



Assessing the Effects of Land Use Change on Flood Occurrence in the Mordaq Chai Watershed Using the SWAT and Artificial Neural Network Models

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam^{1*}, Atefeh Haghighat²,
Tohid Rahimpour³, Abdollah Behboody⁴

¹Professor in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz and Iranian Hazardology Association, Tabriz, Iran

²M. Sc in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Postdoctoral Researcher in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴Ph.D in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 14 March 2025

Revised: 24 May 2025

Accepted: 12 June 2025

Available Online: 13 June 2025

Keywords:

Land Use Change
Flood Risk Assessment
Hydrological Modeling
Watershed Management
SWAT Model

ABSTRACT

Over the past few decades, significant changes have occurred in the Mardagh Chay watershed, primarily due to the development of agricultural lands, the expansion of settlements, and other activities. During this period, several events such as surface flows and river overflows have taken place, leading to flooding in settlements and damage to infrastructure. Accordingly, the present study examines and evaluates the impact of land use changes on flooding in the Mardagh Chay watershed in East Azerbaijan Province. First, land use classification was performed using an artificial neural network model, and land use maps were generated for 2001, 2011, and 2021. Subsequently, the SWAT model was applied to the classification results. According to the findings, over a period of twenty years, with the exception of barren lands, all other land use classes showed a dominant increasing trend, with the rangelands of the region experiencing the greatest expansion. The results of the SWAT model also revealed that the runoff trend in the Mardagh Chay basin has largely corresponded with land use changes during this period. In particular, the growth of pasture and built-up areas in the region has had a direct impact on the increase in runoff in the southern areas. Considering the effect of the topography and slope of the basin on flow trends, as well as the greater imperviousness of land surfaces in the southern areas compared to others, the flood potential in these areas has been determined to be significantly higher.

*Corresponding author: Dr. Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam E-mail address: Rezmogh@tabrizu.ac.ir

How to cite this Article: 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/geoeH.2025.92648.1558>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Floods are considered one of the most important and abundant geomorphic hazards in the country, which cause a lot of damage every year. Recent events in the course of the Mordaq River have indicated the frequency and intensity of floods in the basin. However, the changes in hydrological and climatic regimes of the basin and what causes these changes in the basin have not been well studied. During the last few decades, significant developments have occurred in the Mordaq chai basin with the aim of developing agricultural lands, expanding settlements and other purposes. During this period, several events have been observed in surface flows and river flooding, including the flooding of settlements and the destruction of infrastructure during the rainy season. The present research has evaluated the impact of land use changes on floods in Mordaq chai basin in East Azerbaijan province.

Material and Methods

Mordaq Chai basin is located at latitudes between $37^{\circ} 16'$ and $37^{\circ} 44'$ north, and at longitudes between $46^{\circ} 21'$ and $46^{\circ} 30'$ east. The basin area is about 332 Km². The elevation variations of the basin range from 1567 meters at the outlet of the basin to 3693 meters in Sahand Mountain. In this study land use classification was done using artificial neural network model and land use map was obtained in 2001, 2011 and 2021. Then, the classification results were compared, for which the LCM model was used. The SWAT model has been implemented on the results of land use classification. In addition, the sensitivity assessment of the results has been considered in two phases of calibration and validation, in this regard, land use in 2001 was recalibrated in the statistical period of 1985-1999 and validated in the statistical period of 2000-2001. Also, the land use of 2011 was calibrated in the statistical period of 2002-2009 and validated in the statistical period of 2010-2011 and the land use of 2021 was calibrated in the statistical period of 2012-2019 and validated in the statistical period of 2020-2021.

Results and Discussion

Over the course of twenty years, with the exception of barren lands, other land use classes have shown a predominant upward trend, and the pastures in the region have witnessed the most significant expansion in terms of area. This shift highlights notable changes in land use patterns across the area. The increase in pastureland could be attributed to various factors, such as changes in agricultural practices, conservation policies, or even natural shifts in the ecosystem. This growth in pastures may have positive implications for biodiversity conservation, soil erosion prevention, and overall environmental improvement in the region. However, to fully understand the underlying reasons for these changes and their long-term impacts, a more detailed analysis and further data examination are required. According to the physiography and topography governing the basin, the situation is such that in the northern half of the region, we see more natural land cover (including snow, water, barren and pasture) than in the southern half, where human activities (gardens and built-up lands) dominate. The role of Mordaq Chai river in this field has also been significant and for example, most of the gardens of the region are distributed linearly next to this river and its branches, or the villages of the region that have the largest area of built-up land are located in the vicinity of these rivers. In 2001, wasteland, pastures, and gardens accounted for the largest share of existing land uses at 61.21%, 29.1%, and 8.01%, respectively, and snow, built-up areas, and water were next in rank at 1.59%, 0.073%, and 0.016%, respectively. In 2021, the relative share of barren lands has decreased sharply and reached 28.21% of the entire region, and on the other hand, pastures have grown a lot and their relative share in the region has become 54.45%.

Conclusions

The simulation outcomes generated by the SWAT model revealed certain limitations in its application within the Mordaq Chai basin. Specifically, the calibration and validation phases at the overarching basin scale, which incorporated land use data from varying years, yielded suboptimal and unsatisfactory results. This primary deficiency was quantitatively demonstrated by the fact that the observed runoff data points

frequently fell outside the simulated uncertainty range predicted by the model. The root cause of this discrepancy has been identified as a fundamental inadequacy in the model's algorithmic representation of snowmelt-driven runoff. The SWAT model appears to systematically miscalculate the volume and timing of runoff originating from the melting snowpack, particularly during the critical hydrological period spanning from late winter through late spring. This improper estimation significantly compromises the accuracy of the overall surface runoff simulation, as snowmelt is a major contributor to the basin's hydrologic regime. Furthermore, the analysis of long-term trends established a strong correlation between the hydrological behavior of the basin and anthropogenic changes to the landscape. The recorded trajectory of runoff in the Mordaq Chai basin has been largely congruent with and influenced by the concurrent pattern of land use and land cover change (LULC) over the same period. A direct causal relationship was observed: the expansion of two specific land use classes—pastureland and built-up/urbanized areas—within the southern regions of the watershed has acted as a primary driver for increased runoff generation. This phenomenon is exacerbated by the underlying physiographic characteristics of the basin. The southern areas are distinguished by a more pronounced topography and steeper slopes, which naturally accelerate flow velocity and reduce concentration times. Coupled with this, the land surface in these southern zones has become increasingly impervious due to urbanization and the degradation of natural vegetation cover. This combination of factors—steeper slopes and reduced infiltration capacity—creates a synergistic effect that drastically elevates the flood potential, making these southern areas disproportionately more vulnerable to high-flow events and flooding compared to other parts of the basin.

Acknowledgements

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.





بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر روند وقوع سیلاب حوضه آبریز مردق چای با استفاده از مدل SWAT و شبکه عصبی مصنوعی

محمدحسین رضائی مقدم^{۱*}، عاطفه حقیقت^۲، توحید رحیم پور^۳، عبدالله بهبودی^۴

^{۱*} استاد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ پژوهشگر پسادکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۴ دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	در طی چند دهه اخیر، تحولات محسوسی در گستره حوضه آبریز مردق چای با هدف توسعه زمین‌های زراعی، گسترش سکونت‌گاه‌ها و مقاصد دیگر صورت گرفته است. در این مدت، چندین رویداد مانند جریان‌های سطحی و طغیان رودخانه‌ها رخ داده که منجر به سیلاب در شهرک‌ها و آسیب به زیرساخت‌ها شده است. بر همین اساس، پژوهش حاضر به مطالعه و ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر سیلاب در سطح حوضه مردق چای در استان آذربایجان شرقی پرداخته است. ابتدا طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی انجام شده و نقشه کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به دست آمده است. در ادامه، مدل SWAT بر روی نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی به اجرا درآمده است. مطابق نتایج، در طی مدت زمان بیست ساله، به استثنای اراضی بایر، دیگر طبقات کاربری اراضی دارای روند غالب افزایشی بوده‌اند که مراتع منطقه با بیشترین رشد وسعت مواجه شده است. نتایج مدل SWAT نیز حاکی از این بوده که روند رواناب در سطح حوضه مردق چای تا حد زیادی با روند تغییرات کاربری اراضی منطقه در طی این مدت هم‌سو بوده است و رشد گستره اراضی مرتعی و ساخته شده در سطح منطقه تأثیر کاملاً مستقیمی بر افزایش رواناب در این نواحی جنوبی گذاشته است و با توجه به تأثیر توپوگرافی و شیب حوضه بر روند جریان و نفوذناپذیرتر بودن سطح زمین در نواحی جنوبی نسبت به سایر نواحی، پتانسیل سیل‌خیزی در این نواحی بسیار بالاتر از سایر مناطق تشخیص داده شده است.
کلمات کلیدی:	
تغییرات کاربری اراضی	
ارزیابی ریسک سیلاب	
مدل‌سازی هیدرولوژیکی	
مدیریت حوضه آبریز	
مدل SWAT	

مقدمه

امروزه رشد سریع جمعیت، شهرنشینی روزافزون و توسعه اقتصادی منجر به افزایش تقاضا برای آب، انرژی و غذا گردیده و فشار مضاعفی بر زمین و منابع آب در سراسر جهان وارد نموده است. به دنبال این وضعیت، در حال حاضر بسیاری از مناطق در سراسر جهان و به ویژه در کشورهای در حال توسعه، دستخوش تغییرات قابل توجه در کاربری یا پوشش زمین شده‌اند (Khoi, Loi, & Sam, 2021). یکی از پیامدهای مهم تغییرات کاربری اراضی تشدید وقوع سیلاب‌های مخرب است. سیلاب‌ها از مهم‌ترین و فراوان‌ترین مخاطرات در کشور محسوب می‌شوند که همه ساله خسارت‌های زیادی را بر جای می‌گذارند (Rezaei Moghaddam & Rahimpour, 2024). از دیدگاه زمین‌شناختی، سیل‌ها پیامد طبیعی جریان آب در یک محیط دائماً در حال تغییر هستند. بارندگی‌های شدید، تغییر کاربری زمین از جمله جنگل‌زدایی در بالادست حوضه و اقدامات مهندسی مختلف در مسیر رودخانه، همگی به بزرگی و فراوانی حوادث سیل کمک نموده است (Tali, 2011). تغییرات غیر یکنواخت کاربری اراضی موجب برهم خوردن چرخه آب از تعادل طبیعی می‌شود که پیامدهای ناشی از سیل‌های ویرانگر اعم از خسارات اقتصادی، تلفات جانی، هدررفت آب و نتیجتاً کاهش منابع آب در دسترس را به دنبال داشته است (Yari, Soltani-Gerdefaramarzi, & Ghasemi, 2019). تغییر کاربری زمین یک ویژگی مهم در فرآیند رواناب است که بر نفوذ، فرسایش، تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارد. تغییرات کاربری اراضی منجر به تغییراتی در ویژگی‌های بارندگی و رواناب یک حوضه می‌شود که متعاقباً بر رژیم‌های هیدرولوژیکی و رسوبی حوضه، تأثیر می‌گذارد (Choto & Fetene, 2019). به دلیل توسعه سریع، پوشش اراضی دستخوش تغییراتی می‌شود که باعث می‌شود بسیاری از خاک‌ها به سطوح غیرقابل نفوذ^۱ تبدیل شوند که منجر به کاهش سرعت نفوذ خاک و در نتیجه افزایش مقدار و سرعت رواناب می‌شود (Tali, 2011). تبدیل تالاب‌ها به مناطق شهری، منجر به توسعه سطوح نفوذ ناپذیر از قبیل خانه‌ها، معابر و بزرگراه‌ها گردیده و امکان نفوذ را به آب نمی‌دهد، بنابراین تمام آبی که روی آن‌ها می‌ریزد به رواناب تبدیل شده و در نتیجه بر چرخه آب منطقه‌ای تأثیر می‌گذارد (Achugbu et al., 2022).

مطالعه حوضه‌های آبریز برای ارزیابی تأثیر تغییر کاربری زمین بر وقوع سیل سابقه طولانی داشته و موضوعات سیل و تغییر کاربری اراضی در موارد متعددی در مناطق مختلف جهان مورد توجه قرار گرفته است. رحمتی و همکاران (Rahmati, Rezaei Moghaddam & Nikjoo, 2021) تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش و سیل‌خیزی حوضه سقزچای استان کردستان را در دوره قبل و بعد از احداث سد شهید کاظمی با استفاده از مدل ArcSWAT تجزیه و تحلیل و ارزیابی نموده‌اند. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، ضریب صحت‌سنجی و واسنجی رسوب راندمان نش - ساتکلیف برابر با ۰/۷۶ و ۰/۶۸ به دست آمده است که بر این اساس حوضه سیل‌خیز بوده است. علاوه بر این، اراضی کشاورزی و مراتع متراکم به ترتیب ۲/۱۳۴ و ۱۷/۱۹۵ هکتار کاهش و اراضی بایر و ساخته‌شده به ترتیب ۱۶/۴۶ و ۲/۰۷۲۲ هکتار افزایش مساحت داشته‌اند. در مطالعه‌ای به وسیله حلیم و همکاران (Haleem et al., 2022) اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم و کاربری زمین بر تغییرات رژیم جریان در بالادست حوضه سند در پاکستان تجزیه و تحلیل شده است. در این مطالعه، از مدل SWAT استفاده شده است و همچنین سناریوهای آینده کاربری زمین و تغییرات آب و هوایی به ترتیب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی اتوماتای سلولی و چهار مدل گردش عمومی تصحیح شده پیش‌بینی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل SWAT به خوبی عمل می‌کند. نتایج به‌دست آمده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ نشان داده است که تغییر اقلیم (۶۱/۶۱ درصد) تأثیر بیشتری بر رواناب رودخانه‌ها

1- Impervious

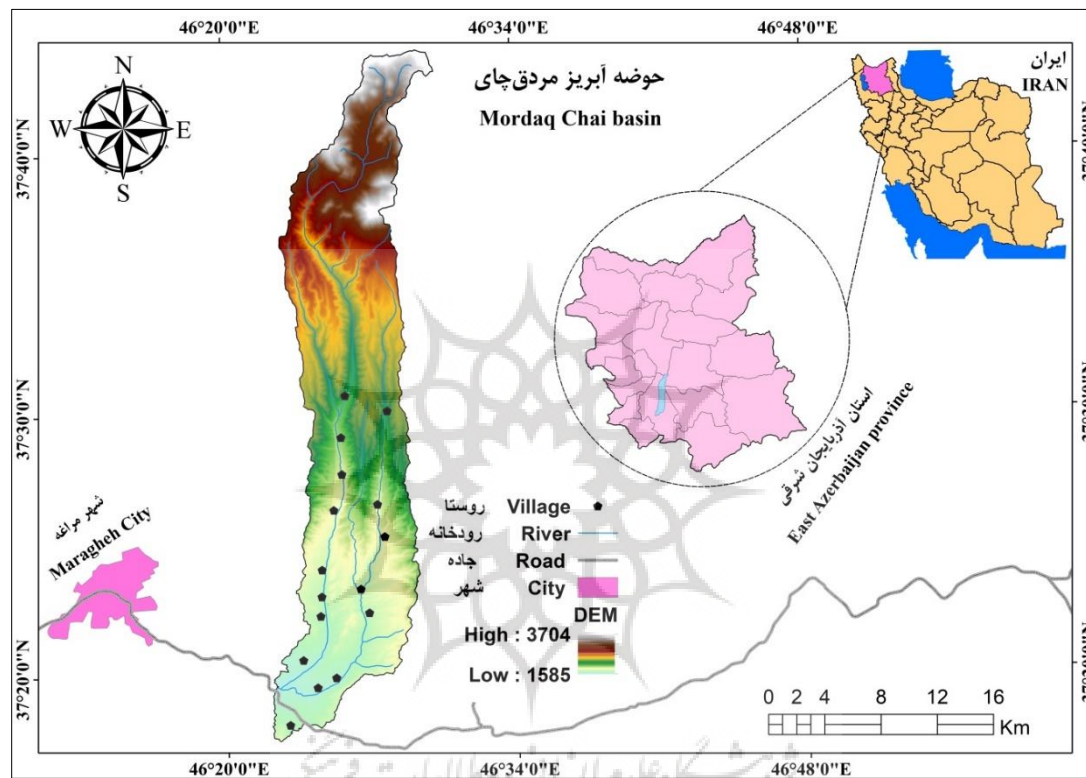
نسبت به تغییر کاربری زمین (۳۸/۳۹ درصد) دارد. بنابراین، پیش‌بینی شده که تغییرات آب و هوایی و کاربری زمین باعث افزایش عمق رواناب آینده در این حوضه شود که تأثیر تغییر اقلیم بیشتر خواهد بود. در تحقیقی سوگیانتو و همکاران (Sugianto, Deli, Miswar, Rusdi & Irham, 2022) به مطالعه تأثیر تغییر کاربری و پوشش زمین بر وقوع سیلاب در حوضه تونوم، آچه جایا واقع در جزیره سوماترا در کشور اندونزی پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده افزایش قابل توجهی در استفاده از زمین‌های مسکونی، زمین‌های باز، مزارع برنج و تالاب‌ها (آب‌ها) و نرخ‌های نفوذ مختلف در دوره زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ بوده است که به تنوع خطرات منطقه سیل کمک می‌کند. از نظر خطرپذیری سیل، این حوضه دارای ریسک بالا و بسیار زیاد (۱۱/۹۸ درصد)، خطر متوسط (۵۶/۲۴ درصد) و ریسک کم و بسیار کم (۳۱/۷۹ درصد) می‌باشد. مارو و همکاران (Maru, Hailesslassie, Zeleke, & Teferi, 2023) در پژوهش خود به تجزیه و تحلیل اثرات تغییر پوشش و کاربری زمین بر رواناب و دسترسی به آب سطحی در حوضه آواش در کشور اتیوپی اقدام نموده‌اند. در این پژوهش از مدل SWAT و تعادل اقلیمی آب (CWB) بهره گرفته شده است. نتایج پژوهش حاکی از آن بوده است که از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۶، مساحت زمین‌های ساخته‌شده و بایر به ترتیب ۵/۳ درصد و ۳/۴ درصد افزایش یافته است. همچنین بر اساس جریان روزانه کالیبره شده، رواناب در سناریوهای ۱۹۹۳ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۲۳۶/۰۱ میلی‌متر و ۲۷۲/۵۹ میلی‌متر برآورد گردیده است. علاوه بر این، کل رواناب حوضه برای سناریوهای کاربری زمین در سال ۱۹۹۳ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۳۶۶/۷ میلی‌متر و ۳۸۲/۰۱ میلی‌متر بوده است. شاخص CWB فصلی حوضه نیز روند کاهشی را نشان داده است.

امروزه وضعیت کاربری و پوشش زمین به شدت در حال تغییر است، به‌ویژه در مناطقی که اقتصاد آن‌ها عمدتاً مبتنی بر کشاورزی است. در طی چند دهه اخیر، تحولات محسوسی در گستره حوضه آبریز مردق‌چای با هدف توسعه زمین‌های زراعی، گسترش سکونتگاه‌ها و مقاصد دیگر صورت گرفته است. در طی این مدت چندین رویداد در جریانات سطحی و طغیان رودخانه‌ها از جمله سیلابی شدن شهرک‌ها و تخریب زیرساخت‌ها در طول فصل بارندگی مشاهده گردیده است. از طرفی دیگر، کاهش قابل توجه جریان آبراهه در فصل خشک نیز در حوضه آبریز رودخانه مردق‌چای اتفاق افتاده است. تحولات اخیر در جریان رودخانه مردق، حاکی از فراوانی و شدت وقوع سیل در سطح حوضه، بوده است. با این حال، تغییرات رژیم‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی حوضه و این که چه چیزی باعث این تغییرات در حوضه می‌شود، به‌خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بر همین اساس، پژوهش حاضر بر آن است که به مطالعه و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی در سطح حوضه مردق‌چای در استان آذربایجان شرقی پرداخته و تأثیر بالقوه این تغییرات بر روند سیلاب در آن را تجزیه و تحلیل نماید.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز مردق‌چای در مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 16' 32''$ تا $37^{\circ} 44' 02''$ درجه عرض شمالی و $46^{\circ} 21' 01''$ تا $46^{\circ} 30' 25''$ درجه طول شرقی گسترده شده است (شکل ۱). مساحت حوضه، بالغ بر ۳۳۲/۹ کیلومتر مربع می‌باشد. از نظر مقادیر ارتفاعی، حداکثر ارتفاع حوضه ۳۷۰۴ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۵۸۵ متر از سطح دریاهای آزاد است. مردق‌چای یک حوضه کاملاً کوهستانی است. روند ارتفاعی در این حوضه به‌گونه‌ای است که از شمال به جنوب از ارتفاع آن کاسته می‌شود. از نظر موقعیت نسبی، حوضه مردق‌چای در دامنه جنوبی کوه سهند واقع شده و از سمت شمال به حوضه رودخانه ليقوان‌چای، از سمت جنوب به حوضه رودخانه لیلان‌چای، از سمت شرقی به حوضه رودخانه قرنقو و از سمت غربی به رودخانه صوفی‌چای و چکان‌چای محدود می‌شود. رودخانه مردق‌چای از ذوب برف‌ها و یا چشمه‌های موجود در دامنه جنوبی کوه سهند سرچشمه گرفته و به طرف جنوب جریان می‌یابد که در ادامه این مسیر، رودخانه مغانجیق‌چای نیز به آن می‌پیوندد.

حجم آب سالیانه رودخانه مردق‌چای در حدود ۱۰۷ میلیون مترمکعب است اما از طرفی یک رودخانه تقریباً فصلی محسوب می‌شود که اغلب در تابستان خشک می‌شود. بر اساس محاسبات گرادیان درجه حرارت در ایستگاه سینوپتیک مراغه، میانگین درجه حرارت سالانه در حوضه مردق‌چای ۵/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه در این حوضه ۵۳۵/۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. مردق‌چای یکی از سرشاخه‌های دریاچه ارومیه است و مشتمل بر دامنه‌های ارتفاعات جنوبی کوه سهند و چشمه‌های روان مشرف به مسیر رودخانه فصلی مردق‌چای می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه مردق‌چای

Fig.1. Geographical location of the Mordaq chai basin

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر یکی از تحقیقات کاربردی با روش توصیفی - تحلیلی است که به منظور ارزیابی و بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر روند سیلاب در حوضه آبریز مردق‌چای استان آذربایجان شرقی به انجام رسیده است. در تحقیق حاضر از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸، داده‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، داده‌های خاک (مستخرج از نقشه جهانی فائو با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر) و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر به منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های فضایی و زمانی در بستر ArcGIS بهره گرفته شده است. در ادامه سه روش مختلف برای تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده واقع شده است: ۱- شبکه عصبی مصنوعی، ۲- مدل SWAT، ۳- مدل LCM.

h

مدل شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک مدل پردازش داده، است که مبتنی بر نحوه پردازش داده‌ها توسط سیستم‌های عصبی بیولوژیکی همچون مغز است (Dastres & Soori, 2021). به طور کلی، شبکه عصبی مصنوعی گروهی، متصل از گره‌هایی است که با استفاده از مبانی ریاضی به پردازش اطلاعات می‌پردازند. این رویکرد با ساختاری نوروئی^۱ و هوشمندانه از طریق الگوبرداری بهینه از نورون‌های موجود در مغز انسان تلاش می‌کند که رفتار درون سلولی نورون‌های مغزی را از طریق توابع تعریف شده ریاضی شبیه‌سازی کند و از طریق وزن‌های محاسباتی موجود در خطوط ارتباطی نورون‌های مصنوعی، عملکرد سیناپسی^۲ را در نورون‌های طبیعی مدل‌سازی نماید (Bakhtiyari, Komeh & Memarian, 2018). انواعی از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی کاربری و پوشش زمین وجود دارد. شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۳ (MLP) متداول‌ترین روش در این زمینه است که برای طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد انتقالی مغز انسان را شبیه‌سازی می‌کند. پرسپترون چند لایه یک کلاس کاملاً متصل از شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور^۴ است. شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به ترتیب شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی^۵ و یک لایه خروجی است و تابع آستانه^۶ به تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نورون‌های موجود در هر لایه پنهان و همچنین نوع تابع فعالیت به کار رفته در هر نورون می‌تواند تغییر نماید (Shirani, Heydari & Arabameri, 2017).

مدل SWAT

ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) به‌منظور پیش‌بینی اثرات اقدامات مدیریت زمین بر منابع آب و محصولات کشاورزی در حوضه‌های مختلف با خصوصیات خاک، کاربری اراضی و بهره‌برداری متفاوت در بستر زمان توسعه داده شده است (Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams & King, 2005). نقشه‌های اصلی مورد نیاز این مدل، شامل مدل رقومی ارتفاعی حوضه، نقشه‌های خاک‌شناسی، نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه و داده‌های اقلیمی است که باید در قالب رستری به مدل ارائه شوند. سایر اطلاعات مربوط به داده‌های جامع هواشناسی، کیفیت آب، مخازن، عوامل مؤثر بر جریان سطحی و کانال، آب زیرزمینی، برداشت آب، مدیریت اراضی و برخی زمینه‌های دیگر با توجه به هدف ارزیابی باید در مدل وارد شوند. رابطه اصلی در محاسبه تمام پارامترهای آب حوضه در این مدل به شرح رابطه (۱) است (Arnold et al., 2012).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در این رابطه، SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی‌متر)، SW_o مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)، t زمان بر حسب روز، R_{day} مقدار بارش در روز i (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آب نفوذی به لایه فوقانی خاک در روز i (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار آب زیرزمینی برداشت شده در روز i (میلی‌متر) می‌باشد.

- 1-Neuron
- 2-Synaptic
- 3-Multilayer perceptron
- 4-Feedforward
- 5- Hidden
- 6-Threshold

در گام نخست، داده‌های ورودی مورد نیاز شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی برای دو مقطع زمانی (به‌عنوان سناریو)، نقشه خاک‌شناسی و داده‌های هواشناسی روزانه (شامل بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد) جمع‌آوری گردید. داده‌های دبی روزانه از ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه نیز به‌منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل تهیه شد. داده‌های مکانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS و افزونه ArcSWAT پردازش و وارد مدل شدند. با استفاده از DEM، مرز حوضه و شبکه زهکشی استخراج و حوضه به چندین زیرحوضه تقسیم شد. در ادامه، ترکیب نقشه‌های کاربری اراضی، نوع خاک و شیب برای تولید واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (Hydrologic Response Units - HRUs) مورد استفاده قرار گرفت. این HRUها امکان تحلیل دقیق‌تری از رفتار هیدرولوژیکی در بخش‌های مختلف حوضه را فراهم می‌کنند (Ghazavi & Fazeli, 2019). شبیه‌سازی رواناب سطحی در مدل SWAT بر پایه معادله شماره منحنی خدمات حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) انجام می‌شود. سایر فرآیندهای مرتبط با چرخه هیدرولوژیکی از جمله تبخیر و تعرق بالقوه به روش Penman-Monteith، نفوذ، جریان سطحی، نفوذ عمقی و جریان پایه نیز به‌صورت روزانه مدل‌سازی گردید. مدل با استفاده از داده‌های کاربری اراضی پایه اجرا شده و نتایج اولیه استخراج شد. برای بهینه‌سازی نتایج، فرآیند کالیبراسیون مدل با بهره‌گیری از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. در این مرحله، پارامترهای حساس مدل از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای دبی تنظیم شدند. عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری مانند ضریب ناش - ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین (R^2) و درصد بایاس (PBIAS) ارزیابی شد. پس از حصول نتایج رضایت‌بخش در دوره کالیبراسیون، مدل برای یک دوره مستقل دیگر اعتبارسنجی گردید. در گام نهایی، سناریوی تغییر کاربری اراضی اعمال و مدل مجدداً اجرا شد تا اثرات این تغییرات بر میزان رواناب و دبی سیلابی تحلیل گردد.

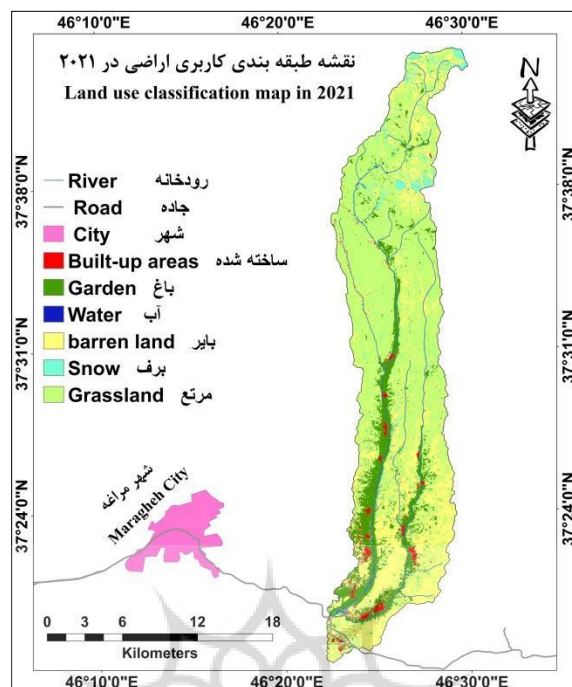
مدل‌سازی تغییرات کاربری (LCM¹)

مدل LCM، یک ابزار نرم‌افزاری ابتکاری برای برنامه‌ریزی زمین و پشتیبانی تصمیم‌گیری است که توسط ایستمن (۲۰۰۶) طراحی شده است که پیچیدگی‌های تجزیه و تحلیل تغییرات، مدیریت منابع و ارزیابی زیستگاه را ساده‌تر می‌کند (Eastman & Toledano, 2018). با استفاده از مدل‌سازی تغییر پوشش زمین در نرم‌افزار IDRISI TerrSet، می‌توان اطلاعات و داده‌های مربوط به پوشش تاریخی زمین را برای ارزیابی، مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش، مورد آنالیز قرارداد که شامل مراحل تجزیه و تحلیل و آشکارسازی تغییرات، مدل‌سازی احتمال انتقال، پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی صحت مدل‌سازی است (Salarin, Tatian, Ghanghermeh & Tamartash, 2022).

نتایج و بحث

طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه در طی یک دوره بلند زمانی بیست ساله و در سه سال ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به انجام رسیده است تا گستره طبقات کاربری اراضی در نواحی مختلف حوضه در طی این سه سال مشخص شده و در فاز بعدی امکان مقایسه آن‌ها با یکدیگر فراهم شود. با توجه به فیزیوگرافی و توپوگرافی حاکم بر حوضه، وضعیت به گونه‌ای است که در نیمه شمالی منطقه بیشتر شاهد پوشش طبیعی زمین (اعم از برف، آب، بایر و مرتع) نسبت به نیمه جنوبی آن، که فعالیت‌های انسانی (باغات و اراضی ساخته‌شده) در آن غالب است، می‌باشیم. نقش رودخانه مردق‌چای در این زمینه نیز قابل توجه بوده است و برای مثال، اغلب باغات منطقه به صورت خطی در جوار این رود و شاخه‌های آن توزیع یافته‌اند و یا روستاهای منطقه که بیشترین وسعت اراضی ساخته‌شده را به خود اختصاص داده‌اند در همجواری با این رودخانه مستقر شده‌اند.

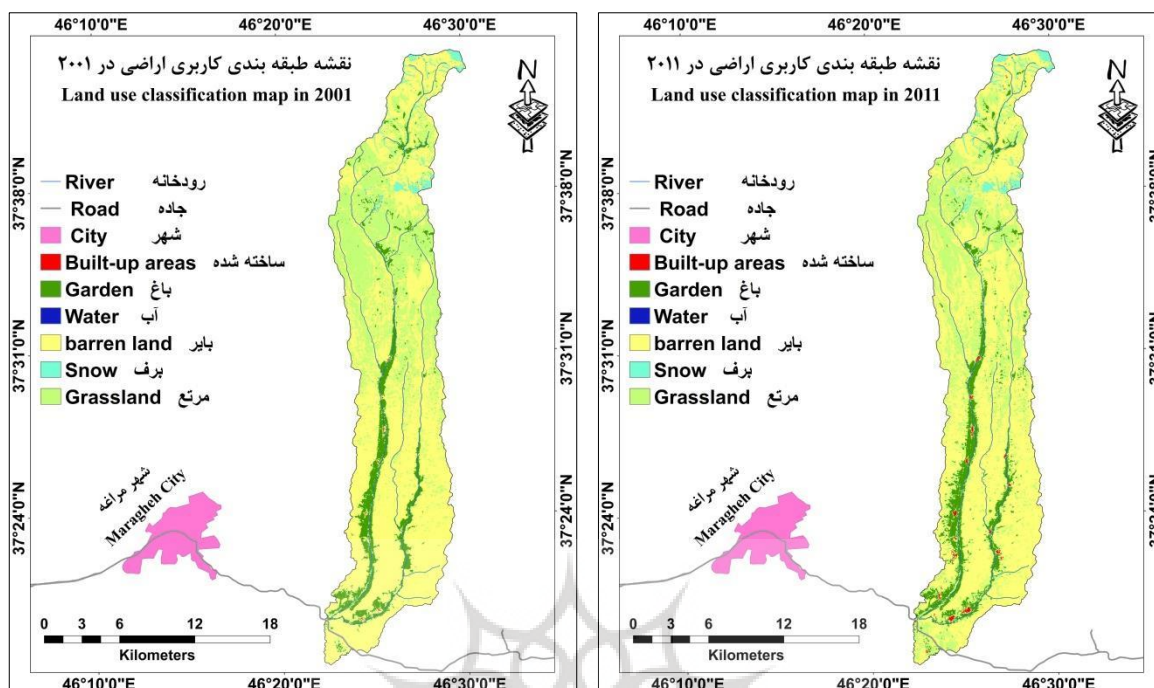
1- Land Change Modeler



شکل ۲- نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه در سال ۲۰۲۱

Fig.2. Land use classification map of the study area in 2021

با توجه به نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه بر اساس مدل شبکه عصبی مصنوعی که در جدول ۱ نشان داده شده است، در سال ۲۰۰۱ اراضی بایر، مراتع و باغات به ترتیب با ۶۱/۲۱٪، ۲۹/۱٪ و ۸/۰۱٪ بیشترین سهم از کاربری‌های موجود را در بر گرفته‌اند و برف، اراضی ساخته‌شده و آب‌ها نیز به ترتیب با ۱/۵۹٪، ۰/۰۷۳٪ و ۰/۰۱۶٪ در رده‌های بعدی از این نظر جای گرفته‌اند. در طبقه‌بندی سال ۲۰۱۱ نیز همین ترتیب برقرار بوده است تنها با این تفاوت که سهم نسبی مراتع و آب‌ها در کاربری اراضی منطقه کاهش یافته است، در حالی که سایر کاربری‌ها سهم خود را افزایش داده‌اند. همچنین در سال ۲۰۲۱، سهم نسبی اراضی بایر به شدت کاهش یافته و به ۲۸/۲۱٪ از کل منطقه رسیده است و در مقابل، مراتع رشد بسیار زیادی داشته و سهم نسبی آن‌ها در منطقه ۵۴/۴۵٪ شده است که ناشی از جابه‌جایی مستقیم میان این دو کلاس می‌باشد. در این سال سهم باغات، برف، اراضی ساخته‌شده و آب‌ها به ترتیب برابر با ۱۱/۷۶٪، ۳/۱۲٪، ۱/۹۶٪ و ۰/۴۹٪ بوده است. بر اساس طبقه‌بندی‌های صورت‌گرفته، باغات و اراضی ساخته‌شده در طی این مدت همواره روند افزایشی داشته‌اند. از طرفی دیگر، آب‌ها، اراضی بایر و مراتع روند متناوب ده ساله را نمایان ساخته‌اند.



شکل ۳- نقشه طبقه بندی کاربری اراضی منطقه در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۰۱
Fig.3. Land use classification map of the study area in 2001 and 2011

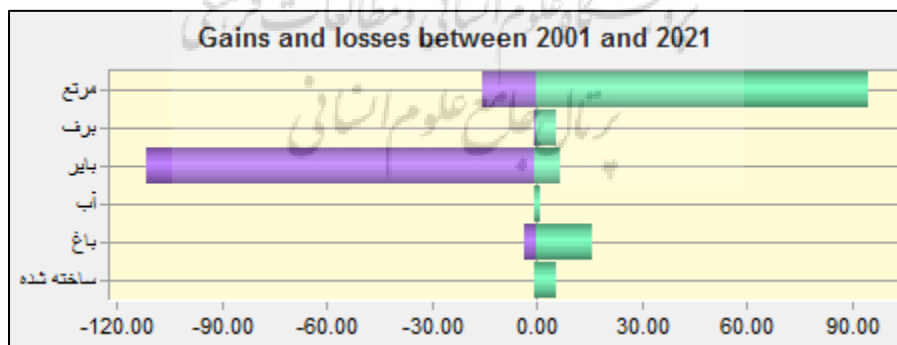
جدول ۱- نتایج طبقه بندی کاربری اراضی با مدل شبکه عصبی مصنوعی

Table 1- Results of land use classification with artificial neural network model

سال	Year	2001	2011	2021		
طبقه بندی کاربری	land use classification	مساحت (Km ²)	درصد	مساحت (Km ²)	درصد	مساحت (Km ²)
ساخته شده	Built-up areas	0.235	0.073	1.38	0.43	6.254
باغات	Garden	25.56	8.01	27.41	8.59	37.54
آب	Water	0.052	0.016	0.002	0.0006	1.57
بایر	barren land	195.321	61.21	197.74	61.97	90.022
برف	Snow	5.058	1.59	7.065	2.21	9.96
مراتع	Grassland	92.86	29.1	85.5	26.79	173.74
مجموع	sum	319.09	100	319.09	100	319.09

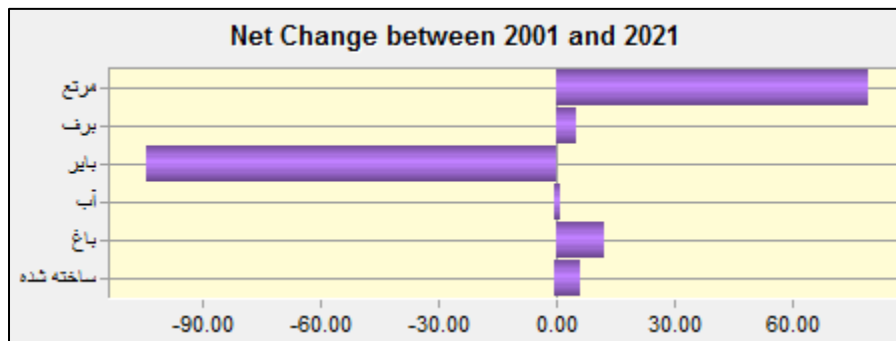
تحلیل مکانی - زمانی کاربری اراضی فرآیند شناسایی تغییرات در وضعیت بهره‌برداری از زمین در مناطق مختلف در طول زمان است. زمانی که داده‌ها دارای ابعاد زمانی و مکانی معینی می‌شوند، در تجزیه و تحلیل داده‌ها از رویکرد ارزیابی زمانی - فضایی استفاده می‌شود. از این نظر، کاربری اراضی و تغییرات آن در دو بعد زمانی و فضایی در سطح منطقه قابل بررسی است. همان‌طور که بدان اشاره گردید، به منظور مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی در سطح حوضه مردق‌چای از مدل LCM موجود در محیط تحلیلی IDRISI بهره گرفته شده است تا کم و کیف تغییرات رخ داده در طی دوره آماری مورد مطالعه، شناسایی شود تا با شناخت روندهای موجود بتوان ارزیابی دقیقی از تأثیر تغییرات صورت گرفته بر رواناب حوضه به انجام رساند. در این راستا، تغییرات صورت گرفته در سه بخش قابل ارزیابی است: اول حجم خالص تغییر و تحولات طبقات کاربری اراضی در سطح منطقه به لحاظ افزایشی یا کاهش‌ی بودن آن‌ها است که بر اساس آن می‌توان مساحت طبقات در ابتدا و انتهای دوره بیست ساله را تجزیه و تحلیل نمود. دوم شناسایی مناطقی از حوضه که تغییرات کاربری اراضی در آن رخ داده است و مساحت طبقات کاربری در آن مناطق با افزایش یا کاهش همراه بوده است. سومین مرحله، شناسایی مناطقی از حوضه رودخانه مردق‌چای به لحاظ عدم تغییر و تحولات کاربری اراضی می‌باشد. به عبارتی تشخیص این موضوع که در کدام مناطق، کاربری اراضی در طی مدت زمان بیست ساله بدون تغییر بوده است.

در شکل ۴، نمودار روند تغییرات طبقات کاربری اراضی در منطقه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ نشان داده شده است. مطابق نمودار حاصله، در طی این مدت زمان بیست ساله، به استثنای اراضی بایر که اغلب با کاهش وسعت همراه شده است، دیگر طبقات کاربری اراضی دارای روند غالب افزایشی بوده‌اند که مراتع منطقه بیش از سایر اراضی با رشد وسعت مواجه شده است. از این نظر و به لحاظ حجم خالص تغییرات کاربری اراضی که در شکل ۵، نشان داده شده است، ۱۰۴/۱۹ کیلومتر مربع از مساحت اراضی بایر کاسته شده است. در مقابل، ۷۹/۱۰ کیلومتر مربع به مساحت مراتع، ۱۲/۱۰ کیلومتر مربع به باغات، ۱/۵۸ کیلومتر مربع به آب‌ها و ۶/۲۶ کیلومتر مربع به اراضی ساخته‌شده منطقه اضافه شده است. بنابراین و بر اساس مقادیر مذکور، اراضی بایر و مراتع بیشترین تغییر و تحولات را در سطح منطقه نشان داده‌اند که از این نظر مراتع بیشترین افزایش و اراضی بایر بیشترین کاهش را به خود اختصاص داده‌اند که این امر در درجه اول با فاکتورهای اقلیمی مختلف از قبیل بارش، درجه حرارت، رطوبت و پوشش گیاهی و در وهله بعدی با رشد فعالیت‌های زراعی و به‌ویژه زراعت دیم قابل توجیه می‌باشد.



شکل ۴- روند تغییر و تحولات کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱ (کیلومتر مربع)

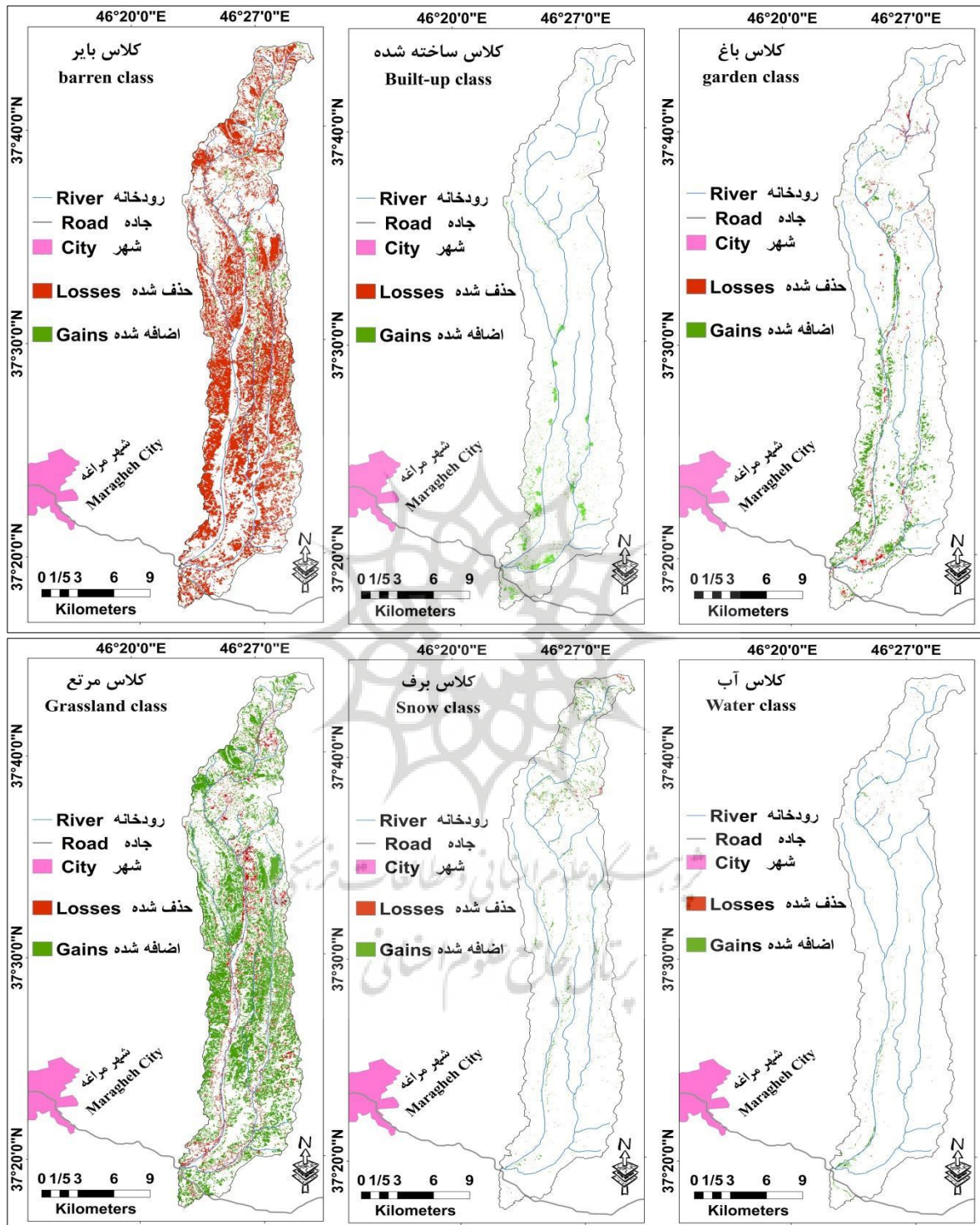
Fig.4. The trend of land use changes in the study area in the period of 2001-2021 (Km²)



شکل ۵- میزان خالص تغییرات کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱ (کیلومتر مربع)

Fig.5. The net amount of land use changes in the study area in the period of 2001-2021 (Km²)

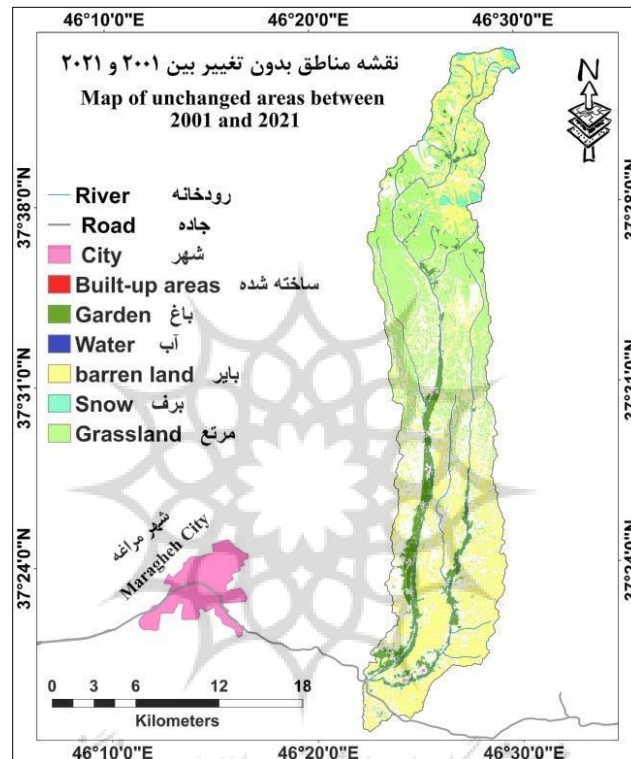
در شکل ۶، نقشه تغییرات فضایی کاربری اراضی حوضه مردقچای در طی دوره بیست ساله نشان داده شده است. با توجه به مقایسه کاربری بین دو سال ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱، تغییرات قابل توجه کاربری اراضی منطقه کاملاً مشهود می‌باشد. در این راستا و از نظر فضایی، دو کاربری مرتع و بایر در تمام نواحی حوضه با تغییر افزایشی یا کاهشی همراه شده‌اند. بر این اساس، در نواحی پراکنده‌ای در مرکز تا شمال حوضه روند غالب تغییر اراضی بایر از نوع افزایشی و روند غالب تغییر مراتع از نوع کاهشی بوده است و در سایر نواحی عموماً عکس این روند مشاهده شده است و به طور کلی باید گفت که پوشش مرتعی در اغلب موارد جایگزین اراضی بایر و زمین لخت شده است. برای کاربری برف، نقاط شمالی حوضه با توجه به ارتفاع بالا و وجود برف در اکثر مواقع سال، شاهد بیشترین تغییرات می‌باشیم که عمدتاً افزایشی بوده است. برای کاربری‌های ساخته شده، با توجه به اینکه اکثریت نواحی مسکونی و روستایی در نیمه جنوبی منطقه مستقر هستند، بیشترین تغییر در این کاربری‌ها در این ناحیه رخ داده است. کاربری باغات به استثنای نواحی شمال و جنوب حوضه که مساحت از دست داده است، در سایر نواحی اغلب با رشد مساحت همراه شده است. نهایتاً کاربری آب در سطح منطقه به صورت بسیار پراکنده تغییر داشته است و غالب این تغییرات در سمت خروجی حوضه در جنوب و از نوع افزایشی بوده است.



شکل ۶- نقشه تغییرات فضایی کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱

Fig.6. Map of the spatial changes of land use in the study area in the period of 2001-2021

به طور کلی، تغییرات فضایی کاربری اراضی منطقه در طی دوره بیست ساله بدین صورت می‌باشد که در مرکز تا نیمه جنوبی حوضه در مقایسه با سایر نواحی تغییرات صورت گرفته بارزتر بوده و در مقابل، بخش‌های زیادی از شمال حوضه و نیز مسیر آبراهه اصلی رودخانه جزو نواحی بدون تغییرات کاربری منطقه محسوب می‌شوند که در نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی سال ۲۰۲۱ عیناً نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ برچسب‌گذاری شده‌اند. در شکل ۷، نقشه مناطق بدون تغییر کاربری در طی دوره زمانی مورد مطالعه، نشان داده شده است.

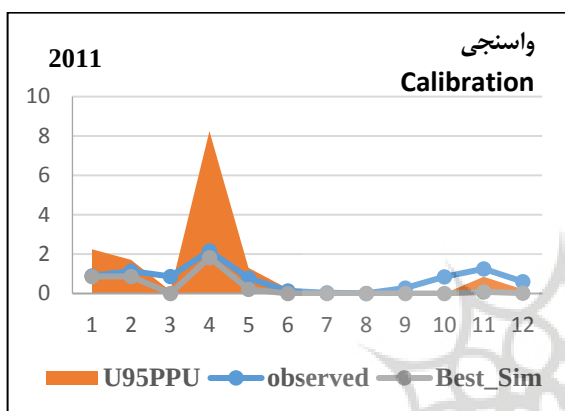


شکل ۷- نقشه نواحی بدون تغییر کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱

Fig.7. Map of areas without land use change in the period of 2001-2021

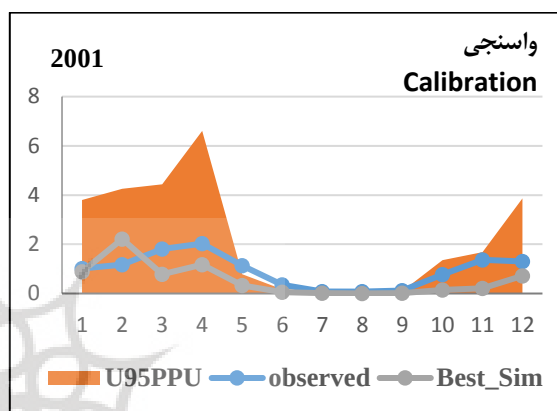
مدل SWAT در چند مرحله به انجام رسیده است. ابتدا تمامی پارامترهای مؤثر بر رواناب حوضه، انتخاب و از میان آن‌ها پارامترهای غیرمؤثر از روند ارزیابی حذف گردیده است. با توجه به این که انتخاب مقادیر مختلف برای واسنجی و بهینه سازی پارامترها محدود بوده و نیز روشی زمان‌بر و پرهزینه است، مدل‌سازی معکوس به عنوان یکی از روش‌های متداول برای واسنجی مدل در نظر گرفته شده است. در این زمینه الگوریتم SUFI-2 که معکوس مدل سوات بوده و به منظور واسنجی و ارزیابی عدم قطعیت آن استفاده می‌شود، به کار گرفته شده است. الگوریتم مذکور در محیط نرم‌افزاری SWAT-CUP به اجرا درآمده است. در این نرم‌افزار کلیه مراحل آزمون و خطا توسط مدل به انجام رسیده و کاربر صرفاً باید محدوده منطقه پارامترهای مؤثر بر واسنجی را به مدل معرفی کند. در این مطالعه، کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ در دوره آماری ۱۹۹۹-۱۹۸۵ واسنجی و در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۰۰ اعتبارسنجی شده است.

همچنین، کاربری اراضی سال ۲۰۱۱ در دوره آماری ۲۰۰۹-۲۰۰۲ و اسنجی و در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۱۰ اعتبارسنجی شده است و نهایتاً کاربری اراضی سال ۲۰۲۱ در دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۱۲ و اسنجی و در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۲۰ اعتبارسنجی گردیده است. در ادامه، نتایج حاصله با استفاده از معیارهای آماری مختلف در هر دو دوره و اسنجی و اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهایتاً ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر پتانسیل تولید رواناب در حوضه مد نظر قرار گرفته و نتایج آن در برنامه SWAT-CUP تجزیه و تحلیل شده است. نتایج و اسنجی مدل SWAT در طی سه دوره مختلف در اشکال ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همچنین، نتایج اعتبارسنجی مدل در اشکال ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.



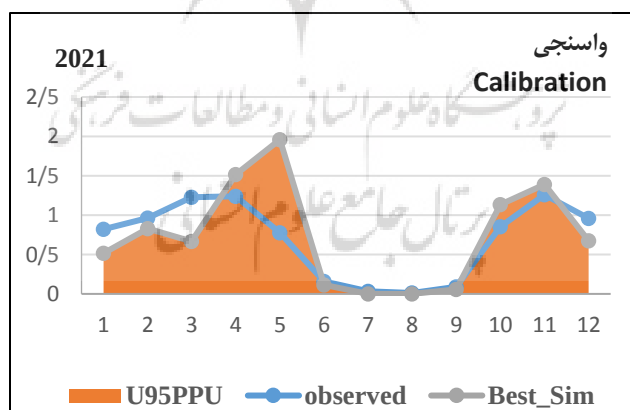
شکل ۹- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره و اسنجی ۲۰۰۹-۲۰۰۲

Fig.9. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the period of 2002-2009



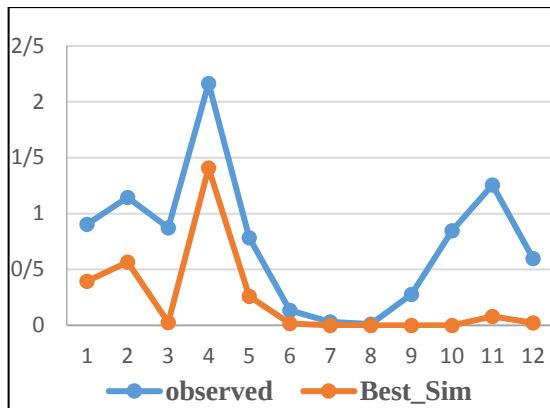
شکل ۸- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره و اسنجی ۱۹۹۹-۱۹۸۵

Fig.8. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the period of 1985-1999



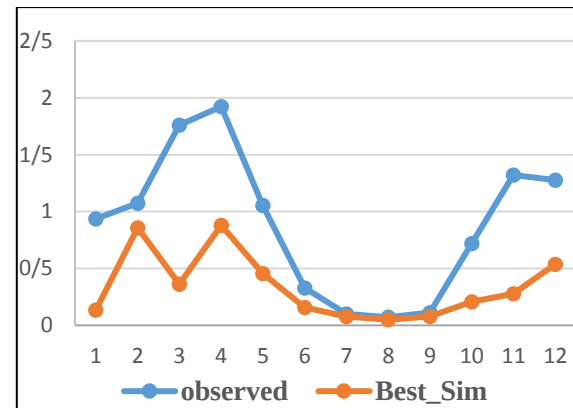
شکل ۱۰- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره و اسنجی ۲۰۱۹-۲۰۱۲

Fig.10. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the period of 2012-2019



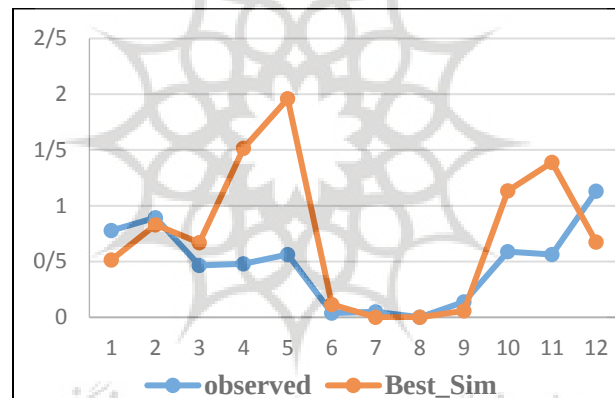
شکل ۱۲- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره اعتبارسنجی ۲۰۱۰-۲۰۱۱

Fig.12. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the validation period of 2010-2011



شکل ۱۱- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره اعتبارسنجی ۲۰۰۰-۲۰۰۱

Fig.11. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the validation period of 2000-2001

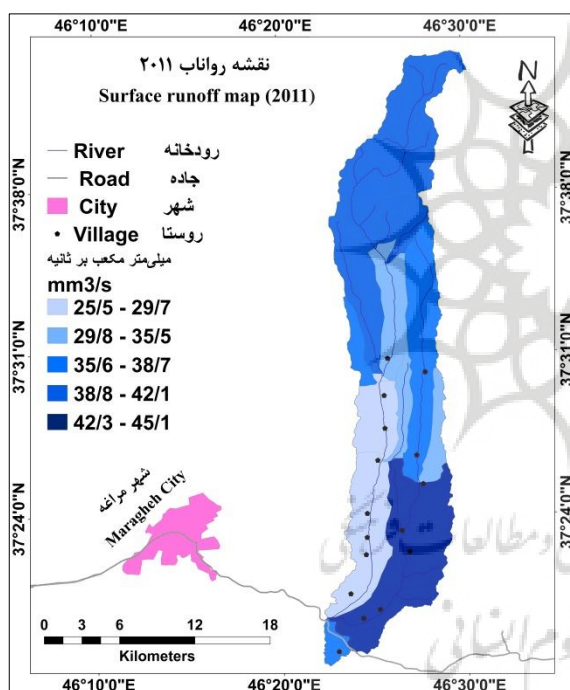


شکل ۱۳- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره اعتبارسنجی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

Fig.13. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the validation period of 2020-2021

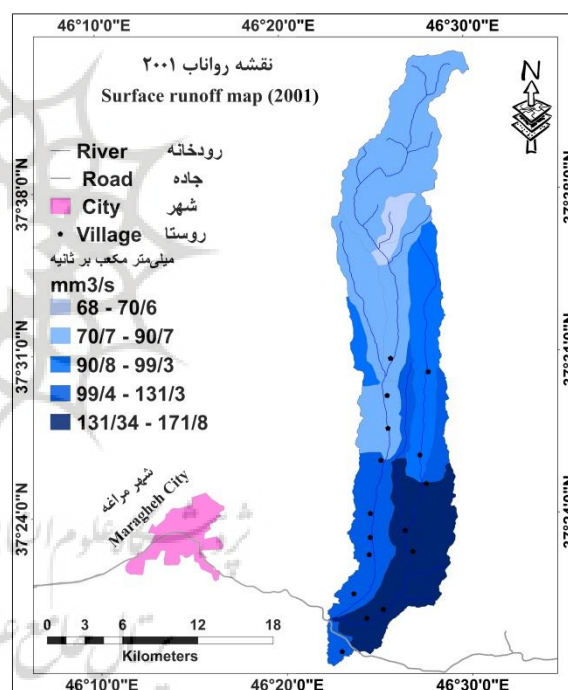
از نظر توزیع رواناب در منطقه باید گفت که در دوره اول حداکثر توزیع رواناب در نواحی جنوب و نیز جنوب شرقی مشاهده شده است درحالی‌که نواحی شمال و شمال غرب حوضه حداقل توزیع رواناب را نشان داده‌اند. در دوره دوم مورد مطالعه، علاوه بر نواحی جنوب و جنوب شرق، نواحی شمالی نیز روند افزایش رواناب را نشان داده‌اند در حالی‌که نواحی مرکزی و جنوب غربی دارای حداقل میزان رواناب در این دوره بوده‌اند. در دوره سوم نیز ارزیابی‌ها چنین نشان می‌دهند که نواحی واقع در نیمه جنوبی و شرقی حوضه مردق‌چای شاهد روند افزایش رواناب بوده‌اند که در سمت جنوب غربی یعنی منتهی‌الیه خروجی حوضه، حداکثر مقدار رواناب مشاهده می‌شود. مقایسه میزان رواناب در این سه دوره حاکی از این بوده است که در دوره اول حداکثر شدت رواناب (با مقادیر ۱۷۱/۸ - ۱۳۱/۳ میلی‌متر مکعب در ثانیه) وجود دارد اما توزیع این رواناب تنها محدود به یک زیرحوضه در جنوب شرقی منطقه بوده است. در دوره دوم نیز در همین زیرحوضه وقع در جنوب شرقی حداکثر

میزان رواناب با مقدار $45/1 - 42/2$ میلی‌متر مکعب در ثانیه مشاهده می‌شود و زیرحوضه‌های غربی و جنوب غربی حداقل میزان رواناب را نشان می‌دهند. در دوره سوم در مقایسه با دوره دوم، علاوه بر افزایش شدت رواناب، بر تعداد زیرحوضه‌های واقع در معرض حداکثر رواناب نیز افزوده شده است و به طور خاص، سه زیرحوضه در شرق، مرکز و خروجی حوضه در جنوب غرب با افزایش حداکثری رواناب ($77/8 - 67/4$ میلی‌متر مکعب در ثانیه) مواجه بوده‌اند. مطابق بررسی‌ها و مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی رواناب با کاربری اراضی در طی مدت زمان بیست ساله (اشکال ۱۴، ۱۵ و ۱۶)، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که روند رواناب در سطح حوضه مردق‌چای تا حد زیادی با روند تغییرات کاربری اراضی منطقه در طی همین مدت هم‌سو بوده است. از این نظر، رشد گستره اراضی مرتعی و ساخته‌شده در سطح منطقه تأثیر کاملاً مستقیمی بر افزایش رواناب در این مناطق بر جای گذاشته است و با توجه به تأثیر توپوگرافی و شیب حوضه بر روند جریان و نفوذناپذیرتر بودن سطح زمین در نواحی نیمه جنوبی حوضه نسبت به سایر نواحی آن، پتانسیل سیل‌خیزی در این نواحی بسیار بالاتر از سایر مناطق تشخیص داده شده است.



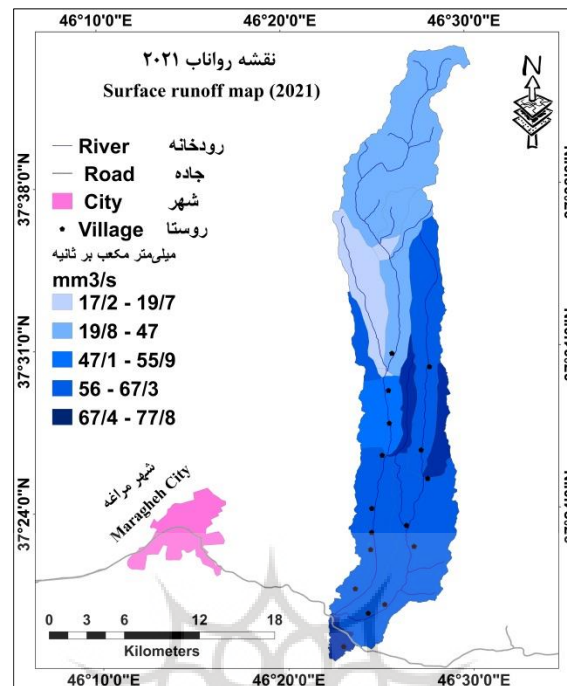
شکل ۱۵- نقشه توزیع مکانی رواناب سطحی برای دوره شبیه‌سازی ۲۰۱۲-۲۰۱۹ با کاربری اراضی سال ۲۰۱۱ (بر حسب میلی‌متر مکعب بر ثانیه)

Fig.15. Surface runoff spatial distribution map for the simulation period 2012-2019 with land use in 2011 (mm^3/s)



شکل ۱۴- نقشه توزیع مکانی رواناب سطحی برای دوره شبیه‌سازی ۱۹۸۵-۱۹۹۹ با کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ (بر حسب میلی‌متر مکعب بر ثانیه)

Fig.14. Surface runoff spatial distribution map for the simulation period 1985-1999 with land use in 2001 (mm^3/s)



شکل ۱۶- نقشه توزیع مکانی رواناب سطحی برای دوره شبیه‌سازی ۲۰۰۹-۲۰۰۲ با کاربری اراضی سال ۲۰۲۱
(بر حسب میلی‌متر مکعب بر ثانیه)

Fig.16. Surface runoff spatial distribution map for the simulation period 2009-2019 with land use in 2021 (mm³/s)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه تغییر کاربری اراضی در حوضه آبریز مردق‌چای آذربایجان شرقی و بررسی تأثیر آن بر روند سیلاب پرداخته شد. با توجه به اینکه عوامل و پارامترهای متعددی در این زمینه دخیل بوده‌اند، لذا لزوم استفاده از روش‌های مناسب تلقی می‌شد و بر همین اساس از تکنیک‌ها و مدل‌های مختلفی از قبیل شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌ساز تغییرات کاربری زمین و سوات بهره گرفته شده و نتایج آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج، مدل SWAT از توانایی بالایی در تجزیه و تحلیل تأثیر تغییرات کاربری زمین بر حوضه‌های آبریز را دارا بوده است و همان‌طور که قضاوی و فاضلی (Ghazavi & Fazeli, 2019) بیان نموده‌اند، توانایی این مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه‌ها در محیط GIS آن را در مقایسه با سایر مدل‌های یکپارچه متمایز ساخته است. اما با این وجود، نتایج این تحقیق حاکی از این بوده است که این مدل در مواردی نتوانسته است برآورد رضایت‌بخشی از میزان رواناب در ارتباط با کاربری اراضی انجام دهد و برخی از شبیه‌سازی‌ها در محدوده خارج از باند عدم قطعیت قرار گرفته است. با توجه به موقعیت و فیزیوگرافی حوضه مردق‌چای، ضعف مدل سوات در تحقیق حاضر می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. اولین دلیل ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف است؛ دومین دلیل ناشی از تغییرات کاربری اراضی منطقه در طول زمان و سومین دلیل مربوط به فقدان ایستگاه هواشناسی در منطقه می‌باشد که در این مطالعه از داده‌های ایستگاه مراغه در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شده است. از طرفی دیگر، در ارتباط با نقش کاربری اراضی در روند سیلاب منطقه باید گفت که تغییرات زمانی - مکانی کاربری و پوشش زمین در نواحی مختلف

حوضه تأثیر کاملاً محسوسی بر میزان رواناب و جاری شدن سیل در منطقه دارد به طوری که در نیمه جنوبی و به ویژه نواحی جنوبی و جنوب شرقی حوضه به دلیل اینکه پوشش گیاهی مرتعی غالب بوده و اراضی مسکونی نیز روند افزایشی داشته‌اند، موجب این شده است که ضریب جذب رواناب در مقایسه با سایر نواحی کمتر و ارتفاع رواناب افزایش یابد که می‌تواند بر احتمال وقوع سیلاب در این نواحی بیافزاید. همچنین، واقع شدن این نواحی در مسیر شیب حوضه و جریان آبراهه که خروجی آن در منتهی الیه جنوب غربی قرار گرفته است، ممکن است که خطر سیلاب را در این نواحی تشدید نماید. بر اساس نتایج، وجود داده‌های ورودی دقیق برای اجرای مدل SWAT از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به منظور دستیابی به نتایج بهینه پیشنهاد می‌شود که به این امر توجه کافی لحاظ شود و در صورت فقدان داده‌ها و اطلاعات کافی از منطقه می‌توان از مدل‌های دیگری به موازات این مدل استفاده گردد. در مطالعات آتی می‌توان به تهیه نقشه پتانسیل خطر سیل و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های مختلف با هدف مدیریت خطرپذیری آن پرداخته و اقدامات بعدی به موازات آن در نظر گرفته شود تا بدین وسیله آمادگی، واکنش‌ها و فرآیندهای کاهش و بازیابی در صورت وقوع سیل به درستی به انجام برسد.

References

- Achugbu, I. C., Olufayo, A. A., Balogun, I. A., Dudhia, J., McAllister, M., Adefisan, E. A., & Naabil, E. (2022). Potential effects of Land Use Land Cover Change on streamflow over the Sokoto Rima River Basin. *Heliyon*, 8(7), e09779. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09779>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Bakhtiyari, M., Komeh, Z., & Memarian, H. (2018). A Comparison of Fuzzy Analytic Hierarchy Process, Artificial Neural Network and Area Density in Quantitative Evaluation and Landslide Susceptibility Mapping within GIS Framework (Case Study: Simereh Homiyan Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 7(3), 19-40. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.67234>
- 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>
- Dastres, R., & Soori, M. (2021). Artificial neural network systems. *International Journal of Imaging and Robotics (IJIR)*, 21(2), 13-25. <https://hal.science/hal-03349542v1>
- Eastman, J. R., & Toledano, J. (2018). A short presentation of the Land Change Modeler (LCM). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*, 499-505. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36
- Ghazavi, R., & Fazeli, A. (2019). Investigation the effects of land use change on surface runoff using Remote sensing and SWAT model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), 191-206. [In Persian] <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.12697.2739>
- Haleem, K., Khan, A. U., Ahmad, S., Khan, M., Khan, F. A., Khan, W., & Khan, J. (2022). Hydrological impacts of climate and land-use change on flow regime variations in upper Indus basin. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 758-770. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.238>
- Khoi, D. N., Loi, P. T., & Sam, T. T. (2021). Impact of future land-use/cover change on streamflow and sediment load in the Be River Basin, Vietnam. *Water*, 13(9), 1244. <https://doi.org/10.3390/w13091244>

- 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>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King, K. W. (2005). *Soil and water assessment tool: theoretical documentation*.
- Rahmati, F., Rezaei Moghaddam, M. H., & Nikjoo, M. R. (2021). The Effects of Land use Change on Erosion & Flood in Saqqez basin before & after Shahid Kazemi Dam Construction, Arc Swat model. *Geography and Human Relationships*, 4(1), 127-144. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.285039.1545>
- Rezaei Moghaddam, M. H., & Rahimpour, T. (2024). Preparation of flood hazard potential map using two methods: Frequency Ratio and Statistical Index (Case study: Aji Chai Basin). *Environmental Management Hazards*, 10(4), 291-308. [In Persian] https://jhsci.ut.ac.ir/article_95951.html?
- Salarin, F., Tatian, M. R., Ghanghermeh, A., & Tamartash, R. (2022). Modeling land cover changes in Golestan province using land change modeler (LCM). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(4), 47-70. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/girs.2021.681267>
- Shirani, K., Heydari, F., & Arabameri, A. (2017). Comparison of artificial neural network and multivariate regression methods in landslide hazard zonation, case study: Vanak Basin, Isfahan province. *Watershed Engineering and Management*, 9(4), 451-464. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.101725.1031>
- Sugianto, S., Deli, A., Miswar, E., Rusdi, M., & Irham, M. (2022). The effect of land use and land cover changes on flood occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*, 11(8), 1271. <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- Tali, M. P. A. (2011). *Land use/land cover change and its impact on flood occurrence: a case study of upper Jhelum floodplain*. (Master's thesis). University of Kashmir.
- Yari, M., Soltani-Gerdefamarzi, S., & Ghasemi, M. (2019). Investigation of the Effect of to 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/geoh.2024.88423.1493>