

Effects of land-use/land-cover changes on Stream Discharge in the Khorram Rud River Basin, Khorramabad, Lorestan

Shahram Amiri ¹ , Mohammad Mahdi Hosseinzadeh ² 

1. Department of Physical Geography, Earth Sciences Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: s_amiri@sbu.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Earth Sciences Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: m_hosseinzadeh@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:
26 February 2026

Revised:
30 April 2026

Accepted:
4 June 2026

Available online:
20 July 2026

Keywords:

Land-Use Change,
Stream Flow
Discharge,
Khorram Rud
Watershed,
SWAT Model.

ABSTRACT

The present study aims to investigate the impact of land-use/land-cover changes on streamflow discharge in the Khorram Rud watershed, located in Lorestan Province, western Iran. This research conducted using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, integrated with Geographic Information Systems and remote sensing techniques. Input datasets comprised a DEM, soil maps, LULC maps for 2001 and 2020 (derived from Landsat 5 and 8 satellite imagery), as well as daily and monthly climatic and hydrometric records spanning a 28-year period (1996–2020). Following the successful calibration and validation of the model employing the SUFI-2 algorithm, the net effect of LULC changes was analyzed by comparing the outputs of two distinct scenarios: the "baseline" scenario (representing 2001 LULC) and the "change" scenario (representing 2020 LULC). The analysis of the LULC maps revealed substantial transformations throughout the study period, including a 69.99% reduction in dense forest cover, a 33.96% decline in sparse forest and rangelands, alongside increases of 72.57% in agricultural lands and 61.68% in built-up areas. Simulation results derived from the SWAT model indicated a discernible impact of these changes on streamflow discharge. Consequently, the mean annual streamflow under the LULC change scenario increased by 0.16 m³/s (equivalent to 1.8%) relative to the baseline scenario. Based on the paired-sample t-test, this upsurge was found to be statistically significant at the 95% confidence level (p-value = 0.003). Overall, LULC changes within the Khorram Rud watershed were identified as one of the contributing factors to the observed increase in streamflow discharge.

Cite this article: Amiri, Sh., & Hosseinzadeh, M. M. (2026). Effects of land-use/land-cover changes on Stream Discharge in the Khorram Rud River Basin, Khorramabad, Lorestan. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (2), 91-110.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.411475.1007922>



Extended Abstract

Introduction

In the context of global water scarcity and climate change, land-use and land-cover change (LU/LCC) is recognized as a principal factor influencing hydrological processes at the watershed scale. Activities such as deforestation, agricultural expansion, and urban development alter the physical characteristics of the land surface, thereby transforming critical hydrological parameters including infiltration capacity, evapotranspiration, and runoff generation. These changes primarily operate by reducing soil water infiltration and increasing surface runoff, which can exacerbate phenomena such as flooding, diminish groundwater recharge, and weaken base flow in rivers. The consequences of these transformations can be more severe in mountainous and semi-arid regions such as the Zagros, which possess high ecological sensitivity.

The Khorram Rud watershed in Lorestan Province, due to its hydropolitical role (as a headwater of the Karkheh River), the reliance of local communities on agriculture and livestock for their livelihoods, and its location in a water-stressed region, necessitates sustainable water resource management. Numerous studies in various parts of the world (including Har et al., 2021; Maru et al., 2023; Abdulai et al., 2025) and Iran (Baloei et al., 2021; Rezaei Moghaddam et al., 2025) utilizing hydrological models such as SWAT have confirmed a significant relationship between land-cover change and increased runoff. However, a quantitative assessment of this relationship in the Khorram Rud watershed, considering the changes over the past two decades, presents a scientific and practical necessity. The primary objective is to simulate and quantify the impacts of land-use changes from 2001 to 2020 on the streamflow discharge in the Khorram Rud watershed using the SWAT model. The findings can provide a scientific basis for decision-makers to guide environmental planning and integrated water resource management in this watershed.

Methodology

This study employed an applied-analytical approach through hydrological modeling. The primary modeling tool was the semi-distributed physical model SWAT (Soil and Water Assessment Tool), implemented within the ArcGIS 10.4 environment using the ArcSWAT extension. In this research, the required data were collected and prepared for modeling in four main categories: (1) topographic data based on an ASTER Digital Elevation Model (DEM) with a 30-m resolution for watershed delineation, drainage network extraction, and subdivision into 21 sub-basins; (2) a soil map from the FAO global database; (3) land-use maps for the years 2001 and 2020, which were developed and validated through supervised classification of Landsat satellite imagery into five main classes; and (4) climatic and hydrological data, including daily precipitation and temperature data from the Khorramabad synoptic station and monthly discharge data from the Cham Anjir hydrometric station for a 28-year period (1993 to 2020).

During the implementation and analysis process, following the initial model setup and creation of Hydrological Response Units (HRUs), sensitivity analysis, calibration, and validation of the model parameters were performed using the SUFI-2 algorithm in the SWAT-CUP software, based on observed discharge data. The periods 1996-2012 and 2013-2020 were designated for calibration and validation, respectively. Model performance was evaluated using the statistical indices NSE, R^2 , and PBIAS.

To assess the net effect of land-use changes, two scenarios were defined and executed: a baseline scenario applying the 2001 land use map and a change scenario applying the 2020 land-use map, while all other input data remained constant.

Results and Discussion

The findings reveal three key sets of results. First, a comparison of land-use maps from 2001 and 2020 indicates extensive changes within the watershed. Specifically, the area of dense forest decreased by 69.99%, and sparse forest decreased by 33.96%. In contrast, agricultural lands expanded by

72.57%, settlement areas by 61.68%, and grasslands by 106.53%. These changes, which were predominantly concentrated in the northern and eastern parts of the watershed, established the primary context for hydrological transformation.

Subsequently, the accuracy and performance of the SWAT model were evaluated. Following calibration and validation using the SUFI-2 algorithm, the model demonstrated good performance. The Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and coefficient of determination (R^2) values were 0.66 during the calibration period and ranged from 0.80 to 0.85 during the validation period. Furthermore, the Percent Bias (PBIAS) index fell within an acceptable range ($\pm 10\%$), confirming the model's reliability for simulation purposes. However, the P-factor values (0.49-0.66) were below the desirable threshold of 0.7, indicating some uncertainty in peak flow simulations, though the low R-factor values (0.33-0.51) suggested acceptable overall uncertainty.

Finally, the quantitative impact of these land-use changes was investigated on the runoff regime. A comparison of outputs from the baseline scenario (2001 land use) and the change scenario (2020 land use) revealed a significant influence of land-cover alterations. Consequently, the mean annual streamflow increased by $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ (equivalent to 1.8%). Based on the paired t-test, this increase is statistically significant at the 95% confidence level ($p\text{-value} = 0.003$). Furthermore, the slope of the upsurge flow trend was steeper in the change scenario (0.164) than in the baseline (0.161), indicating a gradual intensification over the long term; a trend evident in 76% of the study period years. The analysis of hydrological components revealed that surface runoff increased by 23.5%, while groundwater flow decreased by 13%, demonstrating a shift from an infiltration-dominated to a runoff-dominated system. The time of concentration declined from 4.2 hours in the baseline scenario to 3.7 hours in the change scenario. These findings underscore the pivotal role of land-use change in exacerbating surface runoff and increasing flood potential, particularly during intense rainfall events.

Conclusion

This study, utilizing the integration of remote sensing and hydrological modeling, investigated the impact of land-use changes on the streamflow discharge of the Khorram Rud watershed over a 25-year period (1996-2020). The findings reveal that extensive land-cover transformations, particularly a 69.99% decrease in dense forests, a 33.96% decline in sparse forests and rangelands, and a 72.57% expansion of agricultural lands, have acted as one of the effective factors in increasing the watershed's streamflow discharge.

Based on the SWAT model results, land-use changes led to an increase in mean annual streamflow of $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ (equivalent to 1.8%). Long-term trend analysis indicates that the slope of the increasing discharge trend was steeper in the change scenario (0.164) than in the baseline scenario (0.161), indicating a gradual intensification of land-use change effects over time. This increasing trend was evident in 76% of the study period years, emphasizing its stability and continuity. In terms of the mechanism of effect, the reduction in soil infiltration capacity due to the replacement of forest cover with agricultural lands and settlement areas was identified as the primary driver of these changes. According to the optimized model parameters (such as decreased Manning's roughness coefficient and increased runoff curve number), land-use changes appear to have affected the hydraulic characteristics of the watershed surface. This altered pattern was particularly evident in extreme events such as 2019, in which an 11.1% increase in peak discharge was recorded in the change scenario; however, these values pertain to a single event, and comprehensive statistical analysis considering different return periods is needed for conclusions about the general flood pattern.

The findings can provide a suitable scientific basis for developing sustainable watershed management strategies, environmental planning, and adopting appropriate policies to mitigate the negative effects of land-use changes. Conducting similar studies in homogeneous watersheds and investigating the combined effects of

land-use changes and climate change are suggested as future research directions.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' Contribution

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank all participants of the present study.

تأثیرات تغییرات پوشش و کاربری اراضی بر دبی جریان در حوضه رودخانه خرم رود، خرم‌آباد، لرستان

شهرام امیری^۱، محمدمهدی حسین زاده^۲

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_amiri@sbu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر تغییرات پوشش/کاربری اراضی بر دبی جریان رودخانه در حوضه آبخیز خرم‌رود واقع در استان لرستان به اجرا درآمد. این مطالعه با استفاده از مدل شبیه‌سازی آب‌و خاک (SWAT) و تلفیق آن با GIS و RS صورت پذیرفت. داده‌های ورودی مدل شامل مدل رقومی ارتفاعی، نقشه‌های خاک، پوشش/کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰ (تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸) و نیز داده‌های روزانه اقلیمی و ماهانه هیدرومتری در بازه زمانی ۱۹۹۶-۲۰۲۰ بودند. در این پژوهش، پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی موفقیت‌آمیز مدل با استفاده از الگوریتم SUFI-۲، تأثیر تغییرات کاربری اراضی با مقایسه خروجی‌های دو سناریوی متمایز شامل سناریوی مبنا (۲۰۰۱) و سناریوی تغییر (۲۰۲۰) مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی نقشه‌های کاربری اراضی نشان‌دهنده تغییرات چشم‌گیری در طول دوره مطالعه بود که از آن جمله می‌توان به کاهش ۶۹/۹۹ درصدی جنگل‌های انبوه، کاهش ۳۳/۹۶ درصدی جنگل‌های تنک و مراتع و افزایش ۷۲/۵۷ درصدی اراضی کشاورزی و ۶۱/۶۸ درصدی مناطق ساخته‌شده اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی مدل شبیه‌سازی آب‌و خاک حاکی از تأثیر محسوس این تغییرات بر دبی جریان رودخانه بود؛ به گونه‌ای که در سناریوی تغییر کاربری/پوشش اراضی، میانگین دبی سالانه جریان به میزان ۰/۱۶ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۱/۸ درصد) نسبت به سناریوی مبنا افزایش یافت. بر اساس آزمون t نمونه‌های زوجی، مشخص شد که این افزایش در سطح اطمینان ۹۵ درصد از نظر آماری معنادار است (مقدار p برابر با ۰/۰۳). در مجموع، تغییرات کاربری/پوشش اراضی در حوضه آبخیز خرم‌رود به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در افزایش دبی جریان رودخانه شناسایی گردید.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹ واژگان کلیدی: تغییرات کاربری، پاسخ هیدرولیکی، حوضه آبخیز خرم‌رود، مدل SWAT

استناد: امیری، شهرام و حسین زاده، محمدمهدی. (۱۴۰۵). تأثیرات تغییرات پوشش و کاربری اراضی بر دبی جریان در حوضه رودخانه خرم رود، خرم‌آباد، لرستان. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۸ (۲)، ۹۱-۱۱۰.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.411475.1007922>

مقدمه

در بستر بحران کنونی جهانی آب، تغییرات پوشش و کاربری اراضی تأثیرات چشمگیری بر فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس‌های مختلف داشته‌اند (Rolando et al, 2017). فعالیت‌هایی از قبیل جنگل‌زدایی، تخریب مراتع، کشاورزی و توسعه شهری ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین را دگرگون ساخته و در نتیجه پارامترهای حیاتی هیدرولوژیک مانند نفوذپذیری، تبخیر-تعرق و تولید رواناب را تحت تأثیر قرار داده‌اند (یاری و همکاران، ۱۳۹۸). علاوه بر این، خشک‌سالی‌ها و الگوهای نامنظم و غیرقابل‌پیش‌بینی بارندگی، چالش‌های موجود در این زمینه را بیشتر تشدید کرده است (Pokhrel et al, 2018; Vogel et al, 2021). این تأثیرات عمدتاً از طریق دو مکانیسم اصلی عمل می‌کنند: کاهش نفوذ آب به خاک و افزایش رواناب سطحی. جایگزینی سطوح نفوذناپذیر و کم نفوذ با پوشش‌های طبیعی نفوذپذیر باعث می‌شود سهم بیشتری از بارش به‌صورت رواناب سطحی جاری شود و از امکان تغذیه آبخوان‌ها کاسته گردد. این پدیده نه تنها به تضعیف جریان پایه رودخانه‌ها در دوره‌های خشک منجر می‌شود، بلکه با افزایش رواناب حوضه، موجب افزایش دبی اوج سیلاب و تشدید وقوع سیلاب‌های مخرب می‌گردد (Chen et al, 2019). این ارتباط ذاتی را می‌توان به عوامل محیطی متعددی نسبت داد که هر یک تأثیر دیگری را تشدید می‌کند. نقش این تغییرات در مناطق کوهستانی از دیگر مناطق، از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا زمین ناهموار و سطوح سنگی این مناطق مانع قابل‌توجهی برای توزیع و نگهداری کارآمد آب ایجاد می‌کند و از طرف دیگر توپوگرافی ناهموار، ایجاد سیستم‌های مدیریت آب مؤثر را چالش‌برانگیز می‌کند و منجر به هدر رفتن و استفاده ناکارآمد از آب محدود موجود می‌شود (Hermassi et al, 2023). پیامدهای این تغییرات تنها به افزایش رواناب محدود نبوده و طیف وسیعی از اثرات منفی شامل افزایش خطر فرسایش خاک، رسوب‌گذاری در مخازن سدها، کاهش پایداری منابع آب زیرزمینی و تخریب اکوسیستم‌های آبی را در برمی‌گیرد. الگوی کاهش ذخیره‌سازی آبخوان و افزایش رواناب سریع، در بلندمدت تهدیدی جدی برای پایداری منابع آب و امنیت غذایی محسوب می‌شود (Spruce et al, 2020; Choto & Fetene, 2019; Chen et al, 2019).

با توجه به اهمیت این نگرانی‌ها بسیاری از پژوهشگران تاکنون تلاش نموده‌اند جهت ارتقاء دانش تصمیم‌گیرندگان مرتبط با مدیریت مؤثر هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز از مدل‌های هیدرولوژیکی گوناگونی بهره بگیرند. در میان این مدل‌ها، مدل SWAT^۱ به‌عنوان یکی از ابزارهای استاندارد و قدرتمند در شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی از جمله رژیم جریان و دبی سیلاب موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است و تاکنون پژوهش‌های بسیاری با استفاده از این مدل انجام شده است.

هار و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر ظرفیت نفوذپذیری و رواناب سطحی در زیر حوضه لاتونگ، اندونزی را بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد که تغییر کاربری اراضی (مانند تبدیل اراضی طبیعی به سطوح نفوذناپذیر) موجب کاهش شدید ظرفیت نفوذپذیری خاک شده است. در نتیجه، حجم رواناب سطحی در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ حدود ۲۲ درصد افزایش یافته است. یافته‌ها حاکی از آن است که مدیریت نادرست اراضی می‌تواند تعادل هیدرولوژیکی حوضه را برهم زده و خطر سیل‌خیزی را تشدید کند (Har et al, 2021). آراگو و میشر (۲۰۲۱) در حوضه آبریز رودخانه گیدابو، تأثیر تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین بر پاسخ هیدرولوژیکی رودخانه را طی دوره ۲۰۱۸-۱۹۹۸ با بهره‌گیری از مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل رگرسیون کمترین مربعات جزئی (PLSR) موردبررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات کاربری اراضی در این دوره منجر به افزایش میانگین رواناب سالانه سطحی به میزان

۶/۲۳ میلی‌متر شده است (Hermassi & Mishra, 2021). مارو و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به تجزیه و تحلیل اثرات تغییرات پوشش زمین و کاربری اراضی بر رواناب و دسترسی به آب سطحی در حوضه آواش اتیوپی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که در دوره ۲۰۱۶-۱۹۹۳، مساحت زمین‌های ساخته شده ۵/۳ درصد و زمین‌های بایر ۳/۴ درصد افزایش یافته است. همچنین بر اساس شبیه‌سازی با مدل کالیبره شده، کل رواناب حوضه تحت سناریوهای کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۹۳ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۷/۳۶۶ و ۱/۳۸۲ میلی‌متر برآورد گردید. علاوه بر این، شاخص تعادل آبی اقلیمی^۱ (CWB) در مقیاس فصلی روندی کاهشی را نشان داد که حاکی از تشدید فشار بر منابع آبی منطقه در نتیجه تغییرات کاربری اراضی است (Maru et al, 2023). هرماسی و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی هیدرولوژیکی یکپارچه استراتژی‌های حفاظت از خاک و آب: ارزیابی تاب‌آوری محیطی در حوضه آبخیز مرگیل تونس به بررسی اثرات اجرای تکنیک‌های حفاظت از آب و خاک (SWC) طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۰ پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد در مناطقی که این اقدامات همراه با بهبود پوشش گیاهی به کار گرفته شده بود، رواناب سطحی به‌ویژه در زیر حوضه‌های مرکزی طی این دوره ۲۰ ساله بیش از ۱۵ درصد کاهش یافته است. در مقابل، زیر حوضه‌های فاقد مداخلات حفاظتی، تغییرات محسوسی در میزان رواناب نشان ندادند (Hermassi et al, 2025). ژائو و همکاران (۲۰۲۴)، تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر هیدرولوژی حوضه آبی آنیانگ در کره جنوبی را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ با استفاده از مدل SWAT بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اراضی کشاورزی و مرتعی موجب افزایش رواناب سطحی و کاهش تبخیر-تعرق شده است. همچنین، نواحی جنوب شرقی حوضه به دلیل تغییر پوشش گیاهی، با افزایش تغذیه آب‌های زیرزمینی مواجه شده‌اند (Xiao et al, 2024). عبداللهی و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای به مدل‌سازی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه کاتسیناآلا با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج این پژوهش که طی دوره ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۰) انجام شد، نشان می‌دهد کاهش ۱۹/۸ درصدی پوشش جنگلی و گسترش زمین‌های کشاورزی منجر به افزایش ۷۹/۷ درصدی رواناب سطحی و کاهش قابل‌توجه در میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی شده است (Abdulai et al, 2025).

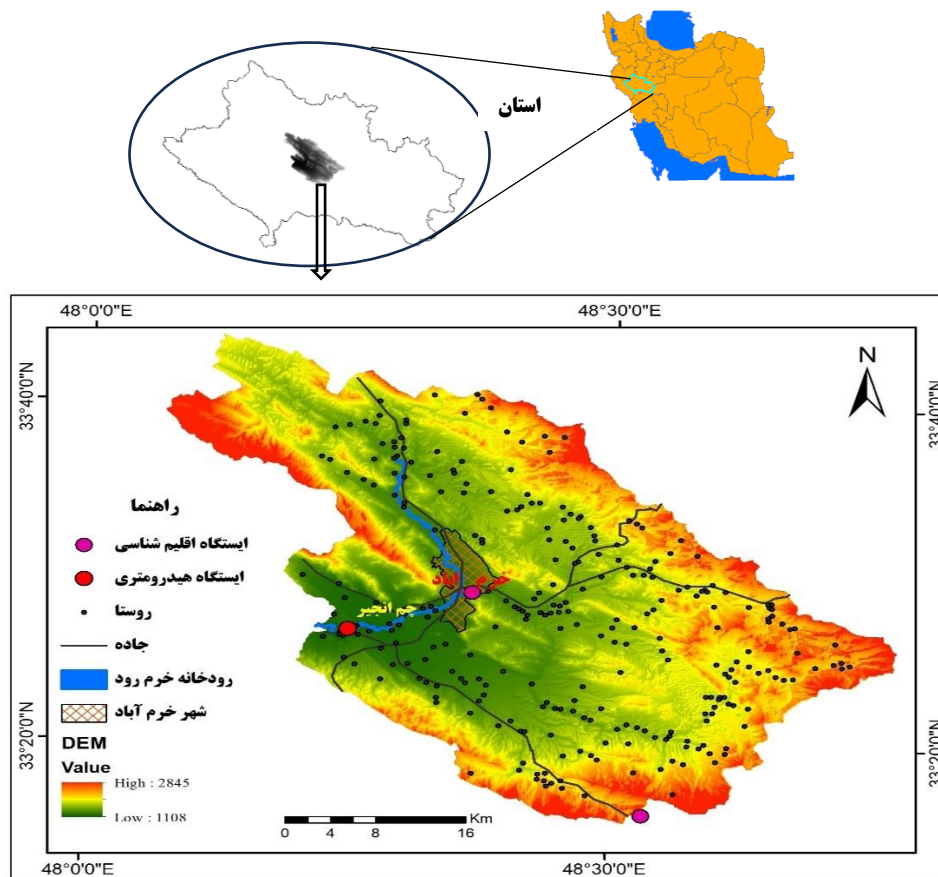
بلویی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر تغییر کاربری اراضی بر رواناب سطحی در حوضه آبخیز دوبرج استان ایلام به بررسی این پدیده با به‌کارگیری مدل SWAT و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در بازه زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۳ پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر پوشش جنگلی و مرتعی به اراضی بایر در طول این دوره، موجب افزایش دبی رواناب خروجی از ۳/۹۱ به ۵/۸۵ مترمکعب بر ثانیه شده است. رحمتی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش و سیل‌خیزی حوضه سقرچای در استان کردستان پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که حوضه مورد مطالعه از پتانسیل سیل‌خیزی بالایی برخوردار است. همچنین تحلیل تغییرات کاربری اراضی در دوره مطالعه حاکی از آن است که مساحت اراضی کشاورزی ۲/۱۳۴ هکتار و مراتع متراکم ۱۷/۱۹ هکتار کاهش یافته، درحالی‌که اراضی بایر و ساخته شده به ترتیب ۱۶/۴۶ و ۲/۰۷۲ هکتار افزایش داشته‌اند. این تغییرات به‌عنوان عامل اصلی تشدید فرسایش و افزایش سیل‌خیزی در حوضه شناسایی شده است. حسن‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به ارزیابی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر دبی رودخانه دره رود طی بازه زمانی ۳۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۹۰) با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر روند کاربری اراضی به سمت سطوح غیرقابل نفوذ، حتی به میزان ۵ درصد، منجر به افزایش قابل‌توجه رواناب در حوضه شده است. بیانی و همکاران

(۱۴۰۳) تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر رواناب را با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز تجن طی دوره زمانی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ موردبررسی قرار دادند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که پدیده‌های جنگل‌زدایی، رشد جمعیت و افزایش فعالیت‌های دامداری از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تشدید رواناب سطحی در منطقه مورد مطالعه بوده‌اند. رضایی مقدم و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر روند وقوع سیلاب در حوضه آبریز مردق چای با به‌کارگیری مدل SWAT و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج این مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱ نشان داد که به‌استثنای اراضی بایر، سایر طبقات پوشش و کاربری اراضی از روند افزایشی برخوردار بوده‌اند. این پژوهش همچنین نشان داد که روند تغییرات رواناب در سطح حوضه تا حد زیادی با تغییرات کاربری اراضی همسو بوده و نواحی جنوبی حوضه بیشترین تأثیر را از این تغییرات پذیرفته‌اند. زمانی و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی به بررسی رفتار هیدرولوژیکی و روندهای احتمالی جریان در حوضه کنگیر تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل SWAT پرداختند. این مطالعه که تغییرات ۲۶ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۰) کاربری اراضی و پوشش زمین را تحلیل کرده است، نشان می‌دهد که این تغییرات نقش مهمی در دگرگونی چرخه هیدرولوژیکی حوضه و افزایش رواناب ایفا نموده است.

با توجه به نتایج این پژوهش‌ها از مناطق مختلف جهان، می‌توان نتیجه گرفت که امروزه بیشتر حوضه‌ها به‌ویژه حوضه‌های واقع در مناطق نیمه‌خشک با چالش‌های دوگانه تغییرات الگوی بارش و تغییرات کاربری روبرو هستند. در این راستا، حوضه آبخیز خرم‌رود به‌عنوان یکی از حوضه‌های مهم شهرستان خرم‌آباد که حفظ و مدیریت پایدار منابع آبی و اکوسیستم آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که معیشت جمعیت قابل‌توجهی از ساکنان این حوضه به‌طور مستقیم به فعالیت‌های کشاورزی و دامداری وابسته است و هرگونه تغییر در حوضه و رژیم هیدرولوژیکی آن می‌تواند اثرات مستقیمی بر امنیت غذایی و معیشتی این منطقه داشته باشد. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)، به پاسخ هیدرولوژیکی ناشی از تغییرات کاربری و پوشش زمین در حوضه خرم‌رود می‌پردازد. مطالعه حاضر از این جهت حائز اهمیت است که می‌تواند راهکارهای علمی برای مدیریت بهینه منابع آب در این حوضه ارائه دهد و نقشه راهی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در جهت تحقق مدیریت پایدار حوضه آبخیز باشد.

روش پژوهش

حوضه آبخیز خرم‌رود با مساحتی معادل ۱۶۴۱/۹ کیلومتر مربع در استان لرستان واقع شده است. از نظر مختصات جغرافیایی، این حوضه در محدوده ۲۱°۴۸' تا ۸°۴۹' طول شرقی و ۳۳°۱۳' تا ۳۳°۴۴' عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). رودخانه خرم‌رود، به‌عنوان شریان اصلی حوضه، از میان شهر خرم‌آباد عبور کرده و یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کرخه محسوب می‌شود. این حوضه دارای توپوگرافی کاملاً کوهستانی و نیمه کوهستانی با اختلاف ارتفاع قابل‌توجه است، به‌طوری‌که حداکثر ارتفاع به ۲۸۵۴ متر و حداقل ارتفاع در خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری چم انجیر) ۱۱۰۵ متر از سطح دریا می‌رسد. این تغییرات شدید ارتفاعی، سبب ایجاد شیب‌های تند و دره‌های عمیق شده که بر توزیع پارامترهای اقلیمی، پوشش گیاهی و رژیم هیدرولوژیکی حوضه تأثیر مستقیم می‌گذارد. این منطقه در تقسیم‌بندی کلان سیستم‌های زمین‌ساختی ایران در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد و از نظر زمین‌شناسی در ناحیه لرستان از کمربند چین‌خورده - رانده زاگرس و در شمال غرب فروافتادگی دزفول واقع شده است.



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعاتی حوضه خرم رود

از نظر ساختاری، تناوبی از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های کوچک و بزرگ در منطقه دیده می‌شود. قدیمی‌ترین سازند رخنمون یافته در هسته تاقدیس خرم‌آباد، سازند گرو می‌باشد. بر روی این سازند، توالی از سنگ‌های رسوبی به ترتیب شامل سنگ‌های کربناته سازند سروک (کرتاسه)، سپس سازندهای ایلام، امیران، کشکان، آسماری، آغاچاری و در نهایت، نهشته‌های کواترنری قرار گرفته‌اند (نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ خرم‌آباد). بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک خرم‌آباد، میانگین بارش سالانه این حوضه ۵۷۷ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۶/۸ درجه سانتی‌گراد است. با تطبیق این داده‌ها با شاخص آب و هوایی دمارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک (مدیترانه‌ای) تشخیص داده می‌شود (سعادت و همکاران، ۱۴۰۰). حوضه آبخیز خرم‌رود در منطقه رویشی زاگرس قرار دارد و از پوشش گیاهی غنی‌ای برخوردار است. محدوده گسترش جنگل‌ها از ارتفاع حدود ۸۰۰ متر شروع شده و تا ۲۲۰۰ متر و گاهی تا ۲۶۰۰ متر از سطح دریا امتداد دارد. گونه جنگلی غالب، بلوط ایرانی است و گونه‌های دیگر درختی و درختچه‌ای شامل پسته کوهی، گلابی وحشی، زبان گنجشک و بادام وحشی هستند. غالب تیپ مرتعی موجود در حوضه نیز از خانواده گون‌ها تشکیل شده است.

مدل ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)

برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی از مدل SWAT بهره گرفته شد. این مدل که یک چارچوب نیمه-توزیعی فیزیکی محسوب می‌شود، برای شبیه‌سازی بلندمدت کمی و کیفی منابع آب در حوضه‌های بزرگ طراحی شده است (Gassman et al, 20007). این مدل با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شرایط آب و

هوایی در دوره‌های طولانی‌مدت، توانایی شبیه‌سازی جامع مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیک از قبیل رواناب سطحی، نفوذ، جریان پایه و تبخیر-تعرق را دارا می‌باشد (Koltsida et al, 2023). یکی از مزیت‌های اصلی مدل SWAT، قابلیت اتصال آن به نرم‌افزار GIS است. این ویژگی به محققان و مدیران منابع آب این امکان را می‌دهد که حجم وسیعی از داده‌ها را به صورت لایه‌های اطلاعاتی مانند کاربری اراضی، خاک و مدل ارتفاع دیجیتال (DEM) به مدل وارد کنند. این فرآیند به تجزیه و تحلیل دقیق‌تر و بهینه‌تری از وضعیت هیدرولوژیکی حوضه‌ها کمک می‌کند و در نتیجه به بهبود تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت منابع آب منجر می‌شود.

داده‌های ورودی و پیش‌پردازش: شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از ابزار ارزیابی خاک و آب در این پژوهش بر پایه مجموعه‌ای جامع از داده‌های مکانی و زمانی صورت پذیرفت. پایه توپوگرافیکی تحلیل‌ها بر اساس مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سنجده استر پی‌ریزی شد که برای تعیین دقیق مرز حوضه آبریز، شبکه زهکشی، استخراج زیرحوضه‌ها و تهیه نقشه شیب مورد بهره‌برداری قرار گرفت. نقشه واحدهای خاک حوضه از مجموعه داده‌های جهانی خاک سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO-UNESCO) با مقیاس ۱:۵۰۰،۰۰۰ استخراج گردید تا پارامترهای هیدرولوژیک مرتبط با نفوذ، ذخیره رطوبتی و جریان آب زیرزمینی تعریف شوند.

برای پایش تغییرات زمانی، نقشه‌های پوشش و کاربری اراضی در دو مقطع زمانی سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰ از طریق طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر ماهواره‌ای لندست در محیط نرم‌افزار ENVI نسخه ۶.۵ تولید شدند. این نقشه‌ها در قالب پنج کلاس اصلی جنگل انبوه، جنگل تنک و مراتع، زمین‌های کشاورزی و سطوح شهری تهیه گردیدند. صحت و قابلیت اعتماد نقشه‌های تولیدشده با به‌کارگیری از پلتفرم گوگل ارث و از طریق محاسبه ضریب کاپا مورد ارزیابی قرار گرفت که دقت مطلوبی را برای تحلیل‌های کمی آبی نشان داد. داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر برای دوره آماری ۲۸ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۰) از سازمان هواشناسی کشور اخذ و پس از کنترل کیفیت در قالب مناسب برای مدل‌سازی آماده شدند. همچنین داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری چم انجیر برای همان دوره از شرکت آب منطقه‌ای تهیه گردید تا به‌عنوان داده مشاهداتی پایه برای فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گیرد.

پیاده‌سازی و اجرای مدل SWAT: پیاده‌سازی اولیه مدل در محیط ArcGIS نسخه ۴.۱۰ و با استفاده از ماژول ArcSWAT نسخه ۲۱.۴.۱۰.۲۰۱۲ انجام پذیرفت. در این مرحله، حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع به ۲۱ زیر حوضه هیدرولوژیکی تقسیم و سپس با تلفیق لایه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) به‌عنوان کوچک‌ترین اجزای محاسباتی ایجاد شدند. داده‌های اقلیمی برای شبیه‌سازی انتقال آب و تبخیر-تعرق با استفاده از روش هارگریوز-سامانی به مدل معرفی شدند. خروجی‌های اولیه مدل در نرم‌افزار SWAT Check مورد ارزیابی اولیه قرار گرفت و پس از اطمینان از صحت آن‌ها، فرآیندهای بعدی اجرا شد.

تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی با به‌کارگیری الگوریتم SUFI-2 در محیط نرم‌افزار SWAT-CUP نسخه ۲۶.۱.۵ انجام شد. در این مرحله، با استفاده از داده‌های دبی ماهانه ایستگاه چم انجیر، پارامترهای مؤثر بر رواناب به‌طور سیستماتیک شناسایی و رتبه‌بندی شدند. برای شناسایی پارامترهای تأثیرگذار در مرحله حساسیت سنجی از آماره t و مقدار p -value به‌عنوان معیارهای اصلی سنجش حساسیت استفاده شد و پارامترهای حساس شناسایی شدند. بر این اساس، ۲۱ پارامتر به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار برای فرآیند واسنجی نهایی انتخاب شدند از میان ۲۱ پارامتر

شناسایی شده ۹ پارامتر اول بیشترین اثرگذاری را در فرایند شبیه سازی بر عهده داشتند. دامنه تغییرات و مقادیر نهایی این پارامترها در (جدول ۱) به تفصیل ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای حساس مدل، دامنه تغییرات و مقادیر بهینه شده در فرآیند واسنجی

پارامتر	محدوده تغییرات			مقدار بهینه
	نوع تغییر	حد پایینی	حد بالایی	
تأخیر جریان آب زیرزمینی (روز)	GW_DELAY.gw	v	۱۱۰	۴۰۰
ضریب بازگشت آب به خاک	GW_REVAP.gw	v	-۰/۰۸	۰/۱۱۲۴
شیب هیدرولیکی لایه آبخوان	GWSOLP.gw	v	۰/۷	۰/۷۹۳
ضریب تغذیه آبخوان عمیق	RCHRG_DP.gw	v	۰/۳	۰/۳۶۶
طول شیب آبراهه (m)	SLSUBBSN.hru	v	۱۱۸	۱۱۸/۳
ضریب زهکشی آب زیرزمینی	ALPHA_BF.gw	v	-۰/۱۵	۰/۲۵
ضریب زبری مانینگ برای رواناب	OV_N.hru	r	۰	-۰/۱۶۰۴
ظرفیت نگهداری آب در خاک (mm/mm)	SOL_AWC(..).sol	r	-۰/۱	۰/۱
آستانه سطح آب برای جریان پایه (mm)	GWQMN.gw	v	۰	۵۰۰۰
شماره منحنی رواناب	CN2.mgt	r	-۰/۲	-۰/۱۱۱
دمای آستانه ذوب برف (°C)	SMTMP.bsn	v	۱/۵	۲
حداکثر نرخ ذوب برف (mm/°C-day)	SMFMX.bsn	v	-۸	-۶/۵
حداقل نرخ ذوب برف (mm/°C-day)	SMFMN.bsn	v	۴/۵	۵/۵
هدایت هیدرولیکی کانال (mm/hr)	CH_K2.rte	v	۱۳۰	۱۵۰
ضریب زبری مانینگ برای کانال	CH_N2.rte	v	-۰/۰۵	۰/۱۵
ضریب چرخه آب گیاه	EPCO.bsn	v	۰/۴	۰/۸
ضریب جبران تبخیر-تعرق خاک	ESCO.bsn	v	-۰/۷۲	۰/۸۹
دمای آستانه یخبندان (°C)	SFTMP.bsn	v	-۰/۶	۲
ضریب تأخیر رواناب سطحی	SURLAG.bsn	v	۴	۴/۸
سطح اولیه آب زیرزمینی (m)	GWHT.gw	v	-۰/۱۶	۰/۱۶۵
زمان تأخیر جریان جانبی (روز)	LAT_TTIME.hru	v	۶۰	۸۰

برای فرآیند شبیه سازی، دوره زمانی ۱۹۹۳-۱۹۹۵ (معادل ۳ سال) به عنوان دوره گرم کردن^۱ و برای واسنجی دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۹۹۶ (معادل ۱۷ سال) و برای اعتبارسنجی، دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۳ (معادل ۸ سال) در نظر گرفته شد. این تقسیم بندی زمانی با در نظرگیری نسبت استاندارد ۷۰ درصد به ۳۰ درصد برای دوره های واسنجی و اعتبارسنجی انجام پذیرفت که مطابق با رویکردهای پذیرفته شده در مطالعات هیدرولوژیکی است (Moriasi et al, 2007). ارزیابی عملکرد مدل و تحلیل عدم قطعیت: عملکرد مدل SWAT پس از فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی، با استفاده از سه شاخص آماری ضریب تبیین (R^2)، کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و انحراف درصدی (PBIAS) مورد ارزیابی کمی قرار گرفت. معیارهای سنجش عملکرد بر اساس استاندارد ارائه شده در جدول ۲ ارزیابی شده اند.

جدول ۲. معیارهای سنجش عملکرد مدل (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷)

شاخص	عملکرد بسیار خوب	عملکرد خوب	عملکرد قابل قبول	عملکرد ضعیف
NSE	$-0.75 < NSE \leq 1$	$-0.65 < NSE \leq -0.75$	$-0.5 < NSE \leq -0.65$	$NSE \leq -0.5$
R ²	$-0.85 < R^2 \leq 1$	$-0.75 < R^2 \leq -0.85$	$-0.6 < R^2 \leq -0.75$	$R^2 \leq -0.6$
PBIAS	$PBIAS < \pm 10\%$	$\pm 10\% \leq PBIAS < \pm 15\%$	$\pm 15\% \leq PBIAS < \pm 25\%$	$PBIAS \geq \pm 25\%$

همچنین، قابلیت اطمینان شبیه‌سازی با دو معیار P-factor (پوشش عدم قطعیت) و R-factor (عرض باند عدم قطعیت) تحلیل شد. مقادیر P-factor بیشتر از ۰/۷ و R-factor کمتر از ۱/۵ به‌عنوان معیار مطلوب در نظر گرفته می‌شوند (Abbaspour et al, 2007). این چارچوب ارزیابی جامع، امکان قضاوت هم‌زمان در مورد صحت و قابلیت اطمینان شبیه‌سازی‌ها را فراهم می‌سازد.

تحلیل سناریوهای تغییر کاربری اراضی: به‌منظور ارزیابی کمی اثرات تغییرات زمانی کاربری اراضی بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه، دو سناریوی مجزا طراحی و اجرا گردید:

سناریوی پایه: در این سناریو از نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ به‌عنوان وضعیت مرجع استفاده شد.

سناریوی تغییر: در این سناریو از نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ که بیانگر تغییرات واقعی رخ‌داده در بازه زمانی مطالعه می‌باشد، بهره گرفته شد. مدل SWAT که پیشتر برای دوره آماری ۱۹۹۳-۲۰۲۰ واسنجی و اعتبارسنجی شده بود، برای هر یک از این سناریوها به‌صورت مجزا اجرا گردید. در این فرآیند، کلیه پارامترهای مدل و داده‌های هواشناسی ثابت نگه‌داشته شده و صرفاً نقشه کاربری اراضی تغییر داده شد تا اثر خالص تغییرات پوشش سطح زمین بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی به‌طور جداگانه موردبررسی قرار گیرد.

برای تحلیل کمی تغییرات و مقایسه سیستماتیک دو سناریو از رگرسیون خطی (رابطه ۱) و تحلیل‌های آماری پارامتریک استفاده شد:

$$Y_{2020} = \beta_0 + \beta_1 \times X_{2001} + \epsilon \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در آن:

❖ Y_{2020} : مقدار شبیه‌سازی‌شده متغیر هیدرولوژیکی (مانند دبی رواناب) در سناریوی سال ۲۰۲۰

❖ X_{2001} : مقدار شبیه‌سازی‌شده همان متغیر در سناریوی پایه (سال ۲۰۰۱)

❖ β_0 : عرض از مبدأ (Intercept) که نشان‌دهنده مقدار ثابت تغییر است

❖ β_1 : شیب خط (Slope) که نشان‌دهنده نسبت تغییر Systematic است:

اگر: $\beta_1 > 1$ افزایش در متغیر خروجی

اگر: $\beta_1 = 1$ عدم تغییر

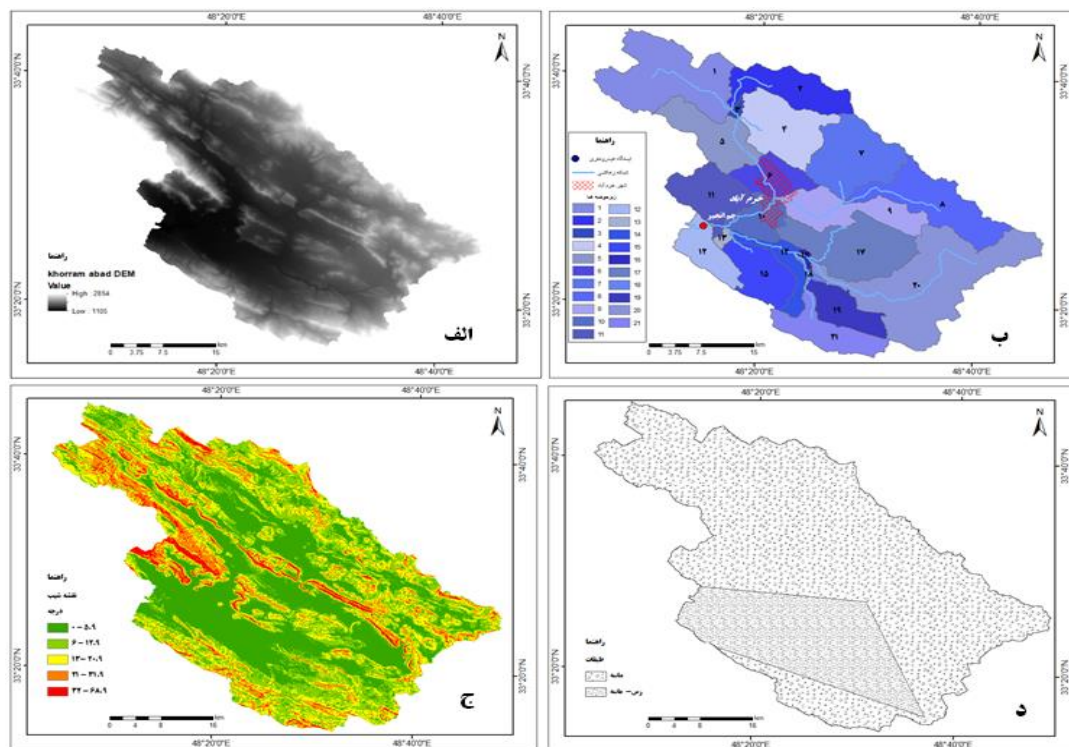
اگر: $\beta_1 < 1$ کاهش در متغیر خروجی

ϵ : جمله خطای مدل

این رویکرد تحلیلی امکان کمی سازی دقیق‌تر تأثیر تغییرات پوشش و کاربری اراضی را بر مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی فراهم می‌سازد.

یافته‌ها

مدل ارزیابی خاک و آب به‌منظور شبیه‌سازی جامع مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی حوضه، با در نظرگیری متغیرهایی نظیر نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شرایط آب‌وهوایی به کار گرفته شد. مبنای توپوگرافیکی تحلیل‌ها، مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سنجنده استر (شکل ۲) بود که برای تعیین دقیق مرز حوضه آبریز، شبکه زهکشی، استخراج زیرحوضه‌ها (۲۱ زیر حوضه) و تهیه نقشه شیب شامل ۵ کلاس (۰-۵۶/۹، ۱۲/۹-۱۳، ۲۰/۹-۲۱، ۳۱/۹-۳۲-۷۰ درجه) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی: الف) مدل رقومی ارتفاع، ب) زیر حوضه‌ها، ج) شیب، د) خاک

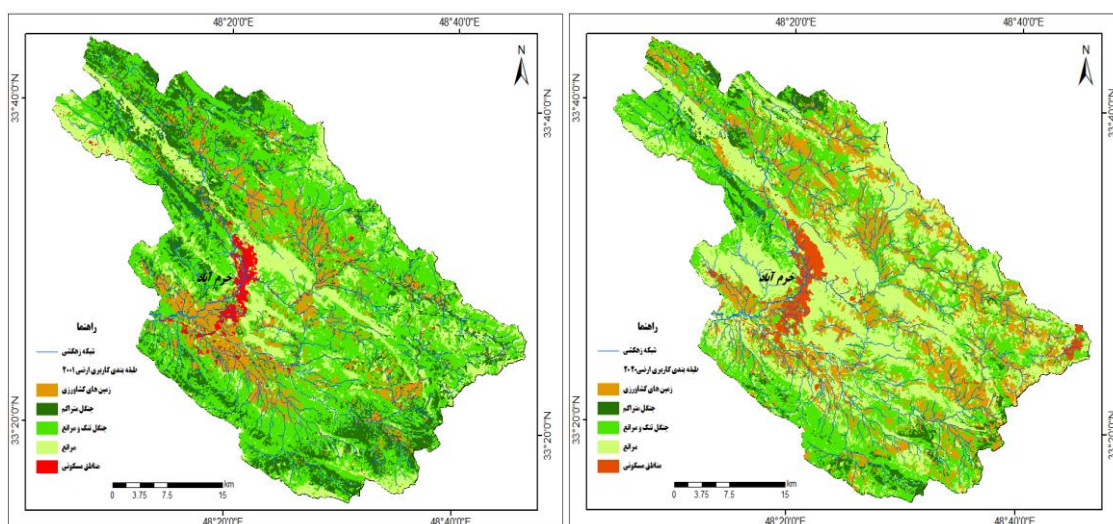
نقشه واحدهای خاک حوضه از مجموعه داده‌های جهانی خاک سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد در مقیاس ۱:۵۰۰،۰۰۰ استخراج گردید که شامل دو لایه خاک با کلاس بافت ماسه‌ای (گروه هیدرولوژیکی D) با ترکیب ۲۶ درصد رس، ۴۱ درصد سیلت و ۳۳ درصد ماسه، و کلاس بافت رس-ماسه (گروه هیدرولوژیکی C) با ترکیب ۱۵ درصد رس، ۱۹ درصد سیلت و ۶۶ درصد ماسه بود. این لایه‌ها به‌منظور تعریف پارامترهای هیدرولوژیک مرتبط با نفوذ، ذخیره رطوبتی و جریان آب زیرزمینی در مدل‌سازی به کار رفت (شکل ۲).

نقشه‌های طبقات پوشش و کاربری اراضی (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

نقشه‌های پوشش و کاربری اراضی در دو مقطع زمانی سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰، از طریق اجرای الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه گردیدند. انتخاب تصاویر در فصل بهار، با هدف کاهش تأثیر تغییرات فصلی پوشش گیاهی بر روی نتایج طبقه‌بندی، صورت پذیرفت. تصویر مربوط به سال ۲۰۰۱ از سنجنده TM ماهواره لندست ۵ با کد مسیر/ردیف ۱۶۶/۰۳۷ در تاریخ ۲۲ آوریل ۲۰۰۱ (۳ اردیبهشت ۱۳۸۰) و تصویر مربوط به سال ۲۰۲۰ از سنجنده OLI/TIRS ماهواره لندست ۸ با همان کد مسیر/ردیف در تاریخ ۲۳ می ۲۰۲۰ (۳ خرداد ۱۳۹۹) اخذ گردیدند.

کلیه عملیات بارزسازی تصویر، از قبیل بزرگ‌نمایی، کوچک‌نمایی و ترکیب رنگی کاذب RGB، بر اساس ترکیب باندهای ۳-۲-۴ برای لندست ۵ و ترکیب باندهای ۳-۴-۵ برای لندست ۸ انجام پذیرفت. بررسی فایل‌های ابر داده نشان داد که درصد پوشش ابر تصاویر مذکور به ترتیب ۸ و ۵/۵۹ درصد بوده که هر دو کمتر از آستانه ۱۰ درصد قرار دارند. پس از اجرای فرایند طبقه‌بندی، صحت و قابلیت اعتماد نقشه‌های تولیدشده با بهره‌گیری از تصاویر گوگل ارث مورد ارزیابی و کنترل قرار گرفت. برای سال ۲۰۲۰، از تصاویر گوگل ارث منطبق بر همان سال و برای سال ۲۰۰۱، به دلیل عدم دسترسی به تصویر مناسب گوگل ارث، از نزدیک‌ترین تصاویر موجود از لحاظ زمانی به‌عنوان مرجع استفاده شد. ضریب کاپا برای سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰ به ترتیب معادل ۹۳/۱۶ و ۹۵/۵۶ درصد محاسبه گردید.

این نقشه‌ها به‌منظور پشتیبانی از دو سناریوی پژوهشی طراحی شده و به‌عنوان پایه‌ای برای تحلیل تغییرات مکانی-زمانی و کمی سازی مساحت هریک از طبقات پوشش و کاربری اراضی در دوره مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه‌های طبقات پوشش و کاربری اراضی برای دو دوره ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰

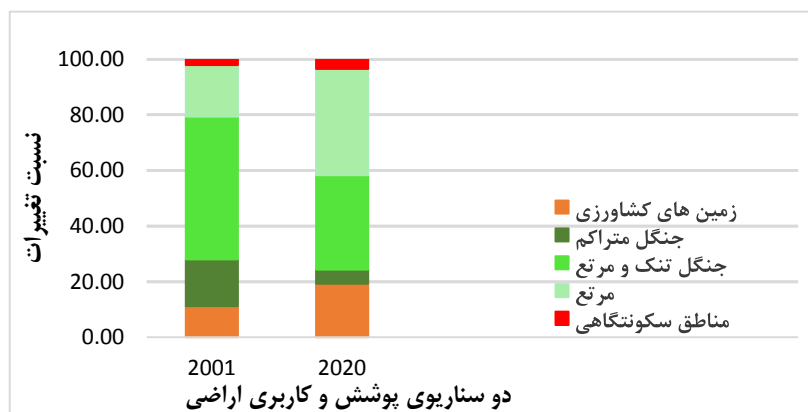
بر اساس داده‌های حاصل از مقایسه نقشه‌های پوشش و کاربری اراضی، منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ شاهد تغییرات قابل توجهی بوده است (جدول ۳). مساحت زمین‌های کشاورزی از ۱۸۳/۴۵ کیلومترمربع (۱۱/۱۷ درصد) به ۳۱۶/۵۸ کیلومترمربع (۱۹/۲۸ درصد) افزایش یافته که بیانگر رشد ۷۲/۵۷ درصدی است. جنگل متراکم کاهش چشمگیری از ۲۷۵/۶۲ کیلومترمربع (۱۶/۷۹ درصد) به ۸۲/۷ کیلومترمربع (۵/۰۴ درصد) را تجربه کرده که نشان‌دهنده کاهش ۶۹/۹۹ درصدی است. مساحت جنگل تنک و مرتع از ۸۴۳/۰۵ کیلومترمربع (۵۱/۳۵ درصد) به ۵۵۶/۷۶ کیلومترمربع (۳۳/۹۱ درصد) کاهش یافته که معادل ۳۳/۹۶ درصد کاهش است. مرتع با افزایش قابل توجهی از ۳۰۴/۲۹ کیلومترمربع (۱۸/۵۳ درصد) به ۶۲۸/۴۶ کیلومترمربع (۳۸/۲۸ درصد) رسیده که رشد بیش از صددرصدی را نشان می‌دهد. مناطق سکونتگاهی از ۳۵/۵۲ کیلومترمربع (۲/۱۶ درصد) به ۵۷/۴۲ کیلومترمربع (۳/۵ درصد) افزایش یافته که حاکی از رشد ۶۱/۶۸ درصدی است (شکل ۴).

جدول ۳. تغییرات مساحت و سهم طبقات پوشش و کاربری اراضی در دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

طبقه‌بندی کاربری اراضی ۲۰۰۱ طبقه‌بندی کاربری اراضی ۲۰۲۰

طبقات کاربری	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	درصد تغییر
زمین‌های کشاورزی	۱۸۳/۴۵	۱۱/۱۷	۳۱۶/۵۸	۱۹/۲۸	+۷۲/۵۷
جنگل متراکم	۲۷۵/۶۲	۱۶/۶۹	۸۲/۷	۵/۰۴	-۶۹/۹۹
جنگل تنک و مرتع	۸۴۳/۰۵	۵۱/۳۵	۵۵۶/۷۶	۳۳/۹۱	-۳۳/۹۶
مرتع	۳۰۴/۲۹	۱۸/۵۳	۶۲۸/۴۶	۳۸/۲۸	+۱۰۶/۵۳
مناطق سکونتگاهی	۳۵/۵۲	۲/۱۶	۵۷/۴۲	۳/۵	+۶۱/۶۸

درصد تغییرات نسبت به سال پایه (۲۰۰۱) محاسبه گردیده است.



شکل ۴. نمودار تغییرات پوشش و کاربری اراضی در بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۱)

نتایج شبیه‌سازی مدل برای دو سناریوی سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۱

فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با بهره‌گیری از الگوریتم SUFI-2 در محیط نرم‌افزار SWAT-CUP انجام پذیرفت. در این فرآیند، از نقشه پوشش و کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ به‌عنوان وضعیت مرجع استفاده شد و پارامترهای حساس مدل (جدول ۱) بر اساس داده‌های دبی ماهانه ایستگاه چم انجیر در دوره واسنجی (۲۰۱۲-۱۹۹۶) بهینه‌سازی گردیدند. عملکرد مدل در دوره اعتبارسنجی (۲۰۲۰-۲۰۱۳) با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 ، NSE و PBIAS مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۴).

به‌منظور بررسی تأثیر محض تغییرات پوشش و کاربری اراضی بر تغییرات دبی حوضه، دو سناریو تعریف شد: سناریوی پایه (پوشش و کاربری اراضی سال ۲۰۰۱) و سناریوی تغییر (پوشش و کاربری اراضی سال ۲۰۲۰). برای اجرای سناریوها، کلیه پارامترهای بهینه‌شده مدل و داده‌های اقلیمی ثابت نگه‌داشته شدند و تنها نقشه پوشش و کاربری اراضی به‌عنوان متغیر مستقل تغییر داده شد. بدین ترتیب، هرگونه تغییر در متغیرهای وابسته خروجی مدل (دبی جریان)، منحصرأً به تغییرات در پهنه‌های پوشش و کاربری اراضی نسبت داده می‌شود.

نتایج عملکرد مدل در سناریوی اول (سناریوی پایه)

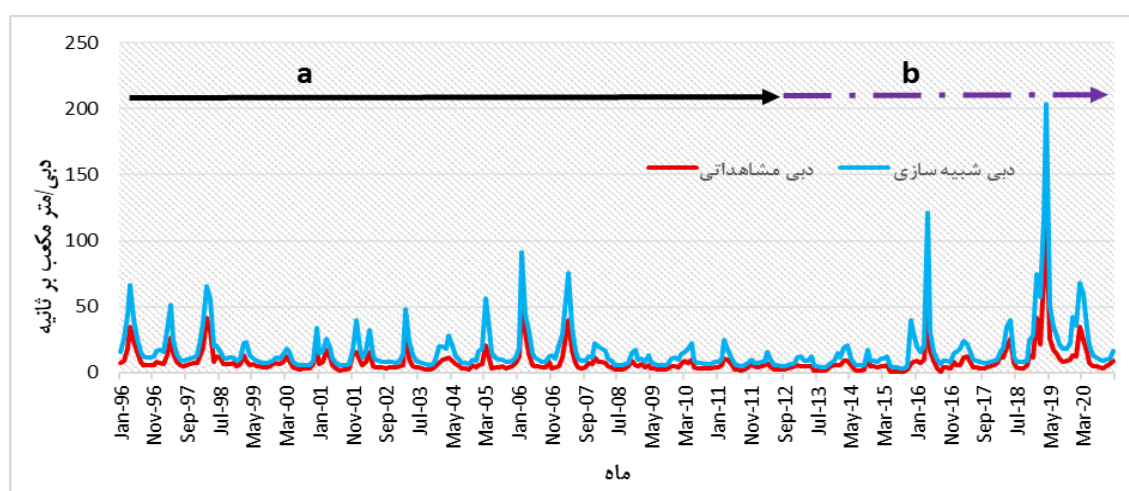
مدل SWAT با اعمال پارامترهای بهینه‌شده در سناریوی اول اجرا گردید. در دوره واسنجی (۲۰۱۲-۱۹۹۶)، مدل با شاخص‌های آماری $R^2=0.66$ ، $NSE=0.66$ و $PBIAS=1/8$ درصد عملکرد خوبی از خود نشان داد.

در دوره اعتبارسنجی (۲۰۲۰-۲۰۱۳)، این شاخص‌ها به ترتیب به 0.85 ، 0.85 و 0.3 درصد بهبود یافتند که بیانگر عملکرد بسیار خوب مدل می‌باشد (جدول ۴). بر اساس داده‌های شبیه‌سازی‌شده در این سناریو، مدل SWAT توانایی قابل‌توجهی در شبیه‌سازی روند تغییرات دبی ماهانه نشان داده است (شکل ۵). اگرچه مقادیر P-factor در دوره

اعتبارسنجی ($0/63$) اندکی کمتر از حد مطلوب $0/7$ است، اما مقادیر پایین R-factor ($0/47 - 0/35$) نشان‌دهنده عدم قطعیت قابل قبول در شبیه‌سازی‌هاست. این موضوع بیانگر آن است که علی‌رغم وجود عدم قطعیت در شبیه‌سازی دبی‌های پیک، مدل از دقت کافی برای تحلیل روندهای کلی برخوردار است.

جدول ۴. پارامترهای آماری در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از SWAT-CUP

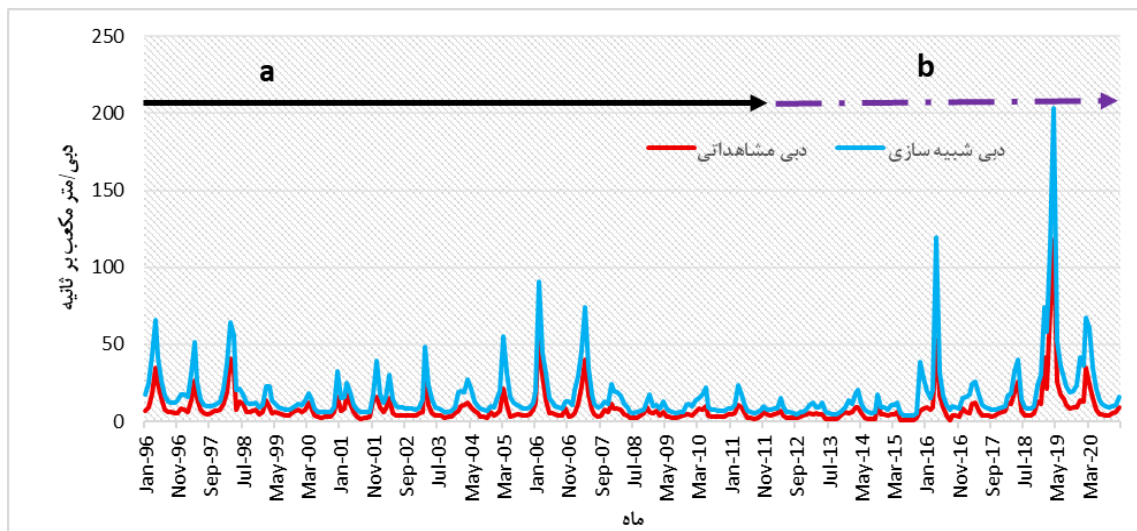
دوره	معیارهای سنجش عملکرد مدل					عملکرد مدل بر اساس مقدار NSE
	R-factor	P-factor	PBIAS	R ²	NSE	
۲۰۰۱-۱۹۹۶	۰/۶۶	۱/۸	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۴۷	خوب
۲۰۱۳-۲۰۲۰	۰/۸۵	۰/۰۳	۰/۶۳	۰/۳۵	۰/۳۵	بسیار خوب
۱۹۹۶-۲۰۱۲	۰/۶۶	-۰/۱	۰/۶۶	۰/۵۱	۰/۵۱	خوب
۲۰۱۳-۲۰۲۰	۰/۸۰	-۹/۲	۰/۴۹	۰/۳۳	۰/۳۳	بسیار خوب



شکل ۵. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دبی ایستگاه چم انجیر برای سناریوی پایه (a) دوره واسنجی (۱۹۹۶-۲۰۱۲) (b) دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۳-۲۰۲۰)

نتایج عملکرد مدل در سناریوی دوم (سناریوی تغییر)

در سناریوی تغییر، با حفظ همان پارامترهای بهینه‌شده مدل و جایگزینی نقشه پوشش و کاربری اراضی سال ۲۰۲۰، مدل مجدداً اجرا گردید. با توجه به ثابت بودن پارامترهای مدل، شاخص‌های آماری انطباق داده‌های شبیه‌سازی‌شده با مشاهداتی در این سناریو، مشابه سناریوی پایه بوده و در دوره واسنجی $NSE=0/66$ ، $R^2=0/66$ و $PBIAS=0/1$ و در دوره اعتبارسنجی، این شاخص‌ها به ترتیب به $0/80$ ، $0/81$ و $9/2$ درصد بهبود یافتند در محدوده خوب تا بسیار خوب قرار دارند (جدول ۴).



شکل ۶. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده دبی ایستگاه چم انجیر برای سناریو تغییر (a) دوره واسنجی (۱۹۹۶-۲۰۱۲) (b) دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۲۰) (۲۰۱۳)

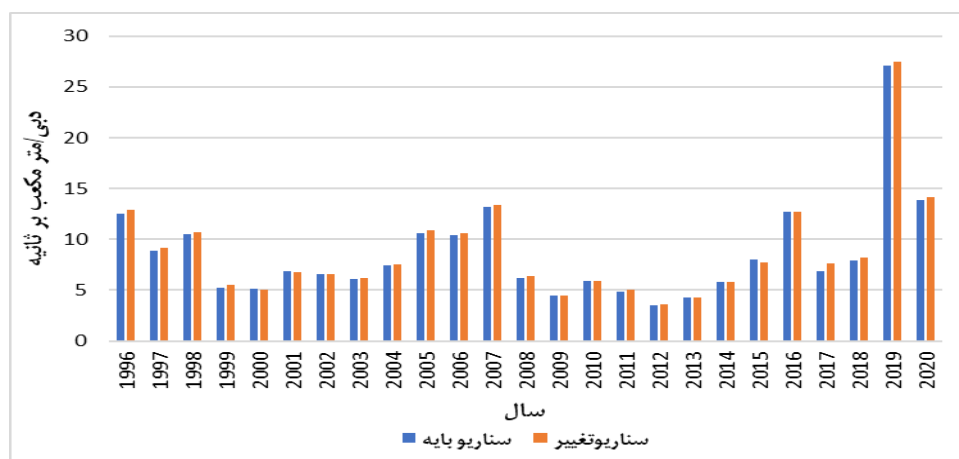
نتایج آنالیز رگرسیون خطی

به منظور بررسی کمی رابطه بین تغییرات پوشش و کاربری اراضی و دبی جریان، از تحلیل رگرسیون خطی بر پایه داده های دبی شبیه سازی شده سالانه در هر دو سناریو استفاده شد. این تحلیل بر مبنای مقایسه خروجی های مدل از دو سناریوی مجزا - پوشش و کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ به عنوان وضعیت پایه و پوشش و کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ به عنوان وضعیت تغییر یافته - انجام گرفت. رویکرد تطبیقی اتخاذ شده در این مطالعه، امکان تفکیک و کمی سازی اثرات خالص تغییرات کاربری اراضی را از سایر عوامل مؤثر بر دبی جریان حوضه فراهم می سازد. افزایش مقادیر کوواریانس بین زمان و دبی و واریانس کل دبی جریان در سناریوی تغییر نشان می دهد که تغییرات پوشش و کاربری اراضی نه تنها بر میانگین دبی، بلکه بر الگوی پراکندگی و تغییرپذیری آن نیز تأثیر گذاشته است. این موضوع حاکی از افزایش نوسانات در رژیم جریان حوضه است. مقادیر پایین ضریب تعیین (R^2) در هر دو سناریو (حدود ۰/۰۵۵) نشان می دهد که تنها بخش محدودی از تغییرات دبی توسط متغیر زمان تبیین می شود و عوامل دیگری نظیر بارش، ویژگی های فیزیوگرافیک و مدیریت حوضه نیز نقش دارند. با این حال، مقایسه ضرایب همبستگی به وضوح تأثیر جهت دار و مثبت تغییرات پوشش و کاربری اراضی در سناریوی تغییر را بر افزایش دبی جریان، در مقایسه با سناریوی پایه، نشان می دهد (جدول ۵).

جدول ۵. نتایج رگرسیون خطی برای دو سناریوی پوشش و کاربری اراضی

پارامتر	سناریو پایه (۲۰۰۱)	سناریو دوم (۲۰۲۰)	تفاوت	تفسیر
تعداد داده (n)	۲۵ سال	۲۵ سال	۰	حجم نمونه یکسان برای مقایسه معتبر
میانگین دبی ($\bar{y}$)	۸/۵۹۹۶	۸/۷۵۶۲	۰/۱۵۶۶	افزایش محسوس در دبی متوسط
SS_{xy}	۲۱۰/۰۳۳۸	۲۱۳/۲۹۸۱	۳/۲۶۴۳	افزایش قدرت و جهت رابطه بین (هم پراش) زمان-دبی
SS_{yy}	۶۱۵/۶۷۸۳	۶۲۷/۴۵۹۸	۱۱/۷۸۱۵	افزایش پراکندگی داده های دبی
SST	۶۱۵/۶۷۸۳	۶۲۷/۴۵۹۸	۱۱/۷۸۱۵	افزایش کل تغییرپذیری دبی
R^2	۰/۰۵۵۱	۰/۰۵۴۹	-۰/۰۰۰۲	پایداری ضریب تعیین
درصد تغییرات دبی که توسط زمان توضیح داده می شود	۰/۰۵۵۱	۰/۰۵۴۹	-۰/۰۰۰۲	

ضریب همبستگی (r)	۰/۲۳۴۷	۰/۲۳۴۳	-۰/۰۰۰۴	ارتباط خطی مشابه در دو سناریو
تعداد سال‌های با دبی بالاتر	-	۱۹ سال از ۲۵ سال	٪ ۷۶	غلبه روند افزایشی
عرض از مبدأ (b ₀)	۶/۴۹۹۲۸	۶/۶۳۳۲۱	۰/۱۳۳۹۳	افزایش مقدار پایه دبی
مقدار پایه دبی در سال مبدأ				
شیب (b ₁)	۰/۱۶۱۵۶	۰/۱۶۴۰۸	۰/۰۰۲۵	تشدید روند افزایشی سالانه
میزان تغییرات سالانه دبی جریان				
معادله رگرسیون - مدل	$\hat{y} = 6/49928 + 16156x$	$\hat{y} = 6/63321 + 16408x$	-	تغییر در ساختار مدل پیش‌بینی
پیش‌بینی دبی بر اساس زمان				
آزمون تی-جفتی (p-value)	-	-	۰/۰۰۳	وجود تفاوت معنی‌دار بین دو سناریو
سطح ۹۵ درصد				



شکل ۷. مقایسه روند تغییرات دبی سالانه در دو سناریوی پایه و تغییر

نتایج تحلیل‌های آماری حاکی از تأثیر معنادار تغییرات پوشش و کاربری اراضی بر افزایش دبی جریان است. میانگین افزایش ۰/۱۶ مترمکعب بر ثانیه دبی در سناریوی تغییر نسبت به سناریوی پایه، نشان‌دهنده تغییر محسوس در دبی جریان خروجی حوضه است. بر اساس آزمون تی-جفتی، این افزایش در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است ($p=0/003$). این افزایش در ۷۶ درصد از سال‌های دوره مطالعاتی (۱۹ سال از ۲۵ سال) مشهود بوده که بیانگر پایداری و تداوم این روند است. شیب روند افزایشی در سناریوی تغییر (۰/۱۶۴) نسبت به سناریوی پایه (۰/۱۶۱) حاکی از تشدید تدریجی اثر تغییرات پوشش و کاربری اراضی در بلندمدت است (شکل ۷). این تفاوت هرچند کوچک در یک دوره ۲۰ ساله منجر به اختلاف ۰/۰۵ واحدی در دبی پیش‌بینی شده می‌شود.

بحث

یافته‌های حاصل از پردازش داده‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با مدل SWAT نشان می‌دهد که تغییرات پوشش و کاربری اراضی در حوضه آبخیز خرم‌رود طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰، یکی از عوامل مؤثر در افزایش دبی جریان خروجی این حوضه بوده است. تحلیل نقشه‌های پوشش و کاربری اراضی (جدول ۳ و شکل ۴) بیانگر تغییرات چشمگیر در ساختار پوشش زمین است: کاهش ۶۹/۹۹ درصدی جنگل‌های متراکم، کاهش ۳۳/۹۶ درصدی جنگل‌های تنک و مراتع، در مقابل افزایش ۷۲/۵۷ درصدی زمین‌های کشاورزی و ۶۱/۶۸ درصدی سطوح سکونتگاهی. این تغییرات عمدتاً در بخش‌های شمالی و شرقی حوضه متمرکز بوده است (شکل ۳). الگوی این تغییرات با نتایج پژوهش‌های بلویی

و همکاران (۱۴۰۰) و رحمتی و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد که در آن‌ها نیز گسترش اراضی کشاورزی و سکونتگاهی با کاهش جنگل‌ها و مراتع همراه بوده است.

نتایج شبیه‌سازی با مدل SWAT در دو سناریوی پایه (پوشش و کاربری ۲۰۰۱) و تغییر (پوشش و کاربری ۲۰۲۰) نشان می‌دهد که میانگین دبی سالانه در سناریوی تغییر نسبت به سناریوی پایه، ۰/۱۶ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۱/۸ درصد) افزایش یافته است. هرچند این افزایش از نظر عددی محدود به نظر می‌رسد، اما تحلیل رگرسیون خطی نشان می‌دهد که شیب روند افزایشی دبی در سناریوی تغییر نسبت به سناریوی پایه بیشتر بوده است. این اختلاف در شیب، بیانگر تشدید تدریجی اثرات تغییرات کاربری اراضی در بلندمدت است. همچنین، مقادیر کوواریانس بین زمان و دبی در سناریوی تغییر (۲۱۳/۲۹) نسبت به سناریوی پایه (۲۱۰/۰۳) افزایش یافته که نشان‌دهنده قدرت بیشتر رابطه زمان-دبی در اثر تغییرات پوشش و کاربری است. این یافته با نتایج پژوهش‌های هار^۱ و همکاران (۲۰۲۱) و واره^۲ و همکاران (۲۰۲۴) همسو است که نشان داده‌اند تغییر پوشش و کاربری اراضی می‌تواند روند افزایشی دبی جریان را در طول زمان تشدید کند. بر اساس داده‌های جدول ۵، در ۷۶ درصد از سال‌های دوره مطالعاتی (۱۹ سال از ۲۵ سال)، دبی جریان در سناریوی تغییر بیشتر از سناریوی پایه بوده است. این موضوع نشان‌دهنده پایداری روند افزایشی دبی در اثر تغییرات پوشش و کاربری اراضی است. همچنین، افزایش واریانس کل دبی جریان از ۶۱۵/۶۷ در سناریوی پایه به ۶۲۷/۴۵ در سناریوی تغییر بیانگر افزایش نوسان‌پذیری دبی در اثر این تغییرات است. نتایج پژوهش حاضر از نظر میزان افزایش دبی جریان ناشی از تغییرات پوشش و کاربری اراضی، با پژوهش‌های بلویی و همکاران (۱۴۰۰) و حسن‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) همسو است.

پارامتر شماره منحنی (CN) رواناب نشان‌دهنده افزایش پتانسیل تولید رواناب سطحی در اثر تغییرات پوشش و کاربری است. کاهش جنگل‌های متراکم و جایگزینی آن با اراضی کشاورزی و سطوح سکونتگاهی، باعث افزایش ضریب رواناب و کاهش ظرفیت نفوذ آب به خاک شده است. این مکانیسم با نتایج پژوهش‌های مانند هار و همکاران (۲۰۲۱) که کاهش ظرفیت نفوذپذیری خاک را در اثر تغییر پوشش و کاربری اراضی گزارش کردند، هماهنگ است. پارامتر ضریب زبری مانینگ برای رواناب سطح (OV_N) و پارامتر ضریب تأخیر رواناب سطحی (SURLAG) نشان می‌دهد که تغییرات پوشش و کاربری باعث کاهش زمان تمرکز حوضه می‌شود. کاهش پوشش جنگلی و افزایش سطوح نفوذناپذیر، سرعت جریان سطحی را افزایش داده و حوضه را نسبت به رویدادهای بارشی سریع‌تر و با شدت بیشتری واکنش‌پذیر ساخته است. این یافته با نتایج پژوهش‌های نوحه‌گر و همکاران (۱۳۹۹) و رضایی مقدم و همکاران (۱۴۰۴) که کاهش زمان تمرکز را در اثر تغییرات کاربری گزارش کردند، همخوانی دارد. پارامترهای مربوط به آب زیرزمینی نظیر تأخیر جریان آب زیرزمینی (GW_DELAY)، ضریب بازگشت آب به خاک (GW_REVAP) و آستانه سطح آب برای جریان پایه (GWQMN) نشان می‌دهد که تغییرات پوشش و کاربری اراضی بر مؤلفه‌های جریان پایه نیز تأثیر گذاشته است. کاهش نفوذ آب به خاک در اثر تغییر کاربری، می‌تواند منجر به کاهش تغذیه آبخوان و در نتیجه کاهش جریان پایه در فصول خشک شود. هرچند در مطالعه حاضر، تأثیر بر جریان پایه به صورت مجزا بررسی نشده، اما پارامترهای بهینه‌شده مدل حاکی از تغییر در شرایط هیدرولیکی آبخوان در سناریوی تغییر است.

مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی (شکل ۵-b و ۶-b) نشان می‌دهد که مدل SWAT توانسته است دبی‌های اوج سیلابی را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی کند. در رویداد فروردین ۱۳۹۸، دبی اوج

1. Har

2. Ware

مشاهداتی ۹۱/۱۲ مترمکعب بر ثانیه و دبی شبیه‌سازی شده در سناریوی پایه و تغییر به ترتیب ۸۸/۶ و ۹۸/۵ مترمکعب بر ثانیه بوده است. این مقادیر نشان می‌دهد که در شرایط بارشی شدید، تغییرات پوشش و کاربری اراضی می‌تواند باعث افزایش قابل توجه دبی پیک سیلاب (حدود ۱۱ درصد) شود. این یافته با نتایج پژوهش‌های حسینی و همکاران (۱۳۹۸) و چن^۱ و همکاران (۲۰۱۹) که نشان داده‌اند که این تغییرات می‌تواند سیلاب‌های مخرب‌تری ایجاد کند، همسو است.

شاخص‌های عدم قطعیت مقادیر P-factor در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب بین ۰/۴۹ تا ۰/۶۶ و R-factor بین ۰/۳۳ تا ۰/۵۱ متغیر بوده است. هرچند مقادیر P-factor کمتر از حد مطلوب ۰/۷ است، اما مقادیر پایین-R-factor (کمتر از ۱/۵) نشان‌دهنده عدم قطعیت مطلوب در شبیه‌سازی‌هاست این موضوع بیانگر آن است که مدل از دقت آماری خوبی برخوردار است. هرچند نتایج این پژوهش نشان‌دهنده افزایش دبی جریان در اثر تغییرات پوشش و کاربری اراضی است، اما بررسی دقیق مکانیسم‌های هیدرولوژیکی نظیر تغییرات زمان تمرکز، ضریب رواناب و تغذیه آبخوان، نیازمند پژوهش‌های تکمیلی با استفاده از داده‌های دقیق‌تر و مدل‌سازی جامع‌تر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از تلفیق سنجش‌ازدور و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، به بررسی تأثیر تغییرات پوشش و کاربری اراضی بر دبی جریان خروجی حوضه آبخیز خرم‌رود طی دوره ۲۵ ساله (۱۹۹۶-۲۰۲۰) پرداخت. یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییرات گسترده در پوشش زمین، به‌ویژه کاهش ۶۹/۹۹ درصدی جنگل‌های متراکم، کاهش ۳۳/۹۶ درصدی جنگل‌های تنک و مراتع، و گسترش ۷۲/۵۷ درصدی اراضی کشاورزی، به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در افزایش دبی جریان خروجی این حوضه عمل کرده است.

بر اساس نتایج مدل SWAT، تغییرات پوشش و کاربری اراضی منجر به افزایش میانگین دبی جریان سالانه به میزان ۰/۱۶ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۱/۸ درصد) شده است. بررسی روند بلندمدت نشان می‌دهد که شیب افزایش دبی در سناریوی تغییر (۰/۱۶۴) نسبت به سناریوی پایه (۰/۱۶۱) بیشتر بوده که نشان‌دهنده تشدید تدریجی اثرات این تغییرات در گذر زمان است. این روند افزایشی در ۷۶ درصد از سال‌های دوره مطالعاتی مشهود بوده که بر پایداری و تداوم آن تأکید دارد. از جنبه مکانیسم اثر، کاهش ظرفیت نفوذپذیری خاک در اثر جایگزینی پوشش جنگلی با اراضی کشاورزی و سطوح سکونتگاهی، به‌عنوان عامل اصلی این تغییرات شناسایی شد. بر اساس پارامترهای بهینه‌شده مدل (نظیر کاهش ضریب زبری مانینگ و افزایش شماره منحنی رواناب)، به نظر می‌رسد که تغییرات پوشش و کاربری اراضی بر مشخصات هیدرولیکی سطح حوضه تأثیر گذاشته است. این تغییر الگو به‌ویژه در رویدادهای حدی مانند سال ۲۰۱۹ مشهود بوده که در آن افزایش ۱۱/۱ درصدی دبی پیک در سناریوی تغییر ثبت شد؛ با این حال، این مقادیر صرفاً مربوط به یک رویداد خاص بوده و برای نتیجه‌گیری درباره الگوی کلی سیلاب‌ها، نیاز به تحلیل آماری جامع‌تر با در نظر گرفتن دوره‌های بازگشت مختلف می‌باشد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تدوین راهبردهای مدیریت پایدار حوضه، برنامه‌ریزی محیطی و اتخاذ سیاست‌های مناسب در جهت کاهش اثرات منفی تغییرات کاربری اراضی ارائه دهد. انجام مطالعات مشابه در حوضه‌های همگن و نیز بررسی اثرات ترکیبی تغییرات پوشش و کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی می‌تواند به‌عنوان جهت‌های پژوهشی آتی پیشنهاد گردد.

حامی مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به‌طور مساوی در طراحی پژوهش، گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، مقاله و نگارش پیش‌نویس‌های اولیه و بعدی آن مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌هاست.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- بالویی، فاطمه؛ سلطانی، کوپایی، سعید و توکلی، محسن. (۱۴۰۰). بررسی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رطوبت موجود در خاک در حوضه دوبرج استان ایلام. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۲ (۲۳)، ۱۸۰-۱۹۰.
<https://doi.org/10.52547/jwmr.12.23.180>.
- بیانی، هاید؛ باقری، علی؛ اکبری نودهی، داود و کریمی، ولی اله. (۱۴۰۳). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر رواناب با استفاده از مدل SWAT در حوزه آبخیز تجن. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۵ (۲)، ۷۷-۸۸.
<https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.77>.
- حسن‌زاده، رسول؛ اسفندیاری درآباد، فریا و اصغری سراسکانرود، صباد. (۱۴۰۰). ارزیابی نتایج تغییرات کاربری اراضی بر دبی رودخانه دره رود در بازه زمانی سی‌ساله با استفاده از مدل HEC_HMS. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۰ (۳)، ۱۷۴-۱۵۷.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.274972.1259>.
- حسینی، یاسر؛ رضائی مقدم، جواد و عبدالعلی‌زاده، زهرا. (۱۳۹۸). بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر سیل‌خیزی و دبی رواناب حوضه آبریز عموقین. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۸ (۲۲)، ۱۶۳-۱۴۵.
<https://doi.org/10.22111/jneh.2019.27508.1464>.
- رحمتی، فاطمه؛ رضائی مقدم، محمدحسین و نیکجو، محمدرضا. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش و سیل‌خیزی حوضه سقز قبل و بعد از احداث سد شهید کاظمی با استفاده از مدل ArcSWAT. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۴ (۱)، ۱۴۴-۱۲۷.
<https://doi.org/10.22034/gahr.2021.285039.1545>.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ حقیقت، عاطفه؛ رحیم‌پور، توحید و بهبودی، عبدالله. (۱۴۰۴). بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر روند وقوع سیلاب حوضه آبریز مردق‌چای با استفاده از مدل SWAT و شبکه عصبی مصنوعی. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۴ (۳)، ۹۲-۷۲.
<https://doi.org/10.22067/geoh.2025.92648.1558>.
- زمانی، معصومه؛ حسین زاده، محمد مهدی و رستمی، نورالدین. (۱۴۰۴). بررسی رفتار هیدرولوژیکی و روندهای احتمالی جریان حوضه کنگیر تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی با استفاده از SWAT. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۵ (۲)، ۳۹-۲۰.
<https://doi.org/10.61882/jeer.15.2.20>

- سعادت، علی؛ سلیقه، محمد و ناصرزاده، محمدحسین. (۱۴۰۰). تحلیل آسیب‌پذیری استان لرستان از تغییرات در بارش مؤثر بر طبق USDA. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۱ (۶۳)، ۴۴۲-۴۲۷. <https://doi.org/10.52547/jgs.21.63.427>
- نوحه‌گر، احمد؛ ظفر محتشمی، فرناز و علوی نائینی، علی. (۱۳۹۹). تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر شدت سیلاب‌های رودخانه‌ای (مورد مطالعه: حوضه آبریز درکه). *فصلنامه جغرافیا برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۱۰ (۳۹)، ۱۰۲۴-۱۰۱۳. <https://doi.org/20.1001.1.22286462.1399.10.39.30.7>
- یاراحمدی، داریوش و بیرانوند، حجت‌الله. (۱۳۹۳). *جغرافیای طبیعی لرستان*. (چاپ اول)، انتشارات دانشگاه لرستان.
- یاری، میثم؛ سلطانی گردفرامریزی، سمیه و قاسمی، محسن. (۱۳۹۸). بررسی نقش تغییر کاربری اراضی در هیدروگراف سیل و نوسانات سطح آب زیرزمینی در بخشی از حوضه آبخیز قره‌سو. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۸ (۳)، ۵۸-۴۱. <https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.80976>

References

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., & Mieleitner, J. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 413-430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- Abdulai, H., Awe-Peter, H. O., Babamaaji, R., Lawal, J. O., Ibrahim, D. M., Yusuf, M. J., Omoti, A. E., Amodu, P. O., Adepoju, M. O., James, G. K., Modie, C. S., & Shabu, T. (2025). Modelling the impact of land use change on hydrological processes in the Katsina-Ala Basin using SWAT. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 13, 235-251. <https://doi.org/10.4236/gep.2025.134013>
- Aragaw, H. M., & Mishra, S. K. (2021). Runoff curve number-potential evapotranspiration-duration relationship for selected watersheds in Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1), 640-655. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01193-6>
- Baloei, F., Soltani Kopaei, S., & Tavakoli, M. (2021). Evaluation of SWAT model for simulation of runoff and soil moisture in Doiraj Basin of Ilam Province. *Journal of Watershed Management Research*, 12(23), 180-190. <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.23.180> [in Persian]
- Bayani, H., Bagheri, A., Akbari Nodehi, D., & Karimi, V. (2024). The effect of land use change on runoff using the SWAT model in the Tajan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 15(2), 77-88. <https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.77> [in Persian]
- Chen, Q., Chen, H., Wang, J., Zhao, Y., Chen, J., & Xu, C. (2019). Impacts of climate change and land-use change on hydrological extremes in the Jinsha River Basin. *Water*, 11(7), 1398-1411. <https://doi.org/10.3390/w11071398>
- Choto, M., & Fetene, A. (2019). Impacts of land use/land cover change on stream flow and sediment yield of Gojeb watershed, Omo-Gibe basin, Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 84-99. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.01.003>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Har, R., Aprisal, A., Taifur, W. D., & Putra, T. H. A. (2021). The effect of land uses to change on infiltration capacity and surface runoff at Latung sub watershed, Padang City Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 331(1), 08002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133108002>
- Hasan Zadeh, R., Esfandiyari Darabad, F., & Asghari, S. (2021). Evaluation of land use changes on the discharge of Darre Rood river in the period (1990-2019) using HEC_HMS model. *Quantitative Geomorphological Research*, 10(3), 157-174. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.274972.1259> [in Persian]
- Hermassi, T., Kotti, M. L., & Jarray, F. (2023). Soil erosion in a changing environment over 40 years in the Merguellil catchment area of central Tunisia. *Applied Sciences*, 13(21), 11641-11671. <https://doi.org/10.3390/app132111641>
- Hermassi, T., Jarray, F., Tlili, W., Achour, I., & Mechergui, M. (2025). Integrative hydrologic modelling of soil and water conservation strategies: A SWAT-based evaluation of

- environmental resilience in the Merguellil watershed, Tunisia. *Frontiers in Water*, 7, 1521812. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1521812>
- Hoseini, Y., Ramezani Moghaddam, J., & Abdolalizadeh, Z. (2019). Evaluating the impact of land use changes on flooding and flood runoff in Amuqin Drainage Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(22), 145-163. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.27508.1464> [in Persian]
- Ivanov, V., Milyaev, I., Konstantinov, A., & Loiko, S. (2022). Land-use changes on Ob River floodplain (Western Siberia, Russia) in context of natural and social changes over past 200 years. *Land*, 11(12), 2258-2267. <https://doi.org/10.3390/land11122258>
- Koltsida, E., Mamassis, N., & Kallioras, A. (2023). Hydrological modeling using the Soil and Water Assessment Tool in urban and peri-urban environments: The case of Kifisos experimental subbasin (Athens, Greece). *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 917-931. <https://doi.org/10.5194/hess-27-917-2023>
- Maru, H., Hailelassie, A., Zeleke, T., & Teferi, E. (2023). Analysis of the impacts of land use land cover change on streamflow and surface water availability in Awash Basin, Ethiopia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 1-25. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2163193>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nohegar, A., Zafar Mohtashami, F., & Alavi Naeini, A. (2020). The effect of land use changes on the intensity of river floods (Case study: Darakeh catchment). *Geography and Regional Planning*, 10(2-3), 1013-1024. <https://doi.org/20.1001.1.22286462.1399.10.39.30.7> [in Persian]
- Pokhrel, Y., Burbano, M., Roush, J., Kang, H., Sridhar, V., & Hyndman, D. W. (2018). A review of the integrated effects of changing climate, land use, and dams on Mekong River hydrology. *Water*, 10(3), 266-293. <https://doi.org/10.3390/w10030266>
- Rahmati, F., Rezaei Moghaddam, M. H., & Nikjoo, M. R. (2021). The effects of land use change on erosion and flood in Saqqez Basin before and after Shahid Kazemi Dam construction, Arc SWAT model. *Geography and Human Relationships*, 4(1), 127-144. <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.285039.1545> [in Persian]
- Rezaei Moghaddam, M. H., Haghighat, A., Rahimpour, T., & Behboody, A. (2025). Assessing the effects of land use change on flood occurrence in the Mordaq Chai Watershed using the SWAT and artificial neural network models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 72-92. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.92648.1558> [in Persian]
- Rolando, J. L., Turin, C., Ramírez, D. A., Mares, V., Moneris, J., & Quiroz, R. (2017). Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.010>
- Saadat, A., Saligheh, M., & Nassrzadeh, M. (2021). Analyzing the vulnerability of the Lorestan Province due to changes in effective rainfalls, based on USDA method. *Journal of Geographical Sciences*, 21(63), 427. <https://doi.org/10.52547/jgs.21.63.427> [in Persian]
- Spruce, J., Bolten, J., Mohammed, I. N., Srinivasan, R., & Lakshmi, V. (2020). Mapping land use land cover change in the Lower Mekong Basin from 1997 to 2010. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00021>
- Vogel, J., Paton, E., Aich, V., & Bronstert, A. (2021). Increasing compound warm spells and droughts in the Mediterranean Basin. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100312>
- Ware, H. H., Chang, S. W., Lee, J. E., & Chung, I. M. (2024). Assessment of hydrological responses to land use and land cover changes in forest-dominated watershed using SWAT model. *Water*, 16(4), 528-557. <https://doi.org/10.3390/w16040528>
- Xiao, C., Gong, Y., Pei, X., Chen, H., Li, S., Lu, C., Chen, L., Zheng, X., Zheng, J., & Yan, X. (2024). Impacts of land-use change from primary forest to farmland on the storage of soil organic carbon. *Applied Sciences*, 14(11), 4736-4753. <https://doi.org/10.3390/app14114736>
- Yari, M., Soltani-Gerdefaramarzi, S., & Ghasemi, M. (2019). Investigation of the effect of land use changes on flood hydrograph and fluctuations of groundwater level in part of Ghareh

- Souh Basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(3), 41-58.
<https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.80976> [in Persian]
- Zamani, M., Hosseinzadeh, M. M., & Rostami, N. (2025). Investigating the hydrological behavior and possible flow trends of the Kangir Basin under the influence of land use change using the SWAT model. *Environmental Erosion Research*, 15(2), 20-39.
<https://doi.org/10.61882/jeer.15.2.20> [in Persian]