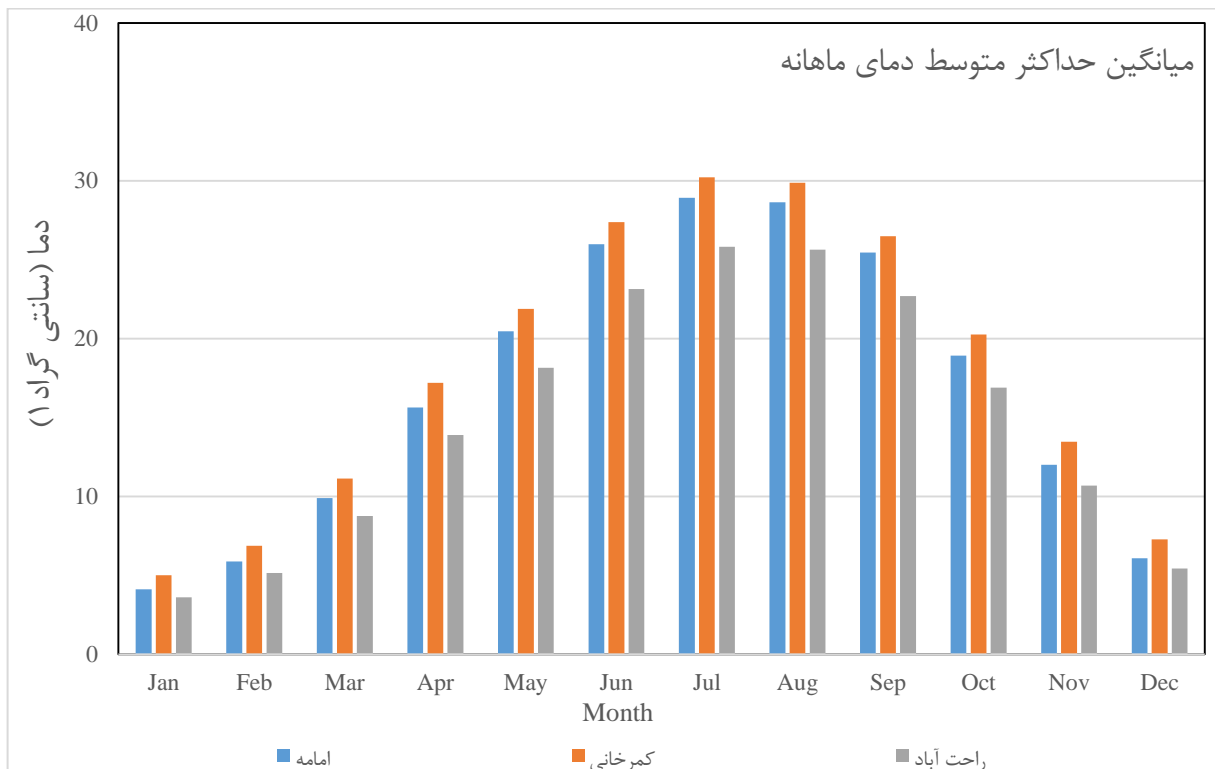
به‌منظور شناخت بیشتر حوضه مورد مطالعه پیش از آغاز اجرای مراحل کار باید به یک دید کلی از منطقه دست‌یافت. بدین منظور ابتدا به بررسی وضعیت اقلیمی و رواناب منطقه در دوره پایه پرداخته می‌شود. با توجه به پراکندگی مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی (شکل ۳-۶) می‌توان اختلاف میانگین بارش هر ایستگاه را در طول دوره آماری پایه ملاحظه نمود. این تفاوت‌ها گویای این نکته است که پراکندگی بارش در منطقه چشمگیر بوده و ضرورت به کار بردن همه‌ی این ایستگاه‌ها را جهت شبیه‌سازی بهتر حوضه در مدل WetSpa نشان می‌دهد. شکل (۵-۱) تفاوت‌های موجود در میانگین ۳۰ ساله‌ی بارش ماهانه در ایستگاه‌های مختلف حوضه را به‌خوبی نمایش می‌دهد. به‌علاوه در شکل-های (۵-۲) و (۵-۳) میانگین حداقل و حداکثر دمای ۳۰ ساله به‌صورت متوسط ماهانه برای ایستگاه-های مورد استفاده قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۵-۱) متوسط ۳۰ ساله‌ی بارش ماهانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل (۲-۵) میانگین ۳۰ ساله‌ی حداقل متوسط دمای ماهانه در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه



شکل (۳-۵) میانگین ۳۰ ساله‌ی حداکثر متوسط دمای ماهانه در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

در این تحقیق به منظور ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل GCM مورد استفاده با نرم‌افزار LARS، به دلیل نبود ایستگاه سینوپتیک و حتی کلیماتولوژی با دوره‌ی آماری حداقل ۳۰ سال در داخل حوضه، از اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی استفاده گردیده است که این اطلاعات به کمک ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی مجاور حوضه اعتبارسنجی شده و داده‌های مفقود آن‌ها با همبستگی بالای ۰.۹۵ جایگزین شده است.

۳-۵- ریزمقیاس نمایی به وسیله مدل اقلیمی لارس و تغییر اقلیم

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق با به‌کارگیری مدل مولد اقلیمی لارس (نسخه ۵.۵) داده‌های اقلیمی از قبیل دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و هواشناسی به صورت جداگانه تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 برای دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰، ۲۰۹۹-۲۰۷۰ ریزمقیاس گردیده است.

در این راستا پس از بررسی‌های اولیه طول دوره آماری از نظر کفایت داده‌ها و پیش از اجرای مدل، نرمال بودن و همگنی مطابق آنچه در بخش ۲-۲-۴ بیان شد، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بررسی‌های صورت گرفته در این مرحله در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

جدول (۵-۱) معیارهای مورد استفاده برای ارزیابی مدل LARS-WG در هریک از ایستگاه‌ها در دوره‌ی پایه

ایستگاه	نوع ایستگاه	KS Statistic	P value	R	NS
امامه	تبخیرسنجی	۰,۰۹۸	۰,۹۸۲	۰,۹۹۹	۰,۹۷۷
آهار	باران‌سنجی	۰,۰۹۹	۰,۹۸۰	۰,۹۹۰	۰,۹۷۹
راحت آباد	تبخیرسنجی	۰,۰۹۵	۰,۹۸۷	۰,۹۹۷	۰,۹۹۴
رودبار قصران	باران‌سنجی	۰,۰۸۹	۰,۹۸۸	۰,۹۹۳	۰,۹۸۵
رودک	باران‌سنجی	۰,۰۸۹	۰,۹۸۱	۰,۹۹۲	۰,۹۸۳
شمشک	باران‌سنجی	۰,۰۸۶	۰,۹۸۱	۰,۹۹۸	۰,۹۹۳
فشم	باران‌سنجی	۰,۰۸۹	۰,۹۸۴	۰,۹۸۷	۰,۹۶۳
کمرخانی	تبخیرسنجی	۰,۰۹۳	۰,۹۸۸	۰,۹۹۹	۰,۹۹۶

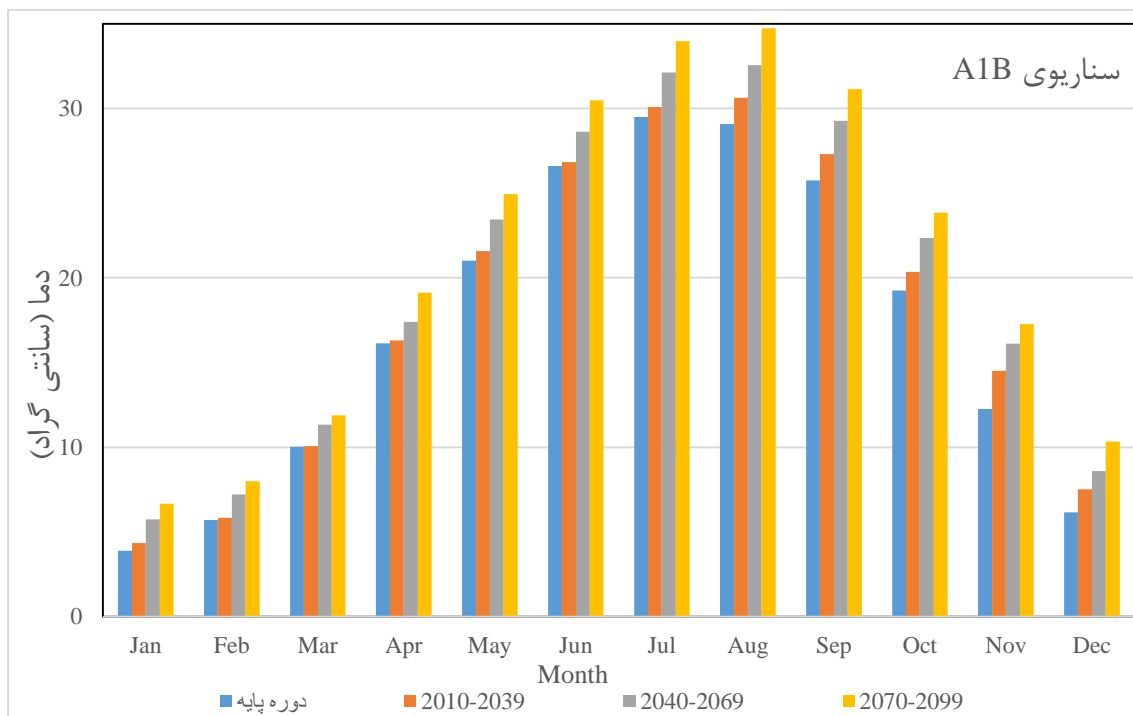
در مورد جدول بالا آماره‌های R و NS به صورت متوسط برای هریک از پارامترهای ریزمقیاس شده برای آن ایستگاه می‌باشند، در نتیجه مقدار دقت آماره‌ها در ایستگاه‌های باران‌سنجی پایین‌تر است، چون در این ایستگاه‌ها فقط دو فاکتور بارش و ساعت آفتابی ریزمقیاس می‌شوند. با توجه به نتایج جدول (۱-۵) و آنچه در بخش ۲-۲-۴ در مورد حدود آماره‌ها آمده است، چون مقدار سطح معنی‌داری برای مؤلفه‌های P-value و KS بزرگ‌تر از مقدار خطا ۰,۰۵ (سطح اطمینان ۹۵ درصد) است بنابراین توزیع فراوانی برای داده‌های ورودی از نوع نرمال است و در نتیجه صحت ریزمقیاس نمایی مدل لارس مورد قبول واقع شد. دقت در مقدار آماره‌ها گویای نتایج عالی ریزمقیاس نمایی مدل به روی اطلاعات موردنظر در دوره‌ی زمانی پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) است.

پس از ارزیابی مدل، دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش به صورت روزانه تحت سناریوهای یادشده برای دوره‌های ۳۰ ساله با استفاده از مدل HadCM3 تخمین زده شده و با دوره پایه (۲۰۰۹-۱۹۸۰) مقایسه گردید. در این پژوهش علاوه بر ۲ شاخص اصلی میانگین حداقل و حداکثر دمای ماهانه ۳۰ ساله به مطالعه ۴ شاخص مهم دیگر از قبیل شاخص تعداد روزهای یخبندان، شاخص روزهای بسیار گرم، شاخص بارش‌های سهمگین و شاخص تعداد روزهای خشک سالانه پرداخته شده است (www.met.hu). از آنجاکه ۲ شاخص میانگین حداقل و حداکثر دمای ماهانه، تنها نمایی کلی از وضعیت اقلیمی منطقه در آینده را نمایش می‌دهند از ۴ شاخص بعدی جهت دستیابی به چشم‌اندازی بهتر برای حوضه جاجرود تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی استفاده شده است.

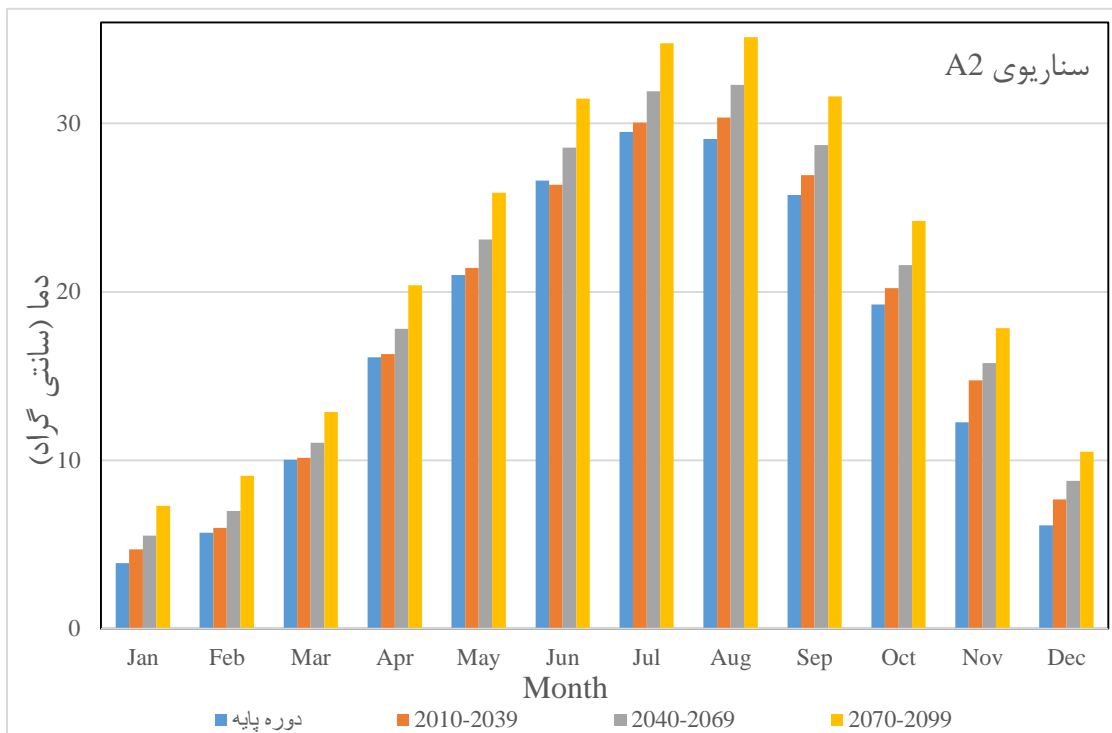
با توجه به تعداد بالای ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش برای بالا بردن دقت مدل بارش رواناب، نتایج اعمال سناریوهای تغییر اقلیم در سه بازه‌ی زمانی 2020s، 2050s و 2080s، تنها برای ایستگاه امامه که تقریباً در مرکز حوضه قرار دارد و به خوبی می‌تواند گویای وضعیت تغییرات اقلیمی حوضه باشد در متن پایان‌نامه آورده شده است و نتایج گرافیکی مربوط به سایر ایستگاه‌های مورد استفاده به همراه آنالیز آن‌ها در پیوست الف ارائه شده است.

۵-۳-۱- بررسی تغییرات دمای حداکثر

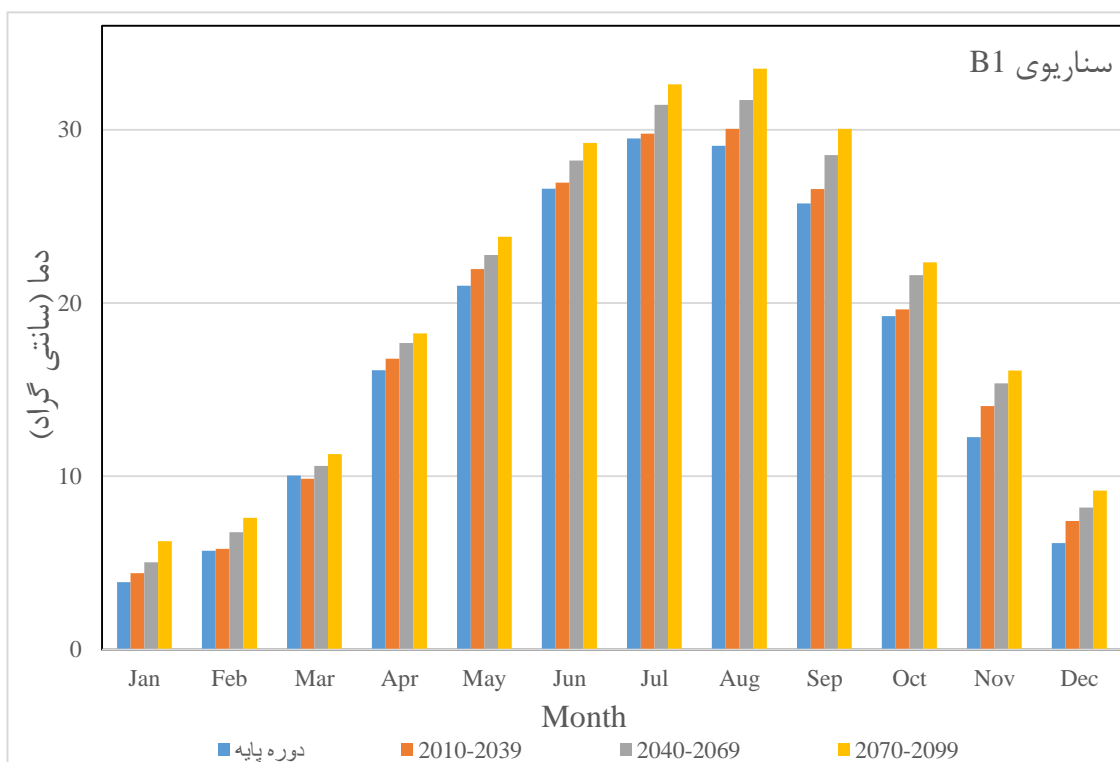
با توجه به شکل‌های (۴-۵) تا (۶-۵)، می‌توان دریافت که بیشترین افزایش میانگین حداکثر دمای ماهانه به میزان ۶,۰۴ درجه سلسیوس نسبت به دوره‌ی پایه مربوط به ماه آگوست سناریوی A2 در دوره‌ی 2080s است و کمترین افزایش در این دوره زمانی برای ماه آگوست (گرم‌ترین ماه سال در این منطقه) به سناریوی B1 به میزان ۴,۴۵ درجه سلسیوس مربوط می‌شود، این در حالی است که سناریوی A1B افزایش ۵,۶۵ درجه سلسیوسی در ماه آگوست در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A1B



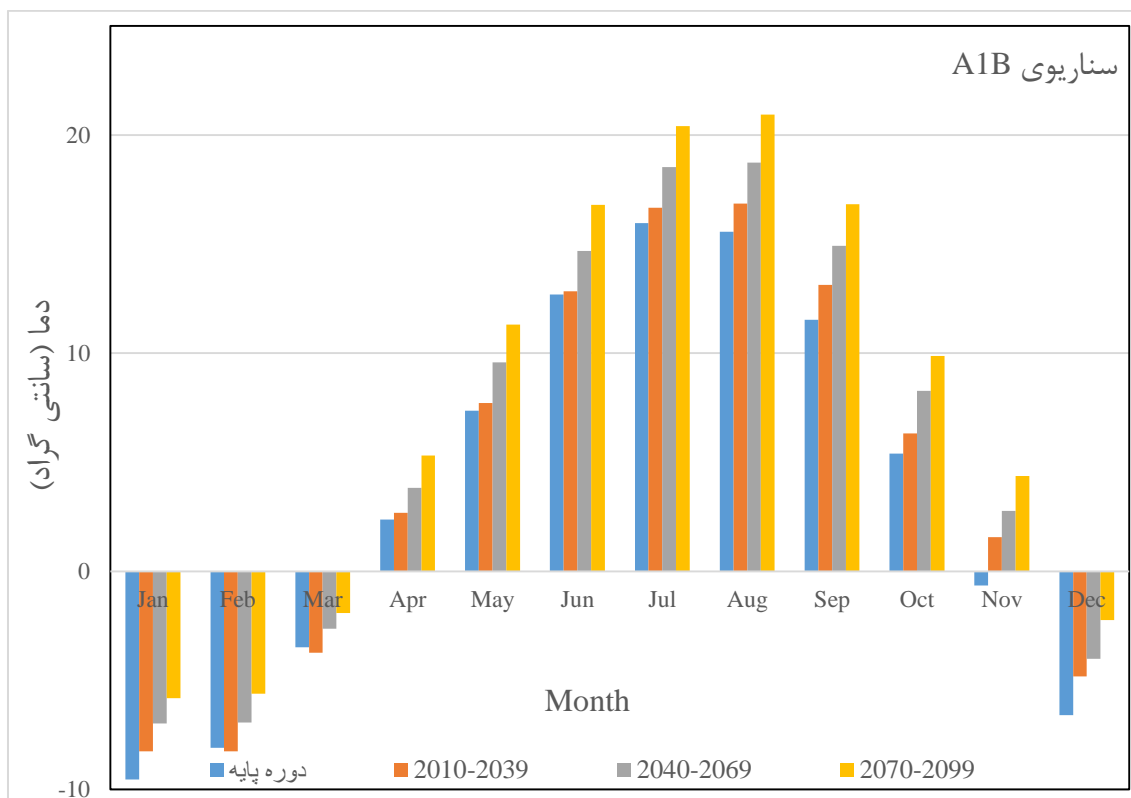
شکل (۵-۵) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A2



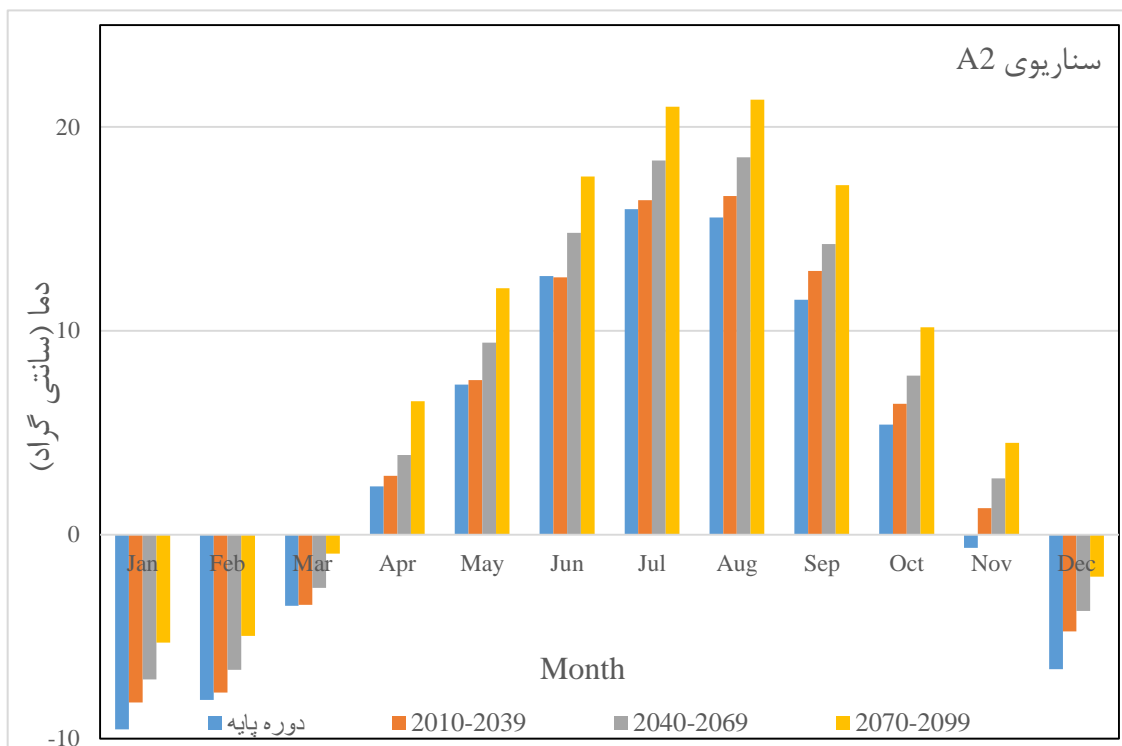
شکل (۶-۵) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی B1

۵-۳-۲- بررسی تغییرات دمای حداقل

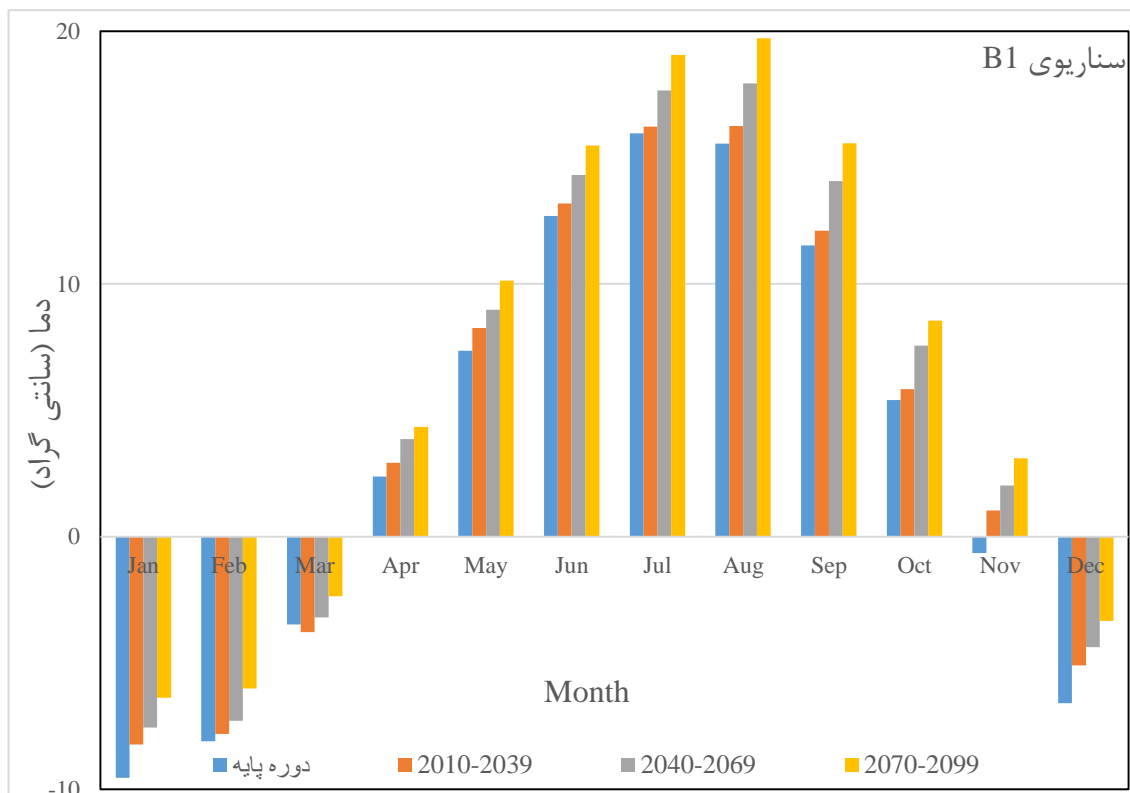
علاوه بر تغییرات میانگین دمای حداکثر، میزان تغییرات دمای حداقل نیز در دوره‌های آتی مورد تخمین و تحلیل قرار گرفت. شکل‌های (۵-۷) تا (۵-۹)، تغییرات حداقل دمای ماهانه را از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ (دوره پایه) نسبت به دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ برای هریک از سناریوهای مدنظر در ایستگاه امامه را نشان می‌دهند.



شکل (۵-۷) مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A1B



شکل (۸-۵) مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی A2



شکل (۹-۵) مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه امامه برای سناریوی B1

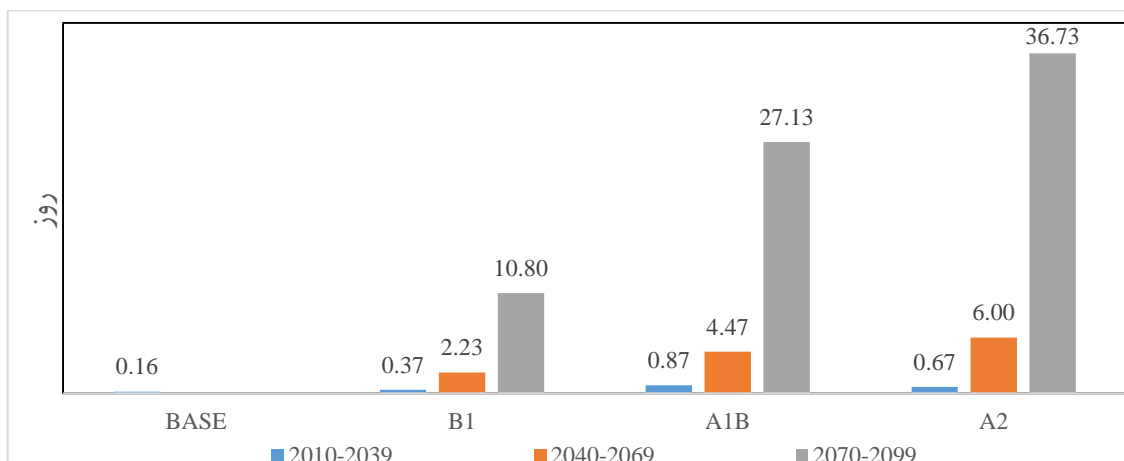
همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شاخص نیز مانند دمای حداکثر در تمامی سناریوها با افزایش افق زمانی میزان دمای حداقل دچار افزایش معنی‌داری شده است و تمامی سناریوها افزایش میانگین دمای حداقل ماهانه را نمایش می‌دهند به طوری که بیشترین افزایش نسبت به دوره‌ی پایه مربوط به سناریوی A2 در دوره‌ی 2080s و به میزان ۵,۷۸ درجه سلسیوس برای ماه آگوست است و کمترین افزایش در این دوره، تحت سناریوی B1 برای ماه مارس به مقدار ۱,۱۲ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد، این در حالی است که سناریوی A1B افزایشی ۵,۳۸ درجه‌ای را در ماه آگوست در دوره زمانی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نشان می‌دهد.

ضمن مشاهده‌ی دو شاخص فوق به این نتیجه می‌رسیم که دما در اثر تغییر اقلیم همواره افزایش می‌یابد به طوری که در خوش‌بینانه‌ترین سناریو (B1) در گرم‌ترین ماه سال در این منطقه (آگوست) شاهد افزایش ۱۴ درصدی میانگین دمای حداکثر ماهانه و افزایش ۲۱ درصدی میانگین دمای حداقل ماهانه تا سال ۲۱۰۰ هستیم، همچنین در بدبینانه‌ترین سناریو (A2) در ماه آگوست شاهد ۱۸ درصد افزایش میانگین دمای حداکثر ماهانه و ۲۷ درصد افزایش در میانگین دمای حداقل ماهانه تا سال ۲۱۰۰ هستیم. این میزان افزایش دما در سال‌های آتی به نوبه‌ی خود حکایت از افزایش مصرف در حوضه‌های شرب، صنعت و کشاورزی دارد.

۵-۳-۳- شاخص روزهای بسیار گرم

این شاخص نشان‌دهنده تعداد روزهایی از سال است که در آن‌ها دمای بیشینه بیشتر یا برابر با ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است، میزان این شاخص دارای روندی افزایشی می‌باشد و بیشترین افزایش‌ها در هر سناریو در دوره‌ی ۳۰ ساله پایانی (2080s) مشاهده می‌شود. به‌طورکلی این شاخص در خوش‌بینانه‌ترین حالت تا سال ۲۱۰۰ بیش از ۱۰ روز افزایش می‌یابد و در بدبینانه‌ترین سناریو تا سال ۲۱۰۰ به بیش از ۳۶ روز می‌رسد و این گویای

افزایش ۲۲۰ برابری این شاخص در منطقه نسبت به وضع کنونی می‌باشد که وقوع این پیش‌بینی می‌تواند با افزایش میزان تبخیر در منطقه به‌شدت تنش آبی را افزایش دهد و مدیریت منابع آبی را با چالش‌های جدی در آینده مواجه کند.

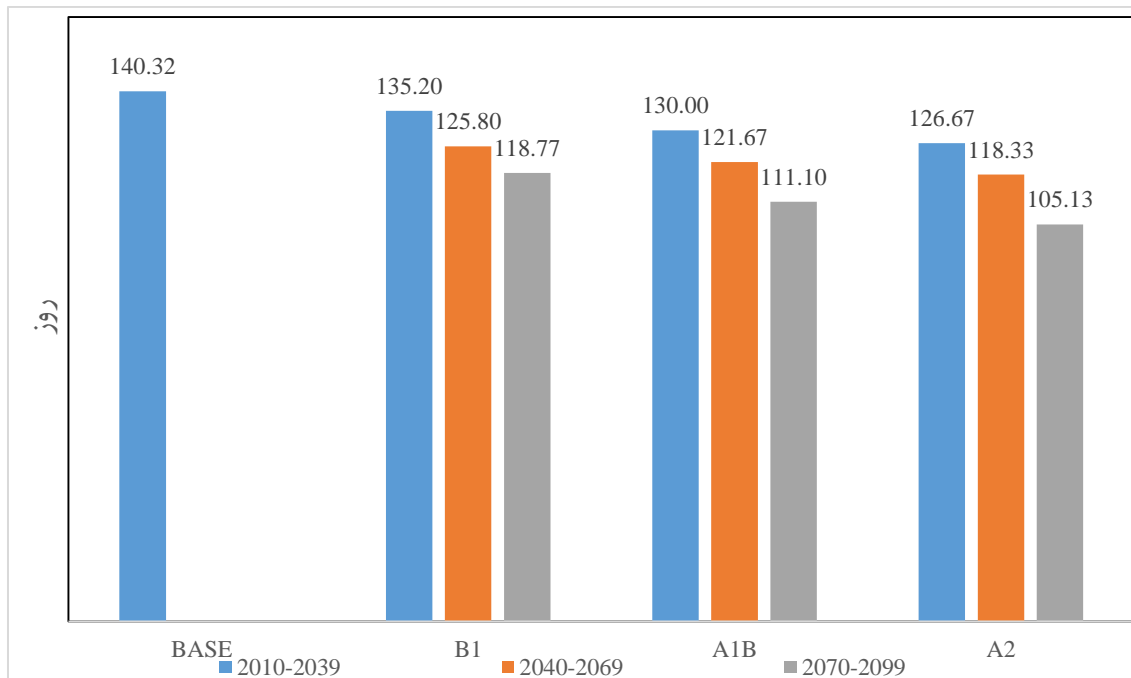


شکل (۵-۱۰) تغییرات شاخص تعداد روزهای بسیار گرم سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف

۵-۳-۴- شاخص تعداد روزهای یخبندان

طبق تعریف این شاخص، روزهایی از سال است که دمای هوای کمینه به زیر صفر برسد روز یخبندان محسوب می‌شود و در این شاخص لحاظ می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است، این شاخص دارای روند نزولی بوده و این مسأله بدین معنی است که حجم آبی که طی فصل‌های سرد به‌صورت جامد (برف و یخ) انباشته می‌گردد، زودتر ذوب‌شده و این مسأله نقش مهمی در جریان پایه رودهای منطقه موردبررسی طی فصول گرم سال خواهد داشت. طبق این نمودار در خوش‌بینانه‌ترین حالت تا سال ۲۱۰۰ تعداد روزهایی که دمای هوای کمینه کمتر از صفر درجه سلسیوس باشد، از ۱۴۰ روز به زیر ۱۱۹ روز خواهد رسید که ممکن است این رقم در سناریوی

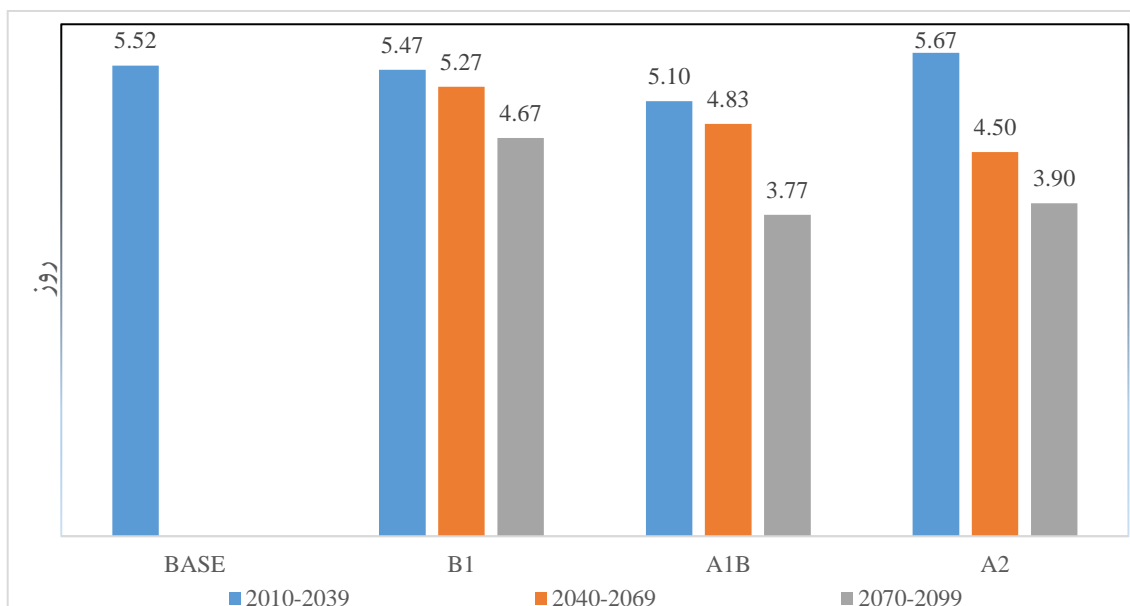
بدبینانه A2 حتی به زیر ۱۰۶ روز نیز کاهش پیدا کند که این کاهش ۲۵ درصدی شرایط مطلوبی را در آینده نشان نمی‌دهد.



شکل (۵-۱۱) تغییرات شاخص تغییرات تعداد روزهای یخبندان سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف

۵-۳-۵- شاخص بارش‌های سهمگین

طبق تعریف، شاخص بارش سهمگین به بارندگی‌هایی گفته می‌شود که بیش از ۲۵ میلی‌متر در روز گزارش شود. با توجه به شکل (۵-۱۲)، تعداد روزهای دارای بارش سهمگین در هر سال در تمامی سناریوها و برای اغلب دوره‌های زمانی دارای روند کاهشی می‌باشد به‌طوری‌که در بدبینانه‌ترین حالت تا سال ۲۱۰۰ می‌توان شاهد ۱,۶ روز کاهش این شاخص در هر سال باشیم و این به معنی کاهش ۳۰ درصدی بارش‌های سهمگین در این منطقه می‌باشد. این تغییرات هرچند اندک به نظر می‌رسد ولی تأثیر چشمگیری در بیلان آب منطقه خواهد داشت.

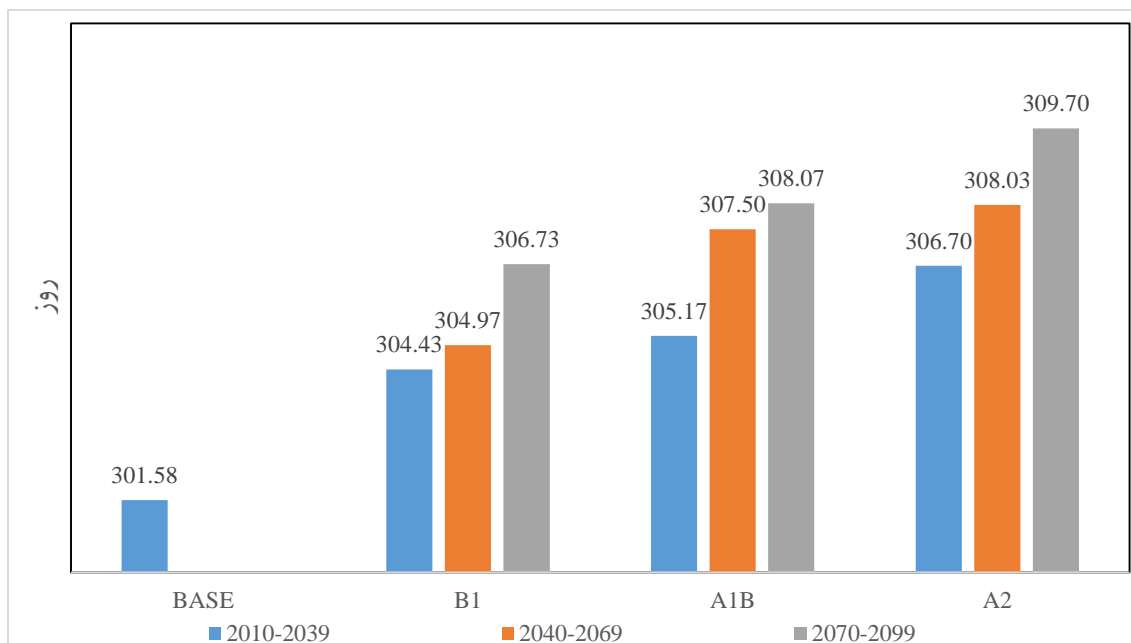


شکل (۵-۱۲) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف

۵-۳-۶- شاخص تعداد روزهای خشک سالانه

این شاخص عبارت است از تعداد روزهایی از سال که در آن‌ها مقدار بارش کمتر از ۱ میلی‌متر باشد. علت محاسبه‌ی این شاخص در این پژوهش، ایجاد امکان قیاس بین تغییرات دو شاخص مربوط به بارش یعنی بارش‌های بیش از ۲۵ میلی‌متر و بارش‌های کمتر از ۱ میلی‌متر تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌باشد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل‌های (۵-۱۲) و (۵-۱۳) قابل مشاهده است، این دو شاخص روندهای عکس دارند و برعکس شاخص بارش‌های سهمگین که به ترتیب با بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق زمانی، اغلب شاهد کاهش بارش‌های سهمگین بودیم؛ در شاخص تعداد روزهای خشک شاهد افزایش این آمار هستیم.



شکل (۵-۱۳) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه ایستگاه امامه تحت سناریوهای مختلف

شاخص تعداد روزهای خشک با توجه به شکل (۵-۱۳)، دارای روندی افزایشی به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق زمانی می‌باشد، به طوری که انتظار می‌رود در بدبینانه‌ترین سناریو (A_2) تا سال ۲۱۰۰ تعداد روزهای خشک سال ۸ روز افزایش داشته باشد که این به معنی افزایش ۳ درصدی خشکی با توجه به این شاخص می‌باشد. لازم به ذکر است که این خشکی به لحاظ میزان حداقل بارش است و تعریف جامعی از خشکی منطقه نمی‌باشد.

با تأمل در دو شاخص فوق که حاکی از کاهش میزان بارش‌ها و افزایش خشکی در اثر تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی آینده است، همچنین با توجه به این موضوع که میانگین دمای ماهانه در آینده در حال افزایش است، مطالعات در زمینه‌ی مدل کردن بارش برای برآورد رواناب و همچنین تخصیص درست و اصولی منابع آب برای آینده امری اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود که در ادامه‌ی این فصل به نتایج این پژوهش در هریک از مسائل فوق پرداخته شده است.

۵-۴- برآورد رواناب با استفاده از مدل WetSpa

پس از انجام تحقیق بر اساس روش و مراحل آورده شده در فصل قبل در این بخش نتایج به صورت مرتب و طبقه‌بندی شده ارائه شده است. نتایج اجرای مدل WetSpa و فرایند واسنجی و اعتبارسنجی جهت شبیه‌سازی جریان روزانه در این بخش آورده شده است.

۵-۴-۱- انتخاب دوره آماری و اجرای مدل

پس از بررسی آمار هواشناسی موجود در شرکت آب منطقه‌ای استان تهران و بررسی شرایط حوضه آبریز لتیان و زیر حوضه موردنظر پژوهش حاضر (جاجرود)، سال‌های آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲-۲۰۱۱ برای اجرای مدل انتخاب گردید. از این ۱۰ سال دوره آماری، ۷ سال (سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲-۲۰۱۱) برای واسنجی مدل و ۳ سال (سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵-۲۰۰۴) برای ارزیابی مدل در نظر گرفته شد.

آمار هواشناسی و هیدرومتری که از شرکت آب منطقه‌ای تهران و شرکت تماب برای اجرای مدل بارش-رواناب جمع‌آوری گشته‌اند عبارت‌اند از: آمار بارندگی روزانه در ۸ ایستگاه (ایستگاه‌های: رودک، رودبار قصران، فشم، آهار، شمشک، امامه، کمرخانی، راحت آباد)، تبخیر و دمای روزانه در ۳ ایستگاه (ایستگاه‌های: امامه، کمرخانی، راحت آباد) و دبی خروجی حوضه (برای دوره آماری موردنظر). مدل پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت.

۵-۴-۱-۱- واسنجی مدل

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در مدل WetSpa برای سهولت واسنجی مدل، ۱۱ پارامتر کلی مورد استفاده قرار گرفته است. این پارامترها دارای تعاریف فیزیکی بوده و در کنترل رواناب و هیدروگراف خروجی حوضه نقش مهمی دارند. در این تحقیق برای واسنجی مدل از روش دستی (آزمون و خطا) و روش واسنجی خودکار نرم‌افزار PEST استفاده شده است. در روش دستی، مدل با مقادیری انتخابی از

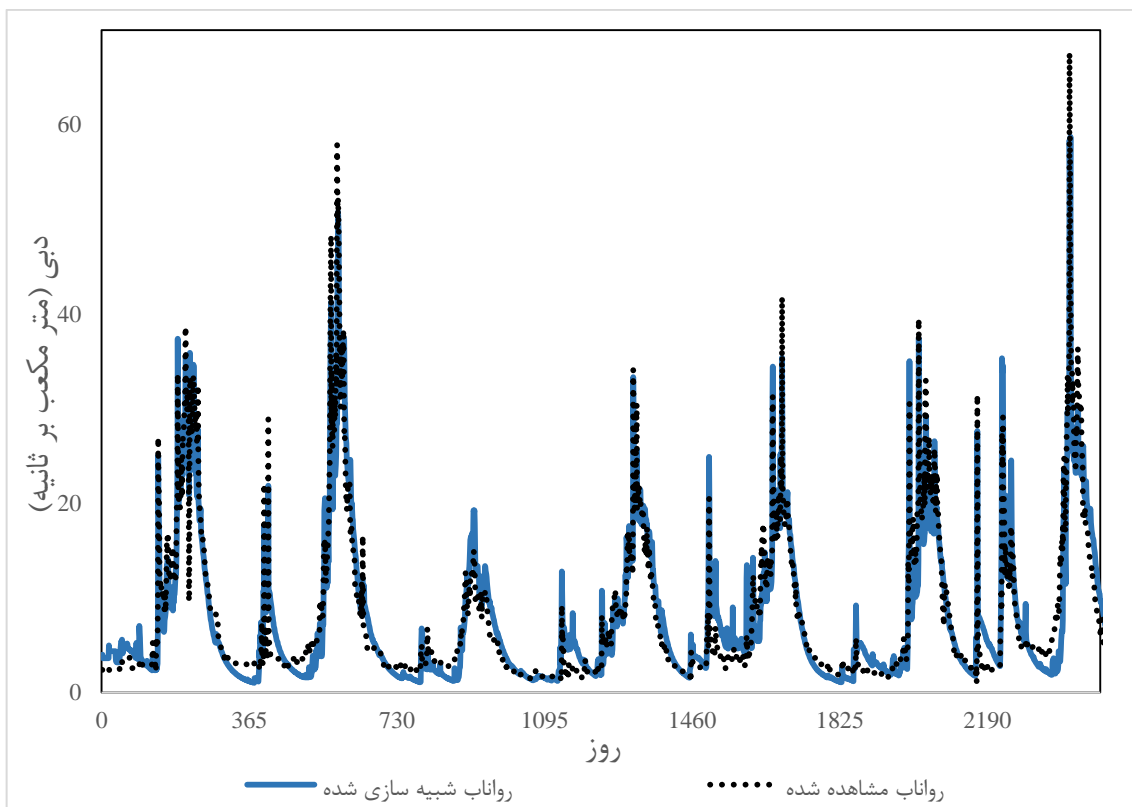
پارامترهای اولیه اجرا شده و خروجی آن با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه می‌گردد و این کار ادامه پیدا می‌کند تا بهترین تطبیق بین خروجی‌ها حاصل شود. در واسنجی خودکار، انتخاب مقادیر اولیه مناسب برای پارامترهای مدل خیلی مهم است. بدین منظور ابتدا مدل تا حدود زیادی به صورت دستی واسنجی شد. پس از به دست آوردن مقادیر مناسب برای مجموعه پارامترهای مورد نظر جهت واسنجی، این مقادیر به PEST، داده شد تا بر اساس روش جستجوی محلی مقادیر مناسبی را برای پارامترها تعیین نماید. در جدول (۲-۵) مقادیر پارامترهای واسنجی شده ارائه شده است.

جدول (۲-۵) مقادیر پارامترهای عددی واسنجی شده

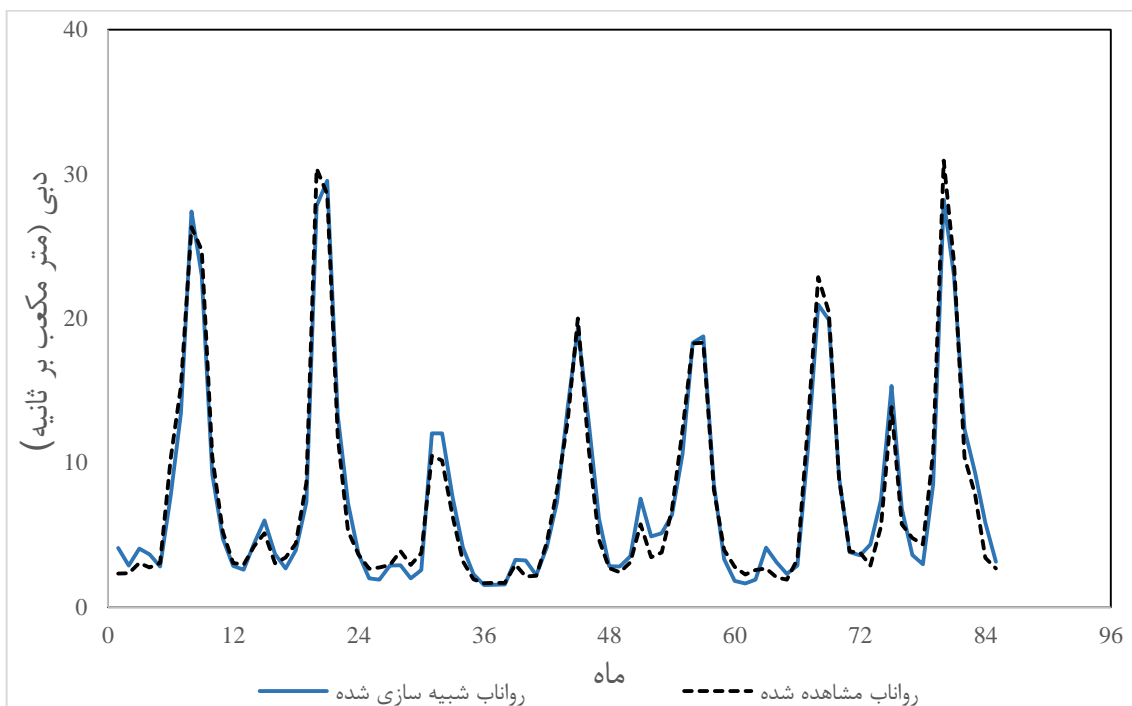
علامت	پارامتر	مقادیر واسنجی شده
K_i	فاکتور جریان زیرسطحی (-)	۰,۳۳۵
K_g	ضریب افت آب زیرزمینی* (d^{-1})	۰,۰۰۰۲۲
K- ss	رطوبت اولیه خاک (-)	۱,۵۳۱
K- ep	فاکتور تصحیح تبخیر و تعریق پتانسیل (-)	۰,۰۴۰۵
G_0	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (میلی‌متر)	۰,۸۵۸
G- max	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (میلی‌متر)	۹۸۰۰
T_0	ضریب درجه حرارت آستانه (درجه سانتی‌گراد)	-۰,۰۴۲
K – snow	ضریب روز درجه حرارت (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد بر روز)	۱,۰۹۵
K – rain	ضریب روز درجه بارش (میلی‌متر بر میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد بر روز)	1×10^{-6} *
K- run	توان رواناب سطحی (-)	۷,۰۹۲
P_max	حداکثر شدت بارش (میلی‌متر)	۷۰۰

* بر روز

به‌منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa نتایج شبیه‌سازی با هیدروگراف مشاهده‌ای، به‌صورت گرافیکی مقایسه می‌شوند. در شکل‌های (۱۴-۵) و (۱۵-۵) مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوضه آبریز جاجرود برای دوره‌ی واسنجی به‌صورت روزانه و ماهانه ارائه شده است.



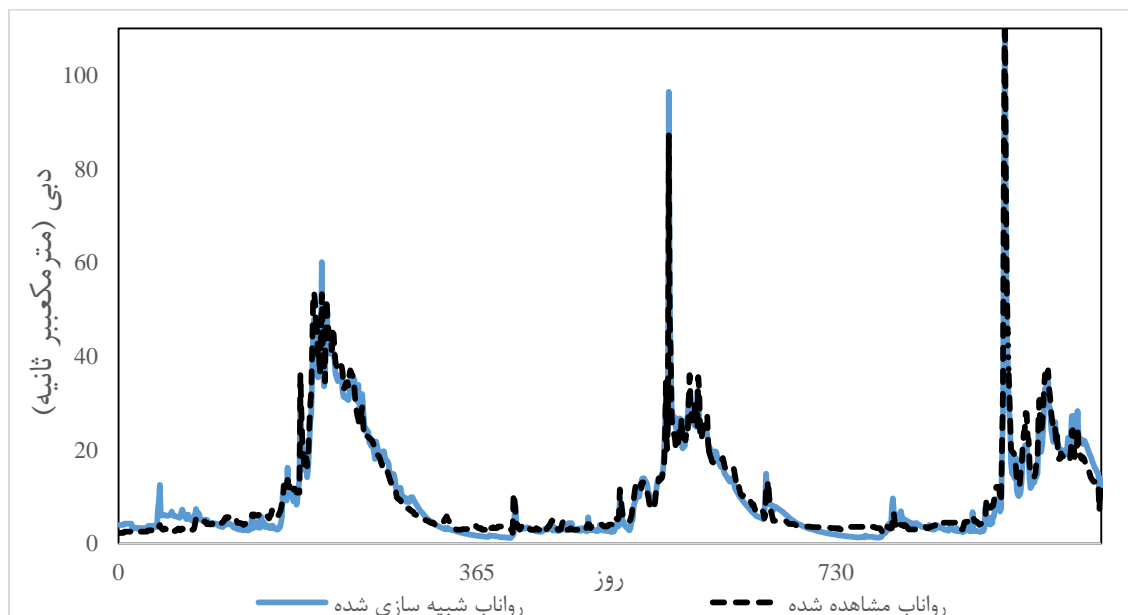
شکل (۵-۱۴) مقایسه جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه حوضه جاجرود در دوره واسنجی



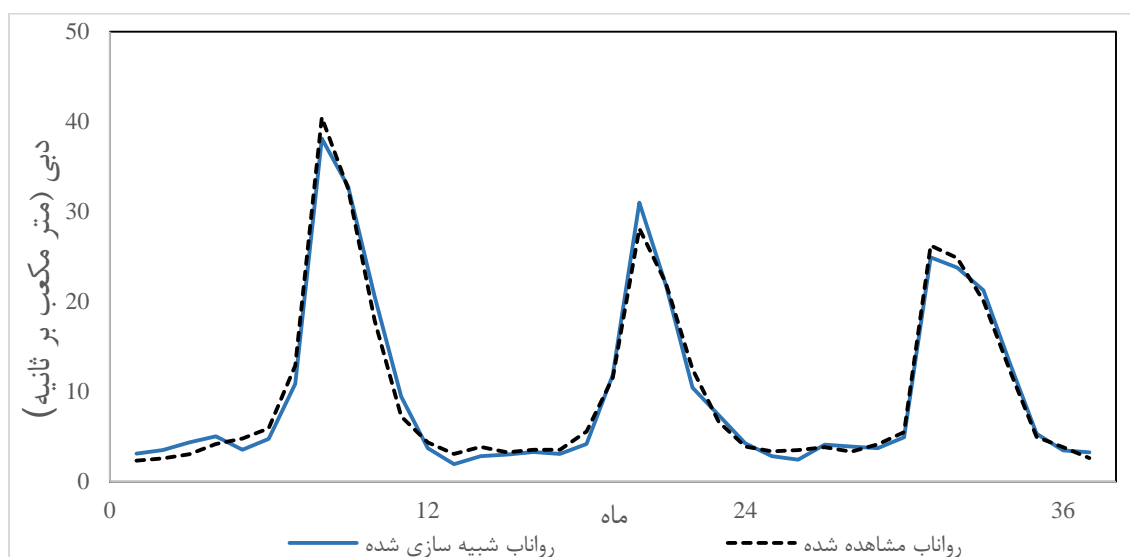
شکل (۵-۱۵) مقایسه بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ماهانه حوضه جاجرود در دوره واسنجی

۵-۴-۱-۲- ارزیابی مدل

با ثابت نگه داشتن پارامترهای حاصل از دوره واسنجی، مدل برای سال‌های آبی ۲۰۰۲-۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴-۲۰۰۵ اجرا شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دوره ارزیابی در مقایسه با داده‌های دبی مشاهداتی موجود در دو شکل (۵-۱۶) و (۵-۱۷) نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۶) مقایسه بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه حوضه جاجرود در دوره ارزیابی



شکل (۵-۱۷) مقایسه بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ماهانه حوضه جاجرود در دوره ارزیابی

۵-۴-۱-۳- نتایج حاصل از تعیین مقادیر شاخص‌های کارایی مدل برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی

جهت اندازه‌گیری بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه‌شده و مشاهده‌ای و بررسی کارایی کمی مدل، معیارهای ارزیابی مختلفی در مدل WetSpa وجود دارد که در بخش ۴-۱-۴-۶ به آن‌ها اشاره شده است. جدول (۳-۵) مقادیر شاخص‌های کارایی مدل را در دوره واسنجی و ارزیابی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در قبل اشاره گردید، برای ارزیابی کارایی مدل، عامل دیگری به نام معیار یکپارچگی، معرفی گردیده است که جنبه‌های مختلف هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای را مورد مقایسه قرار می‌دهد و در حقیقت نشان‌دهنده میزان تفاوت‌هایی از قبیل اندازه، شکل و حجم، بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. با جایگزینی مقادیر حاصل از ارزیابی مدل در رابطه (۴-۸)، معیار جمعی دوره‌ی واسنجی برابر با ۰,۸۹۸ به دست می‌آید که طبق جدول (۴-۲) میزان کارایی مدل در حوضه جاجرود بر اساس معیار جمعی در محدوده‌ی عالی دسته‌بندی می‌شود.

جدول (۳-۵) مقادیر شاخص‌های کارایی مدل در دوره واسنجی و ارزیابی

معیار ارزیابی	دوره‌ی واسنجی	دوره‌ی ارزیابی
انحراف مدل برای تعادل حجم جریان (Bias)	۰,۰۱۲	-۰,۰۳۱
انحراف معیار (R)	۰,۵۶۷	۰,۶۰۵
معیار ناش-ساتکلیف (NS)	۰,۸۰۳	۰,۸۰۱
معیار ناش-ساتکلیف برای جریان‌های کم (NSL)	۰,۷۹۷	۰,۸۲۱
معیار ناش-ساتکلیف برای جریان‌های زیاد (NSH)	۰,۸۱۵	۰,۷۸۹
ضریب همبستگی اصلاح‌شده (Rmod)	۰,۹۰۴	۰,۸۸۱
معیار جمعی	۰,۸۹۸	۰,۸۸۳

۵-۴-۲- شبیه‌سازی رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم

بر اساس نتایج پژوهش فرزانه و همکاران (۱۳۸۹) مدل HadCM3 برای دما و بارش به‌عنوان بهترین مدل معرفی گردید. لذا با توجه به نیاز همزمان مدل WetSpa به هر ۲ پارامتر مذکور، مدل HadCM3 به‌عنوان مدل منتخب حوضه معرفی می‌شود و در کلیه مراحل از داده‌های این مدل استفاده خواهد شد. انتخاب سناریوها بر اساس ترسیم وضعیت اقلیمی در آینده می‌باشد، به‌طوری‌که سناریوی A1B وضعیتی معتدل را ترسیم می‌نماید درحالی‌که سناریو انتشار A2 بحرانی‌ترین حالت در برآورد پارامترها به دست می‌دهد و سناریو B1 نتایجی به‌مراتب خوش‌بینانه‌تر از دو سناریو دیگر را تحت تأثیر تغییر اقلیم ارائه می‌کند.

پس از این‌که داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی تحت مدل HadCM3 و سناریوهای یادشده به کمک مدل لارس ریزمقیاس گردید، سری زمانی ۳۰ ساله این داده‌ها برای هر ۳ دوره آتی جهت معرفی به مدل WetSpa آماده شد. به کمک معادله‌ی تجربی هارگریوز^{۶۳}-سامانی که در معادله‌ی (۵-۱) آورده شده است برای هریک از دوره‌های زمانی و سناریوهای یادشده مقدار تبخیر و تعرق نیز به‌صورت روزانه محاسبه شد و به همراه اطلاعات ریزمقیاس شده‌ی بارش روزانه به‌عنوان ورودی‌های لازم برای برآورد رواناب به مدل WetSpa داده شد.

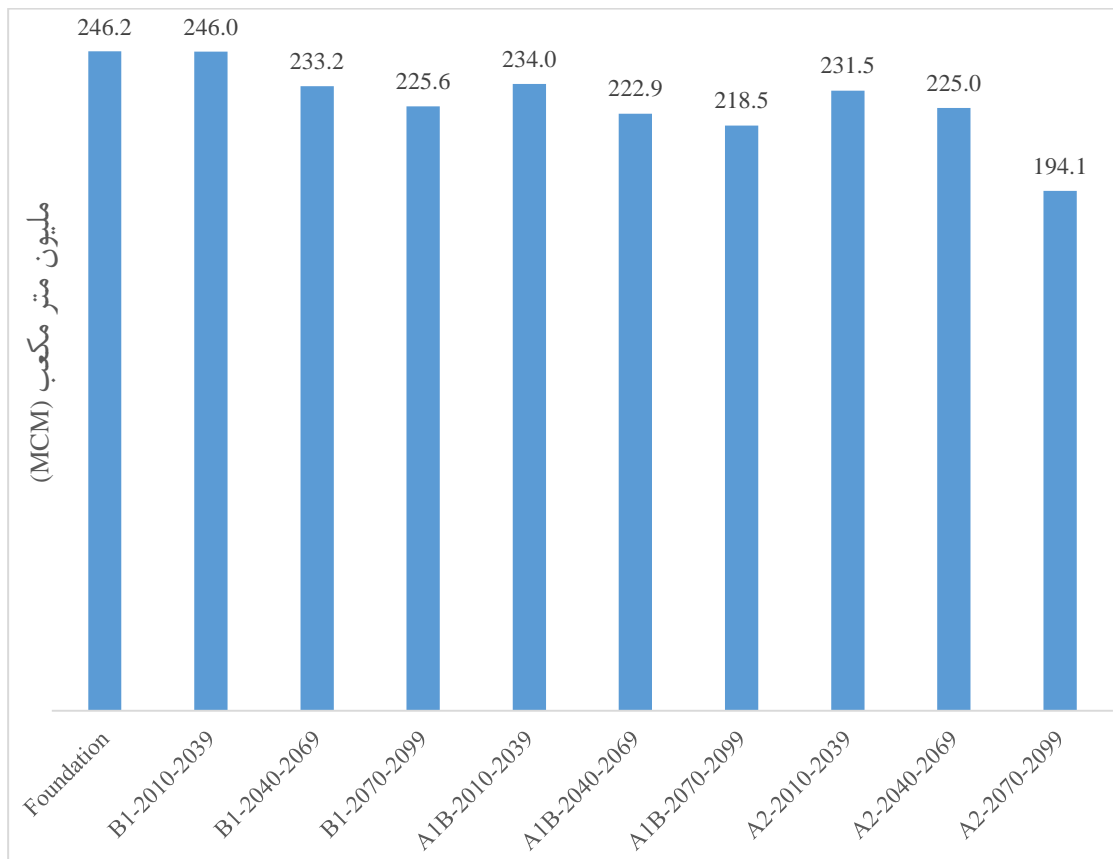
$$ET_o = 0.0023 Ra (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (1-5)$$

در رابطه‌ی بالا T_{min} : دمای حداقل، T_{max} : دمای حداکثر، T_{mean} : دمای متوسط و Ra : ساعات آفتابی می‌باشد.

میزان رواناب بر مبنای طول دوره پایه به‌صورت روزانه برای دوره‌های آتی تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 شبیه‌سازی گردید. نمودار (۵-۱۸) اثرات تغییر اقلیم را بر میانگین سالانه رواناب برای ایستگاه هیدرومتری رودک تحت سناریوهای یادشده، طی دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (۲۰۹۹-۲۰۷۰) نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، در تمامی سناریوها به‌استثنای سناریوی

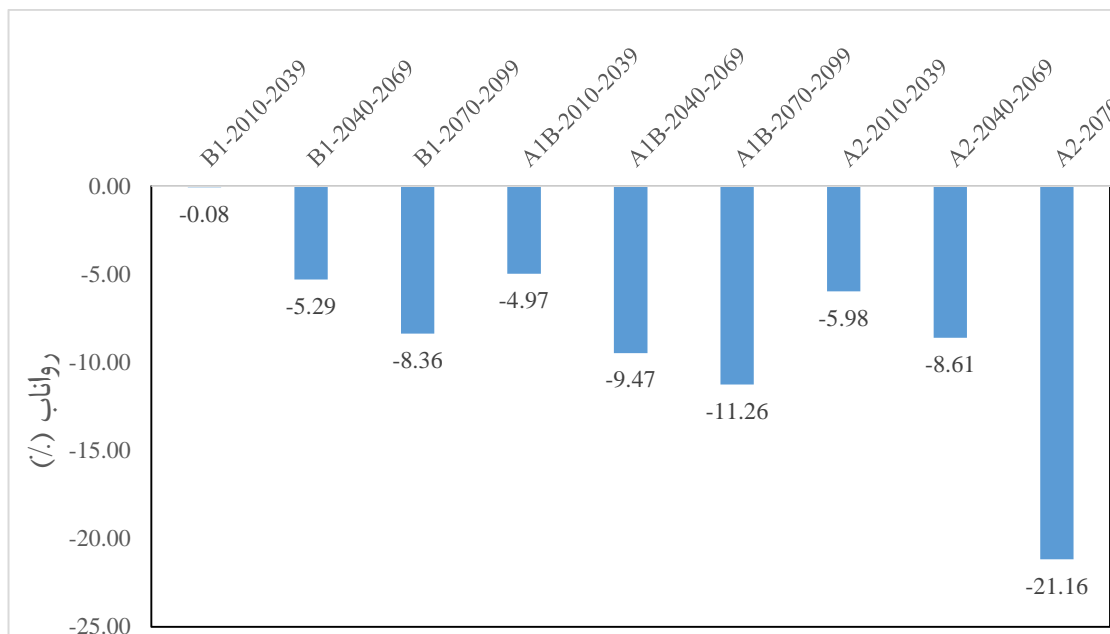
⁶³- Hargreaves

B1 برای دوره‌ی (۲۰۲۰s)، میزان آبدهی دچار افت چشمگیری خواهد بود. به طوری که انتظار می‌رود میزان آبدهی سالانه طی دوره (۲۰۸۰s) تحت سناریوی A2، در بدبینانه‌ترین حالت از ۲۴۶,۲ به ۱۹۴,۱ میلیون متر مکعب در سال برسد.



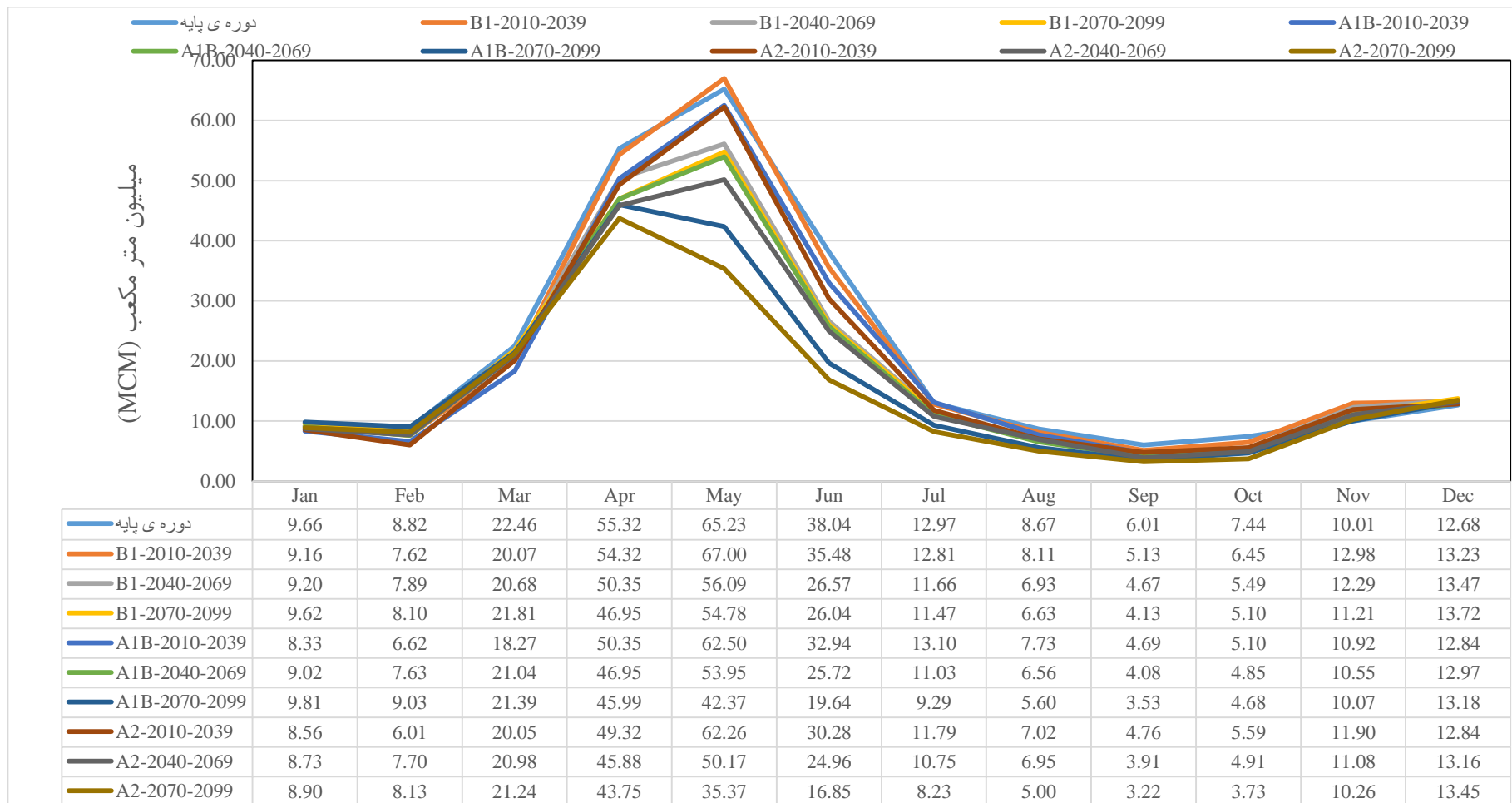
شکل (۵-۱۸) متوسط آبدهی سالانه حوضه جاجرود (ایستگاه آب‌سنجی رودک)

در شکل (۵-۱۹) میزان کاهش رواناب سالانه حوضه جاجرود برحسب درصد نسبت به دوره‌ی پایه برای هریک از سناریوها و افق‌های زمانی نشان داده شده است. همان‌طور که قابل ملاحظه است بیشترین کاهش در سناریوی A2 در افق زمانی سوم (2080s) به میزان ۲۱ درصد اتفاق می‌افتد. نکته‌ی قابل توجه در مورد این نمودار روند کاهشی رواناب به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق‌های زمانی در ایستگاه هیدرومتری رودک است.



شکل (۵-۱۹) درصد کاهش متوسط آبرسانی سالانه حوضه جاجرود (ایستگاه آب‌سنجی رودک)

شکل (۵-۲۰) نیز تغییرات جزئی در متوسط دبی ماهانه ایستگاه رودک را نشان می‌دهد. این نمودارها نیز نتایج مشابهی را ارائه می‌کنند، به طوری که دوره پایه دارای شدیدترین تغییرات در طول ماه‌های مختلف سال بوده و بیشترین میزان دبی مربوط به سناریوی B1 برای دوره آینده نزدیک می‌باشد. در حالی که سناریوی A2 برای دوره آینده دور کمترین سطح زیر نمودار را به خود اختصاص می‌دهد. در تمامی نمودارها حداکثر دبی به ترتیب در ماه‌های آوریل و می (فروردین و اردیبهشت) روی داده و در ماه‌های بعد به تدریج از میزان دبی کاسته شده و در ماه‌های سپتامبر و اکتبر (شهریور و مهر) به حداقل خود می‌رسند. تمامی سناریوها تقریباً از روند مشابهی برخوردار بوده و با فاصله کمی از یکدیگر به صورت دسته‌ای از منحنی‌ها ظاهر شده‌اند.

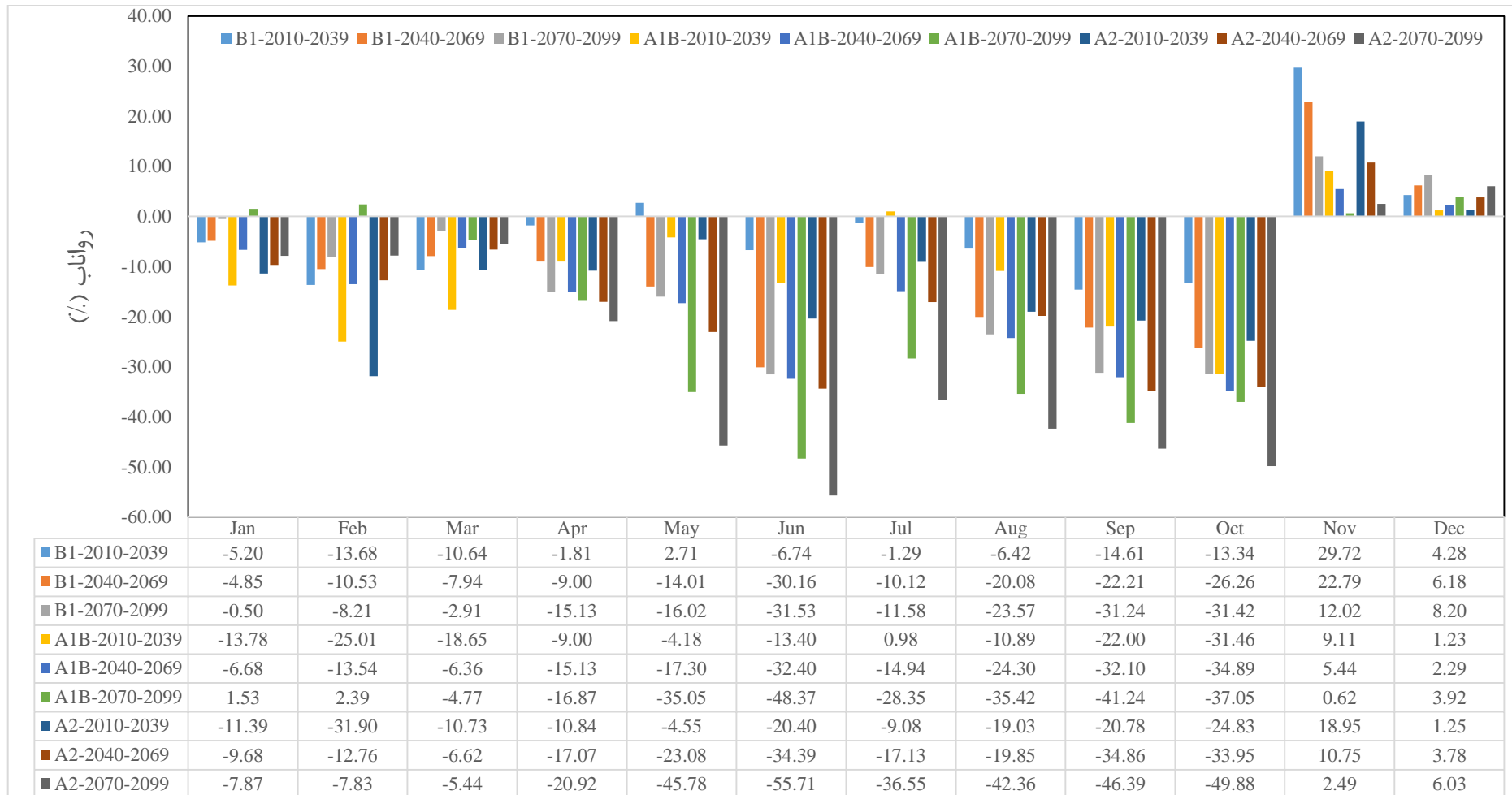


شکل (۵-۲۰) متوسط آبدهی ماهانه ایستگاه آبسنجی رودک

شکل (۵-۲۱) روند تغییرات در میزان رواناب ماهانه را برحسب در صد برای هریک از سناریوها و افق- های زمانی نشان می‌دهد. نکته‌ی قابل‌تأمل در مورد روند تغییرات رواناب در هریک از سناریوها در این حوضه، افزایش متوسط رواناب ماهانه در ماه‌های سرد سال (Dec و Jun, Feb, Mar) و کاهش آن در سایر ماه‌های سال با افزایش افق زمانی است ولی مشابه متوسط رواناب سالانه به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها، متوسط رواناب ماهانه نیز روند کاهشی دارد که این دو نکته در این شکل به‌خوبی نشان داده شده است.

افزایش متوسط رواناب ماهانه بر اثر تغییر اقلیم در ماه‌های سرد سال را می‌توان با افزایش ذوب برف به دلیل افزایش دما مرتبط دانست. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است در ماه‌های نوامبر و دسامبر تحت هر سناریو و افق زمانی متوسط رواناب ماهانه به نسبت دوره‌ی زمانی پایه روند افزایشی دارد.

پس از برآورد رواناب رودخانه تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نوبت به گام پایانی این پژوهش یعنی شبیه‌سازی چگونگی تخصیص منابع آبی محدود موجود در آینده بر اثر افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای است که در بخش بعدی به تفصیل به آن پرداخته شده است.



شکل (۵-۲۱) درصد کاهش متوسط آبدهی ماهانه ایستگاه آب‌سنجی رودک (خروجی نهایی حوضه)

۵-۵- تخصیص منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم

همان‌طور که گفته شد بهره‌برداری اصولی از منابع آب موجود، امری مهم و ضروری می‌باشد بخصوص در ایران که دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک و از لحاظ منابع آبی محدود می‌باشد. در این مطالعه به‌صورت موردی، چگونگی بهره‌برداری از مخزن سد لتیان تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفته است و با اعمال شرایط بهره‌برداری واقعی، وضعیت تخصیص منابع آب به مصارف مختلف و همچنین تغییرات ذخیره مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. بهره‌برداری به روش واقعی یعنی، چنانچه آب کافی در دسترس باشد، خروجی مخزن کل نیازهای آبی را تأمین می‌نماید. اگر برای تأمین نیازها آب کافی در دسترس نباشد تمامی ذخیره مخزن رهاسازی شده و مخزن خالی می‌گردد. همچنین اگر بیش از اندازه آب در دسترس باشد مخزن پر شده و در صورت لزوم آب اضافی به‌صورت سرریز خارج می‌شود.

۵-۵-۱ شبیه‌سازی چگونگی تخصیص منابع آب

همان‌طور که در فصل چهارم بیان شد، یک مدل شبیه‌سازی بر اساس اطلاعات ورودی نظیر جریان، بارندگی و تبخیر قادر به محاسبه نیازهای مختلف، حجم دریاچه و خروجی از آن در دوره‌های زمانی مختلف می‌باشد. محدودیت‌های فیزیکی سیستم شامل ظرفیت دریاچه، حجم خروجی‌ها، تأسیسات انتقال، همچنین محدودیت‌های قانونی نظیر رعایت حق‌آبه بران در مدل شبیه‌سازی لحاظ می‌شود.

علاوه بر پارامترهای فیزیکی و جریان‌های ورودی به مخازن که به‌عنوان اطلاعات ورودی به مدل داده می‌شود، سیاست بهره‌برداری از سیستم (مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها شامل نحوه تخصیص حجم ذخیره مخازن به مصارف مختلف، چگونگی ذخیره یا تخلیه از مخازن یا میزان برداشت آب از نقاط مختلف سیستم)، به مدل داده شده است. متغیرهای تصمیم‌گیری شامل خروجی از دریاچه، حجم ذخیره در دریاچه، میزان تأمین نیازها و غیره خروجی‌های مدل شبیه‌سازی می‌باشند که در ادامه و به

اختصار در این بخش به برخی از آن‌ها که بتوانند گویای تأثیر تغییر اقلیم بر چگونگی تخصیص منابع آب باشند پرداخته شده است.

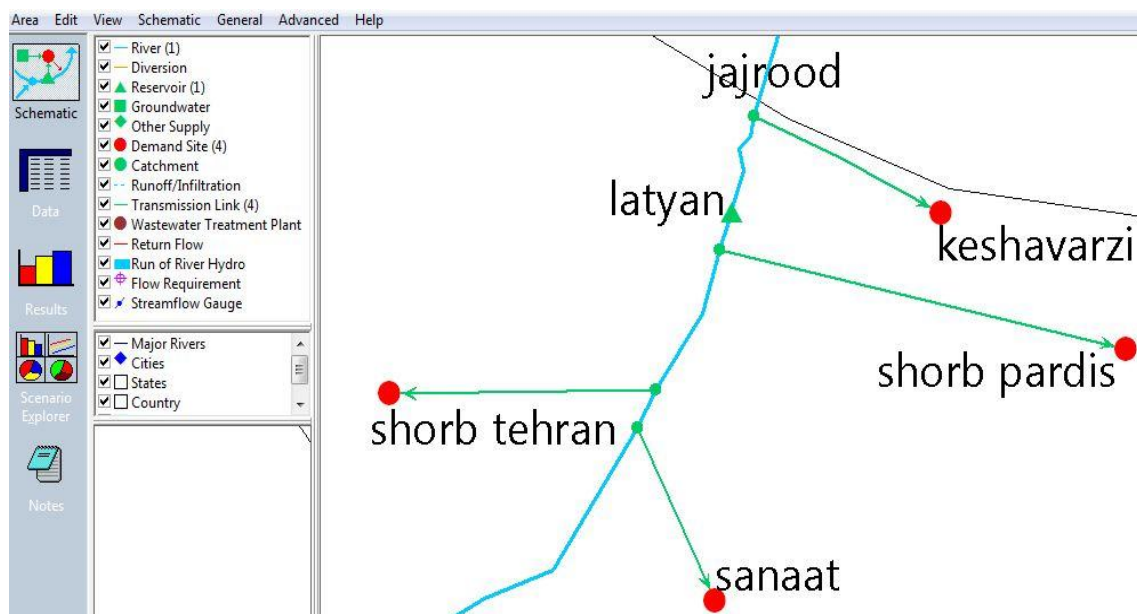
۵-۱-۱-۵-۱- درصد تأمین نیازهای منطقه

یکی از خروجی‌های اصلی شبیه‌سازی در WEAP، مقدار تأمین‌شده‌ی نیاز هریک از مصرف‌کننده‌ها است. برای گزارش بهتر و گویاتر از چگونگی وضعیت تخصیص از پارامتری به‌عنوان درصد تأمین استفاده شده است. درصد تأمین عبارت است از خارج قسمت تقسیم مقدار تأمین‌شده بر میزان تقاضای هر مصرف‌کننده. این پارامتر برای متوسط ۳۰ ساله و همچنین متوسط ماهانه‌ی مقادیر تأمین‌شده در هریک از سناریوها به‌صورت جداگانه محاسبه شده است. در جدول (۴-۵) متوسط ماهانه و سالانه‌ی هریک از تقاضاها که مدل شبیه‌سازی بر مبنای آن‌ها اجرا شده آورده شده است.

جدول (۴-۵) میزان تقاضای هریک از مصرف‌کننده‌ها از رودخانه‌ی جاجرود

مصرف‌کننده	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه (MCM)
کشاورزی	۰	۰	۱	۱,۳	۱,۷	۱,۹	۲	۲	۱,۹	۱,۷	۱,۵	۱	۱۶
صنعت	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۳	۴
شرب پردیس	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۳۰
شرب تهران	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۶	۲۵	۲۰	۱۵	۱۳	۲۱	۱۵	۱۷	۲۳۶
کل نیازهای ماهانه	۲۳,۸	۲۳,۸	۲۴,۸	۲۵,۱	۳۰,۵	۲۹,۷	۲۴,۸	۱۹,۸	۱۷,۷۴	۲۵,۵	۱۹,۳	۲۰,۸	۲۸۶

آنچه در مورد تأمین این تقاضاها حائز اهمیت است، محل آن‌هاست. همان‌طور که در نمای شماتیک آماده‌شده در مدل WEAP (شکل ۵-۲۲) قابل مشاهده است به‌جز نیاز کشاورزی که از بالادست مخزن سد لتیان تأمین می‌شود باقی نیازها از محل مخزن برداشت می‌شوند که در نظر داشتن این نکته در چگونگی تفسیر نتایج بسیار مهم خواهد بود. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این تحقیق بر مبنای فرض ثابت ماندن تقاضاها در مقابل تغییرات اقلیمی می‌باشد.

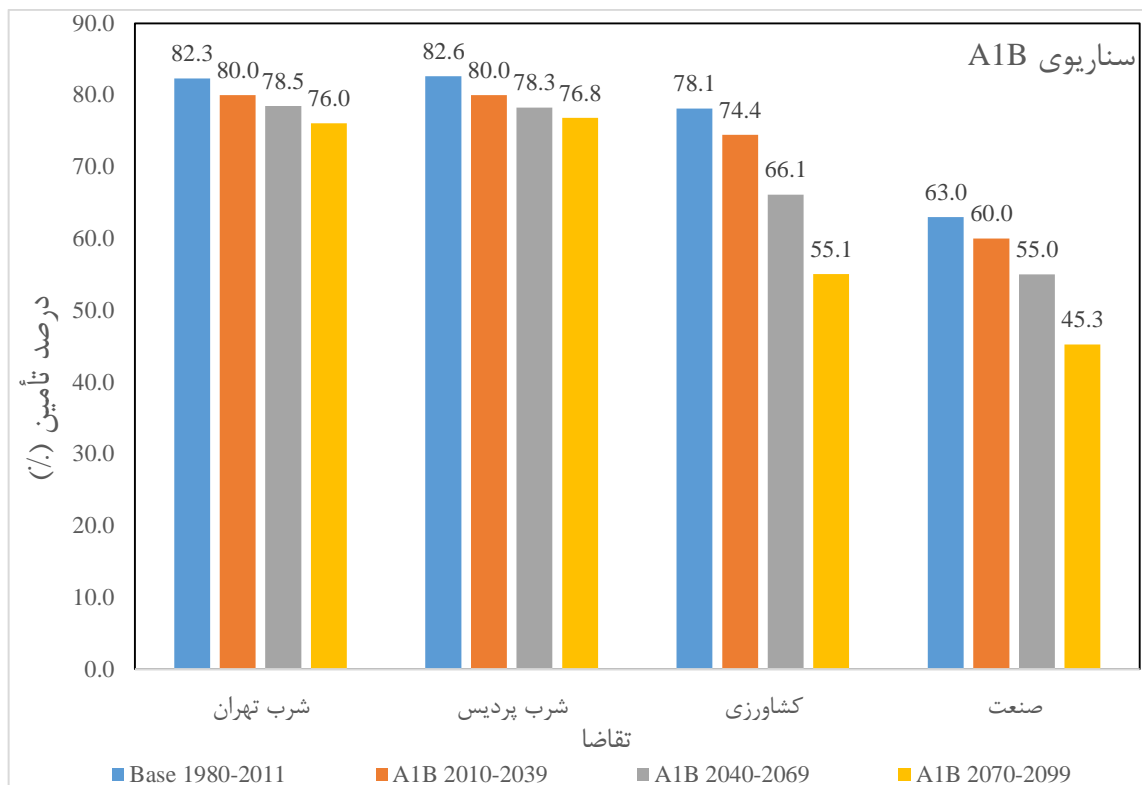


شکل (۵-۲۲) نمای شماتیک بهره‌برداری از رودخانه‌ی جاجرود

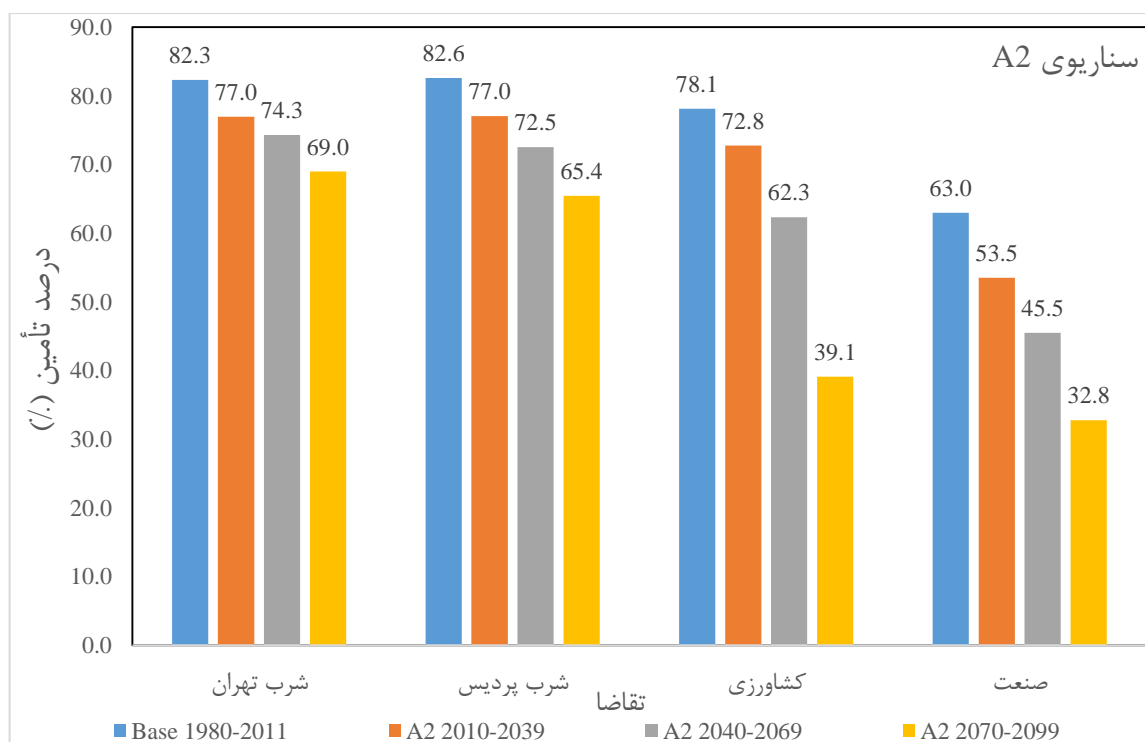
۱- درصد تأمین متوسط سالانه‌ی تقاضاها

برای به دست آوردن یک تصویر کلی از تغییرات میزان تأمین هریک از تقاضاها از پارامتر درصد تأمین سالانه که به کمک متوسط ۳۰ ساله‌ی داده‌های تأمین سالانه محاسبه شده است، کمک می‌گیریم. در شکل‌های (۵-۲۳) تا (۵-۲۵) درصدهای تأمین سالانه برای هریک از سناریوها در سه افق زمانی آینده‌ی نزدیک، آینده‌ی میانی و آینده‌ی دور در مقایسه با دوره‌ی زمانی پایه به‌صورت جداگانه آورده شده است.

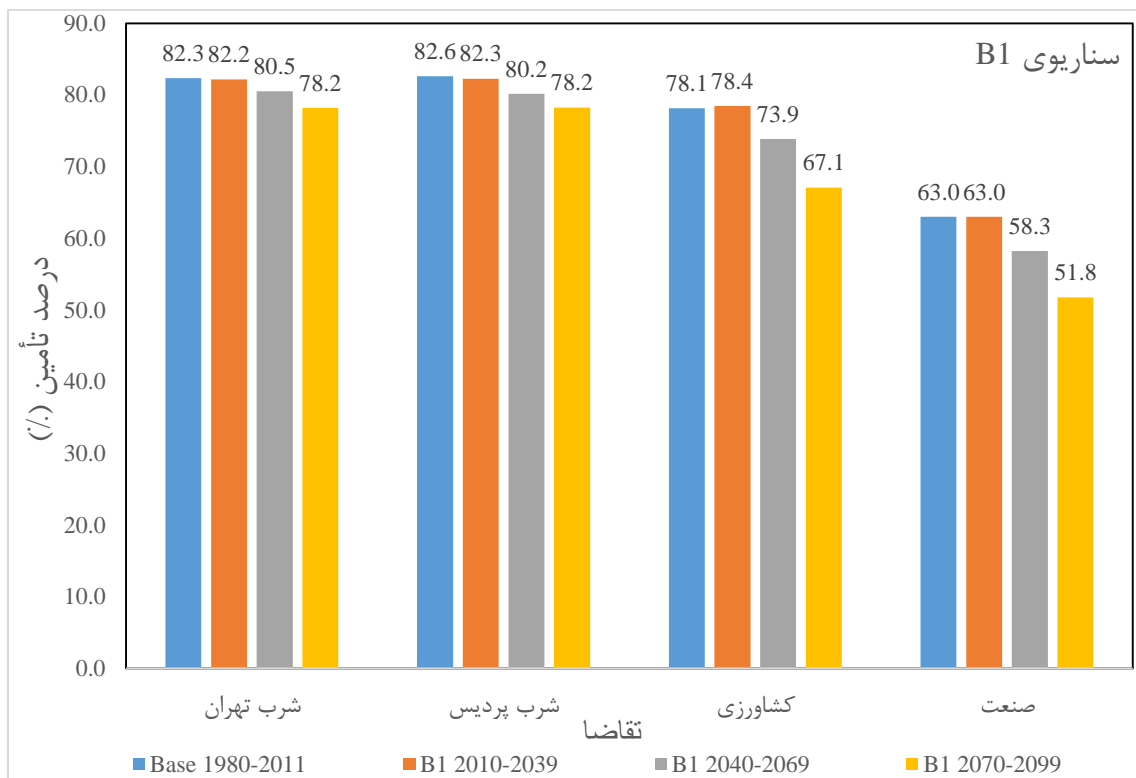
همان‌طور که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود و قابل پیش‌بینی بود تغییرات درصد تأمین همه‌ی تقاضاها مشابه تغییرات رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌باشد و با بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق‌های زمانی متوسط درصد تأمین سالانه کاهش می‌یابد و در افق زمانی آینده‌ی دور (۲۰۹۹-۲۰۷۰) این کاهش شدیدتر است. در سناریوی بدبینانه‌ی A2 تغییرات شدیدتر است و در افق زمانی آینده‌ی دور درصدهای تأمین برای شرب تهران، شرب پردیس، صنعت و کشاورزی به ترتیب عبارت است از: ۶۹، ۶۵، ۴۱، ۳۹، ۳۲، ۸.



شکل (۲۳-۵) درصد تأمین متوسط سالانه برای سناریوی انتشار A1B



شکل (۲۴-۵) درصد تأمین متوسط سالانه برای سناریوی انتشار A2



شکل (۵-۲۵) درصد تأمین متوسط سالانه برای سناریوی انتشار B1

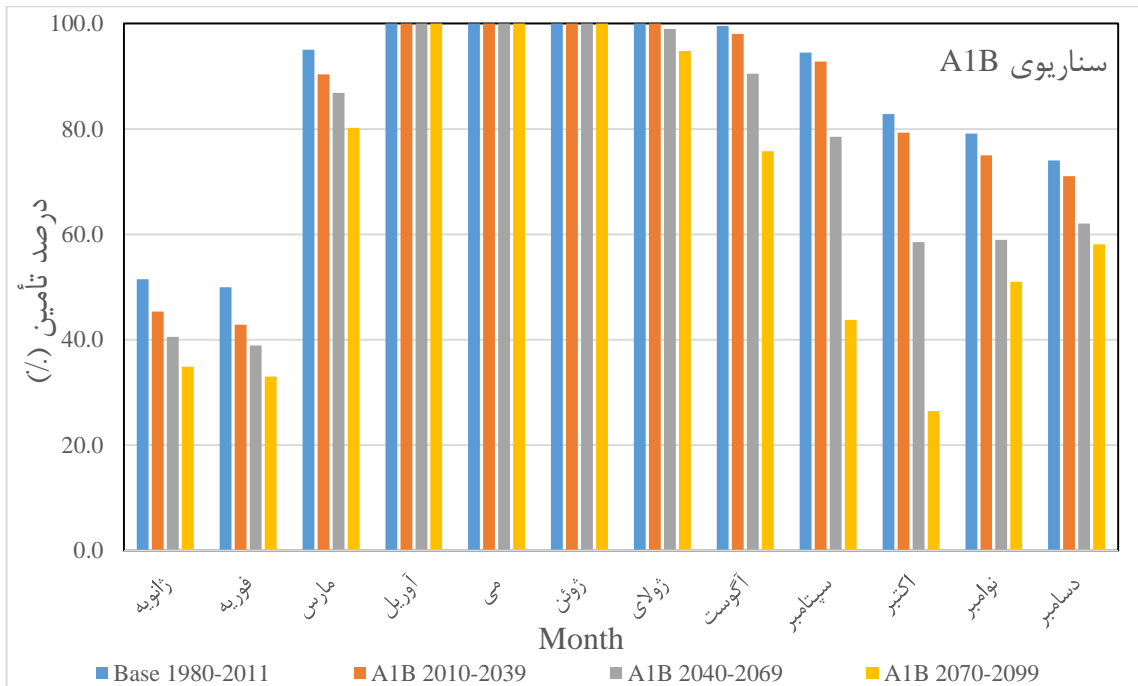
در بخش‌های ۲ تا ۵ درصد تأمین متوسط ماهانه برای هر یک از تقاضاها به شکلی که هر سناریو را بتوان با دوره‌ی زمانی پایه مقایسه کرد به ترتیب اولویت تخصیص در نظر گرفته شده برای آن‌ها، آورده شده است.

۲- درصد تأمین متوسط ماهانه‌ی تقاضای شرب تهران

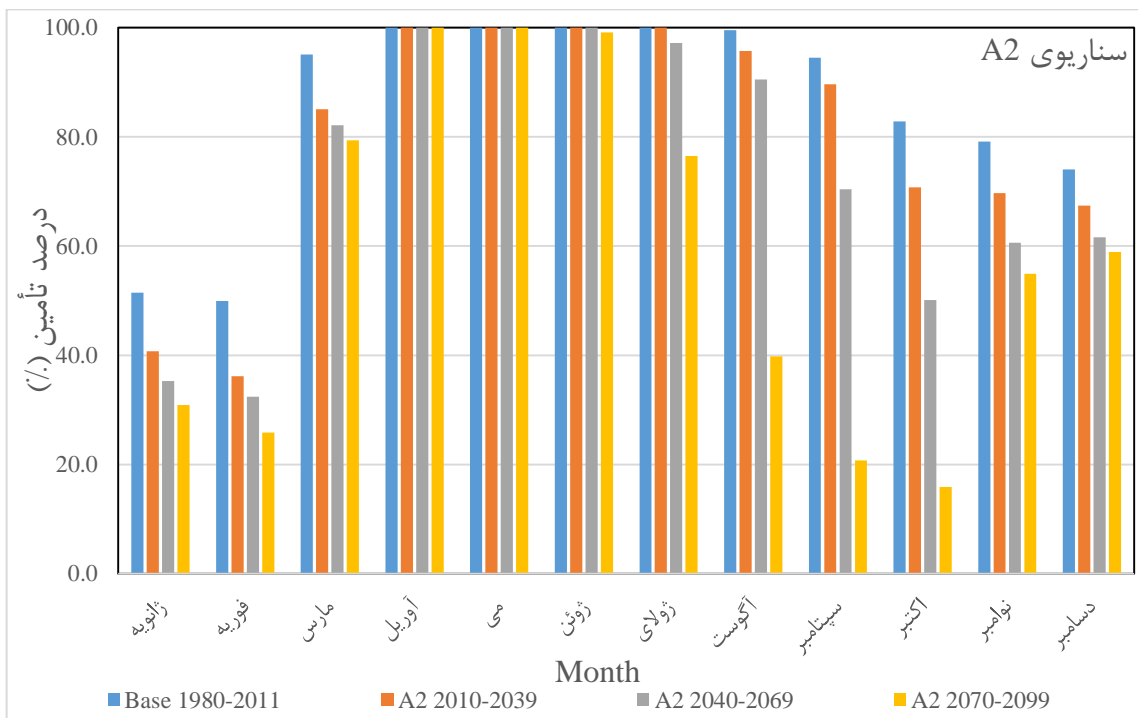
پارامتر درصد تأمین متوسط ماهانه برای هر یک از مصرف‌کننده‌های آب رودخانه‌ی جاجرود به صورت جداگانه و تحت هر سه سناریو و سه افق زمانی مورد مطالعه در این تحقیق محاسبه شده است و در شکل‌های (۵-۲۶) تا (۵-۲۸) مقادیر این پارامتر برای شرب تهران آورده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل‌ها قابل ملاحظه است در ماه‌های آوریل، می و ژوئن تأمین به صورت کامل برای همه‌ی سناریوها و افق‌های زمانی انجام می‌شود و کمترین میزان تأمین در ماه‌های اول سال آبی (ژانویه و فوریه) به علت خالی بودن مخزن اتفاق می‌افتد. کمترین میزان درصد تأمین متوسط ماهانه مربوط به ماه فوریه در سناریوی A2 می‌باشد که به حدود ۴۰٪ در افق زمانی آینده‌ی نزدیک (۲۰۳۹-)

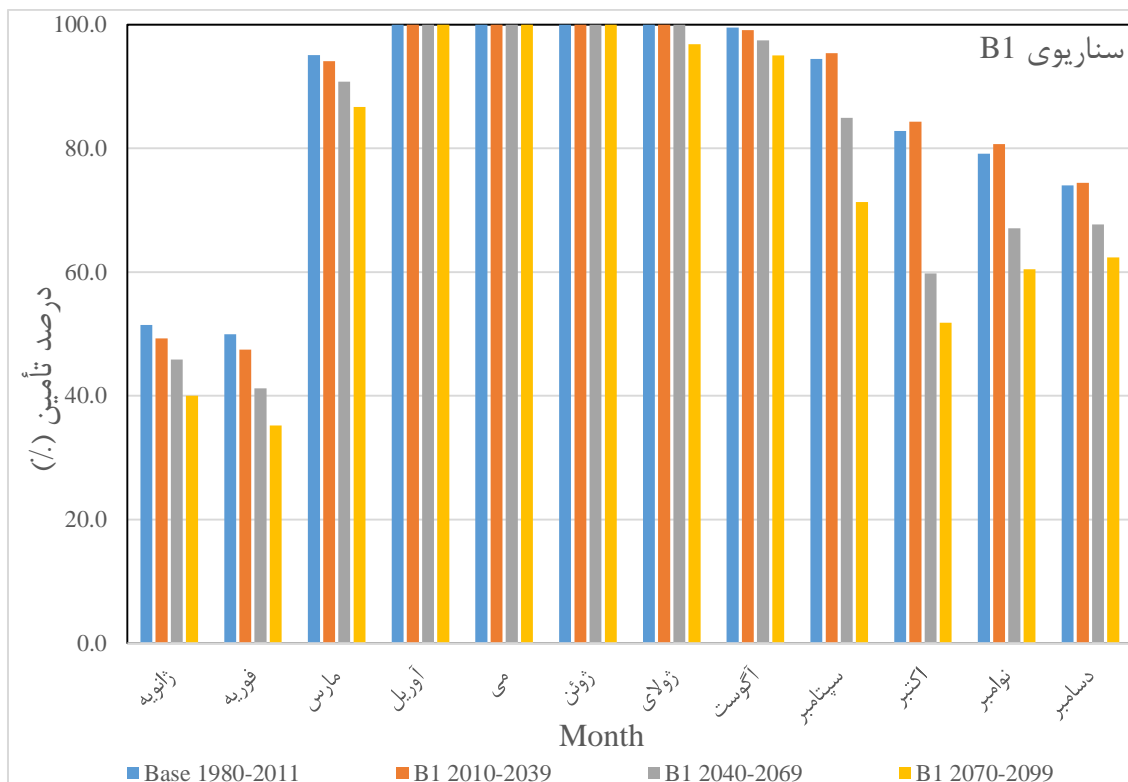
۲۰۱۰) می‌رسد و کمترین میزان این پارامتر برای شرب تهران در ماه اکتبر و در افق زمانی آینده‌ی دور به میزان ۱۵٪ مشاهده می‌شود.



شکل (۵-۲۶) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B



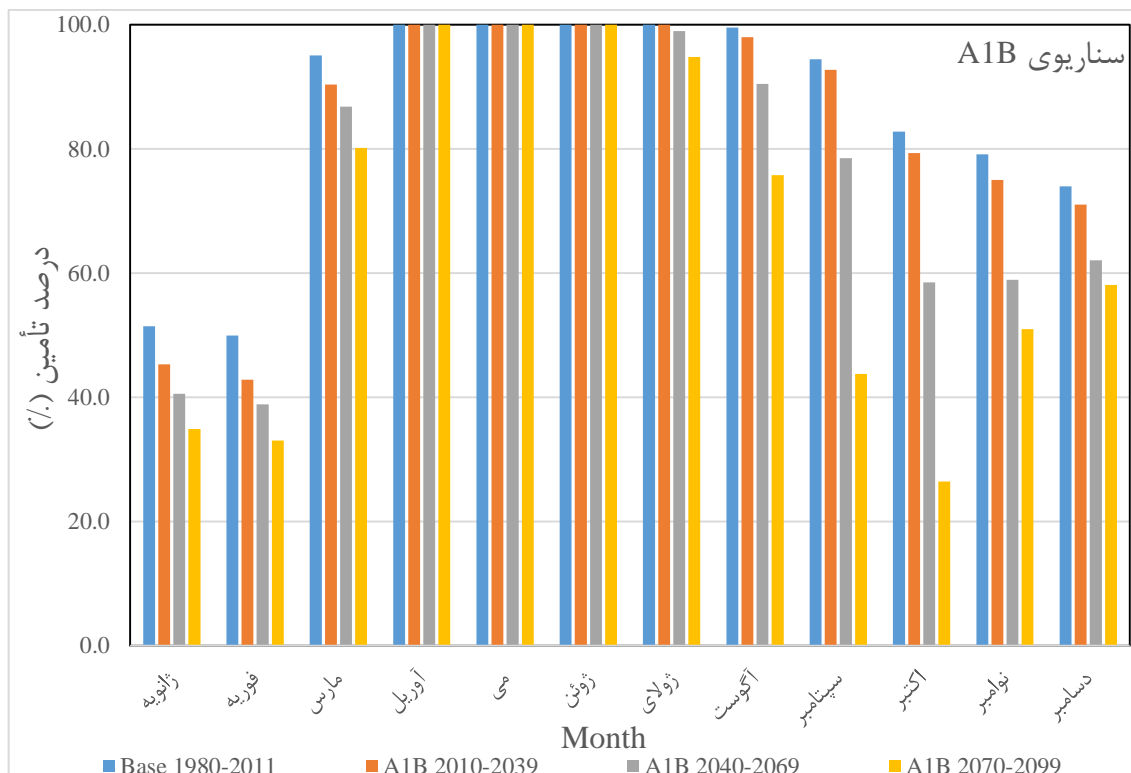
شکل (۵-۲۷) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2



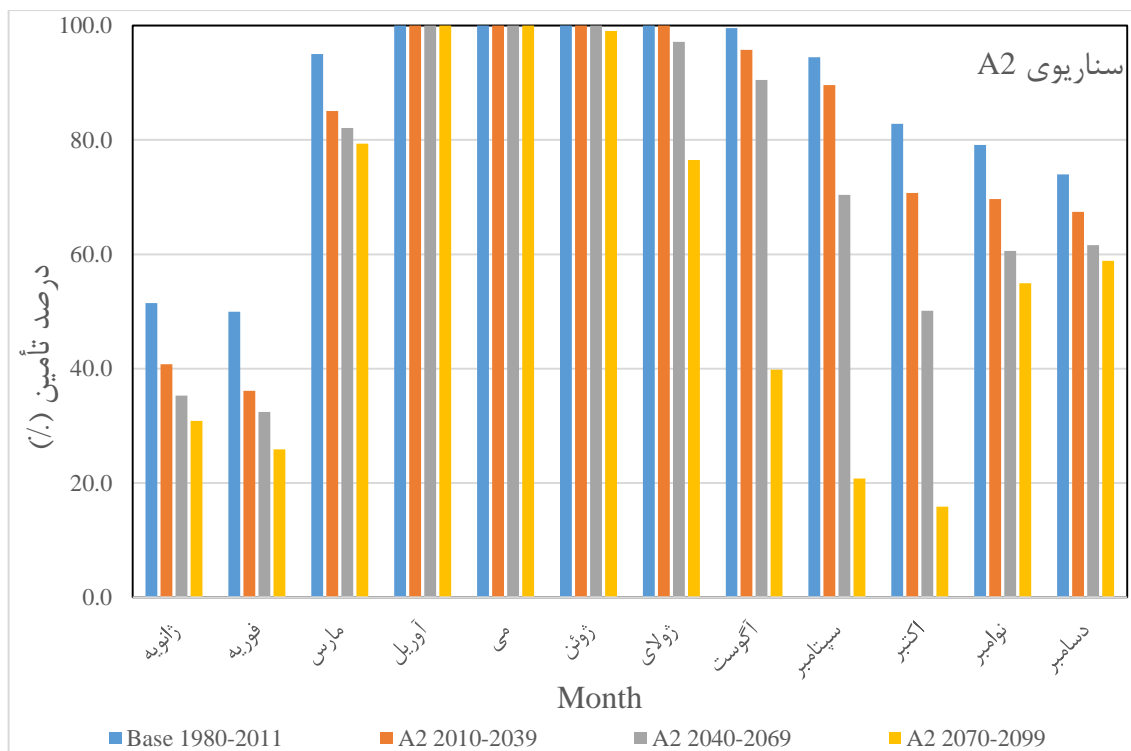
شکل (۵-۲۸) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار B1

۳- درصد تأمین متوسط ماهانه‌ی تقاضای شرب پردیس

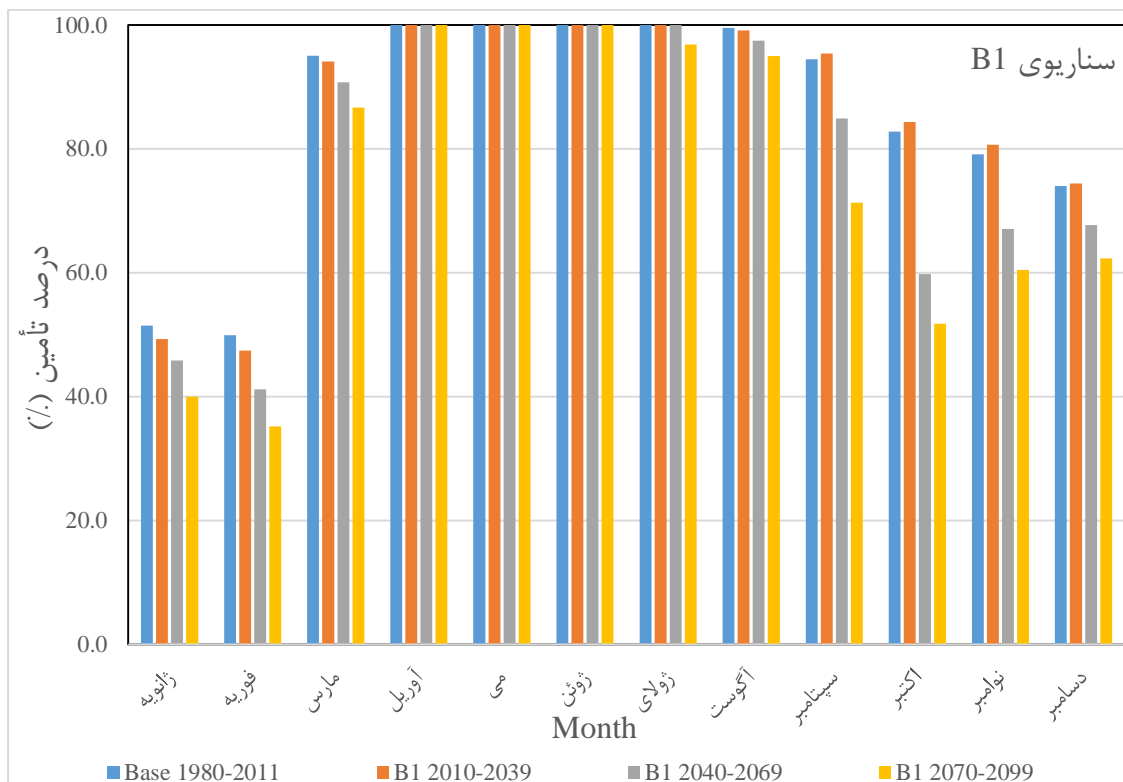
در شکل‌های (۵-۲۹) تا (۵-۳۱) مقادیر پارامتر درصد تأمین متوسط ماهانه برای شرب پردیس نشان داده شده است. شرب پردیس نیز به دلیل اینکه مشابه شرب تهران دارای اولویت تخصیص یک می‌باشد از درصد تأمین بالایی برخوردار است و تقریباً نزدیک به درصد تأمین‌های شرب تهران است به‌گونه‌ای که در ماه‌های آوریل، می و ژوئن تخصیص کامل صورت گرفته است چون ابتدا آب به اولویت اول تخصیص داده می‌شود و بعد به ترتیب به اولویت‌های بعدی که عبارت‌اند از کشاورزی و صنعت تخصیص داده می‌شود و در پایان مقادیری که باقی‌مانده به ذخیره در مخزن اختصاص داده می‌شود تا در مواقع کمبود از آن ذخایر برای تأمین نیازها استفاده شود.



شکل (۲۹-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B



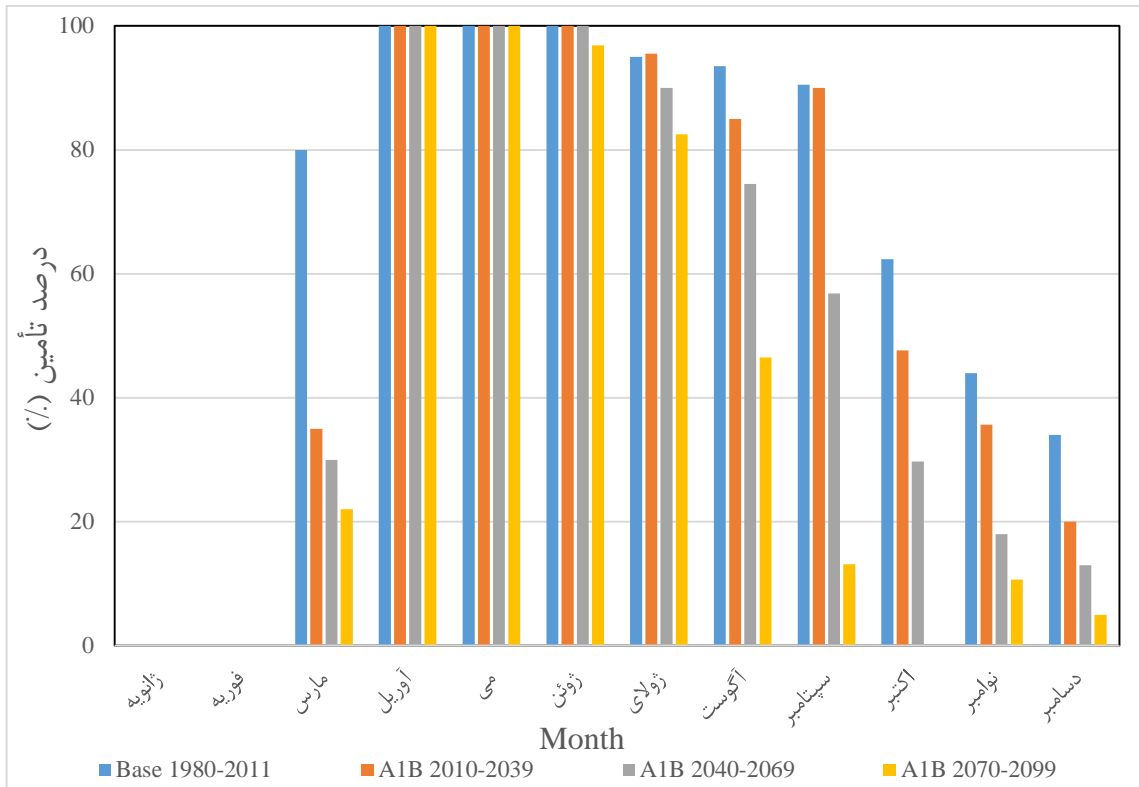
شکل (۳۰-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2



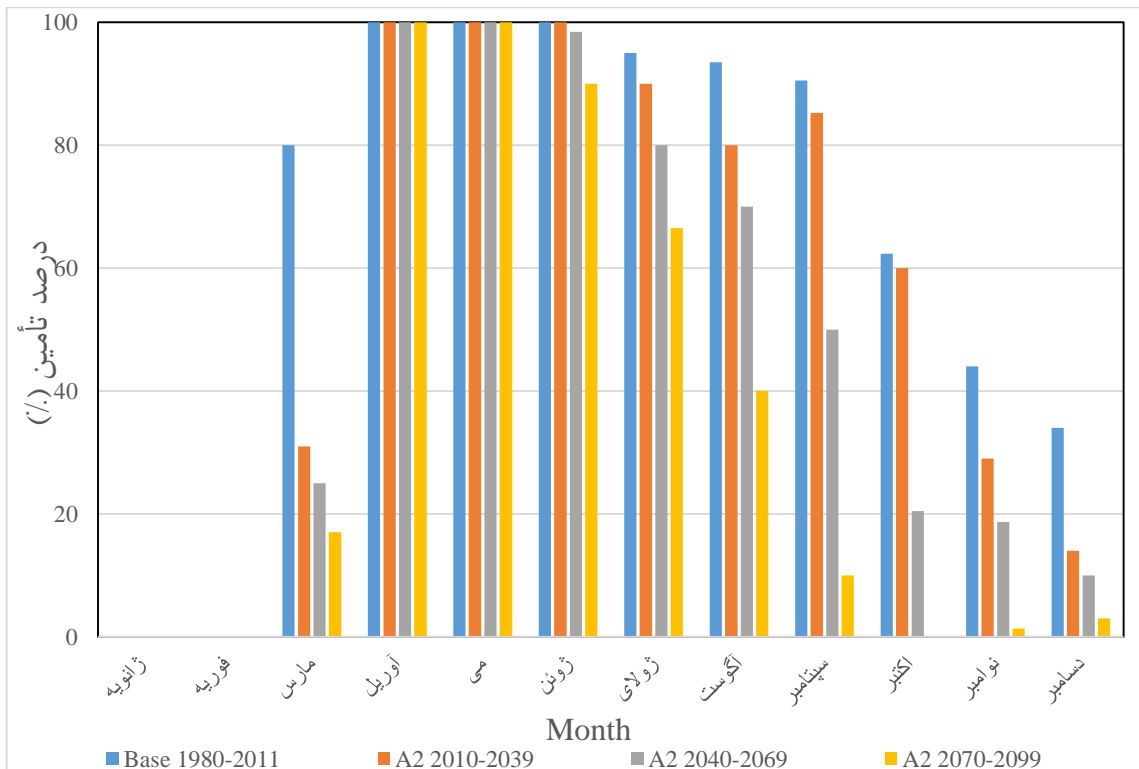
شکل (۵-۳۱) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار B1

۴- درصد تأمین متوسط ماهانه‌ی تقاضای کشاورزی

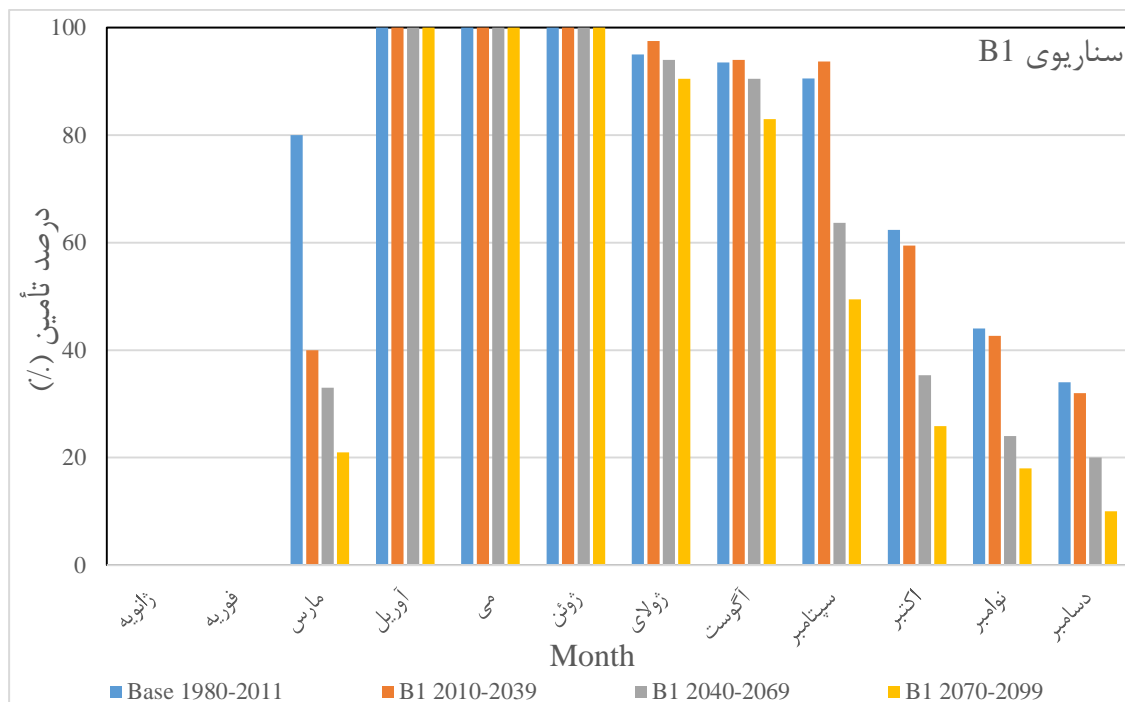
در شکل‌های (۵-۳۲) تا (۵-۳۴) مقادیر پارامتر درصد تأمین متوسط ماهانه برای نیاز کشاورزی نشان داده شده است. در ماه‌های ژانویه و فوریه تقاضایی برای کشاورزی وجود ندارد و تأمینی هم برای آن در نظر گرفته نشده است و در سناریوهای انتشار A1B و A2 در ماه‌های آوریل و می در همه‌ی افق‌های زمانی تخصیص به‌صورت کامل صورت می‌گیرد و تأمین ۱۰۰٪ است و در ماه اکتبر در افق زمانی آینده‌ی دور درصد تأمین صفر است. در سناریوی انتشار B1 در ماه‌های آوریل، می و ژوئن در تمامی افق‌های زمانی تأمین ۱۰۰٪ خواهد بود و در ماه دسامبر در افق زمانی آینده‌ی دور درصد تأمین کمترین مقدار خود را (حدود ۱۰٪) دارد.



شکل (۳۲-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B



شکل (۳۳-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2

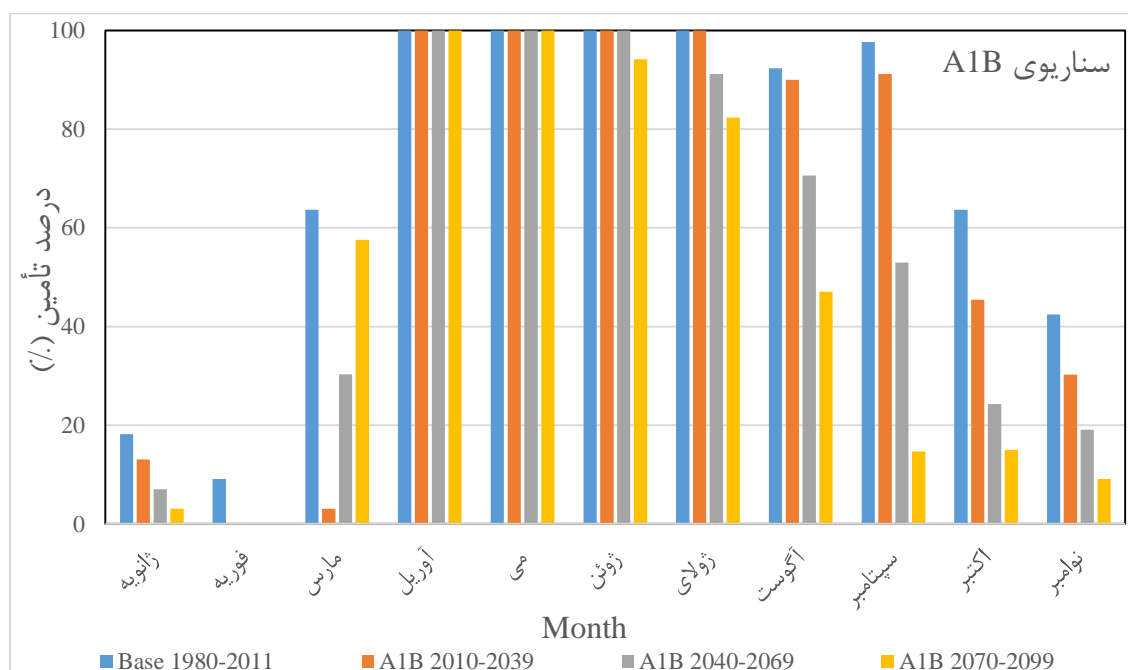


شکل (۳۴-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار B1

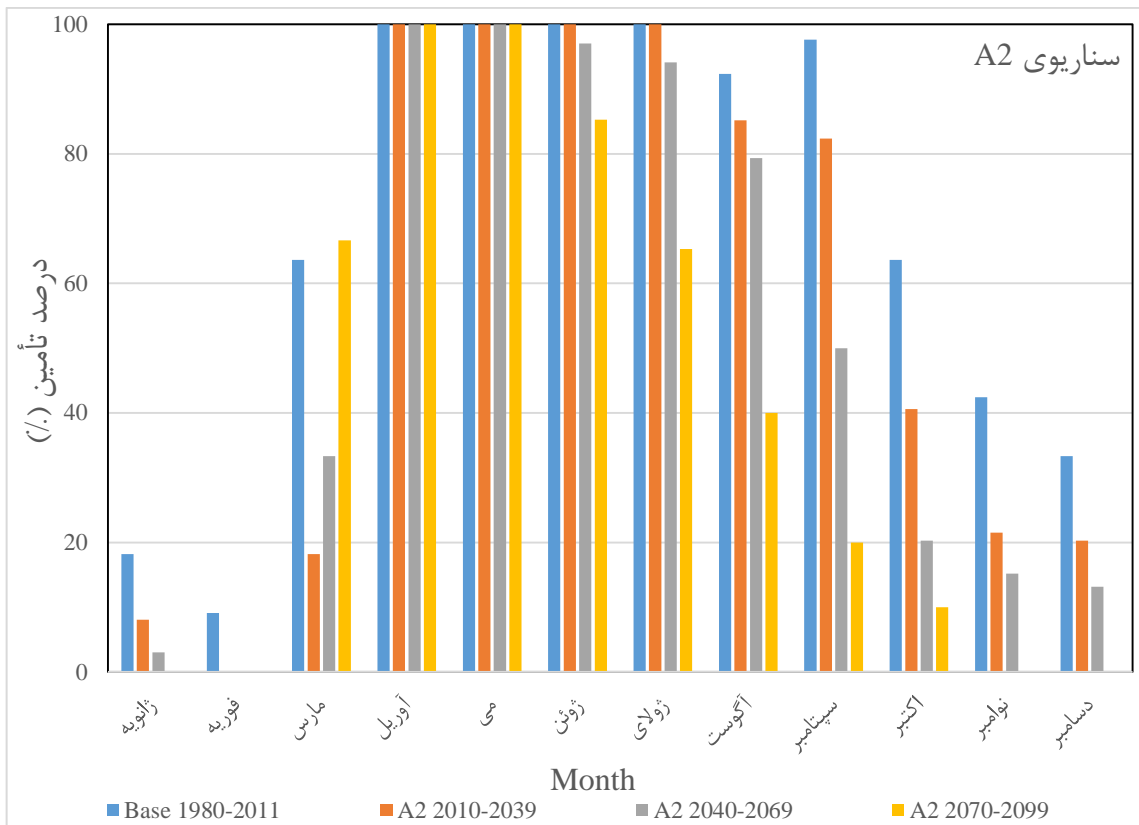
۵- درصد تأمین متوسط ماهانه‌ی تقاضای صنعت

در شکل‌های (۳۵-۵) تا (۳۷-۵) نیز مقادیر پارامتر درصد تأمین متوسط ماهانه برای نیاز صنعت

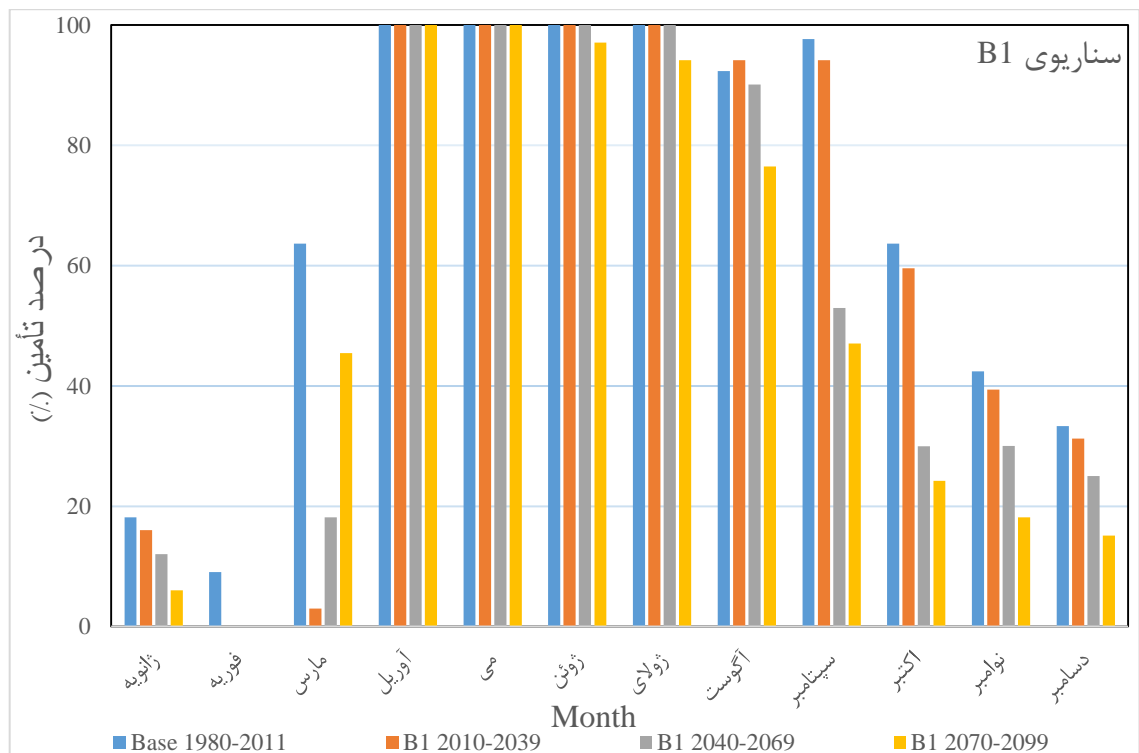
نشان داده شده است.



شکل (۳۵-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A1B



شکل (۳۶-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2



شکل (۳۷-۵) درصد تأمین متوسط ماهانه برای سناریوی انتشار A2

همان‌طور که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود تأمین در ماه‌های آوریل و می به‌صورت کامل برای همه‌ی سناریوها و افق‌های زمانی انجام شده است ولی در ماه فوریه درصد تأمین برای همه‌ی سناریوها و افق‌های زمانی برای این تقاضا صفر است و هیچ حجمی برای این نیاز کوچک (حدود ۰,۳۳ میلیون مترمکعب در ماه) در نظر گرفته نشده است و دلیل آن این است که این تقاضا در اولویت سوم تأمین قرار گرفته‌شده است. به‌طور کلی در شبیه‌سازی که در WEAP بر مبنای بهینه‌سازی صورت می‌گیرد؛ تخصیص به ترتیب اولویت‌ها انجام می‌گیرد و تا زمانی که در یک روز خاص تقاضای دارای اولویت یک به‌صورت کامل تأمین نشود به تقاضاهای دارای اولویت‌های پایین‌تر تخصیصی صورت نمی‌گیرد.

همان‌طور که در متوسط سالانه نیز اتفاق افتاد به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق‌های زمانی در ماه‌های مشابه برای هریک از تقاضاها روند نزولی درصد تأمین اتفاق می‌افتد و در افق زمانی آینده‌ی دور برای همه‌ی سناریوها این تغییرات شدیدتر می‌شود.

۶- قابلیت اطمینان تخصیص تقاضاها

یکی دیگر از پارامترهایی که مدل WEAP در شبیه‌سازی منابع آب و در مورد تأمین تقاضاها محاسبه می‌کند قابلیت اطمینان است که نشان‌دهنده‌ی میزان درصد اطمینان از تأمین صورت گرفته (تخصیص صورت گرفته) برای هریک از تقاضاها است. به‌طور مثال در شبیه‌سازی‌هایی که بر روی جریان رودخانه‌ی جاجرود صورت گرفته است، همان‌طور که در جدول (۵-۵) آمده است در میان همه‌ی تقاضاها بالاترین درصد اطمینان تخصیص مربوط به نیاز کشاورزی است و دلیل آن این است که مقدار نیازهای آن در مقایسه با نیازهای شرب کمتر است و همچنین اینکه از بالادست سد و قبل از ورود جریان به سد تخصیص صورت می‌گیرد و تا جایی که جریان و اولویت تخصیص اجازه دهد نیاز آن تأمین می‌شود.

جدول (۵-۵) اطمینان‌پذیری تأمین نیاز هریک از مصرف‌کننده‌های جریان رودخانه‌ی جاجرود

	کشاورزی	شرب تهران	شرب پردیس	صنعت
Base 1980-2011	۷۸,۸۲	۶۳,۸	۶۳,۸	۶۲,۷۶
B1 2010-2039	۷۵,۸۳	۶۰,۸۳	۶۰,۸۳	۵۹,۴۴
B1 2040-2069	۶۹,۱۷	۵۳,۷۲	۵۳,۷۲	۵۴,۵
B1 2070-2099	۶۴,۶	۵۰,۴۴	۵۰,۴۴	۵۱,۱۱
A1B 2010-2039	۷۲,۵	۵۷,۵	۵۷,۵	۵۶,۳۹
A1B 2040-2069	۶۵	۵۱,۹۴	۵۱,۹۴	۴۸,۳۳
A1B 2070-2099	۶۰,۲۸	۴۸,۶۱	۴۸,۶۱	۴۴,۲۲
A2 2010-2039	۶۷,۵	۶۳,۰۶	۶۳,۰۶	۵۲,۱۱
A2 2040-2069	۶۰,۰۶	۵۳,۶۱	۵۳,۶۱	۴۴,۱۱
A2 2070-2099	۴۹,۷۲	۳۵,۲۸	۳۵,۲۸	۳۲,۵

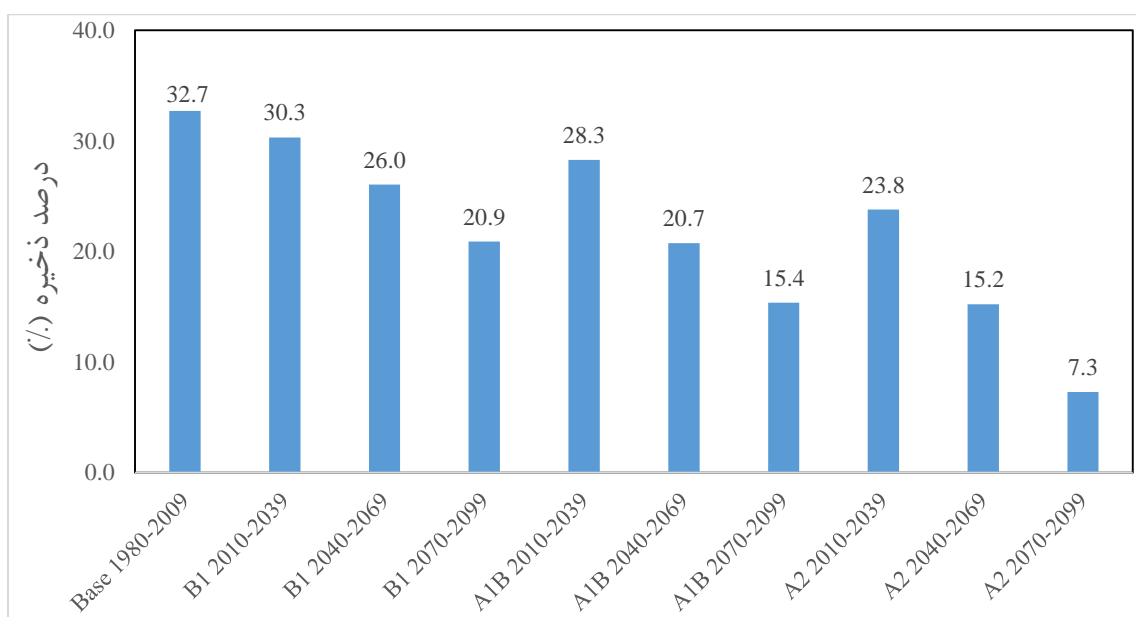
همان‌طور که در جدول فوق قابل ملاحظه است، به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق‌های زمانی برای همه‌ی تقاضاها اطمینان‌پذیری تأمین کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که کمترین درصد اطمینان مربوط به سناریو بدبینانه‌ی A2 در افق زمانی آینده‌ی دور برای همه‌ی تقاضاها می‌باشد و بیشترین اطمینان‌پذیری مربوط به دوره‌ی پایه است.

بالاترین میزان درصد اطمینان که در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته به آن رسیدیم مربوط به تقاضای کشاورزی در دوره‌ی زمانی پایه و به میزان ۷۸,۸۲٪ است و کمترین میزان آن مربوط به تقاضای صنعت و در سناریوی بدبینانه‌ی A2 در افق زمانی آینده‌ی دور به میزان ۳۲,۵٪ است که دلیل آن در اولویت تخصیص آخر قرار داشتن این تقاضا است.

۵-۱-۲- تغییرات ذخیره‌ی مخزن سد لتیان

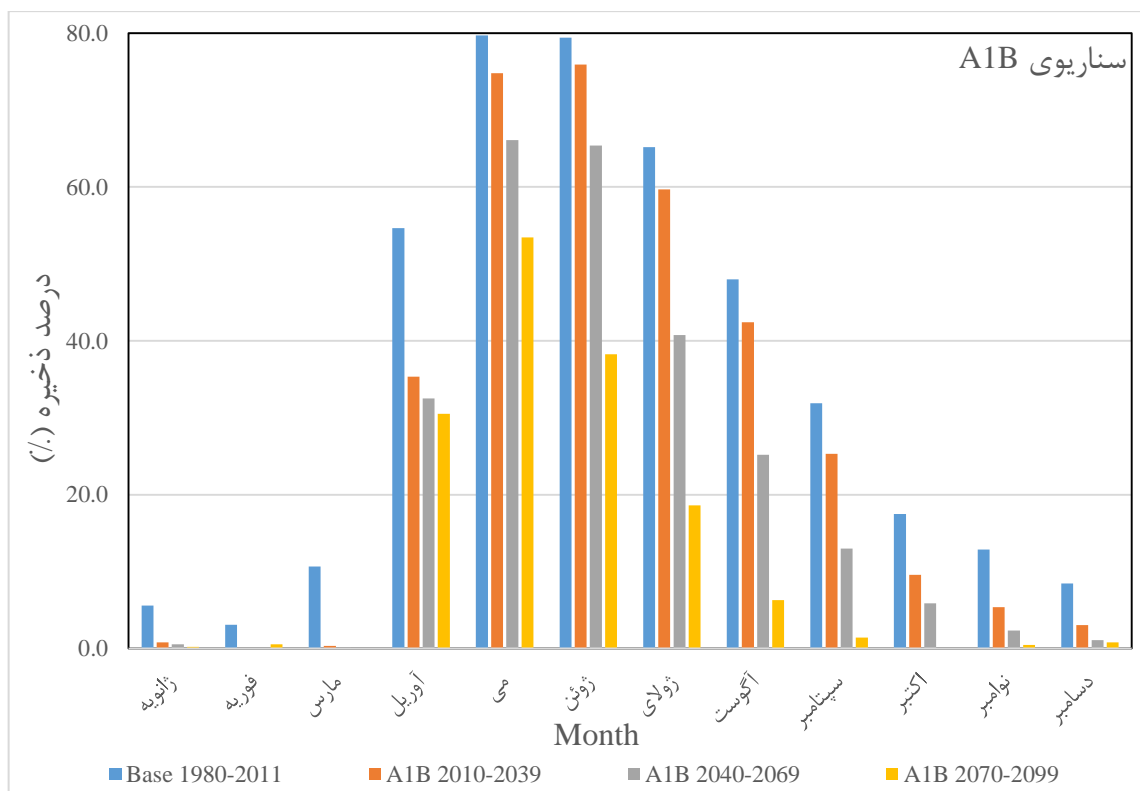
همان‌طور که در فصل سوم گفته شد گنجایش مخزن سد لتیان در زمان احداث ۹۵ میلیون مترمکعب و حجم آن در حال حاضر به علت انباشت رسوبات در حدود ۷۳ میلیون مترمکعب است که ما در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده همگی حجم را در نظر گرفته‌ایم. در دوره‌ی پایه حجم آب موجود در مخزن را در شروع سال آبی ۷۳ میلیون مترمکعب فرض کرده‌ایم (مخزن را پر در نظر گرفته‌ایم) و در سناریوهای و افق‌های زمانی مختلف مقدار ذخیره‌ی اولیه را برابر متوسط ذخیره در طول دوره‌ی ۳۰ ساله فرض کرده‌ایم به‌گونه‌ای که به‌عنوان مثال ذخیره اولیه در سناریوی بدبینانه‌ی A2 و در گام زمانی آینده‌ی دور ۱۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته‌شده است.

نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای سد لتیان شامل تغییرات ذخیره مخزن است که مدل آن را به دو صورت ماهانه و متوسط ماهانه گزارش می‌کند ولی برای گزارش آن‌ها در این پژوهش درصد ذخیره مخزن (حجم مخزن پر / حجم موجود در مخزن) را به‌صورت متوسط ماهانه و سالانه گزارش کرده‌ایم. تغییرات متوسط ۳۰ ساله ذخیره مخزن برای هر یک از سناریوها و افق‌های زمانی در شکل (۵-۳۸) آورده شده است.

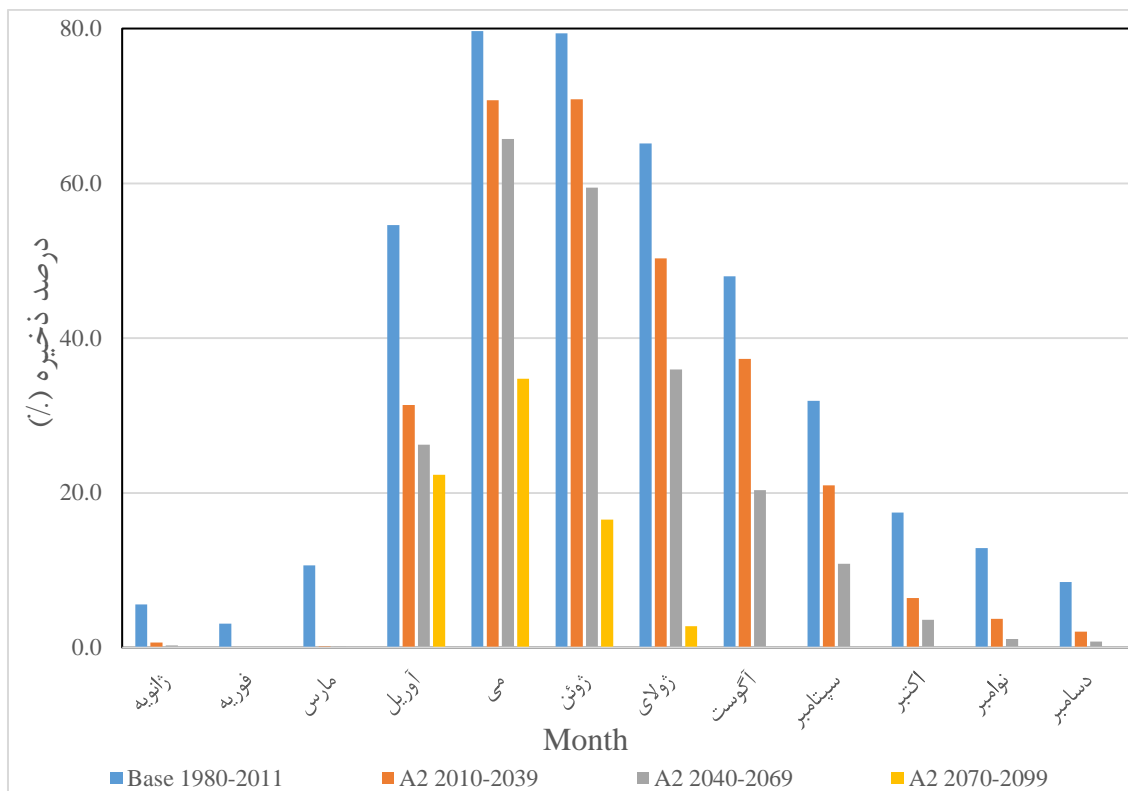


شکل (۵-۳۸) درصد متوسط سالانه ذخیره مخزن سد لتیان

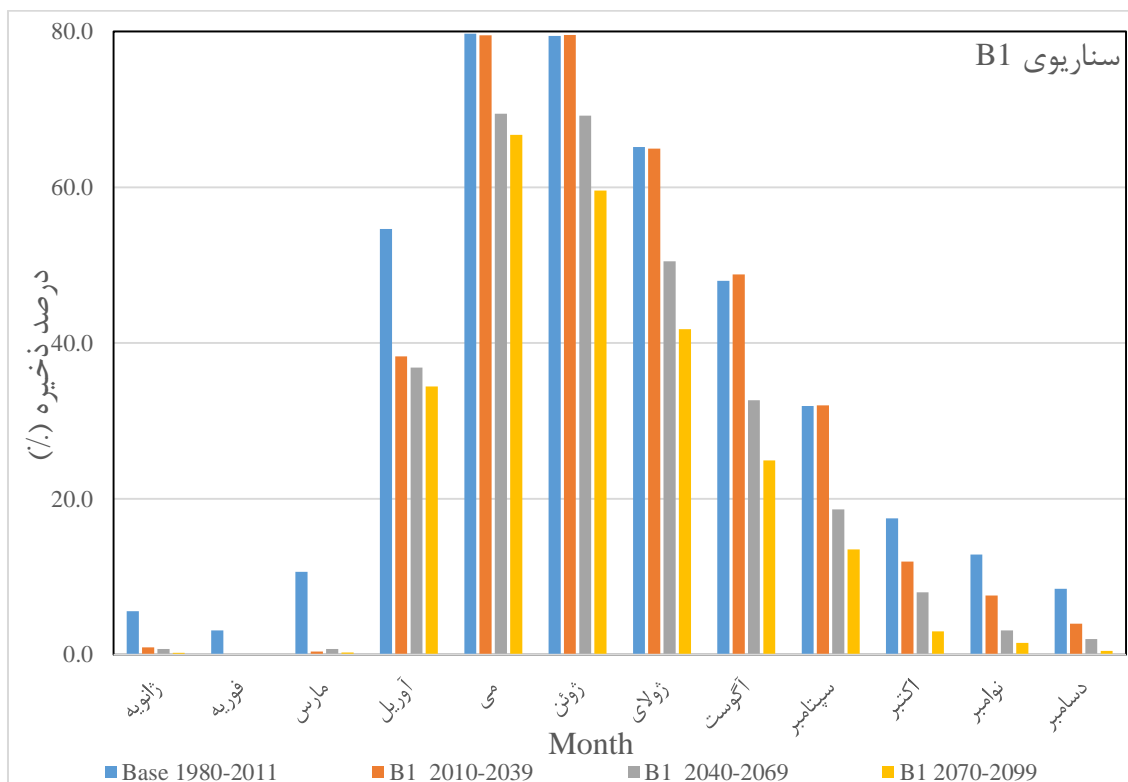
همان‌طور که در شکل فوق قابل مشاهده است به ترتیب در بدبینانه شدن سناریوها که کاهش جریان را هم در پی دارد میزان ذخیره مخزن نیز کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که در دوره‌ی پایه درصد متوسط ذخیره‌ی سالانه تقریباً برابر با نیمی از حجم مفید مخزن است ولی در سناریوی بدبینانه A2 و در افق زمانی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ به مقدار نازل ۷,۳٪ می‌رسد که این مقدار کم ذخیره‌ی مخزن باعث درصد تأمین‌های پایینی می‌شود که در شکل (۵-۲۴) ملاحظه شد که دقیقاً با کاهش ذخیره در مخزن درصد تأمین متوسط سالانه نیز کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۵-۳۹) تا (۵-۴۱) نیز تغییرات متوسط ماهانه‌ی درصد ذخیره‌ی مخزن به ترتیب سناریوها آورده شده است.



شکل (۵-۳۹) درصد متوسط ماهانه‌ی ذخیره مخزن سد لتیان در سناریوی A1B



شکل (۴۰-۵) درصد متوسط ماهانه ذخیره مخزن سد لتیان در سناریوی A2



شکل (۴۱-۵) درصد متوسط ماهانه ذخیره مخزن سد لتیان در سناریوی B1

همان‌طور که در شکل‌های فوق مشخص است مقدار ذخیره‌ی موجود در مخزن در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس در همه‌ی سناریوها و افق‌های زمانی تقریباً صفر است و در ماه‌های می و ژوئن بسته به نوع سناریو و افق زمانی در بالاترین سطح خود قرار دارد و مجدد در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر به مقدار ذخیره‌ی نازل زیر ۱۰٪ می‌رسد. مطابق انتظار موجود به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق‌های زمانی در ماه‌های مشابه شاهد کاهش میزان ذخیره در مخزن خواهیم بود.

۵-۶- جمع‌بندی

در این فصل به‌طور کلی اثر تغییر اقلیم بر رواناب در سناریوها و افق‌های زمانی مختلف بررسی شد و منابع آب حاصل از هر یک از حالت‌ها برآورد شد و درنهایت چگونگی تأمین هر یک از نیازها و تغییرات ذخیره مخزن سد لتیان را در شرایط منابع متغیر و مصارف ثابت در شرایط تغییر اقلیم شبیه‌سازی شده است. با مقایسه‌ی وضعیت درصد ذخیره‌ی مخزن با درصدهای تأمین برای هر یک از سناریوها و افق‌های زمانی به دلیل تغییرات میزان نوسانات تأمین‌ها پی خواهیم برد، به‌این‌ترتیب که در ماه‌هایی که مخزن خالی است درصد تأمین نسبت به زمان‌هایی که مخزن دارای حجم ذخیره بالاتری است کمتر می‌باشد. این مسأله به‌خوبی گویای اهمیت وجود مخزن برای تأمین تقاضاهای این منطقه است و اگر این مخزن می‌توانست با همان حجم اولیه (۹۵ میلیون مترمکعب) ذخیره‌سازی را صورت دهد نوسانات تأمین بسیار کمتر بود و اعتمادپذیری تأمین‌ها بالاتر بود.

نتایج ارائه‌شده در این فصل، در فصل آینده موردبحث و نتیجه‌گیری قرار گرفته و درنهایت نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر با فرضیه و اهداف تعیین‌شده مقایسه شده است.

فصل ششم

نتیجہ گیری و پیشہ ادا

هدف اصلی از انجام این تحقیق، بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی و همچنین ارزیابی کارایی شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa، جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان رودخانه حوزه آبریز جاجرود می‌باشد تا در نهایت بتوان پیشنهاد مناسبی جهت تخصیص منابع آب در دوره‌های زمانی آتی داده شود. پس از اخذ نتایج در فصل قبل، در این فصل نتایج حاصل در قسمت-های مختلف، با توجه به اهداف و فرضیه‌های در نظر گرفته‌شده، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و در ادامه آن پیشنهادهایی به منظور کمک به پژوهش‌های آینده ذکر شده است.

۶-۲- بحث پیرامون نتایج حاصل از این تحقیق

نتایج این تحقیق در ۳ قسمت جداگانه‌ی زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- تغییر اقلیم و اثرات آن بر دما، بارش و شاخص‌های حدی.
- شبیه‌سازی رواناب حاصل از بارش‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده.
- شبیه‌سازی تخصیص رواناب موجود و برآورد شده به مصرف کنندگان مختلف.

۶-۲-۱- نتایج مربوط به بحث تغییر اقلیم

در این تحقیق برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در حوضه آبریز جاجرود از زیر حوضه‌های اصلی لتیان واقع در شرق استان تهران با به‌کارگیری مدل مولد اقلیمی لارس، خروجی‌های مدل گردش عمومی هوا HadCM3 برای داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی حوضه سد لتیان تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 برای دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ ریزمقیاس گردید.

صحت ریزمقیاس نمایی با مدل لارس با بررسی ۴ آماره برای هریک از ایستگاه‌ها در دوره‌ی زمانی پایه مورد ارزیابی قرار گرفت که در نتیجه کمترین مقدار آماره کولموگروف-اسمیرنوف (KS Statistic) برای ایستگاه کمرخانی به مقدار ۰,۰۹۳، کمترین آماره p-مقدار (P value) برای ایستگاه امامه به مقدار ۰,۹۸۲، کمترین آماره ضریب تبیین (R) برای ایستگاه راحت آباد به مقدار ۰,۹۹۷ و کمترین مقدار آماره ناش-ساتکلیف (CNS) برای ایستگاه امامه به مقدار ۰,۹۷۷ به دست آمد که همگی حاکی از اعتماد بالای نتایج ریزمقیاس نمایی با این مدل هستند و با توجه به نتایج مذکور فرضیه تحقیق: (مدل اقلیمی LARS-WG نتایج قابل قبولی برای ریزمقیاس نمایی داده‌های اقلیمی به دست می‌دهد)، قابل قبول است.

برای گزارش بهتر نتایج از شاخص‌های اقلیمی حدی کمک گرفتیم و با محاسبه‌ی برخی از آن‌ها تصویر بهتری از آینده‌ی منطقه تحت تأثیر سناریوها و افق‌های زمانی مختلف ارائه کردیم. با توجه به مساحت کم این حوضه و فاصله‌ی کم ایستگاه‌ها از یکدیگر نتایج حاصله دارای روند مشابهی می‌باشد و به صورت کلی در این منطقه پدیده‌ی گرمایش جهانی و افزایش دما در اکثر ماه‌های سال به ویژه ماه‌های گرم سال در آینده رخ خواهد داد.

بر مبنای بررسی‌های انجام شده به روی خروجی‌های ریزمقیاس شده داده‌های دما و بارش در همه‌ی ایستگاه‌ها به طور متوسط، حداکثر افزایش در میانگین دمای بیشینه تا سال ۲۱۰۰ برابر با ۶,۰۱ درجه سانتی‌گراد، همچنین حداکثر افزایش در میانگین دمای کمینه تا سال ۲۱۰۰ برابر با ۵,۹ درجه سانتی‌گراد در ماه اگوست می‌باشد. با بررسی شاخص‌های حدی روزهای یخبندان و روزهای بسیار گرم می‌توان دریافت که تا سال ۲۱۰۰ در بدبینانه‌ترین شرایط به طور متوسط در منطقه ۴۲ روز (از ۱۳۲ روز در دوره‌ی پایه) از یخبندان کاسته و ۳۰ روز بسیار گرم افزوده می‌شود. شاخص بارش‌های سهمگین در سناریوی بدبینانه‌ی A2، کاهش متوسط ۲۵ درصدی و شاخص روزهای خشک افزایش متوسط ۹ روزه این شاخص‌ها را در هر ۳ ایستگاه نشان می‌دهند.

با توجه به نتایج این تحقیق، به نظر می‌رسد طی دوره‌های آبی نه‌تنها میانگین دما در حوضه جاجرود افزایش خواهد یافت بلکه در بیشتر سناریوها به‌جز B1 برای دوره‌ی (۲۰۳۹-۲۰۱۰) متوسط سالانه‌ی رواناب کاهش خواهد داشت، به‌طوری‌که طی بدبینانه‌ترین حالت تحت سناریو (A2) برای دوره (۲۰۸۰s) تا حدود ۲۲ درصد از متوسط سالانه حجم رواناب خروجی از حوضه مورد مطالعه کاسته خواهد شد. نکته‌ی قابل‌تأمل در مورد روند تغییرات متوسط رواناب ماهانه در این حوضه افزایش آن با افزایش افق زمانی در هر سناریو برای ماه‌های سرد سال (Des و Jun, Feb, Mar) و کاهش آن در سایر ماه‌های سال است. با توجه به نتایج مذکور فرضیه تحقیق: (تغییر اقلیم به‌صورت مستقیم بر منابع آب تأثیرگذار خواهد بود)، قابل قبول است.

۶-۲-۲- نتایج مربوط به بحث مدل‌سازی بارش-رواناب

در این تحقیق مدل بارش-رواناب WetSpa برای حوضه آبریز جاجرود اجرا شد. اطلاعات هواشناسی پایه موردنیاز این مدل شامل بارندگی و تبخیر می‌باشد. نقشه‌های رقومی توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک سه نقشه‌ی اصلی مورد استفاده در مدل می‌باشند که این سه نقشه برای استخراج پارامترهای مدل موردنیاز می‌باشند. خروجی‌های اصلی مدل نیز عبارت‌اند از: هیدروگراف جریان رودخانه و توزیع مکانی خصوصیات هیدرولوژیکی که شامل: رطوبت خاک، نرخ نفوذپذیری، تغذیه آب زیرزمینی و نگهداشت آب سطحی یا رواناب است. فرایندهای هیدرولوژیکی مدل عبارت‌اند از: بارش، برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب (بالانس یا تعادل آب). در این مدل بارش مازاد با استفاده از روش استدلالی اصلاح‌شده (روش ضریب رواناب مبتنی بر رطوبت خاک) و بر مبنای خصوصیات هر شبکه شامل شیب، کاربری، نوع خاک، میزان بارش و رطوبت پیشین خاک محاسبه

می‌گردد. ضریب پتانسیل رواناب بر اساس جداول مرجع تعیین می‌شود که این جداول بر اساس نقشه-های شیب، کاربری و تیپ خاک تهیه می‌شوند.

رواناب در شبکه سلولی حاصل مجموع رواناب سطحی، جریان زیر قشری و دبی آب‌های زیرزمینی است. روند یابی جریان سطحی از سلول‌های مختلف به سمت خروجی حوضه به سرعت جریان و ضریب پخشیدگی موج بستگی داشته و با استفاده از روش تخمین موج پخشی صورت می‌گیرد. در صورتی که جریان زیرسطحی و تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از قانون دارسی و روش موج سینماتیک شبیه‌سازی می‌شود. جریان آب سطحی و زیرسطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به سوی کانال اصلی روند یابی می‌شود و در خروجی هر زیر حوضه آب زیرزمینی هم به آن‌ها اضافه می‌شود، سپس کل جریان به سمت خروجی کل حوضه روند یابی می‌گردد. پارامترهای هیدرولوژیکی مدل بر اساس شیب سطحی، کاربری و نوع خاک و ترکیب آن‌ها تهیه می‌شود که می‌تواند به سهولت با استفاده از تکنیک GIS فراهم شوند.

تاکنون در دنیا، این مدل در تحقیقات متعددی از قبیل حوضه باریک در بلژیک (دست و همکاران، ۲۰۰۰)، حوضه رودخانه آلزیت در لوکزامبورگ (لیو و همکاران، ۲۰۰۳)، حوضه کارستی سومویی در ویتنام (لیو و همکاران، ۲۰۰۵)، حوضه آبریز هورنارد در اسلواکی (بهره‌مند و همکاران، ۲۰۰۵)، مورد مطالعه قرار گرفته است. مرور نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که مدل به خوبی قادر به اداره فرایندهای هیدرولوژیکی، در شرایط گوناگون توپوگرافی، خاک، کاربری، مساحت بوده و در این زمینه از توانایی بالایی برخوردار است.

در این تحقیق مدل روی حوضه جاجرود با داده‌های ۷ ساله بارش روزانه و تبخیر مشاهده شده آزموده شد. نتایج واسنجی مدل، بر اساس معیار ناش- ساتکلیف حدود ۸۰ درصد، برای دبی‌های حداکثر ۸۲ درصد و برای دبی‌های حداقل ۸۰ درصد برآورد گردید. پس از بهینه‌سازی پارامترها در مرحله واسنجی، با ثابت نگه داشتن مقادیر پارامترها، ارزیابی مدل برای ۳ سال دیگر صورت گرفت. در مرحله ارزیابی مدل، بر اساس معیار ناش- ساتکلیف حدود ۸۰ درصد، برای دبی‌های حداقل حدود ۸۲

درصد و برای دبی‌های حداکثر حدود ۷۹ درصد برآورد گردید. مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی نیز نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب دو هیدروگراف می‌باشند. علاوه بر این طبق جدول (۴-۴) نتایج استفاده از شاخص کارایی معیار جمعی مدل را در گروه عالی قرار می‌دهد و با نتایج (صفری و همکاران، ۲۰۰۹)، (زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۹) که از شاخص مذکور برای ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیک استفاده کرده‌اند مطابقت دارد. بنابراین با توجه به نتایج مذکور فرضیه تحقیق: (مدل توزیعی مکانی WetSpa توانایی شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه را با دقت قابل قبول دارد)، قابل قبول است.

۶-۲-۳- نتایج مربوط به بحث تخصیص منابع آب

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی شرایط بهره‌برداری از مخزن سد لتیان تحت تأثیرات تغییر اقلیم با کمک مدل WEAP روش بهره‌برداری واقعی را در نظر گرفته و توسط شاخص‌های درصد تأمین، اطمینان‌پذیری و تغییرات ذخیره مخزن سنجیده شد. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام‌شده می‌توان دریافت که در هر سه سناریوی انتشار مورد مطالعه در این پژوهش (A2، A1B و B1) با افزایش افق‌های زمانی از دوره‌ی پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) به دوره‌ی آینده‌ی نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، از دوره‌ی آینده‌ی نزدیک به آینده‌ی میانی (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و از آینده‌ی میانی به آینده‌ی دور (۲۰۹۹-۲۰۷۰) میزان درصد تأمین متوسط سالانه و ماهانه کاهش پیدا می‌کند و به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها این تغییرات شدیدتر خواهد بود. به‌عنوان نمونه در بدبینانه‌ترین سناریوی انتشار مورد استفاده (A2) اختلاف درصد تأمین متوسط سالانه برای هریک از نیازهای شرب تهران، شرب پردیس، کشاورزی و صنعت بین دوره‌ی زمانی پایه و آینده‌ی دور عبارت است از: ۱۳،۳، ۱۷،۲، ۳۹ و ۳۰،۲ که تفاوت چشم‌گیر در مقادیر آن‌ها به اولویت تخصیص‌ها مربوط

می‌شود، چون شرب تهران و پردیس در اولویت اول، کشاورزی در اولویت دوم و صنعت در اولویت سوم قرار دارند.

در مورد درصد تأمین متوسط ماهانه هم همان‌طور که در شکل‌های (۵-۲۳) تا (۵-۳۷) نشان داده شده است می‌توان گفت که تقریباً در ماه‌های آوریل، می و ژوئن همگی تقاضاها برای هر سه سناریو و افق‌های زمانی مورد بررسی برای آن‌ها به‌صورت ۱۰۰٪ تأمین می‌شود و پایین‌ترین درصد تأمین‌های متوسط ماهانه در ماه‌های ژانویه و فوریه که شروع سال آبی است مشاهده شده است. به‌عنوان مثال درصد تأمین متوسط ماهانه شرب تهران برای ماه‌های مذکور در سناریوی بدبینانه‌ی A2 برای افق زمانی آینده‌ی نزدیک به‌طور متوسط ۳۸,۵٪، برای آینده میانی به‌طور متوسط ۳۴٪ و برای آینده‌ی دور به‌طور متوسط ۲۸٪ می‌باشد.

یکی دیگر از شاخص‌های که در بحث شبیه‌سازی تخصیص منابع منطقه‌ی مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است، درصد اعتمادپذیری است. این شاخص برای تأمین نیاز شرب تهران و پردیس از ۶۳,۸٪ که مربوط به دوره‌ی زمانی پایه است تا ۳۵,۲۸٪ که مربوط به دوره‌ی آینده‌ی دور در سناریوی A2 است تغییر می‌کند، برای نیاز کشاورزی نیز این شاخص در دوره‌های مذکور بین ۷۸,۸٪ تا ۴۹,۷٪ و برای نیاز صنعت بین ۶۲,۸٪ تا ۳۲,۵٪ تغییر می‌کند و به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد.

تغییرات درصد ذخیره‌ی مخزن در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته به‌خوبی گویای مقادیر تأمین نیازها است، به‌گونه‌ای که در زمان‌هایی که مخزن کمبود دارد درصد تأمین نیز پایین است و برعکس زمانی که مخزن پر است درصد تأمین بالا خواهد بود. درصد متوسط سالانه‌ی ذخیره مخزن به ترتیب بدبینانه شدن سناریو و افزایش افق زمانی دارای سیر نزولی است به‌گونه‌ای که در سناریوی B1 بین افق زمانی آینده‌ی نزدیک و دور ۹,۴٪، در سناریوی A1B، ۱۲,۹٪ و در سناریوی A2، ۱۶,۵٪ اختلاف وجود دارد. درصد متوسط ماهانه‌ی ذخیره مخزن سد لتیان در دوره‌ی زمانی پایه حدود ۸۰٪ در ماه‌های می و ژوئن است که این بالاترین مقدار شبیه‌سازی شده است که به تدریج و با بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق زمانی مقادیر آن کاهش می‌یابد. در ماه‌های می و ژوئن به‌طور متوسط این

شاخص برای سناریوی B1 در افق‌های زمانی مورد بحث به ترتیب ۷۹٫۵٪، ۶۹٫۳٪ و ۶۳٫۱۵٪، برای سناریوی A1B به ترتیب ۷۵٫۴٪، ۶۵٫۸٪ و ۴۵٫۸٪ و برای سناریوی A1 به ترتیب ۷۰٫۹٪، ۶۲٫۶٪ و ۲۵٫۷٪ می‌باشد که به خوبی گویای اثر سناریوهای انتشار و افق‌های زمانی مختلف به روی درصد ذخیره مخزن و متعاقب آن درصد تأمین تقاضا می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با مدل را در مقیاس‌های کوچک (بازه‌های زمانی محدود) با محاسبات دستی برای تخصیص مقایسه شده است و از صحت شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بر مبنای بهینه‌سازی اطمینان حاصل شده است. بنابراین با توجه به نتایج مذکور فرضیه تحقیق: (نرم‌افزار WEAP قادر است با ایجاد بستری مناسب کمک شایانی برای سهولت در برنامه‌ریزی خطی جهت دستیابی تخصیص بهینه فراهم آورد)، قابل قبول است.

۶-۳- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی آنچه از نتایج این تحقیق برمی‌آید، در حوضه‌ی آبریز جاجرود به علت افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال‌های آتی شاهد افزایش چشم‌گیر متوسط دما خواهیم بود که این مسأله باعث افزایش تقاضا برای مصارف مختلف به‌ویژه شرب و کشاورزی می‌شود و همچنین این افزایش دما باعث کاهش منابع آب موجود (رواناب رودخانه) خواهد شد. افزایش تقاضا و کاهش منابع به‌درستی ضرورت مطالعه و مدیریت در زمینه‌ی کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش بهره‌وری از منابع آب را برای تأمین مصارف روزافزون گوشزد می‌کند. برای کاهش مشکلات ناشی از پدیده‌ی گرمایش جهانی در آینده باید میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و روی آوردن به سوخت‌های پاک و همچنین اهمیت دادن به حفاظت از محیط‌زیست کنترل شود. از طرفی باید با اعمال مدیریت‌های درست خود را با این پدیده همراه کنیم، به‌ویژه در بحث مدیریت منابع آب با بهینه کردن مصارف و جلوگیری از تلفات رایج در انتقال و تخصیص منابع از خسارت‌های این پدیده در آینده جلوگیری کنیم.

۴-۶- پیشنهادها

با توجه به پژوهش صورت گرفته، پیشنهادهای پژوهشی و اجرایی زیر جهت بهبود نتایج و ارتقای کیفیت تحقیق و همچنین کاهش چالش‌های پیش روی منابع آب در سطح ملی و منطقه‌ای در زمینه‌های زیر ارائه می‌گردد:

۱- تغییر اقلیم و ریزمقیاس نمایی

- استفاده از مدل‌های گردش عمومی (AOGCM) مختلف در منطقه و مقایسه‌ی نتایج آن‌ها.
- استفاده از مدل‌های ریزمقیاس نمایی دیگر از جمله استفاده از مدل مولد اقلیمی SDSM و حتی استفاده از روش‌های ریزمقیاس نمایی دیگر از جمله روش‌های دینامیکی.
- ایجاد ایستگاه معرف در حوضه و بررسی اثر تغییر اقلیم در منطقه به کمک داده‌های این ایستگاه معرف و مقایسه‌ی نتایج آن باحالتی که از تعداد بیشتری ایستگاه در سطح حوضه استفاده شده است.
- محاسبه‌ی شاخص‌های اقلیمی حدی دیگر برای منطقه که ابعاد دیگری از وضعیت اقلیمی منطقه را تحت تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای را روشن کند.
- با توجه به عدم پیوستگی داده‌های اندازه‌گیری و نواقص آماری پیشنهاد می‌گردد که نظارت کافی جهت ثبت داده‌ها و برطرف نمودن ایرادهای دستگاه‌های اندازه‌گیری نصب‌شده در حوضه صورت گیرد.

۲- مدل سازی رواناب

- با توجه به اینکه آمار هیدرولوژی (دبی، بارش) از ورودی‌های اصلی مدل WetSpa می‌باشند، پیشنهاد می‌گردد مدل در حوضه‌هایی که دارای آمار و اطلاعات دقیق هیدرولوژی و فیزوگرافی می‌باشند، مورد استفاده و آزمون قرار گیرد.
- در این تحقیق بخش هیدرولوژیک مدل WetSpa مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج خوبی به دست آمد. پیشنهاد می‌گردد در صورت وجود آمار دقیق رسوب بخش فرسایش و رسوب مدل WetSpa نیز در حوضه آبریز جاجرود استفاده و مورد ارزیابی قرار گیرد.
- با توجه به اینکه این مدل، علاوه بر پیش‌بینی سیلاب، توانایی بررسی عوامل ناشی از آن، نظیر توزیع مکانی توپوگرافی، کاربری اراضی و نوع خاک را نیز دارد. لذا پیشنهاد می‌گردد مطالعاتی در زمینه بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرایندهای هیدرولوژیک با استفاده از این مدل صورت پذیرد.
- از آنجاکه زمان تمرکز آبخیز مورد مطالعه کمتر از یک روز می‌باشد، ضرورت استفاده از اطلاعات ساعتی را ایجاب می‌کند. لذا پیشنهاد می‌گردد که در آبخیز مورد مطالعه از باران‌سنج‌های ثابت استفاده گردد که امکان ثبت آمار ساعتی و پیوسته هیدرولوژی را داشته باشند تا در ارزیابی‌های مختلف حفاظت آب و خاک محدودیتی از نظر اطلاعات ایجاد نگردد.
- مدل مذکور قابلیت شبیه‌سازی رواناب و فرسایش آبی در تمام شبکه سلولی حوضه را دارد. این قابلیت مدل برای مدیران و کارشناسان این امکان را فراهم می‌نماید که قبل از اجرای هرگونه عملیات، مناطق مختلف را از نظر پتانسیل ایجاد رواناب و رسوب شناسایی نمایند. توصیه می‌شود در سایر طرح‌های پیش‌بینی سیل و رسوب، آب منطقه‌ای و منابع طبیعی این مدل مورد استفاده قرار گیرد.

۳- در زمینه‌ی تخصیص منابع آب

- در این تحقیق تخصیص در شرایط تغییر اقلیم با فرض تغییر منابع و ثابت ماندن مصارف شبیه-سازی شده است، پیشنهاد می‌گردد تخصیص در حوزه‌ی مذکور تحت شرایط تغییر اقلیم یک‌بار با فرض ثابت ماندن منابع و تغییر مصارف و یک‌بار هم با فرض تغییر منابع و مصارف شبیه-سازی شود و در نهایت مدل بهینه‌سازی برای امر تخصیص تحت شرایط تغییر اقلیم ساخته شود.
- اثر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی به صورت همزمان به روی منابع آب و چگونگی تخصیص آن‌ها بررسی شود.
- انجام مطالعاتی در مورد مدل‌های آبدهی و تهیه منحنی‌های فرمانی که اهداف دیگری به جز تأمین مصارف شرب، صنعت و کشاورزی، مانند تولید انرژی برقابی، کنترل سیلاب و محیط‌زیست نیز مدنظر قرار گیرند.
- انجام مطالعاتی در مورد تهیه مدل آبدهی و منحنی فرمان به منظور کاهش آلودگی آب سیستم رودخانه‌ای جاجرود.
- انجام مطالعاتی در مورد تهیه مدل آبدهی و منحنی فرمان به منظور جلوگیری و کاهش اثرات مخرب تغییرات اقلیم بر روی منابع آب سطحی و زیرزمینی و محصولات کشاورزی دشت ورامین و پاکدشت.

منابع

۱. اسپنانی، ک.، شهیدی، ع.، فرزانه، م. ر.، رستمیان، ر. ۱۳۹۱. بررسی تأثیرات سناریوهای مختلف تخصیص آب در دوره آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی در حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی) پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بیرجند.
۲. اشرف، ب.، موسوی بایگی، م.، کمالی، غ.ع.، داوری، ک.، ۱۳۹۰. پیش‌بینی تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی در ۲۰ سال آتی با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری داده‌های مدل HADCM3، نشریه آب‌وخاک، شماره ۴، جلد ۹۴۵:۲۵-۹۵۷.
۳. بابائیان، ا.، نجفی‌نیک، ز.، حبیبی نوخندان، م.، زابل عباسی، ف.، ادب، ح.، و ملبوسی، ش.، ۱۳۸۸. مدل‌سازی اقلیم ایران در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G. فصلنامه جغرافیا و توسعه. شماره ۱۶: ۱۳۵-۱۵۲.
۴. بابائیان، ا.، نجفی‌نیک، ز.، حبیبی نوخندان، م.، زابل عباسی، ف.، ادب، ح. و ملبوسی، ش.، ۱۳۸۶. مدل‌سازی اقلیم ایران در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G. کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب. ۶۱-۷۲.
۵. بهبودیان، ج.، ۱۳۸۴. آمار و احتمال مقدماتی. انتشارات دانشگاه شیراز. ویرایش سوم. صص ۲۳۷-۲۴۱.
۶. ترکزاد، ح.، ۱۳۹۰. تحلیل عدم قطعیت در برآورد پارامترهای اقلیمی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.
۷. حافظ پرست مودت، مریم. خلقی، مجید. ۱۳۸۵. برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از مدل WEAP در بخشی از حوضه آبریز رودخانه حبله رود. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب

۸. حسینی، سید حمیدرضا (۱۳۹۲)، " بهره‌برداری بهینه از مخازن متوالی منابع آب سطحی « مطالعه موردی سد ماملو «"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.

۹. رحمتی، حسین (۱۳۹۲)، " شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب در حوضه آبریز چهل چای"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

۱۰. زارع زاده مهریزی، م.، مرید، س. ۱۳۸۹. تخصیص منابع آب حوضه آبریز قزل اوزن-سفیدرود تحت تأثیر تغییر اقلیم با به‌کارگیری رویکرد ورشکستگی در حل اختلافات. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

۱۱. ذهبیون، ب.، گودرزی، م.، مساح بوانی، ع.، ۱۳۸۹. کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم. نشریه پژوهش‌های اقلیمی، شماره ۳ و ۴: ۱-۱۸.

۱۲. راسق قزلباش، مصطفی. ۱۳۹۲. تحلیل سیستم منابع آب با استفاده از نرم‌افزار WEAP مطالعه موردی: حوضه آبریز سد مهاباد. اولین همایش ملی بحران آب.

۱۳. سایت خدمات هواشناسی مجارستان (HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE)
<http://www.met.hu/>

۱۴. شفیعی، م.، انصاری، ح.، داوری، ک. ۱۳۸۹. مدل‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز با استفاده از ArcSWAT. هشتمین همایش ملی ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری ایران، تهران.

۱۵. شوریان، م.، موسوی، ج.، ۱۳۹۰. برنامه‌ریزی بهینه تخصیص منابع آب در سطح حوضه آبریز با اهداف انتقال آب بین حوضه‌ای. پایگاه اطلاعات علمی SID. (<http://www.SID.ir>)

۱۶. علیزاده، ا. ۱۳۸۶. هیدرولوژی کاربردی. انتشارات امام رضا (ع).

۱۷. علیزاده، ا.، سیاری، ن.، حسامی کرمانی، م.ر.، بنایان اول، م.، فرید حسینی، ع.، ۱۳۸۹. بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیمی بر منابع و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کشف رود). نشریه آب و خاک، شماره ۴، جلد ۸۱۵: ۲۴-۸۳۵.
۱۸. علیزاده، ح. ۱۳۸۵. ارزیابی تأثیر هیدرولوژیکی سناریوهای تخصیص آب در سطح حوضه با استفاده از نرم‌افزار WEAP. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۱۹. عباسی، ف.، ملبوسی، ش.، بابائیان، ا.، اثمري، م.، برهانی، ر. ۱۳۸۹. پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی خروجی مدل ECHO-G. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۲، ص ۲۳۳-۲۱۸.
۲۰. فرزانه، م. ۱۳۸۹. بررسی عدم قطعیت مدل چندگانه خطی SDSM بر رواناب رودخانه (مطالعه موردی: حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی، ایران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.
۲۱. فرهنگي، م.، بزرگ حداد، ا.، ۱۳۸۹. ارزیابی معیارهای تخصیص در مدل‌های مدیریت سیستم مخازن در شرایط کم‌آبی (مطالعه موردی: حوضه کارون). مجله پژوهش آب ایران، شماره ۴، جلد ۷: ۳۳-۴۶.
۲۲. کمال ع. ر. ۱۳۸۹. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب، تحت تأثیر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM-AR4 روش‌های کوچک‌مقیاس کردن: مطالعه موردی زیر حوضه قره‌سو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

۲۳. کمال، ع. و مساح بوانی، ع.، ۱۳۹۰. ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM-AR4 و مدل‌های هیدرولوژی در تخمین دما، بارش و رواناب حوضه قره‌سو تحت تأثیر تغییر اقلیم. مجله پژوهش آب ایران. سال پنجم، شماره ۹: ۳۹-۵۰.

۲۴. لاکس، د.پ.، استدینگر، ج.ر.، هیث، د.ا.؛ تحلیل سیستم‌های منابع آب؛ ترجمه‌ی شریفی، م.ب. و شهیدی‌پور، م.م.؛ چاپ سوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۷.

۲۵. مرادی‌پور، ش.، بهره‌مند، ع.ر.، زینی‌وند، ح.، نجفی‌نژاد، ع.، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی توزیعی- مکانی سیل با مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبخیز طالقان. هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری. گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.

۲۶. مساح بوانی، ع. ر.، مرید، س.، محمدزاده، م. و گودس، ک. ۱۳۸۵. ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب (مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود اصفهان). رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

۲۷. مساح بوانی، ع. ر.، مرید، س. و محمدزاده، م. ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های کوچک‌مقیاس کردن و مدل‌های AOGCM در بررسی تأثیر تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای. مجله فیزیک و فضا. (۳۶) ۴: ۱۱۱-۱۰۰.

۲۸. مفتاح هلقی، مهدی. وفایی جوان، عاطفه. ۱۳۸۹. برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از مدل WEAP مطالعه موردی: حوضه آبریز رامیان از استان گلستان. دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب.

۲۹. مقدسی، م.، مرید، س.، عراقی نژاد، ش. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، هوش جمعی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی). مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال چهارم، شماره ۳: ۱-۱۳.
۳۰. مهدوی، م. ۱۳۸۴، هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران. ۴۰۰ ص.
۳۱. ناصری، ع. (۱۳۹۳). "سازگاری با تغییر اقلیم از طریق تخصیص بهینه منابع آب (مطالعه موردی: حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی، ایران)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند.
۳۲. ویژه‌نامه تغییر اقلیم و کشاورزی "مروری بر کنوانسیون و نشست‌های تغییر اقلیم از ریو تا کپنهاگ". بهمن‌ماه ۱۳۸۸. نشر آموزش کشاورزی. ص ۵-۲.
۳۳. ندوشنی، س. و داننده‌مهر، ع. ۱۳۸۴. سیستم مدل‌سازی هیدرولوژی (HEC-HMS). انتشارات موسسه دیباگران تهران. ۲۹۵ ص.
۳۴. یعقوبی، م.، مساح بوانی، ع.ر. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی دما و بارش دوره آتی رودخانه اعظم هرات با استفاده از مدل LARS- WG. نخستین همایش تغییر اقلیم و راهی به سوی آینده پایدار، ۲۰ خرداد ۱۳۹۳، تهران، ایران، ص ۱ - ۹.
۳۵. گزارش مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف.
۳۶. گزارش وضعیت حریم رودخانه فشم - اداره آب شهرستان فشم، ۱۳۸۲

37. ASCE, 1969. American Society of Civil Engineers, Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers, Manuals and Reports of Engineering Practice, No. 37, New York.
38. Abbaspour, K. C. Faramarzi, M. Seyed Ghasemi, S. and Hong Yang. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 45, W10434, doi:10. 1029/2008WR007615.
39. Allen, M.R., Stott, P. A., Mitchell, J. F. B., Schnur, R., and Delworth, T. L., 2000. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. Nature 407: 617- 620.
40. Andersen, J.A., Refsgaard, J.C., and Jensen, K.H. 2001. Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin-model construction and validation. Journal of Hydrology. 247: 200–214.
41. Arnell, N.W., (1999a). Climate change and global water resources. Global Environmental Change 9(S1): S31 S49.
42. Ashraf Vaghefi, S., Mousavi, S.J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., and H.Yang., 2013. Analyses of The Impact of Climate Change On Water Resources Components, Drought and Wheat Yield in Semiarid Regions: Karkheh River Basin in Iran.,Journal of Hydrological Processes.1-15
43. Babel, M.S., Das Gupta, A., Nayak D. K.2005. A Model for Optimal Allocation of Water to Competing Demands. Journal of Water Resources Management.19: 693–712.
44. Baede, A. P. M. Ahlonsou, E. Ding, Y. and Schimel, D. (2001): The Climate System: an Overview. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T. , Y.
45. Bahremand, A., and De Smedt, F. 2010. Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model, Water Resource Management. 24: 2869-2880.
46. Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poórová, J., Velcická, L., and Kuniková, E. 2007 a. WetSpa model Application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia, Water Resource Management. 21: 1373-1391.

47. Bahremand, A., and De Smedt, F. 2007b. Distributed Hydrological Modeling and Sensitivity Analysis in Torysa Watershed, Slovakia, *Water Resource Management*.
48. Bahremand, A., and De Smedt, F. 2006. Sensitivity and uncertainty analysis of a GIS-based flood simulation model using PEST, *WSEAS Transactions on environment and development*.
49. Bahremand, A., Corluy, J., Y.B., Liu, Y.B., and De Smedt, F. 2005. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia, *floods, from Defence to management* edited by van Alphen, j., van Beek, E., and Taal, M., Taylor- Francis Group, London, 67-74.
50. Batelaan, O., Wang, Z.M., and De Smedt, F. 1996. An adaptive GIS toolbox for hydrological modelling, 3-9, eds., Kovar, K. and Nachtnebel, H.P., *Application of geographic information systems in hydrology and water resources management*.
51. Beek, and B. D. Negewo, 2012, *Modeling water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050*, FutureWater, Wageningen, The Netherlands.
52. Berkhout, F., Hertin, J., and Jordan, A., 2002. Socio-economic Futures in Climate Change Impact Assessment: Using Scenarios as 'Learning Machines'. *Journal of Global Environmental Change*. 12: 83-95.
53. Deniz, A., Toros, H. and Incecik, S., 2011. Spatial variations of climate indices in Turkey. *International Journal of Climatology*. 31: 394 - 403
54. Dracup, J. A., and Vicuna, S., 2005. An Overview of Hydrology and Water Resources Studies on - Climate Change: the California Experience. *Proc. EWRI 2005: Impacts of Global Climate Change*.
55. Droogers, P., Immerzeel, W.W., Terink, W., Hoogeveen, J., Bierkens, M. F. P., van Beek, L. P. H., and Negewo, B. D., 2012, *Modeling water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050*, FutureWater, Wageningen, The Netherlands
56. Fakhry, M., Farzaneh, M., Eslamian, S., and Khordadi, M., 2012. Confidence Interval Assessment to Estimate Dry and Wet Spella under Climate Change in Change Station. *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE.
57. Henriksen, H.J., Trolborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C., and Madsen, B. 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*. 280: 52–71.

58. IPCC, 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
59. IPCC, (2007). in: Alfsen, K., Barrow, Bass, E.B, Dai, Desanker, X.P., Gaffin, Giorgi, S.R.F.
60. IPCC Data Distribution Centre., 1998. <http://www.ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>
61. IPCC- TG CIA., (1999). Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Eds. Center, T. R., Hulme, M. and Lal, M., version 1, 69 pp. Inter governmental panel on climate, task group on scenarios for climate impact assessment.
62. Khazaei, M.R., Zahabiyoun, B., Saghafian, B., 2011. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. Journal of Royal Meteorological Society.1-10.
63. Kirsten J. Harma & Mark S. Johnson & Stewart J. Cohen. 2012. Future Water Supply and Demand in the Okanagan Basin, British Columbia: A Scenario-Based Analysis of Multiple, Interacting Stressors, Institute for Resources, Environment and Sustainability, Vancouver. BC, Canada V6T 1Z4.
64. Liu YB, Gebremeskel S, De Smedt F, Hoffmann L, Pfister L (2003) A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. J Hydrol (Amst) 283:91–106. doi:10.1016/ S0022-1694(03)00242-7
65. Liu YB, 2004, Development and application of a GIS-based hydrological model for flood prediction and watershed management. PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
66. Liu, Y.B., Corluy, J., Bahremand, A., De Smedt, F., Poorova, J., Velcicka., L. 2006. Simulation of runoff and phosphorus transport in a Carpathian catchment, Slovakia, Wiley InterScience, 22: 1009–1022.
67. Liu, Y.B., and De Smedt, F. 2005a. Flood modeling for complex terrain using GIS and remote sensed information, Water Resources Management. 19(5): 605-624.
68. Liu, Y.B., Batelaan, O., De Smedt, F., Huong, N.T. and Tam, V.T. 2005b. Test of a distributed modelling approach to predict flood flows in the karst Suoimuoi catchment in Vietnam, Environmental Geology. 48(7): 931-940.

69. Liu, Y.B., and De Smedt, F. 2004. WetSpa extension, documentation and user manual. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
70. Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., and Hoffmann, L., Pfister, L. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology*. 283: 91–106.
71. Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L. and Pfister, L. 2002. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology*. 283: 91–106.
72. Loucks, D.P., Beek, E., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P.M, and villars, M.T. 2005. water resources system planning and management and introduction method, models and application, published by United Nation Educational scientific and cultural Organization (UNESCO). Delft Hydraulic. The Netherlands.
73. Mikhail A. Semenov and Elaine M. Barrow, LARS-WG, A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies, User Manual, 2002.
74. Prudhomme C, Jacob D, Svensson C. 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology*. 277: 1 – 23.
75. Prudhomme C, Reynard N, Crooks S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?. *Hydrological Processes*. 16: 1137 – 1150.
76. Racsko, P., Szeidl, L., and Semenov, M.A., 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57: 27 – 41.
77. Rwetabula, J., De Smedt, F., and Rebhun, M. 2007. Prediction of runoff and discharge in the Simiyu River (tributary of Lake Victoria, Tanzania) using the WetSpa model. *Hydrology and Earth System Sciences*. 4: 881-908.
78. Safari, A., De Smedt, F., and Moreda, F. 2009. WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology*. Doi: 10.1016/j. 04.001.
79. Sieber, j., and purkey, D. 2011. Water Evaluation and planning system (WEAP) user guide, stockholm Environment Institute (SIE), U.S. Center.

80. SINCE, 1972. WatfloodSPL8, Flood Forecasting System, Developed for Surveys and Information Branch Ecosystem Science and Evaluation Directorate, Environment Canada.
81. Wang, J.F., Cheng, G.D., Gao, Y.G., Long, A.H., Xu, Z.M., Hongyan Chen, X.L., Barker, T., 2007.
82. Wang, Z., Batelaan, O, and De Smedt, F. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa), *Physics and Chemistry of the Earth*, 21, 189–193. doi:10.1016/S0079-1946(97)85583-8
83. Zeinivand, H., and De Smedt, F. 2009 a. Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. *Nat Hazards*, DOI10.1007/s11069-009-9478-9.
84. Zeinivand, H., and De Smedt, F. 2009 b. Hydrological modeling of snow accumulation and melting on river basin scale, *Water Resources Management*, 23:2271–2287.
85. “WEAP 3.3, Water Evaluation And Planning System- User Guide”, Stockholm Environment Institute, Tellus Institute, 2012.
86. “WEAP 3.3, Water Evaluation And Planning System- Tutorial”, Stockholm Environment Institute, Tellus Institute, 2012.
87. Wilby RL, Christian WD. 2007. SDSM 4.1 – a decision support tool for the assessment of regional climate change impact, User Manual. <http://copublic.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/SDSMManual.Pdf>

پوست

پیوست الف

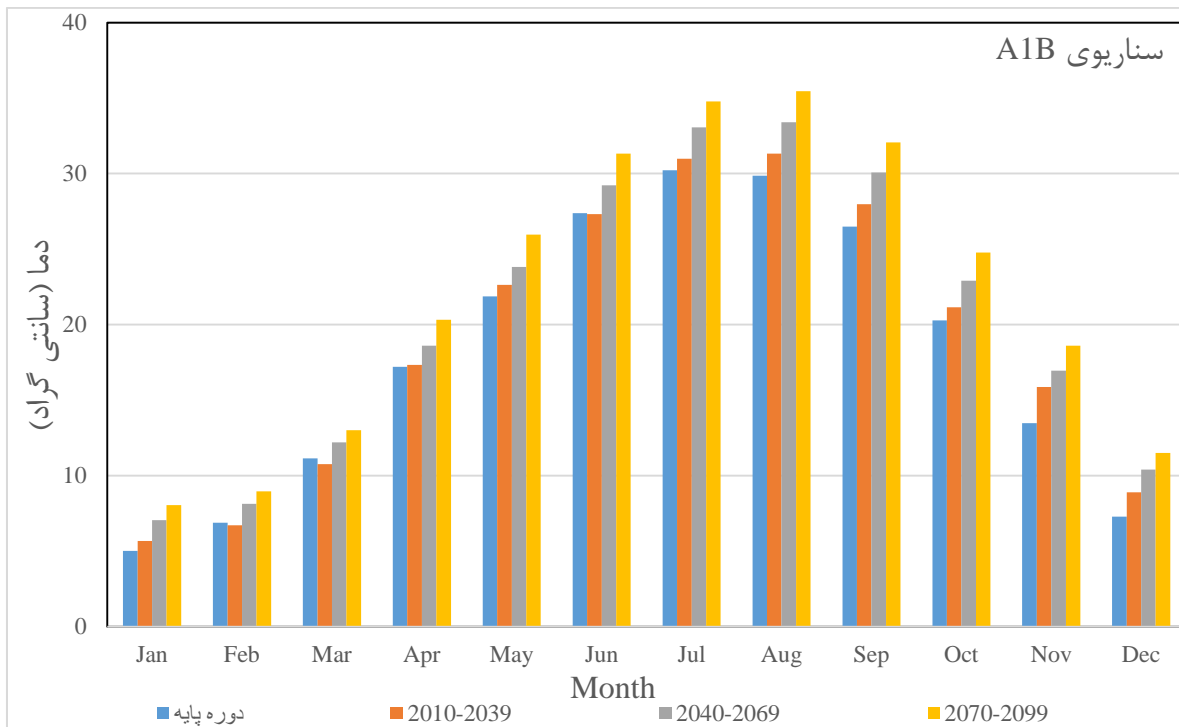
نتایج کامل تغییر اقلیم

در این پیوست نتایج تغییر اقلیم به صورت ۶ شاخص مورد بحث در قسمت ۵-۳ برای سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه که در متن پایان‌نامه به دلیل حجم زیاد مطالب آورده نشده بود به ترتیبی که برای ایستگاه امامه اشاره شد، آمده است.

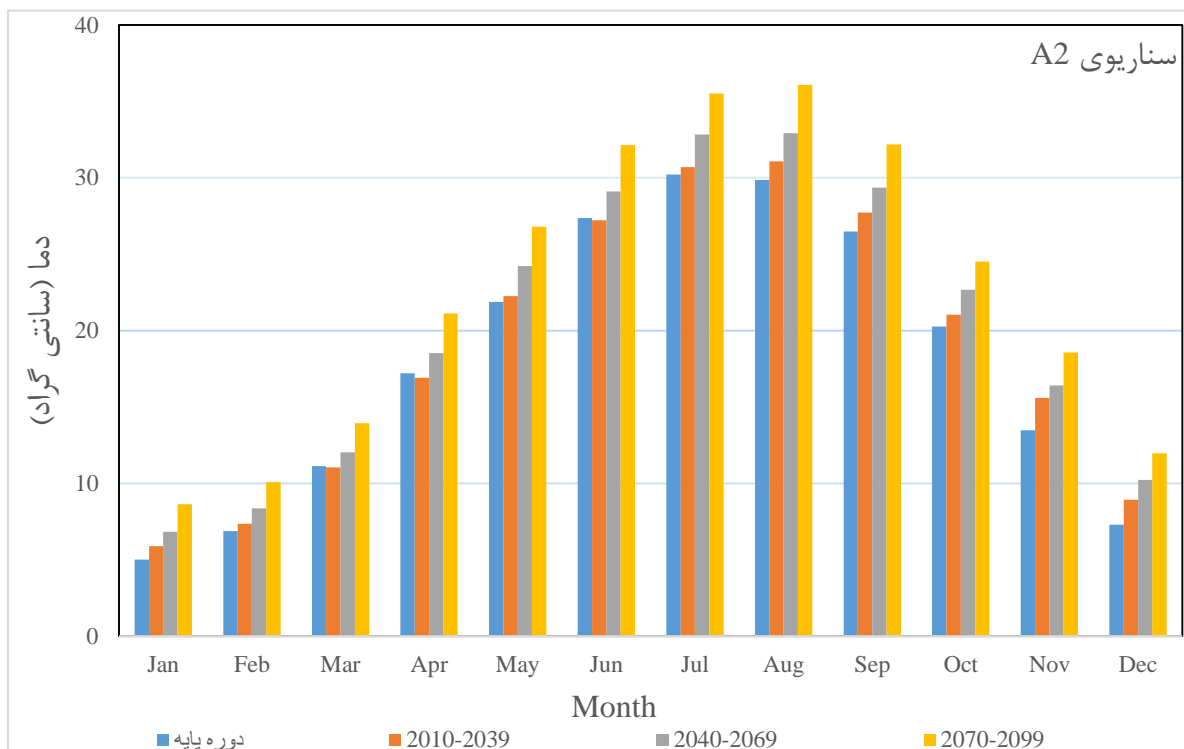
الف-۱- بررسی تغییرات دمای حداکثر

با توجه به شکل‌های (الف-۱) تا (الف-۶)، بیشترین افزایش نسبت به دوره‌ی پایه در ایستگاه‌های کمرخانی و راحت آباد نیز مربوط به سناریوی A2 در دوره‌ی 2080s برای ماه آگوست است و کمترین افزایش در این دوره زمانی برای ماه آگوست (گرم‌ترین ماه سال در این منطقه) به سناریوی B1 مربوط می‌شود، همچنین سناریوی A1B نیز در ماه آگوست افزایش را در بالاترین حالت ممکن (دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰) نشان می‌دهد.

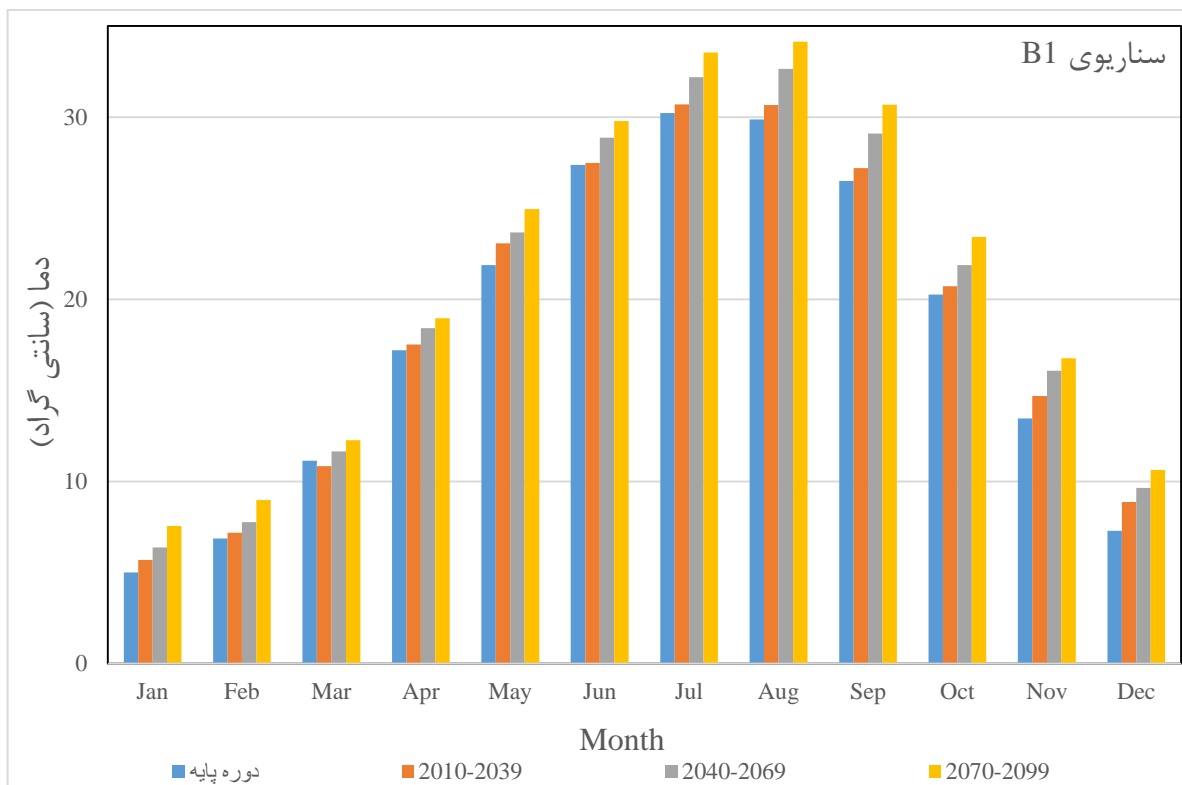
به‌طور کلی طبق این پژوهش میانگین دمای حداکثر ماهانه در بدبینانه‌ترین شرایط تا سال ۲۱۰۰ حدود ۲۰ درصد و در خوش‌بینانه‌ترین حالت حدود ۱۴ درصد در محدوده‌ی منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد.



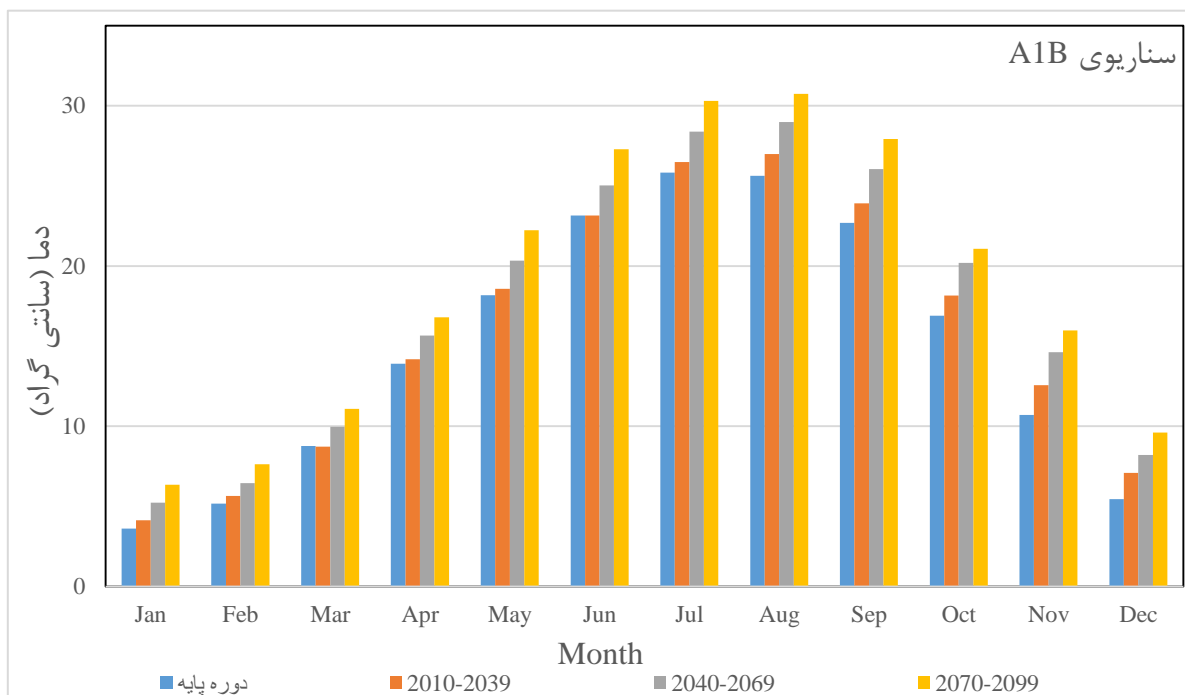
شکل (الف-۱) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A1B



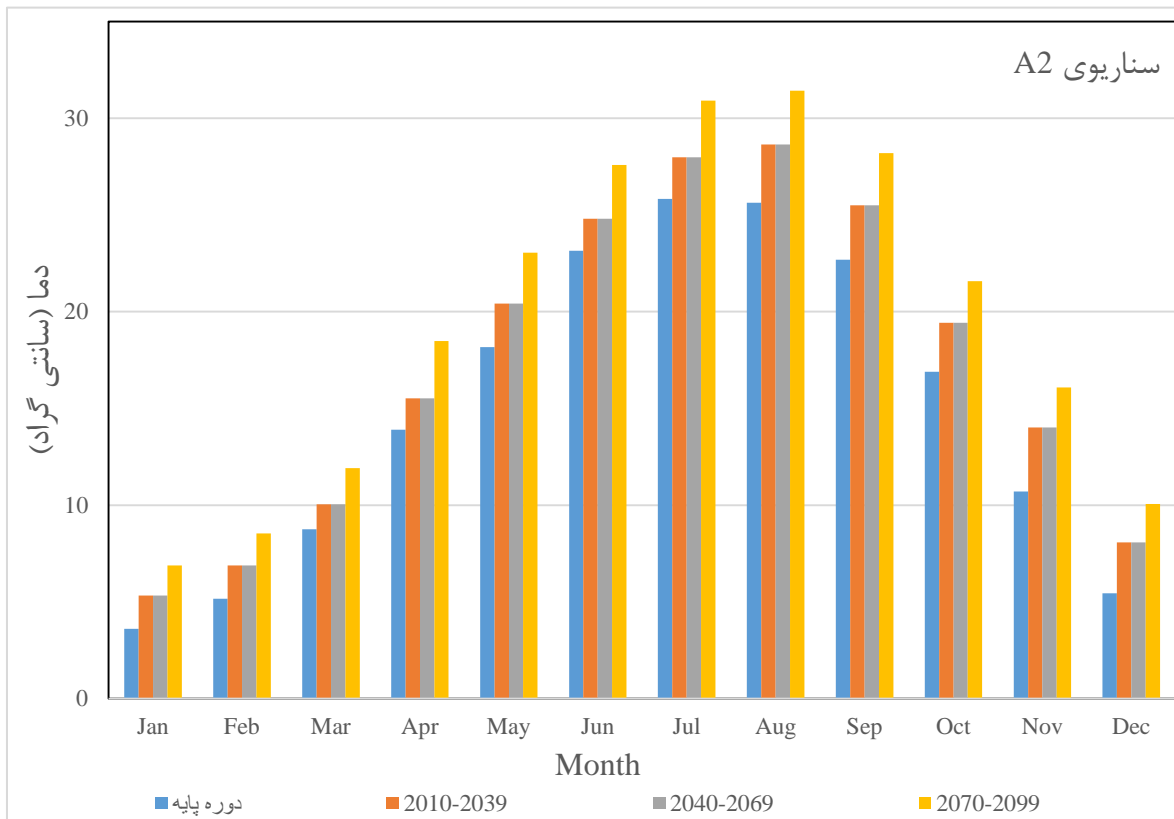
شکل (الف-۲) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A2



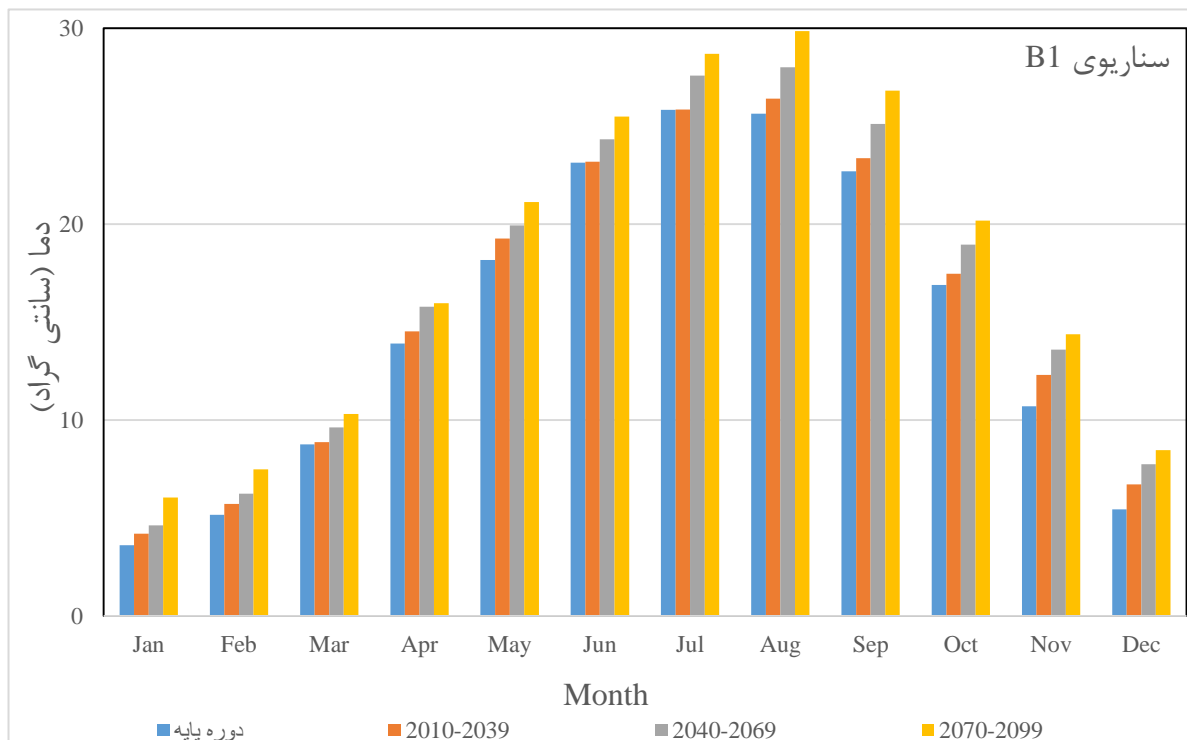
شکل (الف-۳) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی B1



شکل (الف-۴) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A1B



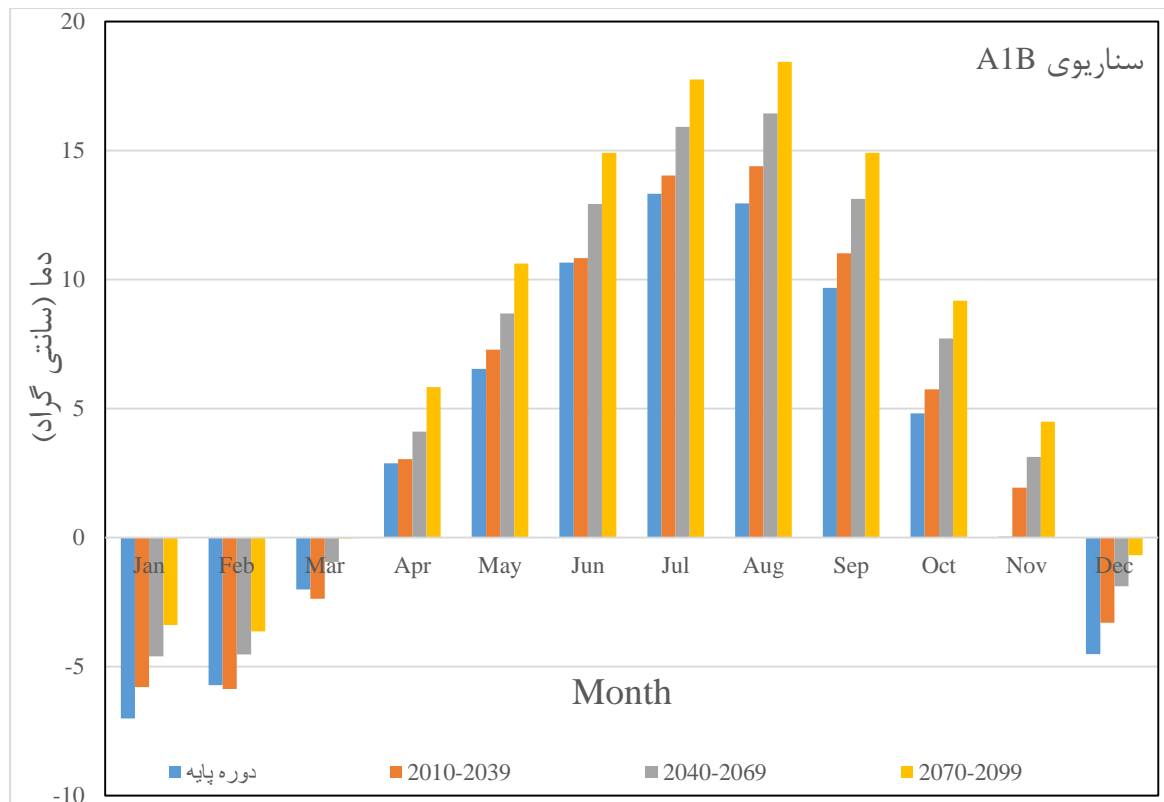
شکل (الف-۵) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A2



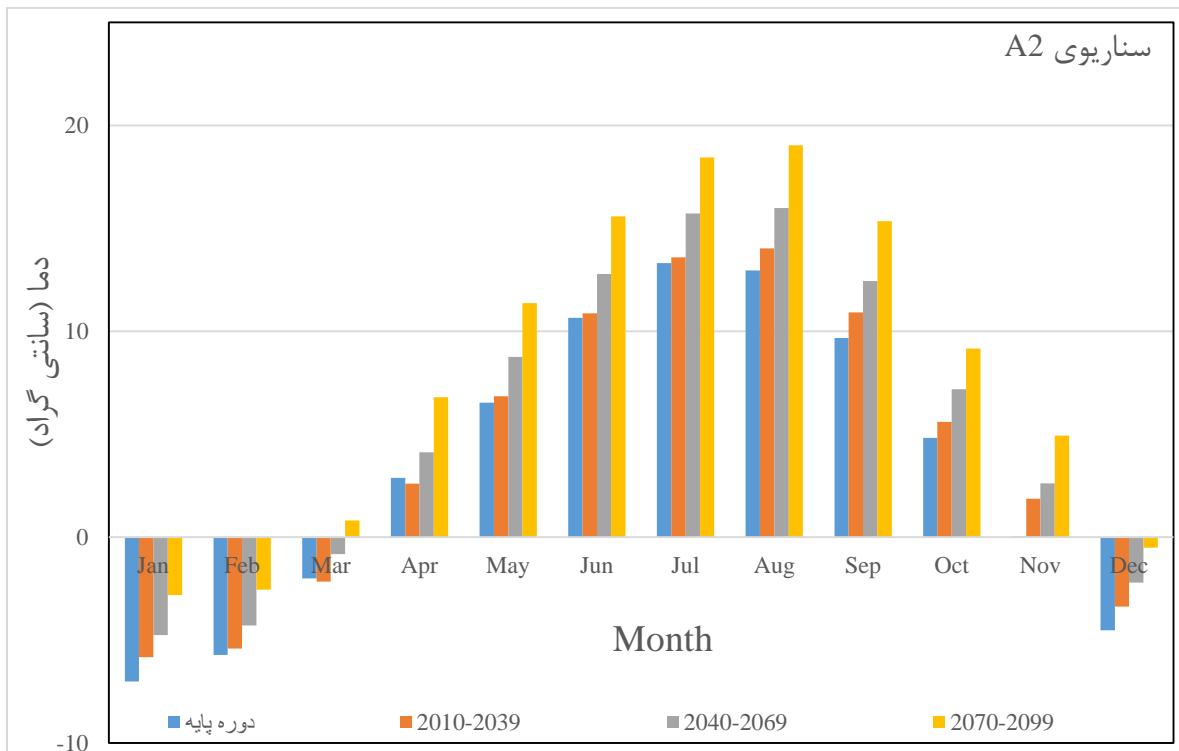
شکل (الف-۶) مقایسه میانگین حداکثر دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی B1

الف-۲- بررسی تغییرات دمای حداقل

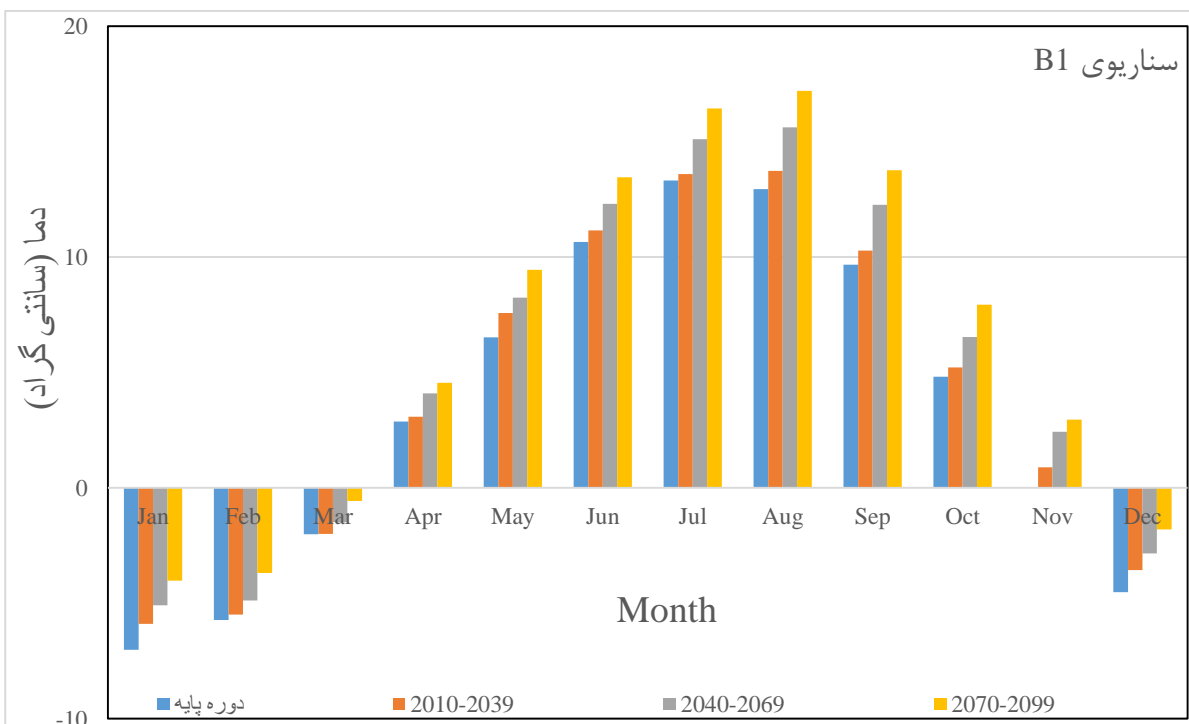
همان‌طور که در شکل‌های (الف-۷) تا (الف-۱۲)، مشاهده می‌شود در این شاخص نیز مانند دمای حداکثر در تمامی سناریوها با افزایش افق‌های زمانی میزان دمای حداقل دچار افزایش معنی‌داری شده است و تمامی سناریوها افزایش میانگین حداقل دما را نمایش می‌دهند. طبق این شاخص نیز شاهد افزایش حدوداً ۲۰ درصدی میانگین دمای حداقل ماهانه در خوش‌بینانه‌ترین حالت و افزایش حدوداً ۳۰ درصدی در بدبینانه‌ترین حالت در ماه آگوست هستیم.



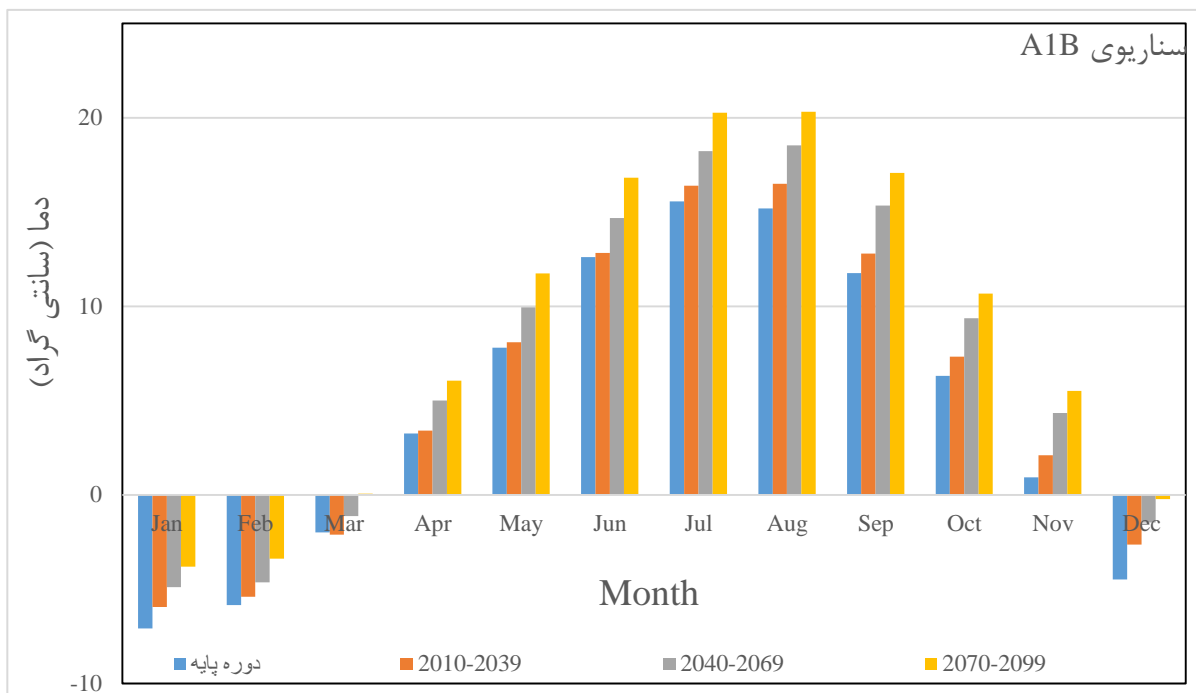
شکل (الف-۷) مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A1B



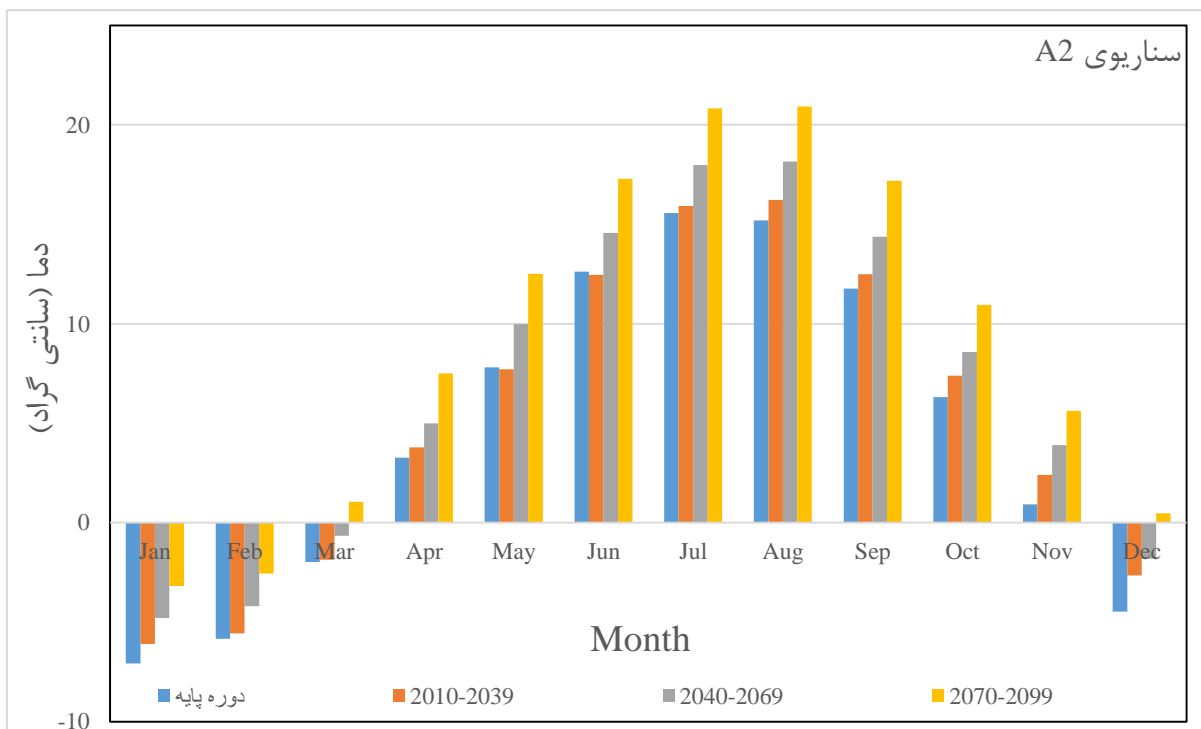
شکل (الف - ۸) مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی A2



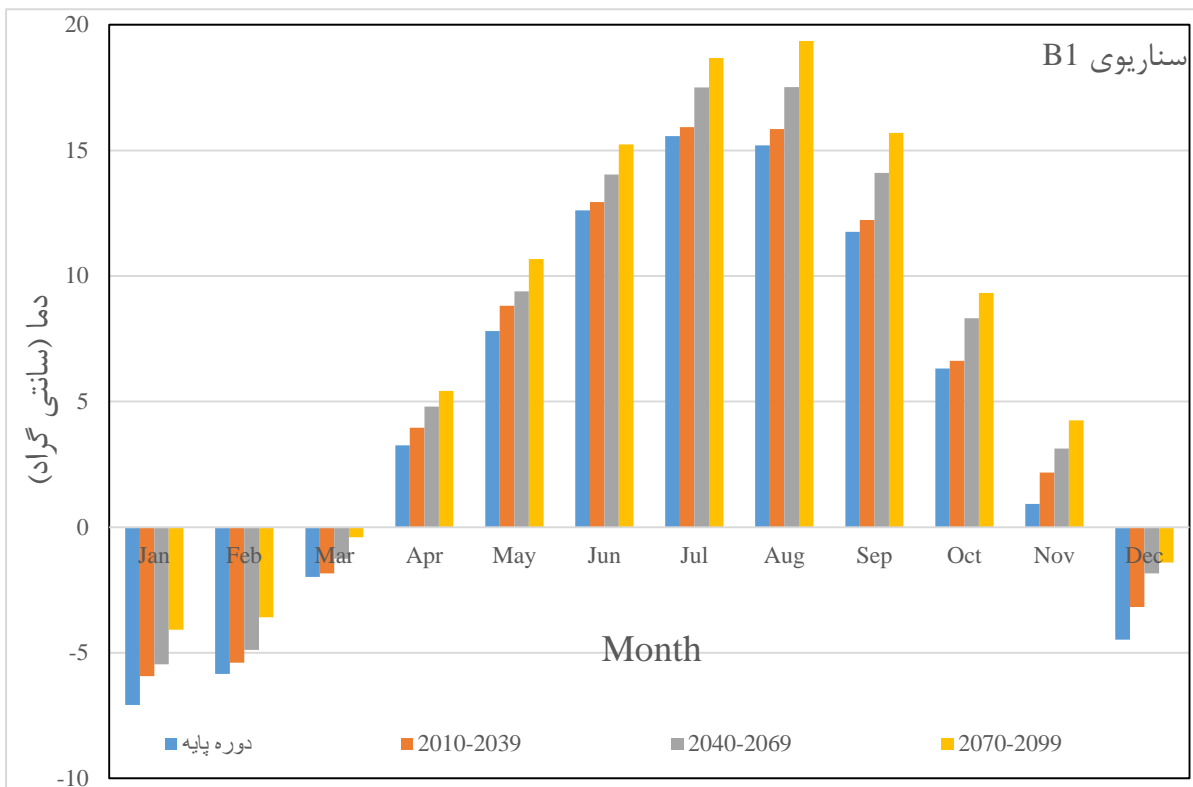
شکل (الف - ۹) مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه کمرخانی برای سناریوی B1



شکل (الف - ۱۰) مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A1B



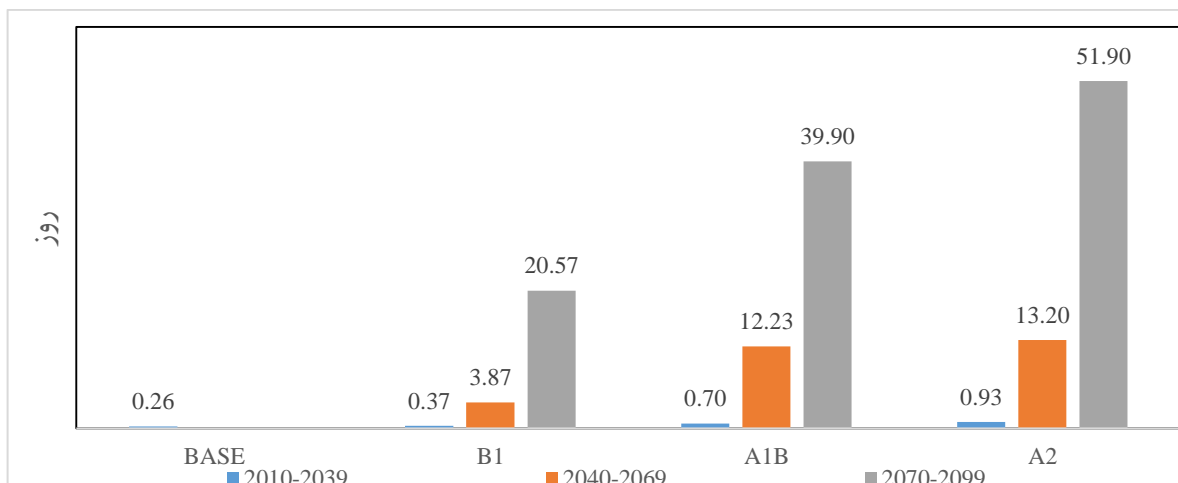
شکل (الف - ۱۱) مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی A2



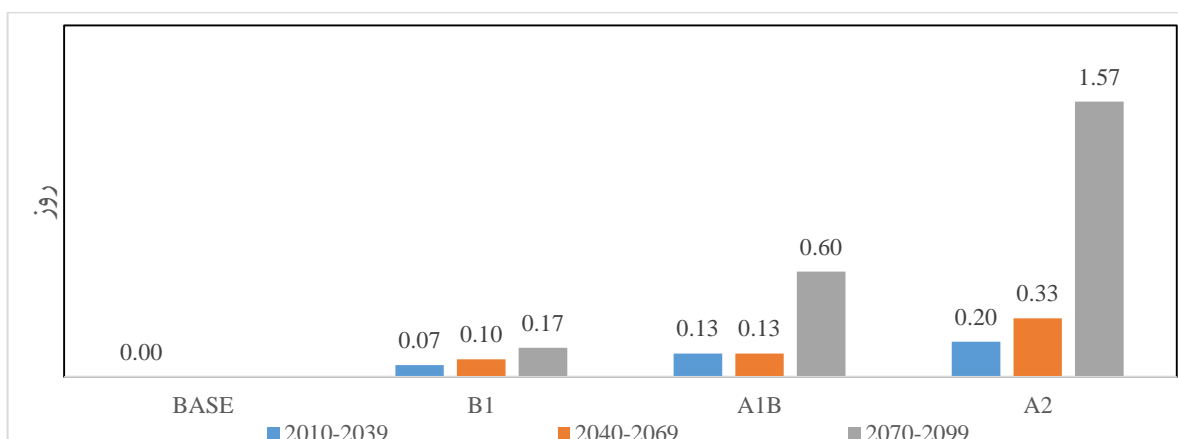
شکل (الف-۱۲) مقایسه میانگین حداقل دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله ایستگاه راحت آباد برای سناریوی B1

الف-۳- شاخص روزهای بسیار گرم

همان‌طور که در شکل‌های (الف-۱۳) و (الف-۱۴)، نشان داده شده است، میزان این شاخص در ایستگاه‌های کمرخانی و راحت آباد نیز مانند ایستگاه امامه دارای روندی افزایشی می‌باشد و بیشترین افزایش‌ها در هر سناریو در دوره‌ی ۳۰ ساله پایانی (2080s) مشاهده می‌شود. نکته جالب توجه این است که در ایستگاه راحت آباد به نسبت دو ایستگاه دیگر تعداد روزهای بسیار گرم در سال خیلی کمتر است ولی کماکان افزایش این شاخص به صورت درصدی در این ایستگاه قابل ملاحظه است.



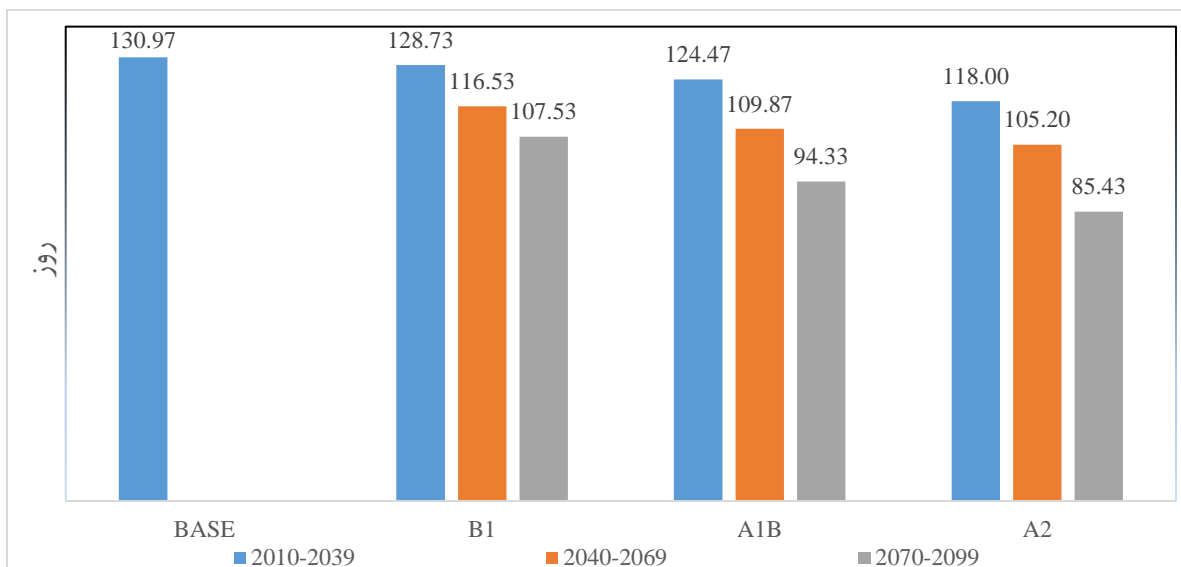
شکل (الف-۱۳) تغییرات شاخص تعداد روزهای بسیار گرم سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی



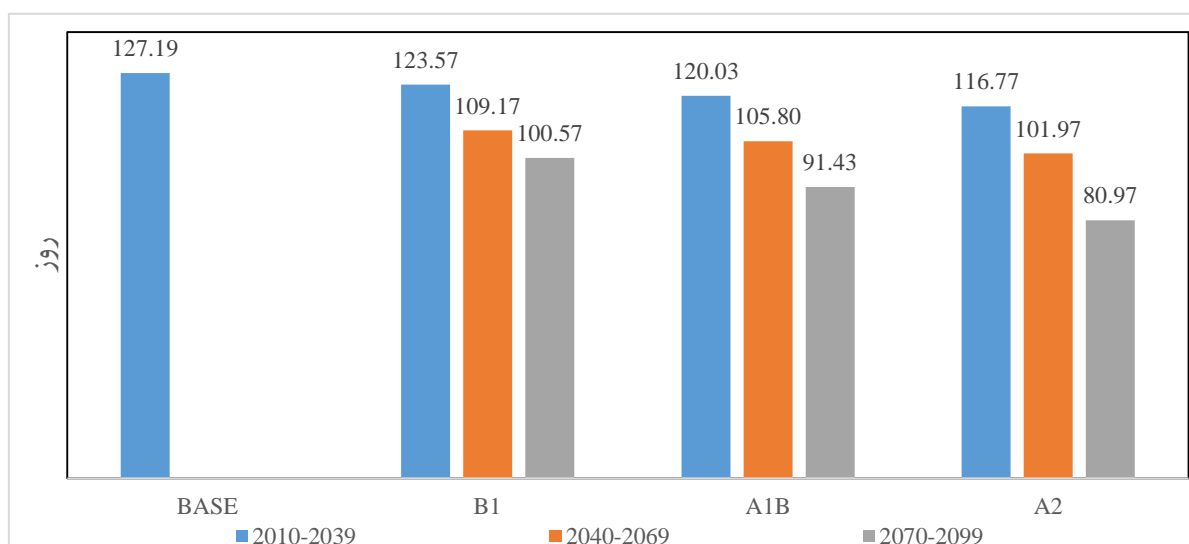
شکل (الف-۱۴) تغییرات شاخص تعداد روزهای بسیار گرم سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد

الف-۴- شاخص تعداد روزهای یخبندان

طبق نمودارهای (الف-۱۵) و (الف-۱۶)، در خوش‌بینانه‌ترین حالت تا سال ۲۱۰۰ تعداد روزهایی که دمای هوای کمینه کمتر از صفر درجه سلسیوس باشد، در ایستگاه کمرخانی ۲۳ روز و در ایستگاه راحت آباد ۲۷ روز کاهش می‌یابد که این کاهش در سناریوی بدبینانه A2، در ایستگاه کمرخانی به ۴۵ روز و در ایستگاه راحت آباد ۴۷ روز می‌رسد.



شکل (الف-۱۵) تغییرات شاخص تغییرات تعداد روزهای یخبندان سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی

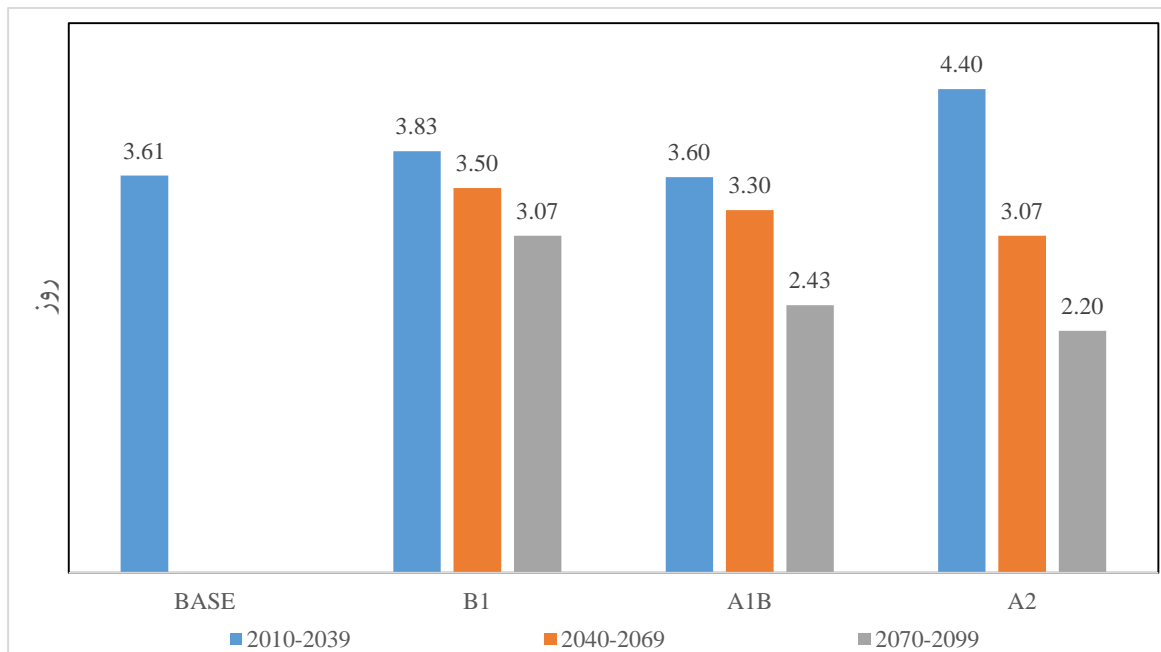


شکل (الف-۱۶) تغییرات شاخص تغییرات تعداد روزهای یخبندان سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد

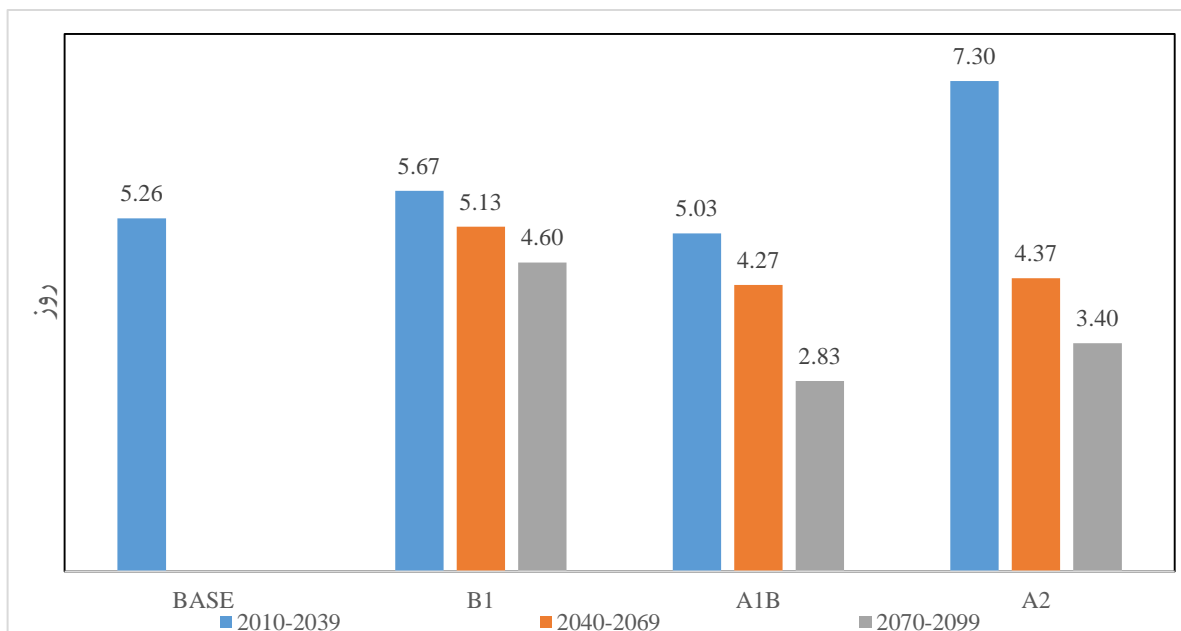
الف-۵- شاخص بارش‌های سهمگین

با توجه به شکل‌های (ت-۱۷) تا (ت-۲۳)، تعداد روزهای دارای بارش سهمگین در هر سال، در تمامی سناریوها و برای اغلب افق‌های زمانی در تمام ایستگاه دارای روند کاهشی می‌باشد به طوری که در بدبینانه‌ترین حالت به طور متوسط در تمامی ایستگاه‌ها تا سال ۲۱۰۰ می‌توان شاهد ۲۵ درصد

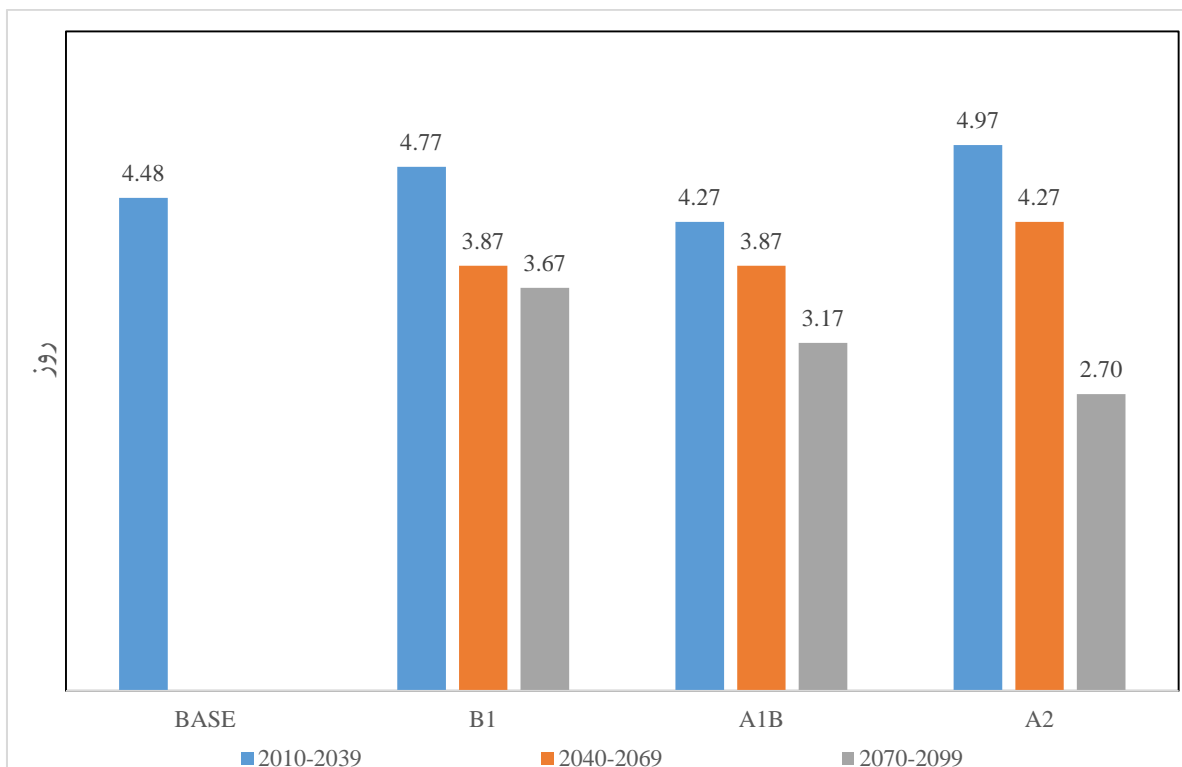
کاهش این شاخص در هر سال باشیم و کمترین میزان کاهش در این حالت مربوط به ایستگاه شمشک با کاهش ۶ درصدی و بیشترین کاهش مربوط به ایستگاه رودک با کاهش ۴۰ درصدی می‌باشد.



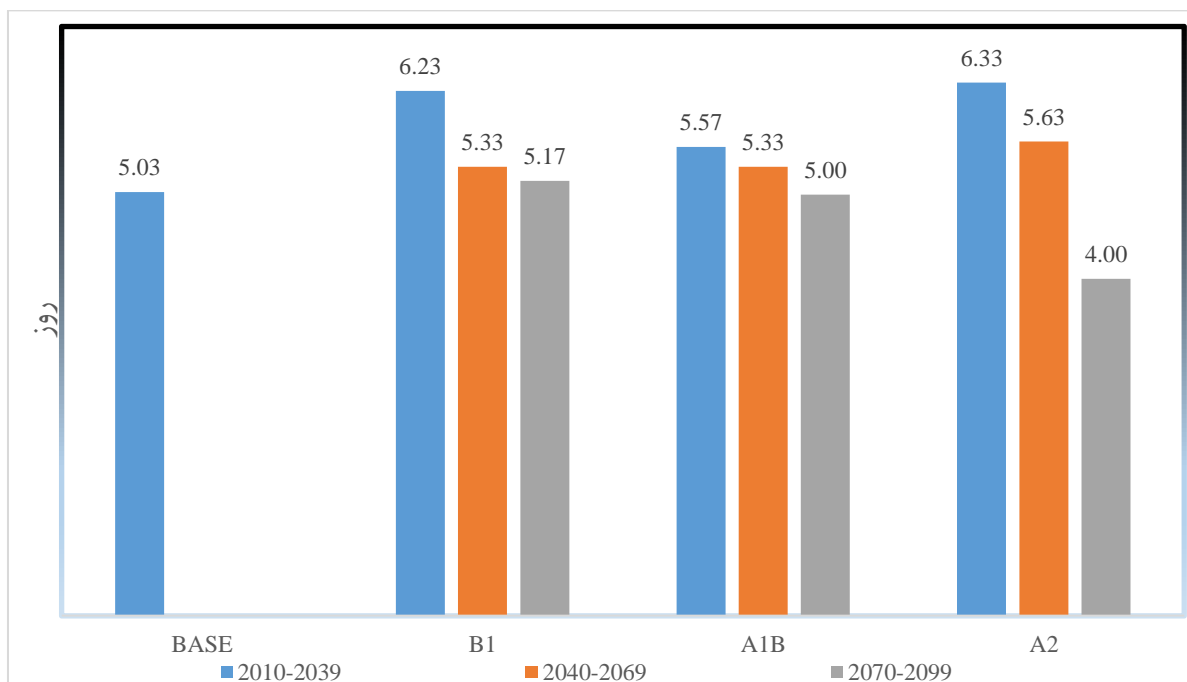
شکل (الف-۱۷) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی



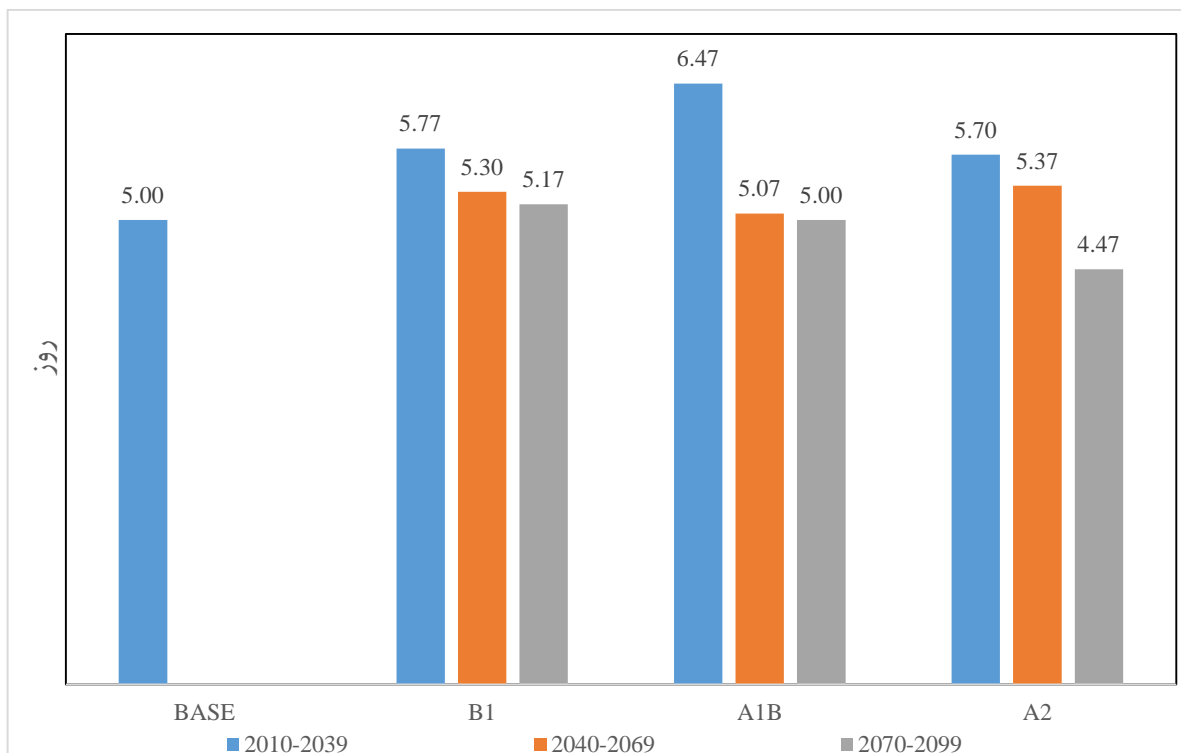
شکل (الف-۱۸) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد



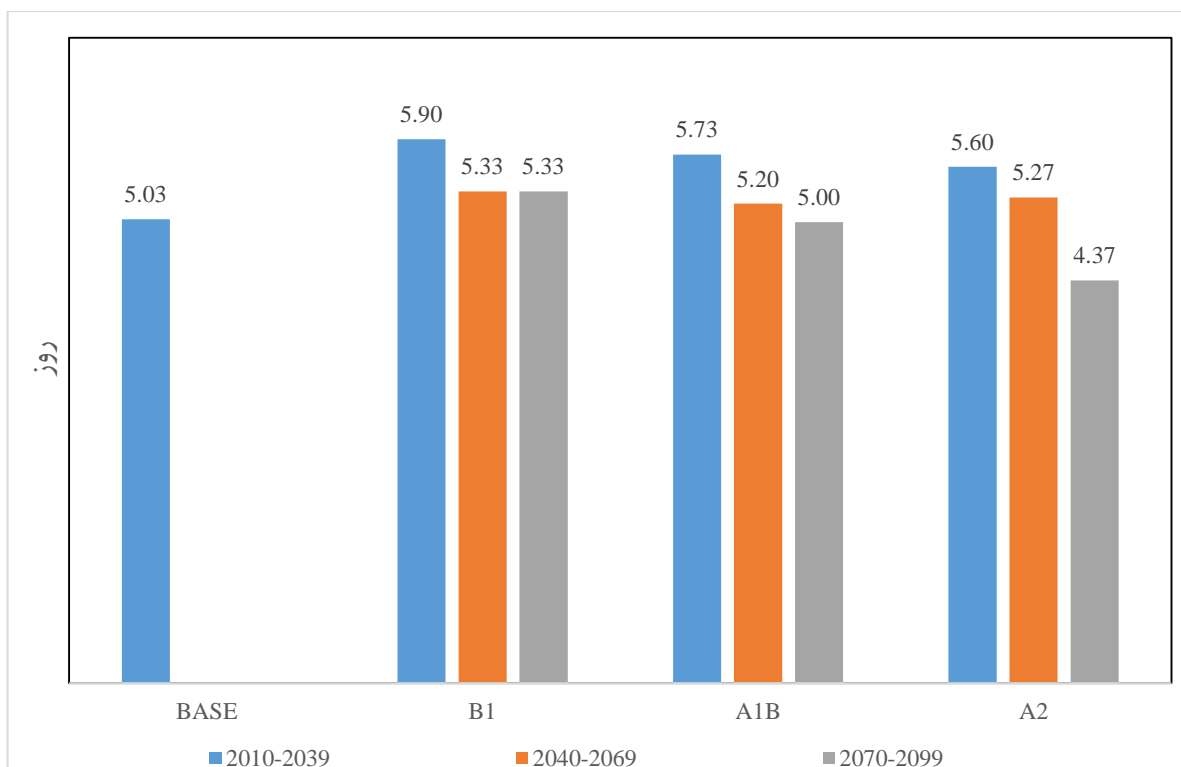
شکل (الف - ۱۹) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودک



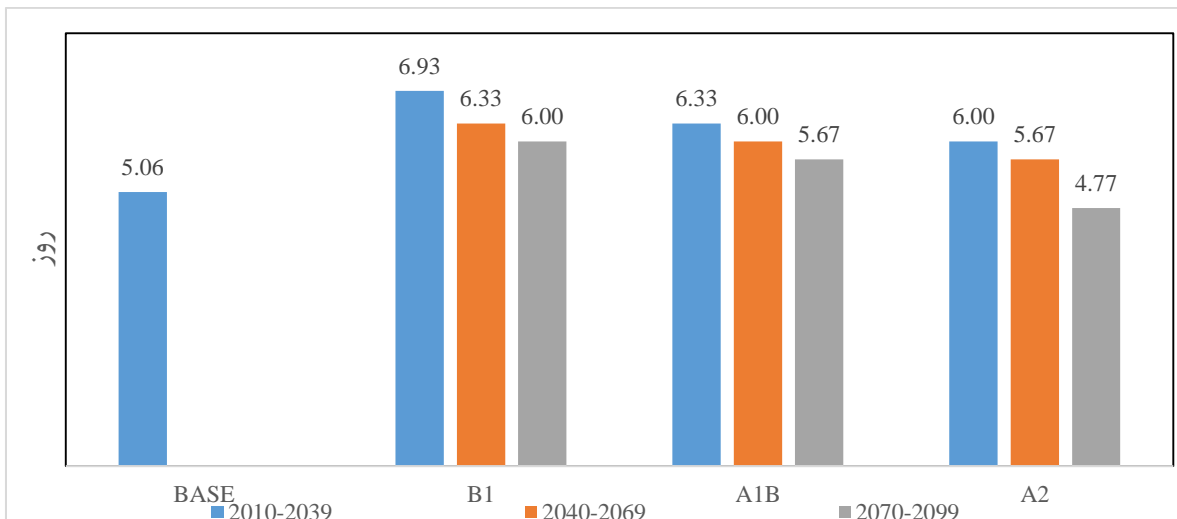
شکل (الف - ۲۰) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودبار قصران



شکل (الف- ۲۱) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه فشم



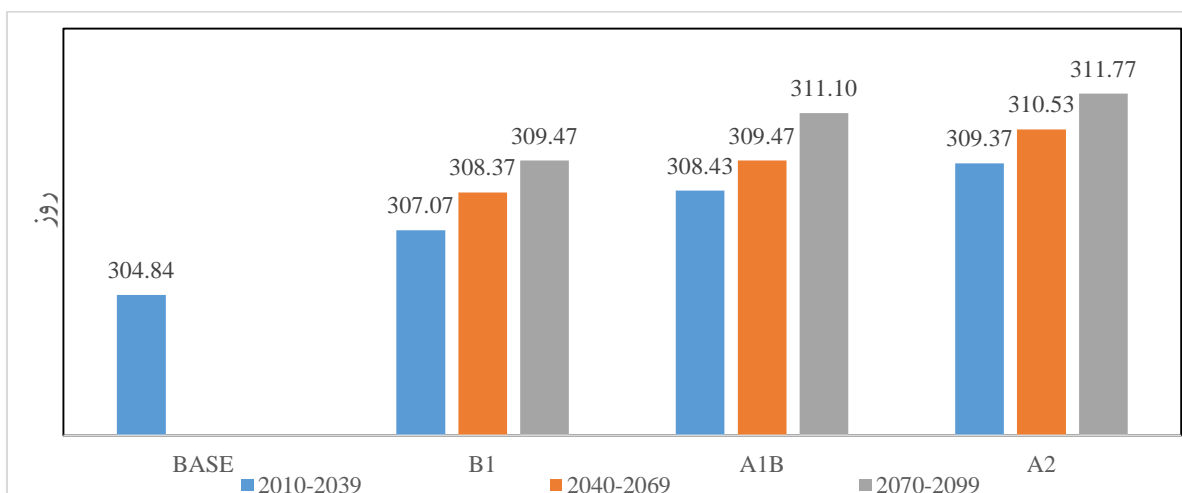
شکل (الف- ۲۲) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه آهار



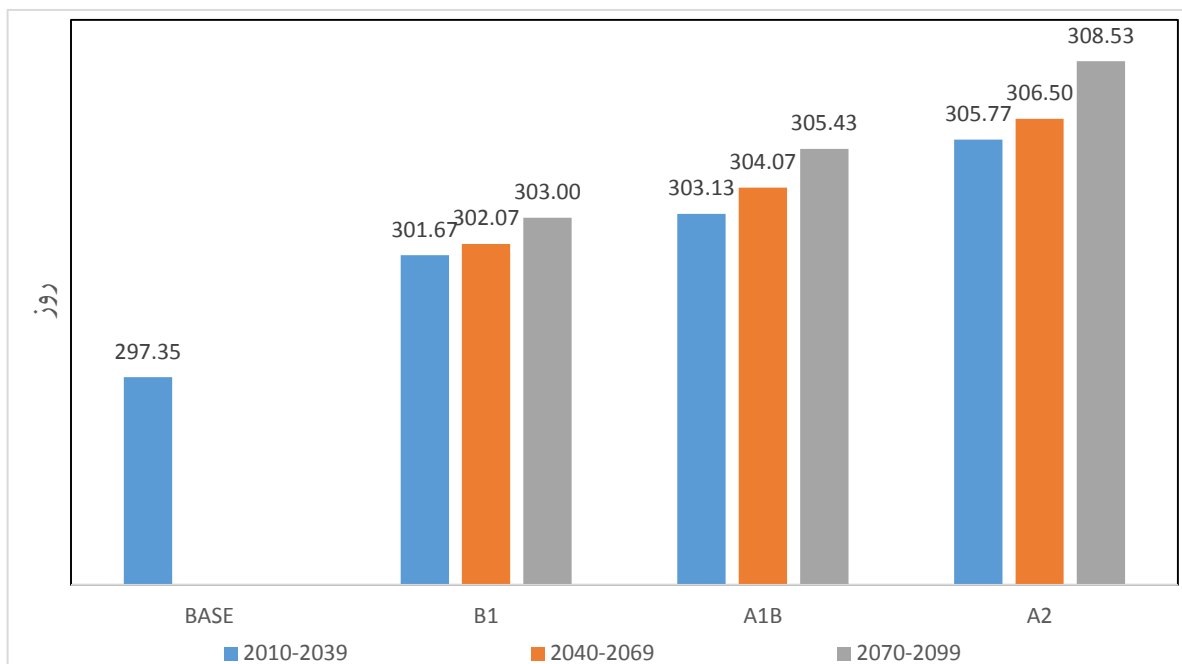
شکل (الف-۲۳) تغییرات شاخص بارش‌های سهمگین سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه شمشک

الف-۶- شاخص تعداد روزهای خشک سالانه

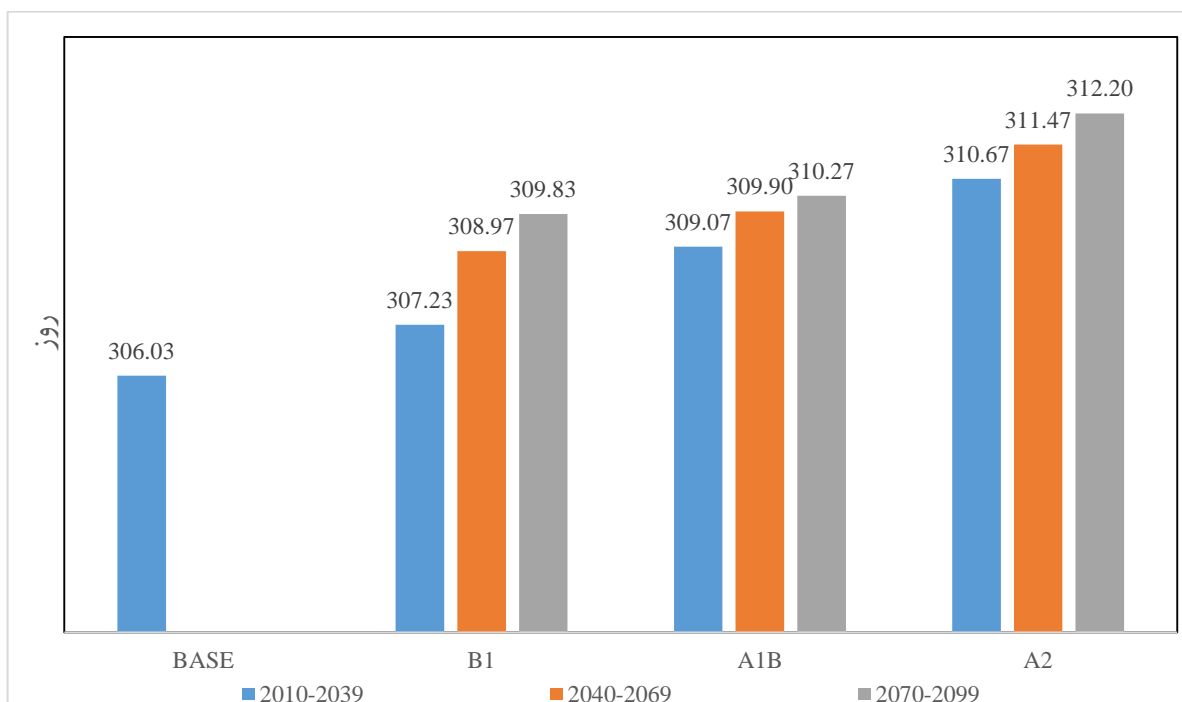
همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل‌های (الف-۲۴) تا (الف-۳۰)، قابل مشاهده است، برعکس شاخص بارش‌های سهمگین که به ترتیب با بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق زمانی، اغلب شاهد کاهش بارش‌های سهمگین بودیم؛ در شاخص تعداد روزهای خشک شاهد افزایش این آمار هستیم.



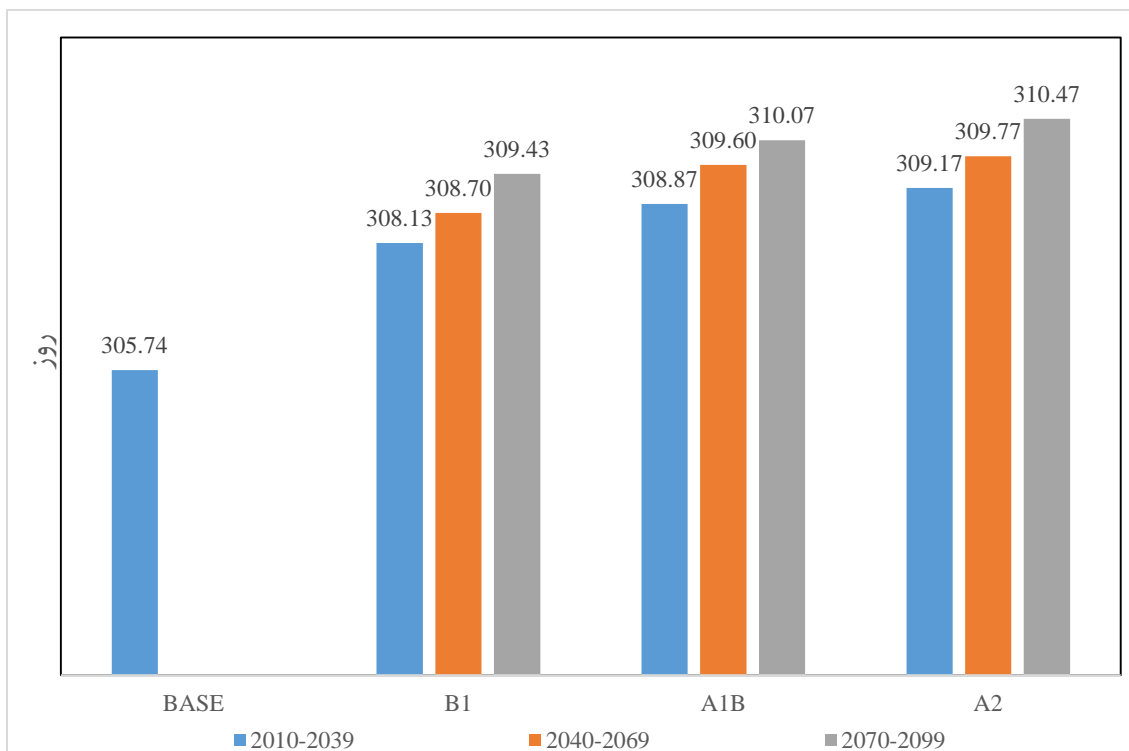
شکل (الف-۲۴) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه کمرخانی



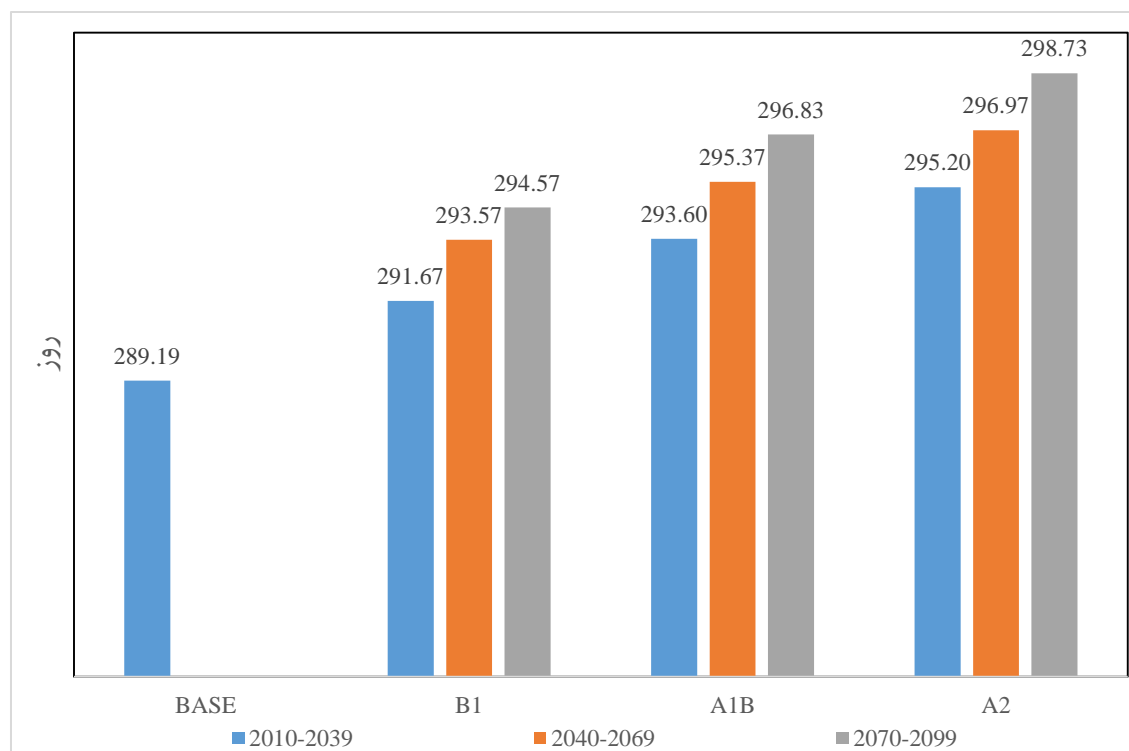
شکل (الف-۲۵) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه راحت آباد



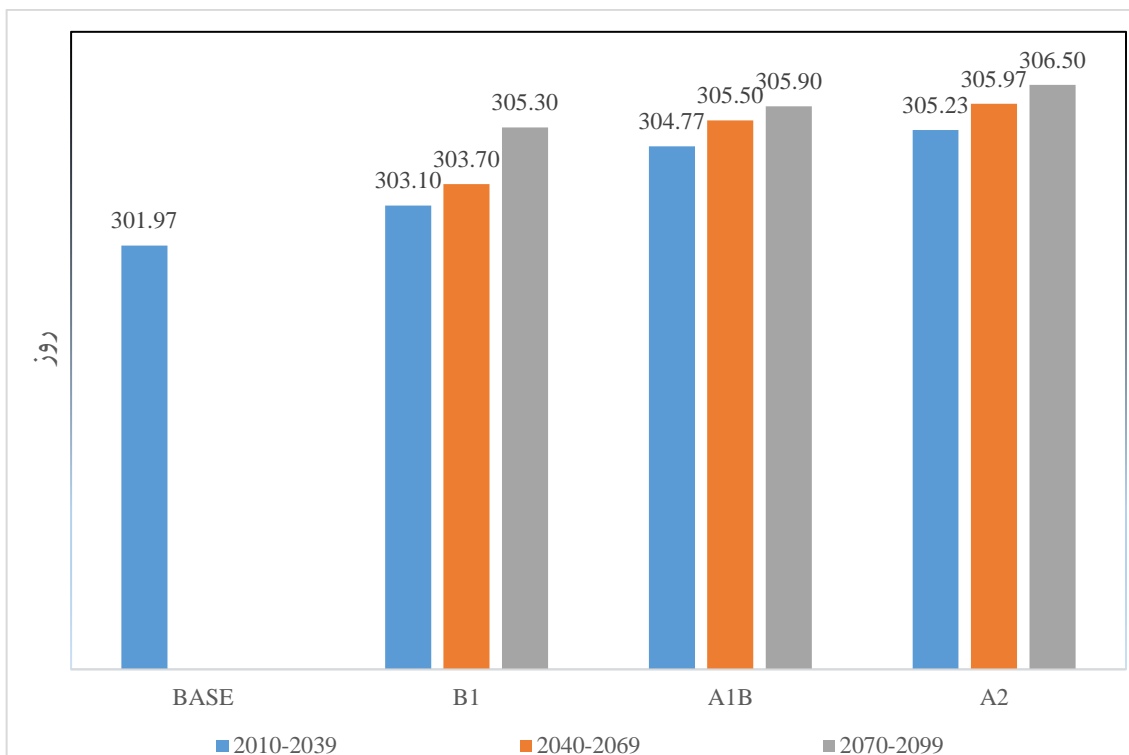
شکل (الف-۲۶) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودک



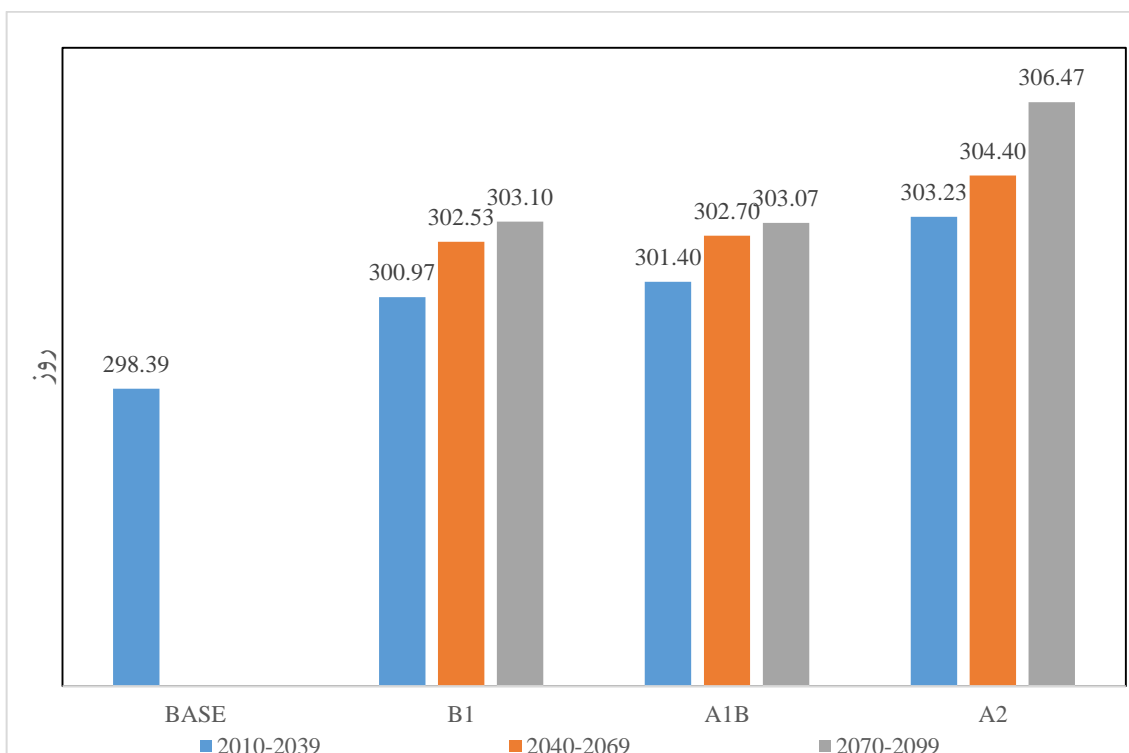
شکل (الف-۲۷) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه رودبار قصران



شکل (الف-۲۸) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه فشم



شکل (الف-۲۹) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه آهار



شکل (الف-۳۰) تغییرات شاخص تعداد روزهای خشک سالانه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه شمشک

شاخص تعداد روزهای خشک با توجه به نمودارهای فوق دارای روندی افزایشی به ترتیب بدبینانه شدن سناریوها و افزایش افق زمانی می باشد، به طوری که انتظار می رود در بدبینانه ترین سناریو (A_2) تا سال ۲۱۰۰ تعداد روزهای خشک سال به طور متوسط در همه ایستگاهها حدود ۹ روز افزایش داشته باشد که این به معنی افزایش ۳ درصدی خشکی با توجه به این شاخص در منطقه می باشد. لازم به ذکر است که این خشکی به لحاظ میزان افزایش حداقل بارش است و تعریف جامعی از خشکی منطقه نیست.

Abstract:

The hydrological cycle has been substantially influenced by climate change and human activities. In this paper, the Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa) hydrologic model was used to investigate the potential impacts of climate change on hydrology of the Jajrood watershed, North Iran. For this purpose, climate data from HadCM3 model was used under three emission scenarios, namely A1B, A2 and B1 for three future periods (2010-2039, 2040-2069, 2070-2099). To downscale climate data, LARS-WG model was employed. Climate change impacts on river runoff were then investigated. The WetSpa model calibration and validation showed reasonable performance of the model with respect to selected performance criteria. Finally, results showed that the mean annual runoff will decrease in all scenarios and future periods: the most reduction in annual runoff is related to the pessimistic scenario A2 in the far future (2070s) while B1 scenario will have the minimum runoff reduction during the near future period (2010s). For the study watershed, climate change will increase the mean monthly runoff to increase with respect to the future periods for all scenarios in the cold months of the year e.g. Jan, Feb, Mar and Dec, while it will decrease for the rest months of the year. In this research the WEAP model was used to simulate the allocation in terms of climate change, how to encounter the needs and water storage changes of Latyan Reservoir was assessed in terms of constant resources. Comparing the status of the reservoir storage to provide percentages for each of the scenarios and time steps due to changes in supply, it will be discovered that when the reservoir is empty, supply percent is less than when, the reservoir storage is higher.

Key words: Climate change, HadCM3, LARS-WG, WetSpa, Resource allocation, WEAP



University of Shahrood

Faculty of Civil Engineering

Department of Water & Environment

**Assessment of water resources allocation scenarios
in climate change conditions
(Case study: Latyan Dam watershed, east of Tehran, Iran)**

Pezhman Yavari

**Supervisors:
Dr. Saeed Golian
Dr. Omid Bozorg Haddad**

**Consulting Supervisor:
Dr. Hossein Zeinivand**

September 2015

