

پیش‌بینی نوسانات نمایه‌های حدی بارش در شهر مشهد با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی

مدل LARS-WG برای دو دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶

سید محمد عسکری‌زاده (دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران)

askarizadeh_1386@yahoo.com

غلامعلی مظفری (دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، نویسنده مسئول)

yazdmozafari@gmail.com

احمد مزیدی (دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران)

payamyazd@gmail.com

صص ۵۰ - ۲۵

چکیده

اهداف: تغییرات در رویدادهای حدی آب و هوایی و اقلیمی اثرات قابل توجهی دارد. به همین دلیل، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جدی فراروی جوامع در مقابله با تغییر اقلیم تبدیل شده است. یکی از جنبه‌های مهم تغییر اقلیم شناخت رفتار رویدادهای حدی است. از آنجایی که شهر مشهد تراکم جمعیت شهری دارد و به‌عنوان یک منطقه نیمه‌صنعتی شناخته شده به طوری که اثرات پارامترهای اقلیمی بر بخش‌های مختلف جامعه شهری و صنعتی آن حائز اهمیت است، نگرش به آینده یکی از ضروریات‌های مقوله مدیریت کلان شهری و ناحیه‌ای در این شهر محسوب می‌شود.

روش: جهت ارائه دورنمایی از تغییرات آتی رویدادهای حدی به‌ویژه بارش با استفاده از خروجی سه مدل گردش عمومی جو (CNCM₃, HadCM₃)، براساس سناریوهای A₁B, A₂ گزارش چهارم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم تحت مدل LARS-WG برای دو دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ برای ایستگاه مشهد ریزمقیاس‌نمایی شده است. نمایه‌های بارش مطالعه‌شده در این

پژوهش شامل (PRCPTOT, R_{10mm}, R_{20mm}, R_{95p}, R_{99p}, RX_{1day},) برای دو دوره آتی یادشده محاسبه شد. یافته‌ها/ نتایج: نتایج نشان می‌دهد احتمالاً میانگین بیشینه بارش پنج‌روزه و شدت بارش طی دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریوی A2 افزایش می‌یابد. سهم بیشتری از کل بارش سالانه به وقوع بارش‌های سیل‌آسا و رگباری؛ یعنی بارش‌های بیش از صدک ۹۵ و ۹۹ دوره پایه تعلق خواهد داشت. نتیجه‌گیری: طبق نتایج، افزایش این نمایه‌ها به معنی افزایش فراوانی وقوع سیل و شدت آن به‌ویژه طی دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ خواهد بود. در حالی که طی دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ احتمال کاهش شدت بارش و نمایه‌های بیشینه بارش پنج‌روزه پیش‌بینی می‌شود. کلیدواژه‌ها: نمایه‌های حدی، مدل‌گردش عمومی جو- اقیانوس، ریزمقیاس‌نمایی، مشهد.

۱. مقدمه

امروزه پذیرفته شده است که بروز هر گونه تغییر در سیستم اقلیمی در مدیریت منابع آب و خاک اهمیت دارد. بنابراین، نوسانات اقلیمی اثرات جبران‌ناپذیری بر منابع آب و خاک ناحیه خراسان رضوی به‌خصوص شهر مشهد داشته است، به طوری که ممکن است در نتیجه گرمایش زمین، تغییراتی در روند پارامترهای اقلیمی منطقه به وجود آید و بر اساس همین مطالعات، وقایع حدی آب و هوایی بسیاری از فعالیت‌های انسانی از جمله کشاورزی، باغداری، صنعت، جهانگردی و حمل و نقل را تحت تأثیر قرار می‌دهد که بستر بیشتر رخدادها و وقایع مخرب آب و هوایی افزایش دما و بارش‌های حدی است. رویداد حدی به رویدادهای نادری اطلاق می‌شود که از دیدگاه آماری احتمال وقوع آن رویداد خیلی کم است و دربرگیرنده معانی مختلفی است. برای مثال، می‌تواند به صورت مقادیر بین و بالای صدک‌های (۹۵ و ۵) (۹۰ و ۱۰) و با مقادیر بالاتر از یک آستانه و با تداوم شرایطی ویژه تعریف شود (رحیم‌زاده، عسکری، فتاحی، محمدیان و تقی‌پور، ۱۳۸۸، ص. ۱۱۹). لازم به ذکر است

که رویدادهای حدی دیگری نیز وجود دارند که در یک مکان و در یک زمان خاص نادر است و نیاز به روش‌های تحلیل متفاوتی دارند.

گزارش‌های هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ طی سالیان اخیر، بر افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی آب و هوایی تحت شرایط تغییر اقلیم تأکید کرده است، به طوری که افزایش گازهای گل‌خانه‌ای و گرمایش زمین به شکل افزایش شدت، فراوانی و سهم رویدادهای حدی تجلی یافته است. در این راستا، مقایسه‌ای بین روند مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل Hadcm3^۲ با تلفیقی از سه اجرای متفاوت در شرایط اولیه سطح زمین و جو انجام شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل و روند رویدادهای حدی (تعداد روزهای یخبندان، تعداد روزهای خشک متوالی، نمایه ساده روزانه شدت بارش، تعداد روزهای با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر) نشان داد که لحاظ کردن اثرات انسانی در تلفیق مدل، به‌ویژه افزایش گازهای گل‌خانه‌ای به طور چشمگیری شبیه‌سازی تغییر رویدادهای حدی را بهبود می‌بخشد. طی سالیان اخیر بسیاری از مناطق جهان شاهد وقوع رخداد‌های حدی بوده‌اند، مانند رخداد دمای بسیار پایین در زمستان ۲۰۱۰-۲۰۰۹ در قسمت‌های اعظم نیم‌کره شمالی شامل اروپا، آسیا و آمریکای شمالی، وقوع مخرب‌ترین سیل پاکستان در تابستان ۲۰۱۰ (سازمان جهانی هواشناسی^۳، ۲۰۱۱، ص. ۱۰۷۵). در چنین شرایطی، توسعه اقتصادی و شرایط زندگی پایدار در سال‌های آتی، بستگی به توانایی ما در مدیریت ریسک‌های مرتبط با رویدادهای حدی دارد (گزارش‌های هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۰، ص. ۷۳). بنابراین، هر نوع تلاشی برای پیش‌بینی وضعیت رویدادهای حدی به‌ویژه بارش در هر منطقه امری ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا و جهت بررسی و تحلیل مقادیر (متوسط) حدی اقلیمی بارش و دما می‌توان از مجموعه نمایه‌های حدی که توسط شبکه پشتیبانی اقلیم اروپا (۲۷ نمایه حدی شامل ۱۶ نمایه بارش و ۱۱ نمایه دما) معرفی شده، استفاده کرد. این نمایه‌ها در سال ۱۹۹۸ و توسط کمیسیون اقلیم‌شناسی سازمان جهانی هواشناسی^۴ و برنامه تحقیقات اقلیم جهانی^۵ وابسته

1. Intergovernmental Panel On Climate Change
2. Hadley center climate model
3. World meteorological organization(wmo)
4. Commission for Climatology(ccl)
5. World Climate Research Program(wcrp)

به طرح پیش‌بینی‌پذیری و تغییرپذیری اقلیم^۱ متشکل از یک تیم کارشناسی در زمینه آشکارسازی و پایش تغییر اقلیم و نمایه‌های آن‌ها^۲ جهت بررسی و تعیین نمایه‌های حدی اقلیمی، تعیین و معرفی شدند (عساکره، ۱۳۸۹، ص. ۸۹).

تحقیقات نشان می‌دهد که دمای سطح زمین در بیشتر مناطق اروپا در طی قرن بیستم افزایش یافته است. از اوایل دهه ۹۰ میلادی بررسی تغییرات مقادیر حدی منطقه‌ای و جهانی به‌ویژه دما و بارش با نگرشی نو به آن در مناطق مختلف دنیا مانند آمریکا (داگاتو^۳، ۱۹۹۶) استرالیا، زلاند نو (پلومر^۴، ۱۹۹۹) چین (ژای^۵، ۱۹۹۹)، کانادا (بونسال^۶، ۲۰۰۱) آغاز شد. از مهم‌ترین نتایج این مطالعات کاهش تعداد روزهای یخبندان در عرض‌های بالا و میانی نیم‌کره شمالی و افزایش طول دوره رویش در مقیاس جهانی به طور میانگین به مدت یک هفته در طول قرن بیستم است.

تاکنون پژوهش‌هایی درباره بررسی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای جوی با تأکید بر وضعیت آبی رویدادهای حدی انجام شده است. به عنوان مثال، (زمنف^۷، ۲۰۰۸، ص. ۲۰۳) در پژوهش خود تغییرات در بزرگی و الگوهای زمانی دو نمایه حدی برای گندم شامل احتمال تنش‌های گرمایی طی زمان گل‌دهی و شدت تنش‌های خشکسالی را تحلیل کرد. جهت محاسبه این نمایه‌ها، از یک مدل شبیه‌سازی گندم در ترکیب با سناریوهایی بر مبنای خروجی‌های مدل Hadcm3 در ۱۸ ایستگاه اینگلدن و والز (ریزگردانی شده با استفاده از مدل (LARS- WG) استفاده کرد. علی‌رغم دمای بالاتر و بارش تابستانی کمتری که برای دوره ۲۰۵۰ پیش‌بینی شده بود؛ اما اثر تنش خشکسالی بر عملکرد گندم نسبت به دوره حاضر کمتر پیش‌بینی شد؛ زیرا گندم جهت فرار از تنش خشکسالی تابستانی در زمان کوتاه‌تری می‌رسید؛ اما احتمال خسارات ناشی از تنش گرمایی در زمان گلدهی به طور چشمگیری طی این دوره افزایش نشان داد. در پژوهشی محققان نیز به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی

1. Climate Variability and Predictability (clivar)
2. Expert team on climatic change detection monitoring and indices (etccdmi)
3. Degaetaho
4. Plumer
5. Zhai
6. Bansa
7. Semenov

حوضه قره‌سو در دوره‌های آتی با استفاده از شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده^۱ اقدام کردند (گل‌محمدی و مساح، ۱۳۹۰، ص. ۳۲۶). در این پژوهش، خروجی‌های مدل گردش عمومی جو Hadcm3 تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ میلادی برای منطقه با استفاده از SDSM^۲ ریزمقیاس و با داده‌های مشاهداتی بارندگی منطقه در دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) مقایسه شد. نتایج نشان داد که حوضه در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ میلادی شاهد افزایش بارش و به تبع آن کاهش شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه خواهد بود.

ژانگ و ساو (۲۰۰۵)^۳ به منظور بررسی روند شاخص‌های حدی دما و بارش با بهره‌گیری از آزمون من‌کندال در دوره آماری ۲۰۰۳-۱۹۵۰ از داده‌های ۵۲ ایستگاه متعلق به ۱۵ کشور خاورمیانه از جمله ارمنستان، ایران، عراق، اسرائیل، سوریه و ترکیه استفاده کرده و نتایج نشان داد که به لحاظ آماری به طور معنی‌داری روند مکانی همسانی در شاخص‌های دما وجود دارد که این روند مربوط به افزایش دما در این مناطق بوده و در شاخص‌های بارش شامل تعداد روزهای دارای بارش متوسط، شدت بارش، حداکثر بارش روزانه روند خاصی مشاهده نمی‌شود.

براتی و جهادی طرفی (۱۳۷۸) به منظور تعیین روند تغییرات دما و بارش شهر مشهد، این موارد را در دوره آماری ۱۹۹۴-۱۹۵۱ با استفاده از تحلیل رگرسیونی و هموارسازی بررسی کردند و نشان دادند که دما و بارش شهر مشهد روند افزایش دارد و این روند تا قبل از ۱۹۷۴ با روند افزایش دما و بارش فصلی هماهنگی ندارد؛ اما از سال ۱۹۷۴ به بعد روند فصلی و سالانه این دو عنصر با هم هم‌خوانی دارند.

عسکری و رحیم‌زاده (۱۳۸۵) به منظور مطالعه تغییرپذیری بارش دهه‌های اخیر ایران، با استفاده از آزمون‌های من‌کندال و حداقل مربعات داده‌های ۳۴ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره آماری ۱۹۹۷-۱۹۵۱ را بررسی کردند که نتایج هر دو روند، کاهش و افزایش در جمع بارش سالیانه را نشان می‌دهد.

1. Standard precipitation index(SPI)
2. Statistical Downscaling model(SDSM)
3. Zang & Cao

بابائیان و نجفی نیک (۱۳۸۴) به ارزیابی تغییر اقلیم استان خراسان رضوی در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو^۱ پرداخته‌اند و بیان کردند خواص آماری داده‌های تولیدشده مشابه دوره آماری بوده؛ اما انحراف معیار آن‌ها به نسبت اختلاف داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو در دوره آینده و گذشته تغییر می‌کند. پیش‌بینی تغییرات در رویدادهای حدی ناشی از گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در ارزیابی اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف مانند: آب، کشاورزی و مدیریت سامانه‌های جمع‌آوری آب شهری بسیار مهم است. از آن‌جا که شهر مشهد تراکم جمعیت شهری زیادی دارد و به‌عنوان یک منطقه نیمه‌صنعتی شناخته شده به‌طوری که اثرات پارامترهای اقلیمی بر بخش‌های مختلف جامعه شهری و صنعتی آن حائز اهمیت است، نگرش به آینده یکی از ضروریات لازم در مقوله مدیریت کلان شهری و ناحیه‌ای محسوب می‌شود. بنابراین، در این پژوهش به بررسی میزان تغییر مقادیر حدی بارش پیش‌بینی شده ایستگاه مشهد با استفاده از سه مدل گردش عمومی جو شامل (NCCCSM^۲, HadCM₃, CNCM₃) طی دو دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ پرداخته شده است. انجام این پژوهش با هدف ارائه چشم اندازی از وضعیت آبی مقدار بارش و تغییرات رویدادهای حدی آن انجام شده که این امر امکان برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و صحیح را در بخش‌های مختلف کشاورزی، منابع آب و برنامه‌ریزی‌های شهری مانند جمع‌آوری آب‌های سطح فراهم می‌آورد.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

۲.۱. داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش شامل داده‌های دیدبانی و شبیه‌سازی شده هستند. داده‌های دیدبانی شامل داده‌های دمای کمینه، بیشینه، بارش روزانه و ساعت آفتابی است که این داده‌ها مربوط به دوره ۲۰۱۴-۱۹۶۱ میلادی ایستگاه مشهد (طول جغرافیایی ۳۸° ۵۹′، عرض جغرافیایی ۳۶° ۱۶′ ارتفاع ۹۹۹ متر بالاتر از سطح دریا) است. داده‌های شبیه‌سازی شده

1. General circulation model(GCM)
2. Center national de circulation model version
3. Ncar coupled community climate system model

توسط سه مدل گردش عمومی (HadCM3, CNCM3, NCCCSM) مربوط به دو دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ است که تحت دو سناریو A2 و A1B و توسط مدل LARS-WG (دوره آماری پایه ۲۰۱۴-۱۹۶۱) در مقیاس ایستگاه ریزگردانی شده و در راستای کاهش عدم قطعیت میانگین نمایه‌های محاسبه شده برای سه مدل به دست آمده است (برای تمام مدل‌ها به طور یکسان و بدون وزن‌دهی عمل شد). در نهایت، مقدار درصد و میزان تغییر نمایه توسط رابطه (۱) و (۲) محاسبه شد. نمایه‌های حدی بارش بررسی شده در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است (ویلی، داوسون، ۲۰۰۴، ص ۵۰)

$$\Delta_{2020s} = \frac{(V_{2020s} - V_{base}) * 100}{V_{base}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$V_{2020s} = (V_{2020} - V_{base}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

Δ_{2020s} : درصد تغییر نمایه طی دوره (به‌عنوان مثال ۲۰۲۰) نسبت به دوره پایه.
 V_{2020s} : مقدار بارش (یا هر کدام از نمایه‌های بررسی شده) در دوره مورد نظر (در اینجا ۲۰۲۰).

V_{base} : میزان بارش طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۶۱).

در ارزیابی رویدادهای حدی به رکوردهای اقلیمی طولانی‌مدت، با کیفیت بالا و قابل اعتماد با تفکیک زمانی روزانه (یا بالاتر) مورد نیاز است. بنابراین، در اولین قدم، کنترل کیفی و همگنی داده‌ها بررسی شد. در این تحقیق کنترل کیفی داده‌ها با بسته نرم‌افزاری به نام RCLimDex انجام شد که به‌عنوان یک ابزار استاندارد توسط ETCCDI^۲ معرفی شده است. همچنین، در زمان استفاده از داده‌های روزانه بارش یک ایستگاه باید مطمئن بود که علاوه بر این که داده‌های ایستگاه از کیفیت بالایی برخوردارند، به طور غیرطبیعی ناهمگن نباشند. همگنی داده‌های استفاده شده نیز با بهره‌گیری از بسته نرم‌افزاری RHtests_dlyPrp تحت زبان برنامه‌نویسی R انجام شد.

1. Wilby, Dawson

2. Exoer team on climate change detection and indices

جدول ۱- نمایه‌های حدی بارش مطالعه‌شده

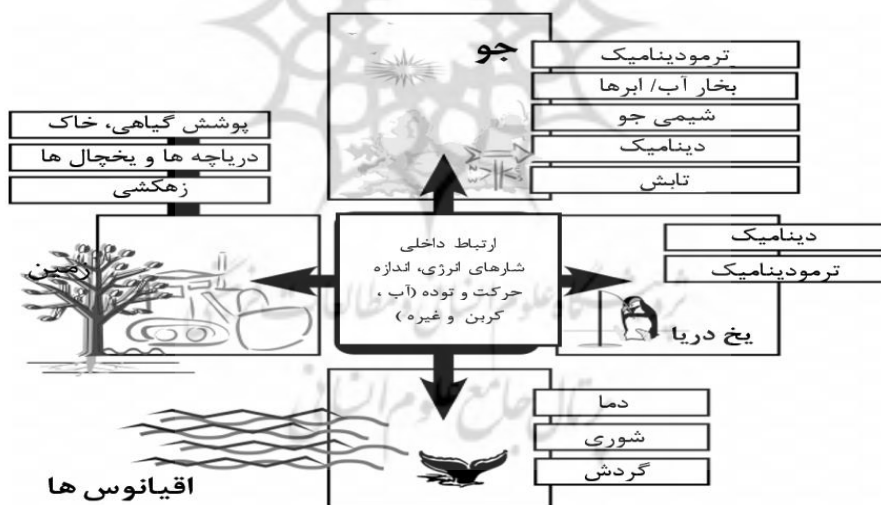
مأخذ: هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۰

ردیف	نماد	تعریف نمایه بارش فرین	واحد
۱	PRCPTOT	اگر RR_{ij} میزان بارش در روز i ام در دوره j و i نماینده تعداد روزهای در j باشد آنگاه $PRCPTOT_i = \sum_{i=j}^i RRIJ$	میلی‌متر
۲	RX1 day	اگر RR_{ij} میزان بارش در روز i در دوره j باشد، آنگاه حداکثر بارش روزانه برای دوره j عبارتست از $RX1DAY_i = MAX(RRIJ)$	میلی‌متر
۳	RX5 day	اگر RR_{ij} میزان بارش ماهانه ۵ روزه در دوره j باشد، آنگاه حداکثر بارش ۵ روزه برای دوره j عبارتست از $RX5DAY_i = MAX(RRIJ)$	میلی‌متر
۴	SDII	اگر RR_{wj} میزان بارش در یک روز بارانی ($RR \geq 1mm$) در دوره j و w عبارت باشد از روزهای تر در دوره j آنگاه $SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^w RR_{wj}}{w}$	میلی‌متر بر روز
۵	R10mm	اگر RR_{ij} میزان بارش روزانه در روز i در دوره j باشد، آنگاه روزهای با بارش سنگین؛ یعنی تعداد روزهایی با مقدار بارش روزانه مساوی یا بیشتر از ۱۰ میلی‌متر عبارتست از تعداد روزهایی که $RR_{ij} \geq 10mm$	روز
۶	R20mm	اگر RR_{ij} میزان بارش روزانه در روز i در دوره j باشد، آنگاه روزهای با بارش خیلی سنگین؛ یعنی تعداد روزهایی با مقدار بارش روزانه مساوی یا بیشتر از ۲۰ میلی‌متر عبارتست از تعداد روزهایی که $RR_{ij} \geq 20mm$	روز
۷	R95p	اگر RR_{wj} میزان بارش روزانه دوره j در یک روز تر ($RR \geq 1.0mm$) و RR_{wn95} صدک ۹۵ ام بارش در روزهای تر دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و w نماینده روزهای تر در دوره باشد، آنگاه $R95_{pj} = \sum_{w=1}^w RR_{wj}$ که در آن $RR_{wj} > RR_{wn95}$	میلی‌متر
۸	R99p	اگر RR_{wj} میزان بارش روزانه دوره j در یک روز تر ($RR \geq 1.0mm$) و RR_{wn99} صدک ۹۹ ام بارش در روزهای تر دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و w نماینده روزهای تر در دوره باشد، آنگاه $R99_{pj} = \sum_{w=1}^w RR_{wj}$ که در آن $RR_{wj} > RR_{wn99}$	میلی‌متر

۲.۲. مدل‌های استفاده‌شده

۲.۲.۱. مدل‌های جفت‌شده اقیانوس-اتمسفر^۱

جهت بررسی تأثیر اقلیم بر سیستم‌های مختلف؛ مانند منابع آب در دوره‌های آبی و تولید سناریوهای مقادیر حدی بارش در ابتدا باید متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر تغییرات گازهای گل‌خانه‌ای شبیه‌سازی شوند. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد که معتبرترین آن‌ها استفاده از مدل گردش عمومی جو است (مساح و آشفته، ۱۳۸۶، ص. ۴۰). تاکنون مدل‌های مختلفی در مراکز گوناگون تحقیقاتی طراحی شده‌اند که دارای مؤلفه‌هایی هستند که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند؛ مانند مدل‌های Hadcm3^۲، CSIRO^۲، CGCM2^۳. از آن‌جا که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها میزان انتشار گازهای گل‌خانه‌ای در دوره‌های آبی است، سناریوهای مختلف انتشار که دربرگیرنده چگونگی تغییرات این گازها در آینده است، ارائه شده‌اند (جدول ۲) (زمنف و استارتویچ^۴، ۲۰۱۰، ص. ۳).



شکل ۱- ساختار یک مدل جفت‌شده جو-اقیانوس

مأخذ: مک‌گوفی کی، ۱۳۷۹

1. Atmospheric - ocean
2. Commonwealth scientific and industrial organization.
3. Coupled general circulation model version
4. Semenov & strationvitch

۲.۲.۲. معرفی مدل LARS-WG

مدل LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های تولید داده‌های هواشناسی است که برای تولید مقادیر روزانه دماهای بیشینه و کمینه بارش و تابش یا ساعت آفتابی در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. نسخه اولیه این مدل طی سال ۱۹۹۰ به‌عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک‌های کشاورزی در بوداپست مجارستان ابداع شد. هسته اصلی این مدل استفاده از زنجیره مارکوف است که به کرات از آن استفاده شده است (اشرف، موسوی بایگی، کمالی و داوری، ۱۳۹۰، ص. ۱۱۸۴)؛ (زمنف و بارو، ۱۹۹۷، ص. ۳۹۷). مدل LARS-WG از سه بخش اصلی واسنجی، ارزیابی و تولید یا شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده تشکیل شده است. نیاز اساسی مدل در مرحله واسنجی، فایلی است که مشخص‌کننده رفتار اقلیم در دوره گذشته است. این فایل با استفاده از داده‌های روزانه پارامترهای اقلیمی ایستگاه هواشناسی مطالعه‌شده و اخذشده از مرکز اطلاعات و آمار سازمان هواشناسی کشور، با در نظر گرفتن یک دوره ۵۳ ساله (۲۰۱۴-۱۹۶۱) به‌عنوان دوره پایه تهیه شد و مدل بر اساس آن اجرا شد. پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی و قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی، مرحله سوم یا شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ اجرا شد.

نیاز اساسی برای اجرای این مدل، دو فایل با پسوند WG و Sce است. فایل اول همان داده‌های روزانه ایستگاه‌های مطالعه‌شده در دوره پایه است و فایل دوم از خروجی ۳ مدل گردش عمومی جو (Hadcm3, CNM3, NCCCSM) مطالعه‌شده در دوره مشابه با دوره پایه به دست آمد. در حقیقت در این مرحله مدل با استفاده از رفتار اقلیم در دوره پایه و ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو، پارامترهای اقلیمی آینده را در حد مقیاس منطقه مطالعه‌شده شبیه‌سازی می‌کند.

جدول ۲- مشخصات سناریوهای A1B و A2 انتشار (غلظت CO₂ در سناریو دوره پایه: 334ppm)

مأخذ: هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۰

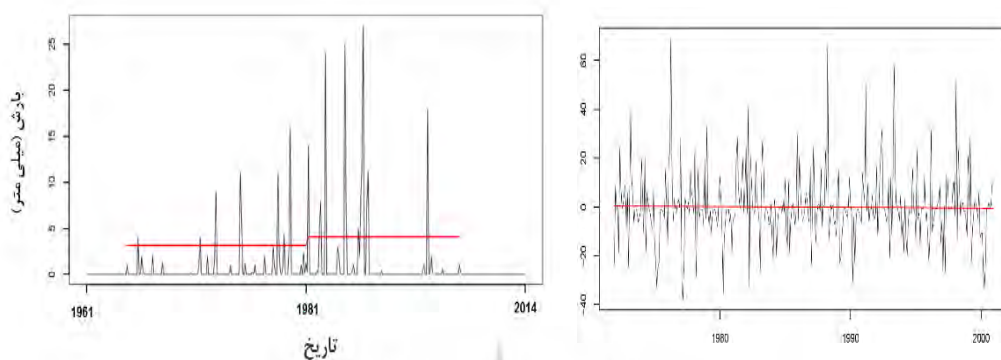
سناریو	فرض‌های کلیدی	غلظت CO ₂ (ppm)	
		۲۰۳۰-	۲۰۶۵-
		۲۰۱۱	۲۰۴۶
A1B (جهان غنی)	این سناریو با رشد اقتصادی بسیار سریع (۳٪ در سال)، رشد جمعیت پایین (۰/۲۷ در سال) و معرفی سریع فناوری‌های مؤثرتر و جدیدتر مشخص می‌شود. در مقیاس جهانی هم‌گرایی و ظرفیت‌سازی اقتصادی و فرهنگی وجود دارد.	۴۱۸	۵۴۱
A2 (جهان تفکیک شده)	هویت‌های فرهنگی مناطق مختلف را از هم تفکیک می‌کند که این امر جهان را ناهمگن‌تر می‌کند. رشد جمعیت بالا (۰/۸۳ درصد در سال) مورد تأیید است و تمرکز کمتر بر رشد اقتصادی (۱/۶۵ درصدی) و ثروت مادی وجود دارد.	۴۱۴	۵۴۵

۳. یافته‌های تحقیق

۳.۱. کنترل کیفی و همگنی داده‌ها

در زمان استفاده از داده‌های روزانه دما و بارش یک ایستگاه یا یک حوضه باید مطمئن بود که علاوه بر این‌که داده‌های ایستگاه از کیفیت بالایی برخوردارند، به طور غیرطبیعی ناهمگن نباشند. برای بررسی همگنی داده‌های روزانه بارش و RHtestsV3.r از بسته نرم‌افزاری RHtests_dlyPrcp می‌توان استفاده کرد. در این بسته نرم افزار جهت بررسی همگنی، داده‌های روزانه، ماهانه و سالانه دما و بارش (به جز داده‌های روزانه بارش) گنجانده شده است. این نرم‌افزار از یک مدل رگرسیون دو مرحله‌ای برای کنترل نقاط تغییر چندگانه که ممکن است در یک سری زمانی وجود داشته باشد، استفاده می‌کنند. همچنین بررسی همگنی داده‌های یک ایستگاه را نیز می‌توان با استفاده از یک سری داده که همگن است (سری مرجع) انجام داد. یا می‌توان بدون داشتن یک سری مرجع اقدام به بررسی همگنی داده‌ها کرد. در این پژوهش با توجه به عدم دسترسی به یک سری مرجع، در بررسی همگنی داده‌ها از روش دوم استفاده شد.

داده‌های ایستگاه مشهد دارای کیفیت مطلوبی است. نتایج همگنی داده‌های بارش و دما نیز نشان داد که این ایستگاه در مقیاس روزانه دارای داده‌های همگن است (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲- سرهای ناهنجاری پایه همراه با
برازش مدل رگرسیون چندگانه داده‌های
بارش ماهانه مشهد ۱۹۶۱-۲۰۱۴
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

۲.۳. بررسی توانمندی مدل‌های استفاده‌شده

جهت بررسی توانمندی سه مدل HadCM3، NCCCSM و CNCM3 در شبیه‌سازی داده‌های آب و هوایی به‌ویژه بارش از ضریب همبستگی بین داده‌های ماهانه بارش مشاهده‌شده و داده‌های شبیه‌سازی سه مدل طی دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۱۴ استفاده شد (جدول ۳). لازم به ذکر است که با توجه به عدم قطعیت زیاد داده‌های بارش در مقیاس روزانه از داده‌های بارش مدل‌های گردش عمومی جو در مقیاس ماهانه استفاده می‌شود. با وجود پایین بودن مقدار ضریب همبستگی موجود بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در آزمون معنی‌داری این ضریب، مشخص شد که با اطمینان ۹۹ بین این دو سری داده رابطه وجود دارد. در جدول شماره (۳) مشخصات مدل‌های اقلیمی استفاده‌شده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات مدل‌های اقلیمی و ضریب همبستگی ماهانه بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

مدل جهانی اقلیم	کشور	تفکیک شبکه	سناریوهای انتشار	ضریب همبستگی
HadCM3	انگلستان	$2/5 * 3/75^{\circ}$	SRA1B, SRA2, SRB1	۰/۵۶
NCCCSM3	آمریکا	$1/4 * 1/4^{\circ}$	SRA1B, SRA2, SRB1	۰/۶۱
CNCM3	کانادا	$2/8 * 2/8^{\circ}$	SRA1B	۰/۶۲

در بررسی توانمندی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های آب و هوایی می‌توان مقادیر میانگین، واریانس و انحراف معیار متغیرهای اقلیمی را با استفاده از آزمون t و F مقایسه کرد (زمنف، ۲۰۰۸، ص. ۲۰۳). در این رابطه، ابتدا با استفاده از ۵۳ سال داده دیدبانی- شده در ایستگاه مشهد (۲۰۱۴-۱۹۶۱) پارامترهای اقلیمی بارش ایستگاه مشهد با استفاده از توزیع نیمه‌تجربی در مدل LARS-WG محاسبه شد. سپس مدل برای تولید ۸۰ سال داده بر اساس پارامترهای به دست آمده بر اساس سری داده‌های مشاهده‌شده ایستگاه اجرا شد. با تغییر عدد تصادفی این عمل چندین بار اجرا شد تا نتایج آماری قابل قبولی به دست آمد. نتایج حاصل از آزمون t برای این ایستگاه نشان داد که بین میانگین شبیه‌سازی شده بارش با مقدار واقعی آن اختلاف معنی‌داری در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ وجود ندارد. همچنین، ضرایب همبستگی، اریبی و میانگین خطای مطلق در سری ماهانه داده‌های دیدبانی شده و شبیه‌سازی- شده نیز برای این ایستگاه محاسبه شد (جدول ۴). در ادامه مقایسه‌ای بین مقادیر میانگین، انحراف معیار و بیشینه بارش ماهانه دو سری مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انجام شد که در شکل‌های (۴، ۵ و ۶) ارائه شده است.

جدول ۴- مقایسه مقادیر مدل‌سازی مدل LARS-WG با مقادیر واقعی در دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۴

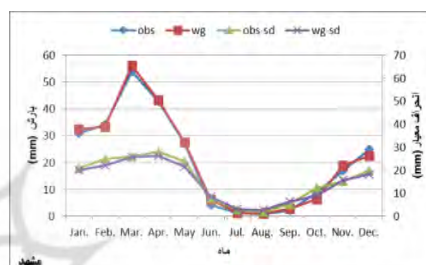
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

ایستگاه	BIAS	MAE	همبستگی
مشهد	۰/۳	۱/۲	۰/۹۹۶

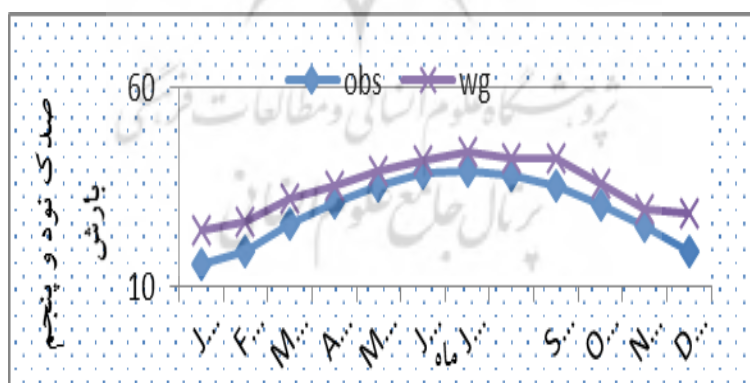
با واسنجی مدل LARS-WG و اطمینان از قابلیت آن در شبیه‌سازی مطلوب سری داده‌ها برای ایستگاه مشهد، این مدل برای دو دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ با استفاده از خروجی سه مدل گردش عمومی جو Hadcm3، NCCCSM و CNcm3 تحت سناریوی A2 و A1B (با تولید ۱۰۰ سال داده روزانه بارش) اجرا شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار RClimDex نمایه‌های حدی محاسبه شد T در ادامه میانگین هر کدام از نمایه‌ها برای دوره پایه و دو دوره آتی به دست آمد.



شکل ۵- مقایسه میانگین بیشینه بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (۲۰۱۴-۱۹۶۱) مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



شکل ۴- مقایسه میانگین و انحراف معیار بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (۲۰۱۴-۱۹۶۱) مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



شکل ۶- مقایسه صدک نود و پنجم بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (۲۰۱۴-۱۹۶۱) مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

۳.۳. محاسبه نمایه حدی بارش

در جداول (۶،۵) نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو تحت دو سناریو انتشار A₂ و A₁B در دو دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ نسبت به دو دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۶۱ ارائه شده است.

جدول ۵- نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی جو تحت دو

سناریوی انتشار A₂، A₁B طی دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

مشهد ۲۰۱۱-۲۰۳۰		PRCPT T	R10m m	R20 mm	R95p	R99 p	RXId ay	Rx5da y	SDI I
A1 B	دوره پایه (WG)	۲۳۹/۴۸	۷/۲۴	۱/۶۵	۵۰/۱۱	۱۴/۴۱	۲۹/۱۷	۴۱/۳۴	۶/۵۴
	CNCM 3	۲۰۷/۵۶	۵/۸۲	۱/۱۶	۴۳/۵۵	۱۲/۲۰	۲۴/۳۹	۳۴/۹۳	۵/۸۱
	HadC M3	۲۴۸/۴۰	۷/۸۰	۱/۶۰	۵۰/۱۰	۱۵/۱۰	۲۹/۱۰	۴۲/۴۰	۶/۶۰
	NCCC SM	۲۴۴/۹۴	۷/۰۶	۱/۷۲	۵۲/۴۸	۱۵/۶۸	۲۹/۸۵	۴۰/۶۴	۶/۴۹
A2	CNCM 3	۲۵۵/۶۵	۷/۷۶	۱/۹۰	۵۵/۷۶	۱۷/۰۸	۳۱/۸۳	۴۳/۱۵	۶/۷۹
	HadC M3	۲۴۳/۸۲	۷/۵۰	۱/۵۶	۴۹/۹۶	۱۴/۹۶	۲۹/۳۶	۴۰/۹۵	۶/۵۷
	NCCC SM	۲۴۹/۳۴	۷/۵۸	۱/۷۶	۵۱/۷۹	۱۵/۷۷	۲۹/۲۷	۴۰/۸۹	۶/۷۱

جدول ۶- نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی جو تحت دو

سناریوی انتشار A₂، A₁B طی دوره آماری ۲۰۶۵-۲۰۴۶

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

مشهد ۲۰۴۶-۲۰۶۵		PRCPT OT	R10m m	R20 mm	R95p	R99 p	RXId ay	Rx5da y	SDI I
A1 B	پایه دوره (WG)	۲۳۹/۴۸	۷/۲۴	۱/۶۵	۵۰/۱۱	۱۴/۴۱	۲۹/۱۷	۴۱/۳۴	۶/۵۴
	CNCM3	۲۵۰/۶۶	۷/۵۸	۱/۶۸	۵۴/۰۰	۱۶/۹۳	۳۱/۲۹	۴۱/۹۱	۶/۶۵
	HadCM 3	۲۱۸/۵۵	۶/۱۸	۱/۲۲	۴۳/۸۷	۱۳/۱۲	۲۶/۶۷	۳۷/۳۶	۶/۱۵

ادامه جدول ۶

مشهد ۲۰۶۵-۲۰۴۶		PRCPT OT	R10m m	R20 mm	R95p	R99 p	RX1d ay	Rx5da y	SDI I
	NCCCS M	۲۲۵/۹۳	۶/۴۶	۱/۲۶	۴۷/۴۸	۱۴/۰۰	۲۷/۵۸	۳۷/۵۳	۶/۱۵
A2	CNCM3	۲۲۸/۱۷	۶/۲۰	۱/۴۰	۴۷/۲۰	۱۳/۸۹	۲۶/۴۹	۳۶/۹۹	۶/۰۷
	HadCM 3	۲۴۹/۶۶	۷/۶۶	۱/۸۸	۵۳/۳۹	۱۵۵۸	۲۷/۸۱	۳۸/۷۹	۶/۶۷
	NCCCS M	۲۳۲/۲۷	۶/۷۰	۱/۴۶	۴۸/۷۴	۱۳/۰۹	۲۷/۹۴	۳۸/۰۴	۶/۲۸

۳.۴. محاسبه درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش

در جداول (۷ و ۸) محاسبه درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد ارائه شده است.

جدول ۷- درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش مشهد با استفاده از مدل‌های خروجی گردش

عمومی جو تحت سناریو A1B و A2 طی دوره آماری ۲۰۳۰-۲۰۱۱

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

مشهد ۲۰۳۰-۲۰۱۱		PRCPT OT	R10m m	R20 mm	R95p	R99p	RX1d ay	Rx5d ay	S DII
	میانگین سناریوی A1B	۲۳۳/۶۳	۶/۸۹	۱/۴۹	۴۸/۷۱	۱۴/۳۳	۲۷/۷۸	۳۹/۳۲	۶/۳۰
	میانگین سناریوی A2	۲۴۹/۶۰	۷/۶۱	۱/۷۴	۵۲/۵۰	۱۵/۹۴	۳۰/۱۵	۴۱/۶۶	۶/۶۹
درصد تفاوت با دوره پایه	CNCM3	-۱۳/۳۳	-۱۹/۵۹	-۲۹/۷۰	-۱۳/۰۹	-۱۵/۲۹	-۱۶/۳۶	-۱۵/۵۲	-۱۱/۲۲
	HadCM 3	۳/۷۳	۷/۷۷	-۳/۰۳	-۰/۰۲	۴/۸۱	-۰/۲۳	۲/۵۶	۰/۹۲
	NCCCS M	۲/۲۸	-۲/۴۵	۴/۲۴	۴/۷۲	۸/۸۳	۲/۳۳	-۱/۷۰	-۰/۷۰
	CNCM3	۶/۷۵	۷/۲۲	۱۵/۱۵	۱۱/۲۷	۱۸/۵۲	۹/۱۲	۴/۳۷	۳/۸۵
	HadCM 3	۱/۸۱	۳/۶۳	-۵/۳۰	-۰/۳۱	۳/۸۶	۰/۶۶	-۰/۹۵	۰/۴۰
	NCCCS M	۴/۱۲	۴/۷۳	۶/۶۷	۳/۳۴	۹/۴۴	۰/۳۷	-۱/۰۸	۲/۶۳

ادامه جدول ۷

مشهد ۲۰۱۱-۲۰۳۰		PRCPT OT	R10m m	R20m m	R95 p	R99 p	RX1da y	Rx5da y	SDI I
	میانگین سناریوی A2	۴/۲۳	۵/۱۹	۵/۵۱	۴/۷۷	۱۰/۶۱	۳/۳۸	۰/۷۸	۲/۲۹
تفاوت مدل‌ها	CNCM3	-۳۱/۹۲	-۱/۴۲	-۰/۴۹	-۶/۵۶	-۲/۲۰	-۴/۷۷	-۶/۴۱	-۰/۷۳
	HadCM3	۸/۹۲	۰/۵۶	-۰/۰۵	-۰/۰۱	۰/۶۹	-۰/۰۷	۱/۰۶	۰/۰۶
	NCCCSM	۵/۴۷	-۰/۱۸	۰/۰۷	۲/۳۶	۱/۲۷	۰/۶۸	-۰/۷۰	-۰/۰۵
	CNCM3	۱۶/۱۷	۰/۵۲	۰/۲۵	۵/۶۵	۲/۶۷	۲/۶۶	۱/۸۱	۰/۲۵
	HadCM3	۴/۳۴	۰/۲۶	-۰/۰۹	-۰/۱۶	۰/۵۶	۰/۱۹	-۰/۳۹	۰/۰۳
	NCCCSM	۹/۸۶	۰/۳۴	۰/۱۱	۱/۶۸	۱/۳۶	۰/۱۱	-۰/۴۵	۰/۱۷
	میانگین سناریوی A1B	-۵/۸۵	-۰/۳۴	-۰/۱۶	-۱/۴۰	-۰/۰۸	-۱/۳۹	-۲/۰۲	-۰/۲۴
میانگین سناریوی A2	۱۰/۱۳	۰/۳۸	۰/۰۹	۲/۳۹	۱/۵۳	۰/۹۹	۰/۳۲	۰/۱۵	

جدول ۸- درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش مشهد با استفاده از مدل‌های خروجی گردش

عمومی جو تحت سناریو A1B و A2 طی دوره آماری ۲۰۴۶-۲۰۶۵

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

مشهد ۲۰۴۶-۲۰۶۵		PRCPT TOT	R10m m	R20m m	R95p	R99p	RX1da ay	Rx5da y	SDI I
	میانگین سناریوی A1B	۲۳۱/۷۱	۶/۷۴	۱/۳۹	۴۸/۴۵	۱۴/۶۸	۲۸/۵۱	۳۸/۹۳	۶/۳۲
	میانگین سناریوی A2	۲۳۶/۷۰	۶/۸۵	۱/۵۸	۴۹/۷۸	۱۴/۱۹	۲۷/۴۲	۳۷/۹۴	۶/۳۴
	CNCM3	۴/۶۷	۴/۷۳	۱/۸۲	۷/۷۵	۱۷/۵۴	۷/۲۸	۱/۳۶	۱/۷۱
	HadCM 3	-۸/۷۴	-۱۴/۶۱	-۲۶/۰۶	-۱۲/۴۵	-۸/۹۲	-۸/۵۵	-۹/۶۳	-۵/۹۳
	NCCCS M	-۵/۶۶	-۱۰/۷۴	-۲۳/۶۴	-۵/۲۵	-۲/۸۶	-۵/۴۴	-۹/۲۱	-۵/۹۶

ادامه جدول ۸

مشهد ۲۰۶۵-۲۰۴۶		PRCPT OT	R10m m	R20m m	R95p	R99p	RX1d ay	Rx5da y	SDII
تفاوت محلی	CNC M3	-۴/۷۲	-۱۴/۳۴	-۱۵/۱۵	-۵/۸۲	-۳/۵۹	-۹/۱۷	-۱۰/۵۴	-۷/۲۲
	HadC M3	۴/۲۵	۵/۸۴	۱۳/۹۴	۶/۵۴	۸/۱۷	-۴/۶۴	-۶/۱۸	۱/۹۹
	NCC CSM	-۳/۰۱	-۷/۴۳	-۱۱/۵۲	-۲/۷۴	-۹/۱۳	-۴/۲۰	-۷/۹۹	۸/۰۱
	میانگین سناریوی A1B	-۳/۲۴	-۶/۸۷	-۱۵/۹۶	-۳/۳۱	۱/۹۲	-۲/۲۴	-۵/۸۳	-۳/۳۹
	میانگین سناریوی A2	-۱/۱۶	-۵/۳۱	-۴/۲۴	-۰/۶۷	-۱/۵۲	-۶/۰۰	-۸/۲۴	-۳/۰۸
	CNC M3	۱۱/۱۸	۰/۳۴	۰/۰۳	۳/۸۹	۲/۵۳	۲/۱۲	۰/۵۶	۰/۱۱
	HadC M3	-۲۰/۹۳	-۱/۰۶	-۰/۴۳	-۶/۲۴	-۱/۲۹	-۲/۴۹	-۳/۹۸	-۰/۳۹
	NCC CSM	-۱۳/۵۴	-۰/۷۸	-۰/۳۹	-۲/۶۳	-۰/۴۱	-۱/۵۹	-۳/۸۱	-۰/۳۹
	CNC M3	-۱۱/۳۱	-۱/۰۴	-۰/۲۵	-۲/۹۲	-۰/۵۲	-۲/۶۷	-۴/۳۶	-۰/۴۷
	HadC M3	۱۰/۱۸	۰/۴۲	۰/۲۳	۳/۲۸	۱/۱۸	-۱/۳۵	-۲/۵۶	۰/۱۳
NCC CSM	-۷/۲۱	-۰/۵۴	-۰/۱۹	-۱/۳۷	-۱/۳۲	-۱/۲۲	-۳/۳۰	-۰/۲۶	
میانگین سناریوی A1B	-۷/۷۷	-۰/۵۰	-۰/۲۶	-۱/۶۶	۰/۲۸	-۰/۶۵	-۲/۴۱	-۰/۲۲	
میانگین سناریوی A2	-۲/۷۸	-۰/۳۸	-۰/۰۷	-۰/۳۴	-۰/۲۲	-۱/۷۵	-۳/۴۱	-۰/۲۰	

۳. ۴. ۱. مقدار سالانه بارش در روزهای تر^۱

مطابق جدول (۷) طی دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ درصد تغییرات این نمایه تحت مدل CNCM₃ و براساس سناریوی A₁B به میزان ۱۳ درصد کاهش می‌یابد و در بقیه مدل‌ها تحت هر دو سناریو این نمایه افزایش یافته است به طوری که میانگین این نمایه تحت سناریو A₁B، ۵/۸ میلی‌متر کاهش یافته است؛ ولی تحت سناریوی A₂ به میزان ۱۰/۱ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش دارد. طی دوره آتی ۲۰۶۵-۲۰۴۶ میانگین درصد تغییرات این نمایه براساس سناریوی A₂ و A₁B به ترتیب ۳ و ۱ درصد کاهش داشته است که میزان این کاهش تحت سناریو A₁B، ۷/۸ و تحت سناریو A₂، ۲/۸ میلی‌متر نسبت به دوره پایه است (جدول ۸).

۳. ۴. ۲. روزهای با بارش سنگین^۲

همان‌طور که در جداول (۷، ۸) مشاهده می‌کنید به طور میانگین احتمال می‌رود تعداد روزهای با بارش سنگین طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریو A₁B، ۵ درصد کاهش؛ ولی تحت سناریو A₂، ۵ درصد افزایش یابد که از بین سه مدل مطالعه‌شده مدل CNCM₃ بیشترین درصد کاهش این نمایه؛ یعنی ۲۰ درصد را داراست؛ البته میانگین میزان افزایش تعداد این روزها قابل اغماض است، به طوری که تحت سناریو A₂ طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ به میزان ۰/۴ روز افزایش می‌یابد و پیش‌بینی می‌شود در طی دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ به طور میانگین تعداد روزها با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر کاهش یابد که کاهش این نمایه تحت سناریو A₁B به میزان ۰/۴ و تحت سناریو A₂ به میزان ۰/۵ روز است و از بین سه مدل HadCM₃ بیشترین درصد کاهش؛ یعنی ۱۵ درصد نسبت به دوره پایه را دارد.

۳. ۴. ۳. روزهای با بارش ابر سنگین^۳

این نمایه نشان‌دهنده تعداد روزهای با بارش ابر سنگین است. پیش‌بینی می‌شود طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ میانگین درصد تغییرات این نمایه در سه مدل تحت سناریو A₁B، ۱۰ درصد کاهش و تحت سناریو A₂، ۶ درصد افزایش یابد که بیشترین درصد کاهش تحت سناریو

1. Annual amount of precipitation in more days (PRCPTOT)

2. Number of heavy precipitation days(R10mm)

3. Number of very heavy precipitation days(R20mm)

A_1B مربوط به مدل $CNCM_3$ به میزان ۳۰ درصد است (جدول ۷)؛ ولی در طی دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ میانگین درصد تغییرات این نمایه تحت سناریو A_1B ، ۱۶ درصد و تحت سناریو A_2 ، ۴ درصد کاهش می‌یابد که بیشترین کاهش مربوط به سناریو A_1B بر اساس مدل $Hadcm_3$ به میزان ۲۶ درصد است.

۳. ۴. ۴. سهم بارش کل سالانه به علت بارش‌های بیش از صدک ۹۹ و ۹۵ بارش دوره پایه

این دو نسبت با محاسبه میانگین مقدار بارش به علت روزهای بسیار تر و بیش از اندازه تر طی دوره پایه و دو دوره پیش‌بینی و تقسیم آن بر میانگین بارش طی دوره‌های یاد شده به دست می‌آید.

همان‌طور که در جداول (۷، ۸) مشاهده می‌شود، میانگین میزان تغییرات این نمایه تحت سناریوی A_1B و A_2 در هر دو دوره کاهش یا افزایش ناچیزی داشته؛ ولی تحت سناریوی A_2 طی دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ میانگین نمایه صدک ۹۹، ۱۱ درصد و میانگین نمایه صدک ۹۵، ۵ درصد افزایش را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که قابل ملاحظه است. بنابراین، میانگین مقدار نمایه‌های صدک ۹۵ و صدک ۹۹ تحت سناریو A_2 در طی دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ به ترتیب ۲/۴ و ۱/۵ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش دارد؛ ولی احتمال می‌رود که در طی دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ شاهد کاهش این نمایه نسبت به دوره پایه باشیم، به طوری که میانگین این نمایه در حدود یک میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد.

۳. ۴. ۵. حداکثر بارش یک‌روزه^۳

همان‌طور که در جداول (۷ و ۸) مشاهده می‌شود، پیش‌بینی می‌شود میانگین میزان تغییرات این نمایه بر اساس سناریو A_1B نسبت به دوره پایه تحت سه مدل مطالعه‌شده در دو دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ به ترتیب ۱/۴ و ۰/۷ میلی‌متر کاهش و تحت سناریو A_2 در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۱ میلی‌متر افزایش و دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶، ۱/۸ میلی‌متر کاهش یابد که می‌توان نتیجه گرفت در حداکثر میزان بارش یک‌روزه تفاوت محسوسی مشاهده نمی‌شود.

1. Rain 99 percential
2. Rain 95 percential
3. Maximum one-day precipitation (Rx1day)

۳. ۴. ۶. حداکثر بارش پنج‌روزه^۱

با توجه به این‌که این نمایه بیانگر تداوم فعالیت سامانه‌های بارانزا و یا ناپایداری در دوره‌های چند روزه است. بنابراین، نمایه‌ای مناسب برای سیل محسوب می‌شود. نتایج به‌دست آمده در مقیاس سالانه نشان می‌دهد طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ میانگین سه مدل این نمایه تحت سناریوی A1B کاهش یافته و تحت سناریوی A2 شاهد افزایش آن می‌باشیم؛ ولی در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ میانگین نمایه تحت هر دو سناریو کاهش را نشان می‌دهد (جداول ۷ و ۸).

۳. ۴. ۷. نمایه ساده شدت روزانه^۲

این نمایه ساده شدت روزانه بارش را نشان می‌دهد. این نسبت نشان‌دهنده نسبت بارش کل سالانه به تعداد روزهای با بارش بیش از ۱ میلی‌متر است. نتایج حاصل از ریزگردانی سه مدل در ایستگاه مشهد نشان‌دهنده تغییرات بسیار نامحسوس این نمایه است؛ به‌طوری‌که میانگین تغییرات این نمایه در هر دو دوره آتی حداکثر ۰/۲ میلی‌متر کاهش یا افزایش می‌یابد. در جدول ۹ و ۱۰ درصد تغییرات نمایه‌های بررسی‌شده نسبت به دوره پایه تحت سناریو A1B و A2 طی دوره‌های آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ نشان داده شده است.

جدول ۹- درصد تغییرات نمایه‌های بررسی‌شده نسبت به دوره پایه تحت سناریوی A1B

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

مدل				دوره	نمایه
CNCM3	HadCM3	NCCCSM	Multi-Model		
۱۳/۳-	۳/۷	۲/۳	۲/۴-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	PRC
۴/۷-	۸/۷-	۵/۷-	۳/۲-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۹/۶-	۷/۸	۲/۵-	۴/۸-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R10mm
۴/۷	۱۴/۶-	۱۰/۷-	۶/۹-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۲۹/۷-	۳-	۴/۲	۹/۵-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R20mm
۱/۸	۲۶/۱-	۲۳/۶-	۱۶-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۳/۱-	۰	۴/۷	۲/۸-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R95P
۷/۸	۱۲/۴-	۵/۲-	۳/۳-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	

1. Maximum five-day precipitation(Rx5day)

2. Simple daily inten sity index(SDII)

ادامه جدول ۹

مدل				دوره	نمایه
CNCM3	HadCM3	NCCCSM	Multi-Model		
۱۵/۳-	۴/۸	۸/۸	۰/۶-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R99P
۱۷/۵	۸/۹-	۲/۹-	۱/۹	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۶/۴-	۰/۲-	۲/۳	۴/۸-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	Rx1day
۷/۳	۸/۶-	۵/۴-	۲/۲-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۵/۵-	۲/۶	۱/۷-	۴/۹-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	Rx5day
۱/۴	۹/۶-	۹/۲-	۵/۸-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۱/۲-	۰/۹	۰/۷-	۳/۷-	۲۰۱۱-۲۰۳۰	SDII
۱/۷	۵/۹-	۶-	۳/۴-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	

جدول ۱۰- درصد تغییرات نمایه‌های بررسی شده نسبت به دوره پایه تحت سناریوی A2

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

مدل				دوره	نمایه
CNCM3	HadCM3	NCCCSM	Multi-Model		
۶/۸	۱/۸	۴/۱	۴/۲	۲۰۱۱-۲۰۳۰	PRC
۴/۷-	۴/۳	۳۰-	۱/۲-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۷/۲	۳/۶	۴/۷	۵/۲	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R10mm
۱۴/۳-	۵/۸	۷/۴-	۵/۳-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۵/۲	۵/۳-	۶/۷	۵/۵	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R20mm
۱۵/۲-	۱۳/۹	۱۱/۵-	۴/۲-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۱/۳	۰/۳-	۳/۳	۴/۸	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R95P
۵/۸-	۶/۵	۲/۷-	۰/۷-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۱۸/۵	۳/۹	۹/۴	۱۰/۶	۲۰۱۱-۲۰۳۰	R99P
۳/۶-	۸/۲	۹/۱-	۱/۵-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۹/۱	۰/۷	۰/۴	۳/۴	۲۰۱۱-۲۰۳۰	Rx1day
۹/۲-	۴/۶-	۴/۲-	۶-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	
۴/۴	۱-	۱/۱-	۰/۸	۲۰۱۱-۲۰۳۰	Rx5day
۱۰/۵-	۶/۲	۸-	۸/۲-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	

ادامه جدول ۱۰

مدل				دوره	نمایه
CNCM3	HadCM3	NCCCSM	Multi-Model		
۳/۹	۰/۴	۲/۶	۲/۳	۲۰۱۱-۲۰۳۰	SDII
۷/۲-	۲	۴-	۳/۱-	۲۰۴۶-۲۰۶۵	

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به اثرانکارناپذیر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی بارش، ارائه سناریوهای این رویدادها جهت برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر برای بخش‌های مختلف اقتصادی-اجتماعی ضروری به نظر می‌رسد. شهرهای در حال توسعه‌ای؛ مانند مشهد به علت زیرساخت‌های شهری پیچیده، مناطق حاشیه‌ای با ساختار غیر استاندارد شهری و تغییرات در الگوهای بارش به علت تغییر اقلیم، به طور روزافزونی در معرض خطر سیل قرار دارند.

در این پژوهش با هدف ارائه دورنمایی از این رویدادها، تأثیر تغییرات میزان گازهای گل‌خانه‌ای بر مبنای سناریوی A₁B و A₂ بر نمایه‌های فوق به صورت درصد و مقدار تغییر آن‌ها نسبت به دوره پایه بررسی شد (جدول ۹ و ۱۰). نتایج نشان از کاهش میانگین اکثر نمایه‌ها طی دو دوره تحت تأثیر سناریو A₁B است (جدول ۹) که این امر ممکن است به دلیل فرآیندهای برگشتی رطوبت و بارندگی باشد و تحت افزایش گازهای گل‌خانه‌ای انتظار می‌رود به دلیل افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر، منطقه مطالعه شده خشک‌تر شود؛ اما نکته قابل تأمل این است که درصد افزایش احتمالی بارش میانگین نمایه صدک ۹۵ تحت سناریو A₁B طی دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ افزایش یافته که بیشترین افزایش این نمایه متعلق به مدل CNCM3 به میزان ۱۸ درصد نسبت به دوره پایه است؛ ولی همان‌طور که در (جدول ۱۰) مشاهده می‌کنید، نتایج نشان از افزایش تمام نمایه‌های مطالعه شده هر سه مدل تحت سناریوی A₂ در دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ است؛ به طوری که میانگین بیشترین این افزایش متعلق به نمایه صدک ۹۹ به میزان ۱۱ درصد نسبت به دوره پایه است. از آن‌جا که نمایه‌های صدک ۹۵ و ۹۹ معیارهای مناسبی برای بارندگی‌های حدی به شمار می‌روند. بنابراین، می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش بارش‌های حدی در نتیجه قدرت گازهای گل‌خانه‌ای (بر مبنای میزان فرض شده

مقدار این گازها در سناریوی A₂ رخ خواهد داد که این امر به‌ویژه در دوره اول قابل ملاحظه است.

افزایش نمایه‌های روزهای بارش سنگین و روزهای بارش ابرسنگین تحت سناریوی A₂ در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ نیز قابل توجه است. به نحوی که به‌طور میانگین این دو نمایه تحت سناریو A₂ در حدود ۵ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابند با توجه به این‌که در اغلب اقلیم‌ها این دو نمایه ارتباط زیادی با جمع بارش فصلی و سالیانه دارند. بنابراین، با افزایش بارش در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تعداد روزهای خشک متوالی تا حدودی کاهش خواهد یافت و انتظار می‌رود طی این دوره شکل بارش‌ها از حالت ملایم به حالت رگباری تبدیل شود.

نمایه ساده شدت روزانه نیز تنها طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریوی A₂ افزایش خواهد یافت که این امر با پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته مبنی بر افزایش شدت بارندگی در اغلب اقلیم‌ها بر اثر افزایش قدرت گازهای گل‌خانه‌ای مطابقت دارد.

بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده، به احتمال بسیار زیاد بارش در عرض‌های بالا افزایش می‌یابد. همچنین، به احتمال بسیار زیاد فراوانی موج‌های گرمایی، رویدادهای حدی گرمایی و بارش‌های حدی فزونی خواهند یافت. نتایج حاصل از این پژوهش نیز نشان‌دهنده افزایش میزان کل بارش با دامنه متفاوت بر حسب مدل استفاده‌شده طی دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ است. همچنین، این نتایج با برخی از نتایج به دست آمده از سایر پژوهش‌ها (به عنوان مثال، انحراف معیار مثبت در شدت بارش در منطقه شمال شرق ایران) هم‌خوانی دارد. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نمایه‌های سیل؛ همچون صدک ۹۵ و صدک ۹۹ و حداکثر بارش ۵ روزه، در طی دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ برخی زیرساخت‌ها و مناطق شهری (به‌ویژه مناطق حاشیه‌ای شهر مشهد) در معرض خطر آسیب‌پذیری بالایی نسبت به این رخداد قرار خواهند گرفت. با توجه به اهمیت موضوع پیشنهاد می‌شود که مسئولین زمینه انجام مطالعات بیشتری؛ همانند استفاده از روش‌های دیگر ریزمقیاس‌نمایی تحت سناریوهای جدید را در این عرصه فراهم کنند؛ چراکه لحاظ چنین نتایجی در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در بخش خدمات شهری (در راستای مدیریت ریسک بلایای طبیعی) ضروری به نظر می‌رسد.

کتاب‌نامه

۱. اشرف، ب.، موسوی بایگی، م.، کمالی، غ. و داوری، ک. (۱۳۹۰). پیش‌بینی نیاز آبی چغندر قند در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل زیرمقیاس‌کننده LARS-WG (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۵ (۵)، ۱۱۹۶-۱۱۸۴.
 ۲. بابائیان، ا. و نجفی نیک، ز. (۱۳۸۴). *ارزیابی تغییر اقلیم استان خراسان رضوی در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل GCM*. گزارش پروژه پژوهش‌کده اقلیم‌شناسی و سازمان هواشناسی کشور.
 ۳. براتی، غ. و جهادی طرقي، م. (۱۳۷۸). تعیین روند تغییرات دما و بارش شهر مشهد طی دوره آماری ۱۹۹۴-۱۹۵۱. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، ۵۵-۵۴ صص ۱۶۵-۱۵۱.
 ۴. رحیم‌زاده، ف.، عسکری، ا.، فتاحی، ا.، محمدیان، ن. و تقی‌پور، ا. (۱۳۸۸). روند نمایه‌های فرین اقلیمی دما در ایران طی دوره ۲۰۰۳-۱۹۵۱. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، ۲۲ (۲)، پیاپی ۱۹۳، ۱۴۴-۱۱۹.
 ۵. عساکره، ح. (۱۳۸۹). تحلیل تغییرات بارش‌های فرین شهر زنجان. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱ (۱ و ۲)، ۱۰۰-۸۹.
 ۶. عسکری، ا. و رحیم‌زاده، ف. (۱۳۸۵). مطالعه تغییرپذیری بارش دهه‌های اخیر ایران. *مجله پژوهشی پژوهش‌های جغرافیایی*، ۵۸، ۸۰-۶۷.
 ۷. گل محمدی، م. و مساح بوانی، ع. (۱۳۹۰). بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آتی تحت‌تأثیر تغییر اقلیم. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۵ (۲)، ۳۲۶-۳۱۵.
 ۸. مساح، ع. و سادات آشفته، پ. (۱۳۸۶). بررسی اهمیت موضوع تغییر اقلیم در جهان و تأثیر آن بر سیستم‌های مختلف. *کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب*، ۲۴ بهمن ماه ۱۳۸۶. (صص. ۱۴-۱). تهران: کمیته ملی آبیاری و زهکشی.
9. Bonsal, B. R., Zhang, X., Vincent, L. A., & Hogg, W. D. (2001). Characteristics of daily and extreme temperature over Canada. *Journal of Climate*, 14, 1959-1976

10. DeaGaetano, A. T. (1996). Recent trends in maximum and minimum temperature threshold exceedances in Northern United States. *Journal of Climate*, 9, 1646-1657.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2010). *Meeting report: IPCC expert meeting on assessing and combining multi model climate projections*. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research.
12. Plummer, N., Salinger, M. J., Nicholls, N., Suppiah, R., Hennessy K.J., ... Lough, J. M. (1999). Changes in climate extremes over the Australian region and New Zeland during the twentieth century. *Climate Change*, 42, 183-202.
13. Semenov, M. (2008). Simulation of extreme weather events by stochastic weather generator. *Climate Research*, 35, 203-212.
14. Semenov, M. A., & Barrow, E. M. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35, 397-414.
15. Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 4, 1-14 .
16. World Meteorological Organization. (2011). *Weather extremes in a changing climate report: Hindsight on foresight*. Retrieved from [https:// www.preventionweb.net/publications/view/17033](https://www.preventionweb.net/publications/view/17033)
17. Zhai, P. M., Sun, A., Ren, F., Liu, X., Gao, B., & Zhang, Q. (1999). Changes of climate extremes in China. *Climate Change*, 42, 203-218.