

بررسی تأثیر تغییرات اقلیم آینده بر تغییرات دما، بارندگی و منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی در مناطق خشک (مطالعه موردی: حوضه تهران-کرج)

محسن یوسفی ملک‌شاه^۱، رضا قضاوی^{۲*}، سید جواد ساداتی‌نژاد^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۳. دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۲/۲۵)

چکیده

با توجه به اینکه ایران غالباً در آب و هوای گرم و خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد، ارزیابی و پایش درازمدت شرایط اقلیمی می‌تواند تأثیر درخور توجهی بر مدیریت‌های کلان منابع آب کشور داشته باشد. به این منظور، در پژوهش حاضر ضمن تهیه اطلاعات مورد نیاز از ایستگاه سینوپتیک مهرآباد در حوضه آبخیز تهران-کرج، واقع در استان‌های تهران و البرز، اقدام به پیش‌بینی پارامترهای بارندگی، دمای بیشینه و دمای کمینه، توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و تحت سناریوهای جدید گزارش پنجم (AR5) هیئت بین‌الدول و مدل گردش عمومی CanESM2 شد. سپس، با توجه به خروجی‌های مدل یادشده، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در دوره بازگشت‌های مختلف و برای دوره‌های مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۵) و آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰) استخراج شد. نتایج نشان دادند هرچند، بارندگی زمستانه و تابستانه در دوره‌های (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و (۲۰۵۱-۲۰۸۰) در هر سه سناریو افزایش داشته است، اما در مجموع بارندگی سالانه برای هر سه سناریو و در هر دو دوره کاهش خواهد یافت (به میزان ۶/۱۷، ۸/۰۲ و ۸/۴۸ درصد به ترتیب برای سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و به میزان ۹/۴۳، ۷/۹۸ و ۸/۵۶ درصد طی دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰). به‌رغم اینکه میانگین دمای سالانه تغییرات محسوسی را نسبت به دوره مشاهداتی نشان نداده، اما بررسی تغییرات داده‌های دما در سناریوهای مختلف بیان‌کننده سیر صعودی میانگین دمای سالانه در دوره‌های پیش‌بینی شده است. همچنین، شدت بارندگی در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در هر سه سناریو ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ (دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال و مقیاس‌های زمانی ۰/۱۷، ۰/۳۳، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ ساعت) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۵) کاهش خواهد یافت. به طوری که سناریو ۲/۶ در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و سناریو ۴/۵ در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰، بیشترین کاهش شدت بارندگی را نسبت به دوره مشاهداتی خواهند داشت. اما مقایسه سناریوهای پیش‌بینی شده با یکدیگر (همه دوره بازگشت‌ها و مقیاس‌های زمانی مد نظر) نشان می‌دهد شدت بارندگی به ترتیب در سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و سناریوهای ۴/۵، ۸/۵ و ۲/۶ در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ با شیب ملایمی افزایش خواهد یافت.

کلیدواژگان: تغییرات اقلیم، مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی، مدل گردش عمومی جو، منحنی شدت - مدت - فراوانی.

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های مهمی است که در قرن حاضر بخش‌های مختلف زندگی انسان را تحت تأثیر قرار داده است. [۱]. به طوری که پیش‌بینی و پایش درازمدت شرایط آب و هوایی در هر منطقه می‌تواند راه‌کار مناسبی برای مقابله با عوارض ناگوار تغییرات آب و هوایی، مانند سیل و خشکسالی باشد [۲]. پدیده تغییر اقلیم می‌تواند بر سیستم‌های مختلفی تأثیر بگذارد که سیستم منابع آب، از اصلی‌ترین آنها به شمار می‌آید. طبق گزارش‌های هیئت بین‌الدول^۱، در چند دهه اخیر، تغییر اقلیم سبب ایجاد تغییراتی در شدت، الگوی بارش‌ها و رژیم هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز در سطح جهان، به خصوص در مناطق خشک شده است [۳].

یکی از ابزارهای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی است که استخراج این روابط، کارکرد مهمی در پیش‌بینی احتمالات آینده، تعیین ریسک و افزایش راندمان طراحی دارد [۴]. به طوری که بر این اساس روابط مختلفی در سطح جهان، برای بیان ارتباط میان شدت - مدت - فراوانی بارش‌ها و استخراج این منحنی‌ها ارائه شده است [۵ و ۶].

تغییر در میزان و الگوی بارش‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی می‌تواند سبب تغییر در این روابط شود. بر همین اساس، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی اهمیت دارد و مطالعات متعددی نیز در سطح جهان در این مورد انجام شده است. کارلیر^۱ و همکارانش در تورنتوی کانادا با بررسی اثر گرمایش جهانی بر منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی دریافتند که شدت بارندگی در دوره‌های پیش‌بینی شده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت که این اتفاق با توجه به شرایط جغرافیایی هر منطقه متفاوت است و امری نسبی به شمار می‌آید [۷]. سینگ^۲ و همکارانش در هند با به‌روزرسانی منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی با استفاده از پنج مدل گردش عمومی جو، آثار تغییر اقلیم را بر منحنی‌های یادشده بررسی کردند [۸]. آنها دریافتند که شدت بارندگی در دوره‌های پیش‌بینی شده نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت، به طوری که شدت بارندگی در تمامی دوره بازگشت‌ها با

افزایش سناریوها، افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات راقوان^۳ و همکارانش در ویتنام در بررسی آثار تغییر اقلیم بر منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی با استفاده از روش آماری - دینامیکی، نشان می‌دهد شدت بارندگی کوتاه‌مدت در دوره‌های پیش‌بینی شده افزایش خواهد یافت [۹]. به طوری که در دوره بازگشت‌های مختلف، احتمال سیلاب‌های شدید در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت وجود خواهد داشت. هانوش^۴ بررسی‌هایی را روی مدل تصادفی بارندگی و زنجیره مارکوف برای منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی انجام داد که نتایج بیان‌کننده موفقیت‌آمیز بودن روش یادشده در ایستگاه مشاهداتی مد نظر و در محدوده زمانی ۶ دقیقه تا ۷۲ ساعت بوده است [۱۰]. همچنین، آنها پی بردند که بارش‌های ناگهانی شهری موجب افزایش شدت بارش طی مدت زمان مطالعه شده می‌شود. میلهات^۵ در جنوب کبک با بررسی مدل‌های گردش عمومی منطقه‌ای کانادایی (CRCM) توانست منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی بارندگی را برای سال‌های مد نظر و برای زمان‌های دو، شش، ۱۲ و ۲۴ ساعت ارائه کند [۱۱]. دسترامات^۶ در منطقه کبک کانادا ضمن محاسبه رگر طرح برای اقلیم آینده، منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی را تحت سناریوهای مختلف استخراج کرد و دریافت که بر اساس تجزیه و تحلیل منطقه‌ای حداکثر بارندگی، امکان برآورد منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی برای ایستگاه‌های بدون آمار نیز وجود دارد [۱۲].

از طرفی، تغییر در الگوی بارش‌ها تحت تأثیر اقلیم سبب تغییر در میزان و شدت رواناب‌ها و در نهایت، تغییر در الگوی سیلاب‌ها خواهد شد که مطالعات محققان نیز این تأثیرات را برای نقاط مختلف جهان نشان داده است. وزیری در ایران رابطه منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی را برای ۱۳۶ ایستگاه باران‌سنجی استخراج کرد [۱۳]. حیدری و همکارانش در غرب حوضه آبریز گرگان‌رود با تحقیقاتی روی منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی و مدل‌های توزیع زمانی بارندگی دریافتند که بیشینه بارندگی روزانه در دوره بازگشت‌های مختلف با بیشینه بارندگی t ساعته منطقه رابطه مستقیم دارد [۱۴]. بختیاری و همکارانش در بررسی اثر تغییر اقلیم بر منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی بارندگی ایستگاه بابلسر

3. Raghavan
4. Hanush
5. Mailhot
6. Desramaut

1. Carlier
2. Singh

سنیوپتیک کشور، آثار تغییر اقلیم را بر بارندگی و دمای مناطق مختلف ایران تحت مدل ECHO-G و سناریوی A1 بررسی کردند [۲۲]. آنها دریافتند که بارندگی با کاهش ۹ درصدی و میانگین دمای سالانه با افزایش ۰/۵ درجه‌ای مواجه خواهد شد. پورمحمدی و همکارانش با بررسی آثار تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه حوضه آبریز تویسرکان همدان دریافتند که بر اثر کاهش بارندگی ناشی از تغییرات اقلیمی، حجم رواناب خروجی هر یک از زیرحوضه‌ها کاهش خواهد یافت [۲۳]. قربانی و همکارانش ضمن مطالعه بر تغییرات دبی ماهانه رودخانه در حوضه آبریز گالیکش دریافتند که دمای هوا در ماه‌های مختلف سال افزایش و مجموع بارندگی سالانه کاهش خواهد یافت [۲۴].

بررسی نتایج مطالعات مختلف در سطح جهان نشان می‌دهد تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات بارش، دما و منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی در نقاط مختلف جهان متفاوت بوده و در عین حال مطالعات کمتری در مورد این تغییرات در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان انجام شده است. از طرفی، با تغییر شرایط زیست‌محیطی در سطح جهان، سناریوهای اقلیمی جدیدی ارائه شده که پیش‌بینی‌های متفاوتی از تغییرات اقلیمی آینده ارائه می‌دهد. بر این اساس هدف از تحقیق حاضر، پیش‌بینی تغییرات الگوهای ماهانه، فصلی و سالانه دما، بارندگی و الگوهای شدت - مدت - فراوانی بارندگی‌ها تحت سناریوهای جدید اقلیمی در حوضه تهران - کرج به عنوان یک منطقه خشک است.

در تحقیق حاضر ضمن بررسی وضعیت اقلیم منطقه مطالعه شده در دوره‌های پیش‌بینی شده نسبت به دوره مشاهداتی، الگوی زمانی بارش، دما، شدت، مدت و تداوم رگبارها در دوره بازگشت‌های مختلف تحت تأثیر شرایط اقلیمی بررسی شده است. با توجه به بحران منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور و قرارگرفتن منطقه مطالعه شده در اقلیم خشک، ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم و پیامدهای احتمالی آن بر چرخه هیدرولوژیکی منطقه، تأثیر درخت‌توجهی در مدیریت و پایش درازمدت منابع آبی کشور خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز تهران - کرج در استان تهران و البرز، با

نتیجه گرفتند که شدت بارندگی پیش‌بینی شده نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت [۱۵]. همچنین، بارندگی ماهانه پیش‌بینی شده نسبت به بارندگی مشاهداتی در بهار و تابستان کاهش و در پاییز و زمستان افزایش داشته است. اشرف و همکارانش در خراسان رضوی با پیش‌بینی تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی تحت مدل HadCM ۳ و سه سناریوی A2، A1B، B1 دریافتند که دما و میزان بارش (در سه فصل پاییز، زمستان و بهار در تمام شهرستان‌ها به جز تربت جام) در هر سه سناریو افزایش خواهد یافت [۱۶].

کریستنسن^۱ و همکارانش تأثیر تغییر اقلیم را بر دما، بارندگی و رواناب رودخانه کلرادو بررسی کردند [۱۷]. آنها دریافتند که بارندگی و رواناب در دوره آتی، نسبت به دوره پایه کاهش یافته و دما افزایش خواهد یافت. آلیسون^۲ و همکارانش با مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر وضعیت تناوب سیلاب تحت خروجی‌های مدل RM3H RC HAD و سناریوی انتشار A2 در حوضه‌های کشور انگلستان دریافتند که به‌رغم کاهش متوسط بارندگی سالانه در بیشتر دوره بازگشت‌ها، تناوب سیلاب‌ها افزایش یافته است [۱۸]. استیل^۳ و همکارانش در ایرلند، تأثیر تغییر اقلیم را بر مقادیر رواناب و بارندگی بررسی کردند [۲]. نتایج پژوهش آنها نشان داد بارندگی زمستانه و تابستانه به‌ترتیب افزایش و کاهش دارند.

مطالعات سویگنت^۴ و همکارانش در شیلی با مدل اقلیمی اقلیمی HadCm3 و سناریوهای B2 و A2 برای یک دوره ۶۰ ساله بیان‌کننده افزایش دما، کاهش بارندگی و تغییرپذیری زیاد رواناب سالانه بود [۱۹]. بویج^۵ و همکارانش با مطالعه روی رودخانه نیل دریافتند که تغییر اقلیم با اثرگذاری بر دما، بارندگی و تبخیر و تعرق، به میزان درخور توجهی جریان رودخانه را در آینده تغییر خواهد داد [۲۰]. مساح بوانی و مرید در حوضه رودخانه زاینده‌رود آثار تغییر اقلیم را بر دما، بارندگی و رواناب تحت مدل HadCM3 و سناریوهای A2 و B2 بررسی کردند [۲۱]. نتایج تحقیق آنها بیان‌کننده کاهش بارندگی به میزان ۱۰ و ۱۶ درصد و افزایش دما به میزان ۶/۴ تا ۲/۳ درجه سانتی‌گراد و کاهش رواناب به میزان ۸/۵ درصد در آینده بود. باباییان و همکارانش با مطالعه روی ۴۳ ایستگاه

1. Christensen
2. Alison
3. Steele
4. Souvignet
5. Booij

از مهم‌ترین مدل‌های مد نظر در این زمینه، مدل‌های معروف به گردش عمومی جو^۱ (GCM) است [۲۲]. با توجه به اینکه در گزارش پنجم هواشناسی، سناریوهای جدید انتشار صرفاً تحت مدل CanESM2 تعریف شده‌اند، بنابراین در تحقیق پیش رو از مدل یادشده تحت سه سناریوی ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ به عنوان سناریوهای خوشبینانه، بینابینی و بدبینانه استفاده شد. CanESM2 نوعی مدل جامع و جفت‌شده و جزء چهارمین نسل از مدل‌های گردش عمومی جفت‌شده (CGCM4) و سری مدل‌های (Coupled Model Intercomparison Project) Phase 5) CMIP5 و گزارش پنجم^۲ (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۳ است [۲۵]. با توجه به اینکه متغیرهای پیش‌بینی‌کننده اطلاعات مربوط به حالت بزرگ‌مقیاس جو را فراهم می‌کنند؛ بنابراین ریزمقیاس‌نمایی داده‌های جو در مقیاس نقطه‌ای- محلی ضروری است. در مطالعه حاضر از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM استفاده شد. جدول ۱ خصوصیات سناریوهای جدید انتشار برای مدل CanESM2 را نشان می‌دهد.

مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM

در تحقیق حاضر از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM تحت سناریوهای جدید انتشار استفاده شد. این مدل روابط آماری بین رفتارهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و محلی (پیش‌بینی‌شونده‌ها) را براساس روش رگرسیون خطی چندگانه برقرار می‌کند. این ارتباطات با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه و برون‌داده‌های (خروجی) مدل‌های گردش عمومی در دوره مشابه دیده‌بانی ایجاد می‌شوند. داده‌های ورودی به مدل یادشده شامل داده‌های محلی بارندگی روزانه، دمای بیشینه و دمای کمینه برای ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران و داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) یا NCEP هستند.

ارزیابی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM

برای ارزیابی کارایی مدل از ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NSE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. شاخص نش- ساتکلیف نشان‌دهنده اهمیت نسبی واریانس مقادیر شبیه‌سازی‌شده در قیاس با واریانس

مساحت ۵۱۵۴/۲ کیلومترمربع و مختصات جغرافیایی ۳۵/۱۰ درجه عرض جنوبی تا ۳۶/۱۷ درجه عرض شمالی و ۵۰/۷۲ درجه طول غربی تا ۵۱/۶۹ درجه طول شرقی در مرکز ایران واقع شده است. آب و هوای این منطقه براساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه جزء منطقه خشک و سرد بوده و میزان بارندگی سالانه آن حدود ۲۳۶/۲۷ میلی‌متر (طی دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۱۵) است که ۳۸/۳۲ درصد از بارش‌ها در بهار، ۲/۸۰ درصد در تابستان، ۱۷/۷۷ درصد در پاییز و ۴۱/۰۹ درصد از آن در زمستان اتفاق می‌افتد. میانگین سالانه دمای منطقه برابر ۱۸/۲۵ درجه سانتی‌گراد بوده و بیشترین دمای ماهانه منطقه، در تیرماه برابر ۳۰/۹۳ درجه سانتی‌گراد و کمترین دمای ماهانه آن در دی‌ماه برابر ۴/۷۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه‌شده را در استان‌های تهران و کرج در ایران نشان می‌دهد.

روش تحقیق

بررسی تغییرات الگوهای ماهانه، فصلی و سالانه دما و بارندگی

در ابتدای مطالعات حاضر، به جمع‌آوری، بازسازی و آنالیز کمی و کیفی داده‌های بارندگی روزانه، دمای کمینه و دمای بیشینه از ایستگاه سینوپتیک مهرآباد اقدام شد. داده‌های یادشده از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ به عنوان داده‌های مشاهداتی و سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۱ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ به عنوان داده‌های دوره هدف، برای پیش‌بینی پارامترهای بارندگی و دما انتخاب شدند. سپس، به پیش‌بینی داده‌های هواشناسی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM (Statistical Downscaling Model) در دوره‌های مد نظر اقدام شد.

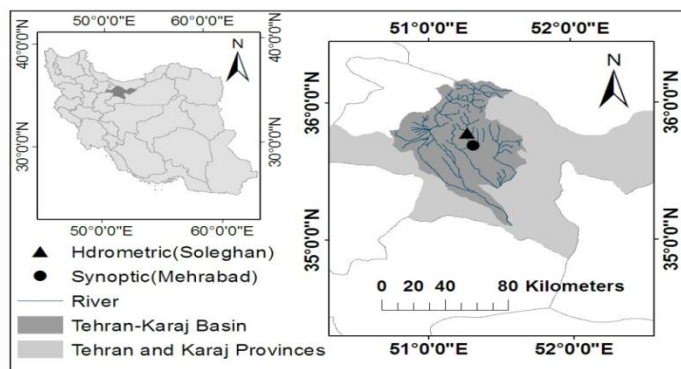
تعیین مدل گردش عمومی جو (GCM) و سناریوهای انتشار

مدل‌های اقلیمی بر اساس نوع و دقت آنها دسته‌بندی می‌شوند. از آنجا که مدل‌های بزرگ‌مقیاس کلی هستند و تغییرات عمومی را نشان می‌دهند، استفاده از مدل‌های کوچک‌مقیاس برای کاربردهای منطقه‌ای و تبدیل نتایج مدل‌های بزرگ‌مقیاس به پدیده‌های منطقه‌ای لازم است.

1. General Circulation Model (GCM)

2. Fifth Assessment Report (AR5)

3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه‌شده در ایران و تهران

جدول ۱. خصوصیات سناریوهای جدید انتشار

سناریوی انتشار	ویژگی
RCP2.6	کمترین میزان افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ وات بر مترمربع می‌رسد. سپس، کاهش می‌یابد و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی، باید گازهای گلخانه‌ای به میزان درخور توجهی کاهش یابند.
RCP4.5	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.
RCP8.5	بدون به‌کارگیری هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر این سناریوی انتشار پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این تغییرات به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ منجر می‌شود. در این هنگام غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ PPM می‌رسد و همچنان تغییرات افزایش خواهد داشت.

تعیین نوع اقلیم منطقه مطالعه شده در دوره های پیش‌بینی شده

بررسی تأثیر تغییرات اقلیم بر پارامترهای دما، بارندگی و شدت آن در دوره‌های پیش‌بینی شده، مبتنی بر ضرورت وقوع تغییر اقلیم در منطقه مطالعه شده است. به این منظور، با استفاده از داده‌های بارندگی و دمای بیشینه و کمینه پیش‌بینی شده توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و مقادیر اندازه‌گیری شده بارش و دمای بیشینه و کمینه در ایستگاه‌های مشاهده‌ای، ضریب رطوبتی آمبرژه محاسبه و نوع اقلیم مربوط به آنها با توجه به اقلیم‌نمای آمبرژه (شکل ۲) تعیین و با یکدیگر مقایسه شد. رابطه ۳ ضریب رطوبتی آمبرژه را نشان می‌دهد. در این رابطه، Q_2 ضریب رطوبتی آمبرژه، P میانگین بارش سالانه (میلی‌متر)، M میانگین بیشترین دما در گرم‌ترین ماه سال (کلوین) و m میانگین کمترین دما در سردترین ماه سال (کلوین) است. در اقلیم‌نمای آمبرژه، محور افقی میانگین کمترین دما در سردترین ماه سال بر حسب درجه سانتی‌گراد است.

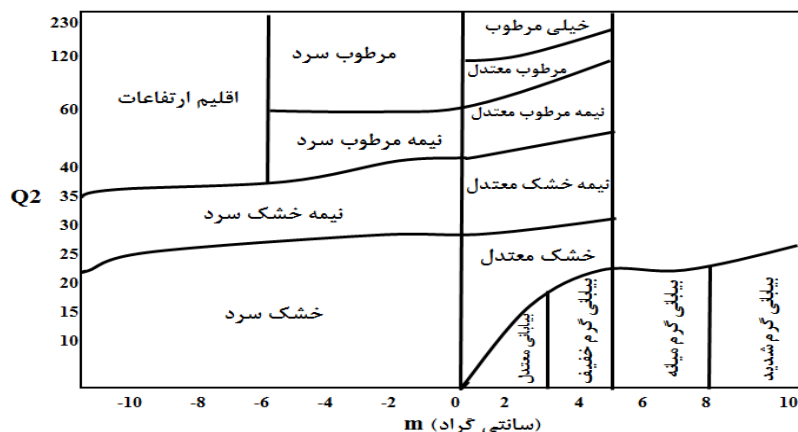
$$Q_2 = \frac{2000 \cdot P}{M^2 - m^2} \quad (3)$$

داده‌های مشاهده‌ای است [۲۶]. در این شاخص اگر مقدار مد نظر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، نتایج رضایت‌بخش بوده، و اگر بیشتر از ۰/۷۵ باشد، نتایج خوب است. اگر مقدار مد نظر برابر یک باشد، نشان‌دهنده تناسب کامل میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است [۲۷]. $RMSE$ مجذور میانگین مربعات خطاست که بیان‌کننده درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر واقعی است. در این شاخص هرچه مقدار مد نظر به صفر نزدیک‌تر باشد، ایده‌آل‌تر است [۲۸]. روابط ۱ و ۲ شاخص‌های یادشده را نشان می‌دهند.

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_s - x_o)^2}{n}} \quad (1)$$

$$NSE(EI) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_s)^2}{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2} \quad (2)$$

در روابط یادشده x_s داده‌های شبیه‌سازی شده، x_o داده‌های مشاهده‌ای، \bar{x}_o میانگین داده‌های مشاهده‌ای و n تعداد داده‌هاست.



شکل ۲. اقلیم نمای آمبرژه

جدول ۲. ضرایب ثابت رابطه ۴ برای نسبت‌های DDR ایران [۳۱]

مدت تداوم باران (ساعت)	A	B
$1 \geq$	۰/۱۲۹۹	۰/۴۹۵۲
$2 \geq$	۰/۱۳۷۲	۰/۴۷۷۸
$9 \geq$	۰/۱۵۸۹	۰/۴۳۶۱
$2 < t \leq 9$	۰/۲۰۰۹	۰/۳۹۳۷

جدول ۳. ضرایب ثابت رابطه ۵ [۳۱]

محدوده تداوم باران (ساعت)		
پارامتر	≥ 2	> 2
a1	۰/۴۶۰۸	۰/۵۵۶۵
a2	۰/۲۳۴۹	۰/۱۹۴۸
a3	۰/۶۲	۰/۸

با توجه به داده‌های بارندگی و دمای کمینه و بیشینه ایستگاه سینوپتیک مهرآباد در دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۵) و داده‌های خروجی از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM برای دوره‌های پیش‌بینی‌شده (۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۲۱-۲۰۵۰)، اقدام به استخراج منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی (IDF) با استفاده از روش قهرمان و آبخضر [۳۱] شد. استفاده از این رابطه مستلزم محاسبه بیشینه بارندگی ۲۴ ساعته به عنوان پارامتر کلیدی رابطه یادشده است. به این منظور، مقادیر بیشینه بارندگی روزانه اتفاق افتاده طی هر سال برای دوره مشاهداتی و دوره پیش‌بینی‌شده به دست آمد و سپس میانگین آنها طی ۳۰ سال آماری محاسبه شد. در ادامه، با توجه به مقادیر بیشینه بارندگی ۲۴ ساعته در هر دوره آماری، مقادیر بارندگی یک‌ساعته ده‌ساله محاسبه شد. سپس، شدت

بررسی تغییرات الگوهای شدت - مدت - فراوانی بارندگی‌ها

بررسی تغییرات الگوهای شدت بارندگی در دوره بازگشت‌های معین مستلزم استخراج منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی است. در صورت وجود باران سنج ثبات می‌توان با تحلیل فراوانی سری شدت‌های بارندگی در تداوم مد نظر منحنی‌های یادشده را تهیه کرد. روش معمول برای مطالعات منطقه‌ای شدت - مدت - فراوانی بارندگی‌ها، روش بل [۵] است که این رابطه توسط قهرمان و همکارانش [۲۹-۳۲] در ایران ارتقا داده شده است.

در تحقیق حاضر برای استخراج منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی (IDF) از آخرین روابط ارتقا داده‌شده توسط قهرمان و آبخضر [۳۱] استفاده شد. با توجه به اینکه ارائه روابط یادشده مبتنی بر تقسیم‌بندی اقلیمی است و براساس آن، ایستگاه سینوپتیک مهرآباد در منطقه شمالی ایران قرار می‌گیرد. بنابراین، شدت بارندگی در دوره بازگشت‌های مختلف از روابط ۴ و ۵ پیروی می‌کند. ضرایب ثابت اصلاح‌شده برای روابط یادشده در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

$$R_t^T = At^B [a_1 + a_2 \ln(T - a_3)] R_{t, \text{ref}}^T \quad (4)$$

$$R_{t, \text{ref}}^T = 9/99 + 0/212 (R_{t, \text{ref}}^T) \quad (5)$$

که در R_{60}^{10} شدت بارش یک‌ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال، R_{1440}^2 میانگین بیشینه باران روزانه، t دوره زمانی مد نظر، T دوره بازگشت و A, B, a_1, a_2, a_3 ضرایب ثابت معادله هستند.

مشاهداتی و محاسباتی برای پارامترهای بارندگی، دمای بیشینه و دمای کمینه (مرحله واسنجی و صحت‌سنجی) به شرح جدول ۴ است. نتایج نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای پارامترهای دمای بیشینه و دمای کمینه و همبستگی رضایت‌بخش برای پارامتر بارندگی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان خطای مقادیر شبیه‌سازی‌شده در بارندگی بیشتر از دمای بیشینه و کمینه است. این اختلاف به علت تغییرپذیری و نرمال نبودن داده‌های بارندگی قابل توجیه است.

بارندگی در هر یک از مقیاس‌های زمانی ۰/۱۷، ۰/۳۳، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، ۰/۱۲، ۰/۱۶، ۰/۲۰ و ۰/۲۴ ساعته، با در نظر گرفتن ضرایب ثابت مندرج در جدول‌های ۲ و ۳ و دوره بازگشت‌های منتخب ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ساله و بارندگی یک‌ساعته ده‌ساله به دست آمد.

نتایج و بحث

ارزیابی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM

مقادیر ضریب تعیین (R^2)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) میان داده‌های

جدول ۴. ضرایب کارایی مدل SDSM برای پارامترهای بارندگی، دمای بیشینه و دمای کمینه

مرحله	بارندگی			دمای حداکثر			دمای حداقل		
	R^2	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE
واسنجی	۰/۹۸	۰/۲۹	۰/۶۸	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۹۹
صحت‌سنجی	۰/۶۶	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۹۹	۱/۱۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۲۸	۰/۹۹

۲۱/۶۵، ۲۵/۸۸ و ۴۰/۱۳ درصد و در پاییز برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ میزان کاهش به ترتیب برابر ۲۶/۲۵، ۲۵/۳۰ و ۲۴/۱۶ و برای دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ به میزان ۲۱/۶۵، ۲۵/۰۶ و ۱۹/۳۳ درصد).

میانگین بارندگی ماهانه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مشاهداتی در ماه‌های فوریه، مارس (سناریوهای ۲/۶ و ۴/۵)، ژوئیه و دسامبر (سناریوهای ۲/۶ و ۸/۵) افزایش و در سایر ماه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، میانگین بارندگی ماهانه در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره مشاهداتی در ماه‌های ژانویه (سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵)، فوریه، ژوئیه، نوامبر (سناریوی ۸/۵) و دسامبر (سناریوی ۴/۵ و ۸/۵) افزایش و در سایر ماه‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۳ a، ۳ b). کریستنس و همکارانش [۱۷] در کلرادو آمریکا، آلیسون و همکارانش [۱۸] در انگلستان، سویگنت و همکارانش [۱۹] در شیلی، مساح بوانی و مرید [۲۱] و باباییان و همکارانش [۲۲] در ایران نیز کاهش بارش‌ها تحت سناریوهای A1، A2 و B2 را برای مناطق مطالعه‌شده نشان داده‌اند، ولی این نتایج با مطالعات اشرف و همکارانش [۱۶] در ایران مبنی بر افزایش میزان بارش‌های آتی، انطباق ندارد.

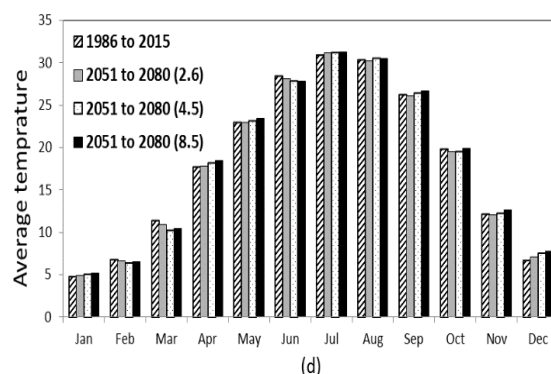
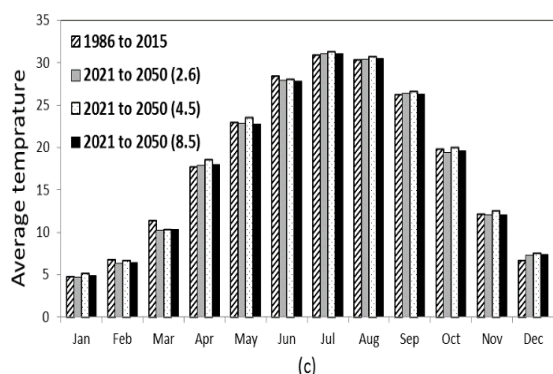
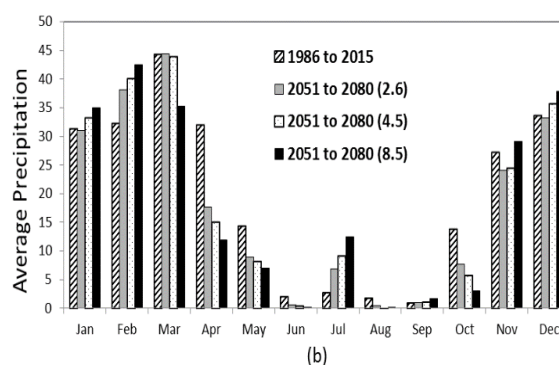
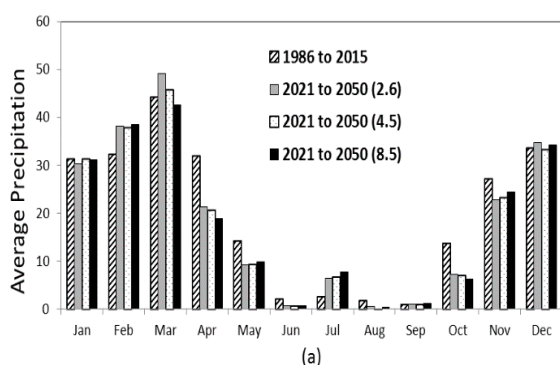
تغییرات دمای ماهانه دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه در شکل‌های ۳ d و ۳ c و در جدول ۶ نشان داده شده است.

تأثیر تغییرات اقلیمی بر دما و بارندگی

مقادیر دما و بارندگی ماهانه، فصلی و سالانه پیش‌بینی‌شده تحت سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ در دو دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است. با توجه به نتایج یادشده، بارندگی، تغییرات قابل تأملی نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) داشته است. به طوری که میانگین بارندگی سالانه نسبت به دوره مشاهداتی برای دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب به میزان ۶/۱۷، ۸/۰۲ و ۸/۴۸ درصد و برای ۲۰۵۱-۲۰۸۰ به میزان ۹/۴۳، ۷/۹۸ و ۸/۵۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، میانگین بارندگی فصلی نسبت به دوره مشاهداتی، در تابستان و زمستان، افزایش می‌یابد (در تابستان برای سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ترتیب به میزان ۱۶/۱۲، ۱۶/۰۳ و ۱۷/۰۳ و ۳۳/۲۲ و طی دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ به میزان ۱۸/۶۱، ۵۰/۳۲ و ۹۲/۰۷ درصد و در زمستان برای سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ترتیب به میزان ۶/۵۲، ۵/۵۰ و ۷/۲۹ و در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ به میزان ۵/۳۷، ۱۲/۵ و ۱۸/۷۰ درصد). ولی در بهار و پاییز میزان بارش‌ها کاهش خواهد یافت (در بهار برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ترتیب به میزان ۱۲/۰۷، ۱۶/۳۲ و ۲۱/۱۴ تحت سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ و برای ۲۰۵۱-۲۰۸۰ به میزان

۲۰۵۱-۲۰۸۰ در بهار و پاییز) خواهد بود. میانگین دمای ماهانه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مشاهداتی در ماه‌های ژانویه (سناریوی ۲/۶)، فوریه، مارس، می، ژوئن، اکتبر (سناریوهای ۲/۶ و ۸/۵) و نوامبر (سناریوهای ۲/۶ و ۸/۵) با اختلاف کمی کاهش و در سایر ماه‌ها با اختلاف ناچیزی افزایش خواهد یافت. همچنین، در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره مشاهداتی در ماه‌های فوریه، مارس، ژوئن، آگوست (سناریوی ۲/۶)، سپتامبر (سناریوی ۲/۶)، اکتبر (سناریوهای ۲/۶ و ۴/۵) و نوامبر (سناریوی ۲/۶) شاهد کاهش میانگین دمای ماهانه و در سایر ماه‌ها نیز شاهد افزایش ناچیز آن خواهیم بود. افزایش میزان دما در سال‌های آتی نیز به وسیله اشرف و همکارانش [۱۶]، مساح بوانی و همکارانش [۲۱]، باباییان و همکارانش [۲۲]، قربانی و همکارانش [۲۴] در ایران و همچنین کریستنس و همکارانش [۱۷] در امریکا، سویگنت و همکارانش [۱۹] در شیلی و بویج و همکارانش [۲۰] در مصر گزارش شده است.

هر چند نوسانات میانگین دما در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه تغییرات محسوس و درخور توجهی را نشان نمی‌دهد، اما به طور کلی مقادیر میانگین دمای سالانه طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. (سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به میزان ۰/۷۹، ۰/۶۸ و ۰/۴۱ درصد و سناریوی ۲/۶ برای دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۱ به میزان ۰/۶۳ درصد). البته، بررسی تغییرات داده‌های دما در سناریوهای مختلف بیان‌کننده سیر صعودی میانگین دمای سالانه در دوره‌های پیش‌بینی‌شده آتی است (از ۰/۷۹- تا ۱/۱۲ درصد). میانگین دمای فصلی طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مشاهداتی در فصل زمستان به طور نامحسوسی بیشتر (سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به میزان ۰/۴۹، ۱/۷۲ و ۲/۳۸ درصد و دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۱ به میزان ۲/۰۵، ۴/۲۶ و ۶/۱۴ درصد) و در سایر فصول کمتر (به استثنای سناریوی ۸/۵ برای دوره



شکل ۳. مقایسه مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده برای پارامترهای دما (c, d) و بارندگی ماهانه (a, b) در دوره‌های آماری ۲۰۵۰-۲۰۲۱ و ۲۰۸۰-۲۰۵۱

جدول ۵. مقایسه مقادیر میانگین بارندگی ماهانه دوره پایه و دوره مشاهداتی

مقیاس	1986-2015	2021-2050			2051-2080		
		scenario 2.6	scenario 4.5	scenario 8.5	scenario 2.6	scenario 4.5	scenario 8.5
Jan	31.27	30.30	31.35	31.22	31.01	33.22	34.97
Feb	32.26	38.29	37.84	38.59	38.14	40.04	42.45
Mar	44.20	49.12	45.68	42.66	44.40	43.89	35.32
Apr	31.98	21.27	20.67	18.88	17.60	15.05	11.95
May	14.38	9.24	9.44	9.87	8.94	8.18	6.94
Jun	2.10	0.73	0.65	0.68	0.61	0.47	0.20
Jul	2.72	6.42	6.70	7.80	6.85	9.18	12.47
Aug	1.80	0.53	0.40	0.33	0.39	0.30	0.05
Sep	1.00	1.02	1.04	1.14	1.07	1.16	1.71
Oct	13.79	7.20	7.09	6.30	7.72	5.81	3.11
Nov	27.20	22.75	23.24	24.41	24.12	24.49	29.06
Dec	33.57	34.83	33.24	34.36	33.15	35.62	37.82
Spring	90.56	79.63	75.78	71.41	70.95	67.12	54.22
Summer	6.62	7.69	7.75	8.82	7.85	9.95	12.71
Autumn	41.99	30.97	31.37	31.85	32.90	31.47	33.87
Winter	97.09	103.42	102.43	104.17	102.30	108.88	115.24
Year	236.27	221.70	217.33	216.24	214.00	217.42	216.04

جدول ۶. مقادیر میانگین دمای ماهانه دوره پایه و دوره مشاهداتی

مقیاس	1986-2015	2021-2050			2051-2080		
		scenario 2.6	scenario 4.5	scenario 8.5	scenario 2.6	scenario 4.5	scenario 8.5
Jan	4.78	4.725	5.185	4.935	4.93	5.08	5.18
Feb	6.85	6.38	6.67	6.42	6.625	6.465	6.545
Mar	11.435	10.21	10.38	10.385	10.965	10.27	10.405
Apr	17.735	17.865	18.555	17.96	17.84	18.17	18.485
May	22.955	22.83	23.525	22.81	23	23.175	23.485
Jun	28.45	27.885	28.03	27.875	28.11	27.88	27.82
Jul	30.93	31.075	31.245	31.09	31.18	31.18	31.265
Aug	30.305	30.46	30.67	30.51	30.18	30.52	30.55
Sep	26.205	26.36	26.575	26.325	26.15	26.395	26.695
Oct	19.845	19.415	20.015	19.6	19.495	19.505	19.92
Nov	12.2	12.1	12.515	12.09	12.11	12.285	12.68
Dec	6.75	7.33	7.54	7.41	7.075	7.57	7.725
Spring	17.37	16.96	17.01	17.045	17.125	17.195	17.45
Summer	29.915	29.825	29.82	29.845	29.86	29.88	29.9
Autumn	19.42	19.29	19.24	19.34	19.23	19.4	19.765
Winter	6.105	6.135	6.21	6.25	6.23	6.365	6.48
Year	18.255	18.11	18.13	18.18	18.14	18.27	18.46

خواهد یافت. بنابراین، با توجه به محرز بودن تغییر اقلیم در منطقه مطالعه شده، بررسی تأثیر آن بر پارامترهای دما، بارندگی و شدت بارندگی در بخش‌های قبلی، قابل توجیه است. جدول ۷ مقادیر شاخص اقلیمی را با روش آمبرژه نشان می‌دهد.

تعیین نوع اقلیم منطقه مطالعه شده در دوره‌های پیش‌بینی شده با توجه به ضریب رطوبتی آمبرژه، نوع اقلیم منطقه مطالعه شده در دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۵) خشک سرد است که این اقلیم، در دوره‌های پیش‌بینی شده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰) به خشک معتدل تغییر

جدول ۷. تعیین نوع اقلیم در دوره‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده

دوره آماری	روش آمبرژه	
	ضریب رطوبتی آمبرژه	نوع اقلیم
۱۹۸۶-۲۰۱۵	۱۷/۶۹	خشک سرد
۲۰۲۱-۲۰۵۰	۲۱/۰۷	خشک معتدل
۲۰۵۱-۲۰۸۰	۲۰/۹۱	خشک معتدل

استخراج منحنی‌های IDF

به منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی، ابتدا منحنی‌های دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) با استفاده از روابط ۴ و ۵ و براساس مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی مهرآباد استخراج شد. سپس، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده به دست آمده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM (تحت مدل CanESM2 و سناریوهای جدید انتشار ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵) اقدام به تهیه منحنی‌ها در دوره‌های آینده (۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۲۱-۲۰۵۰) شده و مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده با یکدیگر مقایسه شد.

جدول‌های ۸ و ۹، مقادیر شدت بارندگی را در دوره‌های آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ (سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵) و در مقیاس‌های زمانی ۱۷/۰، ۳۳/۰، ۱۰/۵، ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴ ساعت و دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ساله نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰ و ۲۵ ساله در مدیریت‌های مرتبط با کارهای هیدرولیکی و آبخیزداری اهمیت بیشتری دارد، مقایسه منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی (IDF) دوره‌های پیش‌بینی شده با دوره مشاهداتی در دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰ و ۲۵ ساله، در قالب شکل ۴ به نمایش درآمده است. نتایج مندرج در جدول‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد شدت بارندگی در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در هر سه سناریوی ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۵) کاهش خواهد یافت. به طوری که در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰، سناریوی ۲/۶ و در دوره آماری (۲۰۵۱-۲۰۸۰)، سناریوی ۴/۵ بیشترین کاهش را نسبت به دوره مشاهداتی خواهند داشت.

همچنین، مقایسه شدت بارندگی در دوره‌های پیش‌بینی شده (در همه دوره بازگشت‌ها و مقیاس‌های زمانی مد نظر) نشان می‌دهد که در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰، سیر صعودی شدت بارندگی به ترتیب در سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ و در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰، سیر صعودی مقادیر

شدت بارندگی به ترتیب در سناریوهای ۴/۵، ۸/۵ و ۲/۶ مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج یادشده می‌توان گفت که در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰، رابطه معناداری میان شدت بارندگی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود خواهد داشت. به طوری که با افزایش میزان واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای، شدت بارندگی نیز افزایش خواهد یافت. اما در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نوسانات شدت بارندگی در سناریوهای مختلف از میزان گازهای گلخانه‌ای تبعیت نمی‌کند. هر چند تغییرات شدت بارندگی می‌تواند متأثر از عوامل اقلیمی و غیر اقلیمی متعددی باشد، اما با توجه به نتایج مد نظر در این مطالعه، سیر صعودی دمای هوا در سناریوهای پیش‌بینی شده (جدول ۶) کارکرد مؤثری در تغییرات شدت بارندگی خواهد داشت.

مقایسه سناریوهای مختلف (در تمام دوره بازگشت‌های مد نظر) بین دو دوره پیش‌بینی شده نشان می‌دهد میانگین شدت بارندگی در سناریوی ۲/۶ و در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به همین سناریو در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ افزایش می‌یابد و میانگین شدت بارندگی در سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵ و در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به سناریوهای یادشده در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت.

تعیین ریسک، افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های طراحی در سیستم‌هایی نظیر زهکش‌های خیابانی، فاضلاب‌های شهری (دوره بازگشت‌های کوتاه‌تر) و حوضچه‌های نگهداشت سیلاب (دوره بازگشت‌های طولانی‌تر)، مستلزم ارزیابی و شناخت مقادیر بیشینه و کمینه شدت‌های بارندگی در آینده است. به این منظور، اقدام به استخراج مقادیر کمینه و بیشینه شدت بارندگی در ۶۰ سال آینده (دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۸۰) شد (جدول ۱۰). نتایج بیان‌کننده افزایش شدت بارندگی در بارش‌های کوتاه‌تر و دوره بازگشت‌های طولانی‌تر است. به طوری که در حوضه آبخیز تهران - کرج، کمترین و بیشترین شدت بارندگی در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰، به ترتیب در سناریوی‌های ۴/۵ و ۲/۶ اتفاق خواهد افتاد.

از این رو، به رغم اینکه در پژوهش حاضر استخراج منحنی‌ها مبتنی بر آخرین روابط واسنجی شده در ایران [۳۱] بوده است، اما ارتقای دقت مقادیر برآوردشده با توجه به شرایط اقلیمی حاضر و افزایش طول دوره آماری مد نظر، امری ضروری به نظر می‌رسد.

جدول ۸. مقادیر شدت بارندگی در دوره بازگشت‌های معین در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ تحت مدل CanESM2 و سناریوهای جدید انتشار

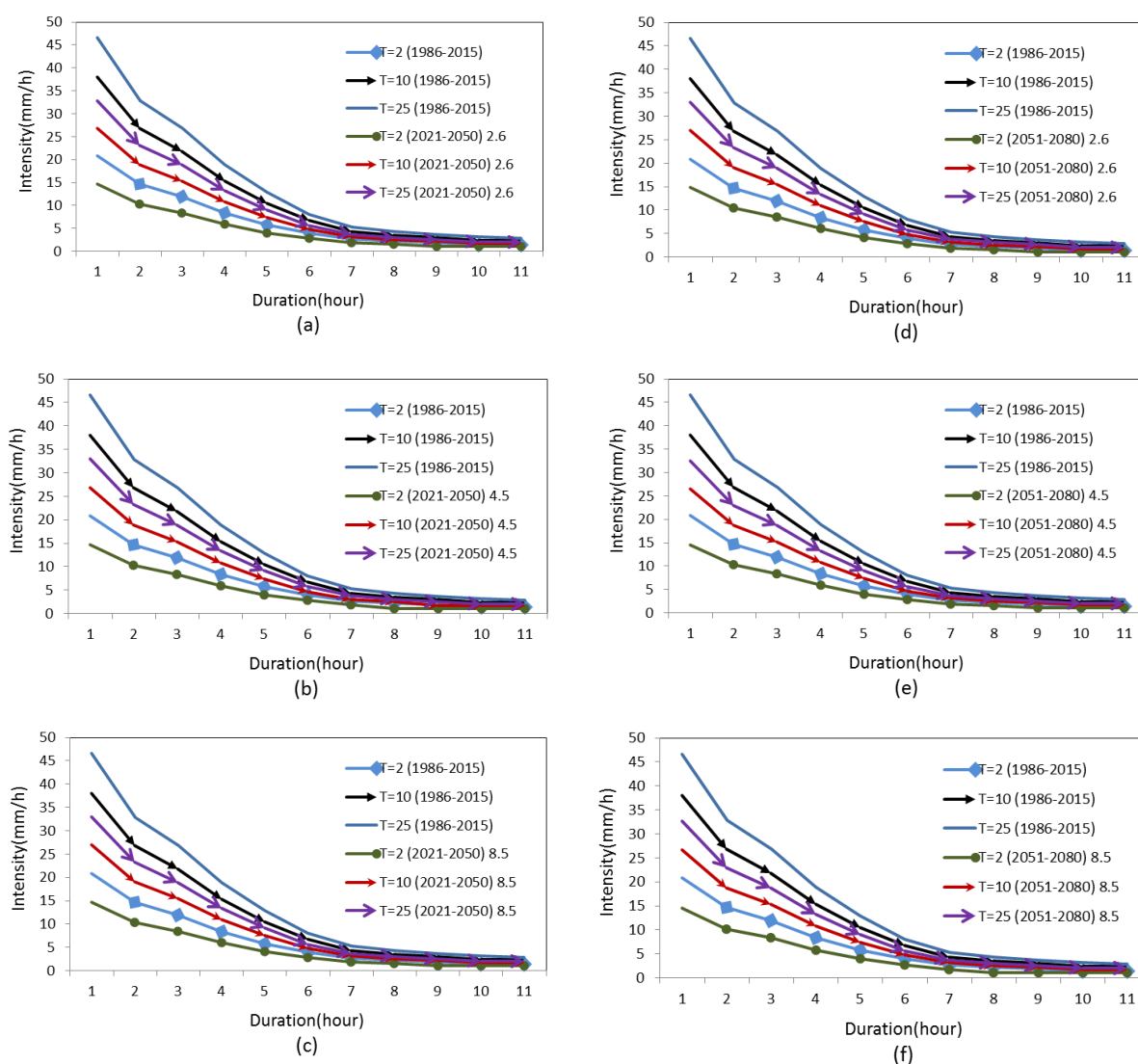
t(h)	2021-2050																							
	T=2 years				T=5 years				T=10 years				T=25 years				T=50 years				T=100 years			
	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5
0.17	20.87	14.71	14.74	14.78	31.24	22.03	22.08	22.13	38.09	26.85	26.91	26.97	46.67	32.90	32.98	33.05	53.01	37.37	37.46	37.54	59.30	41.80	41.90	41.99
0.33	14.70	10.37	10.39	10.41	22.02	15.52	15.56	15.59	26.84	18.92	18.97	19.01	32.89	23.19	23.24	23.29	37.36	26.34	26.40	26.46	41.79	29.46	29.53	29.59
0.50	11.98	8.45	8.47	8.49	17.94	12.65	12.68	12.71	21.87	15.42	15.46	15.49	26.80	18.89	18.94	18.98	30.44	21.46	21.51	21.56	34.05	24.01	24.06	24.12
1.00	8.45	5.95	5.97	5.98	12.65	8.91	8.94	8.96	15.42	10.87	10.89	10.92	18.89	13.32	13.35	13.38	21.46	15.13	15.16	15.20	24.00	16.92	16.96	17.00
2.00	5.78	4.08	4.09	4.10	8.66	6.11	6.12	6.13	10.56	7.44	7.46	7.48	12.94	9.12	9.14	9.16	14.69	10.36	10.38	10.41	16.44	11.59	11.61	11.64
4.00	4.04	2.85	2.85	2.86	5.70	4.02	4.03	4.04	6.74	4.75	4.76	4.77	8.03	5.66	5.67	5.68	8.97	6.32	6.34	6.35	9.90	6.98	7.00	7.01
8.00	2.65	1.87	1.87	1.88	3.74	2.64	2.65	2.65	4.43	3.12	3.13	3.14	5.27	3.72	3.73	3.73	5.89	4.15	4.16	4.17	6.50	4.58	4.60	4.61
12.00	2.17	1.53	1.53	1.54	3.06	2.16	2.16	2.17	3.62	2.55	2.56	2.56	4.31	3.04	3.05	3.05	4.82	3.40	3.41	3.41	5.32	3.75	3.76	3.77
16.00	1.84	1.30	1.30	1.31	2.60	1.84	1.84	1.84	3.08	2.17	2.18	2.18	3.67	2.58	2.59	2.60	4.10	2.89	2.89	2.90	4.52	3.19	3.19	3.20
20.00	1.63	1.15	1.15	1.15	2.30	1.62	1.62	1.63	2.71	1.91	1.92	1.92	3.23	2.28	2.28	2.29	3.61	2.55	2.55	2.56	3.99	2.81	2.82	2.82
24.00	1.47	1.03	1.04	1.04	2.07	1.46	1.46	1.47	2.45	1.73	1.73	1.73	2.92	2.06	2.06	2.07	3.26	2.30	2.30	2.31	3.60	2.54	2.54	2.55
\bar{x}	6.87	4.84	4.85	4.87	10.18	7.18	7.19	7.21	12.35	8.70	8.72	8.74	15.06	10.61	10.64	10.66	17.06	12.02	12.05	12.08	19.04	13.42	13.45	13.48

جدول ۹. مقادیر شدت بارندگی در دوره بازگشت‌های معین در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ تحت مدل CanESM2 و سناریوهای جدید انتشار

t(h)	2051-2080																							
	T=2 years				T=5 years				T=10 years				T=25 years				T=50 years				T=100 years			
	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5	Base	2.6	4.5	8.5
0.17	20.87	14.79	14.51	14.60	31.24	22.15	21.73	21.87	38.09	27.00	26.49	26.66	46.67	33.09	32.46	32.67	53.01	37.58	36.88	37.11	59.30	42.04	41.25	41.50
0.33	14.70	10.43	10.23	10.29	22.02	15.61	15.32	15.41	26.84	19.03	18.67	18.79	32.89	23.32	22.88	23.02	37.36	26.49	25.99	26.15	41.79	29.63	29.07	29.25
0.50	11.98	8.50	8.34	8.39	17.94	12.72	12.48	12.56	21.87	15.51	15.22	15.31	26.80	19.00	18.64	18.76	30.44	21.59	21.18	21.31	34.05	24.14	23.69	23.84
1.00	8.45	5.99	5.87	5.91	12.65	8.97	8.80	8.85	15.42	10.93	10.72	10.79	18.89	13.39	13.14	13.22	21.46	15.21	14.93	15.02	24.00	17.02	16.70	16.80
2.00	5.78	4.10	4.02	4.05	8.66	6.14	6.02	6.06	10.56	7.49	7.34	7.39	12.94	9.17	9.00	9.06	14.69	10.42	10.22	10.29	16.44	11.65	11.43	11.50
4.00	4.04	2.86	2.81	2.83	5.70	4.04	3.97	3.99	6.74	4.78	4.69	4.72	8.03	5.69	5.58	5.62	8.97	6.36	6.24	6.28	9.90	7.02	6.89	6.93
8.00	2.65	1.88	1.84	1.86	3.74	2.66	2.61	2.62	4.43	3.14	3.08	3.10	5.27	3.74	3.67	3.69	5.89	4.18	4.10	4.12	6.50	4.61	4.52	4.55
12.00	2.17	1.54	1.51	1.52	3.06	2.17	2.13	2.14	3.62	2.57	2.52	2.53	4.31	3.06	3.00	3.02	4.82	3.42	3.35	3.37	5.32	3.77	3.70	3.72
16.00	1.84	1.31	1.28	1.29	2.60	1.85	1.81	1.82	3.08	2.18	2.14	2.16	3.67	2.60	2.55	2.57	4.10	2.90	2.85	2.87	4.52	3.21	3.15	3.16
20.00	1.63	1.15	1.13	1.14	2.30	1.63	1.60	1.61	2.71	1.92	1.89	1.90	3.23	2.29	2.25	2.26	3.61	2.56	2.51	2.53	3.99	2.83	2.77	2.79
24.00	1.47	1.04	1.02	1.03	2.07	1.47	1.44	1.45	2.45	1.74	1.70	1.71	2.92	2.07	2.03	2.04	3.26	2.31	2.27	2.28	3.60	2.55	2.50	2.52
\bar{x}	6.87	4.87	4.78	4.81	10.18	7.22	7.08	7.13	12.35	8.75	8.59	8.64	15.06	10.67	10.47	10.54	17.06	12.09	11.86	11.94	19.04	13.50	13.24	13.32

جدول ۱۰. مقادیر کمینه و بیشینه شدت بارندگی در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۸۰

مدت	شدت بارندگی (میلیمتر بر ساعت) - ۲۰۲۱ الی ۲۰۸۰											
	T=2			T=10			T=25			T=100		
	مشاهداتی	حداقل	حداکثر	مشاهداتی	حداقل	حداکثر	مشاهداتی	حداقل	حداکثر	مشاهداتی	حداقل	حداکثر
0.17	20.87	14.51	14.79	38.09	26.49	27.00	46.67	32.46	33.09	59.30	41.25	42.04
0.33	14.70	10.23	10.43	26.84	18.67	19.03	32.89	22.88	23.32	41.79	29.07	29.63
0.5	11.98	8.34	8.50	21.87	15.22	15.51	26.80	18.64	19.00	34.05	23.69	24.14
1	8.45	5.87	5.99	15.42	10.72	10.93	18.89	13.14	13.39	24.00	16.70	17.02
2	5.78	4.02	4.10	10.56	7.34	7.49	12.94	9.00	9.17	16.44	11.43	11.65
4	4.04	2.81	2.86	6.74	4.69	4.78	8.03	5.58	5.69	9.90	6.89	7.02
8	2.65	1.84	1.88	4.43	3.08	3.14	5.27	3.67	3.74	6.50	4.52	4.61
12	2.17	1.51	1.54	3.62	2.52	2.57	4.31	3.00	3.06	5.32	3.70	3.77
16	1.84	1.28	1.31	3.08	2.14	2.18	3.67	2.55	2.60	4.52	3.15	3.21
20	1.63	1.13	1.15	2.71	1.89	1.92	3.23	2.25	2.29	3.99	2.77	2.83
24	1.47	1.02	1.04	2.45	1.70	1.74	2.92	2.03	2.07	3.60	2.50	2.55



شکل ۴. مقایسه شدت بارندگی در دوره بازگشت های ۲، ۱۰ و ۲۵ ساله دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۵) با دوره های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ (a,b,c) و دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ (d,e,f)

نتیجه گیری

سالانه تغییرات محسوسی را نسبت به دوره مشاهداتی نشان نداده است، اما بررسی تغییرات داده های دما در سناریوهای مختلف بیان کننده سیر صعودی میانگین دمای سالانه در دوره های پیش بینی شده آبی است (از ۰/۷۹- تا ۱/۱۲ درصد). نتایج مطالعه حاضر نشان داد شدت بارندگی در دوره های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در هر سه سناریوی ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ (در همه دوره بازگشت های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله و مقیاس های زمانی ۰/۱۷، ۰/۳۳، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، ۰/۱۲، ۰/۱۶، ۰/۲۰ و ۰/۲۴ ساعت) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۵) کاهش خواهد یافت. به طوری که در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰، سناریوی ۲/۶ و

ایران در کمربند پرفشار نیم کره شمالی قرار دارد و این مهم بیشتر مناطق کشور را تحت تأثیر آب و هوای گرم و خشک تا نیمه خشک قرار داده است. به این منظور، تحلیل و پایش درازمدت شرایط اقلیمی می تواند تأثیر زیادی در مدیریت بحران های ناشی از تغییرات اقلیمی نظیر سیل و خشکسالی داشته باشد. در منطقه مطالعه شده، هر چند بارندگی زمستانه و تابستانه در دوره های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در هر سه سناریو افزایش داشته است، اما در مجموع بارندگی سالانه برای هر سه سناریو و در هر دو دوره کاهش خواهد یافت. به رغم اینکه میانگین دمای

بارندگی‌ها از حالت جامد (برف) به مایع (باران) خواهد شد که این مهم در کنار روند صعودی دما و ذوب تدریجی برف‌ها، افزایش رواناب‌ها و طغیان رودخانه‌ها را در پی خواهد داشت. البته، روند افزایشی دما در منطقه مطالعه شده بر رگبارهای کوتاه مدت و بارش‌های سیل‌آسا نیز بی‌تأثیر نخواهد بود. به خصوص در فصل تابستان که این افزایش دما، همراه با افزایش بارندگی نیز خواهد بود. از این رو، لزوم به‌کارگیری سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل در اماکن گردشگری منطقه (ارتفاعات شمال تهران و رودخانه‌های منتهی به آن) و همچنین مدیریت‌های مبتنی بر آبخیزداری شهری و کنترل سیلاب (در مناطق مسکونی شهر تهران) بیش از پیش ضروری می‌نماید.

منابع

- [1]. Karamooz M, Araghinejad Sh. Advanced Hydrology. AmirKabir University Publication Center ; 2005.
- [2]. Steele Dunne S, Lynch P, McGrath R, Semmler T, Wang Sh , Hanafin J, et al. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. Journal of Hydrology. 2008; 356: 28-45.
- [3]. IPCC. Summary for Policymakers in Climate Change. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge. 2007; 1-18.
- [4]. Smithers JC, Schulze RE. A methodology for the estimation of short duration design storms in South Africa using a regional approach based on Lmoments. J. Hydrol. 2000; 241: 42-52.
- [5]. Bell FC. Generalized rainfall depth-duration frequency relationships. Journal of Hydraulic. 1969; 95(1): 331-327.
- [6]. Sherman CW. Frequency and intensity of excessive rainfalls at Boston. Journal of Transactions of American Society of Civil Engineering (ASCE). 1931; 95(1): 951-960.
- [7]. Carlier E, Khattabi J. Impact of Global Warming on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Relationship of Precipitation: A Case Study of Toronto, Canada. Open Journal of Modern Hydrology. 2016; 6(1): 1-7.
- [8]. Singh R, Arya DS, Taxak AK, Vojinovic Z. Potential Impact of Climate Change on Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves in Roorkee, India. Water Resources Management. 2016; 30(13): 4603-4616.

در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰، سناریوی ۴/۵ بیشترین کاهش شدت بارندگی را نسبت به دوره مشاهداتی خواهند داشت. همچنین، در همه دوره بازگشت‌ها و مقیاس‌های زمانی مد نظر، شدت بارندگی در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ترتیب در سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ با شیب ملایمی افزایش خواهد یافت. اما در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰، سیر صعودی مقادیر شدت بارندگی به ترتیب در سناریوهای ۴/۵، ۸/۵ و ۲/۶ مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای، شدت بارندگی نیز افزایش خواهد یافت، اما در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نوسانات شدت بارندگی در سناریوهای مختلف از میزان گازهای گلخانه‌ای تبعیت نمی‌کند. همچنین، مقایسه سناریوهای مختلف (در تمام دوره بازگشت‌ها و مقیاس‌های زمانی مد نظر) بین دو دوره پیش‌بینی شده نشان می‌دهد میانگین شدت بارندگی در سناریوی ۲/۶ و در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به همین سناریو در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ افزایش و میانگین شدت بارندگی در سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵ و در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به سناریوهای یادشده در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت. در مجموع، مقایسه مقادیر کمینه و بیشینه شدت بارندگی در ۶۰ سال آینده (دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۸۰) نشان می‌دهد کمترین و بیشترین شدت بارندگی در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و به ترتیب در سناریوی‌های ۴/۵ و ۲/۶ اتفاق خواهد افتاد. بنا بر آنچه گفته شد، به رغم اینکه در پژوهش حاضر، استخراج منحنی‌ها مبتنی بر آخرین روابط واسنجی شده در ایران [۳۱] بوده است، ارتقای دقت مقادیر برآوردشده با توجه به شرایط اقلیمی حاضر و افزایش طول دوره آماری مد نظر، امری ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به نتایج یادشده، به رغم افزایش بارندگی‌ها در فصول تابستان و زمستان، به دلیل کاهش تقاضای آب برای مصارف کشاورزی و افزایش تبخیر و تعرق در این فصول، بهره‌وری مناسب از مازاد بارش‌های یادشده در منطقه ممکن نخواهد بود. از این رو، لزوم به‌کارگیری سیستم‌های استحصال منابع آب و روش‌های نوین جمع‌آوری رواناب شهری در فصول پربارش سال برای استفاده بهینه در فصول کم‌بارش اجتناب‌ناپذیر است. همچنین، روند افزایشی دما در منطقه موجب تغییر

- [9]. Raghavan SV, Liu J, Liong SY. Constructing short-duration IDF curves using coupled dynamical–statistical approach to assess climate change impacts. *International Journal of Climatology*. 2018; 38(6): 2662-2671 .
- [10]. Hanush CJ. The Effects of climate change and variability on Intensity Duration-Frequency Curves [dissertation]. Western Australia : University of Western; 2003.
- [11]. Mailhot A, Duchesne S, Caya D, Talbot G. Assessment of future change in intensity-duration frequency(IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model(CRCM). *Journal of Hydrology*. 2007; 347: 197-210.
- [12]. Desramaut N. Estimation of intensity duration frequency curves for current and future climates [dissertation]. Montreal, Quebec, Canada: McGill University ; 2008.
- [13]. Vazeri F. Analysis of storms in different parts of Iran, University Jahad, Khaje Naseeriddin Tusi University, Research Design Unit ; 1992.
- [14]. Heydari Z, Jahani Q. Determination of rainfall distribution pattern and intensity-duration-frequency curves in Gorganrood watershed. Fourth Iranian Water Resources Management Conference , Tehran ; 2012.
- [15]. Bakhtiari B, Pour Mousavi SH, sayari N. Investigating the effect of climate change on intensity-duration-frequency curves of Babolsar station during the period of 2020-2011. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2015; 4 (8):704-694.
- [16]. Ashraf B, Mousavi Baygi M, Kamali GA, Davari K. Evaluation of wheat and Sugar beet water use Variation due to climate change effects in two Coming Decades in the selected plains of Khorasan Razavi Province. *Iran. J. Irrig. Drain*. 2012; 6(2)):105-117. (Persian)
- [17]. Christensen NS, Wood AW, Voisin N, Lettenmaier DP. The Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change*. 2004; 62(1-3): 337-363.
- [18]. Kay AL, Jones RG, Reynard NS. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. *Climate change results. J. Hydrol*. 2006; 318(1-4): 163-172.
- [19]. Souvignet M, Gaese H, Ribbe L, Kretschmer N, Oyarzun R. Climate change impacts on water availability in the Arid Elqui Valley, North Central Chile: a preliminary assessment. In *IWRA World Water Congress, Montpellier, France; 2008*.
- [20]. Booij MJ, Tollenaar D, van Beek E, Kwadijk JC. Simulating impacts of climate change on river discharges in the Nile basin. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2011; 36(13) :696-709.
- [21]. Massahboani A, Merid S. Climate change effects on the flow of the Zayandeh River in Isfahan. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2005; 9 (4): 17-28.
- [22]. Babaian A, Najafi Nik Z, Zabul Abbasi F, Habibi Nokhandan M, Adab H, Melbuzi SH. Assessment of Climate Change in the Period of 2039-2010 Using Exponential Microscopic Data on the Model of the General Circulation Model of ECHO-G. *Geography and Development Magazine*. 2009; 7 (16): 135-152. (Persian)
- [23]. Poormohammadi S. Effects of Climate Change on River Runoff and Compatible Solutions (Case Study: Tuysarkan Basin, Hamedan) *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 2017; 11(37):1-12. (Persian)
- [25]. Ghorbani Kh, Sohrabian A, Salari Jazi M, Abdul Hussein M Prediction of climate change impact on monthly river discharge trend using IHACRES hydrological model (case study: Galikesh watershed). *Journal of Soil and Water Conservation*. 2017; 5 (4): 19-45. (Persian)
- [26]. Arora VK, Scinocca JF, Boer GJ, Christian JR, Denman KL, Flato GM, et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research*. 2011; 38(5) :1-6.
- [27]. Sedaqatkerdar A, Fatahi E. Early Warning Drought Indices in Iran. *Journal of Geography and Development*. 2008; 6(11): 59-76 (Persian).
- [28]. Motovilov YG, Gottschalk L, Engeland K, Rohde A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agriculture and Forest Meteorology*. 1999; 98(99): 257-277.
- [29]. Cedron F, Boot KJ, Nogueira BR, Sau F. Testing CERES Maize versions to estimate maize production in a cool environment. *European Journal of Agronomy*. 2005; 23(1): 89-102.
- [30]. Ghahraman B. Sepaskhah A, determine the relationship between severity, duration, periodicity of rainfall in Iran using one hour, ten years rain. *Third International Congress on Road Engineering and Construction*. Shiraz ,iran; 1991. (Persian)

- [31]. Ghahraman B. Updated relationship between severity-duration and frequency of rainfall in Iran using one hour's ten-year rainfall, Journal of Agricultural Science. 1996; 6 (1-2): 13-32. (Persian)
- [32]. Ghahraman B, Abkhzr H. Improvement in Intensity-Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. Journal of Water and Soil Science. 2004;8 (2):1-14 (Persian)
- [33]. Ghahraman B. A general dimensionless rainfall depth-duration frequency relationship. Iran Agric. Res. 1995; 14(2):217-235.