

Modeling Spatiotemporal Changes in Rainfall for Use in Dynamic and Distributed Rainfall-Runoff

Amir Hossein Parsamehr  | Ali Salajegheh  | Shahram Khalighi Sigaroodi  |
Khaled Ahmadali 

Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.
E-mail: salajegh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 15 Jun. 2023
Revised: 09 Aug. 2023
Accepted: 30 Aug. 2023
Published online: 18 Apr. 2024

Keywords:
*Levenberg-Marquardt,
Paskouhak catchment,
Rainfall modelling,
Regression modeling.*

Abstract

The aim of this study is to propose an approach for modeling spatiotemporal changes in rainfall that can be used as input for rainfall-runoff models. To achieve this, rainfall data from four rain gauge stations in the Paskouhak catchment were used. Five parameters, including elevation, slope, aspect, longitude, and latitude, were identified. The different combinations of these five parameters were prioritized using the gamma test in WinGamma™ software. After the use of different regression models, the best model was selected based on evaluation criteria such as R^2 , RMSE, and the Taylor diagram. A raster map of a selected rainfall event was drawn in the Arc GIS environment. Finally, using the proposed approach of relative equations, the spatiotemporal changes in rainfall were modeled. The results showed that using a second-degree nonlinear model and parameters of elevation and latitude, it is possible to accurately obtain the spatial distribution of rainfall in the form of a regular pixel grid (100 square meters) with high precision ($R^2=0.917$ and $RMSE=0.2277$). In different rainfall events in small catchment areas, the variation in rainfall in each pixel is almost constant relative to other pixels, including the rain gauge station, the proposed approach in this study can model the spatiotemporal changes of each rainfall event as a three-dimensional matrix in the study area. The approach can be valuable in predicting potential flood events and in water resource management and planning. However, further research is required to validate the results and test the approach in other areas.

Cite this article: Parsamehr, A.H., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroodi, S., Ahmadali, K. (2024). Modeling Spatiotemporal Changes in Rainfall for Use in Dynamic and Distributed Rainfall-Runoff. *Journal of Range & Watershed Management*, 77 (1), 33-49. DOI: 10.22059/jrwm.2023.360794.1712



مدل سازی تغییرات مکانی - زمانی بارش به منظور استفاده در مدل های دینامیکی و توزیعی بارش - رواناب

امیرحسین پارسامهر^{id} | علی سلاجقه[✉] | شهرام خلیقی سیگارودی^{id} | خالد احمدآلی^{id}

گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
رایانامه: salajegh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

کلیدواژه‌ها:

حوزه پسکوهک،

لونبرگ - مارکوارت،

مدل رگرسیون،

مدل سازی بارش.

هدف از پژوهش حاضر ارائه رویکردی برای مدل سازی تغییرات مکانی-زمانی بارش است که می تواند به عنوان ورودی مدل های بارش - رواناب مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور از داده های رگبار چهار ایستگاه پایش باران در حوزه آبخیز پسکوهک، واقع در ۲۷ کیلومتری غرب شیراز، استفاده شد. پنج پارامتر ارتفاع از سطح دریا، درجه شیب، جهت شیب، طول و عرض جغرافیایی به عنوان عوامل موثر در تغییرات مکانی بارش انتخاب شد. ترکیبات مختلف این پنج پارامتر، با استفاده از آزمون گاما در نرم افزار WinGammaTM، اولویت بندی شد. مدل سازی رگرسیونی و تعیین ضرایب عددی معادلات، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی لونبرگ-مارکوارت در محیط MATLAB انجام شد. سپس با استفاده از معیارهای ارزیابی ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و دیاگرام تیلور (Taylor Diagram)، بهترین مدل انتخاب و نقشه رستری یک رگبار انتخابی در محیط Arc GIS ترسیم شد. در انتها با استفاده از رویکرد پیشنهادی استفاده از روش نسبت معادلات، مدل تغییرات مکانی - زمانی بارش نهایی شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل غیرخطی درجه دو و پارامترهای ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی، می توان با دقت بالایی، توزیع مکانی بارش را به صورت یک شبکه منظم پیکسلی (۱۰۰ متر مربعی) بدست آورد ($R^2 = 0/917$ و $RMSE = 0/2277$). با توجه به اینکه در رگبارهای مختلف حوزه های کوچک، نسبت تغییرات بارش هر پیکسل به پیکسل های دیگر (از جمله پیکسل ایستگاه پایش باران) تقریباً ثابت است، بنابراین با استفاده از رویکرد پیشنهادی در این پژوهش می توان تغییرات مکانی و زمانی هر رگبار را به صورت یک ماتریس سه بعدی در منطقه مدل سازی کرد.

استناد: پارسامهر، امیرحسین؛ سلاجقه، علی؛ خلیقی سیگارودی، شهرام؛ احمدآلی، خالد (۱۴۰۳). مدل سازی تغییرات مکانی - زمانی بارش به منظور استفاده در مدل های دینامیکی و توزیعی بارش - رواناب. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۷(۱)، ۳۳-۴۹.

DOI: 10.22059/jrwm.2023.360794.1712



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

بارش یکی از مهم‌ترین عناصر اقلیمی است که پیوسته مقدار آن در بعد مکان و زمان، تغییر می‌کند. تغییرات مکانی بارش علاوه بر این که در مقیاس وسیع، تحت تاثیر اقلیم‌های گوناگون قرار دارد، در یک گستره کوچک هم می‌تواند متاثر از عوامل محیطی باشد. مکان هندسی نقاط مختلف یک حوزه آبخیز دارای ویژگی‌های محیطی متفاوتی مانند ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت و غیره هستند که این عوامل می‌توانند بر روی بارش تاثیرگذار باشند. بنابراین انتظار می‌رود در مقیاس حوزه‌های آبخیز متوسط و کوچک، به‌ویژه حوزه‌هایی که تغییرات عوامل محیطی در آن‌ها قابل توجه باشند، شاهد تغییرات مکانی بارش باشیم که می‌تواند بسته به شدت تغییرات عوامل تاثیرگذار، بسیار کم یا کاملاً محسوس باشد.

آگاهی از تغییرات مکانی و زمانی بارش و در دسترس بودن سری زمانی داده‌ها، یکی از الزامات طراحی، اجرا و ارزیابی مدل‌های دینامیک هیدرولوژیکی، از جمله مدل‌های بارش-رواناب است. بنابراین با توجه به توسعه مدل‌های توزیعی بارش-رواناب، افزایش تقاضا برای داده‌های بارش در مقیاس زمانی و مکانی کوچکتر، روز به روز افزایش یافته است (Papailiou et al, 2022). از سوی دیگر، عدم کفایت یا عدم توزیع مناسب ایستگاه‌های ثبت بارش، عدم تطابق مقیاس مکانی و زمانی بارش با مدل بارش-رواناب و چگونگی تبدیل داده‌های گسسته (نقاط ایستگاهی) به یک مجموعه پیوسته (نقشه‌های رستری)، از مهمترین چالش‌های پیش رو در استفاده از سری‌های زمانی بارش در اجرای فرآیند مدل‌های توزیعی بارش - رواناب است. لذا یکی از رویکردهای مطالعاتی هیدرولوژیست‌ها، تحلیل، تفسیر و ردیابی تغییرات مکانی و زمانی بارش از طریق تعیین یک مدل بهینه است. (عساکره و سیفی پور، ۲۰۱۳).

مدل‌سازی بارش شامل نمایش مفهومی یک فرآیند طبیعی از طریق روابط ریاضی برای تولید سری‌های بارش است. بسیاری از مدل‌ها بر تولید سری‌های زمانی بارش در مقیاس زمانی روزانه و بزرگتر از آن و در یک محدوده وسیع تمرکز دارند، در حالی که مدل‌سازی بارش در مقیاس زمانی ساعتی (یا بخشی از آن) و در یک محدوده کوچکتر مانند یک حوزه آبخیز، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است (Callau Poduje and Haberlandt, 2017). از دلایل این مهم، این است که وقتی مدل‌سازی در مقیاس حوزه‌های متوسط یا کوچک انجام می‌شود، به وفور شاهد حوزه‌های فاقد آمار (ایستگاه پایش) هستیم و ناگزیر باید از آمار ایستگاه‌های حوزه‌های مجاور یا حوزه‌های دورتر استفاده کنیم. با توجه به تفاوت ویژگی‌های محیطی حوزه آبخیز هدف با حوزه‌های آبخیز هم‌جوار، انتظار رخداد خطا نیز دور از ذهن نخواهد بود. بنابراین باید تا حد امکان از مدل‌هایی استفاده کنیم که نتایج آن از دقت بیشتری در برآورد بارش برخوردار باشد. روش‌های مختلفی برای تخمین و برآورد بارش یک منطقه فاقد آمار وجود دارد که بر مبنای هدف و داده‌های در دسترس، متفاوت است. در این میان، مدل‌های آماری از توجه عمده‌ای برخوردار هستند. از رایج‌ترین مدل‌های آماری کلاسیک، معادلات رگرسیونی است که برای تخمین یک متغیر بر اساس متغیر(های) دیگر استفاده می‌شود. با استفاده از این مدل که بر پایه ارتباط تابعی بین متغیرها است، می‌توان داده‌های خروجی را پیش‌بینی کرد (پناهی و اسدی، ۲۰۱۸). در واقع روش رگرسیون، یک روش یادگیری نظارتی است که به وسیله آن می‌توان تغییرات یک متغیر وابسته را به وسیله ترکیب خطی یا غیر خطی از یک یا چند متغیر مستقل مدل کرد (Chow et al. 2011). صرف نظر از اینکه معادلات رگرسیونی، دو متغیره باشد یا چند متغیره، خطی باشد یا غیر خطی، یکی از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی، انتخاب بهینه پارامترهای ورودی به منظور افزایش دقت و کارایی مدل و کاهش هزینه‌ها و زمان مصرفی در مدل‌سازی است. یکی از روش‌ها برای شناسایی ورودی‌های بهینه و مؤثر در مدل‌سازی، استفاده از فناوری آزمون گاما است. آزمون گاما ابزاری برای تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی بوده که با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار قابل محاسبه میانگین مربعات خطا، مناسب‌ترین رابطه بین ورودی‌ها و خروجی (ها) در یک مجموعه داده‌های عددی را ارائه می‌کند. در واقع با استفاده از آزمون گاما می‌توان بهینه‌ترین ترکیب ورودی‌ها که منجر به کم‌ترین میانگین مربعات خطا در هر نوع مدل‌سازی پیوسته می‌شود را تعیین نمود (Moghaddamnia et al, 2009). پژوهشگران در زمینه عوامل مؤثر در برآورد بارش و در نتیجه روش‌های تخمین بارش اختلاف نظر دارند. بسیاری از محققین در مدل‌های رگرسیونی خود برای برآورد بارش، تنها از متغیر ارتفاع از سطح دریا استفاده کرده‌اند. به نظر می‌رسد عوامل دیگری علاوه بر

ارتفاع از سطح دریا می‌توانند در این زمینه موثر باشند. هوتون^۱ (۱۹۷۹) ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح دریا و جهت دامنه‌ها، مجرد و مرادی‌فر (۲۰۰۳) و باروتی و همکاران (۲۰۲۰) ارتفاع از سطح دریا، طول و عرض جغرافیایی، استور و فرگوسن^۲ (۱۹۷۲) ارتفاع از سطح دریا، زاویه شیب و جهت ناهمواری، ویت مور^۳ (۱۹۷۲)، گیور و مسعودیان (۱۹۹۶) و مسعودیان و همکاران (۲۰۱۴) طول و عرض جغرافیایی، و عساکره و سیفی‌پور (۲۰۱۳) و بلیانی (۲۰۱۷) ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت دامنه‌ها و طول و عرض جغرافیایی را در تغییرات بارش موثر می‌دانند.

در بسیاری از مدل‌های بارش-رواناب، مقادیر بارش به عنوان مهم‌ترین پارامتر ورودی، ثابت فرض شده است. حال آنکه مقادیر بارش هم در بعد مکان و هم در بعد زمان تغییر می‌کند. هدف از پژوهش حاضر ارائه مدلی برای پایش تغییرات مکانی - زمانی بارش است که بتوان از خروجی مدل پیشنهادی بارش، به عنوان ورودی برای مدل‌های توزیعی بارش-رواناب استفاده کرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز پسکوهک، یکی از حوزه‌های معرف استان فارس است که با مساحتی حدود ۷۳/۱۳ کیلومتر مربع، در ۲۷ کیلومتری غرب شیراز قرار دارد. این محدوده در موقعیت جغرافیایی ۶۱۸۱۳۹ تا ۶۲۷۰۴۹ طول شرقی و ۳۲۸۴۱۶۰ تا ۳۲۹۸۳۵۰ عرض شمالی قرار داشته و بخشی از زاگرس چین‌خورده است (شکل ۱). متوسط بارش سالانه محدوده مورد مطالعه ۵۴۰ میلیمتر بوده و بارش‌ها عمدتاً از اواسط آبان شروع و تا اواخر اردیبهشت ادامه دارد. متوسط دما در گرمترین و سردترین ماه سال به ترتیب ۳۴ و ۸ درجه سانتیگراد گزارش شده است. گونه گیاهی غالب منطقه *Crataegus azarolus* است.

۲-۲. روش کار

به منظور مدل‌سازی تغییرات مکانی - زمانی بارش، از داده‌های آماری رگبارهای چهار ایستگاه پایش باران، در یک دوره آماری مشترک ۸ ساله (۱۴۰۰-۱۳۹۳) که از آرشیو سازمان آب منطقه ای فارس تهیه شده بود، استفاده شد. موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. ایستگاه باران‌سنجی مارون با توجه به قدمت و تجهیزات پایش پارامترهای اقلیمی، خصوصاً باران‌نگار، به عنوان ایستگاه مرجع اصلی در حوزه شناخته می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش‌های مشابه، پنج پارامتر که در غالب پژوهش‌ها به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر تغییرات مکانی بارش معرفی شده بودند، انتخاب شدند. این پنج پارامتر شامل ارتفاع از سطح دریا، زاویه شیب، جهت شیب، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی بودند. برای تهیه لایه‌های مذکور از نقشه رستری مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با اندازه سلولی ۱۲/۵ متر ماهواره ALOS PALSAR استفاده شد. با توجه به اهداف مدل‌سازی و رسیدن به تفکیک مکانی ۱۰ متر، بازنمونه‌برداری DEM در نرم‌افزار SNAP انجام شد. سپس در محیط GIS نقشه‌های رستری شیب، جهت شیب، طول و عرض جغرافیایی تهیه شد.

در ادامه رگبارهایی که به صورت مشترک در گزارشات هر چهار ایستگاه ثبت شده بود، انتخاب و پس از اطمینان از صحت داده‌ها، از لحاظ همگنی و نرمال بودن مورد بررسی قرار گرفتند. در بررسی‌های اولیه، ارتباط هر یک از پارامترهای پیشنهادی ورودی مدل با مقادیر بارش به صورت جداگانه بررسی و تاثیرگذاری آن‌ها بر بارش مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور انتخاب بهینه تعداد و ترکیب پارامترهای ورودی مدل از میان پارامترهای موجود، از آزمون گاما استفاده شد. آزمون گاما

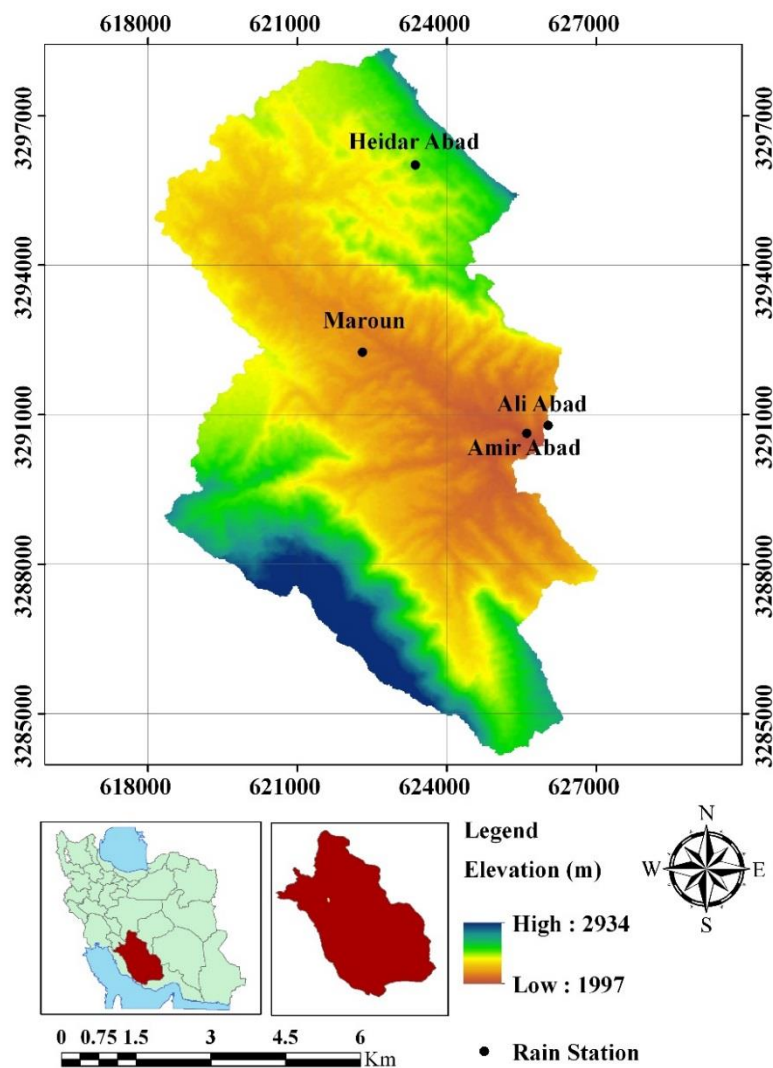
¹ Houghton

² Storr and Ferguson

³ Withmore

مقدار خطای برآورد شده (واریانس خطا) را با توجه به داده‌های مستقیم نشان می‌دهد. از این رو برآورد خطایی که به آن آزمون گاما اطلاق می‌گردد، می‌تواند معادل مجموع مربعات خطای غیرخطی در نظر گرفته شود (پورغلام آمیجی و همکاران، ۲۰۲۱). اگر فرض شود که دو نقطه x و x' با یکدیگر در فضای ورودی متناظر با خروجی‌های y و y' به هم نزدیک شوند، باید در فضای خروجی نیز این دو نقطه به هم نزدیک گردند. در غیر این صورت، نزدیک نبودن این دو نقطه ناشی از اختلافی خواهد بود که از خطاها (نویزها) ایجاد می‌شود. اگر مجموعه‌ای از داده‌های مستقیم به شکل رابطه (۱) را در نظر بگیریم:

$$\{(x_i, y_j), 1 \leq i \leq M\} \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

که در آن، بردار $x_i \in R^m$ به عنوان ورودی و مطابق آن عدد $y_i \in R$ به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. اگر فرض شود که بردارهای x قابلیت پیش‌گویی فاکتورهای مؤثر و بهینه قابل استفاده در برآورد خروجی y را داشته باشند، در این صورت رابطه (۲) صادق خواهد بود:

$$y = f(x_1, \dots, x_M) + r \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن $f(x_1, \dots, x_M)$ یک تابع ساده و r یک متغیر تصادفی است که نشان دهنده مقادیر نویز می‌باشد. به طور کلی و بدون کاهش تابع، می‌توان دریافت که مقدار r برابر صفر بوده و بنابراین هر مقدار اریب ثابت، می‌تواند در تابع ناشناخته $f(x_1, \dots, x_M)$ استنتاج شود. دامنه احتمال مدل به تابعی از مدل ساده محدود می‌شود و چون مشتق جزئی اول دارای محدودیت‌هایی است، آماره گاما (Γ) از قسمتی از واریانس خروجی که نمی‌تواند برای یک مدل ساده محاسبه شود، به دست می‌آید. اگر فرض شود که $\{x_i\}_{i,k}$ مقدار k امین نزدیک‌ترین همسایه در یک فاصله اقلیدسی برای $(1 \leq k \leq p)$ و $(i \leq k \leq M)$ باشد، در این صورت معادله اصلی محاسبه گاما، نیازمند برآورد مقدار Γ از بردارهای ورودی است:

$$\delta_M(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |x_{N[i,k]} - x_i|^2, (1 \leq k \leq p) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن $|x_{N[i,k]} - x_i|$ فاصله اقلیدسی را مشخص می‌کند و تابع مربوطه گاما از مقادیر خروجی عبارت است از:

$$\gamma_M(k) = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M |y_{N[i,k]} - y_i|^2, (1 \leq k \leq p) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن $\gamma_M(k)$: بیانگر مقادیر y برای k امین نزدیک‌ترین همسایه x_i در رابطه (۴) می‌باشد. از این رو با محاسبه Γ می‌توان کم‌ترین مربعات خطا را برای نقاط p $[\delta_M(k), \gamma_M(k)]$ ایجاد کرد:

$$\gamma = A\delta + \Gamma \quad \text{رابطه ۵}$$

اگر محور عمودی قطع شود ($\delta = 0$)، مقدار Γ به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\gamma_M(k) \rightarrow \text{Var}(r) \quad \text{as} \quad \delta_M(k) \rightarrow 0 \quad \text{رابطه ۶}$$

وقتی که مقدار گاما صفر باشد، هیچ محدودیتی برای ساخت یک مدل خوب وجود نخواهد داشت. بنابراین از نقاطی که دارای مقدار گامای کم‌تر در مقایسه با دیگر متغیرها هستند برای مدل‌سازی استفاده خواهد شد (Moghaddamnia et al, 2009). محاسبه گرادین (شیب) نیز می‌تواند اطلاعات مفیدی در زمینه ترکیب سیستم تحت کنترل ارائه کند. در واقع شیب یک مقدار بی‌بعد است که بیان‌کننده پیچیدگی‌های تابع می‌باشد. نسبت v بررسی شکلی که وابسته به دامنه خروجی است را میسر می‌سازد و خروجی مناسب برای توابع ساده را مدل‌سازی می‌کند و به صورت رابطه (۷) نشان داده می‌شود:

$$v = \frac{\Gamma}{\sigma^2(y)} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن $\sigma^2(y)$ واریانس خروجی y است. در آزمون گاما هرچه نسبت v به صفر نزدیک‌تر شود، نمایان‌گر برآوردی مناسب‌تر از خروجی y خواهد بود. برای پارامترهای ورودی که مقدار این متغیر به ۱ نزدیک‌تر باشد، مقدار خطای تصادفی افزایش یافته و بنابراین مدل برازش یافته با استفاده از آن پارامترها، نامناسب‌تر خواهد بود (Moghaddamnia et al, 2009).

در این پژوهش از نرم افزار WinGammaTM برای انتخاب تعداد و ترکیب بهینه پنج ورودی مدل در برآورد مقدار بارش، استفاده شد. در واقع نتایج این روش بهترین ترکیب m پارامتر از میان پنج پارامتر موجود را مشخص می‌کند. این فرآیند، برای مقادیر m از یک تا پنج تکرار شد. بعد از مشخص شدن بهترین ترکیب از میان تعداد پارامترهای مشخص شده، اقدام به مدل‌سازی هر یک از حالات برگزیده شد. برای این کار لازم بود تا معادلات رگرسیونی برای هر ترکیب منتخب مشخص شود. معادلات رگرسیونی گوناگونی وجود دارد که می‌تواند برای مدلسازی مورد استفاده قرار گیرد (بسالت پور و همکاران، ۲۰۱۳). در این پژوهش از معادلات چند متغیره درجه ۱، ۲ و ۳ استفاده شد. یکی از مهمترین مباحث مدل‌سازی با استفاده از معادلات رگرسیونی، برآورد ضرایب پارامترها است. برای این کار از الگوریتم بهینه‌سازی

لونیبرگ - مارکوارت استفاده شد.

الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت^۱ (LMA) روشی است برای یافتن کمینه یک تابع چند متغیره که به عنوان یک روش استاندارد برای حل مسئله کمینه مربعات برای توابع عنوان شده است. این الگوریتم به عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بین الگوریتم گاوس-نیوتون (GNA) و روش گرادیان کاهشی (GDA)، درون‌یابی می‌کند. در بسیاری مواقع، حتی اگر مقادیر اولیه تخمینی ضرایب متغیرهای توابع غیرخطی چند متغیره، بسیار دورتر از کمینه نهایی شروع کرده باشد، در نهایت جواب قابل قبولی را پیدا می‌کند. این الگوریتم یکی از پرطرفدارترین الگوریتم‌های برازش توابع است (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

الگوریتم لونیبرگ - مارکوارت برای پیدا کردن کمینه تابع $F(x)$ به صورت مجموع مربعات توابع غیرخطی، به شکل زیر است:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [f_i(x)]^2 \quad \text{(رابطه ۸)}$$

فرض کنید ژاکوبین $f - i(x)$ با $z - i(x)$ نشان داده شود. در این صورت روش لونیبرگ - مارکوارت در جهت داده شده با جواب p برای معادله زیر به جستجو می‌پردازد.

$$(J_k^T J_k + \lambda_k I) p_k = -J_k^T f_k \quad \text{(رابطه ۹)}$$

که در آن λ_k عددی غیر منفی و I ماتریس همانی است. این روش خاصیت جالبی که دارد این است که برای Δ وابسته به λ_k بردار p_k جواب زیر مسئله حداقل کردن مقید $\|J_k p + f_k\|_2^2 / 2$ تحت قید $\|p\|_2 \leq \Delta < 2$ است (Gill et al. 1981). در مجموع برآورد بهینه ضرایب پارامترها که بیش از ۲۰۰ ضریب بود، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی لونیبرگ - مارکوارت در محیط برنامه‌نویسی متلب انجام شد.

۲-۳. معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های پیشنهادی، نتایج حاصل از مدل‌ها با مقادیر واقعی مقایسه شدند. برای این منظور از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) (رابطه ۱۰)، ضریب همبستگی (r) (رابطه ۱۱) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۱۲)، با توجه به معادلات زیر استفاده شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^2)} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

در این روابط x_i و y_i به ترتیب نامین داده مشاهداتی و برآورد شده، \bar{x} و \bar{y} به ترتیب میانگین داده‌های مشاهداتی و برآورد شده و n طول سری زمانی داده‌ها است. نزدیک بودن مقدار معیار ارزیابی ضریب تعیین (R^2) و ضریب همبستگی (r) به یک و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به صفر نشان دهنده این است که مدل مورد نظر توانسته است برآورد بهتری (در مقایسه با مقادیر واقعی) داشته باشد (ایوبی و همکاران، ۲۰۲۲).

با توجه به اینکه در ارزیابی و مقایسه کارایی برخی مدل‌ها، همسویی واحدی در معیارهای ارزیابی مشاهده نشد، لذا برای حل این مسئله از دیاگرام تیلور استفاده شد (Khalighi Sigaroodi et al, 2014). دیاگرام تیلور، راه حل گرافیکی برای ارزیابی دقت داده‌های پیش بینی

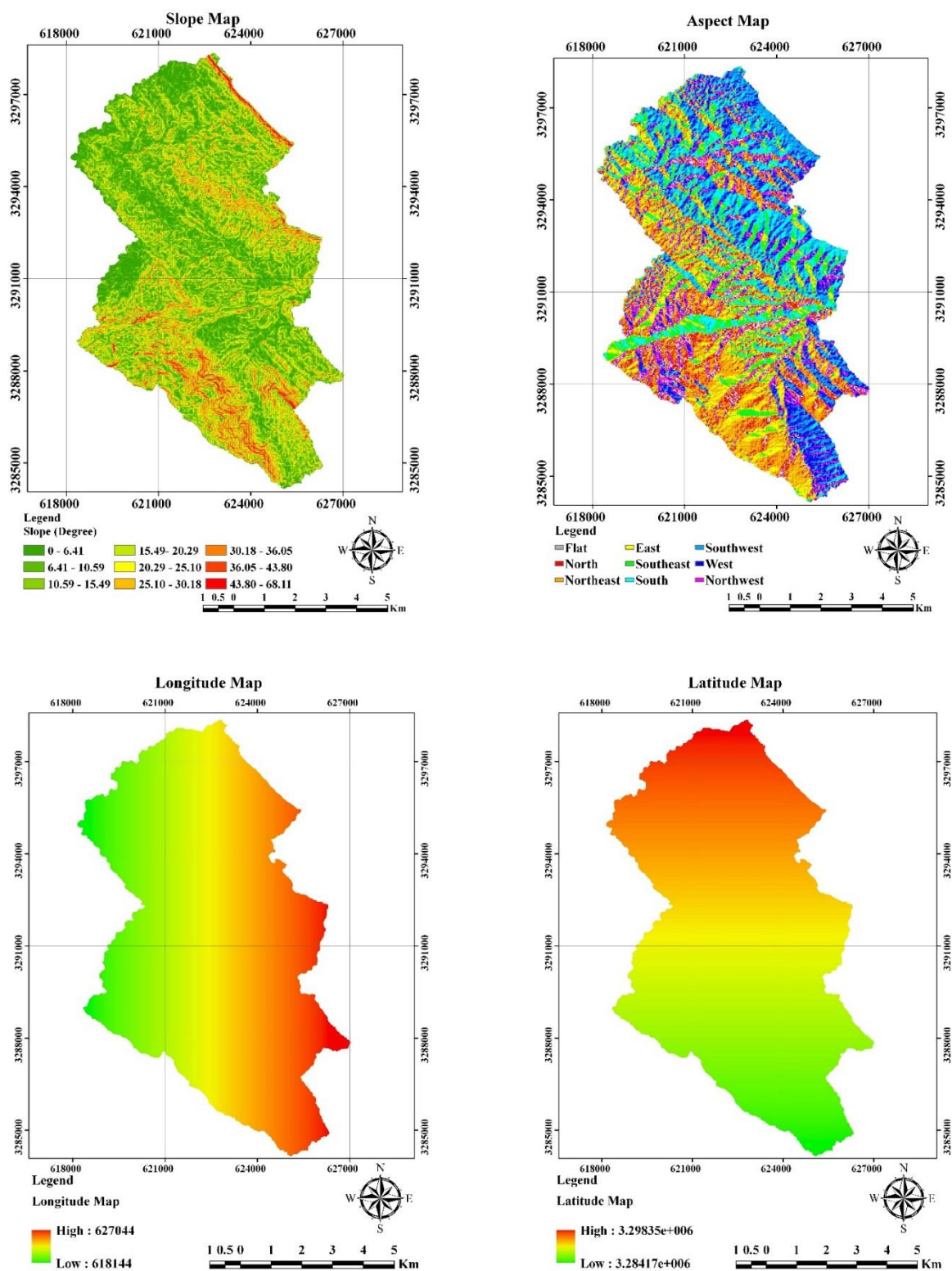
¹ Levenberg - Marquardt

شده (مدل) با به تصویر کشیدن همزمان پارامترهای آماری می‌باشد (Gleckler et al. 2008). در این دیاگرام هم‌زمان میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و همچنین انحراف معیار (S. D) خروجی مدل‌ها با مقادیر واقعی مقایسه می‌گردد (نوری و سلماسی، ۲۰۱۹). به عبارت دیگر، هر نقطه بر روی نمودار تیلور نشان دهنده هم‌زمان سه پارامتر انحراف معیار، ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد. در دیاگرام تیلور، فاصله طولی از مبدا مختصات نشان دهنده انحراف معیار، خط‌چین‌های شعاعی، نشان دهنده ضریب همبستگی و خط‌چین‌های قطاعی نشان دهنده مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد که با بزرگ شدن قطاع دایره، مقدار پارامتر مذکور بیش‌تر می‌شود (مونس‌خواه و همکاران، ۲۰۲۳). نقطه مرجع موقعیت ایستگاه شاهد (داده‌های واقعی) را بر اساس انحراف معیار، ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطای سری زمانی داده‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار RMSE و ضریب همبستگی سری زمانی ایستگاه زمینی در مقایسه با خودش به ترتیب صفر و یک خواهد بود، لذا موقعیت آن روی محور افقی بر اساس مقدار انحراف معیار تعیین خواهد شد. روش ارزیابی در این دیاگرام به این صورت است که موقعیت داده‌های مورد بررسی بر اساس RMSE، ضریب همبستگی آن با ایستگاه زمینی و انحراف معیار سری زمانی، روی دیاگرام ترسیم می‌شود و هر داده‌ای که موقعیت مکانی آن روی نمودار به نقطه مرجع نزدیک‌تر باشد، با دقت بیشتری مقدار بارش را برآورد می‌کند و بنابراین مناسب‌تر خواهد بود (Taylor, 2001). معادله رگرسیونی تابعی است که ارتباط بین مقادیر ورودی و خروجی را نشان می‌دهد. از آنجا که در هر رگبار، مقادیر بارش با رگبارهای قبلی متفاوت است، بنابراین معادله رگرسیونی نیز تغییر خواهد کرد. با توجه به این‌که مقادیر بارش‌ها مستقل از یکدیگر هستند، بنابراین برای مدل‌سازی هر رگبار باید کلیه مراحل مدل‌سازی را تکرار کرد که این امر بسیار وقت‌گیر است. برای حل این مسئله از یک رویکرد جدید به نام نسبت معادلات استفاده شد. بررسی نتایج معادلات رگرسیونی رگبارهای مختلف نشان داد که گرادیان شیب در اکثر معادلات تفاوت زیادی ندارد و تقریباً ثابت است. البته مقادیر عرض از مبدا با توجه به سرشت داده‌ها تغییر می‌کند. لذا انتظار می‌رود مقدار عددی نسبت بارش مکان‌های مشابه در رگبارهای مختلف تقریباً ثابت باشد. بنابراین با داشتن یک معادله رگرسیونی دقیق از یک منطقه و داده‌های آماری حداقل یک ایستگاه، می‌توان نسبت به تخمین مقادیر بارش به صورت یک شبکه منظم، اقدام کرد. همچنین با توجه به مقیاس زمانی داده‌های رگبار ایستگاه مرجع (ایستگاهی که درون حوزه یا نزدیک حوزه است)، می‌توان نقشه‌های رستری در پایه زمانی مشابه مقیاس ایستگاه مرجع تهیه کرد. هرچقدر فاصله زمانی بین داده‌های بارش کمتر باشد، دقت مدل افزایش خواهد یافت. با این روش ویژگی‌های دینامیکی بارش نیز حفظ خواهد شد. لازم به ذکر است با توجه به اهداف مدل‌سازی، مقیاس مکانی داده‌های بارش پیکسل‌های ۱۰×۱۰ متر و مقیاس سری زمانی داده پیکسل‌ها، ۱۰ دقیقه بود. کلیه مراحل مدل‌سازی در محیط برنامه‌نویسی متلب و نمایش گرافیکی آن در محیط GIS انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش

به منظور مدل‌سازی تغییرات مکانی و زمانی بارش از پنج پارامتر پیشنهادی اولیه شامل ارتفاع از سطح دریا (شکل ۱)، درجه شیب، جهت شیب، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی استفاده شد (شکل ۲). جهت انتخاب تعداد و ترکیب بهینه پارامترهای ورودی مدل که یکی از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی است، از روش آزمون گاما استفاده شد. به طور کلی اگر n پارامتر در دسترس باشد، این پارامترها به تعداد $2^n - 1$ حالت می‌توانند با یکدیگر ترکیب شوند. بنابراین پنج پارامتر انتخاب شده در این پژوهش می‌توانند در ۳۱ ترکیب مختلف در کنار یکدیگر قرار بگیرد که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج این جدول نشان می‌دهد که با هر تعداد پارامتری که برای ورودی مدل پیشنهاد می‌شود، چه ترکیب‌هایی می‌تواند حاصل شود. همچنین با توجه به آماره آزمون گاما، انتخاب هر ترکیب در مقایسه با ترکیب‌های دیگر، چه تاثیری در نتایج مدل‌سازی خواهد داشت. همانطور که قبلاً اشاره شد، هرچقدر مقادیر گامای یک ترکیب پارامتری به صفر نزدیک باشد، آن ترکیب نتایج بهتری در مدل‌سازی به دنبال خواهد داشت.



شکل ۲. نقشه رستری پارامترهای پیشنهادی به منظور مدل سازی تغییرات مکانی و زمانی بارش

جدول ۱. نتایج معیارهای انتخاب بهترین ترکیب ورودی برای مدل‌سازی تغییرات مکانی - زمانی بارش (منبع: یافته‌های تحقیق)
(H: ارتفاع از سطح دریا، X: طول جغرافیایی، Y: عرض جغرافیایی، S: شیب، A: جهت شیب)

ردیف	تعداد پارامترها	الگوی ترکیب پارامترها					گاما	گرادیان	نسبت V	ضریب تعیین	خطای مطلق مورد انتظار	اولویت
		H	X	Y	S	A						
۱	۵	۱	۱	۱	۱	۱	۲/۷۳۳۹	۲/۶۴	-۰/۲۹۸۰	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۳۷	۱
۲	۴	۱	۱	۱	۰	۱	۲/۷۳۳۱	۲/۶۲	-۰/۲۹۷۰۴	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۳۱	۱
۳		۱	۱	۱	۱	۰	۲/۷۳۳۹	۲/۶۳	-۰/۲۹۷۱۶	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۳۵	۲
۴		۰	۱	۱	۱	۱	۲/۷۳۶۱	۲/۶۲	-۰/۲۹۷۴۰	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۴۱	۳
۵		۱	۰	۱	۱	۱	۳/۰۲۶۵	۳/۴۶	-۰/۳۲۸۹۷	-۰/۶۷۱	۱/۷۳۹۷	۴
۶		۱	۱	۰	۱	۱	۶/۸۵۵۴	۸/۷۵	-۰/۷۴۵۱۵	-۰/۲۵۴	۲/۶۱۸۳	۵
۷	۳	۱	۰	۱	۰	۱	۲/۷۳۲۸	۲/۶۳	-۰/۲۹۷۱۶	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۳۳	۱
۸		۱	۱	۱	۰	۰	۲/۷۳۶۱	۲/۶۲	-۰/۲۹۷۴	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۴۱	۲
۹		۰	۱	۱	۱	۰	۲/۷۳۷۲	۲/۶۲	-۰/۲۹۷۵	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۴۴	۳
۱۰		۰	۱	۱	۰	۱	۳/۰۲۶۶	۳/۴۶	-۰/۳۲۹۳۲	-۰/۶۷۱	۱/۷۳۹۷	۴
۱۱		۰	۰	۱	۱	۱	۳/۰۲۹۸	۳/۴۷	-۰/۳۲۹۳۳	-۰/۶۷۲	۱/۷۴۰۶	۵
۱۲		۱	۰	۱	۱	۰	۳/۰۳۰۴	۳/۴۶	-۰/۳۲۹۳۹	-۰/۶۷۰	۱/۷۴۰۸	۶
۱۳		۱	۱	۰	۰	۱	۶/۸۵۵۴	۸/۷۵	-۰/۷۴۵۱۵	-۰/۲۵۴	۲/۶۱۸۳	۷
۱۴		۱	۱	۰	۱	۰	۶/۸۶۷۹	۸/۷۴	-۰/۷۴۶۵۲	-۰/۲۵۳	۲/۶۲۰۷	۸
۱۵		۱	۰	۰	۱	۱	۶/۸۶۸۷	۸/۷۲	-۰/۷۴۵۷	-۰/۲۵۲	۱/۷۲۶۷	۹
۱۶		۰	۱	۰	۱	۱	۶/۸۷۹۸	۸/۸۲	-۰/۷۴۷۸	-۰/۲۵۲	۶/۸۷۹۸	۱۰
۱۷	۲	۱	۰	۱	۰	۰	۲/۰۶۹۴	۱/۵۲	-۰/۱۷۰۵۹	-۰/۷۹۳	۱/۵۶۹۴	۱
۱۸		۱	۰	۰	۰	۱	۲/۷۳۷۲	۲/۶۲	-۰/۲۹۷۵۲	-۰/۷۰۲	۱/۶۵۴۴	۲
۱۹		۱	۰	۰	۱	۰	۲/۹۶۲۲	۱/۷۱	-۰/۳۰۵۵	-۰/۷۰۲	۱/۷۱۱۴	۳
۲۰		۱	۱	۰	۰	۰	۳/۰۲۹	۳/۴۷	-۰/۳۲۹۳۳	-۰/۶۷۰	۱/۷۴۰۱	۴
۲۱		۰	۱	۱	۰	۰	۳/۰۳۰۴	۳/۴۶	-۰/۳۲۹۳	-۰/۶۷۰	۱/۷۴۰۸	۵
۲۲		۰	۰	۱	۱	۰	۳/۰۳۳۰	۳/۴۷	-۰/۳۲۹۷۵	-۰/۶۷۰	۱/۷۴۱۷	۶
۲۳		۰	۰	۰	۱	۱	۳/۰۳۳۰	۳/۴۷	-۰/۳۲۹۷۵	-۰/۶۷۰	۱/۷۴۱۷	۷
۲۴		۰	۰	۱	۰	۱	۶/۸۶۸۰	۸/۷۴	-۰/۷۴۶۵۲	-۰/۲۵۳	۲/۶۲۰۰	۸
۲۵		۰	۱	۰	۰	۱	۶/۸۷۹۸	۸/۸۲	-۰/۷۴۷۸۱	-۰/۲۵۲	۲/۶۲۲۹	۹
۲۶		۰	۱	۰	۱	۰	۶/۸۹۲۵	۸/۸۱	-۰/۷۴۹۱۸	-۰/۲۵۰	۲/۶۲۵۳	۱۰
۲۷	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱/۵۸۴۱	۱/۵۲	-۰/۱۷۲۱۸	-۰/۸۲۷	۱/۵۸۴۱	۱
۲۸		۰	۰	۱	۰	۰	۳/۰۳۳۰	۳/۴۷	-۰/۳۲۹۷۵	-۰/۶۷۰	۱/۷۴۰۰	۲
۲۹		۰	۰	۰	۰	۱	۴/۲۴۲۶	۷/۸۶	-۰/۴۶۱۱	-۰/۵۳۸	۲/۰۵۹۰	۳
۳۰		۰	۱	۰	۰	۰	۶/۸۹۲۵	۸/۸۱	-۰/۷۴۹۱۸	-۰/۷۴۹	۲/۶۲۵۴	۴
۳۱		۰	۰	۰	۱	۰	۱۰/۹۷۵	-۱/۳۴	۱/۱۹۲۹	-۰/۱۹۲	۳/۳۱۲۹	۵

در هر تعداد پارامتر (۱ تا ۵)، ترکیب‌ها به ترتیب اولویت یعنی مقدار گامای کمتر مرتب شده‌اند. برای مثال ردیف‌های ۷ تا ۱۶ جدول ۱، اولویت‌های اول تا دهم ترکیب‌هایی است که فقط از سه پارامتر در ترکیب خود استفاده کرده‌اند. با افزایش تعداد پارامترهای ورودی مدل، مقادیر گامای اولین اولویت انتخاب، افزایش می‌یابد، به طوری که کمترین مقدار گاما با ۱/۵۸۴۱ مربوط به اولویت اول استفاده از یک پارامتر و بیشترین مقدار گاما با ۲/۷۳۳۹ متعلق به اولویت اول استفاده از پنج پارامتر است. نتایج دیگر آماره‌های آزمون گاما شامل خطای مطلق

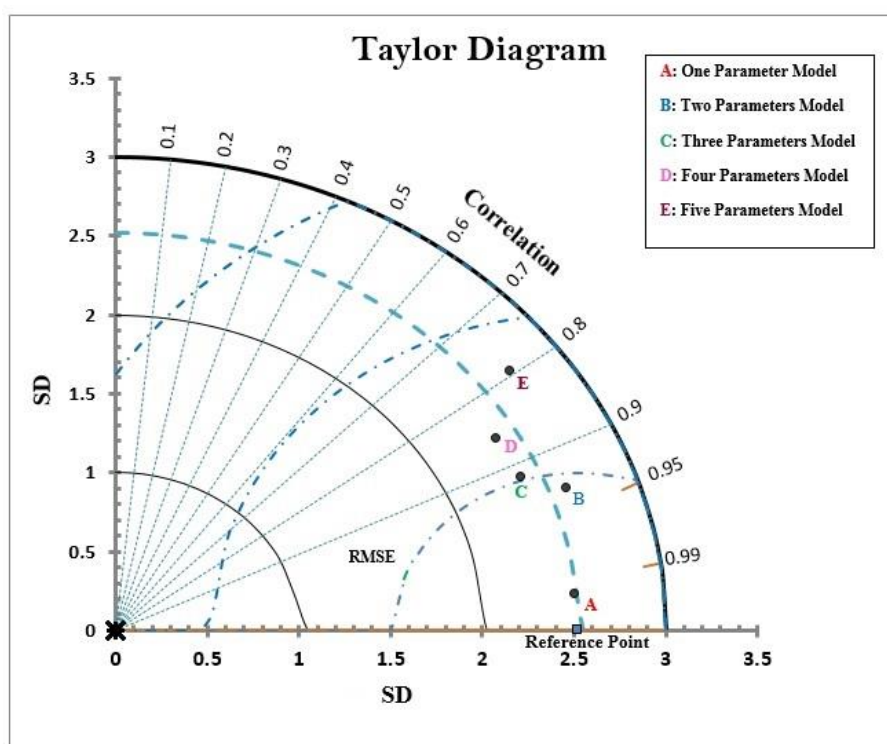
قابل انتظار، گرادیان، ضریب تعیین و شاخص نسبت v نیز در جدول ۱ ارائه شده است. شاخص نسبت v ، اندازه استاندارد شده گاما است و بر اساس آن می‌توان قضاوت مستقلی از بازه خروجی داشت که چه مقدار از این بازه، به خوبی توسط تابع، تخمین زده می‌شود. به بیان دیگر، درجه قابل تخمین بودن خروجی را نشان می‌دهد و هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، خروجی مدنظر با استفاده از این داده‌ها قابل تخمین‌تراست.

در ادامه جهت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در مدل‌سازی، بهترین ترکیب مستخرج از هر تعداد پارامتر مورد استفاده که در مرحله قبل مشخص شده بود، انتخاب و وارد فرآیند مدل‌سازی شد. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، در این پژوهش از معادلات رگرسیونی چند متغیره درجه ۱، ۲ و ۳ استفاده شد و ضرایب پارامترهای معادلات رگرسیونی، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی لونیبرگ - مارکوارت بدست آمد. نتیجه این مدل‌سازی، تعداد ۱۵ مدل رگرسیونی بود که برای ۵ ترکیب پارامتری (هر ترکیب سه مدل) بدست آمد. در ادامه جهت انتخاب بهترین مدل در هر یک از مجموعه پارامترهای مورد استفاده (۱ تا ۵ پارامتر)، با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی R^2 و $RMSE$ ، بهترین مدل انتخاب شد. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول، استفاده از مدل رگرسیون درجه سه برای استفاده از یک پارامتر، مدل رگرسیون درجه دو برای استفاده از ۲ و ۳ پارامتر و مدل رگرسیون خطی برای استفاده از تعداد ۴ و ۵ پارامتر، به عنوان بهترین مدل‌ها انتخاب شدند.

جدول ۲. نتایج انتخاب بهترین مدل رگرسیونی در هر یک از مجموعه پارامترهای مورد استفاده با استفاده از معیارهای ارزیابی مدل (منبع: یافته‌های تحقیق)

مدل برگزیده	ضریب تعیین	ریشه میانگین مربعات خطا	نوع مدل	تعداد پارامتر استفاده شده	ردیف
معادله درجه ۳	۰/۹۱۲	۰/۴۳۶۹	خطی	۱	۱
	۰/۹۸۹	۰/۳۴۳۳	درجه دو	۱	۲
	۰/۹۹۶	۰/۱۴۶۸	درجه سه	۱	۳
معادله درجه ۲	۰/۹۰۷	۰/۴۴۴۸	خطی	۲	۴
	۰/۹۱۷	۰/۲۲۷۷	درجه دو	۲	۵
	۰/۸۵۲	۰/۴۶۵۳	درجه سه	۲	۶
معادله درجه ۲	۰/۸۶۹	۰/۴۵۴۸	خطی	۳	۷
	۰/۹۳۹	۰/۳۳۴۱	درجه دو	۳	۸
	۰/۰۳۷	۹۰۷۳	درجه سه	۳	۹
معادله خطی	۰/۸۶۴	۰/۴۷۶۹	خطی	۴	۱۰
	۰/۷۷۳	۰/۵۳۷۲	درجه دو	۴	۱۱
	-۰/۰۴۳	-۲۱۴۳	درجه سه	۴	۱۲
معادله خطی	۰/۷۹۵	۰/۴۳۸۰	خطی	۵	۱۳
	۰/۱۳۶	۲۵۷۲	درجه دو	۵	۱۴
	۰/۵۳۴	۰/۶۹۱۲	درجه سه	۵	۱۵

جهت انتخاب بهترین یا بهینه‌ترین مدل از میان ۵ مدل انتخاب شده و مقایسه مدل‌ها با یکدیگر، از آنجا که در بعضی از معیارهای ارزیابی مدل، همسویی مشاهده نشد، برای حل این مسئله از دیاگرام تیلور استفاده شد (شکل ۳). همانطور که در این دیاگرام نشان داده شده است، هرچه نقاط متناسب به مدل‌ها به نقطه رفرنس با مختصات $(0,SD)$ نزدیکتر باشد، آن مدل از کارایی بیشتری برخوردار است. با توجه به دیاگرام تیلور بهترین مدل مربوط به مدل رگرسیونی یک پارامتره و بعد از آن مدل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ پارامتره به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.



شکل ۳. دیاگرام تیلور برای ارزیابی مدل‌های چند متغیره رگرسیونی (منبع: یافته‌های تحقیق)

بنابراین با توجه به دیاگرام تیلور مدل رگرسیونی یک پارامتره درجه ۳، به عنوان بهترین مدل معرفی شد و برای مثال نقشه رستری توزیع مکانی بارش یکی از رگبارها (۱۴۰۰/۰۹/۲۳) ترسیم شد که در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مقادیر بارش بین ۴۱/۱۹ تا ۸۰/۲۸ میلی‌متر تغییر می‌کند. بیشترین مقدار بارش مربوط به نواحی جنوبی و کمترین مقدار بارش مربوط به نواحی شرقی حوزه است. با بررسی نقشه مدل ارتفاعی رقومی منطقه، مشخص شد که در جنوب حوزه و در یک فاصله چند صد متری، به سبب تغییرات شدید ارتفاع، بیش از ۲۰ میلی‌متر تغییرات بارش ناگهانی داریم که به نظر می‌رسد شاهد اغراق در نتایج باشیم. بنابراین به دلیل عدم اطمینان از دقت مدل، از مدل رگرسیونی دو پارامتره که در رتبه بعدی قرار داشت، استفاده کردیم.

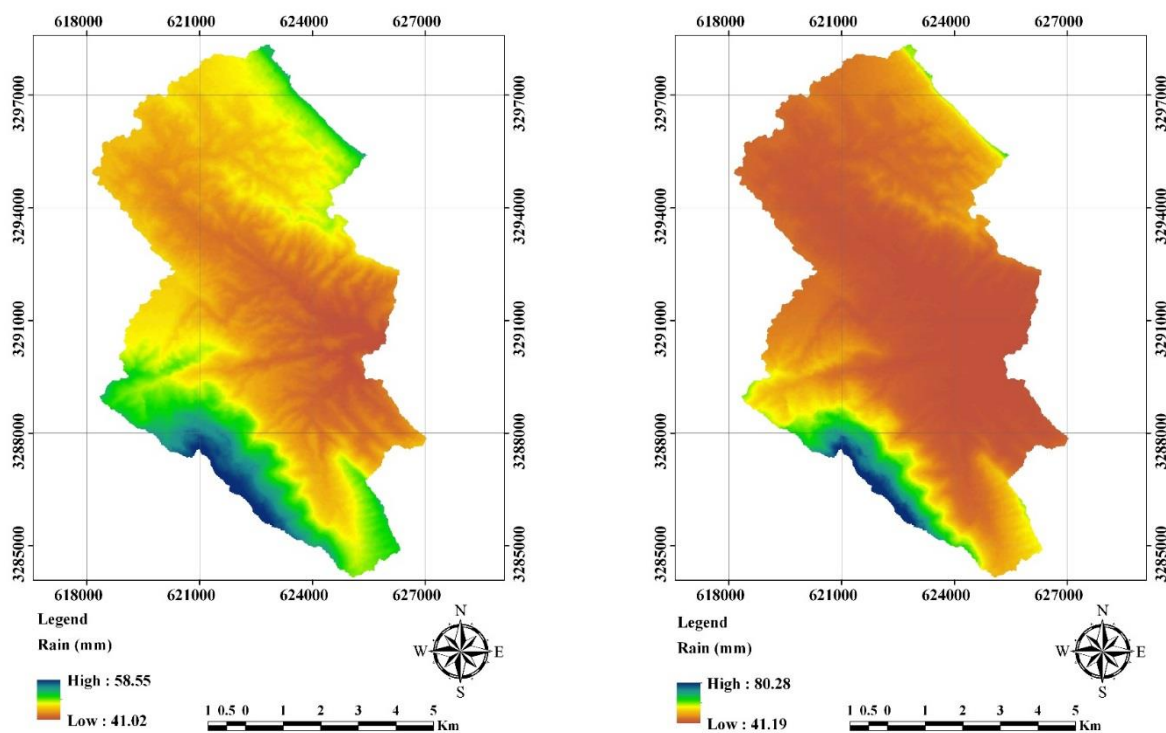
نتایج مدل‌سازی با استفاده از پارامترهای ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی با توجه به داده‌های همان رگبار قبلی (۱۴۰۰/۰۹/۲۳) در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، مقادیر بارش بین ۴۱/۰۲ تا ۵۸/۵۵ میلی‌متر متغیر است و توزیع مقادیر بارش دقیقاً شبیه نقشه قبلی است.

بررسی نمودار تغییرات بارش سالیانه چهار ایستگاه باران‌سنجی نشان داد که مقادیر بارش هر ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها، در سال‌های مختلف آماری تقریباً ثابت است (شکل ۶). لذا انتظار می‌رود این نسبت، علاوه بر ایستگاه‌های باران‌سنجی، برای دیگر نقاط حوزه آبخیز نیز صادق باشد. بنابراین با توجه به معادله زیر، مقدار بارش برای هر پیکسل در پایه زمانی ایستگاه مرجع (ایستگاه مارون) بدست می‌آید:

$$P_{x_i} = P_s \frac{f(x,y,\dots)_i}{f(x,y,\dots)_s} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

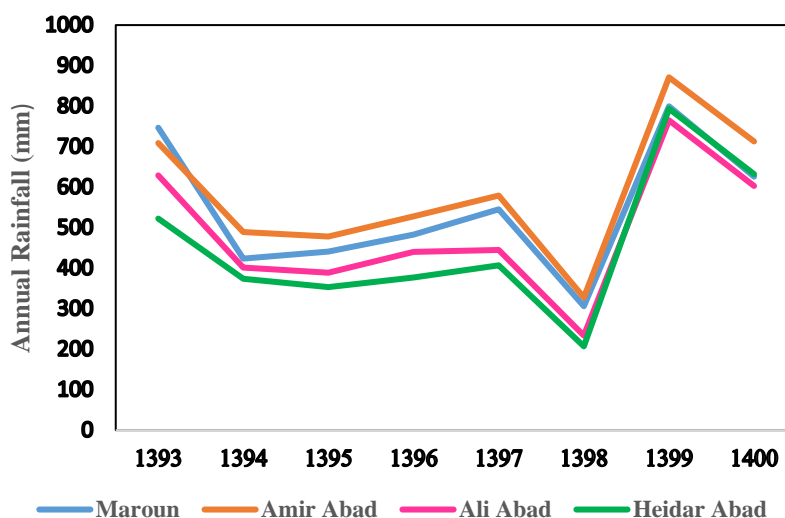
که در آن P_{x_i} مقدار بارش در پیکسل i و در پایه زمانی ایستگاه مرجع، P_s مقدار بارش در ایستگاه مرجع و $\frac{f(x,y,\dots)_i}{f(x,y,\dots)_s}$ نسبت مقدار بارش در پیکسل i به مقدار بارش در ایستگاه مرجع با توجه به مدل رگرسیونی انتخاب شده. لازم به ذکر است که سری زمانی بارش در

ایستگاه مارون در پایه زمانی حداقل یک دقیقه قابل دسترس است. به عبارت دیگر تهیه نقشه های رستری با مقیاس زمانی یک دقیقه و بیش از آن در منطقه مورد مطالعه امکان پذیر است.



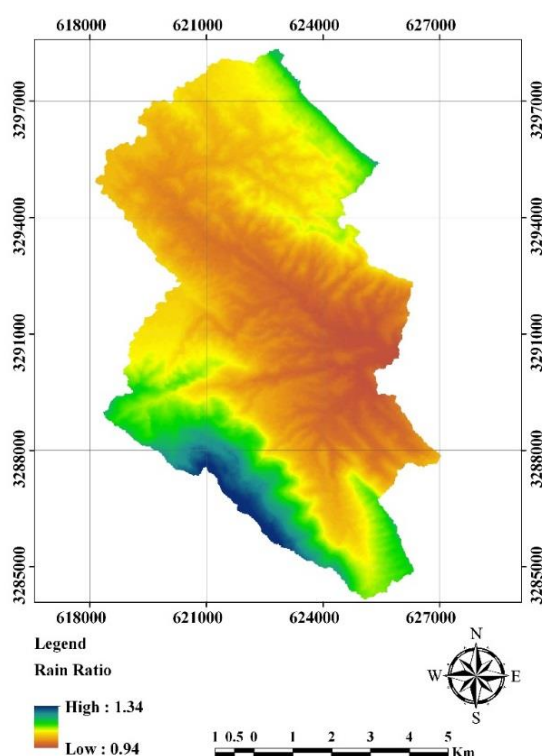
شکل ۵. نقشه توزیع مکانی یک رگبار انتخابی با استفاده از مدل رگرسیونی دو پارامتره (ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی) درجه دو

شکل ۴. نقشه توزیع مکانی یک رگبار انتخابی با استفاده از مدل رگرسیونی تک پارامتره (ارتفاع از سطح دریا) درجه سه



شکل ۶. نمودار تغییرات بارش سالیانه چهار ایستگاه باران‌سنجی (۱۳۹۳-۱۴۰۰)

با توجه به اینکه هدف از پژوهش حاضر تهیه نقشه رستری تغییرات مکانی و زمانی بارش منطقه مورد مطالعه در پایه زمانی ۱۰ دقیقه بود، لذا به منظور عدم تکرار مراحل مدل سازی برای رگبار جدید و همچنین برای سهولت در محاسبات آتی، نسبت بارش هر پیکسل به پیکسل مرجع که در معادله (۱۳) استفاده شد، به صورت یک نقشه رستری تهیه شد (شکل ۷). با ضرب مقدار بارش ایستگاه باران سنجی در پایه زمانی t دقیقه، می توان نقشه رستری تغییرات مکانی بارش را در پایه زمانی t دقیقه بدست آورد. در پایان، با برنامه نویسی در محیط متلب، قابلیت تولید سری زمانی نقشه های رستری بارش در پایه زمانی ۱۰ دقیقه و در طول رگبار مورد نظر و در مقیاس مکانی هر پیکسل (10×10 متر)، به صورت ماتریس های سه بعدی ایجاد شد. بدین ترتیب خروجی این مدل می تواند به عنوان ورودی مدل های بارش - روانابی که ساختار دینامیکی و توزیعی دارند، قابل استفاده باشد.



شکل ۷. نقشه رستری نسبت بارش هر پیکسل به پیکسل مرجع (ایستگاه باران سنجی مارون)

۴. بحث و نتیجه گیری

با توجه به توسعه مدل های توزیعی بارش-رواناب، افزایش تقاضا برای داده های بارش، خصوصاً مدل های توزیعی-دینامیکی بارش به سبب وجود حوزه های فاقد آمار و یا نبود شبکه منظمی از داده های بارش، قابل توجه است. صرف نظر از اینکه از چه مدلی برای برآورد بارش استفاده می شود، انتخاب پارامترهای مهم و تاثیرگذار در مدل سازی یکی از اصول اولیه است. مطالعه منابع مختلف نشان داد که پارامترهای تاثیرگذار در مدل سازی بارش بسیار متنوع بوده و در پژوهش های مختلف، نتایج متفاوتی را به دنبال داشته است. لذا توصیه یک نسخه واحد برای حوزه های مختلف، نتایج قابل قبولی را به همراه نخواهد داشت.

نتایج انتخاب پارامترهای مدل سازی بارش که با استفاده از نرم افزار WinGamma™ انجام شد، نشان می دهد که اگر هدف، استفاده از یک پارامتر به عنوان ورودی مدل باشد، استفاده از پارامتر ارتفاع از سطح دریا می تواند انتخاب خوبی باشد. پارامترهای عرض جغرافیایی،

جهت و طول جغرافیایی در اولویت‌های بعدی قرار دارند. نامناسب‌ترین انتخاب می‌تواند پارامتر شیب باشد. نتایج بسیاری از مطالعات در ایران و جهان نشان می‌دهد که ارتفاع از سطح دریا مهم‌ترین پارامتر مورد استفاده در مدل‌سازی بارش است. در این زمینه می‌توان به نتایج مطالعات مجرد و مرادی فر (۲۰۰۳)، لوکاس و کوئیک^۱ (۱۹۹۶) و سینگ و کومار^۲ (۱۹۹۷) اشاره کرد. البته گزارشاتی هم ارائه شده است که نتیجه کاملاً متفاوتی دارد. علیجانی و زاهدی (۲۰۰۲) در نتایج پژوهش خود بیان می‌کند که رابطه بارش با ارتفاع از سطح دریا در برخی مناطق معنی دار نبوده و پارامتر طول جغرافیایی می‌تواند بیشترین تاثیر را داشته باشد.

در استفاده از دو پارامتر به عنوان ورودی مدل، ترکیب پارامترهای ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی به عنوان اولویت اول و ترکیب پارامترهای شیب و طول جغرافیایی به عنوان آخرین اولویت معرفی شدند. زاهدی و همکاران (۲۰۰۷) بیان داشتند که بارش با ترکیب پارامترهای ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی رابطه معنی‌داری جهت مدل‌سازی بارش دارند. هوتون (۱۹۷۹) در نتایج پژوهش خود به این نتیجه رسید که ترکیب پارامترهای ارتفاع از سطح دریا و جهت شیب برای مدل‌سازی بارش معنی‌دار است. اگر بخواهیم از ترکیب سه پارامتر برای مدل‌سازی استفاده کنیم، ترکیب پارامترهای ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی و جهت شیب به عنوان بهترین ترکیب و ترکیب پارامترهای شیب، طول جغرافیایی و جهت شیب به عنوان یک ترکیب نامناسب برای مدل‌سازی بارش معرفی شد. باروتی و همکاران (۲۰۲۰) ترکیب ارتفاع از سطح دریا، طول و عرض جغرافیایی و استور و فرگوسن (۱۹۷۲) ارتفاع از سطح دریا، زاویه شیب و جهت ناهمواری را به عنوان ترکیب مناسب برای مدل‌سازی بارش معرفی می‌کنند. پارامترهای ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی، جهت و طول جغرافیایی به عنوان بهترین ترکیب متشکل از چهار پارامتر و ارتفاع از سطح دریا، طول جغرافیایی، شیب و جهت به عنوان آخرین اولویت معرفی شدند. در ترکیب پنج پارامتر هم ناگزیر از ترکیب تمام پارامترها یعنی ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی، جهت، طول جغرافیایی و شیب استفاده شد. عساکره و سیفی‌پور (۲۰۱۳) و بلیانی (۲۰۱۷) در مدل‌سازی بارش، دقیقاً از ترکیب همین پارامترها استفاده کردند.

از مطالب فوق اینگونه برداشت می‌شود که در مدل‌سازی بارش با استفاده از یک پارامتر، بیشتر منابع علمی بر اهمیت پارامتر ارتفاع از سطح دریا تاکید دارند. با توجه به اینکه هر حوزه آبخیز دارای ویژگی‌های محیطی (اقلیمی، توپوگرافی، ...) متفاوتی نسبت به سایر حوزه‌ها است، لذا در هر حوزه، میزان اهمیت هر یک از پارامترهای موثر بر بارش، متفاوت است. بنابراین در مدل‌هایی که در ساختار آن‌ها بیش از یک پارامتر استفاده می‌شود، شاهد تنوع بیشتری در ترکیب داده‌ها هستیم.

بعد از انتخاب بهترین ترکیب هر مجموعه پارامتر، مدل‌های رگرسیونی چند متغیره درجه یک، دو و سه مدل شده و در ادامه با استفاده از معیارهای ارزیابی مدل و نمودار تیلور، اولویت استفاده از مدل‌های رگرسیونی مشخص شد (Khalighi Sigaroodi and Chen, 2016). اولین اولویت، استفاده از مدل درجه سه بود که برای تخمین بارش از پارامتر ارتفاع از سطح دریا استفاده می‌کرد. نتیجه که به صورت نقشه رستری تهیه شده بود حاکی از آن بود در مناطقی که تغییرات ناگهانی ارتفاع داریم، شاهد برآورد بیش از حد بارش هستیم. با توجه به اینکه در این مدل از معادله رگرسیونی درجه سه استفاده می‌شد، با افزایش پارامتر ارتفاع از سطح دریا به عنوان متغیر مستقل، چون این مقدار به توان می‌رسد، لذا برای مقادیر ارتفاعی که در محدوده خارج از داده‌های مشاهداتی قرار دارند، می‌تواند خطا ایجاد کرده و بسیار بیشتر از مقدار منطقی برآورد شود. بنابراین به نظر می‌رسد علی‌رغم برتر بودن معادله یک پارامتره درجه سه، بهتر است به جای استفاده از این مدل، از مدل دو پارامتره درجه دو که در جایگاه بعدی قرار دارد، استفاده شود. لذا از مدل رگرسیونی درجه دو متشکل از پارامترهای ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی برای برآورد بارش استفاده شد که نتایج مطلوب‌تری به دنبال داشت. البته توزیع نسبی مکانی بارش تقریباً مشابه نقشه قبلی بود، با این تفاوت که به علت حضور پارامتر عرض جغرافیایی، تغییرات مقادیر بارش با تغییرات ارتفاعی، کمی تعدیل شده است. از آنجا که استفاده از مدل‌های رگرسیونی کاملاً وابسته به سرشت داده‌ها است، لذا با تغییر داده‌ها، مدل‌های رگرسیونی نیز تغییر می‌کند. بنابراین با توجه به ماهیت تغییر پذیری مکانی و زمانی بارش، تغییر مدل‌های رگرسیونی بارش در بعد مکان و زمان دور از ذهن نخواهد

¹ Loukas and Quick

² Singh and Kumar

بود. اما باید توجه داشت که در بسیاری از بارش‌ها، توزیع نسبی بارش یک نقطه به نقطه دیگر تقریباً ثابت است. به بیان ریاضی، در حوزه‌های کوچک نسبت بارش در نقطه A به نقطه B در بارش‌های مختلف، تقریباً ثابت است. البته یادآور می‌شود که اگر فاصله بین دو نقطه خیلی زیاد باشد، به واسطه تاثیر عوامل ثانوی از جمله جهت حرکت ابرهای باران‌زا، این نسبت می‌تواند تغییر کرده که این رخداد بیشتر در حوزه‌های با وسعت خیلی زیاد اتفاق می‌افتد. موضوع ثبات تقریبی بارش نقاط مختلف نسبت به یک نقطه، یکی از نکات کلیدی این پژوهش بود که در مدل‌سازی بارش استفاده شد. در واقع با در اختیار داشتن مدل دقیق رگرسیونی یک منطقه و داده‌های بارش حداقل یک ایستگاه، مقادیر بارش را در پیکسل‌های مجاور ایستگاه به صورت یک شبکه منظم برآورد کنیم که نتیجه، مدل توزیعی بارش خواهد بود. لازم به ذکر است که مقیاس سری زمانی داده‌ها وابسته به مقیاس سری داده‌های بارش در ایستگاه مرجع است. در پایان پیشنهاد می‌شود از مدل ارائه شده در این پژوهش در مناطق مختلف ایران استفاده شده و نتایج مورد بررسی قرار گیرد.

References

- Alijani, B., & Zahedi, M. (2002). Statistical and synoptic analysis of Azarbaijan area rainfall. *Iranian Journal of Research in Geography*, 65, 202-217. (In Persian).
- Asakereh, H., & Seifipour, Z. (2013). Spatial modeling of annual precipitation in Iran. *Geography and development*, 10(29), 6-9. (In Persian).
- Ayoubi Ayoublu, S., Vafakhah, M., & Pourghasemi, H. (2022). Flood Risk Assessment using Multi-Criteria Decision-Making Models (MCDM) and Data Mining Methods (Case Study: Shiraz District 4). *Journal of Water and Soil Science*, 26 (3), 247-265. (In Persian).
- Balyani, S. (2017). Spatial analysis of annual precipitation of khuzestan province; an approach of spatial regressions analysis. *Journal of geographical sciences*, 16(43), 125-147. (In Persian).
- Barooti, H., Esmaili, K., & Ghahraman, B. (2020). Stochastic simulation of daily rainfall using generalized linear models in semiarid simulation of rainfall. *Journal of Climate Research*, 1398(37), 1-20. (In Persian).
- Besalatpour, A. A., Hajabbasi, M. A., & Ayoubi, Sh. (2013). Use of Gamma test technique for choosing the optimum input variables in modeling of soil shear strength using artificial neural networks. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(1), 97-114. (In Persian).
- Callau Poduje, A. C., & Haberlandt, U. (2017). Short time step continuous rainfall modeling and simulation of extreme events. *Journal of Hydrology*, 552, 182-197.
- Chow, T. T., Long, H., Mok, H. Y., & Li, K. W. (2011). Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables. *Energy and Building Journal*, 43, 3568-3575.
- Ghayur, H. A., & Masoudiyan, S. A. (1996). An spatial analysis of elevation – precipitation models (Case study: Iran). *Geographic Researches*, 41, 124-143. (In Persian).
- Gill, P. R., Murray, W., & Wright, M. H. (1981). *The Levenberg-Marquardt Method*. §4.7.3 in *Practical Optimization*. London, Academic Press.
- Gleckler, P. J., Taylor, K. E., & Doutriaux, C. (2008). Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6), 1-20.
- Houghton, J. G. (1979). A Model for Orographic Precipitation in the North-Central Great Basin. *Monthly Weather Review*, 107, 1462-1475.
- Levenberg, K. (1944). A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. *Quarterly Applied Mathematics*, 2, 164-168.
- Loukas, A., & Quick, M. C. (1996). Effect of climate change on hydrologic regime of two climatically different watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(2), 77-87.
- Marquardt, D. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11, 431-441.
- Masoodian, S. A., Keikhosravi Kiany, M. S., & Rayat Pische, F. (2014). Introduction and a comparison among gridded precipitation database of asfazari with GPCP, GPCP and CMAP. *Geographical research*, 29(1), 73-87. (In Persian).
- Moghaddamnia, A., Ghafari Gousheh, M., Piri, J., Amin, S., & Han, D. (2009). Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive Neurofuzzy inference system techniques. *Advances in Water Resources*, 32(1), 88-97.

- Mojarad, F., & Moradifar, H. (2003). Modelling the Relation of Precipitation with Elevation in the Zagros Region. *Modarres Human Sciences*, 7(2), 163-182. (In Persian).
- Mouneskah, V., Khaledi Alamdari, M., Hadi, M., & Samadianfard, S. (2023). Comparison of the efficiency of intelligent and statistical methods in the reconstruction of sunshine hours data (Case study: East of Urmia Lake basin). *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(2), 28-36. (In Persian).
- Nouri, M., & Salmasi, F. (2019). Predicting seepage of earth dams using artificial intelligence techniques. *Irrigation Sciences and Engineering (scientific journal of agriculture)*, 42(1), 83-97. (In Persian).
- Panahi, H., Asadi, S. (2018). Prediction of Nano-Droplet Spreading on the Surface using the Multivariate Non-Linear Regression. *Advanced Materials and New Coatings*, 7(26), 1881-1886. (In Persian).
- Papailiou, I., Spyropoulos, F., Trichakis, I., & Karatzas, G.P. (2022). Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression for Filling in Missing Daily Rainfall Data. *Water*, 14(18), 2892. <https://doi.org/10.3390/w14182892>.
- Pourgholam-Amiji, M., Ahmadaali, K., & Liaghat, A. (2021). Sensitivity Analysis of Parameters Affecting the Early Cost of Drip Irrigation Systems Using Meta-Heuristic Algorithms. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(4), 737-756. (In Persian).
- Sigaroodi, S. K., Chen, Q. (2016). Effects and consideration of storm movement in rainfall-runoff modelling at the basin scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, 20-5063-2016.
- Sigaroodi, S. K., Chen, Q., Ebrahimi, S., Nazari, A., and Choobin, B. (2014). Long-term precipitation forecast for drought relief using atmospheric circulation factors: a study on the Maharloo Basin in Iran, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 1995-2006.
- Singh, P., & Kumar N., (1997). Effect of orographic precipitation in the western Himalayan region. *Journal of Hydrology*, 199(2), 183-206.
- Storr, D., & Ferguson, H. L. (1972, July). *The distribution of precipitation in some mountainous Canadian watersheds*, Paper presented in WMO Symposium on Distribution of Precipitation in Mountainous Areas, Geilo, Norway.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 (D7), 7183-7192.
- Withmore, J. S. (1972). The variation of mean annual rainfall with altitude and locality in South Africa, as determined by multiple curvilinear regression analysis, *Distribution of precipitation in mountainous area*, WMO Publication, 326.
- Zahedi, M., Sari Sarraf, B., & Jamee, J. (2007). The Analysis of Spatio-Temporal Variations of Temperature in the North -West of Iran. *Geography and development*, 10, 183-198. (In Persian).

