



An assessment of the influence of orography on precipitation patterns in the northern regions of Iran

Morteza Gheysouroi¹ | Shahram Khalighi Sigaroodi^{2✉} | Ali Salajegheh³ | Bahram Choubin⁴

1. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: m.gheysouroi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: khalighi@ut.ac.ir
3. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: salajegh@ut.ac.ir
4. Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran. E-mail: b.choubin@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 24 May 2023

Received in revised form 07

June 2023

Accepted 13 July 2023

Published online 23 September
2023

Keywords:

Alborz,

Longitude and latitude,

Neighborhood method,

Topography,

Satellite precipitation.

ABSTRACT

The phenomenon wherein precipitation increases as altitude ascends is referred to as the precipitation gradient, that significant importance in the field of hydrological forecasting in mountain basins and management of water resources. The present study aims to investigate the changes in the topography of the earth on the formation and movement pattern of precipitation, the average rainfall of the IMERG V06 satellite and the dem of the 0.1 degree elevation of the precipitation gradient for eight main directions or coding in the Python environment of the Alborz Mountains were extracted. Then, in order to determine the movement pattern of precipitation, longitudinal and latitude profiles were used. The study findings indicate that in the northeast region of Golestan province (positive gradient), there exists a positive gradient of precipitation, which amounts to 0.44 mm.m elevation. Furthermore, it is worth noting that in the southeastern region of Semnan, there exists a negative gradient of 1.91 mm.m reduction in precipitation of elevation gain. Additionally, it was found that the precipitation gradient was significantly influenced by both the north and south directions, accounting for 16.8% and 25.4% of the effect, respectively, at a significance level of 0.01. On the northern slopes, a negative correlation has been observed between the amount of precipitation and latitude, wherein higher latitudes are associated with lower precipitation levels. Conversely, a positive correlation has been noted between the amount of precipitation and latitude in other regions, where higher latitudes correspond to increased levels of precipitation. The intricate nature of precipitation in mountainous regions presents a challenge in establishing a comprehensive pattern due to the multifaceted influence of anthropogenic, climatic, and terrestrial variables, nevertheless, comprehending precipitation patterns in the context of decision-making can benefit water resource management.

Cite this article: Gheysouroi, M., Khalighi Sigaroodi, S., Salajegheh, A., & Choubin, B. (2023). An Assessment of the influence of orography on precipitation patterns in the northern regions of Iran. *Journal of Natural Environment*, 76 (3), 379-390. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.359816.2555>



ارزیابی اروگرافی مؤثر بر بارش در نواحی شمال ایران

مرتضی قیصوری^۱ | شهرام خلیقی سیگارودی^۲ | علی سلاجقه^۳ | بهرام چوبین^۴

۱. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.gheysouri@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: khalighi@ut.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: salajegh@ut.ac.ir
۴. گروه حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ارومیه، ایران. رایانامه: b.choubin@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	میزان افزایش بارش با ارتفاع، به‌عنوان گرادیان بارش شناخته می‌شود که در مطالعات مربوط به پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌های کوهستانی و مدیریت منابع آب حوزه‌های آبخیز نقش اساسی دارند. در این مطالعه، به‌منظور بررسی تغییرات توپوگرافی زمین بر تشکیل و الگوی حرکتی بارش، از داده‌های شبکه‌ای میانگین بارش ماهواره IMERG V06 و نقشه مدل رقمی ارتفاعی ۰/۱ درجه گرادیان بارشی برای هشت جهت اصلی یا کدنویسی در محیط پایتون رشته‌کوه‌های البرز استخراج شد. سپس به‌منظور تعیین الگوی حرکتی بارش پروفیل‌های طولی و عرضی استفاده شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین گرادیان بارش (گرادیان مثبت) مربوط به شمال شرقی استان گلستان به میزان ۰/۴۴ میلی‌متر به‌ازای افزایش هر متر در ارتفاع بوده است. همچنین جنوب شرقی سمنان دارای گرادیان منفی به میزان ۱/۹۱ میلی‌متر کاهش در بارش به‌ازای هر متر افزایش در ارتفاع بوده است. علاوه بر آن، دو جهت شمالی و جنوبی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ به‌ترتیب با ۱۶/۸ و ۲۵/۴ درصد بیش‌ترین تأثیر را بر گرادیان بارش داشته است. در دامنه‌های شمالی، یک همبستگی منفی بین میزان بارش و طول جغرافیایی مشاهده شده است، به‌طوری‌که در دامنه شمالی با افزایش طول جغرافیایی از میزان بارش کاسته شده است. در مقابل یک همبستگی مثبت بین عرض جغرافیایی و بارش وجود دارد، به‌طوری‌که عرض جغرافیایی بالاتر با افزایش سطوح بارش همراه است. با توجه به رفتار پیچیده بارش در مناطق کوهستانی تعیین یک الگوی کلی به‌دلیل دخالت عوامل مختلف انسانی، اقلیمی و زمینی کار دشواری است ولی درک الگوهای بارشی در فرآیندهای تصمیم‌گیری می‌تواند به مدیران منابع آب کمک کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱	
کلیدواژه‌ها: البرز، بارش ماهواره‌ای، توپوگرافی، روش همسایگی، طول و عرض جغرافیایی.	

استناد: قیصوری، مرتضی؛ خلیقی سیگارودی، شهرام؛ سلاجقه، علی؛ و چوبین، بهمن (۱۴۰۲). ارزیابی اروگرافی مؤثر بر بارش در نواحی شمال ایران. *مجله زیست طبیعی*، ۷۶ (۳)، ۳۷۹-۳۹۰.

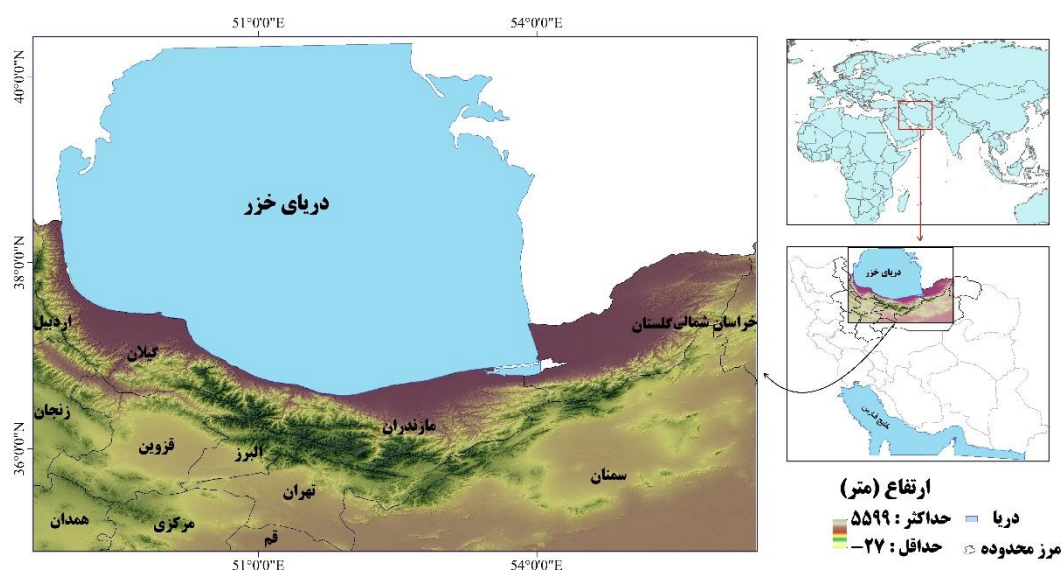
DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.359816.2555>



مقدمه

الگوهای بارش در رشته کوه‌ها به شدت تحت تأثیر الگوهایی است که توسط ارتفاعات کوهستانی کنترل می‌شوند (Anders *et al.*, 2008; Houze, 2012). معمولاً پدیده بارش کوه‌نگاری در عرض‌های جغرافیایی میانی و در جاهایی که بادهای غالب عمود بر کوه‌ها می‌باشند، مشهودتر است (Roe *et al.*, 2002; Roe, 2005; Kirshbaum and Smith, 2008; Chaboureau *et al.*, 2008; Minder *et al.*, 2010; Colberg and Anders, 2014; Shi and Durran, 2015). عمده مناطق نیمه‌خشک در سراسر جهان برای تأمین آب شیرین مورد نیاز خود به شدت به کوه‌ها وابسته هستند، زیرا بخش بزرگی از آب شیرین این مناطق از رواناب موجود در مناطق بالادست تولید می‌شود (Scaff *et al.*, 2017; Viviroli *et al.*, 2007). بنابراین، درک تأثیر روابط بارش و توپوگرافی در بوم‌سازگان نیمه‌خشک جهت تجزیه و تحلیل تغییرات آب‌وهوا حیاتی است. بارش کوه‌نگاری منجر به آب‌وهوای مرطوب‌تر شده و در سمت دامنه بادگیر کوه نسبت به دامنه پشت به باد بیش‌تر است. علاوه بر آن، ارتفاع میزان بارندگی را کنترل می‌کند و سبب ایجاد شرایط خرد اقلیمی در مناطق کوهستانی می‌شود زیرا میانگین بارندگی سالانه با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد (Anders *et al.*, 2007; Colberg and Anders, 2014; Garreaud *et al.*, 2016). بسیاری از محققان رابطه بین بارندگی و ارتفاع را در مکان‌های مختلف در سراسر جهان بررسی کرده‌اند (Guan *et al.*, 2005; Murata *et al.*, 2007; Luce *et al.*, 2013; Scaff *et al.*, 2017). به طوری که Guan و همکاران (۲۰۰۵) اشاره داشتند که ارتفاع، عامل اصلی تأثیرگذار بر توزیع بارندگی در ماه‌های زمستان است و در فصولی که بارش‌های موسمی وجود دارد ارتفاع تأثیر بر توزیع بارش دارد. علاوه بر این، Murata و همکاران (۲۰۰۷)، اهمیت تعامل بین اثرات گردش مکانی بارش در مقیاس بزرگ و توپوگرافی را در تعیین توزیع مکانی بارندگی بر فراز تپه‌های مگالایا، هند را تبیین کردند. یافته‌های مشابهی در مرکز شیلی به دست آمد که نشان داد در بعضی مناطق شیلی که اختلالات در سینوپتیک به شدت با بارش کوهستانی و شارهای رطوبت محلی مرتبط می‌باشد (Garreaud *et al.*, 2016; Scaff *et al.*, 2017). اثرات بارش کوه‌نگاری بر فرآیندهای سطح زمین و ایجاد چشم‌اندازهای طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است (Ferrier *et al.*, 2013; Goren *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2015).

عدم وجود ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق مطالعاتی یکی از مشکلات اصلی در عمده مطالعات بارشی در مناطق کوهستانی می‌باشد (Derin *et al.*, 2019). میزان بارندگی در سطح زمین توسط شبکه‌های باران‌سنج و رادار یا از فضا با استفاده از حس‌گرهای ماهواره‌ای می‌توان اندازه‌گیری نمود. در حالی که باران‌سنج‌ها اندازه‌گیری فیزیکی مستقیم بارندگی سطحی را ارائه می‌دهند، آن‌ها مستعد منابع عدم قطعیت مانند اندازه دستگاه باران‌سنج، تلفات تبخیری، باد، محل قرارگیری و غیره هستند (Strangeways, 2009; Michaelides *et al.*, 2006). علاوه بر این، پراکندگی شبکه‌های باران‌سنج‌ها روی زمین‌های پیچیده، نمایش فضایی تغییرپذیری بارندگی را محدود می‌کند. شبکه‌های رادار آب‌وهوا اندازه‌گیری بارندگی را با وضوح مکانی و زمانی بالا ارائه می‌کنند. با این حال، آن‌ها مستعد محدودیت‌ها و خطاهای خاصی هستند، به‌ویژه در مناطق کوهستانی که در آن دقت در نتیجه بیش از حد پرتو، تابش برد، انسداد پرتو و نوارهای درخشان کاهش می‌یابد (Krajewski and Smith, 2002). در هر دو مورد، ایجاد و نگهداری شبکه‌های باران‌سنج و رادار زمینی اغلب هزینه زیادی دارد، به‌ویژه در نقاط دورافتاده جهان یا مناطقی که منابع مالی محدودی دارند؛ بنابراین، مشاهداتی که عموماً در دسترس هستند روی زمین‌های پست بودی و یک شکاف رصدی در داده‌های بارندگی جهانی روی زمین‌های پیچیده ایجاد می‌کنند. جایی که بارندگی معمولاً با تغییرات مکانی بالا که منجر به رویدادهای هیدرولوژیکی در مقیاس کوچک تا متوسط می‌شود (مانند سیل‌های ناگهانی) مشخص می‌شود. کمبود مشاهدات زمینی در این مناطق بر قابلیت اطمینان مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آب تأثیر می‌گذارد (Immerzeel *et al.*, 2014). بنابراین بارش در مناطق کوهستانی هنوز تا حدی ناشناخته باقی مانده است. ایستگاه باران‌سنجی متعددی در ایران وجود دارد که یک شبکه متراکم را تشکیل می‌دهد، اما تراکم ایستگاه‌های باران‌سنجی با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و نیز در نواحی مرتفع تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد در صورتی که بیش‌ترین میزان بارندگی در این مناطق است. میزان بارندگی در نواحی کوهستانی کاملاً دارای توزیع نابرابری بوده و گرادیان بارش اعم از عمودی و افقی بسیار متغیرتر از مناطق دشتی است. با توجه به این که هر ساله خسارت‌های بارش



شکل ۱. نمایشی از موقعیت رشته کوه‌های البرز در ایران

کوهستانی بر مناطق پایین دست می‌باشد بنابراین درک تعامل و ارتباطات بارش متأثر از تغییرات توپوگرافی زمینی و سازوکارهای تشکیل در ایجاد بارش، علاوه بر مدیریت مناطق بحرانی به تأمین منابع آبی سالم در مواقع خشک‌سالی و کمبود منابع آبی کمک می‌کند. در این تحقیق با هدف بررسی فرآیندهای زمینی متأثر بر بارش از اطلاعات بارش ماهواره IMERG V06 و پروفیل‌های طول و عرض جغرافیایی و اثر جهت‌گیری در کوهستان البرز (ناحیه خزری) استفاده شد و مناطق بحرانی در این کوهستان که بیش‌ترین سهم را در فرآیندهای بارشی داشتند، مشخص شد.

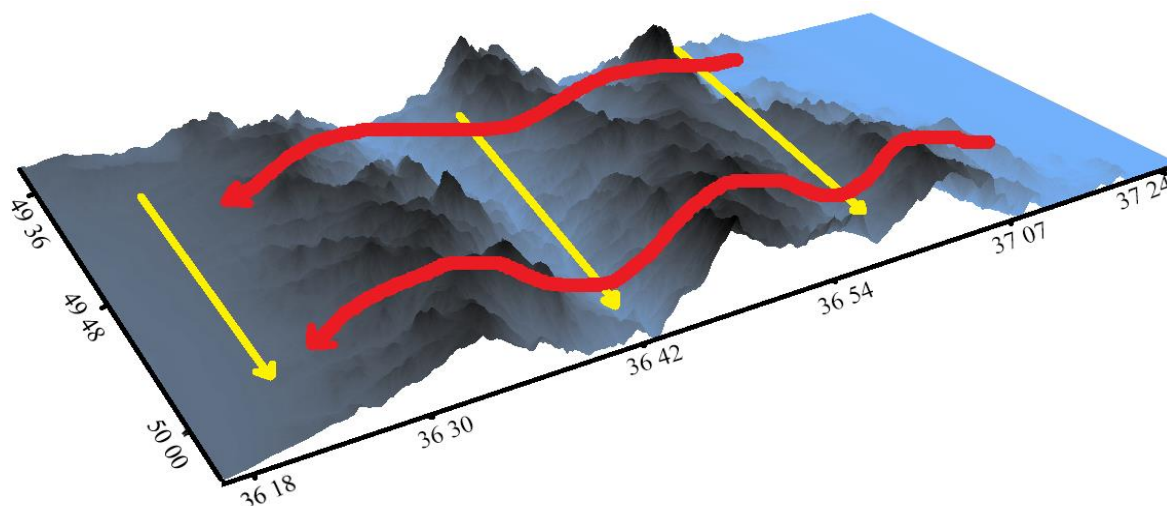
روش‌شناسی پژوهش

معرفی منطقه مورد مطالعه: کوه‌های البرز به صورت یک نوار مرزی در شمال ایران واقع شده و این رشته کوه‌ها به دو دامنه شمالی جنوبی تقسیم شده است. این رشته کوه از شمال به دریای خزر و از جنوب به دشت تهران، قزوین ارتباط دارد (شکل ۱). حداکثر ارتفاع منطقه ۴۰۵۸ متر و حداقل ارتفاع ۲۹- متر می‌باشد. حداکثر بارش در دور ۲۰ ساله از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۴۰۰ معادل ۸۷۰ میلی‌متر و حداقل ۸۸ میلی‌متر می‌باشد. در دامنه شمالی ایران پوشش جنگلی غنی از انواع درختان و گیاهان نواحی معتدله وجود دارد که از شرق استان اردبیل تا استان خراسان شمالی کشیده شده است.

مطالعه حاضر به بررسی تغییرات بارش متأثر از پارامترهای زمینی در دو دامنه شمالی و جنوبی البرز با استفاده از داده‌های ماهواره IMERG V06 در مقیاس زمانی ۲۰ سال و مدل رقومی ارتفاعی با مقیاس مکانی ۱/۰ درجه می‌پردازد. در این مطالعه به دلیل محدودیت ایستگاه زمینی و پراکنش نامناسب ایستگاه‌ها، از ایستگاه‌های زمینی استفاده نشد. جهت نشان دادن تغییرات توپوگرافی بر بارش با استفاده از برش‌های عرضی که نیم‌رخ کوهستان را نشان می‌دهد، تغییرات بارش مشخص گردید (شکل ۲). جغرافیای کوهستان البرز متغیر بوده و تفاوت قابل توجهی بین مناطق مختلف آن وجود دارد. ترکیب دشت‌ها و دامنه‌های کوه نمایش خوبی از شرایط اوروگرافی بر بارش، برای آزمایش عملکرد تصاویر IMERG در مطالعات اقلیم‌شناسی فراهم می‌کند.

جهت استخراج داده‌های بارشی از تصاویر IMERG ماهواره GPM استفاده شد. داده‌های ماهواره IMERG V06 Final از تارنمای ناسا (NASA) قابل دسترسی است. با استفاده از تصاویر IMERG و مدل رقومی ارتفاعی که از تصاویر SRTM90 m تهیه و با دستور Resampel به ۱/۰ درجه تبدیل شده بود، گرادیان بارشی برای منطقه مورد مطالعه در هشت جهت اصلی به دست آمد. به منظور تعیین سهم اثر جهت شیب، طول و عرض جغرافیایی بر بارش، با استفاده از نقشه P -value گرادیان بارشی در سطح اطمینان ۰/۹۹ (سطح معنی‌داری ۰/۰۱) جدا و درصد تغییرات هر عامل مشخص شد. به منظور بررسی اثرات اوروگرافی بر بارش،

¹<https://giovanni.gsfc.nasa.gov>



شکل ۲. نمایی از برش عرضی منطقه مورد مطالعه به صورت سه بعدی، خطوط قرمز در شکل بیانگر محل برش عرضی جهت مشخص نمودن تغییرات اروگرافی بر بارش

برش‌هایی طولی و عرضی متناسب با طول و عرض جغرافیایی روی نقشه بارش و ارتفاع منطقه مورد مطالعه ایجاد شد و نمودار تغییرات بارش برای هر برش طولی ایجاد شد. یک مأموریت بین‌المللی میان ماهواره‌های کشورهای مختلف که شامل ۱۰ ماهواره تخمین بارش می‌باشد که محصول نهایی آن IMERG^۲ نام دارد. در این زمینه، تیمی از دانشمندان برای بهبود الگوریتم IMERG کار می‌کنند. PPS در بهار سال ۲۰۱۹ اجرای نسخه ۶ الگوریتم IMERG را آغاز کرد. نسخه IMERG6 اولین نسخه‌ای است که برای دوره TRMM و GPM، یعنی ژوئن ۲۰۰۰ تا به امروز، در دسترس است. نسخه‌های ۳، ۴ و ۵ IMERG به ترتیب در اواخر سال ۲۰۱۷، اوایل سال ۲۰۱۷ و اواخر سال ۲۰۱۶ منتشر شدند و فقط برای دوره GPM (آوریل ۲۰۱۴ به بعد) تولید شدند. کارشناسان تولیدکننده IMERG ناسا در تارنما بیان داشتند که در برنامه‌های تحقیقاتی باید از آخرین نسخه IMERG استفاده شود زیرا اعتقاد بر این است که دقیق‌ترین نسخه آن IMERG V06 است. این محصول دارای تفکیک‌پذیری مکانی 0.1×0.1 درجه است. این محصول در آخرین نسخه خود به نام IMERG V06 طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ۹۰ درجه شمالی و جنوبی و ۱۸۰ درجه شرقی و غربی را پوشش می‌دهد که شامل شبکه‌ای با ۳۶۰۰ ستون برای طول جغرافیایی و ۱۸۰۰ ردیف برای عرض جغرافیایی می‌باشد. IMERG محبوب‌ترین محصول داده‌ای در میان بیش از ۱۲ محصول داده‌ای مرتبط با مأموریت GPM است و توسط PPS در NASA Goddard تولید می‌شود (Wang et al., 2017).

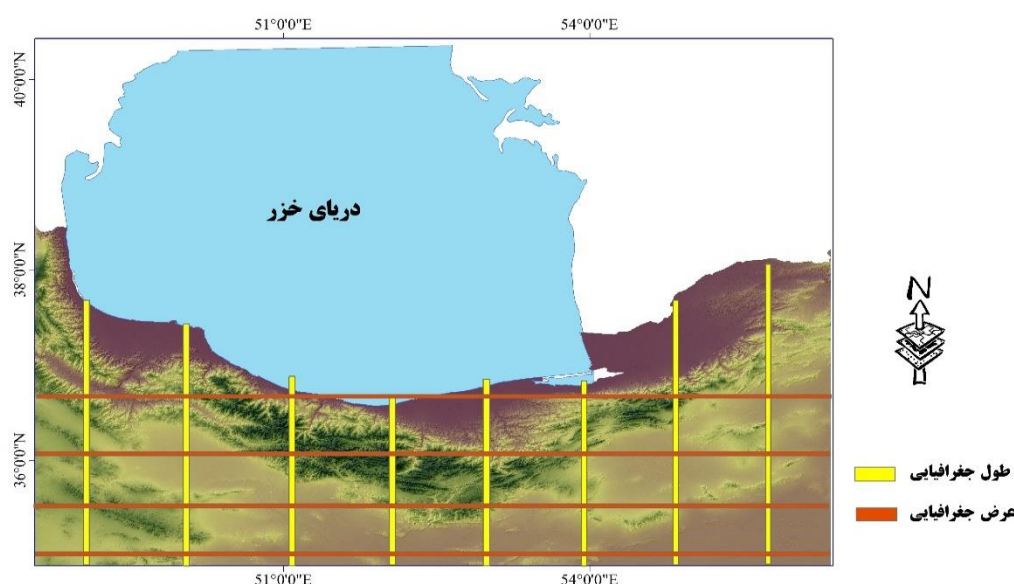
محاسبه گرادیان بارشی: برای یک منطقه، ارتفاع مهم‌ترین عامل در توزیع دما و بارش است (Strangeways, 2006). رگرسیون رابطه خطی بین ارتفاع و بارش براساس هر سلول شبکه DEM می‌باشد. اما شیب این خط به‌طور محلی با ارتفاع تغییر می‌کند. گرادیان بارش بر اساس رابطه ۱ برای منطقه مورد مطالعه محاسبه شد:

$$P = a + bH \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن a : عرض از مبدأ، b : گرادیان ارتفاعی، H : ارتفاع پیکسل به متر و P : بارش پیکسل به میلی‌متر است. **جهت شیب:** در این مطالعه، به منظور تعیین سهم جهت‌هایی که بیش‌ترین تأثیر را بر گرادیان‌های بارشی در منطقه مورد مطالعه دارند، نقشه جهت ابتدا تهیه شد سپس شیب‌های زیر 0.5 درصد که سهم کمی در ایجاد بارش دارند به اراضی فلات (بدون جهت) تبدیل شدند. در مرحله بعد براساس گرادیان بارشی تهیه‌شده با در نظر گرفتن یک پنجره ۴۹ پیکسلی (3×3) و حذف جهت مخالف پیکسل مرکزی، جهاتی که بیش‌ترین تأثیر را بر بارش داشتند، استخراج شد.

نیم‌رخ طولی و عرضی: از دیگر عوامل مؤثر بر بارش طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی می‌باشد که طول‌ها از غرب به شرق و عرض‌ها از جنوب به شمال مقدار عددی آن‌ها افزوده می‌شود. بارش با توجه به وضعیت عوامل اقلیمی ممکن است در یک منطقه

^۲Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM



شکل ۳. پروفیل‌های طولی و عرضی رشته‌کوه‌های البرز

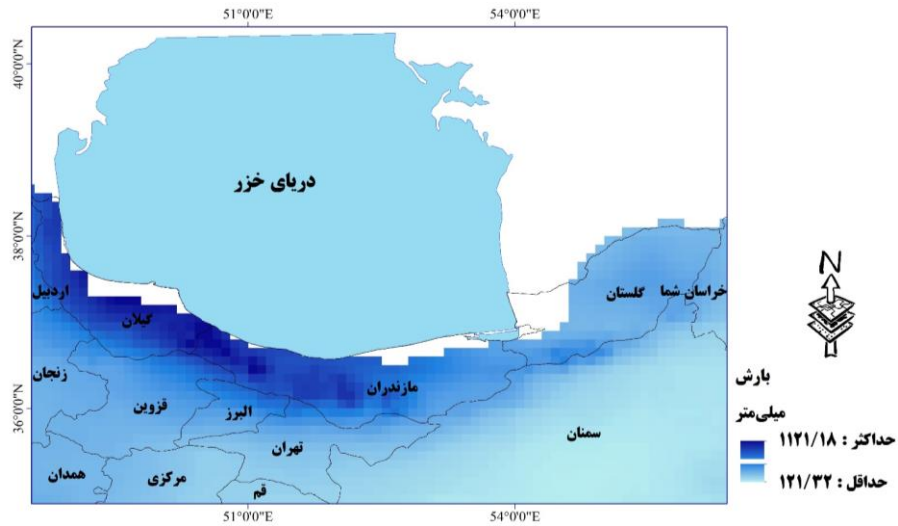
خاص از یک روش حرکتی خاص پیروی کند بر این اساس، در این مطالعه به منظور بررسی اثرات طول و عرض جغرافیای بر بارش، نیمرخ‌های متناسب با ابعاد سلول تصاویر ورودی (۰/۱ درجه) تهیه شد (شکل ۳).
صحت‌سنجی: در محیط کدنویسی پایتون علاوه بر نقشه‌گردان استخراجی حاصل از رگرسیون گیری بین پارمتر ارتفاع و بارش، یک نقشه‌رستری متناسب با نقشه‌گردان بارش تهیه شد که ارزش هر سلول بیانگر میزان سطح معنی‌داری می‌باشد. نقشه سطح معنی‌داری (P -value) سطوح معنی‌داری در سه طبقه ۰/۰۱، ۰/۰۵ و بیش‌تر از ۰/۰۵ در محیط ArcMap طبقه‌بندی شد و در این مطالعه از بین کلاس‌های تهیه شده، سطح ۰/۰۱ جهت ارزیابی اوروگرافی متأثر بر بارش در نظر گرفته شد.

یافته‌های پژوهش

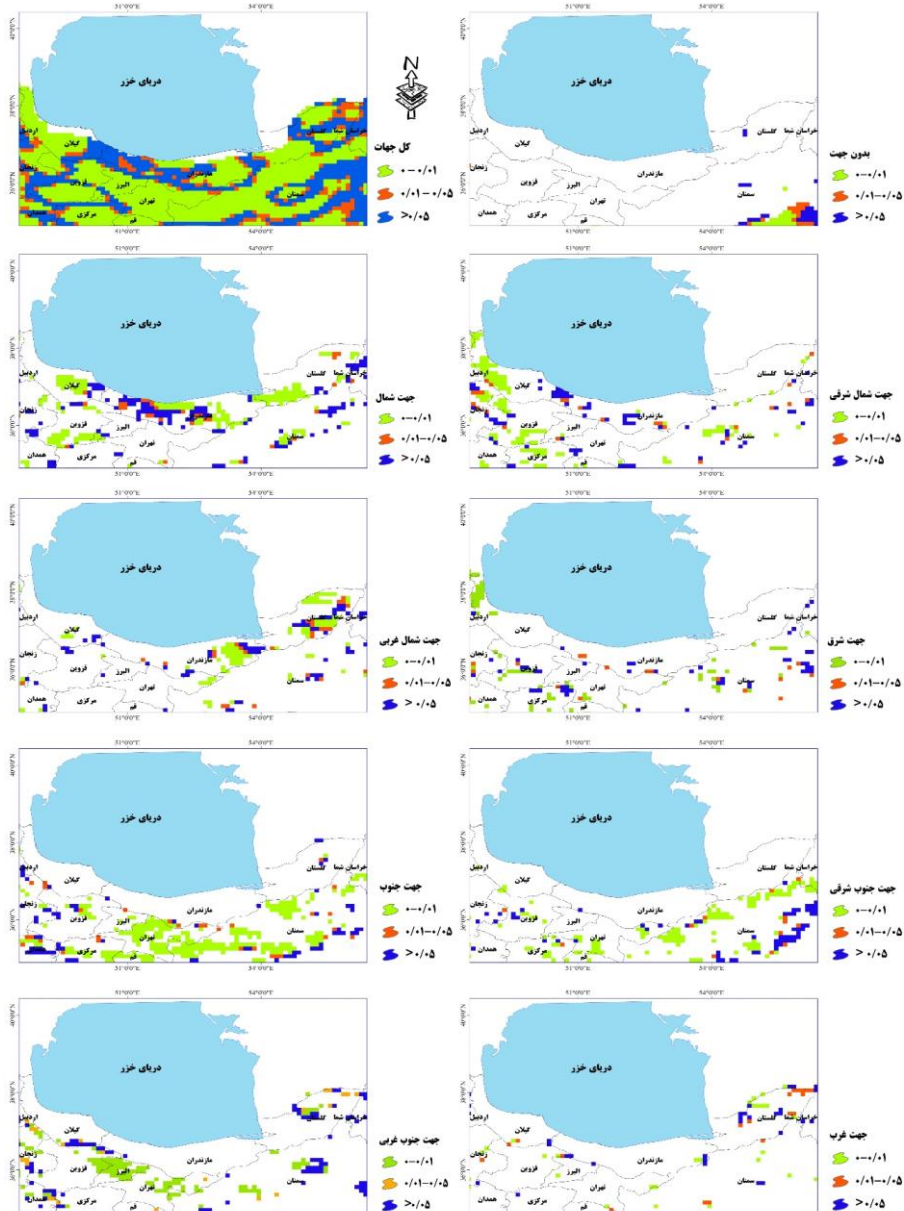
با توجه به شکل ۴، در منطقه مورد مطالعه حداکثر بارش در نواحی شمالی و شمال شرقی البرز (مازندران، گیلان و اردبیل) و حداقل در نواحی شمال شرقی (گرگان) و نوار جنوبی کوهستان البرز (سمنان و بخشی از تهران، البرز و قزوین) می‌توان مشاهده کرد. با توجه به این که نواحی شمالی البرز تحت تأثیر دریای خزر و جبهه‌های هوایی شمالی می‌باشند میزان بارش نسبت به دامنه جنوبی کوهستان البرز بیشتر می‌باشد.

استخراج گرادیان بارشی: نخست برای تمام جهت‌های جغرافیایی با استفاده از کدنویسی در محیط پایتون نقشه‌گردان و سطوح معنی‌داری در سه سطح ۰/۰۱، ۰/۰۵ و بیش‌تر از ۰/۰۵ تهیه شد (شکل ۵). سپس گرادیان بارش برای منطقه مورد مطالعه از موزاییک کردن گرادیان‌های بارشی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ تهیه شد (شکل ۶). با توجه به نتایج شکل ۶، در شمال استان گلستان گرادیان بارشی مثبت و مقدار حداکثر را دارا می‌باشد و حداقل گرادیان بارشی مربوط به جنوب استان سمنان می‌باشد. در گرادیان‌های بارشی مثبت با افزایش ارتفاع به میزان بارش افزوده می‌شود و بارش در این مناطق متأثر از کوهستان می‌باشد برعکس این حالت برای گرادیان بارشی منفی می‌باشد که حداکثر بارش در مناطق مسطح می‌باشد و با افزایش ارتفاع از میزان بارش کاسته می‌شود. برای هر جهت شیب، درصد سهم مؤثر بر گرادیان بارشی به‌دست آمد (جدول ۱). جهت‌های شمالی و جنوبی (دامنه‌های شمالی و جنوبی) در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ به‌ترتیب با ۱۶/۸ و ۲۵/۴ درصد، بیش‌ترین سهم را در تغییرات الگوی مکانی بارش دارند و جهت‌های جغرافیایی جنوب شرقی، شمال شرقی، جنوب غربی، شمال غربی، شرق، غرب و بدون جهت، در مرحله بعدی قرار دارند.

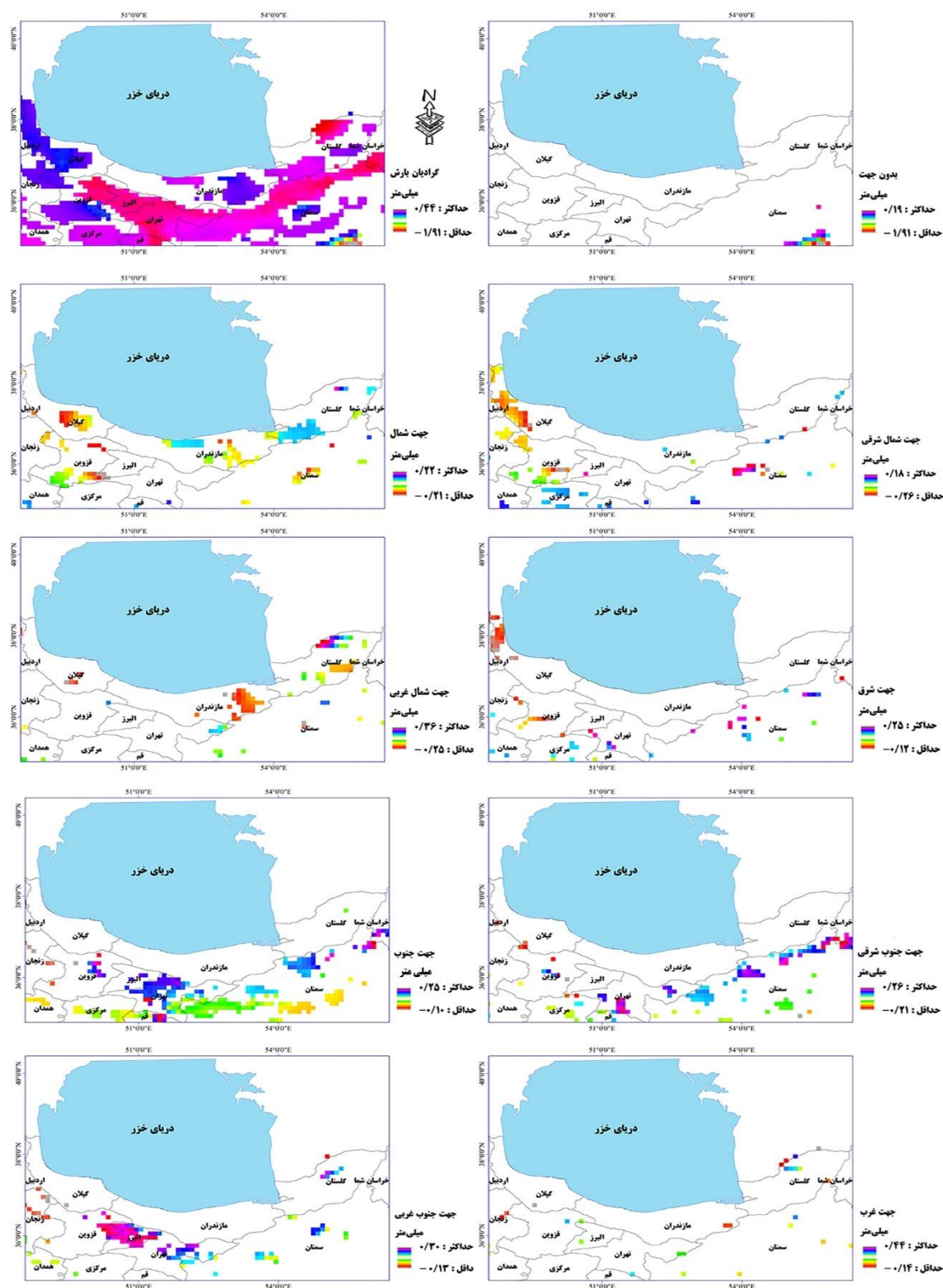
بررسی تغییرات اوروگرافی بر میانگین بلندمدت بارندگی: پس از بررسی تغییرات بارش ناشی از اوروگرافی کوهستانی با استفاده از گرادیان‌های بارشی، در بخش دیگر این پژوهش سعی شد با استفاده از برش‌های طول و عرضی تغییرات بارش ناشی از



شکل ۴. نقشه میانگین بارندگی دامنه شمالی و جنوبی البرز در مقیاس زمانی ۲۰ سال (۲۰۲۰-۲۰۴۰) براساس بارش ماهواره IMERG V06



شکل ۵. نقشه سطوح معنی‌داری گرادیان بارشی در هشت جهت جغرافیایی رشته‌کوه‌های البرز

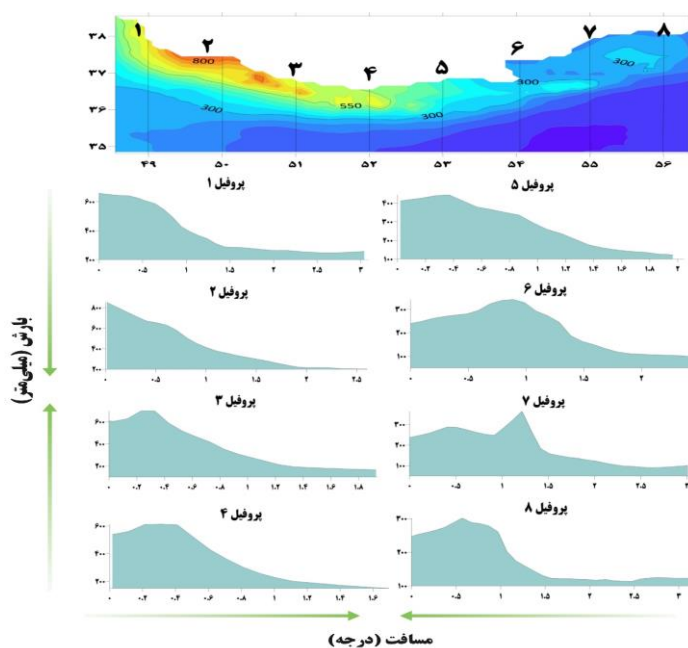


شکل ۶. نقشه گرادیان بارشی هشت جهت جغرافیایی در سطوح معنی داری ۰/۰۱ رشته کوه‌های البرز

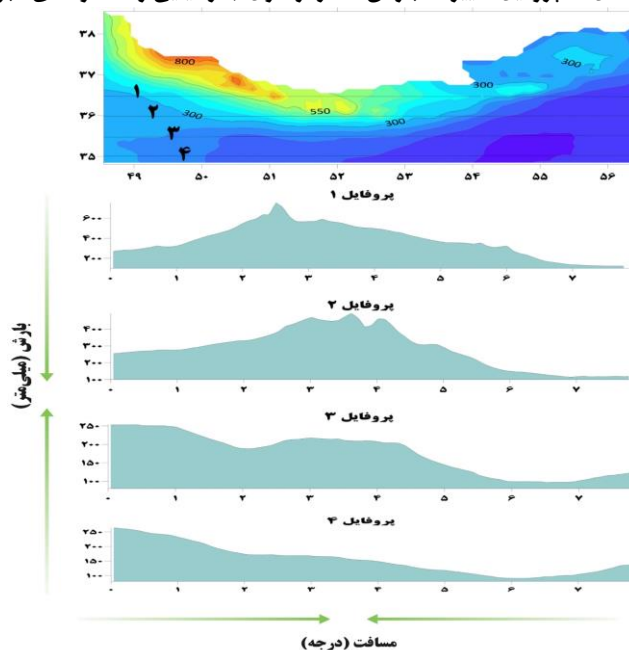
ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی برای منطقه مورد مطالعه استخراج شود. با استفاده از پروفیل‌های طولی تغییرات بارش در طول جغرافیایی استخراج شد (شکل ۷). با توجه به نتایج، بارش با افزایش طول جغرافیایی از خط ساحلی دور شده و به سمت مناطق کوهستانی گرایش پیدا کرده است. به عبارتی دیگر، در طول‌های جغرافیایی کم، بارندگی بیش‌تر به نواحی ساحلی محدود بوده است، ولی با افزایش هر درجه طول جغرافیایی بارش به سمت کوهستان تمایل پیدا کرده و تا یک ارتفاع مشخص که بهینه بارش در

جدول ۱. درصد تغییرات سطوح معنی‌داری برای جهت‌های جغرافیایی

جهت	درصد سلول		
	>۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱
بدون جهت	۴/۴	۱/۹	۳/۴
شمال	۱۲/۵	۳	۱۶/۸
شمال شرقی	۷	۲/۵	۱۲/۲
شرق	۴/۴	۱/۸	۶/۸
جنوب شرقی	۵/۹	۱/۳	۱۲/۵
جنوب	۷	۲/۹	۲۵/۴
جنوب غربی	۸/۱	۲/۲	۱۱/۲
غرب	۳/۱	۱/۹	۲/۷
شمال غربی	۶/۵	۲/۶	۹



شکل ۷. پروفیل تغییرات بارش متأثر از طول جغرافیایی رشته‌کوه‌های البرز



شکل ۸. تغییرات بارش متأثر از عرض جغرافیایی رشته‌کوه‌های البرز

منطقه مورد مطالعه است این روند صعودی در بارش مشاهده می‌شود. یک ویژگی پروفیل‌های طولی و عرضی در بررسی بارندگی نشان دادن تغییرات بارندگی قبل و بعد از یک کوهستان است که در بررسی رفتار بارندگی بسیار مؤثر می‌باشد. به طوری که شروع بارندگی از نوار ساحلی بود و سپس به ارتفاعات رسیده و پس از صعود از کوهستان قدرت بارشی خود را از دست داده است و بعد از طی یک مسیر طولانی، دوباره سامانه بارشی یک‌روند صعودی پیدا کرده است (شکل ۷). در شکل ۸ تغییرات بارندگی ناشی از عرض جغرافیایی نشان داده شد است. با توجه به نتایج، در عرض‌های جغرافیایی بالا بارندگی در قسمت میانی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر بوده و هر چه به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر می‌رود میزان بارندگی از شرق به سمت غرب تمایل پیدا کرده و محدود به سمت دامنه‌های جنوبی در قسمت شمال غربی منطقه مورد مطالعه است.

بحث و نتیجه‌گیری

در بررسی سطوح معنی‌داری گرادیان‌های بارشی مشخص شد که تغییرات بارش در بسیاری از مناطق از علاوه بر الگوهای مکانی متأثر از جهت‌هایی جغرافیایی است. به طوری که در دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز دو الگوی مکانی با بیش‌ترین تأثیر بر بارش بوده که در سازوکار تشکیل ابر و بارش نقش بیش‌تری نسبت به سایر جهت‌های جغرافیایی دارند. در دامنه شمالی البرز در مناطقی که نزدیک به دریا بوده گرادیان‌های بارشی منفی است. گرادیان منفی در دامنه جنوبی البرز در بخش جنوب شرقی استان سمنان نیز مشاهده می‌شود که ناشی از تأثیرپذیری بارش در مناطق دشتی است. یکی از دلایل اصلی این امر این است بارش زمانی که در لبه ساحلی دریای خزر تشکیل می‌شود، به سمت کوهستان البرز حرکت می‌کند؛ از شدت بارش آن کاسته شده و در نزدیک کوه در اثر صعود دوباره بر مقدار بارش افزوده می‌شود که یک گرادیان مثبت را ایجاد می‌کند ولی در یک ارتفاع خاص دوباره بارش کاهش پیدا می‌کند و پس از طی کردن ارتفاعات کوهستانی البرز در دامنه جنوبی همزمان که به سمت پایین کوهستان حرکت می‌کند بر رطوبت خود می‌افزاید. در مناطق مسطح شروع به بارش نموده که نشان‌دهنده تأثیر الگوی مکانی تغییرات جهت‌هایی جغرافیایی بر بارش است. نتایج این پژوهش با یافته‌های Ogrin و همکاران (۲۰۲۰) که نشان داد در کوه‌های آلپ با افزایش ارتفاع در امتداد دره‌ها میزان بارش افزایش می‌یابد و سپس با تغییر شیب کوهستان کاهش می‌یابد هم‌خوانی دارد. بنابراین براساس نتایج مشخص شد که تغییرات در جهت و شدت جریان هوا نیز ممکن است، توزیع مکانی بارش در منطقه و در نتیجه رابطه بین بارش و ارتفاع را تغییر دهد (Kirshbaum *et al.*, 2018). باین‌حال، تغییر بارش وابسته به ارتفاع در دامنه‌های شمالی، جنوبی، غربی، مرکزی و شرقی به‌طور جداگانه مشاهده شده است، البته با نتایج پراکنده‌تری که احتمالاً به کاهش سطح مطالعاتی مرتبط است. یافته‌ها نشان داد که سازوکار مؤثر بر تغییر بارش وابسته به ارتفاع می‌تواند مستقل از تغییرات دینامیکی بر بارش باشد، ولی عامل اصلی در ایجاد بارش در مناطق کوهستانی وجود سدهای طبیعی کوهستان در برابر شارهای رطوبتی است که از دریاها و اقیانوس‌ها به سمت مناطق خشکی حرکت می‌کنند. اگر رشته‌کوه البرز در منطقه خزری وجود نداشت عدم بارش یا کاهش بارش در منطقه شمالی کشور یکی از اصلی‌ترین احتمالاتی است که می‌توان بیان کرد به طوری که زمینه موانع کوهستانی در تحقیقات مختلف (Neiman *et al.*, 2013; Alcott and Steenburgh, 2013; Luce *et al.*, 2002) در تشکیل بارش مؤثر گزارش شده است. باین‌حال، باید توجه داشت که محدودیت‌ها در داده‌های سطحی در مناطق کوهستانی همچنان وجود دارد و برآوردهای ماهواره‌ای از بارش در بسیاری از مطالعات هنوز مورد بحث است (Zambrano-Bigiarini *et al.*, 2017; Rivera *et al.*, Castro *et al.*, 2015). با دور شدن ابرهای باران‌زا از نوار ساحلی و حرکت به سمت مناطق کوهستانی، از قدرت بارندگی آن‌ها کاسته، ولی این روند همیشه پایدار نبوده و ابر با برخورد به دیواره کوهستانی دوباره صعود نموده و چون هنوز دارای رطوبت است در اثر سرد شدن شروع به بارش می‌کند. این بارش تا یک حد خاصی از ارتفاع ادامه دارد و سپس کاهش می‌یابد و تغییرات مکانی بزرگی در میزان بارش وجود دارد. در مناطق بالادست تپه‌ها بارش کم‌تری نسبت به مناطق زمینی وجود دارد و شیب بارش، به‌خصوص در ناحیه زمینی نسبت به جهت جریان ورودی غالب توده‌های هوای مرطوب و همچنین آرایش مکانی دامنه‌های کوه متمایز می‌باشد (Kozak *et al.*, 2019) و در طول خط ساحلی بارش بیش‌تر بوده که با نتایج پژوهش‌های Armon و همکاران (۲۰۲۰) ارتباط دارد، به طوری که در مطالعات خود بیان کردند برای جنوب شرقی مدیترانه، باران به مقدار زیادی در طول خط ساحلی بالاتر بوده و

این بارندگی در طول خط ساحلی تا چند کیلومتر ادامه دارد. به‌طور کلی‌تر، رویکردهای ارائه‌شده در این مطالعه را می‌توان برای ارزیابی اثرات منطقه‌ای به محلی تغییر اقلیم با جزئیات بیش‌تر بکار برد. در بعضی از مناطق بارش متأثر از تغییرات توپوگرافی نبود و چنین تغییراتی ممکن است ناشی از بازیابی ازن استراتوسفر یا افزایش اثر گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد که انتظار می‌رود به‌دلیل توده‌های هوای گرم‌تر و مرطوب‌تر که هم بارش و هم دما را تغییر می‌دهند، تغییر کنند. بنابراین توصیه می‌شود در مطالعات مشابه علاوه بر الگوهای مکانی متأثر بر بارش، تغییرات پوشش گیاهی و جزایر حرارتی و اثرات تغییرات کاربری اراضی نیز مدنظر قرار بگیرد.

References

- Alcott, T.I., Steenburgh, W.J., 2013. Orographic influences on a Great Salt Lake-effect snowstorm. *Monthly Weather Review* 141(7), 2432-2450.
- Anders, A.M., Roe, G.H., Durran, D.R., Minder, J.R., 2007. Small-scale spatial gradients in climatological precipitation on the Olympic Peninsula. *Journal of Hydrometeorology* 8(5), 1068-1081.
- Anders, A.M., Roe, G.H., Montgomery, D.R., Hallet, B., 2008. Influence of precipitation phase on the form of mountain ranges. *Geology* 36(6), 479-482.
- Armon, M., Marra, F., Enzel, Y., Rostkier-Edelstein, D., Morin, E., 2020. Radar-based characterisation of heavy precipitation in the eastern Mediterranean and its representation in a convection-permitting model. *Hydrol. Earth System. Science* 24, 1227-1249.
- Castro, L.M., Miranda, M., Fernández, B., 2015. Evaluation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) in a mountainous region of the central Andes range with a Mediterranean climate. *Hydrology Resource* 46, 89-105.
- Chaboureaud, J.P., Söhne, N., Pinty, J.P., Meirold-Mautner, I., Defer, E., Prigent, C., Pardo, P. J., Mech, M., Crewell, S., 2008. A midlatitude precipitating cloud database validated with satellite observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47(5), 1337-1353.
- Colberg, J.S., Anders, A.M., 2014. Numerical modeling of spatially-variable precipitation and passive margin escarpment evolution. *Geomorphology* 207, 203-212.
- Derin, Y., Anagnostou, E., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Buytaert, W., Chang, C.H., Chen, H., Delrieu, G., Hsu, Y.C., Lavado-Casimiro, W., 2019. Evaluation of GPM-era global satellite precipitation products over multiple complex terrain regions. *Remote Sensing* 11(24), 2936.
- Ferrier, K.L., Huppert, K.L., Perron, J. T., 2013. Climatic control of bedrock river incision. *Nature* 496(7444), 206-209.
- Garreaud, R., Falvey, M., Montecinos, A., 2016. Orographic precipitation in coastal southern Chile: Mean distribution, temporal variability, and linear contribution. *Journal of Hydrometeorology* 17(4), 1185-1202.
- Goren, L., Willett, S.D., Herman, F., Braun, J., 2014. Coupled numerical-analytical approach to landscape evolution modeling. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(4), 522-545.
- Guan, H., Wilson, J.L., Makhnin, O., 2005. Geostatistical mapping of mountain precipitation incorporating autosearched effects of terrain and climatic characteristics. *Journal of Hydrometeorology* 6(6), 1018-1031.
- Han, J., Gasparini, N.M., Johnson, J.P., 2015. Measuring the imprint of orographic rainfall gradients on the morphology of steady-state numerical fluvial landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* 40(10), 1334-1350.
- Houze Jr, R.A., 2012. Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics* 50(1).
- Immerzeel, W.W., Petersen, L., Ragettli, S., Pellicciotti, F., 2014. The importance of observed gradients of air temperature and precipitation for modeling runoff from a glacierized watershed in the Nepalese Himalayas. *Water Resources Research* 50(3), 2212-2226.
- Kirshbaum, D.J., Adler, B., Kalthoff, N., Barthlott, C., Serafin, S., 2018. Moist orographic convection: Physical mechanisms and links to surface-exchange processes. *Atmosphere* 9(3), 80.
- Kirshbaum, D.J., Smith, R.B., 2008. Temperature and moist-stability effects on midlatitude orographic precipitation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography* 134(634), 1183-1199.

- Kozak, J., Cebulak, D., Stec, T., Jaguś, A., 2019. Variation of precipitation gradient in mountain areas based on the example of the western beskids in the polish carpathians. *Journal Ecology Engineering* 20, 261-266.
- Krajewski, W.F., Smith, J.A., 2002. Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in water resources* 25(8-12), 1387-1394.
- Luce, C.H., Abatzoglou, J.T., Holden, Z.A., 2013. The missing mountain water: Slower westerlies decrease orographic enhancement in the Pacific Northwest USA. *Science* 342(6164), 1360-1364.
- Michaelides, S., Levizzani, V., Anagnostou, E., Bauer, P., Kasparis, T., Lane, J.E., 2009. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research* 94(4), 512-533.
- Minder, J.R., Mote, P.W., Lundquist, J.D., 2010. Surface temperature lapse rates over complex terrain: Lessons from the Cascade Mountains. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D14).
- Murata, F., Hayashi, T., Matsumoto, J., Asada, H., 2007. Rainfall on the Meghalaya plateau in northeastern India—one of the rainiest places in the world. *Natural Hazards* 42, 391-399.
- Neiman, P.J., Ralph, F.M., White, A.B., Kingsmill, D.E., Persson, P.O.G., 2002. The statistical relationship between upslope flow and rainfall in California's coastal mountains: Observations during CALJET. *Monthly Weather Review* 130(6), 1468-1492.
- Ogrin, M., Kozamernik, E., 2020. Vertical precipitation gradients: a case study of Alpine valleys of northwestern Slovenia. *Theoretical and applied climatology* 140, 401-409.
- Rivera, J.A., Marianetti, G., Hinrichs, S., 2018. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research* 213, 437-449.
- Roe, G. H., 2005. Orographic precipitation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 645-671.
- Roe, G.H., Montgomery, D.R., Hallet, B., 2002. Effects of orographic precipitation variations on the concavity of steady-state river profiles. *Geology* 30(2), 143-146.
- Roe, G.H., Montgomery, D.R., Hallet, B., 2003. Orographic precipitation and the relief of mountain ranges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108(B6).
- Scaff, L., Rutllant, J.A., Rahn, D., Gascoin, S., Rondanelli, R., 2017. Meteorological interpretation of orographic precipitation gradients along an Andes west slope basin at 30 S (Elqui Valley, Chile). *Journal of Hydrometeorology* 18(3), 713-727.
- Shi, X., Durran, D. R., 2015. Estimating the response of extreme precipitation over midlatitude mountains to global warming. *Journal of Climate* 28(10), 4246-4262.
- Strangeways, I., 2006. *Precipitation: theory, measurement and distribution*. Cambridge University Press.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., Weingartner, R., 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research* 43(7).
- Wang Z., Zhong R., Lai C., Chen J., 2017. Evaluation of the GPM IMERG satellite base precipitation products and the hydrological utility. *Atmospheric Research* 196, 151-163.
- Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., Ribbe, L., 2017. Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 1295-1320.