

Research Paper

Simultaneous Impacts of Climate and Land Use Changes on Flood Hydrographs: A Comparative Analysis of CMIP5 and CMIP6 Climate Scenarios — Case Study: AqQala, Iran

Arash Majidi¹, Seyed-Abbas Hosseini^{2*}, Sara Nazif³, Bagher Ghermezcheshmeh⁴

1. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: majidi.arash@gmail.com

2. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

3. School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: snazif@ut.ac.ir

4. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran, Email: baghergh@gmail.com

Received: 2024/11/15

Revised: 2024/12/02

Accepted: 2025/01/19

Use your device to scan and read
the article online



DOI:

[10.71632/wej.2025.1110569](https://doi.org/10.71632/wej.2025.1110569)

Keywords:

Agriculture, Water well, Conflict perception, Conflict management

Abstract

Introduction: Population growth and social development have significantly intensified pressures on land and natural resources, profoundly affecting climate and land use changes. This study investigates the impacts of these changes on flood hydrographs for various return periods in the AqQala region, Iran, under conditions of deep uncertainty regarding future scenarios.

Methods: The descriptive-survey research method was used. The data-gathering tool was the questionnaire, which its validity was verified through face validity. The study population included farmers who used shared water wells to provide water for agriculture (N=478). Using Cochran's formula, the sample size was 214 farmers who were selected by the simple random sampling method. Data were analyzed using SPSS software.

Findings: Both CMIP5 and CMIP6 scenarios project increases in future precipitation and temperature, with CMIP5 predicting greater precipitation changes than CMIP6. If the current land use change trend continues, the study area will experience an expansion in urban and barelands and a reduction in forest, agricultural, and pasture areas, resulting in larger floods. The analysis reveals that land use changes exert a greater influence on future floods than climate change alone. Combined effects of climate and land use changes lead to substantial increases in flood peak discharge, with projections showing a 128% rise under CMIP5 and 38% under CMIP6 worst-case scenarios for a 100-year return period. This underscores the necessity of integrating both factors into adaptive pathway planning. Advanced modeling techniques are crucial for enhancing predictive accuracy and guiding policymakers in devising robust strategies to mitigate flood damages under deep uncertainty.

Citation: Majidi A, Hosseini SA, Nazif S, Ghermezcheshmeh B. Simultaneous Impacts of Climate and Land Use Changes on Flood Hydrographs: A Comparative Analysis of CMIP5 and CMIP6 Climate Scenarios — Case Study: AqQala, Iran. Water Resources Engineering Journal. 2025; 18(65): 30- 47.

***Corresponding author:** Seyed Abbas Hosseini

Address: Dep. of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Tell: +989122805467

Email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Industrial development and population growth have accelerated deforestation and environmental degradation, significantly driving up greenhouse gas emissions over recent decades. The effects of climate change have become increasingly pronounced, particularly in low-latitude regions like Iran, where critical variables such as temperature and precipitation are experiencing notable shifts. Flood characteristics, heavily influenced by the geographic and climatic conditions of the study area, necessitate methodologies specifically tailored to distinct research objectives. Climate change alters the spatial and temporal distribution of precipitation, directly affecting the availability, quality, and management of water resources. Simultaneously, land use changes significantly influence flood magnitude and the resulting damages.

This study examines the combined impacts of climate change and land use change on future flood hydrographs in the AqQala region, employing comparative analyses under CMIP5 and CMIP6 scenarios. By leveraging advanced climate models, including the dynamically enhanced CMIP6 framework and its SSP scenarios, this research delivers more accurate projections of future climate conditions. The urgency of this investigation is underscored by recent catastrophic flooding events in Iran, such as the 2019 floods in Golestan and Mazandaran provinces, which highlighted the vulnerabilities of current flood management systems. The findings emphasize the necessity of integrating climate and land use change considerations into adaptive strategies, enabling decision-makers to mitigate future flood risks effectively under conditions of deep uncertainty.

Materials and Methods

This study was conducted in three main phases: 1) predicting precipitation and temperature (both minimum and maximum) using climate models; 2) forecasting land use changes for the years 2050 and 2080; and 3) conducting hydrological modeling to generate hydrographs under defined

scenarios. Climate projections were based on the CMIP5 (RCP2.6 and RCP8.5) and CMIP6 scenarios (SSP126, SSP370, SSP585), which were downscaled using LARS-WG. Historical land use maps from 1991, 2002, and 2018 were classified using satellite imagery and ENVI software, while future maps were predicted using TerrSet's Land Change Modeler (LCM). Hydrological modeling was implemented with Autodesk SSA for rainfall-runoff simulation. The study focuses on the Gorganrud Basin, located in Golestan Province, Iran, which covers an area of approximately 10,000 km² upstream of AqQala. This basin experiences annual rainfall ranging from 250 to 550 mm and shows significant seasonal flow variations. The rainfall frequency analysis was performed using HyfranPlus, and synthetic hyetographs were developed based on regional Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves. Physiographic parameters, including Curve Number (CN) values and concentration time, were derived using ArcGIS and Arc-Hydro Tools. Various scenarios combining climate and land use changes were defined to evaluate future flood risks and to assess adaptive strategies for flood management. Model validation was carried out using statistical metrics such as R², NSE, and the kappa coefficient, ensuring robust predictions for future conditions.

Findings

The study used a 30-meter resolution SRTM Digital Elevation Model (DEM) to map a 14.5 km stretch of the Gorganrud River in AqQala County. Various maps, including flow direction, drainage networks, sub-basin delineation, and slope zoning maps, were created using ArcGIS and the Arc-Hydro extension. Land use maps for the years 2018, 2050, and 2080 were overlaid with soil hydrological groups to generate Curve Number (CN) maps. The concentrations and lag times were calculated using the NRCS method within ArcGIS, and land use areas for the specified years were categorized into forest, agriculture, urban, barren land, pasture, and water. The results indicate that urban and barren land are expected to expand, while forest, agricultural, and rangeland areas are projected to decline by

2050 and 2080. The weighted average CN for the study area increases from 77.84 in 2018 to 79.94 in 2050 and 81.09 in 2080. This rise leads to reduced lag and concentration times, ultimately increasing runoff and flood risks. The rainfall-runoff model was validated using historical hydrometric data for various return periods.

Discussion

Simulations under eight CMIP5 and fifteen CMIP6 scenarios revealed significant variations in peak discharge values. For CMIP5, peak flows under a 100-year return period ranged from 965 to 1450 m³/s, with the highest flows occurring in scenarios F08, F06, and F07. Conversely, CMIP6 scenarios showed lower peak flows, ranging from 454 to 876 m³/s, with S12, S05, and S07 presenting the highest peaks. Notably, despite higher projected rainfall in certain scenarios, peak discharges under CMIP6 were lower due to reduced fluctuations in annual rainfall. On the other hand, changes in land use consistently increased peak discharges across all scenarios. Comparing the scenarios representing land use for 2018, 2050, and 2080 (S01, S05, and S12), there is a steady increase in peak flow. Overall, land use change has a more pronounced impact on flood magnitudes than climate change in the CMIP6 scenarios. The peak discharge increases by 128% under the worst-case CMIP5 scenario and by 38% under the CMIP6 scenarios. These findings align with previous studies and highlight CMIP6's enhanced accuracy due to advanced methodologies. The results affirm the critical influence of both climate and land use changes on future hydrological responses.

Conclusion

This study examines the combined effects of climate change and land use changes on future flood hydrographs in AqQala. Climate models CMIP5 and CMIP6 predict increases in both rainfall and temperature, with CMIP5 forecasting higher levels of rainfall. Current land use trends show a rise in urban and bare land areas, while forests, agriculture, and pasture lands are declining. This shift reduces soil infiltration and increases surface runoff,

leading to larger and more destructive floods. The findings emphasize the need to address both climate and land use changes in flood management strategies. Improved modeling techniques enhance predictive accuracy, providing policymakers with the tools to develop adaptive measures in the face of significant uncertainty. Comprehensive assessments of these dual impacts are crucial for creating effective strategies to mitigate flood risks and damages.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Arash Majidi, Seyed Abbas Hosseini. Methodology and data analysis: Arash Majidi, Seyed Abbas Hosseini. Supervision and final writing: Sara Nazif, Bagher Ghermezcheshmeh.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تاثیر همزمان تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل و مقایسه نتایج سناریوهای اقلیمی CMIP5 و CMIP6- مطالعه موردی: منطقه آق قلا

آرش مجیدی^۱، سید عباس حسینی^{۲*}، سارا نظیف^۳، باقر قرمزچشمه^۴

۱. دانش آموخته دکتری، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. دانشیار دانشگاه تهران، دانشکده فنی، تهران، ایران

۴. دانشیار پژوهشکده حفاظت و خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: رشد جمعیت و توسعه جامعه نقش مهمی در افزایش فشارها بر اراضی و منابع طبیعی دارند، که این فشارها می‌توانند بر تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی تأثیرات عمیقی بگذارند. در شرایطی که عدم قطعیت عمیقی در مورد شرایط آینده وجود دارد، این پژوهش، اثرات تغییرات اقلیم و کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل را برای دوره‌های بازگشت مختلف در منطقه آق قلا، ایران ارزیابی می‌کند.

روش: شبیه سازی تغییرات اقلیم با استفاده از مدل CMCC-ESM2 تحت سناریوهای اقلیمی SSP126، SSP370 و SSP585 از CMIP6 و همچنین مدل CanESM2 تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 از CMIP5 انجام شده است. مدل LARS-WG برای ریز مقیاس سازی اطلاعات اقلیمی استفاده شده است و نقشه کاربری زمین از طریق تصاویر ماهواره‌ای Landsat در ENVI 5.3 پردازش گردیده است. روش زنجیره مارکوف برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ از طریق TerrSet پیاده سازی شده است. هیدروگراف‌های سیل توسط مدل فیزیکی SSA تولید شده‌اند.

یافته‌ها: نتایج دو سناریوی اقلیمی CMIP5 و CMIP6، حاکی از افزایش مقادیر بارش و دما در آینده می‌باشد. پیش بینی افزایش بارش در CMIP5 بیشتر از CMIP6 می‌باشد. به شرط تداوم روند تغییر کاربری در محدوده مورد مطالعه، در آینده با افزایش مساحت اراضی شهری و بایر و کاهش اراضی جنگلی، کشاورزی و مرتع، مواجه خواهیم بود که در نتیجه سیلاب‌های بزرگتری را به همراه خواهد داشت. همچنین تأثیر تغییر کاربری اراضی بر سیلاب‌های آینده بیشتر از تغییرات اقلیمی است. این مطالعه نشان می‌دهد که تأثیرات همزمان تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل‌های آینده قابل ملاحظه است، بدین صورت که مقادیر افزایش دبی پیک سیلاب در بدترین سناریوهای مربوط به CMIP5 و CMIP6 به ترتیب ۱۲۸٪ و ۳۸٪ در مقایسه با وضع موجود در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله می‌باشند.

نتیجه‌گیری: برای تدوین راه‌های سازگاری و مدیریت آسیب‌پذیری‌ها، لحاظ تأثیر همزمان تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی ضروری است. استفاده از مدل‌ها و روش‌های بروز می‌تواند دقت پیش بینی‌ها را افزایش داده و برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران را در ارائه راهکارهای سازگاری مؤثرتر برای کاهش خسارات و تلفات ناشی از سیل‌های آینده در شرایط عدم قطعیت عمیق یاری دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.71632/wej.2025.1110569

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم- تغییر کاربری اراضی- CMIP5- CMIP6- هیدروگراف سیلاب.

* نویسنده مسئول: سید عباس حسینی

نشانی: دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تلفن: ۰۹۱۲۲۸۰۵۴۶۷

پست الکترونیکی: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

مقدمه

توسعه صنعتی و رشد جمعیت باعث تسریع کار درختزایی و تخریب محیط زیست شده و نقش قابل توجهی در افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه گذشته داشته است. اثرات تغییرات اقلیمی در مناطق با عرض جغرافیایی کم، مانند ایران، بر متغیرهایی مانند دما و بارش تشدید یافته است (۱،۲). به طور کلی، ویژگی‌ها و مقادیر سیل‌ها به مکان و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه بسیار وابسته هستند و بنابراین روش‌ها و رویکردهای مورد استفاده توسط محققان مختلف بر اساس اهداف تحقیقی آن‌ها متفاوت است. تغییرات اقلیمی می‌تواند توزیع مکانی و زمانی بارش را تغییر دهد و در نتیجه ویژگی‌های کمی و کیفی منابع آبی را تحت تأثیر قرار دهد (۳،۴). سیلاب به عنوان یک پدیده طبیعی حائز اهمیت همواره مطرح بوده و برآورد دقیق آن از طریق روش‌های مختلف برای مدیریت خسارات و تلفات ناشی از آن و همچنین اجرای اقدامات پیشگیرانه مهم می‌باشد.

تغییرات اقلیمی به شدت بر مقادیر بارش و بالطبع مقیاس سیل‌ها و خسارات ناشی از آن‌ها تأثیر گذاشته است (5,6,7,8,9,10). در رابطه با تغییرات جهانی اقلیم و رشد سریع جمعیت، تأثیر سیلاب‌های ترکیبی بر شهرها تقویت خواهد شد (11,12,13). بر اساس گزارش IPCC، تغییرات قابل توجهی در دمای جو، بارش، رطوبت و گردش هوا پیش‌بینی می‌شود که منجر به افزایش رخدادهای شدید، از جمله سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها، موج‌های گرما، بارش‌های شدید و طوفان‌های شدید می‌شود (14,15). در سال‌های اخیر، تغییرات کاربری اراضی نیز به شدت بر مقیاس سیل‌ها و خسارات ناشی از آن‌ها تأثیر گذاشته است (۱۶،۱۷). بسیاری از محققان تأکید کرده‌اند که تغییرات کاربری اراضی تأثیر اساسی بر مقیاس خسارت سیل دارد (18,19,20,21,22). برخی دیگر نیز به نتیجه رسیده‌اند که تغییرات کاربری اراضی نسبت به تغییرات اقلیمی تأثیر بیشتری را بر شدت سیل دارد (۲۳،۲۴).

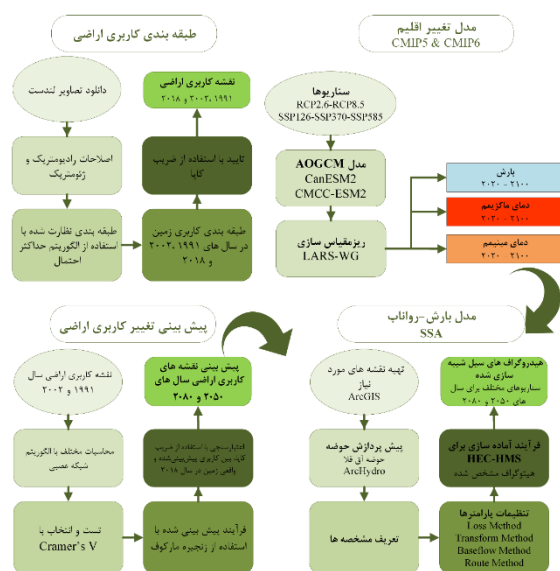
تأثیرات تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی از جنبه آب سطحی و زیرزمینی، به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد آب سطحی، این تأثیرات به صورت مستقل یا به صورت همزمان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج اکثر مطالعات نشان‌دهنده افزایش مشخصات سیل است. به عنوان مثال، تأثیر تغییرات اقلیمی به تنهایی، توسط (۲۵) مورد مطالعه قرار گرفته است و سطوح انتشار گازهای گلخانه‌ای بالاتر منجر به افزایش شدیدتر در پیش‌بینی تمام بارش‌ها و ریسک‌های سیل در آینده نسبت به مشاهدات گذشته می‌شود. برای تأثیر تغییرات کاربری اراضی به تنهایی، مدل هیدرولوژیک توسعه یافته

توسط (۲۶) نشان‌دهنده افزایش پتانسیل سیلاب به تناسب تغییر در شهرنشینی، همراه با بزرگی رویدادهای بارش و ویژگی‌های حوضه آبریز است. با این حال، برخی تحقیقات محدود نشان‌دهنده کاهش یا تغییرات بی‌اهمیت در ویژگی‌های سیل هستند (۲۷). در تعداد محدودی از تحقیقات که هر دو تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، تأثیرات ناچیز آن‌ها بر مقیاس سیل‌ها گزارش شده است (۲۸)، اما در مقابل در تعدادی از تحقیقات که هر دو تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی مورد بررسی قرار گرفته شده است، تأثیرات قابل توجه آن‌ها بر اندازه و بزرگی سیل‌ها عنوان گردیده است (29,30,31). برای مثال، در تحقیقی که توسط (۲۹) صورت گرفته است، نتایج نشان داد که با لحاظ تغییرات کاربری اراضی به تنهایی، افزایش دبی پیک سیلاب ۲۹ درصد خواهد بود در صورتی که با لحاظ تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی افزایش دبی پیک سیلاب ۳۵ درصد خواهد شد. همچنین در تحقیق انجام شده دیگری توسط (۳۱) که تأثیر همزمان اقلیم و کاربری اراضی را ارزیابی کرده‌اند، افزایش ۶۵ درصدی دبی گزارش شده است. برای تنظیمات مدل اقلیمی، تعدادی از تحقیقات از CMIP6 برای فرایندهای شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند، در حالی که بیشتر تحقیقات در این زمینه از طریق CMIP5 انجام شده است. مدل‌های CMIP6 فرآیند دینامیکی بهبود یافته با دقت بالاتر را ارائه می‌دهند و شبیه‌سازی‌های تغییرات اقلیمی آبی با استفاده از سناریوهای انتشار جدید SSP ایجاد می‌شوند (۳۲،۳۳) و در مدل‌های CMIP5، شبیه‌سازی‌های تغییرات اقلیمی آبی با استفاده از سناریوهای انتشار RCP بدست می‌آید. این در حالی است که هر کدام از مدل‌های CMIP5 و CMIP6 قابلیت شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در میان مدت و بلند مدت را دارا می‌باشند. در این تحقیقات، مدل‌های بارش-رواناب (R-R) متنوعی برای دستیابی به اهداف تحقیقاتی مختلف استفاده شده‌اند. یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن عوامل بیشتر و موثر جهت بهبود ارزیابی ویژگی سیل‌های آینده و برنامه ریزی برای سناریوهای آبی تأکید می‌کنند.

CMIP5^۳ که بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ انجام شد، بر سناریوهای تاریخی و شبیه‌سازی‌های میان‌مدت اقلیمی با استفاده از مدل‌هایی با پیچیدگی و وضوح کمتر تمرکز داشت. اما CMIP6^۲، که از سال ۲۰۱۵ آغاز شد، شبیه‌سازی‌ها را تا پایان قرن ۲۱ گسترش داده و از مدل‌های پیشرفته‌تر با وضوح بالاتر و جزئیات بیشتری استفاده کرده است. CMIP6 همچنین تأکید بیشتری بر بهبود نمایش فرآیندهای بیوژئوشیمیایی و افزایش همکاری‌های بین‌المللی دارد. هدف اصلی آن ارائه درک جامع‌تر از دینامیک بهبود یافته اقلیم و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر

³ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6¹ Rainfall-Runoff² Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

پژوهش حاضر در سه مرحله اصلی انجام شده است که در هر بخش به تفصیل توضیح داده شده است. به طور خلاصه، این مراحل به شرح زیر است: ۱- شبیه سازی بارش و دمای حداقل و حداکثر برگرفته از مدل اقلیمی، ۲- پیش بینی تغییرات کاربری اراضی سال های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰، ۳- مدل سازی هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه برای به دست آوردن هیدروگراف در هر یک از سناریوهای تعریف شده. شکل ۱ روش شناسی پژوهش را به صورت شماتیک نشان می دهد. مطابق شکل، ابتدا تغییرات اقلیمی تا سال ۲۱۰۰ به صورت سالانه پیش بینی می شود و توسط مدل اقلیم مقادیر بارندگی و دما (حداقل و حداکثر) در دو حالت CMIP5 و CMIP6 استخراج می شود. نقشه کاربری اراضی سه ساله ۱۹۹۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ از روی تصاویر ماهواره ای طبقه بندی شده است. سپس با کمک آن ها نقشه کاربری اراضی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ پیش بینی می شود. به طور همزمان در ادامه از نتایج تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم برای محاسبه هیدروگراف ها جهت مقایسه توسط SSA^۴ به عنوان یک مدل فیزیکی مدل بارش-رواناب استفاده خواهند شد.



شکل ۱- روش شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

دریای خزر از جنوب به ایران محدود می شود و حوضه مربوط به آن تقریباً ۱۱ درصد از خاک ایران را در بر می گیرد و حدود ۲۰ درصد بارندگی سالانه ایران را شامل می شود. رودخانه های قره سو و گرگانرود در جنوب شرقی دریای خزر، در استان گلستان به عنوان بخشی از حوضه آبریز دریای خزر واقع شده اند. رودخانه گرگانرود به عنوان آبراه اصلی حوضه گرگانرود از به هم پیوستن چند رودخانه تشکیل می شود. رودخانه قره سو قبل از شهر آق قلا (۳۷.۰۰°N، ۵۴.۴۵°E) به گرگانرود می پیوندد و در نهایت این رودخانه به دریای خزر می ریزد. حوضه

برای شرایط آینده است (۳۲, ۳۳, ۳۴). مطالعاتی نظیر (۳۲) به این مسئله پرداخته و تفاوت های این دو فاز را در زمینه های مختلف مثل شبیه سازی دمای جهانی، بارش ها و فرآیندهای بیوژئوشیمیایی بررسی کرده اند. (۳۴) نشان داده است که CMIP6 با استفاده از مدل های به روزتر و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای، شبیه سازی های دقیق تری از تغییرات اقلیمی در سطح جهانی ارائه می دهد و نسبت به CMIP5 تصویر جامع تری از تغییرات آینده به دست می دهد. یکی دیگر از تحقیقات، بهبود نمایش فرآیندهای بیوژئوشیمیایی در CMIP6 را بررسی کرده است. (۳۵) در تحقیق خود به این نکته پرداخته که چگونه CMIP6 توانسته است فرآیندهای مرتبط با چرخه کربن و واکنش های بیوژئوشیمیایی را به شکلی دقیق تر در مدل ها شبیه سازی کند. (۳۶) مطالعه ای را انجام داده که تمرکز آن بر پیش بینی های اقلیمی منطقه ای است. این مطالعه نشان داده که CMIP6 توانسته پیش بینی های دقیق تری از تغییرات اقلیمی در مناطق خاص نسبت به CMIP5 ارائه دهد، به ویژه در مناطق حساس به تغییرات اقلیمی مانند قطب شمال و مناطق گرمسیری.

در تاریخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ بر اثر بارندگی های شدید در استان های شمالی ایران، سیل جاری شد. این سیل ها موجب وارد شدن خسارت های مالی به ساکنین این استان ها و همچنین متأسفانه فوت ده ها نفر و مصدوم شدن صدها نفر شد. در این حادثه طبیعی، در استان های گلستان و بخشی از مازندران، طی دو روز ۳۰۰ میلی متر بارش رخ داده که برابر متوسط بارش یک ساله استان گلستان است. گزارش ها حاکی از آن است که دیگر مناطق نیز با بارشی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد کل بارش سالانه در بازه زمانی کمتر از پنج روز را شاهد بوده اند. این حجم از بارش در این منطقه در تمام دوران ثبت داده های هواشناسی، دست کم در هفتاد سال گذشته بی سابقه بوده است (۳۷). در این پژوهش تلاش داریم تاثیرات هم زمان تغییرات اقلیم و کاربری اراضی را بر روی هیدروگراف های سیل های آینده در منطقه آق قلا شبیه سازی کرده و نتایج آن ها را در دو حالت CMIP5 و CMIP6 با هم مقایسه کنیم. بنابراین، به منظور تعریف یک فرآیند تصمیم گیری مناسب و مؤثر در چنین شرایطی، توسعه روش های بروز و جامع که به برنامه ریزان و سیاست گذاران در ارائه برنامه های بلندمدت کمک می کند، حیاتی است. لذا روش های مورد استفاده در مطالعه حاضر، می تواند باعث اتخاذ یک رویکرد سیستماتیک برای تدوین صحیح استراتژی های سازگاری جهت مدیریت آسیب پذیری های ناشی از سیل های آینده در شرایط عدم قطعیت عمیق شود.

مواد و روش ها

انتخاب شده است (۳۸). مدل GCM انتخابی مربوط به CMIP6، CMCC-ESM2، از AOGCM با فاصله شبکه ۱ درجه انتخاب شده است (۳۹). شایان ذکر است که مدل‌های مختلف از جمله CanESM2، GFDL-CM3 و HadGEM2-ES از CMIP5 و همچنین مدل‌های مختلف از جمله HadGEM3، AccESSES1 و MRI-ESM2 از CMCC-ESM2 از CMIP6 در این منطقه مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌های ما نشان می‌دهد که CanESM2 و CMCC-ESM2 نتایج بهتری برای مطالعات تغییرات اقلیمی به همراه داشت. به دلیل گسترده بودن حجم مقایسه نتایج همه مدل‌ها، صرفاً مدل برتر که دارای دقت بیشتری در منطقه مورد مطالعه بود ملاک مقایسه قرار گرفت. سپس، خروجی مدل اقلیم توسط LARS-WG جهت ریزمقیاس کردن مورد استفاده قرار گرفت. LARS-WG یکی از مولدهای هواشناسی تصادفی^۸ (WGs) است که سری‌های زمانی مصنوعی روزانه تغییرات اقلیمی را تولید می‌کند. LARS-WG همچنین می‌تواند سری‌های زمانی روزانه را از سناریوهای ماهانه تغییرات اقلیمی و داده‌های اقلیمی روزانه تولید کند (۴۰). ابتدا، تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل LARS-WG و داده‌های پایه از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ مربوط به ایستگاه سینوپتیک آق قلا شبیه‌سازی شد. سپس، نتایج مدل با داده‌های مشاهده‌ای از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ اعتبارسنجی شد. پس از اعتبارسنجی مدل، دمای روزانه و سری‌های زمانی بارش در دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰ تحت دو سناریوی RCP و سه سناریوی SSP تولید شد. اعتبار مدل LARS-WG با استفاده از ضریب تعیین^۹ (R^2) (معادله ۱) و ضریب کارایی نش-شاتکلیف^{۱۰} (NSE) (معادله ۲) ارزیابی شد.

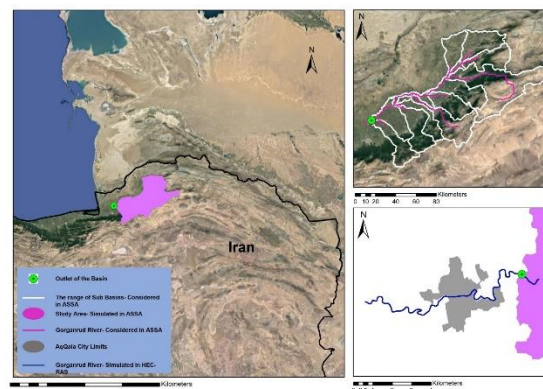
$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})(M_i - M_{avg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - M_{avg})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2} \right] \quad (2)$$

که در آن O_i و M_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، O_{avg} و M_{avg} به ترتیب مقادیر میانگین آن‌ها و N تعداد مشاهدات است.

تغییر کاربری اراضی

گرگانرود ۱۳۰۶۰ کیلومتر مربع مساحت دارد. میزان بارش حوضه از شمال به جنوب کاهش می‌یابد و تقریباً بین ۵۵۰ میلی‌متر تا ۲۵۰ میلی‌متر متغیر است. بارندگی در این حوضه در تمام فصول تقریباً به طور یکنواخت توزیع می‌شود. بر اساس گزارش ملی سیل هیئت ویژه، حوضه گرگانرود هر ماه به طور متوسط ۵۰۰ میلیون متر مکعب بارندگی دریافت می‌کند که میزان ورودی آب از خرداد تا شهریور کاهش می‌یابد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، هندسه حوضه و زیرحوضه‌ها، رودخانه گرگانرود و شهر آق قلا در شکل ۲ نشان داده شده است. ارتفاع این حوضه بین ۲۲- تا ۳۶۶۲ متر متغیر است. در مدل هیدرولوژیکی این تحقیق، بالادست شهر آق قلا با مساحتی حدود ۱۰،۰۰۰ کیلومتر مربع در این تحقیق در نظر گرفته شده است تا جنبه‌های مورد نظر سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف در نظر گرفته شود.



شکل ۲- منطقه مورد مطالعه

تغییر اقلیم

در این مطالعه از تجزیه و تحلیل تغییرات بارندگی و دما (حداقل و حداکثر) همزمان با تغییرات کاربری زمین در آینده برای تجزیه و تحلیل جریان آبی محاسبه شده توسط مدل SSA استفاده شد. در این مطالعه، خروجی مدل اقلیمی تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 مربوط به گزارش پنجم ارزیابی IPCC^۵ (CMIP5) و سه سناریوی SSP126، SSP370، و SSP585 مربوط به گزارش ششم ارزیابی IPCC (CMIP6) استفاده شده است. سناریوهای اقلیمی از لحاظ مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای با سیاست‌های مختلف اقلیمی تعریف شده‌اند. دلیل انتخاب سناریوهای SSP126، SSP370 و SSP585 این است که به ترتیب گزینه خوش بینانه، حالت متوسط و بحرانی‌ترین سناریو را نشان می‌دهند. مدل جهانی اقلیمی انتخابی (GCM^۶) مربوط به CMIP5، CanESM2، از مدل اقلیم جهانی اقیانوس اتمسفر (AOGCM^۷) با فاصله شبکه ۲.۸۱۲۵ درجه

⁸ Weather Generators

⁹ Coefficient of Determination

¹⁰ Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁶ Global Climate Model

⁷ Atmosphere Ocean Global Climate Model

استفاده از روش زنجیره مارکوف پیش بینی شد. زنجیره مارکوف دنباله ای از فرآیندهای تصادفی است که در آن نتیجه هر فرآیند به نتیجه فرآیند در زمان مجاور بستگی دارد و از طریق یک ماتریس انتقال توصیف می شود (۴۶، ۴۷). به منظور ارزیابی عملکرد مدل، نقشه های پیش بینی شده و موجود در سال ۲۰۱۸ با یکدیگر مقایسه شده و نقشه های پیش بینی شده با استفاده از ضریب کاپا اعتبار سنجی شد. ضریب کاپا ۰/۹۲ به دست آمد که نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل بود. پس از اعتبارسنجی مدل، نقشه کاربری اراضی برای سال های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ پیش بینی شد.

جمع آوری داده ها

بارش روزانه از ایستگاه در سال های گذشته (۱۳۵۴ تا ۱۳۹۹) جمع آوری شد. داده های بارندگی و حداکثر و حداقل دما و تابش خورشید از سازمان هواشناسی کشور به دست آمد. دبی پیک لحظه ای و دبی پیک روزانه از ایستگاه هیدرومتری آق قلا به دست آمد و نقشه های DEM محدوده از تصاویر ماهواره ای تهیه گردید. لازم به ذکر است که DEM ارائه شده توسط ماهواره های مختلف از دقت قابل قبولی برخوردار نبود. طبقه بندی گروه های هیدرولوژیکی خاک از نقشه ارائه شده توسط ناسا (HYSOGs250m) استخراج شد. تهیه داده های مکانی با استفاده از بسته نرم افزاری Arc GIS 10.8 انجام شد و همچنین نقشه های مورد نیاز برای تخمین جریان تهیه شد. نقشه های کاربری اراضی برای سال های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ در مرحله قبل تهیه شد. همچنین داده های بارش در سناریوهای مختلف آینده تولید شد. حوضه آق قلا به هفده زیر حوضه تقسیم بندی گردید. در مدل هیدرولوژیکی این تحقیق، بالادست شهر آق قلا به مساحت حدود ۱۰،۰۰۰ کیلومتر مربع در نظر گرفته شد.

مطالعات فیزیوگرافی

جهت انجام مطالعات فیزیوگرافی شامل تهیه نقشه های DEM، جهت جریان، تجمع جریان، پهنه بندی شیب (درصد)، استخراج لایه آبراهه ها، حوضه بندی و در نهایت استخراج لایه بلندترین آبراهه هر زیرحوضه از افزونه Arc-Hydro Tools و برای تهیه نقشه CN، محاسبه CN و شیب معادل و در نهایت برآورد تلفات اولیه رواناب هر زیرحوضه از دستورهای مربوطه در نرم افزار ArcGIS استفاده شد. در نهایت رابطه زمان تأخیر SCS برای برآورد زمان تمرکز به عنوان نتیجه مطالعات فیزیوگرافی بکار گرفته شد. (معادلات ۳، ۴ و ۵)

برای تهیه نقشه کاربری اراضی از نرم افزار ENVI 5.3 و داده های سنسور ETM+^{۱۱} و OLI^{۱۲} ماهواره لندست استفاده شد. این داده ها شامل تصاویر سنسور Landsat 7 ETM+ برای سال ۱۹۹۱ و تصاویر Landsat 8 OLI برای سال های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ می باشد. قبل از پردازش، تصحیحات هندسی و رادیومتری بر روی تصاویر با استفاده از نرم افزار ENVI انجام شد (۴۱). یک نکته کلیدی مهم در تهیه نقشه های کاربری اراضی از روی تصاویر ماهواره ای، دستیابی به تعریف روشنی از کاربری ها در منطقه است (۴۲). در این تحقیق پس از بررسی وضعیت کاربری های موجود در منطقه و نظرات کارشناسان، کاربری ها به جنگل، کشاورزی، شهری، بایر، مرتع و آبی طبقه بندی شدند. سپس نمونه ها از تصاویر ماهواره ای برای هر کلاس تعریف شده گرفته شد و برای اعتبارسنجی به مجموعه های آموزش (۷۰٪) و تست (۳۰٪) تقسیم شدند. با تفسیر بصری و با کمک نقشه های توپوگرافی و تصاویر گوگل ارث، نمونه هایی به صورت تصادفی از تصاویر ماهواره ای جمع آوری شد (۴۳). نمونه های آموزشی بخشی از کل پیکسل های تصویر را تشکیل می دهند که سهم آن ها ۱۰٪ است (همانطور که توسط (۴۴) توصیه می شود). به عنوان یک روش طبقه بندی نظارت شده، از الگوریتم حداکثر درست نمایی برای تهیه نقشه های کاربری اراضی سال های ۱۹۹۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ با استفاده از نرم افزار ENVI استفاده شد. این روش طبقه بندی بر اساس ارزیابی واریانس و کوواریانس طبقات کار می کند (۴۵). پس از تهیه نقشه های کاربری اراضی، نتایج با استفاده از ۳۰ درصد نمونه های جمع آوری شده بر اساس ضریب کاپا مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. ضریب کاپا برای نقشه های کاربری اراضی تهیه شده در سال های ۱۹۹۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ به ترتیب ۷۴/۳۳، ۷۹/۲۵ و ۷۹/۵۳ درصد بوده است.

LCM^{۱۳} در نرم افزار TerrSet برای پیش بینی تغییرات کاربری زمین در آینده استفاده شد. برای این کار نقشه های کاربری اراضی سال های ۱۹۹۱ و ۲۰۰۲ به همراه نقشه های DEM^{۱۴} و شیب منطقه به عنوان ورودی وارد نرم افزار شد. شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و لجستیک در برنامه LCM نرم افزار TerrSet برای مدل سازی از نقشه های پتانسیل انتقال^{۱۵} در این مطالعه استفاده شد. رگرسیون لجستیک فقط پتانسیل های انتقال را به طور جداگانه محاسبه می کند. در عوض، ANN می تواند پتانسیل های انتقال را در زیر مجموعه ای از مدل های فرعی گروه بندی کند یا حتی پتانسیل های انتقال را در یک مدل فرعی واحد محاسبه کند. در نهایت پس از تعدیل مدل های فرعی، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۸ پس از تهیه مدل های فرعی با

14 Digital Elevation Model

15 Transition Potential Maps

11 Enhanced Thematic Mapper Plus

12 Operational Land Imager

13 Land Change Modeler

مدت-فراوانی در شش ناحیه اقلیمی ایران می‌باشد که در پژوهش حاضر جهت ساخت هایتوگراف مصنوعی بارش برای مدلسازی بارش-رواناب از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی مذکور استفاده شد و سپس مقادیر بدست آمده به کمک نتایج تحلیل فرکانس بارش مورد نرمال‌سازی قرار گرفت. توزیع زمانی (هایتوگراف تجمعی S شکل) بارش ۳۶ ساعته در دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ساله جهت معرفی به مدل SSA¹⁷ استخراج گردید.

مدل بارش-رواناب

از یک طرف با داشتن سه سناریوی اقلیمی از CMIP6 شامل SSP126، SSP370 و SSP585 و سه نقشه کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰، نیاز به تعریف سناریوهای ترکیبی برای اعمال تأثیر همزمان تغییر اقلیم گزارش ششم و کاربری اراضی جهت معرفی به مدل SSA وجود دارد. از طرف دیگر با داشتن دو سناریوی اقلیمی از CMIP5 شامل RCP2.6 و RCP8.5 و سه نقشه کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰، نیاز به تعریف سناریوهای ترکیبی برای اعمال تأثیر همزمان تغییر اقلیم گزارش پنجم و کاربری اراضی جهت معرفی به مدل SSA وجود دارد. برای انجام این مهم، ویژگی‌های سناریوهای SSA بر اساس سناریوهای اقلیمی CMIP5 یا CMIP6، نقشه‌های مختلف کاربری اراضی و سال‌های هدف برای پیش‌بینی (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) در جدول‌های ۱ و ۲ تعریف شده‌اند. شایان ذکر است سناریوی S01-PY2018-PrBI-CN2018 در جدول ۲ به عنوان نماینده وضعیت موجود می‌باشد.

$$t_{lag} = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900y^{0.5}} \quad (3)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (4)$$

$$t_c = 1.67t_{lag} \quad (5)$$

که در آن t_{lag} زمان تأخیر (ساعت)، t_c زمان تمرکز (ساعت)، L طول بلندترین آبراهه (فوت)، S تلفات اولیه رواناب (اینچ) و y شیب متوسط زیرحوضه (درصد) می‌باشد.

تحلیل بارش

آزمون‌های آماری بر روی داده‌ها (آزمون کفایت داده‌ها، آزمون همگنی داده‌ها، آزمون داده پرت)، بر اساس داده‌های بلندمدت حداکثر بارندگی سالانه ۲۴ ساعته که از مدل اقلیمی استخراج شده است، انجام می‌شود. تجزیه و تحلیل فرکانس از طریق نرم افزار HyfranPlus انجام می‌شود. پس از انتخاب بهترین توزیع آماری، مقادیر ارتفاع بارش ۲۴ ساعته و ۳۶ ساعته در دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰ ساله در سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده است. برای مقایسه آزمون‌های آماری از روش‌های رایج مانند χ^2 ، p -value و ... استفاده شد. در این تحقیق از روش قهرمان (48) برای تبدیل بارندگی روزانه به مقادیر ساعتی استفاده شد. با توجه به اینکه T_c حوضه بیش از ۲۴ ساعت است و مدت بارندگی باید بیشتر از T_c باشد، برای مدلسازی R-R^{۱۶} (بارش-رواناب) از بارندگی ۳۶ ساعته استفاده می‌شود. جهت تبدیل بارندگی‌های روزانه به مقادیر ساعتی، نتایج مطالعه قهرمان-آبخضر شامل معادلاتی جهت برآورد شدت و ارتفاع بارش با مدت و دوره بازگشت‌های مختلف و همچنین منحنی‌های شدت-

جدول ۱- شرح سناریوهای CMIP5 تعریف شده برای SSA

Scenario Code	Description		Target Year
	Precipitation	CN	
F01-S02-PY2050-Pr26-CN2018	RCP26	2018	2050
F02-S04-PY2050-Pr85-CN2018	RCP85	2018	
F03-S06-PY2050-Pr26-CN2050	RCP26	2050	
F04-S08-PY2050-Pr85-CN2050	RCP85	2050	
F05-S09-PY2080-Pr26-CN2018	RCP26	2018	2080
F06-S11-PY2080-Pr85-CN2018	RCP85	2018	
F07-S13-PY2080-Pr26-CN2080	RCP26	2080	
F08-S15-PY2080-Pr85-CN2080	RCP85	2080	

PY: Prediction Year---Pr: Precipitation---CN: Curve Number

جدول ۲- شرح سناریوهای CMIP6 تعریف شده برای SSA

Scenario Code	Description		Target Year
	Precipitation	CN	
S01-PY2018-PrBI-CN2018	Baseline	2018	Current Situation
S02-PY2050-Pr126-CN2018	SSP126	2018	
S03-PY2050-Pr370-CN2018	SSP370	2018	
S04-PY2050-Pr585-CN2018	SSP585	2018	
S05-PY2050-PrBI-CN2050	Baseline	2050	2050
S06-PY2050-Pr126-CN2050	SSP126	2050	
S07-PY2050-Pr370-CN2050	SSP370	2050	
S08-PY2050-Pr585-CN2050	SSP585	2050	
S09-PY2080-Pr126-CN2018	SSP126	2018	2080
S10-PY2080-Pr370-CN2018	SSP370	2018	
S11-PY2080-Pr585-CN2018	SSP585	2018	
S12-PY2080-PrBI-CN2080	Baseline	2080	
S13-PY2080-Pr126-CN2080	SSP126	2080	
S14-PY2080-Pr370-CN2080	SSP370	2080	
S15-PY2080-Pr585-CN2080	SSP585	2080	

PY: Prediction Year---Pr: Precipitation---CN: Curve Number---BI: Baseline

محاسبه CN وزنی (WCN) با توجه به معادلات ۶، ۷، ۸ و ۹ به صورت زیر است:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (۶)$$

که P_e بارش موثر در زمان t ، P بارندگی کل در زمان t ، I_a ضررهای اولیه و S حداکثر تلفات احتمالی که I_a و S از معادلات زیر محاسبه می شوند:

$$I_a = 0.2 S \quad (۷)$$

$$S = \frac{(25400 - 254CN)}{CN} \quad (۸)$$

CN به عنوان یک مقدار وزنی بر اساس کاربری های مختلف در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

$$WCN = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (۹)$$

که در آن A_i مساحت هر نوع کاربری اراضی و CN_i شماره منحنی برای هر نوع کاربری زمین است. CN از جداول CN استاندارد گرفته شد. CN وزنی محاسبه شده در کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار گرفت و متوالی تغییر کرد.

برای تهیه نقشه شماره منحنی رواناب در سال های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ ابتدا برش نقشه جهانی گروه هیدرولوژیک خاک NASA با

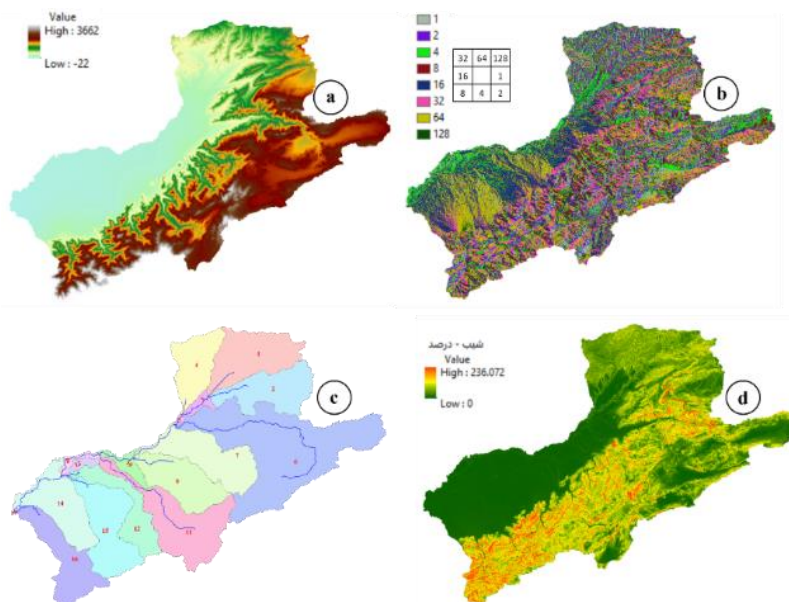
شبیه سازی هیدرولوژیکی مورد استفاده در این تحقیق در حوضه گرگانود با استفاده از مدل SSA صورت گرفته است. SSA بر پایه اصول HEC-1 است و به طور خاص برای فرآیندهای بارش-رواناب طراحی شده است. طبقه بندی گروه های هیدرولوژیکی خاک از نقشه ارائه شده توسط ناسا (HYSOGs250m) استخراج شده است. در نرم افزار ArcGIS 10.8، با استفاده از Arc Hydro Tools، حوضه گرگانود به چندین زیرحوضه تقسیم شد. نقشه DEM و شبکه جریان تولید شد. عناصر هیدرولوژیکی مدل SSA، بینشی در مورد فرآیندهای رواناب و تأثیر آنها بر سیستم زهکشی ارائه می دهند (۴۹). روش SCS-CN^{۱۸} برای محاسبه نفوذ کل در طول یک طوفان در نظر گرفته شده است. این برنامه با محاسبه مجدد حجم نفوذ در پایان هر بازه زمانی، بارندگی افزایشی را در طول طوفان محاسبه می کند. نفوذ در هر بازه زمانی، اختلاف حجم در پایان دو بازه زمانی مجاور است. روش SCS-CN نیازمند الگوی درصد کاربری اراضی حوضه و زیرحوضه، طول کل رودخانه و ارتفاع منطقه حوضه است. حداکثر حفظ و ویژگی های حوضه از طریق یک پارامتر میانی، شماره منحنی، مرتبط هستند. مقادیر CN از ۱۰۰ (برای بدنه های آبی) تا حدود ۳۰ برای خاک های نفوذپذیر با نرخ نفوذ بالا متغیر است. مدل SCS-CN مازاد بارندگی را به عنوان تابعی از بارش تجمعی، پوشش خاک، کاربری زمین و میزان رطوبت پیشین تخمین می زند (۵۰)، بنابراین

مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. در این مطالعه از دو معیار مرسوم برای ارزیابی کارایی مدل‌های هیدرولوژی، ضریب تبیین (R^2) و معیار نش-شاتکلیف (NSE)، جهت مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده دبی با مقادیر مشاهده شده آن و سنجش دقت مدل در برآورد رواناب استفاده شد. مقدار عددی ضریب نش-شاتکلیف از منفی بینهایت تا ۱ (مقدار بهینه) متغیر بوده و هرچه به یک نزدیکتر باشد بیانگر آن است که مدل برآورد بهتری داشته است. عموماً اگر معیار NSE بیشتر از ۰/۷۵ باشد کارایی مدل خوب، اگر بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد رضایت-بخش و اگر کمتر از ۰/۵ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (51) (معادله ۲).

نتایج

نتایج مطالعات فیزیوگرافی

نقشه DEM (با دقت تفکیک مکانی ۳۰ متری SRTM) به طول ۱۴۵ کیلومتر از رودخانه گرگان‌رود در محدوده شهرستان آق قلا تهیه شد. استخراج نقشه‌های جهت جریان، شبکه آبراهه‌ها، تقسیم بندی زیرحوضه‌ها و پهنه بندی شیب در محیط ArcGIS به کمک افزونه Arc-Hydro مطابق شکل ۳ انجام شد.



شکل ۳- (a) نقشه DEM (b) نقشه جهت جریان (c) زیرحوضه‌های استخراج شده و کدگذاری آن‌ها و نقشه شبکه آبراهه‌ها (d) نقشه پهنه بندی شیب

جهت تهیه نقشه پهنه بندی شماره منحنی رواناب (CN) به کمک برهم نهی^{۲۰} نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک برای

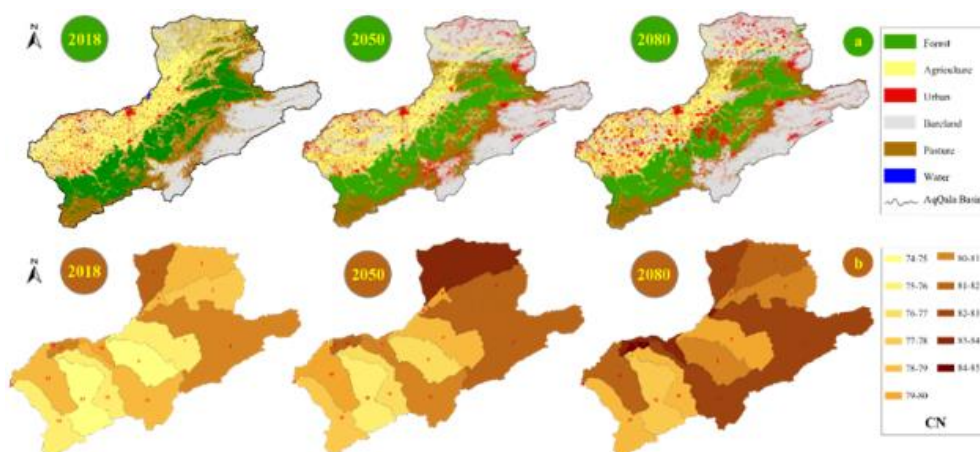
دقت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر (موسوم به HYSOGs250m) با نقشه کاربری اراضی تهیه شده برای هر یک از سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ در محیط ArcGIS تلفیق گردید. سپس بر اساس کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک، CN مربوطه تعیین شد. از روش هیدروگراف واحد SCS (SCS-UH)^{۱۹} برای تخمین رواناب مستقیم استفاده شد. رواناب حاصل از یک رگبار نازل شده بر یک حوضه در محل خروجی آن به نام سیلاب معروف است. SCS روش‌های متفاوتی را برای محاسبه هیدروگراف سیلاب پیشنهاد کرده است. معروف ترین آنها روش هیدروگراف بی بعد است.

در مرحله نخست نقشه DEM وارد شد. پس از ترسیم مرز حوضه، زیرحوضه و شبکه جریان، پارامترهای فیزیکی مربوط به حوضه و هر زیر حوضه شامل مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب، خصوصیات ارتفاعی و غیره محاسبه شد. در مرحله بعد، نقشه‌های خاک و کاربری اراضی به مدل وارد شدند و نقشه شیب نیز تعریف شد. در گام بعدی، داده‌های اقلیمی شامل اطلاعات بارش و درجه حرارت روزانه به مدل وارد شد. برای انجام واسنجی، نیاز است که نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای که در ایستگاه خروجی حوضه آبریز اندازه‌گیری شده است سنجیده شود. در نتیجه، از اطلاعات دبی اندازه‌گیری شده (۲۰۱۰-۱۹۸۰) برای واسنجی و برای اعتبارسنجی (۲۰۲۰-۲۰۱۰) استفاده شد. از شاخص‌های R^2 و NSE نیز جهت ارزیابی کارایی مدل در

نتایج مدل تغییر کاربری اراضی

مقادیر بدست آمده اعمال گردید. برآورد زمان تمرکز و زمان تاخیر زیرحوضه‌ها و کل حوضه به کمک رابطه زمان تاخیر سرشاخه‌ها (NRCS- اداره حفاظت منابع طبیعی ایالات متحده) به کمک نرم‌افزار ArcGIS صورت گرفت. همچنین مساحت اراضی در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بر حسب کاربری آن‌ها که به جنگل، کشاورزی، شهری، بایر، مرتع و آب تقسیم شده‌اند، به دست آمد.

سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ اقدام گردید. در شکل ۴-ا نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ و همین‌طور در شکل ۴-ب نقشه CN معادل برای هر زیرحوضه برای سال‌های مورد اشاره و همچنین در شکل ۴-ج نقشه CN منطقه مورد مطالعه آمده است. شایان ذکر است پس از محاسبه اولیه CN معادل زیرحوضه‌ها، ضریب کاهشی ۰.۹۵ جهت حصول نتایج نزدیکتر به واقعیت بر روی



شکل ۴- (a) نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ (b) نقشه CN معادل برای هر زیرحوضه برای سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰

شده در ایستگاه هیدرومتری مقایسه شد. آمار ثبت شده دبی پس از انجام آزمون‌های آماری و حذف داده پرت مورد تحلیل فرکانس قرار گرفته و مقادیر سیلاب ۲ تا ۱۰۰۰ ساله در محل ایستگاه برآورد گردید. سپس مقادیر مورد نظر با نتایج دبی پیک سیلاب خروجی مدل در گره متناظر ایستگاه مقایسه گردید. خاطر نشان می‌شود که با عنایت به دیده شدن سیل سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ و تشکیل مطالعات کارگروه ملی سیلاب در این حوضه و مطالعات پیشین جهت برآورد مقادیر سیلاب در دوره بازگشت‌های بالا توسط شرکت‌های مشاور انجام شده است. نهایتاً با توجه به مطالب فوق مقادیر سیلاب حدی محاسبه شده در پژوهش حاضر قابل قبول بوده و صحت آنها تأیید گردید. در جدول ۳ مقادیر دبی پیک سیلاب بر اساس خروجی نهایی مدل برای هشت سناریوی مربوط به CMIP5 و پانزده سناریوی مربوط به CMIP6 برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله آمده است و همچنین هیدروگراف سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در هشت سناریوی مربوط به CMIP5 و پانزده سناریوی مربوط به CMIP6 در شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

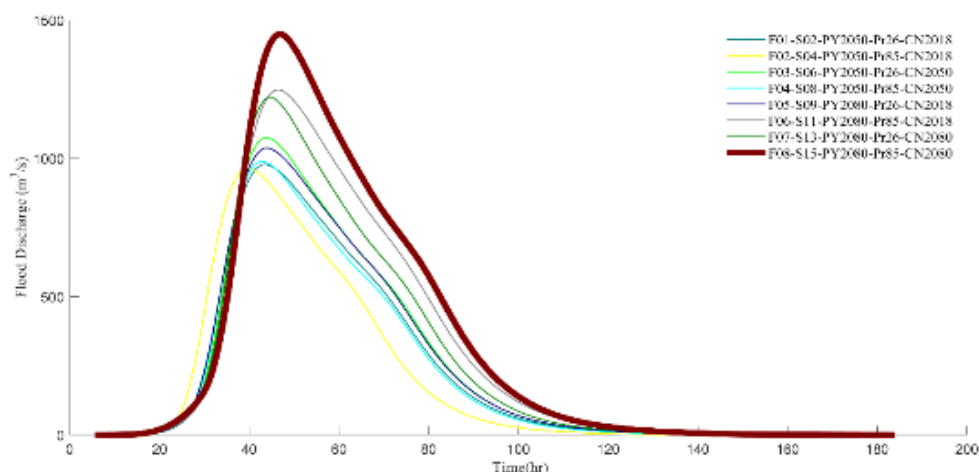
با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و CN بدست آمده و پس از تحلیل و بررسی آن‌ها، می‌توان اطلاعات قابل توجهی استخراج نمود. نتایج بررسی نقشه‌های کاربری اراضی حاکی از افزایش زمین‌های شهری و بایر و کاهش زمین‌های جنگلی، کشاورزی و مرتع برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۸ است. میانگین وزنی CN منطقه مورد مطالعه برای سال ۲۰۱۸، ۷۷.۸۴ می‌باشد که همین مقدار برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ به ترتیب ۷۹.۹۴ و ۸۱.۰۹ می‌باشد. همان‌طور که بدیهی است و البته از نتایج هم پیداست، با افزایش CN مقادیر زمان تاخیر و زمان تمرکز منطقه کاهش داشته است. با توجه به این توضیحات، افزایش میانگین CN و کاهش زمان تاخیر و زمان تمرکز منطقه به معنای کاهش نفوذ و جذب آب توسط خاک و در نتیجه افزایش رواناب و خطرات بیشتر ناشی از سیلاب است.

نتایج مدل بارش-رواناب

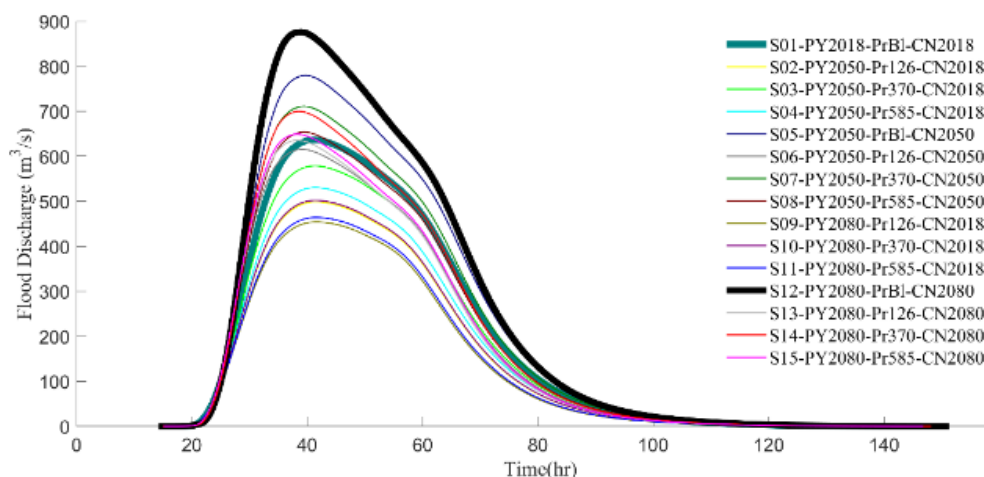
با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های پیشین، مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه برای برآورد سیلاب‌های حدی در دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰ ساله صورت گرفت و سپس نتایج حاصله به کمک آمار ثبت

جدول ۳- مقادیر دبی پیک سیلاب بر اساس خروجی نهایی مدل برای CMIP5 و CMIP6

	خروجی نهایی در دوره بازگشت های مختلف						سناریوها
	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	
CMIP6	۶۳۶,۵	۴۹۵,۷	۳۷۰,۸	۲۲۹,۳	۱۴۶,۴	۶۵,۸	S01-PY2018-PrBI-CN2018
	۴۹۸,۵	۳۸۷,۸	۲۹۱,۲	۱۸۵	۱۲۰,۶	۶۲,۱	S02-PY2050-Pr126-CN2018
	۵۷۸,۷	۴۵۱,۴	۳۴۲	۲۱۶,۵	۱۴۰	۶۵,۸	S03-PY2050-Pr370-CN2018
	۵۳۰,۶	۴۱۵,۷	۳۱۲	۲۰۰,۴	۱۲۹,۳	۶۳,۹	S04-PY2050-Pr585-CN2018
	۷۷۹,۵	۶۱۱,۵	۴۵۹	۲۸۲,۱	۱۷۹,۸	۷۶,۹	S05-PY2050-PrBI-CN2050
	۶۱۵,۴	۴۸۰,۶	۳۶۰	۲۲۷	۱۴۹,۲	۷۰,۴	S06-PY2050-Pr126-CN2050
	۷۱۰,۹	۵۵۸,۲	۴۲۳,۴	۲۶۶,۳	۱۷۲,۳	۷۶,۹	S07-PY2050-Pr370-CN2050
	۶۵۳,۷	۵۱۴,۸	۳۸۶	۲۴۶,۱	۱۵۹,۶	۷۳,۸	S08-PY2050-Pr585-CN2050
	۶۳۵,۶	۴۸۳,۹	۳۵۳,۹	۲۱۶,۹	۱۴۲,۳	۶۹,۴	S09-PY2080-Pr126-CN2018
	۶۹۹,۸	۵۴۰,۷	۳۹۸,۴	۲۴۶,۵	۱۶۱,۸	۷۷,۹	S10-PY2080-Pr370-CN2018
	۶۴۹,۱	۴۹۵,۸	۳۶۳,۹	۲۲۶,۵	۱۴۷,۵	۷۱,۷	S11-PY2080-Pr585-CN2018
	۸۷۶	۶۹۰,۶	۵۲۰,۵	۳۲۰	۲۰۲,۴	۸۴,۲	S12-PY2080-PrBI-CN2080
	۴۵۴	۳۴۳,۸	۲۵۲,۳	۱۵۶,۶	۱۰۱,۹	۶۰	S13-PY2080-Pr126-CN2080
	۵۰۲	۳۸۴,۷	۲۸۳,۶	۱۷۷,۷	۱۱۶,۳	۶۳,۱	S14-PY2080-Pr370-CN2080
	۴۶۴	۳۵۲,۴	۲۵۹,۳	۱۶۳,۵	۱۰۵,۷	۶۰,۷	S15-PY2080-Pr585-CN2080
CMIP5	۹۷۸,۷	۸۲۰,۱	۶۵۶,۳	۴۳۲,۴	۲۶۳,۴	۶۸,۷	F01-S02-PY2050-Pr26-CN2018
	۹۶۵,۱	۸۰۱,۰	۶۴۱,۰	۴۲۲,۴	۲۵۷,۳	۶۷,۱	F02-S04-PY2050-Pr85-CN2018
	۱۰۷۵,۲	۹۰۸,۳	۷۳۴,۹	۴۹۴,۵	۳۰۸,۲	۸۳,۵	F03-S06-PY2050-Pr26-CN2050
	۹۸۹,۴	۸۳۳,۸	۶۷۷,۰	۴۶۷,۱	۳۰۵,۳	۹۸,۶	F04-S08-PY2050-Pr85-CN2050
	۱۰۳۸,۰	۸۷۸,۰	۷۱۵,۴	۴۹۵,۱	۳۲۲,۸	۱۰۶,۵	F05-S09-PY2080-Pr26-CN2018
	۱۲۴۸,۵	۱۰۶۷,۰	۸۸۱,۹	۶۲۰,۸	۴۱۰,۸	۱۳۱,۷	F06-S11-PY2080-Pr85-CN2018
	۱۲۲۱,۸	۱۰۴۶,۰	۸۶۵,۸	۶۱۶,۷	۴۱۵,۳	۱۴۴,۸	F07-S13-PY2080-Pr26-CN2080
	۱۴۵۰,۲	۱۲۵۲,۸	۱۰۴۹,۷	۷۵۹,۲	۵۱۸,۷	۱۷۷,۹	F08-S15-PY2080-Pr85-CN2080



شکل ۵- هیدروگراف سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در هشت سناریوی مربوط به CMIP5



شکل ۶- هیدروگراف سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در پانزده سناریوی مربوط به CMIP6

مقادیر میانگین پیش‌بینی شده سالانه بارش توسط مدل‌های اقلیمی در سال‌های آتی بسیار کمتر از نوسان تغییرات مقادیر میانگین سالانه بارش در شرایط فعلی است. از طرفی دیگر با تغییر نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ و ثابت نگه داشتن متغیرهای دیگر، مقادیر دبی پیک سیل به ترتیب افزایش می‌یابد. به این صورت که با مقایسه سناریوهای S01، S05 و S12 که نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ مورد استفاده قرار گرفته‌اند و متغیر بارش ثابت نگه داشته شده است، مشاهده می‌شود که مقادیر دبی پیک سیل به ترتیب افزایش می‌یابد. همه این توضیحات در حالی است که برعکس آن‌ها صادق نمی‌باشد. بنابراین می‌توان با قطعیت بیان کرد که تأثیر تغییر کاربری اراضی بر سیلاب‌های آینده بیشتر از تغییرات اقلیمی مربوط به CMIP6 است (۵۲).

تغییرات در پیک و شکل هیدروگراف ناشی از مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی و محیطی است که در مدل‌های مختلف و سناریوهای متفاوت لحاظ شده‌اند. CMIP5 و CMIP6 هر دو نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات اقلیمی هستند، با این تفاوت که CMIP6 به دلیل بهبودها، تصحیحات و روش‌های بروزتر و متعدد، نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری ارائه می‌دهد. مقادیر افزایش دبی پیک سیلاب در بدترین سناریوهای مربوط به CMIP5 و CMIP6 به ترتیب ۱۲۸٪ و ۳۸٪ در مقایسه با وضع موجود در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله می‌باشند. در اکثر تحقیقاتی که CMIP5 و CMIP6 را با هم مقایسه کرده‌اند، دقت بیشتر نتایج حاصل از CMIP6 گزارش شده است (۵۳، ۵۴، ۵۵). همچنین مقایسه با تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که این تغییرات در راستای یافته‌های علمی پیشین بوده و تأیید کننده تأثیرات گسترده تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی هستند (۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹).

نتایج مربوط به هشت سناریو مرتبط با CMIP5 نشان می‌دهد که مقادیر دبی پیک سیل برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، به ترتیب برای سناریوهای ۱ تا ۸، به این صورت است: ۹۷۹، ۹۶۵، ۱۰۷۵، ۹۸۹، ۱۰۳۸، ۱۲۴۹، ۱۲۲۲ و ۱۴۵۰ متر مکعب بر ثانیه. از بین این سناریوها، سه سناریوی برتر از نظر بزرگی دبی سیلاب عبارتند از F06، F08 و F07.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی مقادیر بارش در دو سناریوی اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 بیشتر از وضع موجود است، که این امر منجر به افزایش دبی پیک سیلاب می‌شود. همچنین، با تغییر نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰، مقادیر دبی پیک سیلاب به ترتیب افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو عامل، تغییرات اقلیمی مربوط به CMIP5 و تغییرات کاربری اراضی، تأثیر قابل توجهی بر سیلاب‌های آینده دارند.

با مشاهده نتایج مربوط به پانزده سناریو (خروجی مدل بارش - رواناب) مربوط به CMIP6، مقادیر دبی پیک سیل برای سناریوهای ۱ تا ۱۵ برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله به ترتیب ۶۳۷، ۴۹۹، ۵۷۹، ۵۳۱، ۷۸۰، ۶۱۵، ۶۳۶، ۷۰۰، ۸۷۶، ۴۵۴، ۵۰۲ و ۴۶۴ متر مکعب بر ثانیه است. سه سناریوی برتر از نظر بزرگی دبی سیل از زیاد به کم عبارتند از S12، S05 و S07 و در بین پانزده سناریو، رتبه سناریوی S01-PY2018-PrBI-CN2018 (وضعیت فعلی) هفتم است.

با تحلیل نتایج مربوط به پانزده سناریو (خروجی مدل بارش - رواناب)، علیرغم افزایش مقادیر بارندگی و دما در سه سناریوی اقلیمی SSP126، SSP370 و SSP585 و با فرض ثابت بودن سایر متغیرها، مقدار دبی پیک سیلاب کاهش می‌یابد. اگرچه افزایش میزان بارندگی در سه سناریوی اقلیمی مشاهده شده است، اما نوسان تغییرات

نتیجه گیری

این پژوهش به تأثیرات همزمان تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل‌های آینده در منطقه آق قلا پرداخته است. نتایج نشان می‌دهند که تحولاتی که در الگوی بارش و دما براساس داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 شبیه سازی شده، می‌تواند به طور قابل توجهی تأثیرگذار باشد. نتایج مدل‌های اقلیمی حاکی از افزایش مقادیر بارش و دما در CMIP5 و CMIP6 در سال‌های آتی در منطقه آق قلا دارد. مقادیر افزایش بارش در CMIP5 به مراتب بیشتر از CMIP6 می‌باشد. در صورت تداوم روند تغییر کاربری در محدوده مورد مطالعه، با افزایش مساحت اراضی شهری و بایر و کاهش اراضی جنگلی، کشاورزی و مرتع، مواجه خواهیم بود. بدیهی است این موضوع باعث کاهش نفوذپذیری اراضی آینده و متعاقباً افزایش مقادیر رواناب سطحی خواهیم بود و متأسفانه سیلاب‌های بزرگتر با خسارات و تلفات بیشتری را به همراه خواهد داشت.

این مطالعه نشان می‌دهد که تأثیرات همزمان تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف سیل‌های آینده قابل توجه است. با توجه به تحقیقات قبلی و نتایج این مطالعه، می‌توان استنباط کرد که جهت تدوین استراتژی‌های سازگاری و مدیریت آسیب‌پذیری‌ها در برابر سیل‌های آینده، لازم است تأثیر هر دو عامل به طور همزمان مد نظر قرار گیرد. همچنین، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌ها و روش‌های پیشرفته و بروز در تحلیل و پیش‌بینی‌ها می‌تواند دقت

پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشیده و به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران کمک کند تا راه‌های مؤثرتری برای مدیریت خسارات ناشی از سیل‌های آینده را در شرایط عدم قطعیت عمیق شناسایی و ارائه دهند. این تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر تأثیرات همزمان اقلیم و کاربری اراضی بر سیل‌ها، اساسی برای ارائه راهکارهای سازگاری مناسب در مدیریت آسیب‌پذیری‌ها و کاهش خسارات است.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: آرش مجیدی، سید عباس حسینی؛ روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: آرش مجیدی، سید عباس حسینی؛ نظارت و نگارش نهایی: سارا نظیف، باقر قرمز چشمه.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Thompson LG, Davis ME, Mosley-Thompson E, Porter SE, Corrales GV, Shuman CA, et al. The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records. *Glob Planet Change*. 2021 Aug 1;203:103538.
2. Hajarizadeh B, Grebely J, Dore GJ. Epidemiology and natural history of HCV infection. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology* 2013 10:9 [Internet]. 2013 Jul 2 [cited 2023 Aug 18];10(9):553–62.
3. Behboudian M, Anamaghi S, Mahjouri N, Kerachian R. Enhancing the resilience of ecosystem services under extreme events in socio-hydrological systems: A spatio-temporal analysis. *J Clean Prod*. 2023 Apr 15;397:136437.
4. Uniyal B, Kosatica E, Koellner T. Spatial and temporal variability of climate change impacts on ecosystem services in small agricultural catchments using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Science of The Total Environment*. 2023 Jun 1;875:162520.
5. Xu K, Zhuang Y, Bin L, Wang C, Tian F. Impact assessment of climate change on compound flooding in a coastal city. *J Hydrol (Amst)*. 2023 Feb;617:129166.
6. Corringham TW, McCarthy J, Shulgina T, Gershunov A, Cayan DR, Ralph FM. Climate change contributions to future atmospheric river flood damages in the western United States. *Sci Rep*. 2022 Aug 12;12(1):13747.
7. Meresa H, Tischbein B, Mekonnen T. Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: observations from CMIP6 and hydrological models. *Natural Hazards*. 2022 Apr 24;111(3):2649–79.
8. Mayo TL, Lin N. Climate change impacts to the coastal flood hazard in the

- northeastern United States. *Weather Clim Extrem*. 2022 Jun;36:100453.
9. Cea L, Costabile P. Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and
- 10.
11. Swain DL, Wing OEJ, Bates PD, Done JM, Johnson KA, Cameron DR. Increased Flood Exposure Due to Climate Change and Population Growth in the United States. *Earths Future*. 2020 Nov 10;8(11).
12. Edmonds HK, Lovell CAK, Lovell JE. The Inequities of National Adaptation to Climate Change. *Resources*. 2022 Dec 28;12(1):1.
13. Fang J, Lincke D, Brown S, Nicholls RJ, Wolff C, Merckens JL, et al. Coastal flood risks in China through the 21st century – An application of DIVA. *Science of The Total Environment*. 2020 Feb;704:135311.
14. Moftakhari HR, Salvadori G, AghaKouchak A, Sanders BF, Matthew RA. Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017 Sep 12;114(37):9785–90.
15. Stocker T, editor. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge university press; 2014 Mar 24.
16. Knutti R, Sedláček J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat Clim Chang*. 2013 Apr 28;3(4):369–73.
17. Liu J, Xiong J, Chen Y, Sun H, Zhao X, Tu F, et al. An integrated model chain for future flood prediction under land-use changes. *J Environ Manage*. 2023 Sep 15;342:118125.
18. Zhao H, Gu T, Tang J, Gong Z, Zhao P. Urban flood risk differentiation under land use scenario simulation. *iScience*. 2023 Apr 21;26(4):106479.
19. Sun L, Yu H, Sun M, Wang Y. Coupled impacts of climate and land use changes on regional ecosystem services. *J Adaptation to Climate Change. A Review. Hydrology*. 2022 Mar 18;9(3):50.
- Environ Manage*. 2023 Jan 15;326:116753.
20. Xiao J, Song F, Su F, Shi Z, Song S. Quantifying the independent contributions of climate and land use change to ecosystem services. *Ecol Indic*. 2023 Sep 1;153:110411.
21. Sugianto S, Deli A, Miswar E, Rusdi M, Irham M. The Effect of Land Use and Land Cover Changes on Flood Occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land* 2022, Vol 11, Page 1271 [Internet]. 2022 Aug 8 [cited 2023 Aug 18];11(8):1271.
22. Ngondo J, Mango J, Liu R, Nobert J, Dubi A, Cheng H. Land-Use and Land-Cover (LULC) Change Detection and the Implications for Coastal Water Resource Management in the Wami-Ruvu Basin, Tanzania. *Sustainability* 2021, Vol 13, Page 4092 [Internet]. 2021 Apr 7 [cited 2023 Aug 18];13(8):4092.
23. Rogger M, Agnoletti M, Alaoui A, Bathurst JC, Bodner G, Borga M, et al. Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resour Res* [Internet]. 2017 Jul 1 [cited 2023 Aug 18];53(7):5209–19.
24. Agarwal S, Kumar V, Kumar S, Sundriyal Y, Bagri DS, Chauhan N, et al. Identifying potential hotspots of land use/land cover change in the last 3 decades, Uttarakhand, NW Himalaya. 2022 Jul 5.
25. Ward PJ, Renssen H, Aerts JCJH, Van Balen RT, Vandenberghe J. Strong increases in flood frequency and discharge of the River Meuse over the late Holocene: Impacts of long-term anthropogenic land use change and climate variability. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2008;12(1):159–75.
26. Bai Y, Zhang Z, Zhao W. Assessing the Impact of Climate Change on Flood Events Using HEC-HMS and CMIP5. *Water Air Soil Pollut* [Internet]. 2019 Jun 1 [cited 2023 Aug 18];230(6):1–13.
27. Hussein K, Alkaabi K, Ghebreyesus D, Liaqat MU, Sharif HO. Land use/land

- cover change along the Eastern Coast of the UAE and its impact on flooding risk. 2020 Jan 1 [cited 2023 Aug 18];11(1):112-30.
28. Mfwango LH, Ayenew T, Mahoo HF. Impacts of climate and land use/cover changes on streamflow at Kibungo sub-catchment, Tanzania. *Heliyon*. 2022 Nov 1;8(11):e11285.
29. Kuntiyawichai K, Sri-Amporn W, Wongsasri S, Chindaprasirt P. Anticipating of Potential Climate and Land Use Change Impacts on Floods: A Case Study of the Lower Nam Phong River Basin. *Water* 2020, Vol 12, Page 1158.
30. Sabitha NM, Thampi SG, Kumar DS. Application of a Distributed Hydrologic Model to Assess the Impact of Climate and Land-use Change on Surface Runoff from a Small Urbanizing Watershed. *Water Resources Management*. 2023 May 19;37(6-7):2347-68.
31. Masood MU, Haider S, Rashid M, Aldlemy MS, Pande CB, Đurin B, et al. Quantifying the Impacts of Climate and Land Cover Changes on the Hydrological Regime of a Complex Dam Catchment Area. *Sustainability*. 2023 Oct 24;15(21):15223.
32. Barman S, Singh WR, Kalita B, Tyagi J. A combined impact assessment of climate and land use/land cover change in an Eastern Himalayan watershed in northeast India. *Environ Monit Assess*. 2024 Mar 22;196(3):294.
33. Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev*. 2016 May 26;9(5):1937-58.
34. O'Neill BC, Tebaldi C, Van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev*. 2016 Sep 28;9(9):3461-82.
35. Chen H, Sun J, Lin W, Xu H. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Sci Bull (Beijing)*. 2020 Sep;65(17):1415-8.
36. Zelinka MD, Myers TA, McCoy DT, Po-Chedley S, Caldwell PM, Ceppi P, et al. CMIP6 Models. *Geophys Res Lett*. 2020 Jan 16;47(1).
37. Tebaldi C, Debeire K, Eyring V, Fischer E, Fyfe J, Friedlingstein P, et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*. 2021 Mar 1;12(1):253-93.
38. Karami N. Golestan flood in the center of reduction and simplification [Internet]. 2019.
39. CCCma. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma). 2011. Canadian Earth System Model, Version 2 (CanESM2).
40. Cherchi A, Fogli PG, Lovato T, Peano D, Iovino D, Gualdi S, et al. Global Mean Climate and Main Patterns of Variability in the CMCC-CM2 Coupled Model. *J Adv Model Earth Syst*. 2019 Jan 1 [cited 2023 Aug 17];11(1):185-209.
41. Semenov MA, Stratonovitch P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Clim Res* [Internet]. 2010 Jan 20 [cited 2023 Aug 18];41(1):1-14.
42. Birhanu A, Masih I, van der Zaag P, Nyssen J, Cai X. Impacts of land use and land cover changes on hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2019 Aug 1;112:165-74.
43. Marhaento H, Booi MJ, Hoekstra AY. Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. *Hydrological Sciences Journal*. 2018 Jul 4;63(9):1368-85.
44. Tarawally M, Wenbo X, Weiming H, Mushore TD, Kursah MB. Land use/land cover change evaluation using land change modeller: A comparative analysis between two main cities in Sierra Leone. *Remote Sens Appl*. 2019 Nov 1;16:100262.
45. Hanifehlou A, Hosseini SA, Javadi S, Sharafati A. Sustainable exploitation of groundwater resources considering the effects of climate change and land use to provide adaptation solutions (case study

- of the Hashtgerd plain). *Acta Geophysica*. 2022 Aug 1;70(4):1829–46.
46. Islam K, Jashimuddin M, Nath B, Nath TK. Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2018 Apr 1;21(1):37–47.
47. Jokar Arsanjani J, Helbich M, Bakillah M, Hagenauer J, Zipf A. Toward mapping land-use patterns from volunteered geographic information. *International Journal of Geographical Information Science* 2013 Dec: 27(12):2264–78.
48. Noszczyk T. A review of approaches to land use changes modeling. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2018 Aug 18: 25(6):1377–405.
49. B. Ghahraman, H. Abkhezr. Improvement in Intensity-Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. *JWSS - Journal of Water and Soil Science*. 2004.
50. Scharffenberg WA. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual CPD-74A*. 2016.
51. Feldman MS. *Organizational Routines as a Source of Continuous Change*. Organization Science. 2000 Dec;11(6):611–29.
52. Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J Hydrol (Amst)*. 1970 Apr;10(3):282–90.
53. Majidi A, Hosseini SA, Nazif S, Ghermezcheshmeh B. Comprehensive analysis of the impacts of climate and land use changes on flood damage (Case study: AqQala, Iran). *Journal of Water and Climate Change*. 2024 Jul 1;15(7):3260–75.
54. Li J, Huo R, Chen H, Zhao Y, Zhao T. Comparative Assessment and Future Prediction Using CMIP6 and CMIP5 for Annual Precipitation and Extreme Precipitation Simulation. *Front Earth Sci (Lausanne)*. 2021 Jun 24;9.
55. Kim H, Pendergrass AG, Kang SM. The Dependence of Mean Climate State on Shortwave Absorption by Water Vapor. *J Clim*. 2022 Apr 1;35(7):2189–207.
56. Lehner F, Deser C, Maher N, Marotzke J, Fischer EM, Brunner L, et al. Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth System Dynamics*. 2020 May 29;11(2):491–508.
57. Petrova D, Tarin-Carrasco P, Sekulic A, Lukovic J, Reniu MG, Rodo X, et al. Future precipitation changes in California: Comparison of CMIP5 and CMIP6 intermodel spread and its drivers. *International Journal of Climatology*. 2024 Jun 15;44(7):2207–29.
58. Pereira H, Picado A, Sousa MC, Alvarez I, Dias JM. Evaluation of Earth System Models outputs over the continental Portuguese coast: A historical comparison between CMIP5 and CMIP6. *Ocean Model (Oxf)*. 2023 Aug 1;184:102207.
59. Yu T, Chen W, Gong H, Feng J, Chen S. Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models in simulations of the climatology and interannual variability of the east asian summer Monsoon. *Clim Dyn*. 2023 Apr 11;60(7–8):2183–98.
60. Lei Y, Chen J, Xiong L. A comparison of CMIP5 and CMIP6 climate model projections for hydrological impacts in China. *Hydrology Research*. 2023 Mar 1;54(3):330–47.