Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems

Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Evaluation of climate change impact on runoff potential in Kashmar urban watershed

Kowsar Hemmatjo[2], Hadi Memarian [*1], Javad Chezgi [3], Javad Momeni Damaneh[4]

1. Former M.Sc. Student, Department of Natural Resources, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: kosar.hematjo@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: chezgi@birjand.ac.ir
4. Former Ph.D. Student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: j.momenidamaneh.phd@hormozgan.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

Article history

Received: 20 May 2025

Revised: 22 July 2025

Accepted: 31 July 2025

Published online: 05 August 2025

Keywords:

Climate Modeling, Ecosystem Sustainability, General Circulation Model (GCM), Barlow Method, Downscaling, Emission Scenarios.

ABSTRACT

Urban watersheds in arid and semi-arid regions are at the forefront of water management challenges due to their inherent vulnerability from limited precipitation and the dual pressures of climate change and human development. The Kashmar urban watershed, with a low annual average rainfall of approximately 205 mm and physiographic characteristics prone to rapid runoff generation, is a prime example of such sensitive systems, yet a quantitative assessment of its hydrological response to future climate scenarios has been lacking. The primary objective of this research is to fill this knowledge gap by quantifying the potential impacts of climate change on surface runoff generation potential in this basin and identifying its most vulnerable sub-basins. To this end, four General Circulation Models (GCMs) were first evaluated, and the optimal IPSL-CM5A-MR (R^2=0.56) model was selected. Precipitation data from this model under RCP emission scenarios for the future period (2020-2100) were then extracted and downscaled using the BCSD method. Subsequently, surface runoff volume was estimated using the empirical Barlow method, which is based on the classification of the basin's physical characteristics and daily rainfall intensity. Trend analysis was performed using the Mann-Kendall test. The results revealed a decreasing (though statistically non-significant) trend in annual precipitation for most scenarios, particularly the pessimistic RCP8.5 scenario, under which the reduction reaches approximately 41 mm in the far-future period (2070-2100). This significant drop in the system's input will lead to a sharp decline in runoff generation potential; projections for the RCP8.5 scenario indicate a runoff volume decrease of 16.7% in the near-future (2020-2038) and up to 29.1% in the far-future (2070-2100). The spatial vulnerability analysis identified sub-watershed A, with an area of 6588 ha and a predominance of Type E lands (steep slopes), as the most vulnerable part of the watershed to future changes. In conclusion, the findings confirm the high sensitivity of the Kashmar watershed's surface water resources to climate change. The projected runoff reduction poses a serious threat to the region's water and food security. While acknowledging the inherent uncertainties in modeling, this study, as the first quantitative estimate for the watershed, underscores the urgent need for a fundamental revision of water resource management approaches and the development of effective, evidence-based adaptation strategies.

Citation: Hemmatjo, K., Memarian H., Chezgi, J., & Momeni Damaneh, J. (2025). Evaluation of climate change impact on runoff potential in Kashmar urban watershed. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, *13*(2), 83-100.
DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7

Publisher: Iranian Rainwater Catchment Systems Association © Author(s)

***Corresponding author:** Hadi Memarian
Address: Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
Tel: +989155320032
Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Evaluation of Climate Change Impact on Runoff Potential in Kashmar Urban Watershed

Kowsar Hemmatjo [2], Hadi Memarian[*1], Javad Chezgi[3], Javad Momeni Damaneh[4]

1. Former M.Sc. Student, Department of Natural Resources, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: kosar.hematjo@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: chezgi@birjand.ac.ir
4. Former Ph.D. Student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: j.momenidamaneh.phd@hormozgan.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Water, a vital natural resource, is crucial for sustaining ecosystems and human societies. Climate change, driven by human activities like fossil fuel overuse and land-use changes, significantly impacts the hydrological cycle and global water distribution, leading to variations in rainfall, increased temperatures, and altered surface flows, thus affecting water availability. Runoff, a key part of this cycle, is sensitive to climate change, with altered patterns causing widespread issues for water management and environmental planning. In arid regions like Iran with limited water resources, studying climate change's impact on runoff is critical. This 21st-century challenge requires thorough investigation, especially in urban areas vulnerable due to urbanization and land-use changes. Altered rainfall and rising temperatures can change runoff volume, cause flash floods, and affect urban water supply. The Kashmar urban catchment, with low average rainfall, is susceptible to these changes. This research investigates climate change's impact on its runoff using the physically-based Barlow method for accuracy and regional statistical methods, comparing them to improve understanding of runoff patterns under climate change for better water management. While many studies examine climate change's effect on runoff, few combine regional rainfall-runoff and Barlow methods in arid urban areas. This study evaluates climate change's effect on runoff harvesting in Kashmar by combining these methods. The Barlow method is chosen for its simplicity and accuracy in urban areas. This research innovatively integrates downscaled climate model data with the Barlow method to predict future runoff changes, helping identify critical areas for urban water management and adaptation strategies.

Methodology: The study area encompasses three hydrological sub-watersheds located upstream of the city of Kashmar, covering a total area of 12,239.8 hectares. It is characterized by a semi-arid to arid climate and diverse topography. The region exhibits a wide range of elevations, with most areas featuring steep to very steep slopes and a dominant southerly aspect. Land use is primarily composed of poor rangelands (53.19 percent) and rocky areas (44.58 percent), with the underlying geology mainly consisting of low-permeability stony units. The research methodology involved the extraction and evaluation of climate model data from CMIP5 via the ESGF database for both the historical period (1989–2005) and the future period (2020–2100), focusing on four selected models: GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, and NorESM1-M. The performance of these models was assessed using statistical metrics including the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and correlation coefficient (R). Greenhouse gas emission scenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5 were employed for analysis across four future time horizons (near, mid-first, mid-second, and far). Precipitation data were downscaled using the statistical Bias Correction and Spatial Disaggregation (BCSD) method, and runoff was estimated using the Barlow method, based on the physical characteristics of the sub-watersheds and daily precipitation classifications. The projected precipitation and

***Corresponding author:** Hadi Memarian
Address: Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
Tel: +989155320032
Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

estimated runoff data were prepared for statistical analysis. The performance of the climate models in simulating historical data was evaluated using statistical indicators, and trends in precipitation and runoff changes across different time periods under the RCP scenarios were analyzed using the non-parametric Mann-Kendall test. The presence of autocorrelation in the time series was examined using autocorrelation functions (ACF) and partial autocorrelation functions (PACF), and if detected, its effects were removed using the Hamed and Rao method.

Results and Discussion: The results of the climate model performance evaluation indicated that the IPSL-CM5A-MR model demonstrated the best performance in simulating the historical precipitation of the study area, with the highest correlation coefficient (0.56) and coefficient of determination (0.72). The analysis of the annual precipitation trend using the Mann-Kendall test revealed that in the near-future period (2020-2038), there is an increasing trend under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, and a decreasing trend under RCP4.5 and RCP6 scenarios. A similar trend was observed in the mid-future period (2039-2069). In the far-future period (2070-2100), the RCP2.6 scenario showed an increasing trend, while the other scenarios indicated a decreasing trend. The analysis of the annual precipitation trend for the entire projected period (2020-2100) showed that most scenarios exhibit a decreasing trend in precipitation, although this decrease is not statistically significant at the five percent confidence level. The estimation of runoff volume using the Barlow method indicated that sub-watershed A has a higher potential for runoff generation due to its larger area of steep-sloped and low-permeability land. In the near-future period (2020-2038), an increase in runoff is projected under RCP2.6, RCP4.5, and RCP6 scenarios, while a decrease is expected under the RCP8.5 scenario. In the mid-future period (2039-2069), only the RCP2.6 scenario shows an increase, while the other scenarios indicate a decrease. In the far-future period (2070-2100), the decreasing trend intensifies across all scenarios. The results obtained from the Barlow method show a reasonably good agreement with the actual conditions of the study area, considering the local and hydrological characteristics of the region.

Conclusion: The findings of the present research indicate that the phenomenon of climate change plays a significant role in altering the surface runoff in the Kashmar urban watershed. The analysis of various greenhouse gas emission scenarios reveals that fluctuating climatic factors, particularly a potential decrease in precipitation across most scenarios, could lead to a reduction in future runoff. Due to its consideration of the watershed's physical characteristics and rainfall categorization, the Barlow method proves to be a suitable tool for estimating runoff in this region. The results of this study underscore the critical importance of seriously considering the phenomenon of climate change and its implications for water resources in the Kashmar region, highlighting the necessity for precise planning and the adoption of effective adaptation strategies to ensure sustainable water resource management.

Ethical Considerations

Data availability statement: The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Funding: This research, in the form of a master's thesis, was financially and spiritually supported by the University of Birjand.

Authors' contribution: Kowsar Hemmatjo as student and first author, Hadi Memarian as supervisor and corresponding author, and other individuals as consulting professors.

Conflicts of interest: The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Acknowledgment: We hereby express our gratitude and appreciation for the financial and spiritual support of University of Birjand.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید رواناب در حوزه آبخیز شهری کاشمر

کوثر همت‌جو [۱]، هادی معماریان خلیل آباد [۲*]، جواد چزگی [۳]، جواد مومنی دمنه [۴]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.kosar.hematjo@gmail.com

۲. دانشیار و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. hadi_memarian@birjand.ac.ir

۳. دانشیار، عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.chezgi@birjand.ac.ir

۴. دانش‌آموخته دکتری، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. j.momenidamaneh.phd@hormozgan.ac.ir

مشخصات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۴
بازنگری: ۳۱ تیر ۱۴۰۴
پذیرش: ۰۹ مرداد ۱۴۰۴
انتشار برخط: ۱۴ مرداد ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:
مدل‌سازی اقلیمی، پایداری بوم‌سازگان، مدل گردش عمومی جو، روش بارلو، ریز مقیاس‌نمایی، سناریوهای انتشار

چکیده

حوزه‌های آبخیز شهری در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل آسیب‌پذیری ذاتی ناشی از کمبود بارش و فشارهای دوگانه تغییر اقلیم و توسعه انسانی، در خط مقدم چالش‌های مدیریت منابع آب قرار دارند. حوزه آبخیز شهری کاشمر، با متوسط بارش سالانه حدود ۲۰۵ میلی‌متر و ویژگی‌های فیزیوگرافیکی مستعد تولید رواناب سریع، نمونه‌ای بارز از این سیستم‌های حساس است که ارزیابی کمی پاسخ هیدرولوژیکی آن به سناریوهای اقلیمی آتی تا کنون انجام نشده است. هدف اصلی این پژوهش، پر کردن این خلأ تحقیقاتی از طریق کمی‌سازی اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید رواناب سطحی در این حوزه و شناسایی زیرحوزه‌های آبخیز با بیشترین آسیب‌پذیری است. در این راستا، ابتدا عملکرد چهار مدل گردش عمومی جو (GCMs) ارزیابی و مدل بهینه IPSL-CM5A-MR (R^2=0.56) انتخاب شد. سپس داده‌های بارش این مدل تحت سناریوهای انتشار RCPs برای دوره آتی (۲۰۲۰–۲۱۰۰) استخراج و با روش BCSD ریزمقیاس شد. در مرحله بعد، حجم رواناب سطحی با استفاده از روش تجربی بارلو، که بر پایه طبقه–بندی ویژگی‌های فیزیکی حوزه و شدت بارش روزانه استوار است، برآورد شد. تحلیل روند تغییرات نیز با آزمون من–کندال انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که بارش سالانه در اکثر سناریوها، به ویژه سناریوی بدبینانهRCP8.5 ، دارای روند کاهشی (هرچند از نظر آماری غیرمعنادار) است که در دوره دور (۲۰۷۰–۲۱۰۰) این کاهش به حدود ۴۱ میلی‌متر می‌رسد. این افت محسوس در ورودی سیستم، منجر به کاهش شدید پتانسیل تولید رواناب خواهد شد؛ به‌طوری‌که برآوردها برای سناریویRCP8.5 ، کاهش حجم رواناب به میزان ۷/۱۶ درصد در دوره نزدیک (۲۰۲۰–۲۰۳۸) و تا ۱/۲۹ درصد در دوره دور (۲۰۷۰–۲۱۰۰) را پیش‌بینی می‌کند. تحلیل مکانی آسیب‌پذیری نیز مشخص کرد که زیرحوزه آبخیز Aبا مساحتی بالغ بر ۶۵۸۸ هکتار و غلبه اراضی نوع E (با شیب تند)، آسیب‌پذیرترین بخش حوزه در برابر تغییرات آتی است. در یک جمع‌بندی نهایی، یافته‌ها حساسیت بالای منابع آب سطحی حوزه کاشمر به تغییرات اقلیمی را اثبات می‌کند. کاهش قابل توجه رواناب یک تهدید جدی برای امنیت آبی و کشاورزی منطقه محسوب می‌شود. با اذعان به عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌سازی، نتایج این پژوهش به‌عنوان اولین برآورد کمی برای این حوزه، بر ضرورت بازنگری فوری در رویکردهای مدیریت منابع آب و تدوین راهبردهای مؤثر سازگاری مبتنی بر شواهد علمی تأکید می‌ورزد.

استناد: همت‌جو، کوثر، معماریان، هادی، چزگی، جواد، و مومنی‌دمنه، جواد (۱۴۰۴). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید رواناب در حوزه آبخیز شهری کاشمر. سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۱۳(۲)، ۸۳–۱۰۰.

DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران

© نویسندگان

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

مقدمه

آب به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع طبیعی، نقشی حیاتی در پایداری بوم‌سازگان‌ها و توسعه جوامع انسانی ایفا می‌کند (Milly et al., 2008; Vörösmarty et al., 2010). تغییرات اقلیمی که ناشی از فعالیت‌های انسانی نظیر استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی است، تأثیرات چشمگیری بر چرخه هیدرولوژیکی و الگوی توزیع آب در سراسر جهان بر جای می‌گذارد (IPCC, 2021). تغییر اقلیم می‌تواند منجر به تغییر در میزان و شدت بارش، افزایش دما و دگرگونی در روند جریان‌های سطحی شود؛ عواملی که مستقیماً بر تأمین منابع آب اثرگذار هستند (Tan & Gan, 2015; Wada et al., 2017). رواناب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی، به‌شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد و تغییر در الگوهای آن می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی محیطی به همراه داشته باشد (Oki & Kanae, 2006; Kristvik et al., 2018). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند ایران، که منابع آب سطحی و زیرزمینی محدود است، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب اهمیتی دوچندان می‌یابد (Huyen et al., 2017; Nasseri et al., 2017). این چالش در حوزه‌های آبخیز شهری، که در آن فشارهای اقلیمی با محرک‌های انسانی نظیر توسعه فیزیکی و تغییر کاربری اراضی ترکیب می‌شوند، ابعاد پیچیده‌تری می‌یابد (Chawla & Mujumdar, 2015). حوزه‌های آبخیز شهری به‌طور خاص، با توجه به روند رو به رشد شهرنشینی و تغییرات فزاینده در کاربری اراضی، در معرض تأثیرات ناشی از تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند (Altdorff et al., 2017). تغییر در الگوهای بارش و افزایش دما می‌تواند منجر به دگرگونی در میزان رواناب، افزایش احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی و اختلال در تأمین منابع آب شهری شود (Chawla & Mujumdar, 2015).

در همین چارچوب، حوزه آبخیز شهری کاشمر، به‌عنوان یک منطقه نیمه‌خشک با متوسط بارش سالانه پایین (حدود ۲۰۵ میلی‌متر) که حیات یک مرکز جمعیتی را پشتیبانی می‌کند، نمونه‌ای بارز از یک سیستم در معرض خطر است. با وجود این آسیب‌پذیری آشکار، یک ارزیابی کمی و مدون از پروفایل پاسخ هیدرولوژیکی این حوزه خاص به طیف‌های مختلف سناریوهای اقلیمی آتی تا کنون ارائه نشده است و در نتیجه، میزان تغییرات بالقوه در منابع آب سطحی آن در هاله‌ای از ابهام قرار دارد. این خلأ دانش، هرگونه برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب و تدوین راهبردهای مؤثر سازگاری را با چالش مواجه می‌سازد. بنابراین، هدف اصلی و محوری این پژوهش، پر کردن این خلأ تحقیقاتی از طریق کمی‌سازی اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید رواناب سطحی در حوزه آبخیز شهری کاشمر برای قرن بیست و یکم است. این مطالعه به طور مشخص به دنبال پاسخ به این سؤالات است: (۱) الگوهای بارش در آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار چگونه تغییر خواهد کرد؟ (۲) این تغییرات چه تأثیری بر حجم رواناب تولیدی در سطح حوزه آبخیز و زیرحوزه‌های آبخیز آن خواهد داشت؟ و (۳) کدام زیرحوزه‌های آبخیز بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر این تغییرات نشان می‌دهند؟ برای نیل به این اهداف، یک چارچوب تحلیلی یکپارچه اتخاذ شد. پیش‌بینی‌های اقلیمی از خروجی مدل‌های معتبر گردش عمومی جو (GCMs) تحت سناریوهای مسیرهای غلظت بازنمایان‌گر (RCPs) استخراج شد. برای برآورد رواناب نیز، روش تجربی بارلو (Barlow, 1944) به دلیل تناسب آن با شرایط داده–محدود و توانایی‌اش در لحاظ کردن مستقیم مشخصات فیزیکی کلیدی حوزه (مانند شیب و پوشش گیاهی) به‌عنوان یک ابزار کارآمد انتخاب شد (Croke et al., 2005; Littlewood et al., 2007). در نهایت، لازم به ذکر است که مشارکت علمی (Scientific Contribution) این پژوهش، نه در ابداع یک روش‌شناسی نوین، بلکه در کاربرد یک چارچوب تحلیلی معتبر برای ارائه اولین برآورد کمی از پاسخ هیدرولوژیکی یک حوزه مطالعه‌نشده به تغییرات اقلیمی است. این تحقیق یک سند علمی پایه و یک خط مبنای استنادی (Referential Baseline) برای مطالعات آتی فراهم می‌آورد و با شناسایی زیرحوزه‌های آبخیز با بیشترین آسیب‌پذیری، شواهد علمی لازم را برای تدوین راهبردهای مدیریت انطباقی آب در سطح محلی ارائه می‌دهد.

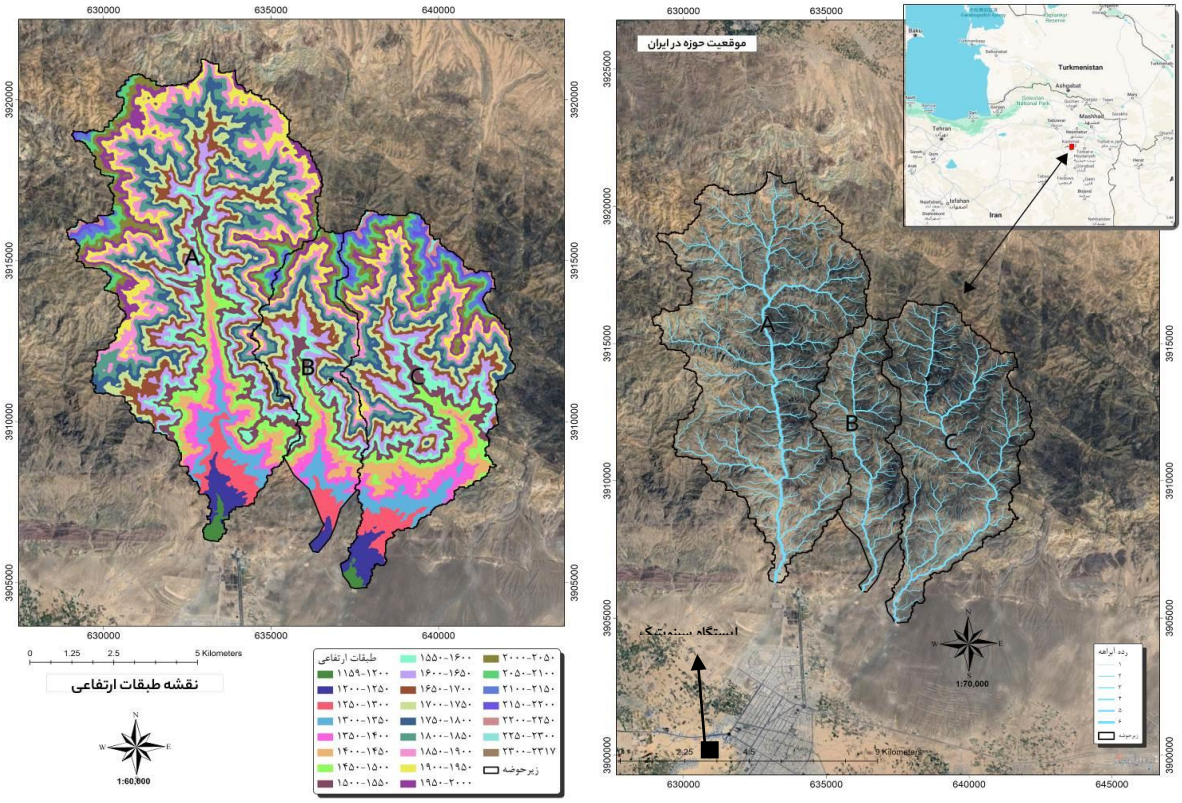
مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل سه زیرحوزه آبخیز هیدرولوژیک به‌نام‌های A ، B و C با مساحت کل ۱۲۲۳۹,۸ هکتار است که در بالادست شهر کاشمر، در استان خراسان رضوی و در حدود سه کیلومتری شمال این شهر واقع شده است (جدول ۱ و شکل ۱). این منطقه توپوگرافی متنوعی با بازه ارتفاعی نسبتاً وسیع از ۱۱۵۹ تا ۲۳۱۷ متر دارد. ارتفاع متوسط و میانه در کل محدوده به‌ترتیب ۱۷۰۰,۷ و ۱۶۹۵,۳ متر بوده و بیشترین مساحت در بازه ارتفاعی ۱۸۰۰ تا ۱۸۵۰ متر قرار گرفته است (شکل ۱). اقلیم این منطقه نیمه‌خشک تا خشک است و بارش عمدتاً در فصول زمستان و بهار رخ می‌دهد. میزان بارش سالیانه در ایستگاه هواشناسی کاشمر طی دوره آماری ۱۳۶۸ تا ۱۴۰۰ بین ۱۵۰ تا ۳۱۳ میلی‌متر متغیر بوده است. بر اساس تحلیل داده‌های بلندمدت و نتایج مطالعات اقلیمی انجام‌شده، ایستگاه سینوپتیک کاشمر در دوره

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

آماری ۱۳۶۰ تا ۱۴۰۰ دارای یک رژیم دمایی مشخصه مناطق خشک و نیمه‌خشک با نوسانات حرارتی قابل توجه است. میانگین دمای سالانه در این ایستگاه حدود ۶/۱۷ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود. این منطقه تابستان‌های بسیار گرم و طولانی را تجربه می‌کند، به‌طوری که میانگین دمای حداکثر در گرم‌ترین ماه سال (تیر) به بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد؛ در مقابل، زمستان‌های آن سرد بوده و میانگین دمای حداقل در سردترین ماه (دی) به حدود صفر درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (اصغرزاده و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقشه طبقات ارتفاعی

Figure 1– Location of the study area and altitude categories

جدول ۱- مشخصات محدوده مورد مطالعه

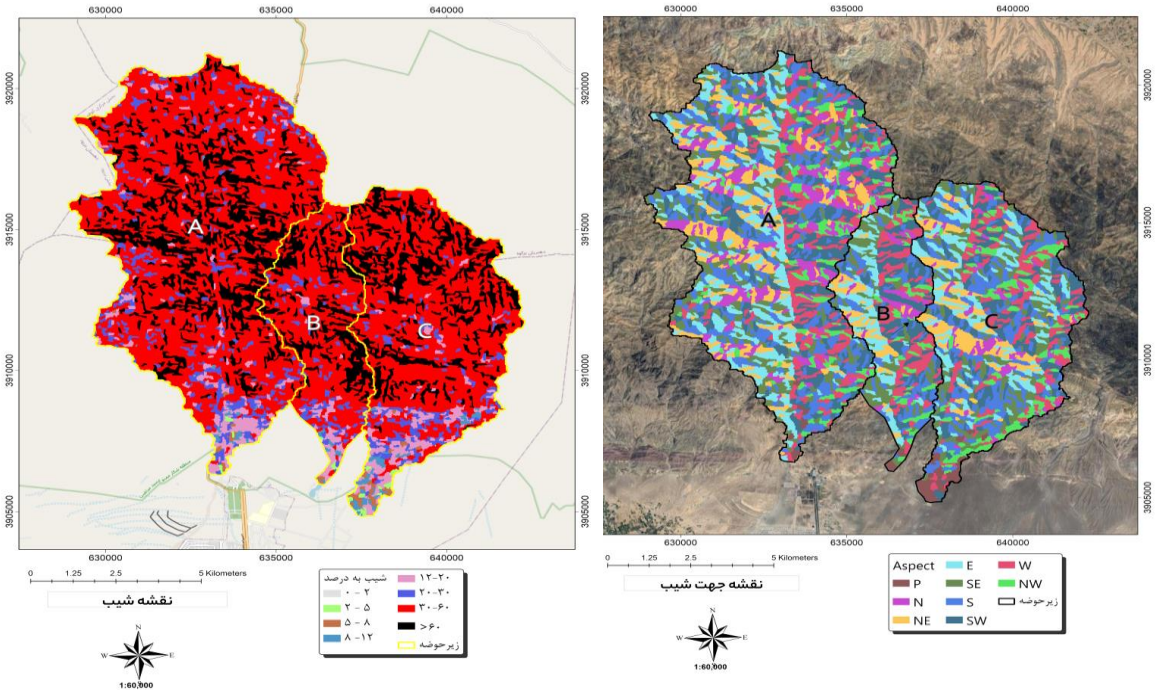
Table 1- Characteristics of the study area

کد زیرحوزه آبخیز	نوع زیرحوزه آبخیز	مساحت (هکتار)	محیط (کیلومتر)
A	هیدرولوژیک	6588.0	61.9
B	هیدرولوژیک	1852.2	32.2
C	هیدرولوژیک	3799.6	43.8

بر اساس تحلیل نقشه کاربری اراضی منطقه (برگرفته از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استان، ۱۴۰۰)، مشخص شد که منطقه مورد مطالعه عمدتاً از اراضی با پوشش گیاهی فقیر (مراتع فقیر با ۱۹/۵۳ درصد) و مناطق صخره‌ای (۵۸/۴۴ درصد) تشکیل شده است و اراضی باغی سهم بسیار اندکی را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، بر مبنای نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ منطقه (منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)، از نظر ساختار سنگی، غالبیت با واحدهای با نفوذپذیری کم تا بسیار کم (به‌ویژه گرانیت و آندزیت‌های آتشفشانی) است که این ویژگی، پتانسیل بالایی برای تولید رواناب سطحی در حوزه ایجاد می‌کند.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]



شکل ۲- نقشه جهت و طبقات شیب

Figure 2– Aspect and slope classes' maps

جدول ۲- وضعیت و توزیع طبقات شیب در حوزه مورد مطالعه (مساحت به هکتار)

Table 3- The condition and distribution of slope classes in the study area (area in hectares)

C (ha)	B (ha)	A (ha)	Total (ha)	طبقه شیب
0.17	0.56	0.00	0.72	0 - 2
20.04	3.90	7.68	31.62	2 - 5
41.96	4.91	16.04	62.90	5 - 8
65.11	12.91	24.32	102.33	8 - 12
261.12	88.61	291.77	641.51	12 - 20
261.94	149.02	574.37	985.32	20 - 30
2212.51	1120.12	4145.88	7478.51	30 - 60
893.86	454.57	1411.00	2759.42	>60
0.00	0.62	0.00	0.00	حداقل شیب
75.59	75.19	73.67	75.59	حداکثر شیب با دامنه ۹۰ درصد داده‌ها
47.61	49.00	47.89	48.21	شیب متوسط
36.10	36.74	36.20	36.25	شیب میانه
30 - 60	30 - 60	30 - 60	30 - 60	نمای شیب

جدول ۳- وضعیت و توزیع کاربری اراضی در حوزه مورد مطالعه (مساحت به هکتار)

Table 4- Land use status and distribution in the study area (area in hectares)

اراضی صخره‌ای Rock Outcrops	مرتع فقیر Poor Rangeland	مرتع متوسط Moderate Rangeland	اراضی باغی Orchards	کد زیرحوزه آبخیز Sub-watershed Code	پارامتر Parameter
5378.37	6416.53	198.51	70.38	total	مساحت (هکتار)
2825.95	3509.13	66.19	70.38	A	
855.82	975.01	4.23	0.00	B	
1696.60	1932.39	128.10	0.00	C	
44.58	53.19	1.65	0.58	Total	درصد از کل
23.43	29.09	0.55	0.58	A	
7.09	8.08	0.04	0.00	B	
14.06	16.02	1.06	0.00	C	

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

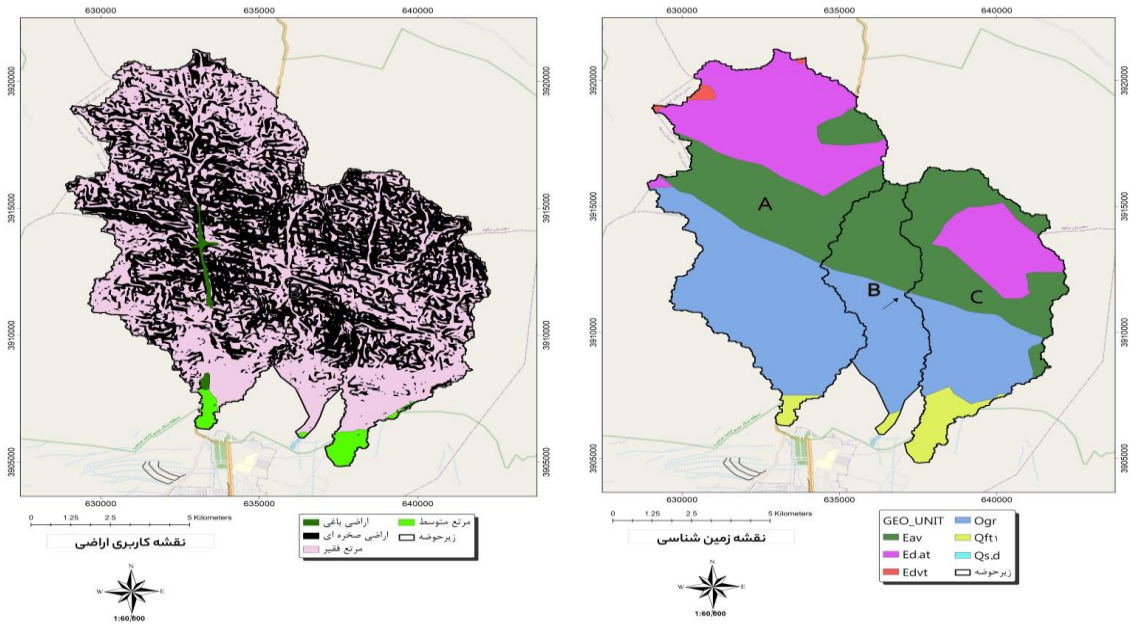
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

روش تحقیق

این پژوهش با هدف ارزیابی کمی تأثیرات تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید رواناب در حوزه آبخیز بالادست شهر کاشمر طراحی و اجرا شد. چارچوب روش‌شناختی این تحقیق بر سه محور اصلی استوار است: (۱) استخراج، ارزیابی و انتخاب مدل اقلیمی بهینه؛ (۲) ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی آتی تحت سناریوهای مختلف انتشار؛ و (۳) برآورد رواناب سطحی با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی متناسب با شرایط منطقه.

۱- استخراج و ارزیابی داده‌های مدل‌های اقلیمی

در گام نخست، داده‌های شبیه‌سازی‌شده بارش از چهار مدل گردش عمومی جو (GCMs) شامل GFDL-ESM2G، IPSL-CM5A-MR، MIROC-ESM و NorESM1-M، که خروجی آن‌ها در چارچوب پروژه هم‌مدل‌سازی اقلیم جهانی پنجم (CMIP5) ارائه شده است، از طریق پایگاه داده ESGF استخراج شد (Meehl et al., 2007). انتخاب این مدل‌ها بر اساس نتایج مطالعات پیشین در مناطق مشابه ایران (نظیر آقاخانی و همکاران، ۱۳۹۵) صورت پذیرفت. داده‌ها برای دو دوره زمانی شامل دوره تاریخی (۲۰۰۵–۱۹۸۹) و دوره آتی (۲۱۰۰–۲۰۲۰) دریافت شدند. به‌منظور اعتبارسنجی و انتخاب مدل برتر، عملکرد هر یک از این چهار مدل در شبیه‌سازی بارش دوره تاریخی، با داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک کاشمر (که موقعیت آن در شکل ۱ نمایش داده شده) مقایسه شد. این فرآیند اعتبارسنجی، که یک گام بنیادین در مطالعات ارزیابی اثرات اقلیمی برای تعیین قابلیت اعتماد مدل‌هاست (Gómez et al., 2023)، با استفاده از مجموعه‌ای از سنجه‌های عملکرد استاندارد شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب همبستگی پیرسون (R) انجام شد. انتخاب این شاخص‌ها بر اساس رویه‌های علمی پذیرفته‌شده در ارزیابی مدل‌های اقلیمی صورت گرفته است (Gleckler et al., 2008).



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی و کاربری اراضی

Figure 3- Lithologic and land use maps

۲- انتخاب سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای

در این پژوهش، به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم، از سناریوهای بازنمایه‌گر غلظت مسیرها (RCPs) که در گزارش پنجم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2014) معرفی شده‌اند، استفاده شد. این سناریوها شامل RCP2.6 ، RCP4.5، RCP6.0و RCP8.5 می‌باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی پیش‌بینی‌شده در سال ۲۱۰۰ طبقه‌بندی شده‌اند (Riahi et al., 2017). انتخاب این سناریوها به دلیل پوشش دادن طیف وسیعی از احتمالات انتشار گازهای گلخانه‌ای و شرایط سیاست‌گذاری اقلیمی آتی صورت پذیرفته است. به طور مشخص، سناریوی RCP2.6 یک سناریوی خوش‌بینانه تلقی می‌شود که هدف آن محدود کردن افزایش دمای جهانی به زیر ۲ درجه سانتی‌گراد است و مستلزم کاهش چشمگیر انتشار و به‌کارگیری فناوری‌های حذف کربن می‌باشد (Rogelj et al., 2018). در مقابل، سناریوی RCP4.5یک سناریوی میانی است که در آن واداشت تابشی قبل از سال ۲۱۰۰ در سطح ۴٫۵ W/m^2 تثبیت می‌شود و نیازمند اتخاذ سیاست‌های کاهش انتشار است (Fricko et al., 2017). سناریوی RCP6.0 نیز یک سناریوی میانی دیگر به شمار می‌رود که در آن

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

واداشت تابشی پس از سال ۲۱۰۰ در سطح ۶٫۰ W/m^2 تثبیت خواهد شد (Fujimori et al., 2017). در نهایت، سناریوی RCP8.5 به‌عنوان یک سناریوی بدبینانه در نظر گرفته می‌شود که بالاترین میزان انتشار را در پی داشته و منجر به افزایش واداشت تابشی تا ۸٫۵ W/m^2در سال ۲۱۰۰ می‌شود (Kriegler et al., 2017). خروجی‌های حاصل از این سناریوها برای دوره آتی (۲۰۲۰–۲۱۰۰) استخراج و به چهار بازه زمانی مجزا تقسیم شدند: آینده نزدیک (۲۰۲۰–۲۰۳۹)، آینده میانی اول (۲۰۴۰–۲۰۵۹)، آینده میانی دوم (۲۰۶۰–۲۰۷۹) و آینده دور (۲۰۸۰–۲۱۰۰).

۳- ریزمقیاس‌نمایی مکانی و اصلاح خطاهای مدل

با توجه به عدم انطباق مقیاس مکانی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) با مقیاس مورد نیاز در مطالعات هیدرولوژیکی منطقه‌ای (Wilby & Wigley, 1997)، در این پژوهش از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری اصلاح انحراف و تفکیک مکانی (BCSD) برای آماده‌سازی داده‌های اقلیمی استفاده شد (Wood et al., 2004). داده‌های ماهانه بارش و دما برای دوره تاریخی (۲۰۰۵–۱۹۸۹) و آتی (۲۱۰۰–۲۰۲۰) از پایگاه داده GDO-DCP دریافت و با روش BCSD به شبکه‌هایی با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه ریزمقیاس شدند. این فرآیند چندمرحله‌ای به شرح زیر انجام پذیرفت:

- ✓ اصلاح انحراف (Bias Correction): در گام نخست، انحرافات سیستماتیک خروجی‌های ماهانه مدل GCM نسبت به داده‌های مشاهداتی دوره پایه (تاریخی) محاسبه و اصلاح شد.
- ✓ تفکیک مکانی (Spatial Disaggregation): سپس، داده‌های ماهانه اصلاح‌شده که همچنان دارای مقیاس مکانی درشت بودند، با استفاده از روش‌های درون‌یابی مکانی بر روی یک شبکه با قدرت تفکیک مکانی بالاتر (۵/۰ درجه) تفکیک شدند. انتخاب روش‌های مناسب درون‌یابی برای داده‌های بارش به منظور حفظ ساختار مکانی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (نادی و همکاران، ۱۳۹۱).
- ✓ تفکیک زمانی (Temporal Disaggregation): از آنجایی که روش برآورد رواناب بارلو به ورودی بارش در مقیاس روزانه نیاز دارد، در مرحله نهایی، داده‌های ماهانه ریزمقیاس‌شده به داده‌های روزانه تفکیک زمانی شدند. این فرآیند با نمونه‌برداری تصادفی از الگوهای بارش روزانه مشاهداتی در دوره تاریخی انجام شد. به این صورت که برای هر ماه از دوره آتی، یک ماه مشابه از دوره مشاهداتی به‌صورت تصادفی انتخاب شده و توالی روزهای خشک و مرطوب آن به‌عنوان الگو در نظر گرفته می‌شود. سپس مقادیر بارش روزانه به‌گونه‌ای مقیاس‌بندی (rescaled) می‌شوند که مجموع آن‌ها در انتهای ماه دقیقاً با مقدار کل ماهانه پیش‌بینی‌شده توسط مدل GCM برابر باشد. این روش تضمین می‌کند که ضمن حفظ مجموع ماهانه خروجی مدل اقلیمی، ویژگی‌های آماری داده‌های روزانه (مانند توالی و شدت) با شرایط واقعی منطقه سازگار باشد.

لازم به ذکر است که فرض بنیادین در این روش، پایداری رابطه آماری بین مقیاس‌های مختلف و همچنین ثبات انحراف مدل در دوره‌های پایه و آینده می‌باشد (Wood et al., 2004).

۴- روش برآورد رواناب بارلو

در مطالعات هیدرولوژیکی، روش‌های متنوعی برای تخمین رواناب در حوزه‌های آبخیز به کار می‌روند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های بارش–رواناب منطقه‌ای و روش بارلو اشاره کرد (Croke et al., 2005; Littlewood et al., 2007). این روش‌ها به دلیل سادگی و دقت قابل‌توجه، کاربرد گسترده‌ای در این زمینه دارند. به ویژه، روش بارلو در حوزه‌های آبخیز شهری که با تغییرات عمده در پوشش زمین مواجه هستند، از کارایی بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، روش بارلو برای تخمین رواناب در حوزه آبخیز شهری کاشمر به‌کار گرفته شده است؛ این روش به‌ویژه برای ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی ناشی از بارش‌های سنگین و حداکثری، که مشخصه اصلی مناطق خشک و نیمه‌خشک است، کارایی بالایی دارد (Zarghami et al., 2011). روش بارلو که در سال ۱۹۴۴ توسط بارلو در هندوستان معرفی شد (Barlow, 1944)، یک روش تجربی برای برآورد رواناب سطحی در حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق گرمسیری است. این روش با هدف ارائه ابزاری کاربردی برای تخمین رواناب بر اساس ویژگی‌های فیزیکی حوزه و نوع بارندگی روزانه، بدون نیاز به مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی پیچیده، توسعه یافت. روش بارلو بر دو طبقه‌بندی اصلی استوار است: طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز و طبقه‌بندی بارندگی روزانه. در طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز، بارلو بر اساس مشاهدات میدانی، حوزه‌ها را به پنج دسته (A تا E) تقسیم کرد (Chow et al., 1988): دسته A شامل حوزه‌های مسطح با خاک‌های تیره و سنگین و نفوذپذیری بالا است که کمترین پتانسیل تولید رواناب را دارند. دسته B حوزه‌های مسطح با خاک‌های تا حدی زیرورو شده یا کشت پراکنده را شامل می‌شود که رواناب بیشتری نسبت به دسته A تولید می‌کنند. دسته C حوزه‌هایی با شرایط متوسط شیب، خاک و پوشش گیاهی را در بر می‌گیرد و به‌عنوان وضعیت مرجع در نظر گرفته

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

می‌شود. دسته D شامل تپه‌ها و دشت‌هایی با شخم‌خوردگی اندک یا پوشش مرتعی است که به دلیل شیب بیشتر، رواناب بالاتری تولید می‌کنند. دسته E حوزه‌های بسیار تپه‌ای با شیب‌های تند و خاک‌های ناپایدار را شامل می‌شود که بیشترین پتانسیل رواناب و سیل‌خیزی را دارند. در کنار این طبقه‌بندی، بارندگی‌های روزانه نیز بر اساس تأثیرشان بر رواناب به چهار دسته تقسیم شدند (Singh, 1992): دسته I (بارش ناچیز، <۱۲ میلی‌متر) که رواناب قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کند؛ دسته II (بارش کم، ۱۲–۲۵ میلی‌متر) که منجر به رواناب جزئی می‌شود؛ دسته III (بارش متوسط، ۲۵–۴۰ میلی‌متر) با تأثیر قابل‌توجه بر رواناب؛ و دسته IV (بارش سنگین و سیل‌آسا، >۴۰ میلی‌متر) که به‌عنوان عامل اصلی تولید رواناب حداکثری، باعث اشباع سریع خاک و ایجاد جریان سطحی زیاد می‌شود (جدول ۴). در این روش، با تعیین دسته حوزه و نوع بارندگی، از جدول ضرایب رواناب برای محاسبه درصد رواناب استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، با توجه به ویژگی‌های زیرحوزه‌های آبخیز A، B و C و داده‌های بارش روزانه ریزمقیاس‌شده، ضرایب بارلو برای محاسبه رواناب در دوره‌های تاریخی و آینده به کار گرفته شد.

جدول ۴- ضرایب بارلو بر حسب درصد

Table 5- Barlow coefficients in percent

E	D	C	B	نوع بارش Precipitation type
0	0	0	0	ناچیز (Little)
15	10	5	3	کم (Low)
33	25	20	15	متوسط (Average)
70	55	40	33	سنگین (Heavy)

تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش، ابتدا داده‌های پیش‌بینی‌شده بارش تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم استخراج و آماده‌سازی شد. سپس، رواناب با استفاده از روش بارلو برآورد شد. در ادامه، داده‌های ثبت‌شده و برآوردی به منظور انجام تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گرفتند. بدین منظور، در گام نخست، نرمال بودن توزیع داده‌ها و همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون‌های مربوطه بررسی شد. برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی داده‌های تاریخی، شاخص‌های آماری نظیر ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب همبستگی (R) محاسبه شد. به منظور تحلیل روند تغییرات بارش و رواناب در دوره‌های زمانی مختلف تحت سناریوهای انتشار RCP، از آزمون غیرپارامتری من–کندال (Kendall, 1975; Mann, 1945) استفاده شد. پیش از اعمال این آزمون، وجود خودهمبستگی در سری‌های زمانی با بهره‌گیری از توابع خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF) (Box et al., 2015) مورد ارزیابی قرار گرفت و در صورت تشخیص خودهمبستگی، از روش حامد و رائو (Hamed & Rao, 1998) برای حذف اثرات آن استفاده شد. در نهایت، مقایسه نتایج حاصل از روش بارلو با نتایج روش منطقه‌ای نیز به‌صورت آماری انجام پذیرفت. کلیه مراحل تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزارهای استاندارد از قبیل اکسل، SPSS و R صورت گرفت.

نتایج و بحث

بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی بارش در دوره تاریخی

به‌منظور انتخاب قابل‌اطمینان‌ترین ابزار برای پیش‌بینی اقلیم آینده منطقه، ابتدا عملکرد چهار مدل گردش عمومی جو (GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, NorESM1-M) در بازتولید بارش دوره تاریخی (۲۰۰۵–۱۹۸۹) ارزیابی شد. نتایج کمی این ارزیابی (جدول ۵) به وضوح نشان داد که مدل IPSL-CM5A-MR با کسب بالاترین ضریب همبستگی (R=0.72) و ضریب تبیین (R^2=0.56) و همچنین مقادیر خطای کمتر (RMSE و MAE) نسبت به سایر مدل‌ها، بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش تاریخی حوزه آبخیز کاشمر داشته است. کسب بهترین عملکرد توسط مدل IPSL-CM5A-MR یک یافته کلیدی است که نیازمند تفسیر عمیق‌تر است. این برتری می‌تواند به پارامترسازی دقیق‌تر این مدل برای دینامیک جوی در مقیاس بزرگی که سامانه‌های بارشی منطقه را کنترل می‌کنند، نسبت داده شود. با این وجود، همانطور که به درستی اشاره شده است، این مقادیر اگرچه بهترین در میان مدل‌های منتخب هستند، اما یک تطابق متوسط را نشان داده و نقاط ضعف مدل را نیز آشکار می‌سازند. ضریب تبیین ۵۶/۰ به این معناست که ۴۴ درصد از واریانس بارش مشاهداتی توسط مدل تبیین نمی‌شود که نشان‌دهنده عدم قطعیت قابل توجهی است. همچنین، مقادیر خطای RMSE و MAE (جدول ۵)، هرچند در مقایسه با سایر مدل‌ها کمتر هستند، اما همچنان بیانگر وجود خطای نسبی در شبیه‌سازی مقدار بارش می‌باشند. این عدم قطعیت (Uncertainty) ذاتی، ناشی از عواملی چون محدودیت داده‌های ورودی، قدرت تفکیک مکانی پایین GCMها که قادر به بازتولید دقیق پدیده‌های محلی نیستند، و

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

ساده‌سازی فرآیندهای فیزیکی پیچیده (مانند فرآیندهای همرفتی در مناطق خشک) است. اذعان به این نقاط ضعف برای تفسیر محتاطانه نتایج آتی ضروری است. یافته ما مبنی بر برتری نسبی IPSL-CM5A-MR با نتایج مطالعات دیگر (نظیر صادقی و همکاران، ۲۰۲۲) همسو است، اما تأکید می‌شود که تمامی پیش‌بینی‌های آتی بر پایه‌ی مدلی استوار است که دارای محدودیت‌های مشخصی است. بنابراین، با پذیرش این عدم قطعیت‌ها، مدل IPSL-CM5A-MR به‌عنوان مناسب‌ترین ابزار موجود در این پژوهش انتخاب شد و تحلیل‌های بعدی بر مبنای خروجی‌های آن استوار است.

جدول ۵- نتایج سنجه‌های ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی بارش

Table 6- Results of Model Evaluation Metrics for Precipitation

مدل	معیارهای ارزیابی مدل				
	R	RMSE	MAE	R2	MSE
IPSL-CM5A-MR	0.72	21.3	13.5	0.56	456
GFDL-ESM2G	0.50	23.2	15.3	0.50	540
MIROC-ESM	0.49	23.3	14.2	0.49	544
NorESM1-M	0.44	25.4	15.8	0.44	645

تحلیل روند بارندگی سالانه

پس از انتخاب مدل برتر، خروجی‌های بارش آن تحت سناریوهای مختلف RCP و برای دوره‌های زمانی آتی، با استفاده از آزمون من–کندال (پس از حذف اثر خودهمبستگی) مورد تحلیل روند قرار گرفت. نتایج تحلیل روند (جدول ۶) نشان‌دهنده یک تصویر پیچیده و چندوجهی از آینده بارش در حوزه کاشمر است. یافته کلیدی، وجود یک روند کاهشی عمومی در میزان بارش سالانه تحت اکثر سناریوهای با انتشار متوسط تا بالا (RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) برای کل دوره پیش‌بینی (۲۱۰۰–۲۰۲۰) است. این کاهش در سناریوی بدبینانه RCP8.5 و در دوره آینده دور (۲۱۰۰–۲۰۷۰) به اوج خود می‌رسد و کاهشی معادل ۴۱/۱۲ میلی‌متر را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که با توجه به متوسط بارش ۲۰۵ میلی‌متری منطقه، یک افت بسیار قابل‌توجه (حدود ۲۰٪) محسوب می‌شود. با این حال، این روندهای کاهشی در اکثر موارد از نظر آماری معنادار نیستند ($p > 0.05$). در مقابل، سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6 یک روند افزایشی را، به خصوص در دوره دور، به نمایش می‌گذارد که این افزایش از نظر آماری معنادار است.

جدول ۶- تحلیل روند پارامتر بارش سالانه تحت سناریوهای انتشار RCP و دوره‌های زمانی متفاوت با استفاده از آزمون من–کندال

Table 7- Trend Analysis of Annual Precipitation Parameter under Different RCP Emission Scenarios and Time Periods Using the Mann-Kendall Test

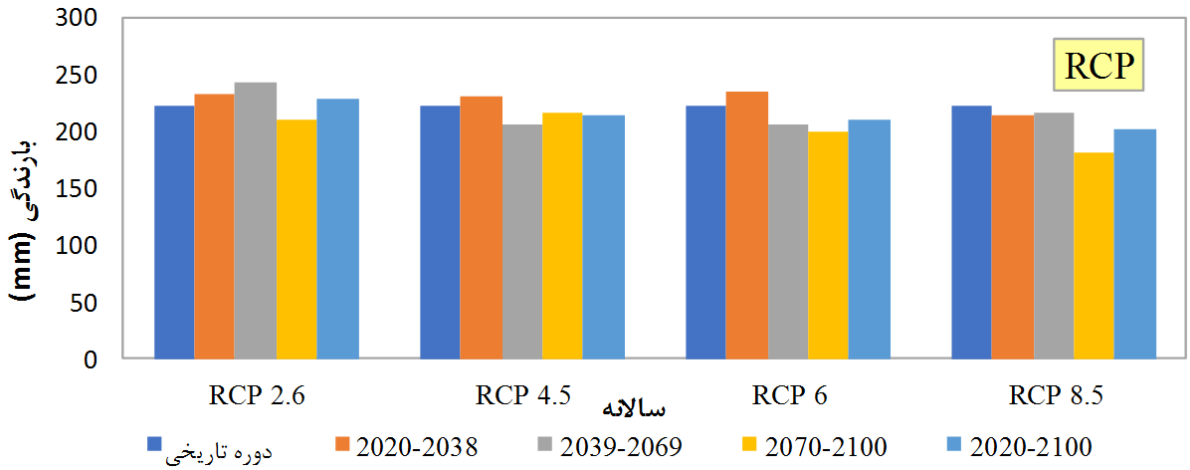
RCP	آینده نزدیک			آینده میانی			آینده دور			کل دوره		
	Kendall's tau	p-value	Trend	Kendall's tau	p-value	Trend	Kendall's tau	p-value	Trend	Kendall's tau	p-value	Trend
RCP2.6	0.1228	0.4841	↑	0.0280	0.8384	↑	0.1398*	0.0280	↑	-0.0716	0.2340	↓
RCP4.5	-0.0058	1.0000	↓	0.0151	0.9188	↑	-0.0452	0.6942	↓	-0.0685	0.3674	↓
RCP6	-0.1579	0.3630	↓	-0.0624	0.6341	↓	-0.1226	0.3412	↓	-0.1235	0.0594	↓
RCP8.5	0.0760	0.6746	↑	0.0581	0.6586	↑	0.0323	0.6715	↑	-0.1420	0.0974	↓

این نتایج نیازمند یک تفسیر دقیق و فراتر از اعداد خام است. عدم معناداری آماری روند کاهشی در اکثر سناریوها به معنای «عدم وجود تغییر» نیست؛ بلکه نشان‌دهنده آن است که «سیگنال» تغییر اقلیم هنوز آن‌قدر قوی نشده که بر «نویز» یا همان نوسانات طبیعی و بالای بین‌سالی بارش در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک غلبه کند. در واقع، این یک سیگنال هشداردهنده است که منطقه به تدریج به سمت شرایط خشک‌تر حرکت می‌کند، هرچند این حرکت به دلیل نوسانات شدید، از نظر آماری به قطعیت نرسیده است. نکته مهم‌تر، اهمیت عملیاتی این کاهش است. یک افت ۲۰ درصدی در بارش سالانه، حتی اگر روند آن از نظر آماری معنادار نباشد، می‌تواند اثرات ویرانگری بر منابع آب، کشاورزی و بوم‌سازگان‌های شکننده منطقه داشته باشد. این یافته، اهمیت تمرکز بر مقدار تغییرات پیش‌بینی‌شده را به جای اتکای صرف بر معناداری آماری برجسته می‌کند. این نتایج با یافته‌های جدیدتر مبتنی بر مدل‌های CMIP6 نیز همخوانی دارد. بسیاری از این مطالعات نیز ضمن تأیید عدم قطعیت بالا در پیش‌بینی بارش، بر افزایش شدت و تکرار خشکسالی‌ها در خاورمیانه و ایران تأکید دارند (Sadeghi et al., 2022). واگرایی نتایج بین سناریوهای مختلف (مانند روند کاهشی در RCP8.5 در مقابل روند افزایشی در (RCP2.6) نیز به وضوح نشان می دهد که مسیر آینده اقلیم منطقه کاشمر به شدت به سیاست‌گذاری‌های جهانی در کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای وابسته است و عدم اقدام

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

جهانی، منطقه را در مسیر سناریوی بدبینانه قرار خواهد داد. در نهایت، این تحلیل روند بارش، ورودی اصلی برای مرحله بعد پژوهش را فراهم می‌کند. تغییرات پیش‌بینی‌شده در رژیم بارش، چه از نظر مقدار کل و چه از نظر الگو، مستقیماً پتانسیل تولید رواناب سطحی را در حوزه آبخیز تحت تأثیر قرار خواهد داد و مبنای ارزیابی آسیب‌پذیری هیدرولوژیکی منطقه خواهد بود. مقادیر بارش سالانه شبیه‌سازی شده توسط مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوهای مختلف در دوره‌های زمانی متفاوت در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- مقادیر بارش سالانه شبیه‌سازی شده توسط مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوهای انتشار RCP در دوره‌های زمانی مختلف

Figure 4 - Simulated annual precipitation by the IPSL-CM5A-MR model under RCP emission scenarios across different time periods

برآورد حجم رواناب از روش بارلو

در جدول شماره ۸، مساحت انواع اراضی موجود در زیرحوزه‌های آبخیز مورد بررسی ارائه شده است و نقشه مربوط به توزیع این اراضی نیز در شکل ۵ قابل مشاهده است. بر اساس داده‌ها، زیرحوزه آبخیز A با مساحت ۶۱۲۳٫۵۴ هکتار، بیشترین سهم را از اراضی نوع E (مناطق بسیار تپه‌ای با شیب تند و خاک‌های تثبیت‌نشده) به خود اختصاص داده است. این نوع اراضی به دلیل ویژگی‌های خود، در شرایط بارندگی شدید، بالاترین میزان تولید رواناب را دارند، به طوری که ضریب رواناب آن‌ها در بارندگی‌های سنگین به حدود ۷۰ درصد می‌رسد. از این رو، زیرحوزه آبخیز A از نظر پتانسیل تولید رواناب و خطر وقوع سیلاب در وضعیت بالاتری نسبت به سایر زیرحوزه‌های آبخیز قرار دارد. زیرحوزه‌های آبخیز B و C نیز به ترتیب با مساحت‌های ۱۷۲۲ و ۳۳۶۶ هکتار، دارای اراضی نوع E هستند، اما مساحت کل آن‌ها در مقایسه با زیرحوزه آبخیز A کمتر است. علاوه بر این، اراضی نوع D با ضریب رواناب ۵۵٪ در بارندگی‌های سنگین، در این زیرحوزه‌های آبخیز وجود داشته و نقش قابل توجهی در تولید رواناب ایفا می‌کنند. در مقابل، اراضی نوع B و C که میزان تولید رواناب کمتری دارند، سهم کوچکی از مساحت این زیرحوزه‌های آبخیز را تشکیل می‌دهند و تأثیر چندانی بر میزان رواناب کلی حوزه ندارند. در مجموع، زیرحوزه‌های آبخیز A، B و C به دلیل دارا بودن مساحت قابل توجهی از اراضی نوع E و D، از پتانسیل نسبتاً بالایی برای تولید رواناب و افزایش خطر سیلاب برخوردارند.

جدول ۸- مساحت انواع کاربری اراضی در زیرحوزه‌های آبخیز به روش بارلو (مساحت به هکتار)

Table 8- Land use area by Barlow method in sub-watersheds (Area in ha)

زیرحوزه آبخیز	مساحت نوع اراضی (هکتار)			
	B	C	D	E
A	0.00	23.53	314.07	6123.54
B	0.55	8.59	100.93	1722.68
C	0.16	61.32	324.65	3366.21

به‌منظور برآورد رواناب با روش بارلو، دسترسی به داده‌های قابل‌اتکا از بارش روزانه، به‌ویژه رویدادهای بارش سنگین (حداکثر ۲۴ ساعته)، یک ضرورت است. با این حال، کاملاً مستند است که مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs)، علی‌رغم توانایی در شبیه‌سازی روندهای کلی، در بازتولید توزیع و شدت بارش‌های روزانه، به‌ویژه در مناطق خشک، دارای انحرافات سیستماتیک قابل‌توجهی هستند (پدیده "بارش نم‌نم" یا Drizzle Effect). استفاده مستقیم از داده‌های روزانه خام و بایاس‌دار GCM می‌توانست عدم قطعیت قابل‌توجهی را به مدل هیدرولویکی

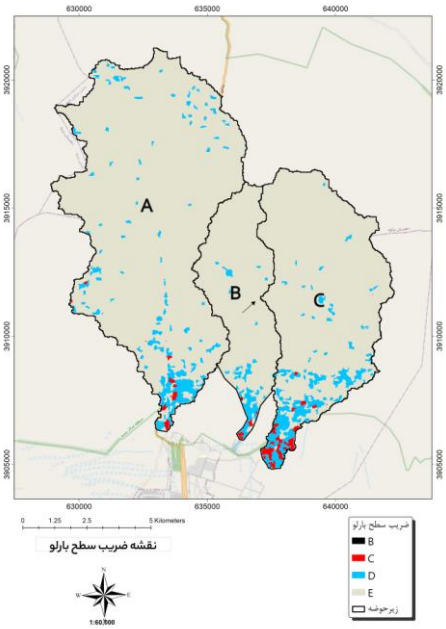
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

بارلو، که به طبقه‌بندی بارش‌های سنگین بسیار حساس است، منتقل کند. از این رو، در این پژوهش یک رویکرد جایگزین و مبتنی بر روابط آماری محلی اتخاذ شد که نوعی ریزمقیاس‌نمایی آماری برای رویدادهای حدی محسوب می‌شود. در این رویکرد، ابتدا یک رابطه رگرسیونی پایدار و معنادار بین داده‌های مشاهداتی بارش سالانه (Panual) و مشاهداتی حداکثر بارش ۲۴ ساعته (P24) در دوره پایه برقرار شد. سپس، از خروجی بارش سالانه پیش‌بینی‌شده توسط مدل GCM (که متغیر قوی‌تر و قابل‌اطمینان‌تری است) به‌عنوان ورودی این رابطه رگرسیونی محلی استفاده شد تا مقادیر آتی حداکثر بارش ۲۴ ساعته، با حفظ ساختار آماری مشاهدات محلی، برآورد گردد. نتایج این بررسی‌ها حاکی از وجود یک رابطه خطی معنادار (مطابق شکل ۶) با ضریب تعیین (R^2) قابل توجهی به میزان ۰/۶۴ می‌باشد. این ضریب تعیین نشان‌دهنده آن است که حدود ۶۴ درصد از تغییرات حداکثر بارش ۲۴ ساعته توسط تغییرات بارش سالانه در داده‌های مشاهداتی قابل تبیین است. رابطه خطی به دست آمده بین این دو متغیر به‌صورت زیر فرمول‌بندی شده است:

$$P24 = 0.0734 * Panual + 7.5072 \quad (N = 19, R^2 = 0.6435)$$

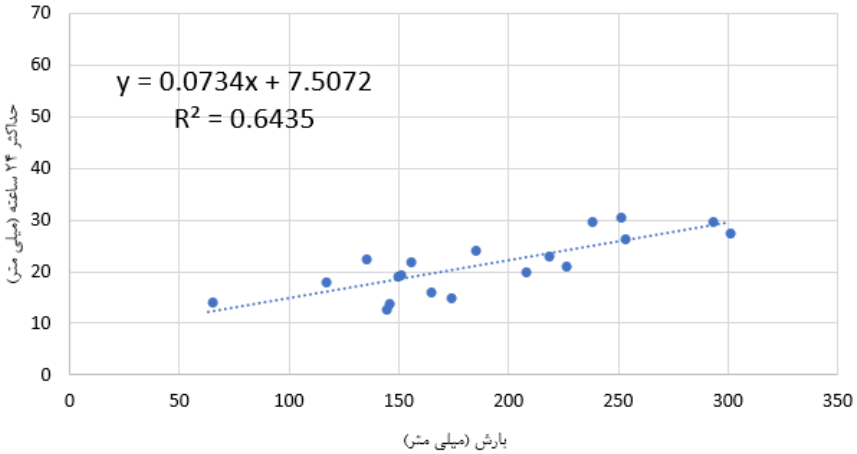
در این رابطه:

P24 حداکثر بارش ۲۴ ساعته (میلی‌متر)؛ Panual بارش سالانه (میلی‌متر)؛ N تعداد سال‌های دوره پایه (۱۹ سال)؛ R^2 ضریب تبیین



شکل ۵- نقشه ضریب سطح بارلو در منطقه مورد مطالعه

Figure 5- Barlow coefficient map of the study area



شکل ۶- رابطه بین میزان بارش سالانه و حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دوره پایه

Figure 6- Relationship between annual rainfall and maximum 24-hour rainfall in the base period

در نهایت برای هر سال، رواناب تولید شده از هر نوع اراضی در زیرحوزه‌های آبخیز به‌صورت زیر محاسبه شد:

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

$$Q=P\times C$$

که در این رابطه:

Q = حجم رواناب (مثلاً به متر مکعب)؛ C = ضریب رواناب (عددی بدون واحد) و P = میزان بارش (مثلاً به متر)

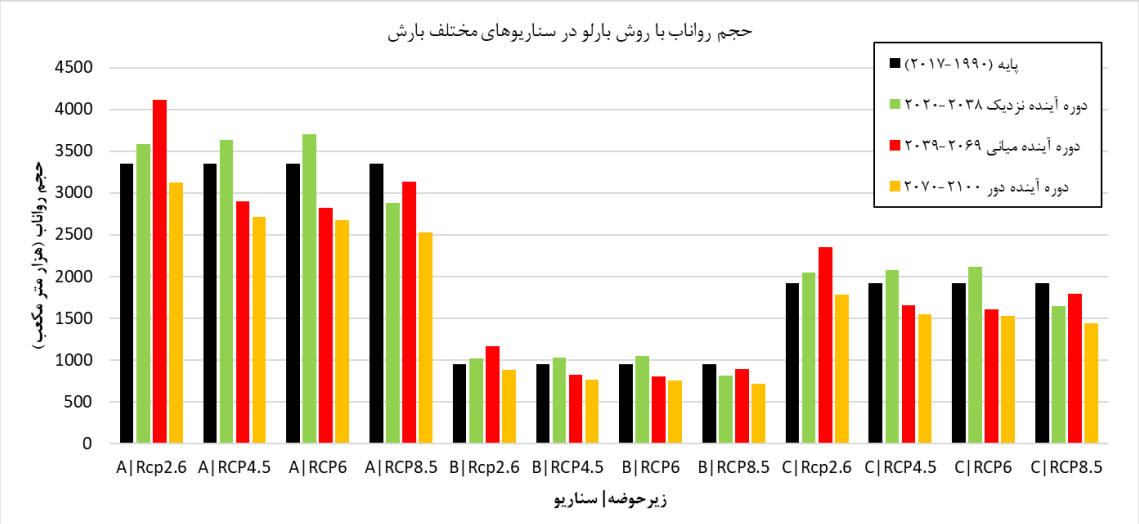
نتایج حاصل از تحلیل میزان متوسط رواناب سالانه در زیرحوزه‌های آبخیز A، B و C با استفاده از روش بارلو و تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم شامل RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 برای دوره‌های زمانی آتی به دقت مورد بررسی قرار گرفت که جزئیات این ارزیابی در شکل ۷ ارائه شده است. در دوره مبنا (۲۰۱۷–۱۹۹۰)، مقادیر متوسط رواناب سالانه برای زیرحوزه‌های آبخیز A، B و C به ترتیب برابر با ۳۳۵۱، ۹۴۸ و ۱۹۱۵ هزار متر مکعب برآورد شد. بررسی تغییرات آتی رواناب در دوره نزدیک (۲۰۳۸–۲۰۲۰) نشان می‌دهد که در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP6، افزایش میزان رواناب به میزان ۵/۶ تا ۴/۹ درصد پیش‌بینی می‌شود. با این حال، سناریوی RCP8.5 در همین دوره، کاهش قابل توجهی در حدود ۴/۱۶ تا ۷/۱۶ درصد در میزان رواناب را نشان می‌دهد. در دوره میانی آینده (۲۰۶۹–۲۰۳۹)، تنها سناریوی RCP2.6 افزایش نسبتاً چشمگیری (۴/۲۱ درصد) در رواناب را پیش‌بینی می‌کند، در حالی که سایر سناریوها، یعنی RCP4.5، RCP6 و RCP8.5، همگی کاهش رواناب را بین ۵/۱۲ تا ۵/۱۴ درصد نشان می‌دهند. در دوره دور آینده (۲۱۰۰–۲۰۷۰)، روند کاهشی رواناب در تمامی سناریوهای مورد مطالعه تداوم یافته و تشدید می‌شود، به طوری که بیشترین میزان کاهش (۷/۲۸ تا ۱/۲۹ درصد) در این دوره مربوط به سناریوی RCP8.5 خواهد بود.

این یافته‌ها به وضوح بیانگر آن است که پدیده تغییرات اقلیمی، به ویژه تحت سناریوی انتشار بالای RCP8.5، تأثیرات عمیق و قابل ملاحظه‌ای بر کاهش میزان رواناب در آینده این منطقه خواهد گذاشت. لازم به ذکر است که زیرحوزه آبخیز A به دلیل وسعت بیشتر و ویژگی های فیزیکی خاص خود، بیشترین میزان تغییرات در رواناب را در مقایسه با سایر زیرحوزه‌های آبخیز تجربه خواهد کرد. ارزیابی‌های صورت گرفته، انطباق قابل توجه نتایج حاصل از روش بارلو را با شرایط واقعی حاکم بر منطقه مورد مطالعه تأیید می‌نماید. این همخوانی قابل قبول، ناشی از توجه دقیق روش بارلو به ویژگی‌های محلی و هیدرولوژیکی از قبیل نوع خاک، پوشش گیاهی غالب و میزان شیب در زیرحوزه‌های آبخیز مختلف می‌باشد. برای مثال، در زیرحوزه‌های آبخیزی که دارای شیب‌های تندتری هستند مانند زیرحوزه آبخیز B، روش بارلو به طور صحیح میزان رواناب بیشتری را در مقایسه با زیرحوزه‌های آبخیز با توپوگرافی مسطح‌تر مانند زیرحوزه آبخیز A برآورد نموده است. این نتایج به دست آمده، تطابق معناداری با مشاهدات میدانی و داده‌های تاریخی رواناب ثبت شده در منطقه مورد مطالعه دارد. علاوه بر این، روش بارلو توانسته است به نحو مطلوبی تأثیر رخدادهای بارندگی رگباری و سنگین، که از ویژگی‌های اقلیمی غالب در منطقه کاشمر به شمار می‌رود، را در فرآیند تخمین میزان رواناب لحاظ نماید که این امر بر دقت و قابلیت اعتماد نتایج افزوده است.

با تمام این تفاسیر، اذعان به محدودیت‌های روش بارلو برای ارائه یک تصویر جامع ضروری است. این روش، با وجود کارایی بالا در ارزیابی‌های اولیه، یک مدل تجربی است و فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی مانند تأثیر رطوبت اولیه خاک و شدت زمانی بارش در طول یک رویداد را به‌صورت ساده‌شده در نظر می‌گیرد. در مقایسه با روش‌های رایج دیگر مانند شماره منحنی SCS (SCS-CN)، روش بارلو تاکید بیشتری بر طبقه‌بندی شیب و ویژگی‌های سطحی حوزه دارد، در حالی که روش SCS-CN بیشتر بر گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و کاربری اراضی متمرکز است. با توجه به اینکه حوزه آبخیز کاشمر دارای توپوگرافی بسیار متغیر و شیب‌های تند و ناهمگن است، انتخاب روش بارلو که به این ویژگی‌ها حساسیت بالایی نشان می‌دهد، برای اهداف این پژوهش ارجحیت داشت. با این حال، مطالعات آتی می‌توانند با به‌کارگیری مدل‌های فیزیکی توزیعی و مقایسه نتایج، به درک دقیق‌تری از پاسخ هیدرولویکی این حوزه دست یابند.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]



شکل ۷- میزان حجم رواناب با روش بارلو در سناریوهای مختلف بارش در زیرحوزه‌های آبخیز مورد مطالعه

Figure 7- Runoff volume by Barlow method in different rainfall scenarios in the studied sub-watersheds

نتایج به‌دست آمده تصویری هشداردهنده از آینده منابع آب سطحی در حوزه کاشمر ترسیم می‌کند. کاهش حدوداً ۳۰ درصدی رواناب تحت سناریوی RCP8.5 صرفاً یک خروجی عددی نیست، بلکه پیامد مستقیم و هم‌افزای کاهش بارش (ورودی سیستم) بر روی یک منظره ذاتاً آسیب‌پذیر (ویژگی‌های فیزیکی حوزه) است. در واقع، شیب تند و پوشش گیاهی فقیر که در بخش اول نتایج شناسایی شد، به‌عنوان یک مکانیسم تقویت‌کننده عمل کرده و اثرات کاهش بارش را بر حجم رواناب تشدید می‌کند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات جدیدتر در سایر حوزه‌های آسیب‌پذیر ایران و جهان همخوانی دارد. برای مثال، پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) در یک مطالعه مروری جامع نشان دادند که مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل حساسیت بالای فرآیندهای هیدرولوژیکی به تغییرات اندک در بارش و افزایش تبخیر، در خط مقدم آسیب‌پذیری ناشی از تغییر اقلیم قرار دارند. پیامدهای این کاهش رواناب برای منطقه کاشمر چندوجهی است. اولاً، امنیت آبی شهری و کشاورزی به طور مستقیم به خطر می‌افتد. کاهش جریان‌های سطحی به معنای کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و افت آبدهی منابع موجود است که می‌تواند معیشت مبتنی بر کشاورزی محدود منطقه را نابود سازد. ثانیاً، این نتایج می‌تواند به یک پارادوکس هیدرولوژیکی منجر شود: کاهش حجم کل رواناب سالانه ممکن است با افزایش فرکانس سیلاب‌های ناگهانی و مخرب همراه باشد. زیرا تغییر الگوهای بارش به سمت رگبارهای کوتاه‌مدت و شدید، بر روی اراضی نفوذناپذیر و پرشیب منطقه، به سرعت به سیلاب تبدیل می‌شود. در نهایت، ضمن تأیید کارایی روش بارلو به‌عنوان یک ابزار برآورد اولیه در مناطق فاقد آمار کافی، باید محدودیت‌های آن را نیز در نظر گرفت.

نتیجه‌گیری

به طور جامع، یافته‌های پژوهش حاضر آشکار می‌سازد که پدیده چندوجهی تغییر اقلیم، به‌عنوان یک محرک اساسی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تحول میزان رواناب سطحی در حوزه آبخیز شهری کاشمر ایفا می‌نماید. تحلیل دقیق سناریوهای گوناگون انتشار گازهای گلخانه‌ای، شامل RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5، نمایانگر آن است که عوامل متعددی به طور هم‌افزا در شکل‌دهی الگوی رواناب در این حوزه آبخیز دخیل هستند. در حالی که سناریوی خوش‌بینانهRCP2.6 ، با پیش‌بینی افزایش اندک در میزان بارش سالانه، ظرفیت بالقوه برای افزایش رواناب را در برخی بازه‌های زمانی مشخص بروز می‌دهد، سناریوهای با انتشار بالاتر، به ویژهRCP4.5 ، RCP6و سناریوی بدبینانهRCP8.5 ، روندی کاهشی محسوس در بارش سالانه و به تبع آن، کاهش چشمگیر حجم رواناب را در آینده‌ای نه چندان دور نوید می‌دهند. در کنار اثرات تغییر اقلیم، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تجربی بارلو، به روشنی نشان می‌دهد که خصوصیات هیدرولوژیکی منحصربه‌فرد حوزه آبخیز، شامل نوع پوشش اراضی و میزان شیب، به‌عنوان عوامل محوری در تعیین کمیت رواناب سطحی عمل می‌کنند. به طور خاص، مناطقی از حوزه که دارای اراضی با کیفیت نامناسب و شیب‌های تند هستند، استعداد بیشتری برای تولید رواناب قابل توجه و افزایش خطر وقوع سیلاب‌های مخرب از خود نشان می‌دهند. این یافته‌های مهم، با نتایج مطالعات مشابهی که در سایر مناطق با شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی نزدیک به کاشمر انجام شده است، همخوانی قابل توجهی دارد و بدین ترتیب، بر ضرورت توجه ویژه به ویژگی‌های ذاتی هر حوزه آبخیز در طراحی و اجرای راهبردهای مؤثر مدیریت رواناب تأکید می‌ورزد. در یک جمع‌بندی نهایی، دستاوردهای این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی آتی و ویژگی‌های ساختاری حوزه آبخیز شهری کاشمر، هر دو به طور توأمان بر میزان رواناب تولیدی در این منطقه اثرگذار هستند. این

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

درک عمیق و جامع از عوامل مؤثر بر رواناب، می‌تواند به‌عنوان بنیانی استوار در تدوین برنامه‌ریزی‌های دقیق و کارآمد در زمینه مدیریت پایدار منابع آب، کاهش پیامدهای منفی ناشی از تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌شده و ارتقاء سطح تاب‌آوری حوزه آبخیز در برابر تحولات آتی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

با این حال، لازم است محدودیت‌های این مطالعه نیز در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد. پیش‌بینی‌های اقلیمی ذاتاً با عدم قطعیت همراه هستند که از ساختار مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) و سناریوهای انتشار نشأت می‌گیرد. همچنین، این پژوهش بر پایه مجموعه داده‌های CMIP5 بنا شده و مطالعات آتی با بهره‌گیری از نسل جدید مدل‌ها (CMIP6) می‌توانند به درک دقیق‌تری از دامنه عدم قطعیت‌ها کمک کنند. علاوه بر این، روش هیدرولویکی بارلو یک مدل تجربی است و ساده‌سازی‌هایی را در فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی لحاظ می‌کند. از این رو، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با استفاده از مدل‌های فیزیکی توزیعی و واسنجی آن‌ها با داده‌های مشاهداتی، نتایج این تحقیق را تکمیل نموده و به اعتبارسنجی دقیق‌تر آن‌ها بپردازند.

ملاحظات اخلاقی

دسترسی به داده‌ها: داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

حمایت مالی: این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه بیرجند بوده است.

مشارکت نویسندگان: کوثر همت‌جو به‌عنوان دانشجو و نویسنده اول، هادی معماریان به‌عنوان استاد راهنما و نویسنده مسئول و سایر افراد به‌عنوان اساتید مشاور.

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

سپاس‌گزاری: بدین‌وسیله از حمایت های مادی و معنوی دانشگاه بیرجند تشکر و قدردانی می شود.

منابع

۱. اصغرزاده، علی، ثابت دیزاوندی، لیلا، جانبازقبادی، غلامرضا، و زینل‌زاده، مهدیه. (۱۳۹۸). تحلیل آماری پارامترهای دما و بارش ایستگاه سینوپتیک کاشمر در مرور زمان. مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست. ترشیز (کاشمر)، ایران. https://civilica.com/doc/905075

۲. آقابیگی، نیر، اسمعلی‌عوری, اباذر، مصطفی‌زاده، رئوف و گلشن، محمد. (۱۳۹۸). اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با مدل هیدرولوژیکی IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان اردبیل. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۳۸)، ۱۷۶-۱۸۷. doi: 10.22125/iwe.2019.100750

۳. آقاخانی افشار، امیرحسین، حسن‌زاده، یوسف، بسالت‌پور، علی‌اصغر و پوررضا بیلندی، محسن. (۱۳۹۵). ارزیابی سالیانه مؤلفه‌های اقلیمی حوزه آبخیز کشف‌رود در دوره‌های آتی با استفاده از گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۶)، ۲۱۷-۲۳۳. doi: 10.22069/jwfst.2017.11186.2553

۴. ذهبیون، باقر، گودرزی، محمدرضا، و مساح بوانی، علیرضا. (۱۳۸۹). کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱(۳- ۴)، ۴۵-۶۰. SID. https://sid.ir/paper/213097/fa

۵. رحیم‌پور، محدثه، تاجبخش، سیدمحمد، معماریان، هادی، و آقاخانی افشار، امیرحسین. (۱۳۹۶، تیر). ارزیابی تولید رواناب حوزه‌های آبخیز مناطق نیمه خشک تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوزه زشک-ابرده). دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران. شهرکرد، ایران. https://civilica.com/doc/661428

۶. رضایی زمان، مصطفی، مرید، سعید و دلاور، مجید. (۱۳۹۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدروکلیماتولوژی حوضه سیمینه رود. *آب و خاک*، ۲۷(۶)، ۱۲۴۷-۱۲۵۹. doi: 10.22067/jsw.v0i0.21814

۷. عباسی, فاطمه , ملبوسی, شراره , بابائیان, ایمان , اثمری, مرتضی و برهانی, رضا. (۱۳۸۹). پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G. *آب و خاک*، ۲۴(۲)، ۲۱۸-۲۳۳. doi: 10.22067/jsw.v0i0.3218

۸. فرخزاده، بهنوش، چوبه، سپیده، نوری، حمید، و گودرزی، مسعود. (۱۳۹۷). بررسی اثر تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر رواناب سطحی حوزه آبخیز بالیقلو چای اردبیل. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۰(۳)، ۳۱۸-۳۳۱. https://sid.ir/paper/234693/fa

۹. نادی، مهدی، جامعی، مژده، بذرافشان، جواد و جنت رستمی، سمیه. (۱۳۹۱). ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه (مطالعه موردی: استان خوزستان). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۴(۴), ۱۱۷-۱۳۰. doi: 10.22059/jphgr.2012.30245

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

References

1. Abbasi, F., Malboosi, S., Babaeian, I., Asmeri, M., & Borhani, R. (2010). Prediction of climatic changes in South Khorasan during 2010-2039 using statistical downscaling of ECHO-G model outputs. *Water and Soil*, 24(2), 218-233. [In Persian]
2. Aghabigi, N., Esmaeili Aoori, A., Mostafizadeh, R., & Golshan, M. (2019). Effects of climate change on runoff using the IHACRES hydrological model in some watersheds of Ardabil province. *Irrigation and Water Engineering Journal*, 10(38), 176-187. [In Persian]
3. Aghakhani Afshar, E., Hassan Zadeh, Y., Basaltpour, A. A., & Pourreza Bilandi, M. (2016). Annual assessment of climatic components in the Koshfroud watershed under future periods using the fifth IPCC report. *Water and Soil Conservation Research Journal*, 23(6), 217–233. [In Persian]
4. Altdorff, D., Bechtold, M., van der Kruk, J., & Vereecken, H. (2017). Mapping peatland hydrology with ground-penetrating radar: A review. *Vadose Zone Journal*, 16(1), 1-15.
5. Asgharzadeh, A., Sabit Dizavandi, L., Janbazghobadi, G., & Zeynalzadeh, M. (2019). Statistical analysis of temperature and precipitation parameters at Kashmar synoptic station over time. *Proceedings of the First National Conference on Applied Research in Agricultural Sciences, Natural Resources and Environmental Engineering. Torshiz (Kashmar), Iran*. [In Persian]
6. Barlow, K. (1944). An empirical method of runoff estimation in catchment areas. Government of India Press.
7. Box, G. E., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (2015). Time series analysis: Forecasting and control (4th ed.). Wiley.
8. Chawla, I., & Mujumdar, P. P. (2015). Isolating the impacts of land use and climate change on streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(8), 3633-3651.
9. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.
10. Croke, B. F. W., Merritt, W. S., & Jakeman, A. J. (2005). A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 291(1-2), 115-131.
11. Farokhzadeh, B., Choubeh, S., Noori, H., & Goudarzi, M. (2018). Investigation of the effect of climate change and land use on surface runoff in the Baliqlu Chay watershed of Ardabil. Watershed Management and Engineering Journal, 10(3), 318-331. [In Persian]
12. Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M. and Ermolieva, T. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251–267.
13. Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D.S., Dai, H., Hijioka, Y. and Kainuma, M. (2017). SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 268–283.
14. Gabr, M. E. (2023). Flash flood hazard assessment in the Red Sea region, Egypt: a comparative analysis of AHP and HEC-HMS in urban catchments. *Journal of Arid Environments*, 215, 104997.
15. Gleckler, P. J., Taylor, K. E., & Doutriaux, C. (2008). Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6).
16. Gómez, M. J., Barboza, L. A., Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2023). Comparison of indicators to evaluate the performance of climate models. *arXiv preprint arXiv*:2307.04658.
17. Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182–196.
18. Huyen, N. T. M., Dung, T. T., Binh, C. T. T., & Duong, V. T. (2017). Impacts of climate change on streamflow in the Ba River basin, Vietnam. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 22-38.
19. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press.
20. Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). Griffin.
21. Kriegler, E., Bauer, N., Popp, A., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., Baumstark, L., Bodirsky, B.L., Hilaire, J., Klein, D. and Mouratiadou, I. (2017). Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 297–315.
22. Kristvik, E., Alfnes, E., & Deelstra, J. (2018). Climate change impacts on hydrological processes and water resources in Norway. *Hydrology Research*, 49(1), 1-18.
23. Littlewood, I. G., Croke, B. F. W., Jakeman, A. J., & Sivapalan, M. (2007). The role of rainfall and land use in determining hydrologic response from small catchments. *Hydrological Processes*, 21(20), 2691-2701.
24. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
25. Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383–1394.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]

26. Milly, P.C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P. and Stouffer, R.J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574.
27. Nadi, M., Jamei, M., Bazrafshan, J. and Janatrostami, S. (2012). Evaluation of different methods for interpolation of mean monthly and annual precipitation data (Case study: Khuzestan Province). *Physical Geography Research*, 44(4), 117-130. [In Persian]
28. Nasseri, M., Zahabiyoun, B., & Golian, S. (2017). Projection of climate change impacts on streamflow using SDSM and SWAT models (Case study: Zayandehroud basin, Iran). *Water Resources Management*, 31(10), 2999-3015.
29. Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 1068-1072.
30. Pan, S., Liu, D., Wang, Z., & Li, Y. (2017). Runoff responses to climate and land use/cover changes under future scenarios. *Water*, 9(6), 1-15.
31. Rahimpour, Mahdeh; Tajbakhsh, Seyed Mohammad; Me'marian, Hadi; & Aghakhani Afshar, Amir Hossein. (2017, July). Evaluation of Runoff Generation in Watersheds of Semi-Arid Regions under Climate Change Conditions (Case Study: Zeshk-Abarde Watershed). *The Second National Conference on Iranian Hydrology. Shahrekord, Iran*. [In Persian]
32. Rezaee, M., & Morid, S. (2014). Impact of Climate Change on Water Resources on Simineh Rud Basin and Its Inflows to Lake Urmia. *Water and Soil*, 27(6), 1247-1259. [In Persian]
33. Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O. and Lutz, W. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168.
34. Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G. and Krey, V. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, 8(4), 325–332.
35. Sadeghi, R., Tabari, H., & Zohrabi, N. (2022). Performance evaluation of CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over Iran. *International Journal of Climatology*, 42(5), 2895-2915.
36. Shahid, M., Rahman, K. U., Haider, S., & Gabriel, H. F. (2021). Quantitative Assessment of Regional Land Use and Climate Change Impact on Runoff across Gilgit Watershed. *Environmental Earth Sciences*, 80(3), 1-15.
37. Singh, V. P. (1992). Elementary hydrology. Prentice Hall.
38. Singha, S., Pasupuleti, S., & Singha, S. (2024). A novel integrated approach for assessing the combined impacts of climate change and LULC on watershed hydrology of a semi-urban catchment in eastern India. *Science of The Total Environment*, 912, 169004.
39. Tan, M. L., & Gan, T. Y. (2015). Impact of climate variability and change on streamflow and sediment yield in the Johor River Basin, Malaysia. *Journal of Hydrology*, 527, 462-477.
40. Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R. and Davies, P. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561.
41. Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., Van Vliet, M.T.H., Yillia, P., Ringler, C.J.G.M.D. and Burek, P. (2017). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 10(1), 237-266.
42. Wilby, R. L., & Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in physical geography*, 21(4), 530-548.
43. Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., & Lettenmaier, D. P. (2024). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic change*, 62(1-3), 189-216.
44. Zahabiyon, B., Goudarzi, M. R., & Masah Bovani, A. (2010). Application of the SWAT model in estimating future runoff under climate change scenarios. Climatology Research Journal, 1(3&4), 43-58. [In Persian]
45. Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y., & Kanani, R. (2011). Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*, 78(3-4), 137-146.
46. Zhang, X., Liu, Y., & Chen, Y. (2024). A global review on hydrological responses to climate change in drylands. *Earth-Science Reviews*, 251, 104725.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-02-20]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7]