

تحلیل توزیع فضایی-زمانی بارش فصلی در پهنه زاگرس با تأکید بر بارش طبقات ارتفاعی

چکیده

بارش یکی از مهم‌ترین عناصر اقلیمی و مؤلفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژیکی است که نقش مهمی در تأمین منابع آب و پایداری محیطی مناطق کوهستانی دارد. شناخت الگوهای مکانی و زمانی بارش و ارتباط آن با ارتفاع، برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. پژوهش حاضر با هدف بررسی الگوهای بارش فصلی در طبقات ارتفاعی زاگرس و تحلیل نقش عوامل توپوگرافی در تغییرپذیری مکانی و زمانی آن انجام شد. برای این منظور، از داده‌های بارش ماهواره‌ای MSWEP طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ و مدل رقومی ارتفاعی ALOS PALSAR استفاده گردید. منطقه مورد مطالعه در پنج طبقه ارتفاعی شامل کمتر از ۱۰۰۰ متر، ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر، ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر و بیش از ۲۵۰۰ متر طبقه‌بندی شد. روند تغییرات بارش با آزمون من-کندال و برآوردگر شیب سن بررسی شد. همچنین، رابطه بارش و ارتفاع با ضریب همبستگی اسپیرمن و تفاوت میانگین بارش بین طبقات ارتفاعی با تحلیل واریانس و آزمون شفه ارزیابی گردید. نتایج نشان داد بیشترین میانگین بارش سالانه در طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر و کمترین مقدار در ارتفاعات بیش از ۲۵۰۰ متر رخ داده است. همچنین، بین بارش و ارتفاع در فصول پاییز و زمستان رابطه معکوس مشاهده شد، در حالی که در بهار بیشترین بارش در ارتفاعات میانی ثبت گردید. نتایج بیانگر آن است که الگوی بارش در زاگرس تنها تابع ارتفاع نبوده و عوامل توپوگرافی و موقعیت نسبت به منابع رطوبتی نیز در توزیع آن نقش دارند. این یافته‌ها می‌تواند در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی محیطی مناطق کوهستانی زاگرس مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بارش، توزیع فضایی-زمانی، زاگرس، سنجش از دور، طبقات ارتفاعی.

مقدمه

بارش یکی از اساسی‌ترین عناصر اقلیم است که نقش مهمی در چرخه هیدرولوژیکی، تأمین منابع آب سطحی و زیرزمینی، و تداوم زیست‌بوم‌ها دارد (خضرلوی محمدیار، ۱۴۰۱؛ سعیدیان و مرادی، ۱۴۰۱؛ امیدوار و همکاران، ۱۳۹۸). توزیع مکانی و زمانی بارش در سطح زمین بسیار ناهمگون است (دوستان، ۱۳۹۸)، و این ناهمگونی ناشی از تأثیر متقابل عوامل متعددی نظیر عرض جغرافیایی، فاصله از منابع رطوبتی، جریان‌های جوی، جهت و شیب ناهمواری‌ها و به‌ویژه ارتفاع از سطح دریاست (Barry, 2008). در مناطق کوهستانی، تغییرات بارش نسبت به ارتفاع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا با افزایش ارتفاع، کاهش دما، افزایش تراکم بخار آب و صعود اجباری هوا رخ می‌دهد که منجر به افزایش بارش در دامنه‌های بادگیر^۱ و کاهش آن در دامنه‌های بادپناه^۲ می‌شود. این فرآیند که به بارش اوروگرافیک^۳ مشهور است، یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های کنترل‌کننده بارش در مناطق کوهستانی محسوب می‌شود (Ntwali et al., 2016; Roe, 2005). در مقابل، در کوهستان‌های مدیترانه‌ای مانند زاگرس، به دلیل فاصله از منابع رطوبتی و کاهش تدریجی رطوبت، بارش معمولاً در ارتفاعات میانی به بیشینه می‌رسد و در ارتفاعات بسیار بالا به دلیل تخلیه رطوبت، کاهش می‌یابد (Ntwali et al., 2016; Barry, 2008). عوامل دیگری نظیر جهت‌گیری دامنه نسبت به بادهای غالب، فاصله از دریا، و الگوهای گردش جوی منطقه‌ای نیز در این الگو نقش تعیین‌کننده‌ای دارند (Roe, 2005).

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که هم تغییرات مکانی و هم نوسان‌های زمانی بارش با موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های توپوگرافی مانند ارتفاع و شیب و جهت دامنه مرتبط هستند. با این حال، ارتباط میان تغییرات زمانی بارش و نقش عوامل مکانی در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته شده است (سینگ و همکاران، ۱۹۹۵). در ایران، رشته‌کوه زاگرس به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های کوهستانی کشور، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی بارش مناطق غربی دارد. توپوگرافی پیچیده این رشته‌کوه سبب می‌شود تا مقدار بارش در دامنه‌های غربی بسیار بیشتر از دامنه‌های شرقی باشد (جعفری و فولادی، ۱۴۰۲؛ کیانی و همکاران، ۱۳۹۸). فاصله از دریای مدیترانه به‌عنوان منبع اصلی رطوبت، و جهت‌گیری شمال‌غربی - جنوب‌شرقی زاگرس، دو عامل کلیدی در کنترل الگوی بارش این منطقه محسوب می‌شوند. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که زاگرس با ایجاد سد توپوگرافی، بارش‌های جبهه‌ای دوره سرد را در دامنه‌های غربی تشدید کرده و از ورود توده‌های هوای مرطوب به نواحی داخلی کشور جلوگیری می‌کند (Alijani, 2008). همچنین، مدل‌سازی‌های عددی در زاگرس میانی نشان داده است که بارش در دامنه‌های بادگیر تا ارتفاع ۲۵۰۰ متر افزایش یافته و سپس ثابت یا کاهش می‌یابد، که حاکی از پیچیدگی رابطه ارتفاع - بارش در این منطقه است (Saeidabadi et al., 2016). شناخت نحوه‌ی تأثیر ارتفاع و ویژگی‌های ناهمواری زاگرس بر توزیع بارش، به‌ویژه با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، می‌تواند در مدیریت منابع آب و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی منطقه‌ای مؤثر باشد. تنوع ارتفاعی گسترده زاگرس نیز می‌تواند شرایط اقلیمی منطقه را به شکل چشمگیری دستخوش تغییر کند (میرزایی و همکاران، ۱۴۰۴).

در سال‌های اخیر، فناوری‌های سنجش از دور به‌ویژه روش‌های راداری و طیفی به‌عنوان ابزارهایی مؤثر و قابل‌اعتماد در مطالعات اقلیمی و هواشناسی شناخته شده‌اند (عظیمی و همکاران، ۱۴۰۴). سنجش از دور، به‌خصوص با کاربرد سامانه‌های طیفی و راداری، امکان تحلیل دقیق ویژگی‌های سطح زمین و تحول آن‌ها را مهیا می‌کند. این فناوری‌ها کمک می‌کنند نقشه‌های دقیق‌تری از ساختارهای طبیعی، پوشش گیاهی و دگرگونی‌های اقلیمی تهیه شود و با پردازش داده‌های حاصل، مدل‌های پیش‌بینی توسعه یابد که بتواند نقش ارتفاع در بارش را به‌صورت کمی و قابل تحلیل بازنمایی کند. با این حال، داده‌های بارش ماهواره‌ای به دلیل محدودیت ایستگاه‌های زمینی و عدم قطعیت‌های محصولات، همواره با خطاهایی همراه هستند. در این راستا، روش‌های نوین ادغام چند محصول بارش می‌تواند با ترکیب نقاط قوت هر محصول، دقت برآورد بارش را به‌ویژه در مناطق با کمبود داده افزایش دهند (Xu et al., 2026). ارزیابی‌های مستقل در ایران نشان داده است که محصول بارش MSWEP در مقایسه با سایر محصولات ماهواره‌ای، از دقت بالاتری در برآورد بارش در مقیاس‌های ماهانه،

1. Windward
2. Leeward
3. Orographic Precipitation

فصلی و سالانه برخوردار است و به‌ویژه در مناطق کوهستانی با تراکم ایستگاهی کم، عملکرد قابل‌قبولی ارائه می‌دهد (رستمی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Nozarpour et al., 2024).

تا امروز پژوهش‌های اندکی به‌طور جامع اثر ارتفاعات زاگرس بر بارش را با استفاده از فناوری‌های نوین سنجش‌ازدور بررسی کرده‌اند. تنوع گسترده اقلیمی در بخش‌های مختلف این رشته‌کوه و تغییرات سریع اقلیمی سال‌های اخیر، نیاز به انجام پژوهش‌های دقیق‌تر و کاربردی را برجسته‌تر کرده است (Pordel et al., 2026; Besharatifar et al., 2026). کمبود داده‌های کافی و نبود شواهد علمی گسترده نیز ضرورت مطالعات عمیق‌تر را نشان می‌دهد. الگوی بارش در زاگرس نشان می‌دهد که نوسان ارتفاع در این رشته‌کوه می‌تواند موجب تغییر در الگوهای جوی و توزیع بارش شود. این تفاوت‌های مکانی و عوامل اثرگذار بر آن‌ها نیازمند واکاوی عمیق‌تر هستند. بررسی ساختار ارتفاعی زاگرس و تولید نقشه‌های توپوگرافی می‌تواند در روشن شدن نحوه تأثیر این ناهمواری‌ها بر الگوی بارش نقش مهمی داشته باشد. در مجموع، پرسش از اینکه ارتفاعات زاگرس چگونه بر بارش تأثیر می‌گذارند، مسیری ارزشمند برای گسترش دانش اقلیم‌شناسی و جغرافیای ایران است. بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش‌ازدور طیفی و راداری می‌تواند درک ما را از این تأثیرات دقیق‌تر و جامع‌تر سازد. با توجه به شرایط تغییرات اقلیمی جهانی، اهمیت انجام چنین مطالعاتی بیش از پیش احساس می‌شود.

پیشینه پژوهش

مطالعات متعدد ملی و بین‌المللی در زمینه تحلیل اثر ارتفاع بر الگوهای بارش انجام شده است. اگرچه اثر ارتفاع بر بارش به‌صورت جهانی به رسمیت شناخته شده است، اما مکانیزم‌ها و الگوهای آن در هر منطقه‌ای منحصر به فرد و وابسته به شرایط خاص اقلیمی و جغرافیایی است. در ایران، قیصوری و همکاران (۱۴۰۲)، اروگرایی مؤثر بر بارش در نواحی شمال ایران را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای IMERG و مدل رقومی ارتفاعی در رشته‌کوه‌های البرز بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که افزایش بارش با ارتفاع (گرادیان مثبت) در برخی مناطق شمالی و شرق استان‌ها مشهود است و جهت‌گیری دامنه‌ها نیز تأثیر قابل توجهی بر میزان بارش دارد. این مطالعه نمونه‌ای از تحلیل ارتفاع و توپوگرافی در مناطق کوهستانی ایران است که می‌تواند برای مطالعه زاگرس الگویی مشابه ارائه دهد. سروش و فتحیان (۱۴۰۰)، در پژوهشی به بررسی رابطه بین ارتفاع و شیب روند متغیرهای اقلیمی در ایران، داده‌های ایستگاه هواشناسی در سراسر ایران را تحلیل کردند. آن‌ها دریافتند که اثر ارتفاع بر روند متغیرهای اقلیمی در مقیاس سالانه معنی‌دار نیست اما در مقیاس فصلی مشهود است، که اهمیت توجه به عوامل توپوگرافی در تحلیل بارش و شرایط اقلیمی کوهستانی ایران را برجسته می‌کند. نتایج همانند مطالعات نقوی و همکاران (۱۴۰۰) و مهبد و همکاران (۱۴۰۱)، نشان می‌دهد که توپوگرافی و ارتفاع بر روندهای اقلیمی و بارش نقش دارند. و بر اهمیت تحلیل در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر تأکید دارند. در مطالعات متمرکز بر زاگرس، ستوده و همکاران (۱۳۹۷) به اثر کوه‌های زاگرس بر چرخندهای بارش‌زای ایران پرداخته و نشان داده‌اند که زاگرس با ایجاد سد توپوگرافی، مسیر چرخندهای مدیترانه‌ای را تغییر داده و باعث تمرکز بارش در دامنه‌های غربی می‌شود. همچنین، محمدی و لشکری (۱۳۹۷)، نقش توپوگرافی را در تشدید بارش‌های جنوب و جنوب غرب ایران بررسی کردند و نشان دادند که ارتفاع و جهت دامنه‌ها نقش مهمی در تشدید بارش‌های همرفتی دارند. کیانی و همکاران (۱۳۹۸) نیز اثر رشته‌کوه زاگرس را بر تغییرات بارش‌های سودانی در غرب ایران واکاوی کردند. علاوه بر این، پژوهش‌های بین‌المللی مانند علیجانی (۲۰۰۸) و سعیدآبادی (۲۰۱۶)، نیز به‌طور خاص اثر توپوگرافی زاگرس را بر توزیع بارش مدل‌سازی کرده‌اند.

پردل^۱ و همکاران (۲۰۲۶)، با تحلیل داده‌های ماهواره‌ای در زاگرس مرکزی نشان دادند که شروع فصل رشد، اوج فصل رشد و پایان فصل رشد زودتر از گذشته رخ می‌دهد و این تغییرات همبستگی قوی با بارش و دما دارد. و بیانگر آن است که مراتع زاگرس به‌شدت نسبت به تغییرات اقلیمی حساس هستند و الگوهای رشد گیاهی در این منطقه در حال دگرگونی است. در همین راستا، علینژاد و همکاران (۲۰۲۶)، با تحلیل داده‌های تاریخی بارش از ۲۶۹ ایستگاه هواشناسی و باران‌سنجی در زاگرس (دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۵) و همچنین پیش‌بینی بارش آینده با استفاده از مدل‌های CMIP6، به ارزیابی روند بارش در این رشته‌کوه پرداختند. نتایج نشان داد که بیشتر ایستگاه‌ها روندهای

غیرمعنی‌دار آماری را در بارش تاریخی نشان دادند. با این حال، از میان ۲۶۹ ایستگاهی که روند معنی‌دار داشتند، ۳۵ ایستگاه در فصل تابستان روند افزایشی نشان دادند، هرچند مقدار افزایش نسبتاً ناچیز بود. بارزترین تغییرات در الگوهای بارش طی دو دهه اخیر شناسایی شد و تحلیل‌ها حاکی از آن بود که بارش در منطقه عمدتاً روند کاهشی داشته است. از سوی دیگر، بشارتی‌فر و همکاران (۲۰۲۶)، با ارزیابی ده محصول بارش ماهواره‌ای در سه حوضه آبریز با شرایط اقلیمی و توپوگرافی متنوع در ایران (از جمله حوضه کرخه در زاگرس)، عملکردی آن‌ها را در ارتفاعات مختلف مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که محصولات TERRA، IMERG، MSWEP و CHIRPS عملکردی قابل‌اعتماد و ثابتی دارند، در حالی که محصولات PERSIANN، GLDAS و FLDAS به‌ویژه در مناطق مرتفع از دقت کم‌تری برخوردارند. به‌کارگیری روش‌های تصحیح اریبی مبتنی بر اوروگرافی (مانند QQM-ORO و LS-ORO) بهبود قابل‌توجهی در دقت برآورد بارش در مناطق کوهستانی ایجاد کرد. در مجموع، MSWEP و CHIRPS به‌عنوان قابل‌اعتمادترین محصولات در ارتفاعات بالا معرفی شدند. همچنین، ارزیابی‌های مستقل در ایران نشان داده است که MSWEP در مقایسه با سایر محصولات ماهواره‌ای از دقت بالاتری در برآورد بارش در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه برخوردار است (رستمی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Nozarpour et al., 2024). در مطالعه‌ای لی و همکاران (۲۰۲۳)، در بررسی تغییرات مکانی و زمانی دما و بارش و ارتباط آن با عوامل جغرافیایی در کوه‌های چین نشان دادند که دما و بارش با افزایش ارتفاع و عرض جغرافیایی افزایش می‌یابد. این مطالعه الگویی روشن از وابستگی بارش به عوامل جغرافیایی ارائه می‌دهد. و ضرورت بررسی همزمان این عوامل در مناطق مشابه، از جمله رشته‌کوه‌های زاگرس را تقویت می‌کند. میائو و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهشی به بررسی تغییرات زمانی-مکانی دما و بارش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ERA5-Land در مناطق کوهستانی پرداختند. نتایج نشان داد که دما روند افزایشی و بارش روند کاهشی داشته است. این تغییرات در ارتفاعات میانی وابسته به ارتفاع بوده و الگوهای بارش در دامنه‌های شرقی و غربی متفاوت بوده‌اند. این مطالعه تأکید دارد که الگوهای اقلیمی کوهستان‌ها نه تنها محلی، بلکه تحت تأثیر توپوگرافی و شرایط جوی گسترده قرار دارند و این یافته‌ها می‌تواند مبنایی برای تحلیل مشابه در مناطق کوهستانی ایران، مانند البرز و زاگرس، باشد. مونترو-مارتینز^۲ (۲۰۲۱)، اثر ارتفاع را بر پیش‌بینی انرژی جنبشی بارش و فرسایش خاک در کمزیک بررسی کرد. این پژوهش با تحلیل داده‌های دیسدرومتر نوری در چهار ایستگاه کمزیک نشان داد که، با افزایش ارتفاع، انرژی جنبشی بارش افزایش می‌یابد و رابطه بین شدت بارش و انرژی بارش وابسته به ارتفاع تغییر می‌کند. این یافته اهمیت در نظرگیری اثرات مستقیم توپوگرافی بر ویژگی‌های فیزیکی بارش را نشان می‌دهد که می‌تواند در مدل‌سازی هیدرولوژیکی زاگرس نیز مورد توجه قرار گیرد. این مطالعه، مشابه پژوهش‌های بین‌المللی دیگر همچون میائو و همکاران (۲۰۲۲)، نشان می‌دهد که بررسی تغییرات ارتفاعی و مکانی بارش برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی اثرات محیطی ضروری است.

شکاف پژوهش

با وجود پژوهش‌های ارزشمند یادشده، بررسی دقیق منابع نشان می‌دهد که شکاف دانشی مهمی در این حوزه وجود دارد. عمده مطالعات انجام‌شده در زاگرس یا بر تغییرات زمانی بارش در مقیاس سالانه متمرکز بوده‌اند و یا به بازسازی خشکسالی‌های بلندمدت پرداخته‌اند. همچنین، مطالعات محدودی که به بررسی اثر ارتفاع بر بارش پرداخته‌اند، عمدتاً در سایر مناطق کوهستانی ایران (مانند البرز) انجام شده و یا از داده‌های ایستگاهی با پراکندگی مکانی محدود استفاده کرده‌اند. از سوی دیگر، پژوهش‌های بین‌المللی عمدتاً بر ارزیابی عملکرد محصولات مختلف بارش ماهواره‌ای متمرکز بوده‌اند و کمتر به تحلیل سیستماتیک رابطه بین طبقات ارتفاعی و بارش فصلی پرداخته‌اند. در ایران، ستوده و همکاران (۱۳۹۷)، به اثر زاگرس بر چرخندهای بارش‌زا پرداخته‌اند، محمدی و لشکری (۱۳۹۷)، نقش توپوگرافی را در تشدید بارش‌های جنوب غرب بررسی کرده‌اند و کیانی و همکاران (۱۳۹۸)، اثر رشته‌کوه زاگرس را بر تغییرات بارش‌های سودانی واکاوی کرده‌اند، اما هیچ‌یک به‌طور ویژه تأثیر همزمان طبقات ارتفاعی و تغییرات فصلی را با استفاده از داده‌های با تفکیک مکانی بالا در کل پهنه

2. Lei

3. Miao

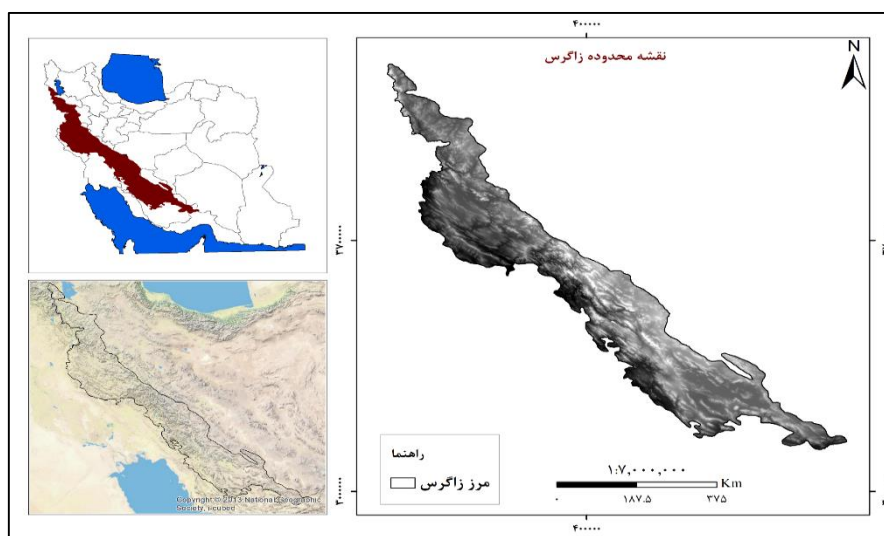
4. Montero-Martinez

زاگرس بررسی نکرده‌اند. همچنین، پژوهش‌های بین‌المللی عمدتاً بر جنبه‌های خاصی از اثر توپوگرافی متمرکز بوده‌اند و به تحلیل همزمان طبقات ارتفاعی و تغییرات فصلی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا نپرداخته‌اند. در همین راستا، پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین از داده‌های ماهواره‌ای MSWEP استفاده می‌کند، تحلیل فضایی را با دقت بالا انجام می‌دهد، طبقه‌بندی ارتفاعی را مبنای کار قرار داده و داده‌های بارش را با مدل رقومی ارتفاعی ترکیب می‌نماید. توجه به اهمیت بارش در تأمین منابع آب و نقش کلیدی ارتفاعات زاگرس در توزیع مکانی و زمانی بارش مناطق غربی ایران، این پژوهش با هدف تحلیل تأثیر طبقات ارتفاعی بر الگوهای بارش فصول مختلف در پهنه زاگرس با استفاده از داده‌های سنجش از دور انجام می‌شود. بر این اساس، سؤال اصلی این پژوهش این است که الگوهای توزیع فضایی بارش در طبقات مختلف ارتفاعی زاگرس چگونه است و عوامل توپوگرافی چه نقشی در تغییرپذیری فصلی آن دارند؟ نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه مورد مطالعه شامل محدوده زاگرس است. زاگرس بزرگ‌ترین رشته‌کوه فلات ایران است که از شمال‌شرق عراق تا جنوب ایران امتداد دارد. اقلیم این منطقه از نوع قاره‌ای با رژیم بارش مدیترانه‌ای است که زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک را تجربه می‌کند (Noroozi et al., 2020). این رشته‌کوه یکی از مهم‌ترین ساختارهای توپوگرافی غرب ایران است (Attarod et al., 2025). (Attarod et al., 2023a,b; Vaghefi et al., 2019). و حدود ۱۶۰۰ کیلومتر طول و ۲۴۰ کیلومتر عرض دارد (جعفری و فولادی، ۱۴۰۲). این رشته‌کوه در عرض‌های جغرافیایی 25° تا 38° شمال و طول‌های 45° تا 55° شرق قرار گرفته (Britannica, 2024) و نقش کلیدی در توزیع اقلیم و منابع آب منطقه‌ای دارد (شکل ۱). ارتفاع متوسط زاگرس بین ۱۷۰۰ تا ۴۰۰۰ متر است و قله‌های بلند آن مانند دنا و زردکوه، بارش و دما را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین توپوگرافی ناهموار و طولانی زاگرس باعث می‌شود که جریان‌های جوی غربی هنگام عبور از آن با صعود اجباری مواجه شوند و الگوی بارش و اقلیم منطقه را تغییر دهند. این رشته‌کوه مرز فلات ایران را از غرب تشکیل می‌دهد و از استان‌های کرمانشاه، ایلام، لرستان، کهگیلویه و بویراحمد تا استان فارس و خوزستان امتداد دارد (ستوده و همکاران، ۱۳۹۷; Attarod et al., 2025). زاگرس به‌عنوان یک آب‌انبار طبیعی عمل می‌کند و نقش مهمی در تأمین منابع آب سطحی و زیرزمینی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دارد (محمدی و لشکری، ۱۳۹۷). اکوسیستم‌های جنگلی بلوط زاگرس با گونه‌ی *Quercus brantii* var. *persica*، علاوه بر حفاظت از خاک و آب، میزبان تنوع زیستی بالا هستند و نقش اقتصادی و اجتماعی مهمی در زندگی بیش از ۱۰ میلیون نفر در مناطق پیرامونی ایفا می‌کنند (Sagheb-Talebi et al., 2014). با توجه به همین ویژگی‌های منحصر به فرد، انتخاب رشته‌کوه زاگرس در این پژوهش بر پایه دلایل علمی زیر استوار است: (۱) نقش کلیدی و بی‌بدیل آن در تأمین منابع آب غرب و جنوب غرب ایران، (۲) وجود گرادیان شدید ارتفاعی و توپوگرافی پیچیده که امکان مطالعه رابطه ارتفاع-بارش را فراهم می‌کند، (۳) قرارگیری در مسیر سامانه‌های اصلی باران‌زای منطقه و (۴) دارا بودن دامنه‌های کاملاً متضاد از نظر جهت (بادگیر و پناه‌باد) که نمونه‌ای ایده‌آل برای بررسی پدیده سایه بارشی محسوب می‌شود.



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه

مراحل انجام پژوهش

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، از محصول بارش ماهواره‌ای MSWEP با وضوح فضایی ۰٫۱ درجه (تقریباً ۱۱ کیلومتر) و دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. این محصول از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، بارتحلیل و ایستگاه‌های زمینی تولید شده و برای مطالعات منطقه‌ای در مناطق کوهستانی مناسب تشخیص داده شده است (Beck et al., 2019). همچنین به منظور اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای، از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور با دوره آماری مشابه (۱۹۹۰-۲۰۲۴) استفاده گردید. برای استخراج ویژگی‌های توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاع ALOS PALSAR با وضوح ۱۲٫۵ متر استفاده شد. این مدل امکان استخراج لایه‌های ارتفاع، شیب، جهت دامنه و سایر شاخص‌های توپوگرافی را فراهم می‌سازد. مشخصات داده‌های اصلی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده

دوره زمانی	منبع	نوع داده
۱۹۹۰-۲۰۲۴	MSWEP	بارش ماهواره‌ای
-	ALOS PALSAR	مدل رقومی ارتفاع
۱۹۹۰-۲۰۲۴	ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی	بارش زمینی

روش‌شناسی تحقیق

در این مرحله، لایه‌های توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع ALOS PALSAR با استفاده از ابزارهای استاندارد پردازش DEM در محیط ArcGIS استخراج شد. منطقه مورد مطالعه بر اساس ارتفاع از سطح دریا به پنج طبقه ارتفاعی تقسیم‌بندی گردید:

۱. طبقه اول: کم‌تر از ۱۰۰۰ متر
۲. طبقه دوم: ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر
۳. طبقه سوم: ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر
۴. طبقه چهارم: ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر
۵. طبقه پنجم: بالاتر از ۲۵۰۰ متر

این طبقه‌بندی بر اساس مطالعات پیشین در مناطق کوهستانی مشابه انجام شده است (Barry, 2008). پس از طبقه‌بندی، میانگین فضایی بارش سالانه و فصلی برای هر طبقه ارتفاعی با استفاده از ابزار Zonal Statistics در محیط ArcGIS استخراج گردید. فصول مورد بررسی شامل بهار (فروردین تا خرداد)، تابستان (تیر تا شهریور)، پاییز (مهر تا آذر) و زمستان (دی تا اسفند) می‌باشد. همچنین توزیع مساحت هر طبقه ارتفاعی محاسبه شد.

به منظور شناسایی و کمی‌سازی روند تغییرات بارش در بلندمدت، از دو آزمون ناپارامتریک من-کندال (Mann-Kendall Test) و تخمین گر شیب سن استفاده شد. این آزمون‌ها به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها و مقاومت در برابر داده‌های پرت، در تحلیل‌های اقلیمی کاربرد گسترده‌ای دارند (Kendall, 1975; Mann, 1945; Sen, 1968).

آزمون من-کندال برای تشخیص وجود روند معنی‌دار در سری زمانی بارش به کار می‌رود. آماره S از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن x_i و x_j : مقادیر بارش در سال‌ها i و j و تابع sgn برابر است با:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

برای داده‌های با حجم نمونه بزرگ ($n > 10$)، آماره S با استفاده از رابطه (۲) نرمال شده و آماره Z محاسبه شد.

$$Z = \begin{cases} (s-1) / \sqrt{\text{var}(s)} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ (s+1) / \sqrt{\text{var}(s)} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن واریانس آماره S ($\text{Var}(S)$) با استفاده از رابطه زیر (رابطه ۳) محاسبه می‌گردد:

$$\text{Var}(s) = [n(n-1)(2n+5) - \sum (t_p(t_p-1)(2t_p+5))] / 18 \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه n : تعداد داده‌ها، t_p : تعداد گروه‌های داده‌ای تکراری (مقادیر هم‌رتبه) و t_p : تعداد داده‌های هم‌رتبه در گروه p ام. برای محاسبه بزرگی شیب روند، از تخمین گر سن استفاده شد که روشی ناپارامتری و مقاوم در برابر داده‌های پرت است (Sen, 1968). شیب روند از رابطه (۴) محاسبه گردید:

$$\beta = \text{median}[(x_j - x_i) / (j - i)] \quad \text{برای تمام } i < j \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن β شیب روند (میلی‌متر در سال) را نشان می‌دهد.

این تخمین گر میانه شیب‌های تمام جفت‌های داده است و روشی ناپارامتری و مقاوم در برابر داده‌های پرت محسوب می‌شود. مقدار مثبت β نشان‌دهنده روند افزایشی و مقدار منفی نشان‌دهنده روند کاهشی است. سطح معنی‌داری ۰.۰۵ برای کلیه آزمون‌ها در نظر گرفته شد ($P < 0.05$).

در ادامه به منظور بررسی رابطه خطی بین بارش و ارتفاع در پهنه زاگرس، از ضریب همبستگی اسپیرمن (ρ) استفاده گردید. مقدار این ضریب بین -۱ و +۱ است. مقدار منفی نشان‌دهنده همبستگی معکوس (با افزایش ارتفاع، بارش کاهش می‌یابد) و مقدار مثبت نشان‌دهنده همبستگی مستقیم است. آزمون معنی‌داری همبستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد ($P < 0.05$).

برای بررسی معنی‌دار بودن تفاوت میانگین بارش بین طبقات مختلف ارتفاعی، از تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. شایان ذکر است که داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ۲۵۰،۰۰۰ پیکسل با پوشش مکانی پیوسته است. با توجه به اینکه پیکسل‌های مجاور به دلیل ماهیت داده‌های مکانی دارای خودهمبستگی فضایی بوده و مستقل از یکدیگر نیستند، استفاده از آزمون ANOVA بدون اعمال نمونه‌گیری فضایی می‌تواند منجر به پدیده تکرار کاذب^۱ و کاهش مصنوعی واریانس درون‌گروهی شود. به منظور رعایت استقلال مشاهدات و جلوگیری از پدیده تکرار کاذب ناشی از خودهمبستگی فضایی پیکسل‌ها، از روش نمونه‌گیری سیستماتیک شبکه‌ای استفاده شد. بدین منظور، یک شبکه منظم با ابعاد ۰٫۱ درجه (مطابق با وضوح داده‌های MSWEP) بر روی منطقه مورد مطالعه ایجاد گردید و از هر سلول شبکه، یک پیکسل به‌عنوان نمونه انتخاب شد. حجم نمونه جدید حدود ۲،۸۵۰ پیکسل بود که نسبت به ۲۵۰،۰۰۰ پیکسل اولیه، استقلال نسبی مشاهدات را تأمین می‌کند. این آزمون فرض صفر (H_0) مبنی بر برابری میانگین بارش در تمام طبقات ارتفاعی را در مقابل فرض مقابل (H_1) مبنی بر نابرابری حداقل دو میانگین آزمون می‌کند. سپس برای تعیین اینکه کدام طبقات ارتفاعی با یکدیگر تفاوت معنی‌دار دارند، از آزمون تعقیبی شفه در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده گردید. این آزمون یکی از محافظه‌کارترین آزمون‌های پس از ANOVA است که احتمال خطای نوع اول را کنترل می‌کند.

همچنین، به منظور بررسی اثر جهت شیب بر توزیع بارش، لایه جهت شیب استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع به هشت طبقه اصلی (شمالی، شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوبی، جنوب غربی، غربی و شمال غربی) تقسیم‌بندی شد و میانگین بارش فصلی و سالانه برای هر طبقه با استفاده از آماره Zonal Statistics محاسبه گردید. سپس طبقات جهت شیب بر اساس جهت‌گیری نسبت به سامانه‌های بارشی غالب، به دو گروه بادگیر و بادپناه تفکیک و مقایسه شدند.

نتایج

اعتبارسنجی داده‌های بارش ماهواره‌ای MSWEP

به منظور ارزیابی دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای MSWEP در منطقه زاگرس، نتایج این محصول با داده‌های ۲۵ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور مقایسه گردید. نتایج اعتبارسنجی (جدول ۲) نشان داد که داده‌های MSWEP از دقت قابل قبولی در منطقه مورد مطالعه برخوردار هستند. ضریب تبیین (R^2) برابر ۰٫۸۴، بیانگر همبستگی قوی بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است. مقدار RMSE برابر ۱۸٫۳ میلی‌متر در مقیاس سالانه، نشان‌دهنده خطای نسبتاً پایین این محصول در برآورد بارش منطقه است. همچنین مقدار MBE برابر ۲٫۱ میلی‌متر حاکی از بیش‌برآورد اندک داده‌های ماهواره‌ای است که در محدوده قابل قبول برای مطالعات منطقه‌ای قرار دارد. بنابراین، داده‌های MSWEP برای تحلیل‌های فضایی بارش در پهنه زاگرس قابل استفاده هستند.

جدول ۲. نتایج اعتبارسنجی داده‌های بارش MSWEP در مقابل داده‌های ایستگاهی در پهنه زاگرس (دوره ۲۰۲۴-۱۹۹۰)

شاخص آماری	مقدار	تفسیر
R^2	۰٫۸۴	همبستگی قوی
RMSE	۱۸٫۳ میلی‌متر	خطای قابل قبول

شاخص آماری	مقدار	تفسیر
MBE	$\pm 2/1$ میلی متر	بیش برآورد اندک
MAE	۱۴۷ میلی متر	دقت مناسب

تحلیل روند سری زمانی بارش پهنه زاگرس

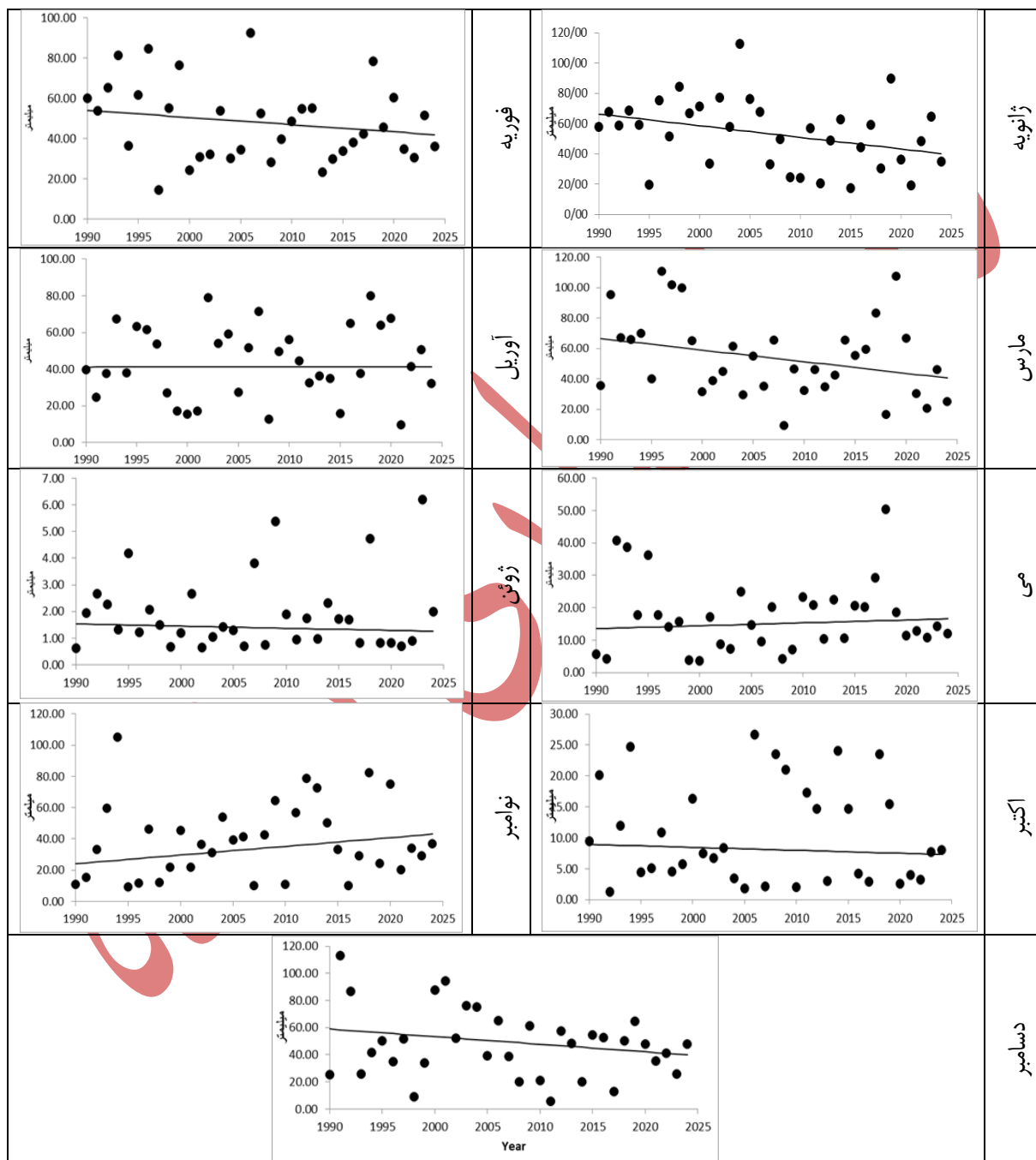
بر اساس نتایج آزمون ناپارامتریک من-کندال برای سری زمانی ۳۵ ساله بارش پهنه زاگرس (۱۹۹۰-۲۰۲۴)، مقدار بحرانی آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر $\pm 1,96$ در نظر گرفته شده است. مقایسه مقادیر T محاسباتی با T بحرانی نشان می‌دهد که در ماه ژانویه مقدار Z برابر با $-2,05$ و در ماه دسامبر مقدار Z برابر با $-1,99$ بوده است که قدرمطلق آن‌ها از $1,96$ بیشتر است؛ بنابراین روند کاهشی این دو ماه از نظر آماری معنی‌دار است. در سایر ماه‌ها، از جمله مارس با مقدار Z برابر $-1,90$ ، قدرمطلق آماره کمتر از حد بحرانی بوده و در نتیجه روندها غیرمعنی‌دار ارزیابی می‌شوند. برآوردگر شیب سن (Q) نیز جهت و شدت تغییرات را نشان می‌دهد؛ به طوری که در ژانویه و دسامبر به ترتیب شیب $-0,67$ و $-0,56$ میلی متر در سال بیان‌گر کاهش سالانه بارش است. اگرچه در مارس نیز شیب $-0,57$ میلی متر در سال مشاهده می‌شود، اما به دلیل عدم عبور آماره Z از حد بحرانی، این کاهش‌ها از نظر آماری تأیید نمی‌شوند. در مقابل، ماه نوامبر دارای شیب مثبت $0,35$ است که نشان‌دهنده تمایل افزایشی بارش بوده، ولی مقدار Z برابر $1,14$ کمتر از سطح معنی‌داری است. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که طی دوره آماری مورد بررسی، تنها ماه‌های ژانویه و دسامبر روند کاهشی معنی‌دار را تجربه کرده و سایر ماه‌ها علی‌رغم نوسانات مثبت یا منفی، فاقد روند معنادار آماری هستند (جدول ۳). لازم به ذکر است که به دلیل بارش ناچیز (کمتر از ۱ میلی متر) در ماه‌های تابستان، روند آن‌ها محاسبه نشد.

جدول ۳. نتایج حاصل از اجرای دو تست تحلیل روند ناپارامتریک تخمینگر شیب Sen و Man-Kendal برای بررسی روند سری زمانی بارش ماهانه منطقه مورد مطالعه دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴ در سطح اطمینان ۹۵ درصد

توضیحات	Test Z	Test S	Q-Slop	
ژانویه	$\pm 1/96$	$-2/05$	$-0/67$	معنی‌دار
فوریه	$\pm 1/96$	$-1/11$	$-0/36$	غیرمعنی‌دار
مارس	$\pm 1/96$	$-1/90$	$-0/57$	غیرمعنی‌دار
آوریل	$\pm 1/96$	$0/00$	$0/00$	غیرمعنی‌دار
می	$\pm 1/96$	$0/31$	$0/09$	غیرمعنی‌دار
ژوئن	$\pm 1/96$	$-0/26$	$-0/01$	غیرمعنی‌دار
اکتبر	$\pm 1/96$	$-0/45$	$-0/05$	غیرمعنی‌دار
نوامبر	$\pm 1/96$	$14/1$	$0/35$	غیرمعنی‌دار
دسامبر	$\pm 1/96$	$-1/99$	$-0/56$	معنی‌دار

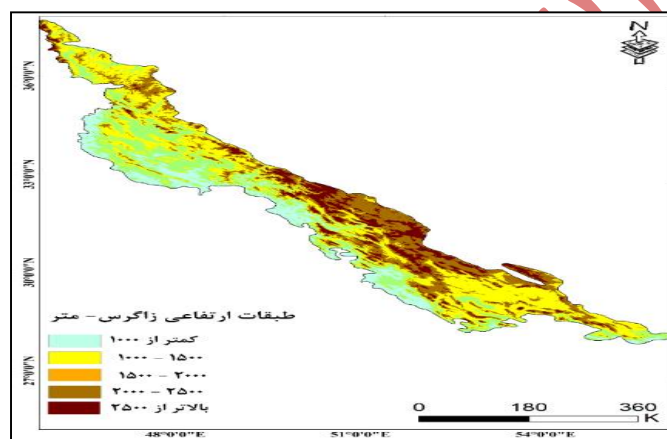
همان‌طور که در نمودارهای روندنگار شکل (۲) دیده می‌شود، بارش ماه ژانویه طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴، روند کاهشی با شیب $-0/67$ میلی متر در سال داشته است که این شیب روند آشکار شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد براساس آزمون ناپارامتریک من-کندال معنی‌دار بوده است. در ماه فوریه نیز روند کاهشی وجود داشته است که برابر $-0/36$ میلی متر در سال بوده است که این روند در سطح

اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نبوده است. در ماه مارس نیز روند بارش در سطح پهنه زاگرس براساس تخمین‌گر شیب سن، برابر $0/۵۷$ - میلی‌متر در سال بوده است. بارش ماه‌های فصل بهار روند معنی‌داری را طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴ نشان نداده است. در نهایت بارش پاییزه در ماه نوامبر روند افزایشی با شیب $۰/۳۵$ میلی‌متر در سال داشته است که این روند معنی‌دار نبوده است. اما در ماه دسامبر روند کاهشی با شیب $-۰/۵۵$ میلی‌متر در سال دیده شده است که این روند در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده است.



شکل ۲. روند سری زمانی بارش ماهانه پهنه زاگرس مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴ براساس آزمون تخمین‌گر شیب سن در سطح اطمینان ۹۵ درصد

همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود طبقات ارتفاعی زاگرس نشان می‌دهد که ساختار توپوگرافی این پهنه به‌طور عمده از یک کمربند کوهستانی کشیده در راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی تشکیل شده است که بیشترین ارتفاعات در بخش‌های مرکزی و شرقی این کمربند متمرکز است. بر اساس طبقات ارتفاعی، کمینه ارتفاع در نواحی حاشیه‌ای، به‌ویژه در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی، کم‌تر از ۱۰۰۰ متر بوده و این مناطق عمدتاً شامل دشت‌ها و اراضی کم‌شیب می‌باشند. در مقابل، بیشینه ارتفاع در هسته کوهستانی زاگرس و خط‌الرأس‌های اصلی، به بیش از ۲۵۰۰ متر می‌رسد که بیان‌گر حضور ارتفاعات مرتفع و ناهمواری‌های شدید است. تغییرات ارتفاعی در جهت شرق به غرب نشان می‌دهد که ارتفاعات به‌طور کلی از بخش‌های مرکزی و شرقی به سمت غرب کاهش یافته و به دشت‌های کم‌ارتفاع منتهی می‌شوند. همچنین در امتداد شمال به جنوب، الگوی ناهمواری‌ها بیان‌گر تداوم رشته‌کوه‌ها با نوسانات موضعی ارتفاع است، به‌گونه‌ای که ارتفاعات میانی نسبت به دو انتهای شمالی و جنوبی از میانگین ارتفاع بیشتری برخوردارند. نیم‌رخ ارتفاعی در هر دو راستای مذکور حاکی از شیب نسبتاً تند در مجاورت خط‌الرأس‌ها و شیب ملایم‌تر در حواشی است که نشان‌دهنده فرایندهای فرسایشی و رسوبی در دامنه‌ها و دشت‌های پیرامونی می‌باشد. در مجموع، الگوی توپوگرافی منطقه بیان‌گر غالب بودن ناهمواری‌های کوهستانی، تمرکز ارتفاعات بالا در محور اصلی زاگرس و کاهش تدریجی ارتفاع به سمت حاشیه‌های غربی و جنوبی است که می‌تواند نقش مهمی در کنترل اقلیم محلی، رژیم بارش و الگوی زهکشی منطقه ایفا کند.



شکل ۳. طبقات ارتفاعی پهنه زاگرس مستخرج از مدل ارتفاع رقومی زمین با رزولوشن فضایی ۱۲٫۵ متر

در توزیع مساحت طبقات ارتفاعی پهنه زاگرس بر اساس جدول (۴)، بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه که در طبقه ارتفاعی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر قرار گرفته است، ۱۱ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه یعنی ۲۱۰۴۳ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد. بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه در طبقه ارتفاعی ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متری قرار گرفته است. در این طبقه ارتفاعی ۳۵ درصد از مساحت منطقه یعنی ۶۹۳۰۲ کیلومتر مربع از در این طبقه ارتفاعی قرار گرفته است. اما در بالاترین طبقه ارتفاعی یعنی در طبقه ارتفاعی بالاتر از ۲۵۰۰ متر تنها ۱۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه یعنی ۱۹۳۶۷ کیلومتر مربع از مساحت منطقه مورد مطالعه توزیع شده است.

جدول ۴. توزیع مساحت طبقات ارتفاعی پهنه زاگرس مستخرج از مدل ارتفاع رقومی زمین با رزولوشن فضایی ۱۲٫۵ متر

طبقه ارتفاعی	مساحت طبقه - کیلومتر مربع	درصد نسبی	درصد تجمعی
> ۱۰۰۰	۲۱۰۴۳	۱۱	۱۱
۱۵۰۰-۱۰۰۰	۴۰۶۶۱	۲۱	۳۱
۲۰۰۰-۱۵۰۰	۶۹۳۰۲	۳۵	۶۶
۲۵۰۰-۲۰۰۰	۴۷۳۳۴	۲۴	۹۰
< ۲۵۰۰	۱۹۳۶۷	۱۰	۱۰۰

ساختار بارش در طبقات ارتفاعی زاگرس

میانگین فضایی بارش فصلی و سالانه هر کدام از طبقات ارتفاعی در جدول (۵) ارائه شده است. مقادیر میانگین فضایی بارش سالانه و فصلی براساس آماره Zonal Statistic در هر طبقه ارتفاعی استخراج گردید. لازم به ذکر است که بارش فصل تابستان (تیر تا شهریور) در منطقه زاگرس به دلیل غلبه پرفشار جنب‌حاره‌ای بسیار ناچیز (نزدیک به صفر) بوده و در تفکیک فصلی جدول به صورت مجزا ارائه نشده است؛ از این رو مجموع بارش سه فصل پاییز، زمستان و بهار، معادل بارش سالانه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در فصل پاییز بیشترین میانگین بارش مربوط به طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر با مقدار ۸۷٫۴ میلی‌متر است و پس از آن طبقه کم‌تر از ۱۰۰۰ متر با ۸۳٫۸ میلی‌متر قرار دارد، در حالی که با افزایش ارتفاع، بارش پاییزه روند کاهشی داشته و در طبقه بالاتر از ۲۵۰۰ متر به ۴۶٫۳ میلی‌متر می‌رسد. در فصل زمستان نیز بیشترین بارش دوباره در طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر با ۱۵۳ میلی‌متر ثبت شده است و کم‌ترین مقدار مربوط به طبقه بالاتر از ۲۵۰۰ متر با ۱۱۴٫۱ میلی‌متر است، هرچند اختلاف طبقات در این فصل کم‌تر از پاییز است. در فصل بهار الگو کمی متفاوت است و بیشترین بارش در طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر با ۱۱۴٫۱ میلی‌متر مشاهده می‌شود و پس از آن طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر با ۱۱۳٫۳ میلی‌متر قرار دارد، در حالی که کم‌ترین مقدار به طبقه کم‌تر از ۱۰۰۰ متر با ۷۹٫۴ میلی‌متر مربوط است. در مقیاس سالانه، پربارش‌ترین طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر با میانگین ۳۵۳٫۷ میلی‌متر است و پس از آن طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر با ۳۲۷٫۷ میلی‌متر قرار می‌گیرد، در حالی که کم‌ترین بارش سالانه در طبقه بالاتر از ۲۵۰۰ متر با ۲۵۶٫۶ میلی‌متر ثبت شده است.

با توجه به نقشه طبقات ارتفاعی، پهنه‌های کم‌تر از ۱۰۰۰ متر عمدتاً در حاشیه‌های غربی و جنوب‌غربی زاگرس و نواحی کم‌شیب قرار دارند. طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر که بیشترین بارش را نشان می‌دهد، بخش وسیعی از دامنه‌های میانی و عمدتاً رو به غرب و جنوب‌غرب را در بر می‌گیرد؛ این نواحی نخستین مناطق برخورد توده‌های مرطوب غربی هستند و به همین دلیل بارش بیشتری دریافت می‌کنند. طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بیشتر در کمربند میانی و دامنه‌های مرتفع‌تر گسترش دارد و در بهار بیشترین بارش را تجربه می‌کند. طبقات ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر و بالاتر از ۲۵۰۰ متر عمدتاً در خط‌الرأس‌ها و ارتفاعات مرکزی و شرقی زاگرس متمرکزند که به دلیل فاصله بیشتر از منبع رطوبت و شرایط دمایی سردتر، میانگین بارش کم‌تری دارند. در مجموع، توصیف آماری نشان می‌دهد که بیشترین بارش فصلی و سالانه در ارتفاعات میانی زاگرس رخ می‌دهد و هم در پاییز و زمستان و هم در مجموع سالانه، طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر پربارش‌ترین طبقه است؛ الگویی که با موقعیت جغرافیایی این طبقه در دامنه‌های رو به جریان‌ات مرطوب غربی و گستردگی فضایی آن در نقشه توپوگرافی همخوانی دارد.

جدول ۵. میانگین فضایی بارش (میانگین دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴) در هر طبقه ارتفاعی پهنه زاگرس

بارش فصلی	۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰	۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰	۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰	بالتر از ۲۵۰۰
بارش پاییزه-میلی‌متر	۸۳/۸	۸۷/۴	۷۱/۶	۵۵
بارش زمستانه-میلی‌متر	۱۴۵	۱۵۳	۱۴۲	۱۲۲/۱
بارش بهاره-میلی‌متر	۷۹/۴	۱۱۳/۳	۱۱۴/۱	۹۷/۸
بارش سالانه-میلی‌متر	۳۰۸/۲	۳۵۳/۷	۳۲۷/۷	۲۷۴/۹
				۴۶/۳
				۱۱۴/۱
				۹۶/۲
				۲۵۶/۶

مقایسه هم‌زمان میانگین بارش و مقادیر انحراف معیار (جدول ۵ و ۶) فضایی در طبقات ارتفاعی زاگرس نشان می‌دهد که الگوی توزیع بارش نه تنها از نظر مقدار، بلکه از نظر تغییرپذیری مکانی نیز وابستگی قابل توجهی به ارتفاع دارد. در فصل پاییز، انحراف معیار بارش بین ۹٫۲ تا ۱۶٫۳ میلی‌متر متغیر است و بیشترین مقدار آن در طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر (۱۶٫۳ میلی‌متر) مشاهده می‌شود، در حالی که کم‌ترین مقدار مربوط به ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر (۹٫۲ میلی‌متر) است؛ این امر نشان می‌دهد که بارش پاییزه در ارتفاعات میانی ناهمگن‌تر و در

ارتفاعات بسیار زیاد یکنواخت‌تر توزیع می‌شود. در فصل زمستان نیز دامنه تغییرات انحراف معیار بین ۸,۹ تا ۲۳ میلی‌متر است و بیشترین مقدار در طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر (۲۳ میلی‌متر) دیده می‌شود، درحالی‌که کم‌ترین مقدار همچنان در طبقه بالاتر از ۲۵۰۰ متر (۸,۹ میلی‌متر) قرار دارد که بیان‌گر یکنواختی نسبی بارش زمستانه در ارتفاعات زیاد است. در فصل بهار، که بیشترین ناپایداری جوی در منطقه رخ می‌دهد، انحراف معیارها به بیشترین مقادیر خود می‌رسند و از ۱۵,۱ میلی‌متر در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر تا ۲۸,۵ میلی‌متر در طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر افزایش می‌یابد؛ این مقدار بیشترین تغییرپذیری فضایی بارش در میان همه فصول و طبقات را نشان می‌دهد.

بررسی ضرایب تغییرات نیز این الگو را تأیید می‌کند؛ بیشترین ضریب تغییرپذیری فصلی بارش مربوط به بارش فصل بهار در طبقه ارتفاعی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر با حدود ۵۴ درصد است که بیان‌گر ناهمگونی بسیار زیاد توزیع بارش‌های بهاره در دشت‌ها و نواحی کم‌ارتفاع است، در حالی‌که کم‌ترین ضریب تغییرات بارش نیز در فصل زمستان و در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر با حدود ۱۶,۷ درصد مشاهده می‌شود که یکنواخت‌ترین شرایط مکانی بارش را نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه، انحراف معیار بارش از ۶۳,۴ میلی‌متر در ارتفاعات بیش از ۲۵۰۰ متر تا ۱۱۸,۳ میلی‌متر در طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر متغیر است و همین طبقه با ضریب تغییرات حدود ۳۷,۹ درصد بیشترین ناهمگنی مکانی بارش سالانه را نشان می‌دهد.

در این بخش نکته قابل توجه آن است که طبقات ارتفاعی میانی زاگرس، که در جدول میانگین‌ها نیز مقادیر نسبتاً بالاتری از بارش سالانه (حدود ۳۲۷ تا ۳۵۳ میلی‌متر) را نشان می‌دادند، هم‌زمان دارای بیشترین انحراف معیار و ضرایب تغییرات نیز هستند؛ به بیان دیگر، مناطقی که بارش بیشتری دریافت می‌کنند، لزوماً یکنواخت‌ترین توزیع مکانی را ندارند، بلکه پیچیدگی توپوگرافی دامنه‌های میانی باعث افزایش ناهمگنی فضایی بارش می‌شود. در مقابل، ارتفاعات بسیار زیاد، با وجود میانگین بارش کم‌تر (حدود ۲۵۶ میلی‌متر در سال)، از نظر آماری پایدارتر و یکنواخت‌تر عمل می‌کنند. این الگو نشان می‌دهد که بیشترین تغییرپذیری فضایی بارش در زاگرس در فصل بهار و عمدتاً در طبقات ارتفاعی میانی و پایین رخ می‌دهد، در حالی‌که زمستان و ارتفاعات بسیار زیاد کم‌ترین تغییرپذیری مکانی بارش را دارند؛ نتیجه‌ای که بیان‌گر نقش هم‌زمان ناپایداری‌های فصلی و ناهمواری‌های توپوگرافی در کنترل ساختار فضایی بارش در این پهنه کوهستانی است.

جدول ۶. انحراف معیار فضایی بارش (میانگین دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴) در هر طبقه ارتفاعی پهنه زاگرس

بارش فصلی	کمتر از ۱۰۰۰ متر	۱۵۰۰ متر	۲۰۰۰ متر	۲۵۰۰ متر	بالاتر از ۲۵۰۰ متر
بارش پاییزه-میلی متر	۱۱/۹	۱۵/۴	۱۶/۳	۱۴/۵	۹/۲
بارش زمستانه-میلی متر	۱۸/۸	۲۳/۰	۲۰/۱	۱۴/۱	۸/۹
بارش بهاره-میلی متر	۲۱/۴	۲۵/۷	۲۸/۵	۲۳/۱	۱۵/۱
بارش سالانه-میلی متر	۸۸/۹	۱۱۴/۱	۱۱۸/۳	۹۲/۰	۶۳/۴

در جدول (۷) همبستگی فضایی بین بارش و ارتفاع ارائه شده است، همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، در سطح پهنه زاگرس، بارش بهاره همبستگی معنی‌داری با بارش ارائه نکرده است. در این فصل، بارش در پهنه زاگرس، همبستگی برابر ۰,۰۵ با ارتفاع در پهنه زاگرس ارائه کرده است که این همبستگی آشکار شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نبوده است. در فصل پاییز بارش منطقه بیشترین همبستگی معکوس را با ارتفاع در پهنه زاگرس داشته است، در این فصل ضریب همبستگی بین بارش و ارتفاع پهنه زاگرس برابر ۰,۴۱- بوده است که در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده است. بارش سالانه نیز همبستگی معنی‌دار معکوسی با ارتفاع در پهنه زاگرس داشته است که برابر ۰,۲۱- بوده است. در نهایت بارش زمستانه نیز با ضریب همبستگی ۰,۳۴- همبستگی معنی‌داری با ارتفاع در پهنه زاگرس نشان داده است.

جدول ۷. همبستگی بین بارش و ارتفاع در پهنه زاگرس در سطح منطقه مورد مطالعه

ضریب همبستگی فضایی	آماره معنی داری Sig	
بارش بهاره	۰/۰۵	۰/۱۲
بارش پاییزه	-۰/۴۱	۰/۰۲۱
بارش زمستانه	-۰/۳۴	۰/۰۲۸
بارش سالانه	-۰/۲	۰/۰۳۸

نتایج آزمون تحلیل واریانس جدول (۸) نشان داد که در مقیاس سالانه و تمامی فصول، اختلاف میانگین بارش بین طبقات مختلف ارتفاعی از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است ($P < 0.001$). بیشترین مقدار آماره F در فصل پاییز (۱۸۲) و کمترین آن در فصل بهار (۴۷) مشاهده شد.

جدول ۸. نتایج آزمون ANOVA برای بررسی تفاوت میانگین بارش در طبقات ارتفاعی

مقیاس زمانی	آماره F	Sig.
سالانه	۶۸	۰/۰۰۰
زمستانه	۱۲۲	۰/۰۰۰
بهاره	۴۷	۰/۰۰۰
پاییزه	۱۸۲	۰/۰۰۰

نتایج آزمون تعقیبی پست‌هاک؛ آزمون شفه Scheffe^۲ در سطح اطمینان ۹۵ درصد در جدول (۹) نشان داد که فصل زمستان و پاییز: طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر با میانگین بارش به ترتیب ۱۵۳ و ۸۷٫۴ میلی‌متر، پربارش‌ترین طبقه است. در فصل بهار، الگوی متفاوتی مشاهده شد؛ طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر با ۱۱۴٫۱ میلی‌متر پربارش‌ترین و طبقه زیر ۱۰۰۰ متر با ۷۹٫۴ میلی‌متر کم‌بارش‌ترین طبقه است. در مقیاس سالانه: طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر بیشترین بارش سالانه (۳۵۳٫۷ میلی‌متر) و طبقه بالای ۲۵۰۰ متر کم‌ترین بارش (۲۵۶٫۶ میلی‌متر) را دارد. بیشترین اختلاف بین این دو طبقه ۹۷٫۱ میلی‌متر است.

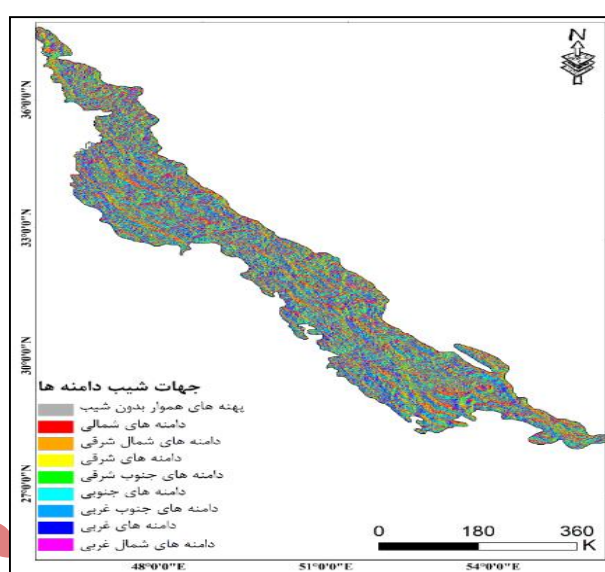
جدول ۹. خلاصه نتایج بیشترین و کم‌ترین بارش در طبقات ارتفاعی

بیشترین اختلاف	کم‌بارش‌ترین طبقه متر (میلی‌متر)	پربارش‌ترین طبقه متر (میلی‌متر)	مقیاس زمانی
۹۷/۱ میلی‌متر	بالای ۲۵۰۰ متر (۲۵۶/۶)	۱۵۰۰-۱۰۰۰ متر (۳۵۳/۷)	سالانه
۳۸/۹ میلی‌متر	بالای ۲۵۰۰ متر (۱۱۴/۱)	۱۵۰۰-۱۰۰۰ متر (۱۵۳/۰)	زمستان

پاییز	۱۵۰۰-۱۰۰۰ متر (۸۷/۴)	بالای ۲۵۰۰ متر (۴۶/۳)	۴۱/۱ میلی‌متر
بهار	۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر (۱۱۴/۱)	زیر ۱۰۰۰ متر (۷۹/۴)	۳۴/۷ میلی‌متر

طبقات جهت شیب دامنه‌ها در پهنه زاگرس

در این بخش میانگین بارش در طبقات مختلف جهت شیب محاسبه و تحلیل شده است. در شکل (۴) نقشه طبقات جهت شیب و در جدول (۱۰) توزیع مساحت هر طبقه ارائه شده است. همچنین، نتایج تحلیل بارش در طبقات جهت شیب و تفکیک دامنه‌های بادگیر و بادپناه به‌ترتیب در جدول‌های (۱۱، ۱۲ و ۱۳) ارائه شده است.



شکل ۴. نقشه جهت شیب دامنه‌ها

بررسی میانگین فضایی بارش در طبقات مختلف جهت شیب (جدول ۱۱) نشان می‌دهد که در مقیاس سالانه، دامنه‌های شمال غربی با ۳۱۶٫۸ میلی‌متر و غربی با ۳۱۴٫۷ میلی‌متر به‌ترتیب پربارش‌ترین جهات هستند، در حالی که کم‌ترین بارش سالانه در دامنه‌های شمالی با ۳۱۱٫۱ میلی‌متر ثبت شده است. دامنه اختلاف سالانه حدود ۵٫۷ میلی‌متر بوده که بیانگر اثر ملایم اما معنادار جهت شیب بر توزیع بارش است. در فصل پاییز، بیشترین بارش در دامنه‌های شمال غربی (۷۱٫۴ میلی‌متر) و کم‌ترین در دامنه‌های شمالی (۶۹٫۵ میلی‌متر) مشاهده می‌شود. در زمستان، دامنه‌های غربی بیشترین بارش (۱۳۸٫۰ میلی‌متر) و دامنه‌های شمالی کم‌ترین مقدار (۱۳۶٫۱ میلی‌متر) را دارند. در فصل بهار، بیشترین بارش در دامنه‌های شمال غربی (۱۰۸٫۲ میلی‌متر) و کم‌ترین در دامنه‌های جنوب غربی (۱۰۳٫۷ میلی‌متر) ثبت شده که اختلافی حدود ۴٫۵ میلی‌متر و بیشترین دامنه تغییرات فصلی را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. توزیع مساحت طبقات جهت شیب پهنه زاگرس

جهت شیب	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد نسبی
شمالی	۲۵/۵۴۴	۱۳

جهت شیب	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد نسبی
شمال شرقی	۳۰/۵۴۴	۱۵
شرقی	۲۱/۶۴۶	۱۱
جنوب شرقی	۱۹/۴۹۰	۱۰
جنوبی	۲۶/۵۷۱	۱۳
جنوب غربی	۳۲/۲۴۰	۱۶
غربی	۲۲/۹۱۴	۱۲
شمال غربی	۱۸/۵۳۱	۹

جدول ۱۱. میانگین فضایی بارش در طبقات جهت شیب پهنه زاگرس (میانگین دوره ۲۰۲۴-۱۹۹۰)

جهت شیب	بارش پاییزه (میلی متر)	بارش زمستانه (میلی متر)	بارش بهاره (میلی متر)	بارش سالانه (میلی متر)
شمال	۶۹/۵۲	۱۳۶/۱۰	۱۰۵/۴۴	۳۱۱/۰۶
شمال شرق	۶۹/۹۸	۱۳۶/۷۸	۱۰۴/۲۰	۳۱۰/۹۶
شرق	۷۰/۷۸	۱۳۶/۸۴	۱۰۶/۷۶	۳۱۴/۳۸
جنوب شرق	۷۰/۸۸	۱۳۶/۲۸	۱۰۷/۹۴	۳۱۵/۱
جنوب	۷۰/۳۴	۱۳۷/۳۴	۱۰۵/۴۶	۳۱۳/۱۴
جنوب غرب	۷۰/۳۴	۱۳۷/۷۶	۱۰۳/۷۴	۳۱۱/۸۴
غرب	۷۰/۸۸	۱۳۸/۰۴	۱۰۵/۸۲	۳۱۴/۷۴
شمال غرب	۷۱/۳۸	۱۳۷/۲۴	۱۰۸/۱۸	۳۱۶/۸

جدول ۱۲. ANOVA برای بررسی تفاوت میانگین بارش در طبقات جهت شیب

مقیاس زمانی	آماره F	Sig.
سالانه	۳۲	۰/۰۰۰

مقیاس زمانی	آماره F	Sig.
زمستانه	۲۸	۰/۰۰۰
بهاره	۴۵	۰/۰۰۰
پاییزه	۱۸	۰/۰۰۰

نتایج آزمون تحلیل واریانس جدول (۱۲) نشان داد که در مقیاس سالانه و تمامی فصول، اختلاف میانگین بارش بین طبقات مختلف جهت شیب از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است ($P < 0.001$). بیشترین مقدار آماره F در فصل بهار (۴۵) و کمترین آن در فصل پاییز (۱۸) مشاهده شد. این الگو بیانگر نقش برجسته‌تر جهت دامنه در بارش‌های بهاره است که می‌تواند ناشی از تقویت ناپایداری‌های همرفتی در این فصل و تعامل آن‌ها با ساختار ناهمواری‌های زاگرس باشد.

جدول ۱۳. مقایسه میانگین بارش فصلی و سالانه در دامنه‌های بادگیر و بادپناه پهنه زاگرس

گروه	بارش پاییزه (میلی متر)	بارش زمستانه (میلی متر)	بارش بهاره (میلی متر)	بارش سالانه (میلی متر)
بادگیر	۷۰/۸۹	۱۳۷/۸۴	۱۰۶/۰۶	۳۱۴/۸۸
بادپناه	۷۰/۲۴	۱۳۶/۴۷	۱۰۵/۸۴	۳۱۲/۵۵
اختلاف (بادگیر - بادپناه)	+۰/۷۴	+۱/۳۷	+۰/۲۲	+۲/۳۳

به‌منظور بررسی دقیق‌تر اثر جهت دامنه، طبقات جهت شیب به دو گروه بادگیر (شمال غربی، غربی و جنوب غربی) و بادپناه (شمالی، شمال شرقی، شرقی و جنوب شرقی) تفکیک شدند. نتایج جدول (۱۳) نشان می‌دهد که میانگین بارش سالانه در دامنه‌های بادگیر (۳۱۴٫۹ میلی‌متر) حدود ۲٫۳ میلی‌متر بیشتر از دامنه‌های بادپناه (۳۱۲٫۶ میلی‌متر) است. این اختلاف در فصل زمستان به حدود ۱٫۴ میلی‌متر و در پاییز به حدود ۰٫۷ میلی‌متر می‌رسد که نشان‌دهنده نقش جهت دامنه در دریافت بارش، به‌ویژه در فصول فعال‌تر سامانه‌های بارشی غربی است. جالب توجه اینکه در فصل بهار، دامنه‌های بادگیر حدود ۰٫۲ میلی‌متر بارش بیشتری نسبت به بادپناه دریافت کرده‌اند که نشان‌دهنده تداوم نقش جهت دامنه در این فصل نیز می‌باشد.

بحث

پهنه زاگرس به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ساختارهای توپوگرافی غرب ایران، نقش کلیدی در توزیع مکانی و زمانی بارش مناطق غربی و جنوب غربی کشور ایفا می‌کند. با توجه به اهمیت بارش در تأمین منابع آب و تأثیرپذیری آن از عوامل توپوگرافی، پژوهش حاضر با هدف تحلیل تأثیر طبقات ارتفاعی بر الگوهای بارش فصول مختلف در پهنه زاگرس انجام گرفت. انتخاب محصول بارش MSWEP در پژوهش حاضر با توجه به عملکرد قابل قبول آن در ایران (عظیمی و همکاران، ۱۴۰۴) و تأیید قابلیت اطمینان آن در ارتفاعات بالا (Besharatifar et al., 2025) صورت گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که در پهنه زاگرس، رابطه معناداری بین ارتفاع و بارش وجود دارد، اما این رابطه خطی و مستقیم نیست. طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۱۵۰۰ متر در موقعیتی قرار دارد که هم دمای کافی برای میعان دارد و هم توده‌های مرطوب هنوز بخش قابل توجهی از رطوبت خود را حفظ کرده‌اند؛ از این رو بیشترین بارش را در این فصول دریافت می‌کند. در مقابل، در

ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر، هوای باقی مانده پس از عبور از خطالرأس اصلی، فرونشست کرده و با افزایش دما، رطوبت نسبی آن به شدت کاهش می یابد (پدیده سایه بارشی) (Roe, 2005; Barry, 2008). این فرآیند باعث می شود که بارش در دامنه های شرقی زاگرس به مراتب کم تر از دامنه های غربی باشد و طبقات ارتفاعی بالایی با کاهش شدید بارش مواجه شوند. این یافته با نتایج قیصوری و همکاران (۱۴۰۲)، در رشته کوه البرز همخوانی دارد که نشان دادند گرادیان مثبت بارش - ارتفاع در برخی مناطق محدود است و جهت گیری دامنه ها نقش تعیین کننده ای در توزیع بارش دارد. نتایج همبستگی فضایی نشان داد که بارش پاییزه ($p=-0.41$) و زمستانه ($p=-0.34$) همبستگی معکوس معناداری با ارتفاع دارند. همانگونه که پیشتر تشریح شد، این همبستگی معکوس را می توان به مکانیسم سایه بارشی نسبت داد که در آن، با افزایش ارتفاع و عبور از خطالرأس، بارش به طور سیستماتیک کاهش می یابد و دامنه های شرقی زاگرس به مراتب بارش کمتری نسبت به دامنه های غربی دریافت می کنند (Roe, 2005; Ntwali et al., 2016). این نتیجه با مطالعات میائو و همکاران (۲۰۲۲)، که نشان دادند الگوهای بارش در دامنه های شرقی و غربی کوهستانی متفاوت است، همخوانی دارد. در فصل بهار، الگوی بارش دستخوش تغییر اساسی می شود و بیشینه بارش به طبقه ارتفاعی ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر منتقل می شود. این تغییر را می توان به فعال شدن سامانه های سودانی و دریای سرخ نسبت داد. این سامانه ها رطوبت خود را از دریاهای گرم تر (دریای سرخ و خلیج فارس) تأمین می کنند و با دمای نسبتاً گرمتری وارد زاگرس می شوند. در این شرایط، ناپایداری های همرفتی نقش بیشتری در بارش دارند. سطح میعان در فصل بهار به دلیل گرم تر شدن هوا، بالاتر می رود و برای تشکیل ابر و بارش، نیاز به صعود بیشتری است. در نتیجه، ارتفاعات ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر که در پاییز و زمستان در سایه بارشی قرار داشتند، در بهار به دلیل قرارگیری در تراز مناسب برای همرفت های عمیق، بیشترین بهره را از این ناپایداری های بهاره می برند (Miao et al., 2022). در مقابل، دشت های کم ارتفاع (کم تر از ۱۰۰۰ متر) به دلیل نبود مکانیسم صعود کافی، از این بارش های همرفتی جا می مانند. همچنین، تغییر جهت جریانات از غربی به جنوبی و جنوب غربی، باعث می شود که دامنه های جنوب شرقی (که در زمستان بادپناه بودند) در بهار بارش بیشتری دریافت کنند. نتایج تحلیل روند سری زمانی نشان داد که در دو ماه ژانویه ($Z=-2.05$) و $Q=-0.67$ تغییر در الگوهای جوی منطقه ای و کاهش نفوذ سامانه های باران زای مدیترانه ایی به غرب ایران نسبت داد. این یافته با نتایج میرزایی و همکاران (۱۴۰۴) از نظر کاهش بارندگی و افزایش دوره های خشک و با نتایج علینژاد و همکاران (۲۰۲۶)، از نظر شناسایی تغییرات بارش در دو دهه اخیر همسو است. همچنین با نتایج لی و همکاران (۲۰۲۳)، در کوه های چین که تغییرات فصلی بارش را بررسی کردند، قابل مقایسه است. سروش و فتحیان (۱۴۰۰)، نیز در مطالعات خود تأکید کردند که اثر ارتفاع بر روند متغیرهای اقلیمی در مقیاس فصلی مشهودتر است. نتایج تحلیل واریانس بیشترین مقدار آماره F در فصل پاییز (۱۸۲) و کمترین آن در فصل بهار (۴۷) را نشان داد که نشان دهنده تأثیرپذیری شدید بارش از عوامل توپوگرافی در مقیاس فصلی است. در تبیین این یافته می توان بیان کرد که این اختلافات، نشان دهنده نقش تعیین کننده ارتفاع در توزیع مکانی بارش است، اما عوامل ارتفاعی به تنهایی قادر به تبیین کامل الگوی بارش نیستند و تعامل ارتفاع با جهت دامنه و موقعیت جغرافیایی، الگوی نهایی بارش را شکل می دهد. این یافته با سروش و فتحیان (۱۴۰۰)، که اثر ارتفاع بر متغیرهای اقلیمی در مقیاس فصلی را معنادار دانستند، همخوانی کامل دارد. همچنین، نقوی و همکاران (۱۴۰۰) و مهبد و همکاران (۱۴۰۱)، نیز بر تأثیر توپوگرافی و ارتفاع بر روندهای اقلیمی و بارش تأکید داشته اند. در ادامه طبقات ارتفاعی میانی (۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) بیشترین تغییرپذیری مکانی بارش را نشان دادند (انحراف معیار ۱۱۸٫۳ میلی متر در مقیاس سالانه و ضریب تغییرات ۳۷٫۹ درصد). این تغییرپذیری بالا ناشی از پیچیدگی توپوگرافی دامنه های میانی و تأثیر همزمان عوامل متعدد (ارتفاع، جهت، شیب) است. به عبارت دیگر، در این طبقات، برهم کنش بین جریانات جوی و ناهمواری های سطح، ناهمگنی فضایی بیشتری ایجاد می کند. این موضوع با مونتررو-مارتینز (۲۰۲۱)، که اثر ارتفاع بر ویژگی های فیزیکی بارش را در مکزیک بررسی کرد، همخوانی دارد. از سوی دیگر، ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر با وجود میانگین بارش کم تر (۲۵۶٫۶ میلی متر سالانه)، از نظر آماری پایدارتر و یکنواخت تر عمل می کنند (کمترین انحراف معیار و ضریب تغییرات). که این امر

می‌تواند ناشی از یکنواختی نسبی شرایط توپوگرافی و غلبه فرایندهای سینوپتیکی بر فرایندهای محلی در این ارتفاعات باشد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده و نتایج بخش جهت شیب، دامنه‌های شمال غربی و غربی در مقیاس سالانه پربارش‌ترین جهات هستند، در حالی که دامنه‌های شمالی کم‌بارش‌ترین جهات محسوب می‌شوند. این الگو را می‌توان با جهت‌گیری غالب سامانه‌های بارشی و نقش دامنه‌های بادگیر در دریافت بارش تبیین کرد. همانگونه که در تبیین الگوی ارتفاعی بارش نیز اشاره شد، در فصول سرد، دامنه‌های غربی و شمال غربی به‌عنوان دامنه‌های بادگیر، بارش بیشتری دریافت کرده و دامنه‌های شرقی در سمت بادپناه قرار می‌گیرند (Alijani, 2008). اگرچه اختلاف مطلق بارش بین دامنه‌های بادگیر و بادپناه در مقیاس سالانه تنها ۲,۳ میلی‌متر برآورد شد (جدول ۱۳)، اما همین اختلاف اندک از نظر آماری معنادار است ($F=32, P<0.001$; جدول ۱۲) و در عمل، تجمع این اختلاف در طول دهه‌های متوالی، نقش مؤثری در شکل‌گیری الگوی پوشش گیاهی و منابع آب دامنه‌های شرقی در مقابل غربی داشته است. این یافته با مدل‌سازی‌های عددی سعیدآبادی و همکاران (۲۰۱۶) در زاگرس میانی همخوانی دارد که نشان دادند بارش در دامنه‌های بادگیر تا ارتفاع ۲۵۰۰ متر افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد؛ الگویی که مؤید نقش تعیین‌کننده جهت دامنه در کنار ارتفاع بر توزیع بارش منطقه است.

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش، نتیجه‌گیری می‌شود که ارتفاع به تنهایی عامل تعیین‌کننده بارش در زاگرس نیست و الگوی بارش تابع پیچیده‌ای از عوامل توپوگرافی شامل ارتفاع، جهت دامنه و موقعیت نسبت به منابع رطوبتی است. مهم‌ترین مکانیسم‌های تبیین‌کننده الگوهای مشاهده‌شده عبارت‌اند از: (۱) صعود اوروگرافیک و نسبت میر آدیاباتیک در دامنه‌های بادگیر که منجر به بیشینه بارش در طبقه ۱۵۰۰-۱۰۰۰ متر در پاییز و زمستان می‌شود؛ (۲) پدیده سایه بارشی که باعث کاهش شدید بارش در ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متر و دامنه‌های شرقی می‌گردد؛ (۳) تغییر سامانه‌های بارشی در بهار به سمت جریانات جنوبی و همرفتی که سطح میعان را بالا برده و بیشینه بارش را به طبقه ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر منتقل می‌کند؛ و (۴) نقش جهت دامنه که در فصول سرد با تقویت بارش در دامنه‌های غربی و در بهار با تغییر الگو به سمت دامنه‌های جنوبی، تغییرپذیری فصلی بارش را تشدید می‌کند. ارتفاعات میانی (۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر) پربارش‌ترین طبقه در فصول پاییز، زمستان و مقیاس سالانه هستند و بیشترین میانگین بارش سالانه (۳۵۳,۷ میلی‌متر) را دارا می‌باشند. فصل بهار الگوی متفاوتی دارد و بیشترین بارش در طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تأثیرپذیری الگوی بارش از نوع سامانه‌های باران‌زای فصلی است. پدیده سایه بارشی در زاگرس فعال است و دامنه‌های بادپناه (شرقی) به‌طور معناداری بارش کم‌تری دریافت می‌کنند. روند کاهشی معنادار بارش ژانویه (۰,۶۷- میلی‌متر در سال) می‌تواند هشدار برای تغییرات اقلیمی منطقه‌ای باشد. چراکه الگوهای فنولوژیکی در زاگرس مرکزی در پاسخ به تغییرات اقلیمی در حال تغییر است و شروع فصل رشد زودتر از گذشته رخ می‌دهد. بیشترین تغییرپذیری مکانی بارش در طبقات ارتفاعی میانی رخ می‌دهد که ناشی از پیچیدگی توپوگرافی این نواحی است. با توجه به یافته‌های پژوهش، به مدیران منابع آب پیشنهاد می‌شود که با عنایت به بالاترین پتانسیل رواناب سالانه در طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۱۵۰۰ متر (به‌ویژه دامنه‌های غربی)، طراحی و احداث سازه‌های ذخیره‌سازی آب نظیر بندهای زیرزمینی، گابیونی و سدهای کوتاه را در این طبقه و در دامنه‌های بادگیر غربی در اولویت قرار دهند و با توجه به تغییرپذیری بالای بارش بهار در طبقه ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر، ذخیره‌سازی آب‌های سطحی در این مناطق را با احتیاط بیشتری انجام دهند و سیستم‌های هشدار سیلاب را در این طبقه تقویت نمایند. به کشاورزان و برنامه‌ریزان کشاورزی نیز توصیه می‌شود که با توجه به ضریب تغییرات حدود ۵۰ درصدی بارش بهار در دامنه‌های میانی (۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر)، از ارقام بذری زودرس و متحمل به خشکی انتهای فصل مانند گندم دیم مقاوم به تنش انتهایی و جو دیم استفاده کنند و تاریخ کشت را بر اساس پیش‌بینی‌های فصلی تنظیم نمایند؛ همچنین در طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۱۵۰۰ متر که بارش پاییز و زمستان نسبتاً قابل اعتمادتر است، کشت پاییزه با اولویت انجام شود و از کشت بهار که با ریسک بالای نوسانات بارش همراه است، اجتناب گردد. به علاوه، با توجه به روند کاهشی معنادار بارش در ژانویه و دسامبر، پایش مستمر این ماه‌ها به‌عنوان شاخص تغییرات اقلیمی منطقه‌ای توصیه می‌شود و برنامه‌های سازگاری با خشکسالی بر اساس این روند تدوین گردد. در نهایت، انجام پژوهش‌های تکمیلی با تمرکز بر اثر همزمان جهت دامنه و ارتفاع با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی با وضوح بالاتر و شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش‌بینی تغییرات آینده بارش در زاگرس پیشنهاد می‌شود.

این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- امیدوار، کمال، ابراهیمی، رضا و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۸). مدلسازی وردایی زمانی- مکانی بارش فصلی در ایران مرکزی. *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۷(۲)، ۷۱-۴۷.
- جعفری، غلامحسین و فولادی، نرگس. (۱۴۰۲). تحلیل تغییرات بارش در شرق و غرب تراست اصلی زاگرس. *فصلنامه برنامه‌ریزی فضایی*، ۱۳(۱)، ۹۷-۱۱۶.
- خضرلوی محمدیار، زلیخا، عزیزی، قاسم و علیجانی، بهلول. (۱۴۰۱). تحلیل روند دوره‌های بارشی ایران و نقش آن در برنامه‌ریزی و مدیریت محیط. *فصلنامه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۱۲(۴)، ۱۲۰۲-۱۲۱۷.
- دوستان، رضا. (۱۳۹۸). تحلیلی بر تغییرات بارش در ایران. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۰(۴۰)، ۱۳-۲۵.
- رستمی، مریم، سلاجقه، علی، شریفی، فرود، ملکیان، آرش و مصباح‌زاده، طیبه. (۱۴۰۱). ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی چند مجموعه داده بارش در سطح حوزه‌های آبخیز کشور. *نشریه علمی- پژوهشی مرتع و آبخیزداری*، ۷۵(۲)، ۱۸۱-۱۹۶.
- ستوده، فاطمه، علیجانی، بهلول، سلیقه، محمد و اکبری، مهری. (۱۳۹۷). اثر کوه‌های زاگرس بر چرخندهای بارش‌زای ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۰(۴)، ۶۳۹-۶۵۳.
- سروش، فاطمه و فتحیان، فرشاد. (۱۴۰۰). بررسی رابطه بین ارتفاع و شیب روند متغیرهای اقلیمی در ایران طی دوره زمانی ۲۰۱۶-۱۹۸۷. *نشریه علوم آب و خاک*، ۲۵(۱)، ۱۵۷-۱۷۸.
- سعیدیان، حمزه و مرادی، حمیدرضا. (۱۴۰۱). نقش تغییر ارتفاع شبیه‌ساز باران و سرعت حد بارش در مولفه‌های مختلف رواناب و رسوب. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۳(۲۵)، ۶۲-۷۳.
- عظیمی، فائزه، مدرسی، فرشته، بانژاد، حسین و عراقی، سید علیرضا. (۱۴۰۴). ارزیابی کارایی پایگاه‌های داده بارش برای حوضه‌های آبریز کوچک (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارده). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، (مقالات آماده انتشار).
- قیصوری، مرتضی، خلیقی سیگارودی، شهرام، سلاجقه، علی و چوبین، بهرام. (۱۴۰۲). ارزیابی اریوگرافی مؤثر بر بارش در نواحی شمال ایران. *نشریه محیط‌زیست طبیعی*، ۷۶(۳)، ۳۷۹-۳۹۰.
- کیانی، مهرداد، لشکری، حسین و قائمی، هوشنگ. (۱۳۹۸ الف). واکاوی اثر رشته‌کوه‌های زاگرس بر تغییرات بارش‌های سودانی در غرب ایران. *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳۰(۳)، ۱۷-۴۰.
- محمدی، زینب و لشکری، حسین. (۱۳۹۷). نقش توپوگرافی در تشدید بارش‌های جنوب و جنوب غرب ایران، مطالعه موردی: روز ۳ دسامبر ۲۰۱۵. *جغرافیای طبیعی*، ۱۱(۴۰)، ۱۷-۳۳.
- مهبذ، مهدی، صفری، سعیده و رفیعی، محمد رفیع. (۱۴۰۱). ریزمقیاس‌سازی داده‌های بارش ماهواره TRMM به کمک داده‌های NDVI، مدل رقومی ارتفاعی و دمای سطح زمین با استفاده از مدل‌های یادگیری رگرسیونی. *نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۴(۳)، ۳۴۷-۳۶۱.
- میرزایی، سمیه، عطارد، پدram و مصطفی‌نژاد نشلی، کیمیا. (۱۴۰۴). تأثیر روندهای درازمدت بارندگی و روزهای خشک متوالی بر زوال جنگل‌های زاگرس در استان ایلام. *نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۸(۱)، ۱-۱۰.
- نقوی، مریم، علیجانی، بهلول، اکبری، مهری و فتاحی، ابراهیم. (۱۴۰۰). ارتباط بین شاخص‌های توپوگرافی با بارش‌های فراگیر منطقه کوهستانی البرز. *جغرافیا*، ۱۹(۶۸)، ۵۱-۶۷.

References

- Alijani, B. (2008). Effect of the Zagros Mountains on the spatial distribution of precipitation. *Journal of Mountain Science*, 5(3), 218–231. <https://doi.org/10.1007/s11629-008-0126-8>
- Alinejad, M., Dhorde, A. G., Taghizadeh, E., Jadhav, T. S., & Zeyaeyan, S. (2026). Historical trend analysis and projection of precipitation by CMIP6 models across the Zagros Mountains of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 19(5). <https://doi.org/10.1007/s12517-026-12486-4>
- Attarod, P., Dezhban, A., Pypker, T. G., Sigaroodi, S. K., Bayramzadeh, V., Tang, Q., Liu, X., & Mariv, H. S. (2023a). Iran's changing climate over the past 30 years. *Russian Meteorology and Hydrology*, 48(1), 53-62. <https://doi.org/10.3103/S1068373923010077>
- Attarod, P., Beiranvand, S., Pypker, T. G., Bayramzadeh, V., Helali, J., Mashayekhi, Z., Fathi, J., & Soofi Mariv, H. (2023b). Are precipitation characteristics and patterns impacting oak trees decline in the Zagros region of western Iran? *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 21(4), 753-765. <https://doi.org/10.22124/cjes.2023.7122>
- Attarod, P., Zhu, H., Beiranvand, S., Pypker, T. G., Bayramzadeh, V., Soofi Mariv, H., & Karimi, K. (2025). Past and future climate change in the Zagros region of western Iran. *Anthropocene*, 50, 100475. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2025.100475>
- Azimi, F., Modaresi, F., Banejad, H., & Araghi, S. A. (2025). Evaluating the efficiency of precipitation databases for small catchments (Case study: Kardeh watershed). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, (In Press). (in Persian)
- Barry, R. G. (2010). *Mountain Weather and Climate*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754753>
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., van Dijk, A. I. J. M., McVicar, T. R., & Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 473-500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>
- Besharatifar, M., Kamrani, S., & Nasserli, M. (2025). Augmenting precipitation datasets: A comparative study of topographic-based corrections and collocation techniques considering orographic effects. *Atmospheric Research*, 326, 108317. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108317>
- Besharatifar, M., Latif, A., & Rahsepas, K. (2026). A novel cascaded neural network architecture integrating nonlinear autoregressive models with exogenous inputs (NARX) and LSTM for precipitation error correction. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 144(Part 1), 104479. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2026.104479>
- Doustan, R. (2019). An analysis of precipitation changes in Iran. *Climatology Research Journal*, 10(40), 13-25. (in Persian)
- Encyclopædia Britannica. (2024). Zagros Mountains. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/place/Zagros-Mountains>
- Gheisouri, M., Khalighi Sigaroudi, Sh., Salajegheh, A., & Choobin, B. (2023). Evaluation of orography effect on precipitation in northern regions of Iran. *Journal of Natural Environment*, 76(3), 379-390. (in Persian)
- Jafari, Gh., & Fooladi, N. (2023). Analysis of precipitation changes in the east and west of the Main Zagros Thrust. *Spatial Planning Quarterly*, 13(1), 97-116. (in Persian)
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin.

- Khezrlou Mohammadiyar, Z., Azizi, Gh., & Alijani, B. (2022). Analysis of the trend of precipitation periods in Iran and its role in environmental planning and management. *Scientific-Research Quarterly of Geography and Regional Planning*, 12(4), 1202-1217. (in Persian)
- Kiani, M., Lashkari, H., & Ghaemi, H. (2019a). Analysis of the effect of the Zagros Mountain range on the changes of Sudanese precipitation in western Iran. *Geographical Research Quarterly*, 30(3), 17-40. (in Persian)
- Lei, Y., Liao, R., Su, Y., Zhang, X., Liu, D., & Zhang, L. (2023). Variation characteristics of temperature and rainfall and their relationship with geographical factors in the Qinling Mountains. *Atmosphere*, 14(4), 696. <https://doi.org/10.3390/atmos14040696>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mehboudi, M., Safari, S., & Rafiei, M. R. (2022). Downscaling TRMM satellite precipitation data using NDVI data, digital elevation model, and land surface temperature using regression learning models. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 14(3), 347-361. (in Persian)
- Miao, W. F., Liu, S. Y., Zhu, Y., Duan, S. M., & Han, F. Z. (2022). Spatio-temporal differentiation and altitude dependence of temperature and precipitation in Meili Snow Mountains. *Climate Change Research*, 18(3), 328-342. <http://www.climatechange.cn/EN/Y2022/V18/I3/328>
- Mirzaei, S., Ataroud, P., & Mostafanejad Nesheli, K. (2025). The impact of long-term rainfall trends and consecutive dry days on the decline of Zagros forests in Ilam province. *Journal of Forest and Wood Products*, 78(1), 1-10. (in Persian)
- Mohammadi, Z., & Lashkari, H. (2018). The role of topography in intensifying precipitation in southern and southwestern Iran, Case study: December 3, 2015. *Physical Geography*, 11(40), 17-33. (in Persian)
- Montero-Martinez, G. (2021). The effect of altitude on the prediction of momentum for rainfall erosivity studies in Mexico. *Catena*, 207, 105604. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105604>
- Naghavi, M., Alijani, B., Akbari, M., & Fattahi, E. (2021). The relationship between topographic indices and widespread precipitation in the Alborz Mountain region. *Geography*, 19(68), 51-67. (in Persian)
- Noroozi, J., Talebi, A., Doostmohammadi, M., & Bagheri, A. (2020). The Zagros Mountain Range. In *Plant Biogeography and Vegetation of High Mountains of Central and South-West Asia* (Plant and Vegetation, Vol. 17, pp. 185–214). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45212-4_6
- Nozarpour, N., Mahjoobi, E., & Golian, S. (2024). Assessment of satellite-based precipitation products in monthly, seasonal, and annual time-scale over Iran. *International Journal of Environmental Research*, 18(5), Article 76. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00629-2>
- Ntwali, D., Zhong, J., Wu, P., & Xu, Y. (2016). The impacts of topography on spatial and temporal rainfall distribution over Rwanda based on WRF model. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6(2), 145-157. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62013>
- Omidvar, K., Ebrahimi, R., & Dadashi Rudbari, A. A. (2019). Modeling the spatio-temporal variability of seasonal precipitation in Central Iran. *Geographical Explorations of Desert Regions*, 7(2), 47-71. (in Persian)
- Pordel, F., Jafari, R., Esfahani, M. T., Ahmadi, M., Henebry, G. M., Ebrahimi, A., Descals, A., & Penuelas, J. (2026). Land surface phenometrics and their responses to climatic variables in the semi-arid rangelands of the central Zagros mountains. *Scientific Reports*, 16, 7843. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-38652-y>
- Roe, G. H. (2005). Orographic precipitation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 645-671. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122541>

- Rostami, M., Salajegheh, A., Sharifi, F., Malekian, A., & Mesbahzadeh, T. (2022). Evaluation of temporal and spatial changes of several precipitation datasets in the watersheds of Iran. *Journal of Rangeland and Watershed Management*, 75(2), 181-196. (in Persian)
- Saeidabadi, R., Najafi, M. S., Roshan, G. R., Fitchett, J. M., & Abkharabat, S. (2016). Modelling spatial, altitudinal and temporal variability of annual precipitation in mountainous regions: The case of the Middle Zagros, Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52(5), 437-449. <https://doi.org/10.1007/s13143-016-0026-8>
- Sagheb-Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). *Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future* (Plant and Vegetation, Vol. 10). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4>
- Saidian, H., & Moradi, H. R. (2022). The role of changing rainfall simulator height and rainfall terminal velocity on various runoff and sediment components. *Journal of Watershed Management Research*, 13(25), 62-73. (in Persian)
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Singh, P., Ramasastri, K. S., & Kumar, N. (1995). Topographical Influence on Precipitation Distribution in Different Ranges of Western Himalayas. *Hydrology Research*, 26(4), 259-284. <https://doi.org/10.2166/nh.1995.0015>
- Soroush, F., & Fathian, F. (2021). Investigation of the relationship between elevation and slope on the trend of climatic variables in Iran during 1987-2016. *Journal of Water and Soil Science*, 25(1), 157-178. (in Persian)
- Sotoudeh, F., Alijani, B., Saligheh, M., & Akbari, M. (2018). The effect of Zagros Mountains on Iran's precipitation-generating cyclones. *Journal of Natural Geographical Research*, 50(4), 639-653. (in Persian)
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1), 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
- Xu, S., Li, Q., Sun, Y., Zhou, Z., Wu, C., Yang, X., Han, X., Huang, X., & Jin, J. (2026). A newly merging approach of multiple precipitation products by combining time-varying quadruple collocation and random forest spatial interpolation. *Journal of Hydrology*, 674, 135514. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2026.135514>

Spatial–Temporal Analysis of Seasonal Precipitation Distribution in the Zagros Region with Emphasis on Elevation Zones

Abstracts

Precipitation is one of the most important climatic elements and a key component of the hydrological cycle, playing a vital role in supplying water resources in mountainous regions. Understanding the spatial and temporal patterns of precipitation and their relationship with elevation is essential for sustainable water resource management. The present study aimed to investigate seasonal precipitation patterns across different elevation classes in the Zagros Mountains. For this purpose, MSWEP satellite-based precipitation data for the period 1990–2024 and the ALOS PALSAR Digital Elevation Model (DEM) were utilized. The study area was classified into five elevation zones: below 1,000 m, 1,000–1,500 m, 1,500–2,000 m, 2,000–2,500 m, and above 2,500 m. Temporal trends in precipitation were analyzed using the Mann–Kendall test and Sen's slope estimator. In addition, the relationship between precipitation and elevation was assessed using Spearman's correlation coefficient, while differences in mean precipitation among elevation classes were evaluated through one-way analysis of variance (ANOVA) and Scheffé's post hoc test. The results indicated that the highest annual mean precipitation occurred in the 1,000–1,500 m elevation class, whereas the lowest values were observed at elevations above 2,500 m. A negative relationship between precipitation and elevation was detected during autumn and winter, while the highest

precipitation amounts in spring were recorded at mid-elevations. The findings suggest that precipitation patterns in the Zagros Mountains are not solely controlled by elevation but are also influenced by topographic conditions and the geographical position relative to moisture sources. These results can contribute to improved water resource management and environmental planning in the mountainous regions of the Zagros.

Keywords: *Precipitation, Spatio-Temporal Distribution, Zagros, Remote Sensing, Elevation Classes.*

Spatial–Temporal Analysis of Seasonal Precipitation Distribution in the Zagros Region with Emphasis on Elevation Zones

Abstract

Background and objectives

Precipitation is one of the most fundamental climatic elements, playing a crucial role in the hydrological cycle, the supply of surface and groundwater resources, and the sustainability of ecosystems. The spatial and temporal distribution of precipitation is highly heterogeneous across the Earth's surface, and this heterogeneity arises from the interaction of various factors including latitude, distance from moisture sources, atmospheric circulation patterns, and particularly elevation above sea level. In mountainous regions, precipitation variations with elevation are of particular importance, because topography significantly controls precipitation patterns through the forced ascent of air. The Zagros mountain range, as one of the principal mountain systems in Iran, plays a decisive role in the precipitation patterns of the western and southwestern regions of the country. The wide elevational range of the Zagros substantially modifies the climatic conditions of the region. Nevertheless, no comprehensive study has yet been conducted to investigate the distinct effects of different elevation classes on seasonal precipitation patterns using remote sensing data. The present study aimed to analyze the spatial distribution patterns of precipitation across different elevation classes in the Zagros region and to investigate the role of topographic factors in seasonal variability.

Methodology

In this study, MSWEP satellite precipitation data with a spatial resolution of 0.1 degree (approximately 11 km) and a temporal period from 1990 to 2024 were employed. This product is generated by combining satellite data, reanalysis, and ground-based stations, and recent international studies have confirmed its suitability for mountainous regions. Additionally, the ALOS PALSAR digital elevation model with a resolution of 12.5 metres was used to extract topographical characteristics. The study area was classified into five elevation classes based on altitude above sea level (below 1000, 1000–1500, 1500–2000, 2000–2500, and above 2500 metres). Non-parametric Mann-Kendall tests and Sen's slope estimator were applied to analyse precipitation trends. Furthermore, due to the non-normal distribution of precipitation data, Spearman correlation was employed, and one-way analysis of variance (ANOVA) along with Scheffé's post-hoc test was used to examine precipitation differences among elevation classes. To avoid the pseudo-replication problem caused by spatial autocorrelation, a systematic grid sampling (0.1-degree resolution) was applied, reducing the sample size from 250,000 to approximately 2,850 independent pixels.

Results

The results revealed a significant relationship between elevation and precipitation in the Zagros region; however, this relationship is neither linear nor direct. The highest annual precipitation occurred in the 1000–1500 metre elevation class, with a mean of 353.7 mm, while the lowest precipitation was recorded in the above 2500 metre class (256.6 mm). This pattern contradicts the common expectation that precipitation increases with increasing elevation. Autumn ($\rho = -0.41$) and winter ($\rho = -0.34$) precipitation exhibited significant inverse correlations with elevation, indicating the role of the rain shadow phenomenon in the Zagros. A different pattern was observed in spring, with the highest precipitation recorded in the 1500–2000 metre elevation class (114.1 mm), while the lowest spring precipitation was related to the below 1000 metre class (79.4 mm). ANOVA results indicated that the differences in mean precipitation among elevation classes were statistically significant across all seasons at the 95% confidence level ($P < 0.001$). The highest F-statistic value was observed in autumn (182) and the lowest in spring (47). Furthermore, temporal trend analysis using the Mann-Kendall test demonstrated that January ($Z = -2.05$) and December ($Z = -1.99$) precipitation exhibited significant decreasing trends. In contrast, other months, despite positive or negative fluctuations, lacked statistically significant trends. The greatest spatial variability of precipitation (standard deviation of 118.3 mm and coefficient of variation of 37.9%) was observed in the middle elevation classes (1500–2000 metres), a finding attributed to the complexity of topography and the diversity of slope aspects in these classes. In contrast, elevations above 2500 metres, despite having lower mean precipitation, exhibited greater statistical stability and uniformity (lowest standard deviation and coefficient of variation). It should be noted that summer precipitation (July–September) is negligible (near zero) due to the dominance of subtropical high pressure.

Conclusion

Elevation alone is not the sole determinant of precipitation in the Zagros region; rather, precipitation patterns represent a complex function of topographical factors including elevation, slope aspect, and position relative to moisture sources. The middle elevations (1000–1500 metres), which are located on the windward western and southwestern slopes, constitute the wettest elevation class during autumn and winter. The rain shadow phenomenon is active in the Zagros, with eastern leeward slopes receiving considerably less precipitation. In spring, with the activation of Sudanese and Red Sea systems and the increase in convective instabilities, the 1500–2000 metre elevations become the wettest class. The significant decreasing trends in January and December precipitation may serve as

indicators of regional climate change and are consistent with the findings of other studies regarding reduced rainfall and increased dry periods in the Zagros. Based on the findings, it is recommended that middle elevations be prioritised for water storage in water resource management planning, and in agricultural planning, the high variability of spring rainfall in middle elevations should be taken into consideration. Furthermore, continuous monitoring of January and December precipitation trends is recommended as an indicator of climate change.

Keywords: Precipitation, Spatio-Temporal Distribution, Zagros, Remote Sensing, Elevation Classes.

پذیرش نشده