

تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر روند داده‌های بارش ایستگاه مرند

میلاد مرادزاده^{۱*}، یعقوب دین‌پژوه^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

Miladmoradzadeh1997@gmail.com

۲- استاد مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

dinpashoh@yahoo.com

چکیده

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت منابع آب است که به‌طور مستقیم بر میزان بارش و توزیع فصلی آن تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، روند تغییرات بارش در شهرستان مرند بررسی شده و تأثیر تغییر اقلیم بر میزان بارش در آینده پیش‌بینی شده است. به این منظور، داده‌های ثبت‌شده طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ گردآوری و پس از کنترل کیفی و حذف نواقص آماری، از مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی بارش در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین بارش سالانه در دوره پایه ۳۷۷ میلی‌متر بوده و در آینده ممکن است بین ۳۸۰ تا ۳۹۵ میلی‌متر تغییر کند. بیشترین تغییرات در سناریوی SSP5-8.5 مشاهده شد که در آن بارش زمستانی تا ۱۵ درصد افزایش و بارش تابستانی تا ۲۰ درصد کاهش یافت. همچنین، بارندگی در ماه‌های مارس و آوریل افزایش ۱۰ درصدی را نشان داد، درحالی‌که در ماه‌های ژوئن تا آگوست، کاهش ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متری بارش پیش‌بینی شد. این تغییرات می‌تواند منجر به افزایش خطر سیلاب‌های زمستانی و تشدید خشکسالی‌های تابستانی شود که چالش‌های جدیدی را برای مدیریت منابع آب منطقه ایجاد خواهد کرد. این پژوهش نشان می‌دهد که اتخاذ رویکردهای مدیریتی مناسب برای کنترل سیلاب‌ها، استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری و برنامه‌ریزی برای ذخیره‌سازی آب در فصل‌های پربارش، نقش مهمی در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم خواهد داشت. در نهایت، تدوین راهبردهای پایدار در بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب، برای افزایش تاب‌آوری منطقه مرند در برابر تغییرات اقلیمی، ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، پیش‌بینی بارش، LARS-WG، سناریوهای اقلیمی، بارندگی، شهرستان مرند

۱- مقدمه

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی است که بر متغیرهای اقلیمی همچون بارش تأثیر گذاشته و موجب اختلال در الگوی توزیع بارش، کاهش منابع آب و افزایش خشک‌سالی در بسیاری از مناطق شده است. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر الگوی توزیع فصلی بارش به‌ویژه در مناطقی مانند مرند که به‌شدت به منابع آب سطحی و زیرزمینی وابسته هستند، ضروری است. مطالعات داخلی و خارجی متعددی تلاش کرده‌اند تا ابعاد این پدیده و راهکارهای مدیریت سازگار با آن را تبیین نمایند. که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند [1].

مطالعاتی که بر روی تأثیر تغییر اقلیم بر الگوی توزیع بارش صورت گرفته نشان می‌دهند که تغییر اقلیم باعث تغییر در توزیع مکانی و زمانی بارش شده است. بر اساس یافته‌های احمدی و همکاران (۱۳۹۶)، تغییر اقلیم در مناطق سردسیر ایران موجب کاهش بارش زمستانه و بهاره و افزایش بارش‌های رگباری کوتاه‌مدت شده است.

میان‌آبادی و داوری (۱۴۰۲) با بررسی روند تغییرات بارش و دما در ایران نشان دادند که تغییرات اقلیمی منجر به کاهش بارش سالانه و تغییر چشمگیر در توزیع فصلی بارش شده است و همراه با افزایش دما، بروز خشکسالی‌های متوالی را تشدید کرده است. صدریان‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) با داده‌های بارش و دما (۱۹۸۵-۲۰۱۸)، مدل CanESM2 و نرم‌افزار SDSM 5.3 نشان داد که تغییر اقلیم باعث افزایش بارش بارانی و کاهش بارش برفی شده و منابع آبی را تهدید می‌کند. عزیزی و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد شبیه‌سازی داده‌های بارش و دما با استفاده از مدل LARS-WG، در بازه (۲۰۲۱-۲۰۵۰) را تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 بررسی و نتایج نشان داد که تغییر اقلیم باعث افزایش ۱/۳ درجه‌ای دما، تغییر در الگوی بارش و تشدید خشکسالی در منطقه خواهد شد. حجازی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) با داده‌های دما و بارش (۱۹۸۸-۲۰۲۰) و مدل‌های SDSM-DC و HEC-HMS نشان داد که تغییر اقلیم شدت بارش‌های حدی را افزایش داده و خطر سیلاب در استان تهران را تشدید می‌کند. دلاور و همکاران (۲۰۱۴) با مدل HadCM3، سناریوهای A2 و B2 و روش LARS-WG نشان داد که تغییر اقلیم باعث کاهش رواناب ورودی و افت سطح آب دریاچه ارومیه می‌شود. کاهش در سناریوی A2 بیش از B2 خواهد بود. اعتدالی و همکاران (۱۴۰۱) نشان داد که تا سال ۲۱۰۰، در استان ایلام دما ۳/۸ درجه افزایش و بارش ۶/۸ درصد کاهش می‌یابد. این بررسی با مدل CanESM2، روش SDSM و سناریوهای RCP انجام شده است. شجاعی و همکاران در سال ۱۴۰۳ نشان دادند که استفاده از مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و SDSM تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای حوزه آبخیز تودشک اصفهان، حاکی از کاهش بارش ماهانه و افزایش دمای بیشینه و کمینه در دوره‌های آبی (۲۰۱۵-۲۱۰۰) است. بیشترین تغییرات مربوط به سناریوی SSP5-8.5 بوده و بر ضرورت برنامه‌ریزی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید شده است. سوری‌نژاد (۱۳۹۹) روند بارش و جریان‌های سطحی تجدیدپذیر در ایران (۱۳۹۷-۱۳۴۷) را بررسی کرد. با تحلیل داده‌ها توسط آزمون‌های آماری (من-کندال) مشخص شد بارش در اکثر حوضه‌ها روند کاهشی داشته است. میانگین حجم جریان سطحی نیز در دو دهه اخیر نسبت به دوره بلندمدت (۵۰ ساله) کاهش چشمگیری داشته که نشان‌دهنده تأثیر منفی تغییر اقلیم بر منابع آبی است. بنیستون و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه پروژه ACQWA نشان دادند که افزایش دما و تغییر بارش در آلپ موجب کاهش یخچال‌ها، افزایش سیلاب و خشکسالی و تأثیر بر کشاورزی، گردشگری و انرژی آبی شده است. مدیریت بهینه منابع آب ضروری است. کالامیتا و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای که در حوضه رودخانه اِزینو، ایتالیا صورت گرفت نشان داد که تغییرات اقلیمی و بارندگی موجب افزایش خطر زمین‌لغزش در آینده خواهد شد. این تحقیق بر اهمیت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر خطرات زمین‌شناسی تأکید دارد. منابع آب یکی از حیاتی‌ترین ارکان توسعه پایدار به‌شمار می‌آیند و تغییرات اقلیمی تهدیدی بزرگ برای این منابع است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که الگوهای بارش، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر منابع آبی و اکوسیستم‌های مرتبط هستند (شایان‌مهر و همکاران ۲۰۲۲). از سوی دیگر، درک تغییرات تاریخی این متغیرها و پیش‌بینی رفتار آن‌ها در آینده، می‌تواند راهکاری کلیدی برای مدیریت بهتر منابع آب در مواجهه با شرایط اقلیمی متغیر باشد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۹) در این راستا، استفاده از مدل‌های اقلیمی و سناریوهای تغییر اقلیم مانند RCPها و SSPها ابزاری مؤثر برای تحلیل تغییرات آینده است (دلجو و همکاران ۲۰۱۳). بررسی داده‌های تاریخی بارش، علاوه بر درک تغییرات گذشته، امکان پیش‌بینی تأثیرات آبی را نیز فراهم می‌کند. مدل‌های اقلیمی مانند CMIP5 و CMIP6، که در سطح جهانی توسعه یافته‌اند، ابزارهای مؤثری برای شبیه‌سازی این تغییرات ارائه می‌دهند (کنوتی و همکاران ۲۰۱۷).

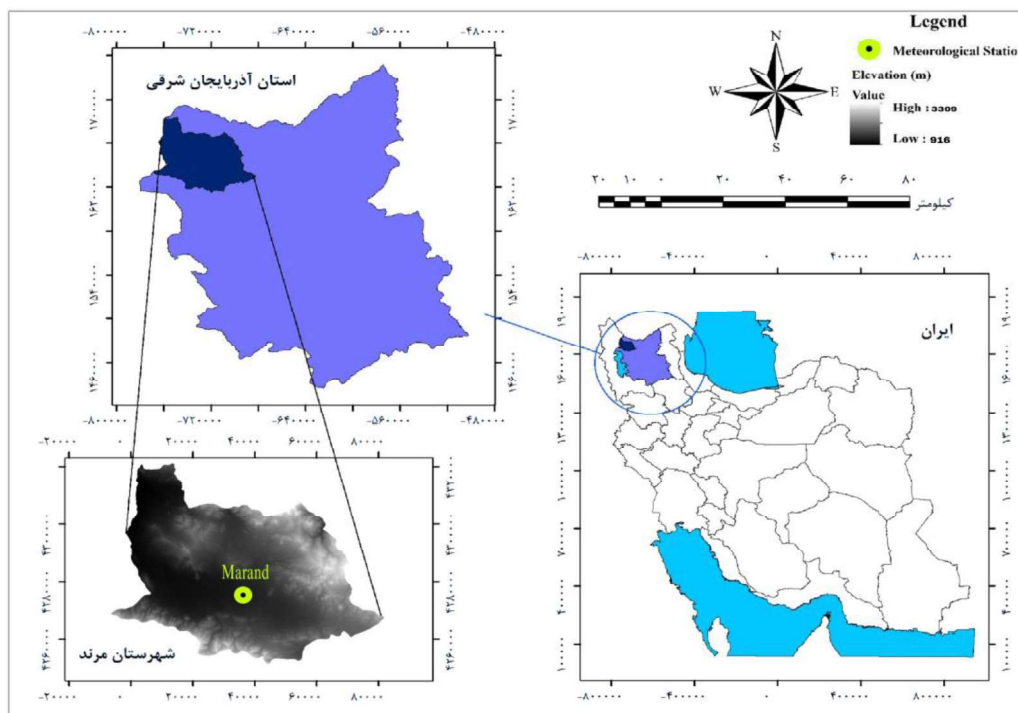
این پژوهش با هدف بررسی روند تغییرات بارش در شهرستان مرند و تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب منطقه انجام شده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تغییر اقلیم می‌تواند منجر به کاهش میزان بارش سالانه، افزایش شدت بارش‌های حدی و تغییر در الگوی توزیع فصلی بارندگی شود. بر همین اساس، این تحقیق با استفاده از داده‌های تاریخی، مدل‌های اقلیمی و تحلیل‌های آماری به دنبال اندازه‌گیری و کمی‌سازی این تغییرات است تا درک بهتری از میزان تأثیرات تغییر اقلیم در منطقه

به دست آید. علاوه بر بررسی روند تغییرات بارش، این پژوهش تلاش دارد راهکارهایی عملی برای مدیریت پایدار منابع آب ارائه دهد تا اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر کشاورزی، تأمین آب شرب و احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی کاهش یابد. مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی الگوی بارش را دگرگون کرده و شدت و توزیع آن را تحت تأثیر قرار داده است. تحقیقات انجام‌شده در ایران و سایر کشورها حاکی از کاهش بارش سالانه، افزایش بارندگی‌های شدید، کاهش بارش برف و تشدید خشکسالی‌های متوالی است. علاوه بر تغییر در میزان بارش، توزیع زمانی و مکانی آن نیز دستخوش نوسان شده است. این تحولات، نیاز به بررسی دقیق اثرات تغییر اقلیم در مناطقی مانند شهرستان مرند و تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثر را ضروری کرده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نادیده گرفتن این تغییرات می‌تواند منابع آب، کشاورزی و وقوع بلایای طبیعی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، استفاده از مدل‌های اقلیمی، سیاست‌گذاری علمی و مدیریت پایدار منابع آب، کلید کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم خواهد بود.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در شهرستان مرند، یکی از مناطق مهم شمال غربی استان آذربایجان شرقی، انجام شده است. مرند با وسعت ۳۲۳۰ کیلومتر مربع در ۶۰ کیلومتری شمال غرب تبریز قرار دارد و از شمال به شهرستان جلفا و جمهوری آذربایجان، از شرق به شبستر، از جنوب به تبریز و اسکو، و از غرب به شهرستان‌های ورزقان و خوی محدود می‌شود. موقعیت جغرافیایی آن با طول ۴۵° ۴۶' ۱۳.۳۰" شرقی و عرض ۳۸° ۲۲' ۵۳.۳۷" شمالی ثبت شده است. این شهرستان به دلیل قرار گرفتن در دامنه‌های کوهستانی میشو، اقلیمی نیمه‌خشک و سرد کوهستانی دارد. تابستان‌های مرند معتدل و دلپذیر بوده و زمستان‌های آن سرد و همراه با بارش برف است. میانگین دمای سالانه حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد و میزان بارندگی سالانه بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر متغیر است. زمستان‌های این منطقه معمولاً طولانی بوده و بین ۱۱۰ تا ۱۴۰ روز از سال را یخبندان تشکیل می‌دهد. ارتفاع مرکز شهرستان ۱۵۴۸ متر از سطح دریا است، اما بلندترین نقطه آن، کوه‌های میشو با ارتفاع ۲۸۵۰ متر، مانند سدی طبیعی در برابر جریان‌های جوی شمالی قرار دارد. این کوه‌ها که در بیشتر ایام سال پوشیده از برف هستند، نقش مهمی در تغذیه منابع آب زیرزمینی و تأمین آب رودخانه‌های منطقه ایفا می‌کنند. علاوه بر این، مرند دارای مراتع وسیع به وسعت حدود ۹۰ هزار هکتار است که نقشی اساسی در دامداری و تأمین علوفه منطقه دارند. تنوع توپوگرافی و شرایط اقلیمی مرند، این شهرستان را به منطقه‌ای با ظرفیت‌های طبیعی قابل توجه تبدیل کرده است که می‌تواند در مدیریت منابع آب و توسعه پایدار منطقه نقش کلیدی داشته باشد.

دوره مطالعاتی بررسی شده در این پژوهش، شامل سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بوده و مجموعاً ۲۴ سال داده‌های هواشناسی را در بر می‌گیرد. میانگین سالانه بارش براساس محاسبات انجام شده بر روی داده‌های بارش اخذ شده از سازمان هواشناسی در این بازه برابر با ۳۷۷ میلی‌متر و مجموع بارش سالانه برابر با ۹۰۵۱ میلی‌متر برآورد شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، شامل بارش روزانه ثبت‌شده در ایستگاه هواشناسی مرند است که به صورت مقیاس داده‌های روزانه از سازمان هواشناسی تبریز دریافت شده‌اند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، شهرستان مرند، استان آذربایجان شرقی

۲-۱- کنترل کیفی داده‌ها

پیش از انجام تحلیل‌های اقلیمی، داده‌های بارش از نظر صحت، دقت و پیوستگی مورد بررسی قرار گرفتند. (اللهوردی پور و ستاری ۱۴۰۲)

این فرآیند شامل شناسایی و اصلاح داده‌های مفقود، بررسی ناهنجاری‌ها و ارزیابی همبستگی با ایستگاه‌های مجاور بود. ابتدا، داده‌های دارای نقص یا مقدار نامعتبر با روش میان‌یابی آماری و استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های نزدیک ترمیم شدند. در این مرحله، ایستگاه‌هایی که بیشترین شباهت اقلیمی و همبستگی آماری با ایستگاه هدف داشتند، به‌عنوان مرجع انتخاب شدند.

برای تکمیل داده‌های ناقص، از رگرسیون خطی ساده استفاده شد که طی آن، داده‌های ایستگاه مرجع به‌عنوان متغیر مستقل و داده‌های ایستگاه هدف به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. سپس معادله رگرسیون به‌دست‌آمده، برای برآورد داده‌های مفقود به‌کار گرفته شد. علاوه بر این، جهت افزایش دقت بازسازی، داده‌های بازسازی‌شده با میانگین‌های ماهانه و سالانه دوره‌های مشابه مقایسه شدند تا از تطابق آن‌ها با الگوی کلی بارش منطقه اطمینان حاصل شود. روش محاسبه مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$y = a + bx \quad (1)$$

در این رابطه، a نشان‌دهنده داده‌های ایستگاه هدف و b نشان‌دهنده داده‌های ایستگاه همجوار است. ضریب (شیب خط) بر اساس داده‌های هم‌زمان در هر دو ایستگاه محاسبه شد. به این ترتیب:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

که در آن و به ترتیب میانگین داده‌های ایستگاه مرجع و ایستگاه هدف هستند. تعداد داده‌های مشترک در بازه زمانی موردنظر نیز با نشان داده می‌شود.

سپس عرض از مبدأ () نیز بر اساس رابطه زیر به دست آمد:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3)$$

پس از تعیین ضرایب معادله رگرسیونی و اطمینان از صحت محاسبات، فرآیند بازسازی داده‌های ناقص برای ایستگاه هدف آغاز شد. در این مرحله، داده‌های موجود ایستگاه مرجع که دارای همبستگی بالایی با ایستگاه هدف بود، به عنوان مبنای محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب، برای هر بازه زمانی که داده‌ای در ایستگاه هدف ثبت نشده بود، مقدار متناظر آن با استفاده از معادله خطی برآورد شد. در این فرآیند، سعی شد با اعمال کنترل‌های آماری متعدد، از تطابق الگوی تغییرات داده‌های بازسازی‌شده با روندهای مشاهده‌شده در ایستگاه‌های همجوار اطمینان حاصل شود.

مقایسه‌ای میان داده‌های بازسازی‌شده با میانگین‌های دوره‌ای به منظور به حداقل رساندن خطای تخمین انجام گردید تا هرگونه ناهمبستگی یا انحراف غیرمنطقی شناسایی و اصلاح رعایت شود. این مقایسه‌ها به‌ویژه برای بازه‌هایی که تغییرات اقلیمی خاصی مانند دوره‌های خشک‌سالی یا بارش‌های غیرمعمول ثبت شده بود، با حساسیت بیشتری انجام گرفت. هدف اصلی از این مرحله، اطمینان از هماهنگی و سازگاری داده‌های بازسازی‌شده با الگوهای تاریخی منطقه و جلوگیری از ایجاد روندهای کاذب بود.

۲-۲- مدل سازی اقلیمی

جهت بررسی روند تغییرات بارش در آینده و تأثیر تغییر اقلیم بر الگوی بارندگی در منطقه مورد مطالعه، از مدل LARS-WG استفاده شد. این مدل که یکی از روش‌های متداول در ریزمقیاس‌نمایی اقلیمی است، با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی، امکان شبیه‌سازی داده‌های روزانه بارش برای آینده را فراهم می‌کند [13].

در گام نخست، داده‌های بارش روزانه ثبت‌شده در ایستگاه مرند طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، پس از طی مراحل کنترل کیفی، به عنوان ورودی مدل LARS-WG مورد استفاده قرار گرفت. مدل ابتدا ویژگی‌های آماری بارش را تحلیل کرده و توزیع احتمالاتی متغیرها را مشخص نمود. سپس، برای شبیه‌سازی داده‌های آینده، سناریوهای مختلف تغییر اقلیم شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 که دربرگیرنده سه مسیر محتمل تغییر اقلیمی هستند، به مدل معرفی شدند.

پس از کالیبراسیون مدل با داده‌های واقعی دوره پایه، فرآیند شبیه‌سازی داده‌های بارش در دو دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱) اجرا شد. خروجی این مدل، شامل مجموع بارش سالانه، میانگین ماهانه، و تغییرات فصلی بارش تحت هر یک از سناریوها بود که مبنای تحلیل روند تغییرات اقلیمی منطقه قرار گرفت.

برای اعتبارسنجی مدل و ارزیابی دقت شبیه‌سازی‌ها، داده‌های تولیدشده با مدل LARS-WG با داده‌های ثبت‌شده در دوره پایه مقایسه شدند. نتایج این بررسی نشان داد که مدل توانسته است الگوی کلی بارش منطقه را به‌درستی شبیه‌سازی کند و روندهای فصلی و سالانه را با دقت مناسبی بازتولید نماید. هرچند در برخی ماه‌ها اختلاف‌هایی مشاهده شد، این تفاوت‌ها در محدوده قابل قبول برای مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری قرار داشتند.

در مجموع، مدل سازی اقلیمی با استفاده از داده‌های تاریخی، روش‌های آماری دقیق و سناریوهای معتبر جهانی، تصویری جامع و چندوجهی از آینده اقلیمی شهرستان سراب ارائه کرد که می‌تواند مبنایی مناسب برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و تدوین سیاست‌های سازگار با تغییر اقلیم در سطح منطقه باشد.

۳- نتایج

به منظور تحلیل تغییرات دمای میانگین و بارش در ایستگاه مرند و بررسی روندهای تاریخی و پیش‌بینی وضعیت آینده اقلیمی، داده‌های ثبت‌شده طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از مدل LARS-WG داده‌های مصنوعی برای دو دوره آبی (۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP1-4.5 و SSP1-8.5 تولید شد. در این بخش و در ادامه یافته‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌های آماری، مدل‌سازی‌های اقلیمی، و مقایسه داده‌های تاریخی و آینده‌ای که شامل جداول و نمودارهای مربوطه است ارائه شده است.

جدول (۱) میانگین بارش ماهانه ایستگاه مرند را در دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۲۳) و تغییرات آن را در سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای بازه‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ نشان می‌دهد. در دوره پایه، بیشترین بارش در مارس (۶۰/۹۹ میلی‌متر)، آوریل (۵۷/۹۸ میلی‌متر) و می (۴۶/۹۴ میلی‌متر) ثبت شده که بیانگر اوج بارندگی در فصل بهار است، درحالی‌که کمترین میزان در آگوست (۸/۶۱ میلی‌متر) و سپتامبر (۹/۱۸ میلی‌متر) دیده می‌شود که نشان‌دهنده یک دوره خشک در تابستان است. در بازه ۲۰۲۱-۲۰۴۰، سناریوی SSP1-2.6 تغییرات اندکی نسبت به دوره پایه دارد، اما در SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایش بارش زمستانی و کاهش بارندگی در تابستان مشهود است که می‌تواند الگوی بارش را تغییر داده و احتمال بارش‌های حادی را افزایش دهد. در بازه ۲۰۶۰-۲۰۴۱، سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کاهش شدیدتری در بارش تابستانی (ژوئن تا سپتامبر) نشان می‌دهند که می‌تواند منجر به خشکسالی‌های شدیدتر شود، درحالی‌که در مارس، آوریل و می افزایش بارش در برخی سناریوها پیش‌بینی شده است که ریسک وقوع سیلاب‌های بهاره را افزایش می‌دهد. در مجموع، SSP5-8.5 بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد و کاهش چشمگیری در بارش تابستانی دارد، درحالی‌که SSP1-2.6 کمترین تغییر را دارد که نشانه‌ای از یک اقلیم پایدارتر است. مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی بر اساس این تغییرات ضروری خواهد بود.

جدول ۱: تغییرات میانگین بارش ماهانه (mm) ایستگاه مرند در دوره پایه و اختلاف آن با مقادیر دوره‌های آبی (mm)

دوره زمانی	سناریو	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
۱۹۸۶-۲۰۲۳	بارش میانگین در دوره پایه	۳۲/۶۳	۳۷/۲۵	۶۰/۹۹	۵۷/۹۸	۴۶/۹۴	۱۷/۵۰	۱۱/۴۸	۸/۶۱	۹/۱۸	۲۵/۵۰	۳۶/۸۴	۳۲/۲۴
۲۰۲۱-۲۰۴۰	SSP1-2.6	۰/۹۳	۱/۲۲	۲/۰۰	۱/۶۴	۱/۵۷	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۳۳	۰/۲۴	۰/۸۴	۱/۶۲	۱/۳۱
	SSP1-4.5	۰/۸۸	۱/۱۷	۲/۱۱	۱/۷۱	۱/۶۰	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۳۲	۰/۲۷	۱/۰۳	۱/۸۹	۱/۳۶
	SSP1-8.5	۰/۹۰	۱/۲۵	۲/۱۸	۱/۷۱	۱/۵۴	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۸۴	۱/۶۹	۱/۳۲
۲۰۴۱-۲۰۶۰	SSP1-2.6	۰/۹۵	۱/۴۱	۲/۲۹	۱/۷۳	۱/۵۵	۰/۴۸	۰/۶۵	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۸۳	۱/۶۳	۱/۳۴
	SSP1-4.5	۰/۹۰	۱/۲۲	۲/۱۵	۱/۸۵	۱/۷۷	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۲۰	۰/۸۱	۱/۶۳	۱/۲۸
	SSP1-8.5	۰/۹۱	۱/۲۹	۲/۳۰	۱/۸۵	۱/۶۲	۰/۴۴	۰/۵۴	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۸۴	۱/۵۴	۱/۲۳

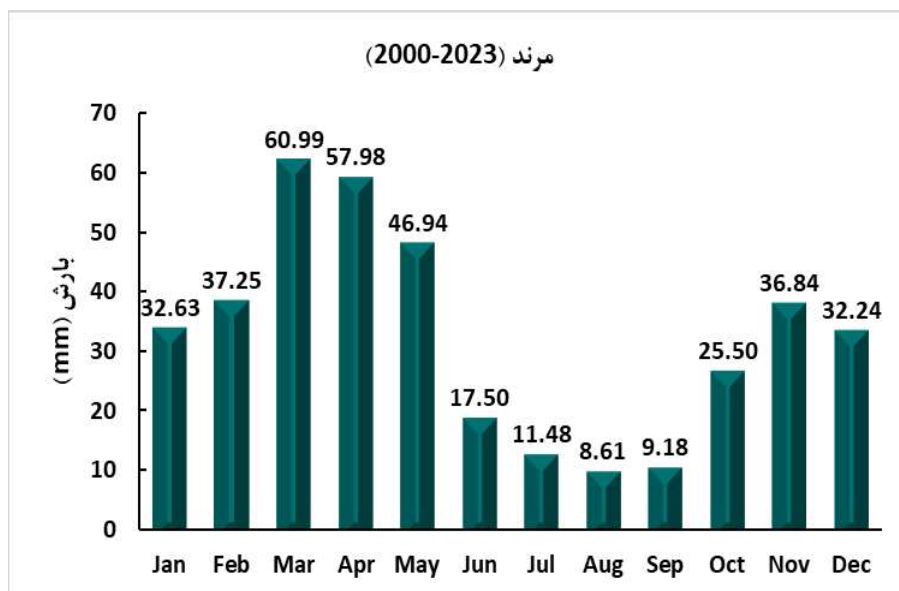
جدول (۲) جدول ارائه شده مقایسه‌ای از بارش تاریخی و شبیه‌سازی شده با مدل LARS-WG را در ایستگاه مرند طی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نمایش می‌دهد. مجموع بارش سالانه تاریخی ۸۹۴۱/۳ میلی‌متر و مقدار شبیه‌سازی شده ۸۹۶۷/۸ میلی‌متر است که اختلاف ۲۶/۵ میلی‌متری آن دقت بالایی مدل را نشان می‌دهد. بیشترین بارش در مارس (۱۴۶۷/۶ میلی‌متر) ثبت شده که مدل مقدار ۱۳۸۷/۱ میلی‌متر را پیش‌بینی کرده و ۸۰/۵ میلی‌متر اختلاف دارد. در سپتامبر، بیشترین خطای مدل (۶/۹۸ میلی‌متر) مشاهده شده، در حالی که در آگوست اختلاف تنها ۲ میلی‌متر است که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در ماه‌های خشک است. به‌طور کلی، در اغلب ماه‌ها اختلاف کمتر از ۵ درصد است و مدل LARS-WG توانایی بالایی در شبیه‌سازی الگوی بارش دارد. با وجود برخی اختلافات جزئی، مجموع بارش سالانه تقریباً یکسان است، بنابراین می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده استفاده کرد، اما اعتبارسنجی‌های بیشتر برای افزایش دقت پیشنهاد می‌شود.

جدول ۲: بارش تاریخی و شبیه‌سازی شده با مدل LARS-WG در ایستگاه مرند (۲۰۰۰-۲۰۲۳) و ارزیابی دقت مدل

Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	ماه
۷۷۳/۶ ۵	۸۸۴/۱	۶۱۲/۱ ۱	۲۲۰/۲ ۶	۲۰۶/۵ ۵	۲۷۵/۵ ۸	۴۱۹/۹ ۸	۱۱۲۶/۶ ۴	۱۳۹۱/۴ ۱	۱۴۶۳/۶ ۹	۸۹۴/۰۲	۷۸۳/۰۳	مجموع بارش تاریخی (۲۰۰۰-۲۰۲۳)
۷۶۹/۳	۸۶۴/۸	۷۷۹	۲۳۲/۴	۳۰۵/۱	۳۵۰/۵	۳۶۳/۶	۹۵۰/۸	۱۸۳۸/۱	۱۳۶۰/۵	۱۰۷۵/۳	۸۸۱/۷۰	مجموع بارش تاریخی شبیه‌سازی (۲۰۰۰-۲۰۲۳)
۳۲/۲۴	۳۶/۸۴	۲۵/۵۰	۹/۱۸	۸/۶۱	۱۱/۴۸	۱۷/۵۰	۴۶/۹۴	۵۷/۹۸	۶۰/۹۹	۳۷/۲۵	۳۲/۶۳	میانگین بارش تاریخی
۳۲/۰۵	۳۶/۰۳	۳۲/۴۶	۹/۶۸	۱۲/۷۱	۱۴/۶۰	۱۵/۱۵	۳۹/۶۲	۶۰/۰۱	۵۶/۶۹	۴۴/۸۰	۳۶/۷۴	میانگین بارش تاریخی شبیه‌سازی (۲۰۰۰-۲۰۲۳)
۰/۱۸	۰/۸۰	-۶/۹۵	-۰/۵۱	-۴/۱۱	-۳/۱۲	۲/۳۵	۷/۳۳	-۲/۰۳	۴/۳۰	-۷/۵۵	-۴/۱۱	اختلاف (میلی‌متر)
۰/۵۶	۲/۱۸	- ۲۷/۲۶	-۵/۵۱	- ۴۷/۷۱	- ۲۷/۱۹	۱۳/۴۲	۱۵/۶۱	-۳/۵۱	۷/۰۵	-۲۰/۲۸	-۱۲/۶۰	درصد خطا

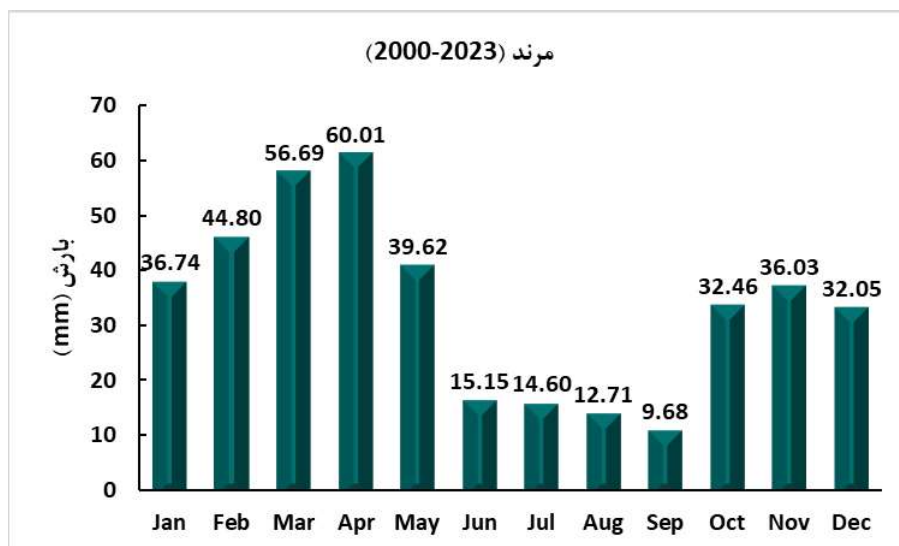
شکل (۲) نمودار میزان بارش ماهانه شهرستان مرند در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بارش در ماه مارس (۶۰/۹۹ میلی‌متر) و پس از آن در آوریل (۵۷/۹۸ میلی‌متر) و می (۴۶/۹۴ میلی‌متر) رخ داده است. این الگو نشان می‌دهد که مرند در فصل زمستان و اوایل بهار بارش بیشتری دریافت می‌کند که با سیستم‌های بارشی فعال در این فصول مرتبط است. کمترین میزان بارش در ماه آگوست (۸/۶۱ میلی‌متر) و سپتامبر (۹/۱۸ میلی‌متر) دیده می‌شود و بارندگی در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر بسیار کم است که نشان‌دهنده یک دوره خشک در تابستان است. در اکتبر (۲۵/۵۰ میلی‌متر) و نوامبر (۳۶/۸۴ میلی‌متر) بارش‌ها دوباره افزایش می‌یابند که این موضوع نشان‌دهنده آغاز فعالیت‌های سامانه‌های بارشی پاییزی و ورود تدریجی به فصل مرطوب‌تر است. ژانویه (۳۲/۶۳ میلی‌متر) و فوریه (۳۷/۲۵ میلی‌متر) نیز میزان بارش متوسطی دارند، اما

همچنان کمتر از اوج بارش در مارس و آوریل هستند. الگوی بارش مرند مشابه مناطق نیمه خشک با زمستان‌های پربارش و تابستان‌های خشک است. بالاترین میزان بارش در بهار و کمترین مقدار آن در تابستان مشاهده می‌شود. این الگو برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و پیشگیری از سیلاب‌های بهاره اهمیت دارد. تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث تغییر در توزیع زمانی و شدت بارش‌ها شود که باید مورد توجه سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب قرار گیرد [۳] و [۱۹].



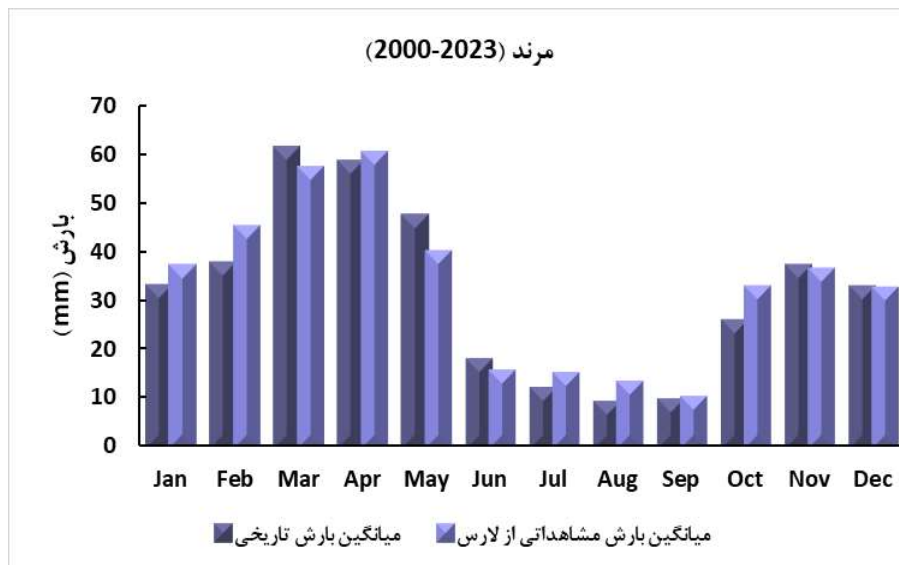
شکل ۲: نمودار میانگین بارش ماهانه داده‌های تاریخی ایستگاه مرند (۲۰۰۰-۲۰۲۳)

شکل (۳) نمودار میانگین بارش ماهانه برای داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد که بیشترین میزان بارش در اواخر زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد، به‌طوری که ماه آوریل با $60/01$ میلی‌متر دارای بیشترین مقدار بارش است و پس از آن ماه‌های مارس با $56/49$ میلی‌متر و فوریه با $44/80$ میلی‌متر قرار دارند که نشان‌دهنده پیک بارش در بهار و ادامه بارش‌های قابل توجه در زمستان است. در مقابل، کمترین میزان بارش در ماه‌های جولای با $14/60$ میلی‌متر، آگوست با $12/71$ میلی‌متر و سپتامبر با $9/68$ میلی‌متر مشاهده می‌شود که بیانگر یک دوره خشک در تابستان است. این روند با اقلیم مناطق نیمه خشک و کوهستانی سازگار است که در آن تابستان‌ها خشک و زمستان‌ها مرطوب‌تر هستند. در ادامه، بارش در فصل پاییز افزایش می‌یابد و در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر به ترتیب $32/46$ ، $36/03$ و $32/05$ میلی‌متر ثبت شده است که نشان‌دهنده آغاز ورود سیستم‌های بارشی پاییزی است. اگر این داده‌ها مشاهداتی باشند، نشان می‌دهند که مرند دارای یک الگوی بارش کلاسیک نیمه خشک است که بارش‌ها عمدتاً در فصل زمستان و بهار متمرکز هستند و تابستان‌ها میزان بارش کاهش می‌یابد. اگر این داده‌ها شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG باشند، مقایسه آن‌ها با داده‌های ایستگاه هواشناسی کمک می‌کند تا دقت مدل در شبیه‌سازی الگوی بارش بررسی شود.



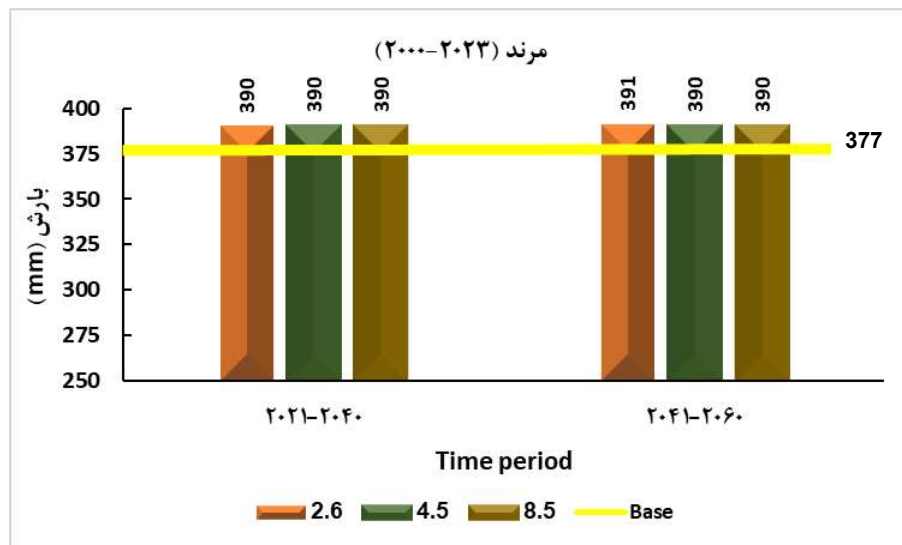
شکل ۳: نمودار میانگین بارش ماهانه داده‌های مشاهداتی ایستگاه مرند (۲۰۰۰-۲۰۲۳)

شکل (۴) نمودار مقایسه‌ای میانگین بارش داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی شده با مدل LARS-WG در شهرستان مرند برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۳ نشان می‌دهد که داده‌های شبیه‌سازی شده در بسیاری از ماه‌ها با داده‌های تاریخی همخوانی خوبی دارند، به‌ویژه در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر که اختلاف بسیار اندک است و این موضوع نشان‌دهنده دقت بالای مدل LARS-WG در شبیه‌سازی الگوی بارش در برخی ماه‌های سال است. در ماه‌های مارس، آوریل و می، مقدار بارش داده‌های شبیه‌سازی شده LARS-WG اندکی بیشتر از داده‌های تاریخی است، درحالی‌که در ماه‌های اکتبر و نوامبر بارش شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های تاریخی کمی کمتر ثبت شده که این تفاوت‌ها می‌تواند به دلیل محدودیت‌های مدل LARS-WG در پیش‌بینی بارش‌های حدی و کوتاه‌مدت باشد، زیرا این مدل معمولاً میانگین‌های کلی را بهتر شبیه‌سازی می‌کند اما در بازتولید رویدادهای شدید بارشی با چالش مواجه است. در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر، مقادیر بارش در هر دو مجموعه داده نسبتاً کم و نزدیک به یکدیگر هستند که این امر نشان‌دهنده پایداری مدل در شبیه‌سازی دوره‌های خشک تابستانی است. مدل LARS-WG توانایی خوبی در بازتولید روند کلی بارش مرند دارد، اما در برخی ماه‌های بهاری و پاییزی اختلاف‌هایی با داده‌های واقعی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که این مدل در بازه‌های مرطوب (مارس تا می) تمایل به بیش‌برآورد بارش و در پاییز (اکتبر و نوامبر) تمایل به کم‌برآورد دارد. داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی شده در تابستان مطابقت خوبی دارند که نشان‌دهنده پایداری مدل در پیش‌بینی دوره‌های خشک است و برای بهبود دقت مدل در ماه‌های با اختلاف زیاد، می‌توان از روش‌های آماری برای تعدیل داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده کرد.



شکل ۴: هیستوگرام بارش میانگین داده‌های تاریخی ایستگاه مربند (۲۰۰۰-۲۰۲۳) و شبیه سازی شده با مدل LARS-WG

شکل (۵) نمودار بارش سالانه ایستگاه مربند در دوره ۲۰ ساله آینده تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نشان می‌دهد که مقدار بارش سالانه در تمامی سناریوها (۲.۶، ۴.۵ و ۸.۵) برای هر دو دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تقریباً در محدوده ۳۹۰ میلی‌متر باقی مانده است و تفاوت بسیار کمی بین این سناریوها دیده می‌شود، به طوری که مقدار بارش در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تنها در سناریوی SSP2.6 مقدار اندکی افزایش داشته و به ۳۹۱ میلی‌متر رسیده است. مقدار میانگین بارش پایه (Base) برابر با ۳۷۷ میلی‌متر است که از بارش‌های آینده در تمامی سناریوها کمتر است و این نشان می‌دهد که مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی نمی‌کنند که بارش سالانه مربند در آینده کاهش محسوسی داشته باشد و حتی ممکن است مقدار آن اندکی بیشتر از مقدار تاریخی ثبت شده باشد. مقدار بارش سالانه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تقریباً یکسان باقی مانده است که این امر نشان می‌دهد در مدل‌های شبیه‌سازی شده، اثرات تغییر اقلیم در مقیاس سالانه تأثیر چشمگیری بر کاهش بارش ندارد. بارش سالانه در آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰) در تمامی سناریوهای تغییر اقلیم نسبتاً ثابت باقی می‌ماند و حتی کمی بیشتر از مقدار پایه (۳۷۷ میلی‌متر) است. بین سناریوهای مختلف (۲.۶، ۴.۵، ۸.۵) تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود و مقدار بارش در محدوده ۳۹۰ میلی‌متر قرار دارد. عدم کاهش بارش سالانه نشان می‌دهد که در منطقه مربند، تغییر اقلیم ممکن است الگوی بارش را تغییر دهد، اما مقدار کلی بارندگی کاهش محسوسی نخواهد داشت. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییر اقلیم، باید تغییرات فصلی بارش و شدت بارش‌های حدی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند [۲۰].



شکل ۵: بارش سالانه ایستگاه مروند در دوره‌های آینده تحت سناریوهای مختلف

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوی بارش در شهرستان مروند در سال‌های آینده با تغییراتی همراه خواهد بود. تحلیل داده‌های گذشته (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳) نشان داد که بیشترین میزان بارش معمولاً در فصل بهار رخ می‌دهد، درحالی‌که تابستان‌ها خشک‌تر هستند. اما مدل‌سازی اقلیمی با استفاده از LARS-WG و سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی می‌کند که در آینده، بارش زمستانی افزایش یافته و بارش تابستانی کاهش پیدا خواهد کرد. این تغییرات می‌تواند اثرات متعددی بر منطقه بگذارد. در سناریوی (SSP5-8.5)، بارش‌های زمستانی تا ۱۵ درصد بیشتر از مقدار فعلی خواهد شد، اما در مقابل، بارش‌های تابستانی ممکن است تا ۲۰ درصد کاهش پیدا کند. این مسئله می‌تواند منجر به افزایش خطر سیلاب‌های زمستانی و کاهش منابع آب در ماه‌های گرم سال شود. علاوه بر این، در برخی از ماه‌ها، مانند مارس و آوریل، میزان بارندگی ممکن است ۱۰ درصد بالاتر از مقادیر کنونی باشد، درحالی‌که در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست، کاهش ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متری بارش پیش‌بینی شده است. چنین تغییراتی ممکن است تغذیه آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده و منجر به تغییر در الگوی رواناب‌های سطحی شود. با توجه به این یافته‌ها، لزوم مدیریت بهینه منابع آب و به‌کارگیری راهکارهای سازگار با تغییرات اقلیمی بیش از پیش احساس می‌شود. برنامه‌ریزی برای کنترل سیلاب‌ها در زمستان، استفاده از سیستم‌های آبیاری کارآمدتر در تابستان و بهبود زیرساخت‌های ذخیره آب از جمله اقداماتی است که می‌تواند به کاهش اثرات این تغییرات کمک کند. در نهایت، سیاست‌گذاری‌هایی که کاهش آسیب‌پذیری منطقه در برابر تغییر اقلیم را هدف قرار دهند، می‌توانند به حفظ تعادل منابع آب و افزایش تاب‌آوری زیست‌محیطی شهرستان مروند کمک کنند.

۵- قدردانی

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور و اداره منابع آب استان آذربایجان شرقی به خاطر ارائه داده‌های مورد نیاز جهت انجام این پژوهش، سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Wilby, R. L. and I. Harris. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42(2), W02419, 2006.
- [۲] احمدی، ح. فلاح قالهری، غ. ع. باعقیده، م. پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر بارش فصلی مناطق سردسیر ایران براساس سناریوهای واداشت تابشی، فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۱)، ۱۹۶-۱۷۷، ۱۳۹۸.
- [۳] میان‌آبادی، آ. داوری، ک. بررسی تغییرات مقدار و توزیع بارش و دما در ایران و اثرات آن‌ها بر رخدادهای حدی. آب و توسعه پایدار، ۱۰(۲)، ۱۳-۲۶، ۱۴۰۲.
- [۴] صدریان زاده، م. قربانی‌زاده خرازی، ح. اسلامی، ح. فتحیان، ح. تلوری، ع. ر. بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر روند و توزیع دمایی فاز بارش در حوضه برفی-بارانی بهشت آباد و کوه‌رنگ. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۸(۴)، ۷۷-۱۰۰، ۱۴۰۰.
- [۵] عزیزی، ح. ر. نجائیان، ن. اطهری، م. ع. هاشمی، س. ش. اثرات تغییر اقلیم بر روند خشکسالی دشت ورامین با استفاده از شاخص دی-مارتن. *نیوار*، ۴۵(۱۱۳-۱۱۲)، ۶۷-۷۶، ۱۴۰۰.
- [۶] حجازی‌زاده، ز. اکبری، م. ساسان‌پور، ف. حسینی، ع. ر. محمدی، ن. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل آسا در استان تهران. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۱۰۵-۸۷، ۱۴۰۱.
- [7] Delavar, M. , Babaee, O. and Fattahi, I. (2014). Evaluation of climate change impacts on Urmia lake water level fluctuations. *Journal of Climate Research*, 1393(19), 53-65.
- [۸] اعتدالی رضائی، ه. خدابخشی، ف. و کنعانی، ا. چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی بر اساس گزارش پنجم IPCC (مطالعه موردی شهر ایلام). *حفاظت منابع آب و خاک*، ۱۲(۱۱ (پیاپی ۴۵))، ۸۷-۱۰۷، ۱۴۰۱.
- [۹] شجاعی، غ. ر. قربانی، م. ملکیان، آ. علم بیگی، ا. رستمی، م. "چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوزه آبخیز تودشک"، *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۱۴۰۳.
- [۱۰] سوریزاد، ع. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی تجدیدپذیر سی حوضه آبریز کشور. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۲(۳)، ۳۷۳-۳۵۱، ۱۳۹۹.
- [11] Beniston, M., Stoffel, M., & Hill, M. (2011). Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: Can current water governance cope with future challenges? *Environmental Science & Policy*, 14(7), 734-743.
- [12] Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., & Piscopia, R. (2018). Impact of climate change on landslides frequency: The Esino river basin case study (Central Italy). *Natural Hazards*, 93(2), 683-705.
- [13] Shayanmehr, S., & Liaghat, A. M. The impacts of climate change on water resources and crop production in an arid region. *Agriculture*, 12(7), 1056, 2022.
- [14] Zhang, W., Villarini, G., Scoccimarro, E., & Gualdi, S. Constraining climate model projections of regional precipitation over the central United States by the observed seasonal cycle. *Geophysical Research Letters*, 46(10), 5480-5489, 2019.
- [15] Delju, A. H., Ceylan, A., Piguet, E., & Rebetez, M. Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake. *Journal of Great Lakes Research*, 39(3), 740-748, 2013.
- [16] Knutti, R., Rugenstein, M. A. A., & Hegerl, G. C. Beyond equilibrium climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 10(10), 727-736, 2017.
- [۱۷] الله‌وردی‌پور، پ. و ستاری، م. ت. مقایسه عملکرد روش کلاسیک رگرسیون خطی چندگانه و روش‌های داده کاوی نوین در مدل سازی بارش سالانه مطالعه موردی شهر اهواز مدل سازی و مدیریت آب و خاک (۲۳)، ۱۲۵-۱۴۲، ۱۴۰۲.

[18] Semenov, M.A.; Brooks, R.J.; Barrow, E.M.; Richardson, C.W. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Clim. Res.* 10, 95–107, 1998.

[۱۹] جوانشیری، ز. عباسی، ف. تحلیل مکانی روند بارش های سنگین فصلی و سالانه کشور با استفاده از رگرسیون چندک. پژوهش های تغییرات آب و هوایی، ۴(۱۵)، ۳۹-۵۴، ۱۴۰۲.

[۲۰] قائمی، ع. هاشمی منفرد، س. آ. بحرپیما، ع. ا. محمودی، پ. ذونعمت کرمانی، م. تغییرات مکانی- زمانی ویژگی های خشکسالی پیش بینی شده ایران تحت سناریوهای تغییر اقلیم. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۵(۱)، ۶۸-۸۰، ۱۴۰۱.