

(OPEN ACCESS)

Performance evaluation of the FLEX-L and FLEX-Topo hydrological models in simulating surface runoff in the Tamer loess watershed

Najmeh Ganji¹, Mohsen Hosseinalizadeh^{*2}, Abdolreza Bahremand³,
Chooghi Bairam Komaki⁴, Majid Ownegh⁵

1. Ph.D. Student in Desert Management and Control, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: najmeh.ganji_s99@gau.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mhalizadeh@gau.ac.ir
3. Professor, Dept. Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: bahremand@gau.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: komaki@gau.ac.ir
5. Professor, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mownegh@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: Accurate simulation of surface runoff in loess deposits, particularly at the watershed scale, such as the Tamer Loess Watershed, plays a fundamental and pivotal role in sustainable water resource management, flood risk mitigation, erosion control, soil conservation, and enhanced environmental planning, thereby serving as an essential foundation for scientific, executive, and managerial decision-making. In recent years, the application of conceptual and semi-distributed hydrological models has garnered increasing attention among researchers as an efficient and robust approach to better understand the complex hydrological response of such watersheds and to analyze the intricate interplay of climatic, geological, and topographical factors, particularly under changing environmental conditions. In this context, a rigorous and comprehensive evaluation of the performance of the FLEX-L and FLEX-Topo models, representing an integrated structure and an advanced structure explicitly based on topographic heterogeneity, respectively, is of paramount importance. Accordingly, the present study was conducted to comprehensively and systematically assess the performance of the FLEX-L and FLEX-Topo hydrological models in simulating surface runoff in the Tamer Loess Watershed. The primary objective was to compare the capabilities of these two models and to quantitatively and qualitatively determine their efficiency and reliability in accurately representing the governing processes of runoff generation, water transmission, infiltration, and runoff storage in loess environments. Furthermore, both models were employed, using their respective conceptual structures, to simulate the watershed's hydrological response and to conduct a detailed analysis of surface and subsurface flow behavior. This integrated approach effectively and realistically incorporated the role of spatial heterogeneity, topographical characteristics, soil hydrodynamic differences, and the interactive effects of climatic factors.
Article history: Received: 11.19.2025 Revised: 01.04.2026 Accepted: 02.04.2026	
Keywords: Conceptual model, Loess, Precipitation, Runoff, Topography	

Materials and Methods: To simulate the rainfall-runoff process in the Tamer Loess Watershed, comprehensive climatic and hydrometric data, including daily precipitation, temperature, and discharge, were systematically collected to accurately analyze the basin's hydrological behavior and provide a suitable and reliable basis for modeling. Additionally, various spatial layers, including a Digital Elevation Model (DEM), slope, stream network, land use, and the Height Above the Nearest Drainage (HAND) index, were utilized to effectively delineate landscape units and prepare essential model inputs. In this study, two conceptual models from the FLEX family, namely FLEX-L and FLEX-Topo, were employed. Due to their flexible and conceptual structure, FLEX family models enable the simulation and analysis of various hydrological behaviors across different spatial and temporal scales and can model complex rainfall-runoff processes in diverse watersheds. The FLEX-L model is a lumped model that considers the entire watershed as a single integrated unit and does not utilize elevation data, whereas the FLEX-Topo model is semi-distributed, explicitly incorporates topographical information, and comprises four parallel components to represent the hydrological functioning of different landscape elements. Daily outlet runoff simulation was performed for a ten-year period from 2013 to 2023 using both models. Both models consist of a combination of reservoirs, lag functions, and connection elements, which are flexibly linked to simulate various hydrological processes, including surface and subsurface flow, infiltration, and runoff storage. The structure of these models was developed using the SUPERFLEX modeling framework, and their coding and implementation were carried out in Python to enable more detailed analysis and greater control over model components. To evaluate the accuracy and reliability of the simulated outlet runoff, two well-established statistical indices, namely the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) and the Kling–Gupta Efficiency (KGE), were employed. These indices effectively determine the degree of agreement between simulations and observed data, providing a comprehensive and robust criterion for comparing the performance of the two models and analyzing their capability and reliability in reproducing the watershed's hydrological processes.

Results: Comparison of the performance evaluation indices for the two models clearly indicated that the FLEX-Topo model exhibits higher accuracy and superior performance in simulating runoff compared to the FLEX-L model. The Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) value for FLEX-L was 0.62, while for FLEX-Topo it was 0.69; the Kling–Gupta Efficiency (KGE) values were 0.67 and 0.72, respectively, and the Root Mean Square Error (RMSE) values were 2.9 and 1.8, respectively. These results consistently demonstrate the superiority of the FLEX-Topo model in reproducing streamflow dynamics and substantially reducing simulation error relative to observed data. From a behavioral perspective, although the FLEX-L model successfully simulated the overall trend of flow variations, the simulated flow values on some peak runoff days were noticeably lower than the observed values, indicating its limitation in capturing extreme events. In contrast, by effectively utilizing topographical information and disaggregating the watershed into distinct hydrological landscape units, the FLEX-Topo model was able to more accurately represent the spatial patterns of runoff generation and the inherent spatial heterogeneity of hydrological processes. On most days with high precipitation, this model simulated runoff values considerably closer to the actual measurements and

demonstrated more precise and reliable performance. Furthermore, a detailed analysis of the one-to-one scatter plot of observed versus simulated flow reveals that, in the FLEX-Topo model, the data points are more consistently clustered around the 1:1 line, indicating stronger agreement and lower bias between observed and simulated flows. In the FLEX-L model, however, the data points exhibit greater dispersion and less concentration around the 1:1 line, particularly at higher flow values, reflecting the model's lower sensitivity to spatial heterogeneities and its tendency to systematically underestimate. These findings conclusively confirm that incorporating topographical characteristics and landscape structure into the FLEX-Topo model plays a significant and determinative role in improving runoff simulation accuracy and the representation of hydrological processes in the Tamer Loess Watershed.

Conclusion: The results of this study indicate that both the FLEX-L and FLEX-Topo models possess acceptable efficiency in simulating surface runoff in the Tamer Loess Watershed and are capable of representing the general flow pattern and its temporal variations with reasonable accuracy. However, the FLEX-Topo model demonstrated more accurate and reliable performance compared to the FLEX-L model due to its disaggregation of the watershed into hydrologically homogeneous units and its incorporation of spatial heterogeneity. While FLEX-L captures the general flow trend, its simple structure and insufficient attention to spatial heterogeneity limit its ability to simulate peak discharges. In the FLEX-Topo model, different landscapes were identified and simulated based on dominant hydrological processes, such as surface runoff on steep slopes, subsurface flow in forested and rangeland plains, and saturated excess runoff in low-lying areas. Overall, the FLEX-Topo model is introduced as a more suitable and reliable option for hydrological analyses in the Tamer Loess Watershed; nevertheless, parameter optimization in both models can still play an important role in enhancing accuracy and reducing simulation uncertainty.

Cite this article: Ganji, Najmeh, Hosseinalizadeh, Mohsen, Bahremand, Abdolreza, Komaki, Chooghi Bairam, Ownegh, Majid. 2026. Performance evaluation of the FLEX-L and FLEX-Topo hydrological models in simulating surface runoff in the Tamer loess watershed. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (2), 31-59.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.24294.3832

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژی FLEX-Topo و FLEX-L در شبیه‌سازی رواناب سطحی حوزه آبخیز لسی‌تمر

نجمه گنجی^۱، محسن حسینعلی‌زاده^{۲*}، عبدالرضا بهره‌مند^۳، چوقی‌بایرام کمکی^۴، مجید اونق^۵

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: najmeh.ganji_s99@gu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: mhalizadeh@gu.ac.ir
۳. استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: bahreman@gu.ac.ir
۴. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: komaki@gu.ac.ir
۵. استاد گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mownegh@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: شبیه‌سازی دقیق رواناب سطحی در نهشته‌های لسی، به‌ویژه در مقیاس حوزه‌های آبخیز، مانند حوزه آبخیز لسی‌تمر، نقش بسیار مهمی در مدیریت پایدار منابع آب، کاهش خطر سیلاب، کنترل فرسایش، حفاظت از خاک و بهبود برنامه‌ریزی محیطی دارد و مبنای تصمیم‌گیری‌های علمی، اجرایی و مدیریتی محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های هیدرولوژی مفهومی و نیمه‌توزیعی به‌عنوان رویکردی کارآمد برای درک بهتر پاسخ هیدرولوژی این‌گونه حوزه‌های آبخیز و تحلیل تعامل پیچیده عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و توپوگرافی، به‌ویژه در شرایط محیطی متغیر، مورد توجه ویژه پژوهش‌گران قرار گرفته است. در این راستا، ارزیابی دقیق عملکرد مدل‌های FLEX-Topo و FLEX-L که به ترتیب نماینده یک ساختار یکپارچه و یک ساختار پیشرفته مبتنی بر ناهمگنی‌های توپوگرافی هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جامع عملکرد مدل‌های هیدرولوژی FLEX-Topo و FLEX-L در شبیه‌سازی رواناب سطحی حوزه آبخیز لسی‌تمر انجام شد تا ضمن مقایسه توانایی این دو مدل، میزان کارایی آن‌ها در بازنمایی دقیق فرآیندهای حاکم بر رواناب، انتقال آب، نفوذ و ذخیره رواناب در محیط‌های لسی، به‌صورت کمی و کیفی مشخص شود. هم‌چنین، هر دو مدل با استفاده از ساختار مفهومی ویژه خود برای شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژی حوزه و تحلیل دقیق رفتار جریان‌های سطحی و زیرسطحی به‌کار گرفته شدند، به‌گونه‌ای که نقش ناهمگنی‌های فضایی، ویژگی‌های توپوگرافی، تفاوت‌های هیدرودینامیکی خاک‌ها و تأثیر متقابل عوامل اقلیمی به‌صورت مؤثر و واقع‌بینانه در نظر گرفته شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۸/۰۸/۲۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵	
واژه‌های کلیدی: بارش، توپوگرافی، رواناب، لس، مدل مفهومی	

مواد و روش‌ها: برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوزه آبخیز لسی تمر، داده‌های اقلیمی و هیدرومتری شامل بارش، دما و دبی روزانه گردآوری شد تا رفتار هیدرولوژی حوضه به‌صورت دقیق تحلیل شود و مبنایی مناسب برای مدل‌سازی فراهم گردد. هم‌چنین، لایه‌های مکانی شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب، شبکه آبراهه‌ها، کاربری اراضی و شاخص HAND برای تفکیک چشم‌اندازها و آماده‌سازی ورودی‌های مدل مورد استفاده قرار گرفتند. در این مطالعه از دو مدل مفهومی خانواده FLEX شامل FLEX-L و FLEX-Topo بهره گرفته شد. مدل‌های خانواده FLEX به دلیل ساختار انعطاف‌پذیر و مفهومی خود، امکان شبیه‌سازی و تحلیل رفتارهای مختلف هیدرولوژی را در مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت فراهم می‌کنند و قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده بارش-رواناب در حوزه‌های متنوع را دارند. مدل FLEX-L یک مدل یکپارچه است که کل حوضه را به‌عنوان یک واحد در نظر می‌گیرد و از داده‌های ارتفاعی استفاده نمی‌کند، درحالی‌که مدل FLEX-Topo نیمه‌توزیعی بوده و به‌صورت صریح از اطلاعات توپوگرافی بهره می‌برد و شامل چهار جزء موازی برای بازنمایی عملکرد هیدرولوژی عناصر مختلف چشم‌انداز است. شبیه‌سازی رواناب روزانه خروجی حوضه برای یک دوره ده‌ساله (2013-2023) با هر دو مدل انجام شد. هر دو مدل ترکیبی از مخازن (reservoirs)، توابع تأخیری (lag functions) و عناصر ارتباطی (connection elements) هستند که به‌گونه‌ای انعطاف‌پذیر به یکدیگر متصل شده‌اند تا فرآیندهای مختلف هیدرولوژی، شامل جریان سطحی و زیرسطحی، نفوذ و ذخیره رواناب را شبیه‌سازی کنند. ساختار این مدل‌ها با استفاده از چارچوب مدل‌سازی SUPERFLEX توسعه یافت و کدنویسی و اجرای آن‌ها در محیط Python انجام شد تا امکان تحلیل دقیق‌تر و کنترل بیش‌تر بر اجزای مدل فراهم شود. برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی رواناب خروجی، از دو شاخص آماری معتبر ضریب نش-سانتکیلف (NSE) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده گردید. این شاخص‌ها میزان انطباق شبیه‌سازی‌ها با داده‌های مشاهداتی را مشخص کرده و معیار جامعی برای مقایسه عملکرد دو مدل و تحلیل قابلیت اطمینان آن‌ها در بازتولید فرآیندهای هیدرولوژی حوضه ارائه کردند.

یافته‌ها: مقایسه شاخص‌های ارزیابی عملکرد دو مدل نشان داد که مدل FLEX-Topo نسبت به FLEX-L دقت بالاتری در شبیه‌سازی رواناب دارد. مقدار NSE برای FLEX-L برابر 0.62 و برای FLEX-Topo برابر 0.69 ، KGE مقدار به‌ترتیب 0.67 و 0.72 و RMSE به‌ترتیب 2.9 و 1.8 به‌دست آمد که همگی حاکی از برتری مدل FLEX-Topo در بازتولید جریان و کاهش خطا نسبت به داده‌های مشاهداتی هستند. از منظر رفتاری، مدل FLEX-L اگرچه توانسته است روند کلی تغییرات جریان را به‌خوبی شبیه‌سازی کند، اما در برخی روزهای اوج رواناب، مقدار جریان شبیه‌سازی‌شده کمتر از مقادیر مشاهده‌شده بوده است. در مقابل، مدل FLEX-Topo با بهره‌گیری از اطلاعات توپوگرافی و تقسیم‌بندی حوضه به واحدهای چشم‌انداز هیدرولوژی، توانست الگوهای مکانی تولید رواناب و ناهمگنی‌های فضایی فرآیندهای هیدرولوژی را با دقت بیش‌تری بازنمایی کند. این مدل در اغلب روزهای با بارش زیاد، روانایی نزدیک‌تر به مقادیر واقعی شبیه‌سازی کرده و عملکرد دقیق‌تری از خود نشان داده است. هم‌چنین، تحلیل پراکنش یک‌به‌یک جریان مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد که در مدل FLEX-Topo، نقاط

داده تمرکز بیش‌تری پیرامون خط برابری (۱:۱) دارند؛ به‌گونه‌ای که تطابق بین جریان‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در این مدل بیش‌تر است. در مدل FLEX-L پراکندگی نقاط بیش‌تر و نقاط داده تمرکز کم‌تری پیرامون خط برابری (۱:۱) دارند که بیانگر حساسیت کم‌تر این مدل به ناهمگنی‌های مکانی است. این نتایج تأیید می‌کنند که در نظر گرفتن ویژگی‌های توپوگرافی و ساختار چشم‌انداز در مدل FLEX-Topo نقش مهمی در بهبود شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز لسی تمر دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش بیانگر آن است که هر دو مدل FLEX-L و FLEX-Topo از کارایی قابل‌قبول در شبیه‌سازی رواناب سطحی حوزه آبخیز لسی تمر برخوردار بوده و قادرند الگوی کلی جریان و تغییرات زمانی آن را با دقت قابل‌قبول بازنمایی کنند. با این وجود، مدل FLEX-Topo به دلیل تفکیک حوزه به واحدهای همگن هیدرولوژی و لحاظ ناهمگنی‌های فضایی، عملکردی دقیق‌تر و قابل‌اطمینان‌تر نسبت به مدل FLEX-L از خود نشان داد. درحالی‌که FLEX-L روند کلی جریان را بازنمایی می‌کند، اما به دلیل ساختار ساده و عدم توجه کافی به ناهمگنی‌های مکانی در شبیه‌سازی دبی‌های اوج محدودیت دارد. در مدل FLEX-Topo، چشم‌اندازهای مختلف بر اساس فرآیندهای غالب هیدرولوژی، مانند رواناب سطحی در دامنه‌های شیب‌دار، جریان زیرسطحی در دشت‌های جنگلی و مرتعی و رواناب اشباع‌شده در مناطق پست، شناسایی و شبیه‌سازی شدند. به‌طورکلی، مدل FLEX-Topo به‌عنوان گزینه‌ای مناسب‌تر و قابل‌اعتمادتر برای تحلیل‌های هیدرولوژی در حوزه آبخیز لسی تمر معرفی می‌شود؛ با این‌حال، بهینه‌سازی پارامترها در هر دو مدل هم‌چنان می‌تواند نقش مهمی در ارتقاء دقت و کاهش عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌ها ایفا کند.

استناد: گنجی، نجمه، حسینعلی‌زاده، محسن، بهره‌مند، عبدالرضا، کمکی، چوقی‌بایرام، اونق، مجید (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژی FLEX-L و FLEX-Topo در شبیه‌سازی رواناب سطحی حوزه آبخیز لسی تمر. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۳ (۲)، ۵۹-۳۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.24294.3832



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

نهشته‌های لسی به‌عنوان یکی از پیامد بارز تغییرات اقلیمی دوره کواترنری شناخته می‌شوند و تقریباً ۱۰ درصد از سطح کره زمین را فراگرفته‌اند. این نهشته‌ها رسوبات بادی با تراکم پایین و فاقد لایه‌بندی یکنواخت هستند که عمدتاً شامل اندازه ذرات سیلت (۵۰ تا ۹۰ درصد کل ذرات) می‌باشند (۱ و ۲). این رسوبات باعث ایجاد توپوگرافی‌های ناهموار و دره‌های ناپیوسته به‌ویژه در اطراف صفحات یخچالی قدیمی و عرض‌های جغرافیایی میانی می‌شوند (۳). نهشته‌های لسی بیش‌تر در نیمکره شمالی در کمربند لس بین عرض‌های ۳۰ تا ۶۰ درجه پراکنده‌اند و مناطق عمده شامل مرکز و شمال اروپا، آمریکای شمالی، آسیای مرکزی و چین هستند (۴). در ایران، نهشته‌های لسی به‌ویژه در شمال کشور و استان گلستان و هم‌چنین در بخش‌هایی از خراسان شمالی و رضوی نیز پراکنده‌اند (۵ و ۶). لس‌های شرق ایران و منطقه خزر دارای دو دیدگاه اصلی درباره منشأ خود هستند: نخست، منشأ محلی که این رسوبات را حاصل هوازدگی مواد داخل حوضه می‌داند؛ و دوم، منشأ غیرمحلی که آن‌ها را نتیجه انتقال بادی مواد ریزدانه از نواحی شمالی، به‌ویژه بیابان‌های آسیای مرکزی معرفی می‌کند (۷).

نهشته‌های لسی به‌دلیل ساختار متخلخل و دانه‌ریز خود، نقش مهمی در فرآیندهای هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز ایفا می‌کنند. این رسوبات بادی به‌واسطه حساسیت بالای خود نسبت به فرسایش‌های پایپینگ، تونلی و آب‌کندی، موجب تغییرات قابل‌توجهی در شبکه زهکشی سطحی و زیرسطحی می‌شوند که بر رفتار هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز تأثیرگذار است (۸، ۹، ۱۰ و ۱۱)؛ بنابراین شناخت ویژگی‌های هیدرولوژی آن‌ها برای مدیریت منابع آب و کنترل فرسایش ضروری است (۱۱). در علم هیدرولوژی، درک و پیش‌بینی فرآیندهای تولید و انتقال رواناب به خروجی حوضه، یکی از مباحث بنیادی به شمار می‌رود. با پیشرفت علم، روش‌های

غیرمستقیم متنوعی برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی در حوزه‌های آبخیز معرفی شده‌اند. یکی از این روش‌ها، استفاده از مدل‌های هیدرولوژی کامپیوتری است (۱۱). مدل‌های هیدرولوژی بر پایه نمایش ساده‌شده چرخه آب و فرآیندهای هیدرولوژی پیچیده، طراحی شده‌اند و قادرند تغییرات جریان را تحت شرایط محیطی و آب و هوایی در مناطق مختلف پیش‌بینی کنند (۱۲ و ۱۳). مدل‌های هیدرولوژی به‌عنوان ابزاری کلیدی در حوزه‌های آبخیز متنوعی مانند مدیریت منابع آب، پیش‌بینی سیلاب، نظارت برسازه‌های آبی، توسعه زیرساخت‌های آب شهری، برنامه‌ریزی آبیاری و طراحی نیروگاه‌های آبی به‌کار گرفته می‌شوند (۱۴). ازاین‌رو، توسعه و بهبود این مدل‌ها برای پیشبرد مطالعات در زمینه‌های هیدرولوژی، کشاورزی، بوم‌شناسی و اقلیم‌شناسی امری ضروری است (۱۴ و ۱۵). با توجه به تنوع مدل‌های بارش-رواناب، انتخاب مدل مناسب برای حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق بدون ایستگاه، می‌تواند بهینه‌سازی مدیریت منابع آب را تسهیل کند. مدلی که با حداقل اطلاعات ورودی، نتایج قابل‌قبولی را در کوتاه‌ترین زمان و با کم‌ترین هزینه ارائه دهد، ابزاری کارآمد در آبخیزداری خواهد بود (۱۶). به همین دلیل، هیدرولوژیست‌ها در تلاش‌اند تا مدل‌های جدیدی را توسعه دهند یا مدل‌های موجود را بهبود بخشند. یکی از رویکردهای رایج در این زمینه، استفاده از مدل‌های مفهومی هیدرولوژی است که با ساده‌سازی فرآیندها و کاهش نیاز به داده‌های مشاهداتی، امکان مدل‌سازی سریع‌تر و کارآمدتر را فراهم می‌کنند (۱۷). یکی از نمونه‌های برجسته مدل‌های مفهومی، مدل هیدرولوژی FLEX است (۱۸، ۱۹، ۲۰). مدل هیدرولوژی FLEX از معادلات ریاضی مختلفی استفاده می‌کند تا جریان‌های سطحی و زیرزمینی را تخمین بزند. این مدل، با تکیه بر اصول فیزیکی و تعادل هیدرولوژیک، برای شبیه‌سازی دقیق چرخه آب و جریان سطحی در مناطق مختلف طراحی شده است. FLEX با در نظر

گرفتن عوامل کلیدی مانند خواص خاک، ویژگی‌های گیاهی، بارش، تبخیر و تعرق و جذب آب توسط گیاهان، قادر است رواناب را به دقت مدل‌سازی و تغییرات جریان سطحی را پیش‌بینی کند (۲۱). مدل FLEX انواع مختلفی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل یکپارچه FLEX-L اشاره کرد که هرچه حوزه آبخیز مورد نظر کوچک‌تر و همگن‌تر باشد، کاربرد آن مناسب‌تر خواهد بود (۱۸ و ۲۲). همچنین در این مدل فرض می‌گردد که تغییرات سری زمانی پارامترهای هواشناسی و اقلیمی مدل در سطح منطقه مورد مطالعه یکسان است، در صورتی که در چشم‌اندازهای مختلف رفتار هیدرولوژی حوزه ممکن است متفاوت باشد و ناهمگونی در چشم‌اندازها ذخیره آب، تقسیم‌بندی و حرکت رواناب را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲۰). برای رفع محدودیت‌های مدل یکپارچه FLEX، مدل FLEXD توسعه یافت که مدلی نیمه توزیعی (semi-distributed) محسوب می‌شود. در این مدل، اطلاعات ارتفاعی و توپوگرافی به صورت غیرمستقیم در فرآیند مدل‌سازی لحاظ می‌شود (۲۰)، سپس، مدل FLEXG به عنوان نسخه‌ای خاص از مدل‌های FLEX برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژی مناطق یخچالی ارائه شد. این مدل با استفاده از روش شاخص دما و بهره‌گیری از داده‌های توپوگرافی، حوزه را به دو ناحیه یخبندان و غیر یخبندان تقسیم می‌کند و از این طریق رواناب حاصل از ذوب یخ‌ها را به طور دقیق‌تری مدل‌سازی می‌کند (۱۸). در ادامه، مدل FLEX-Topo به عنوان نسخه‌ای خاص از مدل‌های FLEX توسعه یافت که یک مدل نیمه توزیعی مبتنی بر توپوگرافی است. ناهمگنی‌های توپوگرافی نقش مهمی در تعیین واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) و رفتار متفاوت چشم‌اندازهای مختلف حوزه دارند. توپوگرافی همچنین از طریق تعامل با سایر ویژگی‌های محیطی مانند پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، نوع خاک و شرایط اقلیمی، به صورت غیرمستقیم اما چشمگیر، بر پاسخ

هیدرولوژی کل حوزه اثر می‌گذارد (۲۳ و ۲۴). گنان و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داده‌اند که اتصال هیدرولوژی بین چشم‌اندازهای مختلف که عمدتاً تحت تأثیر ساختار توپوگرافی شکل می‌گیرد، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری رواناب دارد. این پیوستگی هیدرولوژی به طور متقابل با ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در ارتباط است و بر رفتار هیدرولوژی حوزه تأثیر می‌گذارد (۲۵). افزون بر این، نتایج مطالعه لوری‌تس و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که شاخص‌های توپوگرافی نقش مهمی در پیش‌بینی جریان‌های کم‌آبی در حوزه‌های آبخیز، ایفا می‌کنند. در مجموع، بهره‌گیری تلفیقی از داده‌های دقیق توپوگرافی در کنار سایر مؤلفه‌ها مانند خاک و پوشش گیاهی، موجب افزایش دقت مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی و بازنمایی واقعی‌تر پاسخ حوزه به بارش خواهد شد (۲۶). با وجود این که نقش توپوگرافی در بسیاری از مطالعات به خوبی مستند شده است، اطلاعات مرتبط با آن همچنان در بسیاری از مدل‌های هیدرولوژی به طور کامل به کار گرفته نمی‌شود. با این حال، برخی مدل‌ها مانند TOPMODEL، مدل مفهومی HBV و مدل FLEX-Topo توانسته‌اند این داده‌ها را به صورت صریح یا ضمنی در ساختار خود وارد کرده و از آن‌ها برای شبیه‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای مکانی استفاده کنند (۱۹). در چارچوب FLEX-Topo، اطلاعات توپوگرافی به عنوان شاخص اصلی طبقه‌بندی چشم‌انداز و فرآیندهای هیدرولوژیک غالب در نظر گرفته می‌شود. یکی از کلیدهای ارزشمند برای طبقه‌بندی معنادار هیدرولوژی چشم‌انداز، شاخص HAND^۱ است (۲۷). در این مطالعه، با بهره‌گیری از راهبرد مدل‌سازی FLEX-Topo شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی در حوزه آبخیز لسی تمر واقع در شمال شرقی استان گلستان انجام شده است (۱۹، ۲۳، ۲۴). به منظور مقایسه عملکرد مدل‌های مفهومی با سطوح مختلف از پیچیدگی مکانی، از دو مدل استفاده شد: مدل یکپارچه

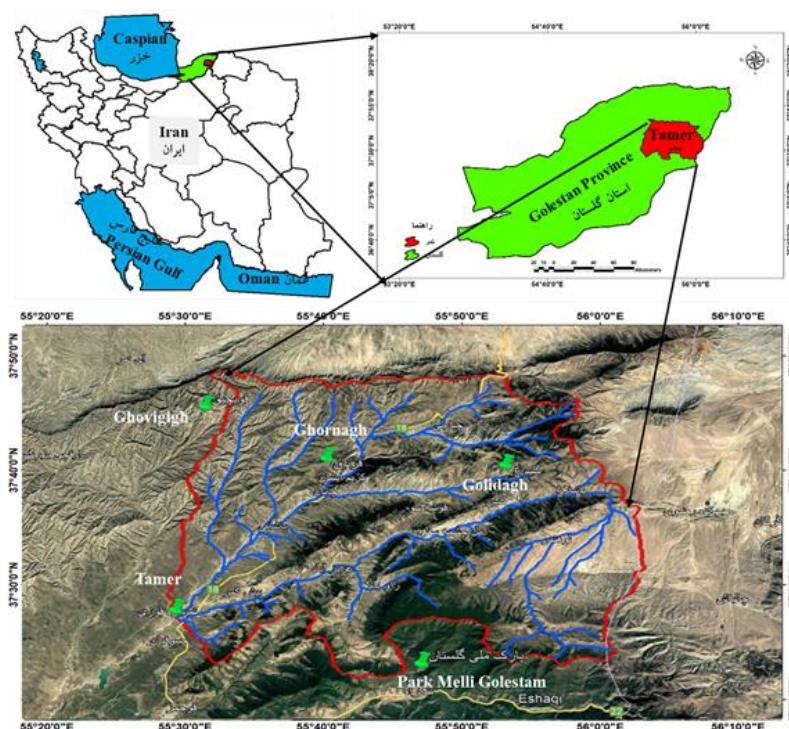
1- Height Above Nearest Drainage

بین عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه و ۵ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه و ۳۳ ثانیه شمالی و طول‌های ۵۵ درجه و ۲۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۵۶ درجه و ۴ دقیقه و ۳۵ ثانیه شرقی قرار دارد (شکل ۱). این حوضه، با مساحتی معادل ۱۵۶۱/۸ کیلومترمربع، از اقلیمی نسبتاً معتدل برخوردار است؛ به گونه‌ای که میانگین بارندگی سالانه آن در حدود ۵۰۶ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن برابر با ۱۶/۵۸ درجه سانتی‌گراد است. میانگین رطوبت نسبی نیز حدود ۶۱/۵ درصد گزارش شده است. از منظر توپوگرافی، ارتفاع این حوضه از ۱۱۱ متر در نواحی پست تا ۲۱۷۸ متر در ارتفاعات خوش‌بیلاق در جنوب منطقه متغیر است که این اختلاف ارتفاع، گویای تنوع زیاد در چشم‌اندازهای منطقه است.

FLEX-L که مبتنی بر داده‌های ورودی یکپارچه است و مدل نیمه‌توزیعی FLEX-Topo که ساختار آن بر پایه شاخص‌های توپوگرافی بنا شده است. هدف اصلی این مطالعه، توسعه و به‌کارگیری یک مدل مفهومی نیمه‌توزیعی مبتنی بر طبقه‌بندی چشم‌انداز براساس شاخص‌های توپوگرافی (FLEX-Topo) و ارزیابی آن در مقایسه با مدلی با ساختار ساده‌تر و ناهمگنی فرآیندی کم‌تر (FLEX-L) است؛ به گونه‌ای که بتوان از طریق آن، درک بهتری از تأثیر ناهمگنی مکانی و فرآیندی در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژی حوضه به‌دست آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز لسی تمر یکی از زیرحوضه‌های مهم رودخانه گرگان‌رود در شرق استان گلستان است که در محدوده‌ای با مختصات جغرافیایی



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز لسی تمر در استان گلستان، ایران.

Figure 1. Geographical location map of the Tamer loess watershed in Golestan Province, Iran.

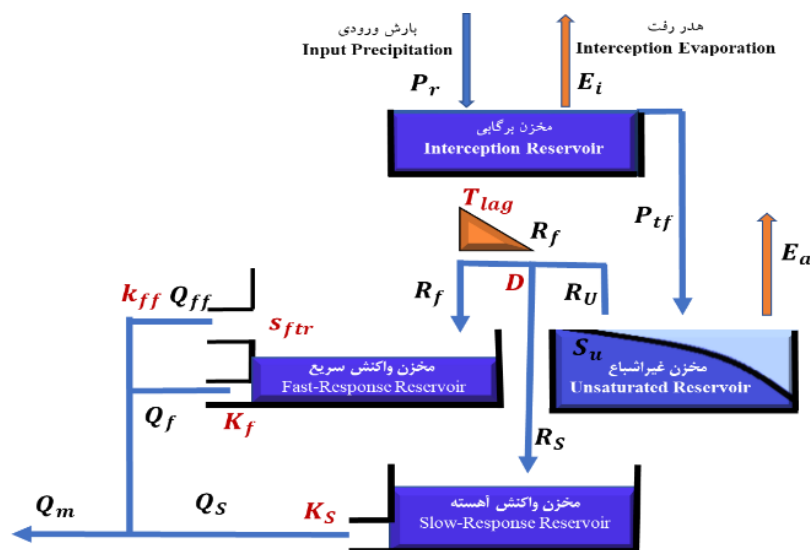
روش پژوهش

جمع‌آوری آمار و اطلاعات: در این پژوهش، به‌منظور تحلیل دقیق رفتار هیدرولوژی حوزه آبخیز لسی‌تمر، داده‌های اقلیمی و هیدرومتری از ایستگاه‌های مختلف گردآوری و تحلیل شده‌اند. ایستگاه هیدرومتری تمر برای ثبت جریان خروجی حوضه و ایستگاه‌های باران‌سنجی قویجیق و گلیداغ جهت اندازه‌گیری بارندگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، داده‌های تبخیر و تعرق از ایستگاه‌های تبخیرسنجی گلیداغ، سدگلستان، پارک ملی گلستان و تمر استخراج شده است. دوره آماری مورد بررسی، بازه‌ای مشترک از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ هجری شمسی (معادل ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ میلادی) را دربرمی‌گیرد که برای بررسی مدل‌سازی بارش و رواناب در این حوضه انتخاب شده است. با استفاده از داده‌های هم‌زمان بارندگی، تبخیر، دما و دبی، نمودار هیدروگراف روزانه برای حوضه تمر ترسیم شد. همچنین، برای انجام مدل‌سازی مکانی و شبیه‌سازی دقیق رواناب، لایه‌های مکانی مورد نیاز نظیر مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب، جهت شیب، شبکه آبراهه‌ها، کاربری اراضی و شاخص توپوگرافی HAND استفاده شد. بیش از ۹۰ درصد سطح حوزه آبخیز با رسوبات لسی پوشیده شده است. در حوزه آبخیز لسی‌تمر، کاربری اراضی متنوعی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که حدود ۴۵ درصد حوزه تحت کشت کشاورزی، ۳۰ درصد مراتع و ۲۵ درصد جنگل

و پوشش گیاهی طبیعی قرار دارند. طول رودخانه یا آبراهه اصلی حوزه آبخیز لسی‌تمر حدود ۵۸ کیلومتر است. این آبراهه نقش مهمی در جمع‌آوری و هدایت رواناب سطحی به خروجی حوضه دارد و ویژگی‌های طول و شیب آن بر رفتار هیدرولوژیکی کل حوضه تأثیرگذار است. شیب متوسط حوضه در حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد است که در بخش‌هایی از حوزه شیب‌ها به بیش از ۱۰۰ درصد نیز می‌رسد. چشم‌اندازهای هیدرولوژی برای این حوضه شامل اراضی پست حاشیه رودخانه، دامنه‌های پرشیب و فلات‌های کم‌شیب است.

رویکرد مدل‌ها: در این پژوهش، برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوزه آبخیز لسی‌تمر از دو مدل خانواده FLEX شامل FLEX-L و FLEX-Topo استفاده شده است. این مدل‌ها به‌دلیل ساختار انعطاف‌پذیر، امکان بررسی رفتارهای مختلف هیدرولوژی در مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت را فراهم می‌کنند (۱۸ و ۲۸).

مدل یکپارچه (FLEXL): این مدل به‌صورت یکپارچه است و تمام حوضه را به‌عنوان یک واحد یکپارچه در نظر می‌گیرد؛ و شامل چهار مخزن مفهومی برگابی، غیراشباع، واکنش سریع و واکنش آهسته است که با استفاده از تعادل هیدرولوژی، فرآیندهای بارش تا رواناب را شبیه‌سازی می‌کند و تمامی پارامترها به‌صورت یکنواخت برای کل حوضه تعریف می‌شوند (۱۹).

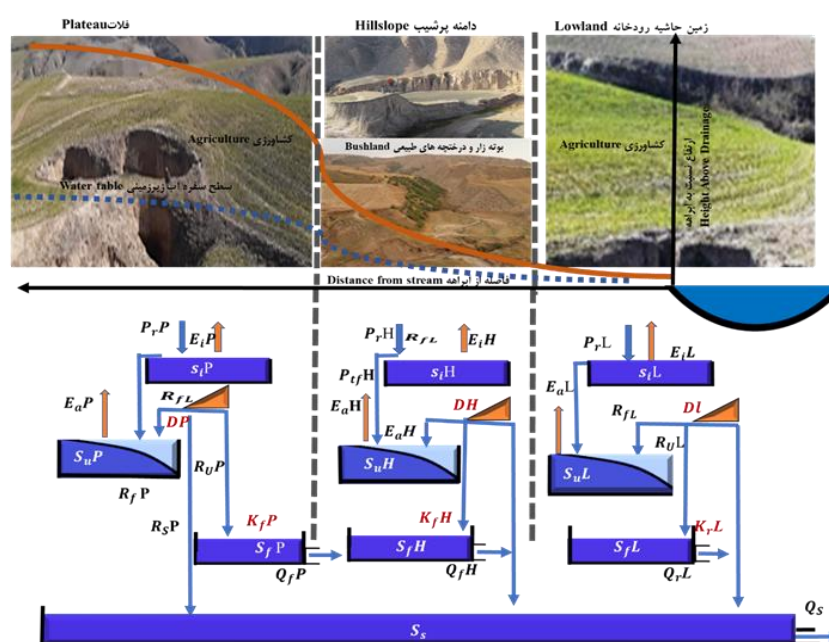


شکل ۲- نمودار جریان‌ی مدل هیدرولوژی FLEX برای حوزه آبخیز لسی تمر (۱).

Figure 2. Flowchart of the FLEX hydrological model for the loess Tamer watershed (1).

هر دو مدل، ترکیبی از مخازن (reservoirs)، توابع تأخیری (lag functions) و عناصر ارتباطی (connection elements) هستند که به روش‌های مختلف به یکدیگر متصل شده‌اند تا عملکردهای مختلف هیدرولوژی را شبیه‌سازی کنند. ساختار این مدل‌ها با استفاده از چارچوب مدل‌سازی انعطاف‌پذیر SUPERFLEX ایجاد شده است. کدنویسی و اجرای هر دو مدل در چهارچوب مفهومی Superflex انجام شد. این چارچوب انعطاف‌پذیر در محیط برنامه‌نویسی Python پیاده‌سازی شد و از کتابخانه‌های علمی numpy, matplotlib, pre-commit, pandas, scipy و openpyxl برای اجرای مدل و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. برای پردازش داده‌ها، واسنجی پارامترها و تحلیل نتایج استفاده شد. محیط Python به دلیل پشتیبانی از ساختارهای شیء‌گرا و ابزارهای تحلیل داده، بستر مناسبی برای توسعه و اجرای مدل‌های مفهومی هیدرولوژی فراهم کرد (۳۰ و ۳۱).

مدل نیمه‌توزیعی مبتنی بر توپوگرافی (FLEX-Topo): این مدل نیز نیمه‌توزیعی است و ساختار آن بر اساس اطلاعات توپوگرافی طراحی شده است. مدل FLEX-Topo با بهره‌گیری از اطلاعات توپوگرافی، حوضه را به واحدهای همگن از نظر هیدرولوژی تقسیم می‌کند. در این مدل، از شاخص توپوگرافی HAND برای تفکیک چشم‌اندازهای مختلف مانند دامنه‌های پرشیب و مناطق مسطح استفاده شد. این شاخص با ارائه درکی از ارتفاع نسبی نسبت به نزدیک‌ترین شبکه زهکشی، مبنای طبقه‌بندی هیدرولوژی را فراهم می‌کند و دقت شبیه‌سازی را بهبود می‌بخشد (۲۱، ۲۲، ۲۹). ساختار مدل و مقداردهی پارامترها به گونه‌ای طراحی شد که ویژگی‌های هیدرولوژی خاص هر واحد را منعکس کند. در نهایت، خروجی واحدها با توجه به نسبت مساحت هر چشم‌انداز تجمیع شده و رواناب کل حوزه آبخیز لسی تمر برآورد می‌گردد. این رویکرد منجر به افزایش دقت مدل و بهبود قابلیت تعمیم آن به سایر زیرحوضه‌های مشابه شد.



شکل ۳- نمودار جریان‌ی مدل FLEX-Topo و چشم‌اندازهای هیدرولوژی حوزه آبخیز لسی تمر.

Figure 3. Flowchart of the FLEX-Topo model and hydrological landscapes of the loess Tamer watershed.

رابطه ۶، S_u محتوی رطوبتی خاک، G_r ضریب رواناب، S_{uMax} بیشینه ظرفیت رطوبتی در ناحیه ریشه، و پارامتر β که بیانگر ناهمگنی مکانی فرآیند است، توصیف می‌شود. در معادله ۷، جریان R_u رواناب ناشی از بارش مؤثر ورودی به خاک (P_{tf}) است (جدول ۲). طبق رابطه ۸، مقدار R_f بیانگر جریان ورودی به مخزن واکنش سریع بوده و D به‌عنوان پارامتر تفکیک‌کننده برای تعیین سهم نفوذ عمقی از جریان عمل می‌کند. همچنین، رابطه ۹ جریان R_s را به‌عنوان ورودی به مخزن آب‌زیرزمینی تعریف می‌کند. رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ به‌منظور مدل‌سازی تأخیر زمانی بین وقوع رگبار و اوج جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقدار $R_f(t-i+1)$ بیانگر رواناب سریع در منطقه غیراشباع در زمان است. پارامتر T_{lag} نمایانگر مدت‌زمان تأخیر میان بارش و شکل‌گیری جریان سریع است. همچنین $c(i)$ وزن جریان مربوط به روز $i-1$ را مشخص می‌کند و $R_{fL}(t)$ جریان ورودی تجمیع‌شده به مخزن واکنش

ساختار مدل: مدل‌های مفهومی FLEX شامل چهار مخزن برگابی، غیراشباع، واکنش سریع و واکنش آهسته است. بارندگی ابتدا در مخزن برگابی ذخیره و سپس به مخزن غیراشباع منتقل می‌شود. میزان اتلاف آب از طریق برگاب (E_i) با توجه به تبخیر پتانسیل (E_p)، ذخیره موجود در مخزن برگابی (S_i) و I_{max} محاسبه می‌شود. مقدار برگاب (P_{tf}) با استفاده از بیان تاج‌پوشش (رابطه ۱) و مؤلفه‌های رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه‌شده (جدول ۱) و به‌عنوان ورودی وارد مخزن غیراشباع می‌شود. تغییرات ذخیره آب در این مخزن با توجه به رابطه ۴ محاسبه می‌شود. تابع بتا، ضریب رواناب بر اساس رطوبت نسبی خاک برآورد می‌کند. برای محاسبه تبخیر واقعی (E_a)، از رابطه ۵ همراه با مقادیر ذخیره غیراشباع (S_u)، بیشینه ظرفیت این مخزن (S_{uMax}) و تبخیر پتانسیل استفاده می‌شود. ضریب C_e نشان‌دهنده آن بخشی از S_{uMax} است که اگر ذخیره رطوبت خاک از آن فراتر رود، مقدار (E_a) برابر با (E_p) در نظر گرفته می‌شود. در

سریع را نشان می‌دهد (جدول ۳). رابطه ۱۲ بیانگر نوسانات ذخیره آب در مخزن واکنش سریع است که از تفاضل بین ورودی‌های و خروجی‌های مستقیم و پایه حاصل می‌شود. در رابطه ۱۳، رواناب سطحی (Q_{ff}) با استفاده از پارامتر زمانی K_{ff} تعریف شده و زمانی فعال می‌شود که مقدار ذخیره در مخزن سریع از حد آستانه تعیین شده (S_{thr}) فراتر رود (جدول ۴). رابطه‌های ۱۴ و ۱۵، Q_f و Q_s به ترتیب نمایانگر رواناب سریع و آهسته هستند، S_f و S_s وضعیت ذخیره در مخزن سریع و مخزن آب زیرزمینی را نشان می‌دهند. رابطه ۱۶ جریان خروجی را توصیف می‌کند. پارامترهای K_f و K_s نیز به عنوان ضرایب مقیاس زمانی است (جدول ۵). مجموع این جریان‌ها، رواناب کلی مدل (Q_m) را تشکیل می‌دهد (۱۹).

جدول ۱- روابط مورد استفاده در مدل مفهومی FLEX برای مخزن برگابی.

Table 1. Equations Used in the Conceptual FLEX Model for the Interception Storage Reservoir.

شماره Number	شرح Description	رابطه Equation
1	تغییرات حجم ذخیره رطوبت خاک Change in soil moisture storage volume	$\frac{dS_i}{dt} = P_r - E_i - P_{tf}$
2	تبخیر از پوشش گیاهی Evaporation from interception	$E_i = \begin{cases} E_p; & S_i > 0 \\ 0; & S_i = 0 \end{cases}$
3	بارش عبوری Throughfall	$P_{tf} = \begin{cases} 0; & S_i < I_{max} \\ P_r; & S_i = I_{max} \end{cases}$

جدول ۲- روابط مورد استفاده در مدل مفهومی FLEX برای مخزن غیراشباع.

Table 2. Equations Used in the Conceptual FLEX Model for the Unsaturated Reservoir.

شماره Number	شرح Description	رابطه Equation
4	تغییرات حجم ذخیره رطوبت خاک Soil Moisture Storage	$\frac{dS_u}{dt} = P_{tf}(1 - C_r) - E_a$
5	تبخیر واقعی Actual Evaporation	$E_a = (E_p - E_i) \min \left(\frac{S_u}{S_{uMax} C_e}, 1 \right)$
6	ضریب رواناب Runoff Coefficient	$C_r = 1 - \left(1 - \frac{S_u}{S_{uMax}} \right)^\beta$
7	رواناب تولیدی Generated Runoff	$R_u = P_{tf} C_r$

جدول ۳- روابط مورد استفاده در مدل مفهومی FLEX برای تابع مقسم و تأخیر.

Table 3. Equations Used in the Conceptual FLEX Model for the Splitter and Lag Function.

شماره Number	شرح Description	رابطه Equation
8	رواناب سریع Fast runoff	$R_f = R_u D$
9	رواناب آهسته Slow runoff	$R_s = R_u (1 - D)$
10	رواناب با تأخیر Lagged fast runoff	$R_{fl}(t) = \sum_{i=1}^{T_{lag}} c(i) \cdot R_f(t - (i + 1))$
11	طول دوره تأخیر Lag time	$c(i) = i / \sum_{u=1}^{T_{lag}} u$

جدول ۴- روابط مورد استفاده در مدل مفهومی FLEX برای مخزن واکنش سریع.

Table 4. Equations Used in the Conceptual FLEX Model for the Fast-Response Reservoir.

شماره Number	شرح Description	رابطه Equation
12	تغییرات حجم ذخیره مخزن سریع Change in storage volume of the surface reservoir storage	$\frac{dS_f}{dt} = R_{fl} - Q_{ff} - Q_f$
13	جریان خروجی سریع Fast flow output	$Q_{ff} = m a x(0, S_f - S_{ftr}) / K_{ff}$
14	نرخ جریان خروجی Outflow rate	$Q_f = S_f / K_f$

جدول ۵- روابط مورد استفاده در مدل مفهومی FLEX برای مخزن واکنش آهسته.

Table 5. Equations Used in the Conceptual FLEX Model for the Slow-Response Reservoir.

شماره Number	شرح Description	رابطه Equation
15	تغییرات حجم ذخیره مخزن آهسته Change in storage volume of the slow reservoir Slow reservoir storage	$\frac{dS_s}{dt} = R_s - Q_s$
16	تخلیه پایه Baseflow	$Q_s = S_s / K_s$

ارزیابی عملکرد مدل: برای ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های هیدرولوژی، از چندین شاخص آماری استفاده شد که شامل شاخص‌های نسبت خطای استاندارد (RMSE)، شاخص نش-ساتکلیف (NSE) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) است. این شاخص‌ها به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژی به‌منظور ارزیابی انطباق بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به‌کاررفته‌اند (۳۲ و ۳۳). شاخص NSE به‌طور خاص برای ارزیابی تطابق مدل با داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود و هرچه مقدار آن به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است (۳۴ و ۳۵). شاخص KGE نیز به‌عنوان یک ابزار ترکیبی برای بررسی هم‌راستایی واریانس‌ها، میانگین‌ها و همبستگی بین داده‌ها و پیش‌بینی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۶).

نتایج و بحث

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های هیدرولوژی حوزه آبخیز تمر با استفاده از مدل‌های FLEX-L و FLEX-Topo ارائه و تحلیل می‌شوند. ابتدا چشم‌اندازهای هیدرولوژی حوزه مطابق مدل نیمه‌توزیعی FLEX-Topo و شاخص توپوگرافی HAND شناسایی شده و ویژگی‌ها و مکانیسم‌های تولید رواناب در واحدهای مختلف چشم‌انداز بررسی می‌شوند. سپس، نتایج شبیه‌سازی رواناب توسط هر دو مدل در دوره ۲۰۱۳-۲۰۲۳ مقایسه و عملکرد آن‌ها با شاخص‌های آماری NSE، KGE و RMSE ارزیابی می‌گردد.

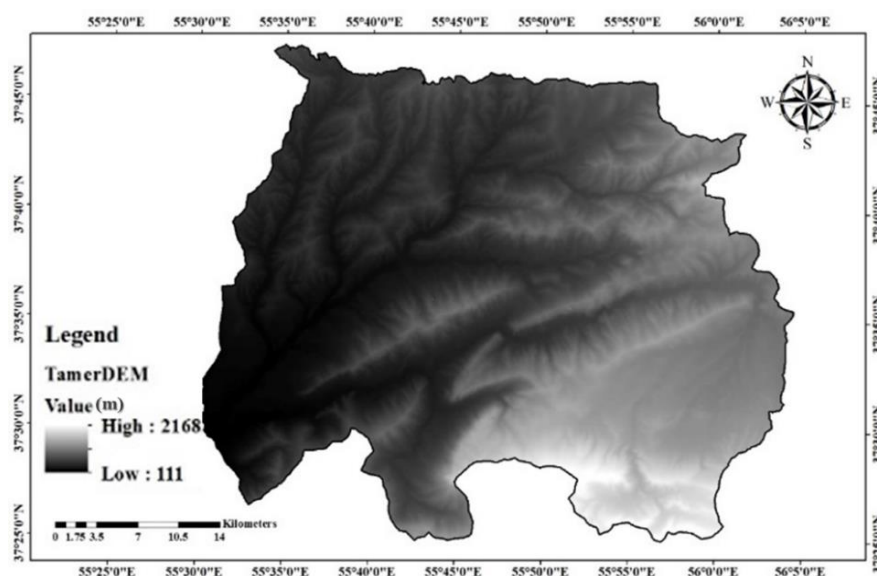
چشم‌اندازهای هیدرولوژی حوزه آبخیز لسی تمر: در مدل هیدرولوژی FLEX-Topo، نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) نقش اساسی در تعریف و طبقه‌بندی چشم‌اندازها داشت (شکل ۴). این نقشه با فراهم کردن اطلاعات ارتفاع، شیب، جهت جریان و شبکه آبراهه‌ها، امکان شناسایی موقعیت‌های

توپوگرافی مختلف مانند مناطق بالادست، شیب‌های میانی و نواحی پست نزدیک رودخانه را فراهم کرد. همچنین در این مدل، از نقشه شاخص توپوگرافی HAND استخراج‌شده از DEM برای تفکیک چشم‌اندازها و تعیین مرز واحدهای هیدرولوژیک استفاده شده بود (شکل ۵). نقشه کاربری اراضی که از تصاویر ماهواره Sentinel-2 مربوط به سال ۲۰۲۴ تهیه شده است (شکل ۶)، برای توصیف ویژگی‌های سطح زمین و تعیین نوع کاربری در چشم‌اندازهای مختلف استفاده شد. این نقشه امکان تفکیک کاربری‌هایی مانند جنگل، مرتع، زمین‌های کشاورزی و مناطق شهری را فراهم می‌کرد و در تعیین پارامترهایی هم‌چون ظرفیت نفوذ، زبری سطح و الگوی رواناب سطحی نقش داشت. همچنین، نقشه NDVI استخراج‌شده از تصاویر همان ماهواره و مربوط به سال ۲۰۲۴، با استفاده از Google Earth Engine تهیه شد (شکل ۷)؛ و وضعیت و تراکم پوشش گیاهی را نشان می‌داد و برای مشخص کردن شرایط پوشش گیاهی در هر چشم‌انداز به کار رفت. بهره‌گیری هم‌زمان از این دو نقشه، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر پاسخ هیدرولوژیکی حوزه و بازتاب واقع‌بینانه‌تر تغییرات فصلی و مکانی فرآیندهای هیدرولوژیکی را فراهم ساخت.

مطابق مدل‌سازی مبتنی بر توپوگرافی FLEX-Topo که بر پایه شاخص HAND استوار است. در حوزه مورد مطالعه سه چشم‌انداز هیدرولوژی مشخص شد (شکل ۸). این چشم‌اندازها شامل نواحی پست در مجاورت شبکه زهکشی، دامنه‌های شیب‌دار در نواحی میانی و مناطق مرتفع و نسبتاً هموار در بخش‌های بالادست حوزه می‌باشند که بهره‌مند و حسینعلی‌زاده (۲۰۲۲) در این منطقه این طبقه‌بندی را پیشنهاد دادند (۲۴). این طبقه‌بندی، با چارچوب مفهومی مدل FLEX-Topo همخوانی داشته و مبنایی برای تفکیک واحدهای پاسخ هیدرولوژی در مدل‌سازی نیمه‌توزیعی

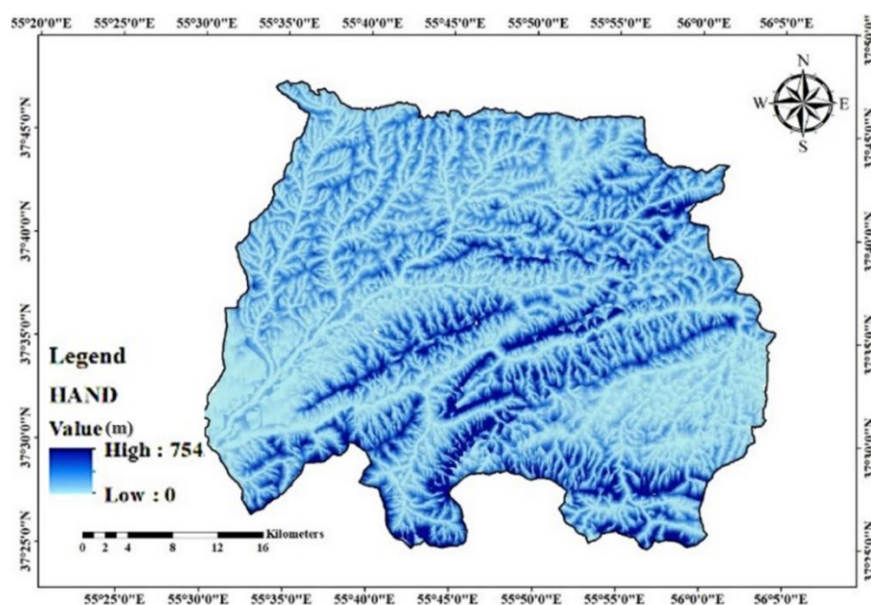
واحدهای هیدرولوژی در مدل‌سازی‌های مفهومی و نیمه‌توزیعی شناخته شده است (۲۶، ۲۸، ۳۷).

فراهم کرده است. به منظور تفکیک این چشم‌اندازها، از شاخص توپوگرافی HAND بهره گرفته شد؛ این شاخص به عنوان ابزاری مؤثر برای جداسازی



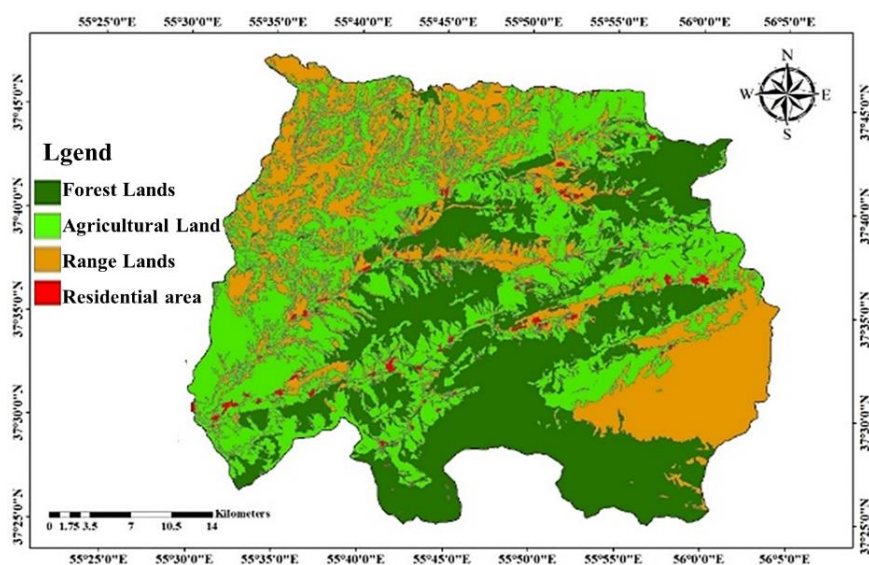
شکل ۴- نقشه رقومی ارتفاعی DEM حوزه آبخیز لسی تمر.

Figure 4. Digital Elevation Model (DEM) map of the Tamer loess watershed.



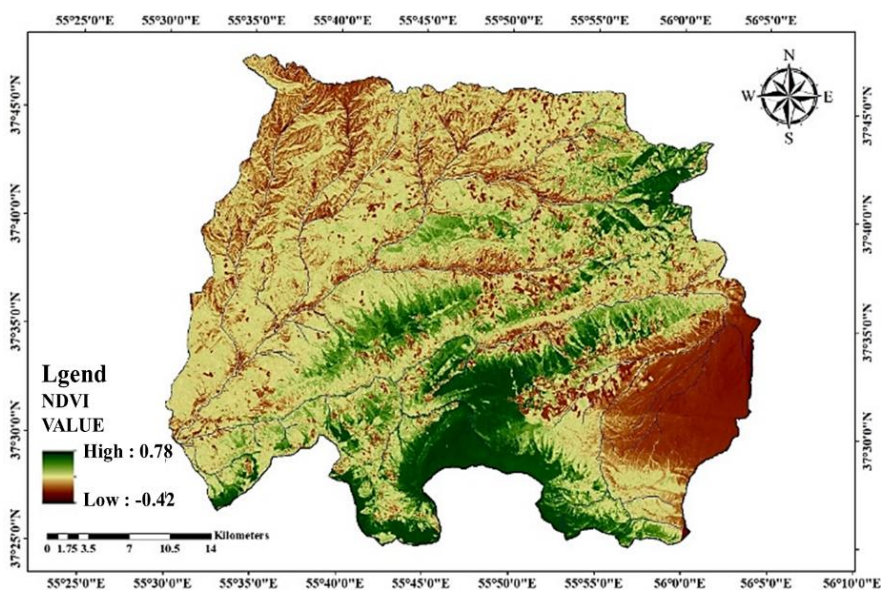
شکل ۵- نقشه شاخص توپوگرافی HAND حوزه آبخیز لسی تمر.

Figure 5. The topographic index HAND of the Tamer loess watershed.



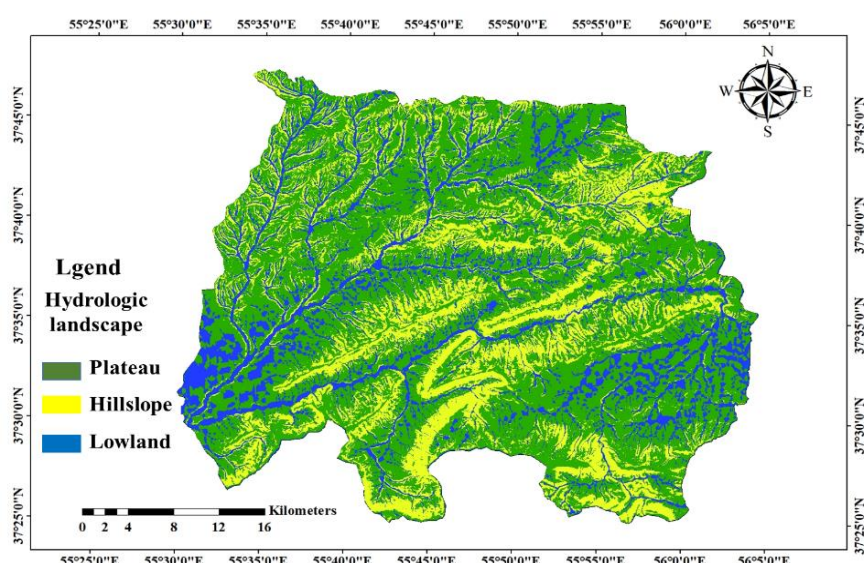
شکل ۶- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز لسی تمر.

Figure 6. Land use map of the Tamer loess watershed.



شکل ۷- نقشه NDVI حوزه آبخیز لسی تمر.

Figure 7. NDVI map of the Tamer loess watershed.



شکل ۸- نقشه چشم‌اندازهای هیدرولوژی حوزه آبخیز لسی تمر برای مدل FLEX-Topo

Figure 8. The hydrological landscape map of the Tamer loess watershed for FLEX-Topo Modeling.

ارضی، تأثیر مستقیمی بر نوع و شدت فرآیندهای رواناب دارد به‌طوری‌که اراضی کشاورزی بیشترین رواناب سطحی را نشان دادند، در حالی‌که اراضی جنگلی و مرتعی سهم بیشتری در جریان‌های زیرسطحی داشتند. همچنین تأثیر شیب، به‌ویژه در اراضی با شیب تند و تحت بهره‌برداری انسانی برجسته‌تر بود. این نتایج بر ضرورت مدیریت تلفیقی کاربری اراضی و توپوگرافی به‌منظور تحقق پایداری هیدرولوژی حوضه تأکید می‌کند (۳۸). همچنین پولیاکوف و همکاران (۲۰۲۵) در اراضی کشاورزی کم‌شیب، دو مکانیسم اشباع و هورتنی را به تفکیک موقعیت بالا و پایین‌دست تأیید کرده‌اند (۳۹). نیو و همکاران (۲۰۲۴) نیز بر اهمیت طبقه‌بندی چشم‌اندازهای هیدرولوژی به‌عنوان مبنایی برای درک بهتر مکانیسم‌های رواناب و بهبود مدل‌سازی حوزه‌های آبخیز تأکید می‌کنند (۴۰).

ویژگی‌های چشم‌اندازهای هیدرولوژی و مکانیسم تولید رواناب در حوزه آبخیز لسی تمر در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که بهره‌مند و حسینعلی‌زاده (۲۰۲۲) نیز بیان کرده‌اند، در حوزه آبخیز لسی تمر، تحلیل چشم‌اندازهای هیدرولوژی نشان می‌دهد که نوع مکانیسم تولید رواناب به‌شدت تحت تأثیر عواملی چون شیب زمین، نوع کاربری اراضی و موقعیت آن‌ها نسبت به شبکه زهکشی قرار دارد. اراضی پست با شیب ملایم، بسته به جایگاه مکانی خود، رواناب را از طریق دو مکانیسم متفاوت تولید می‌کنند. در دامنه‌های پرشیب با پوشش طبیعی، جریان زیرقشری به‌عنوان مکانیسم غالب است. همچنین، در فلات‌های مرتفع با شیب کم، مکانیسم هورتنی نقش اصلی را در تولید رواناب ایفا می‌کند (جدول ۶). یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه مگرسا و همکاران (۲۰۲۲) هم‌راستا است. آن‌ها در پژوهش خود نشان دادند که توپوگرافی و کاربری

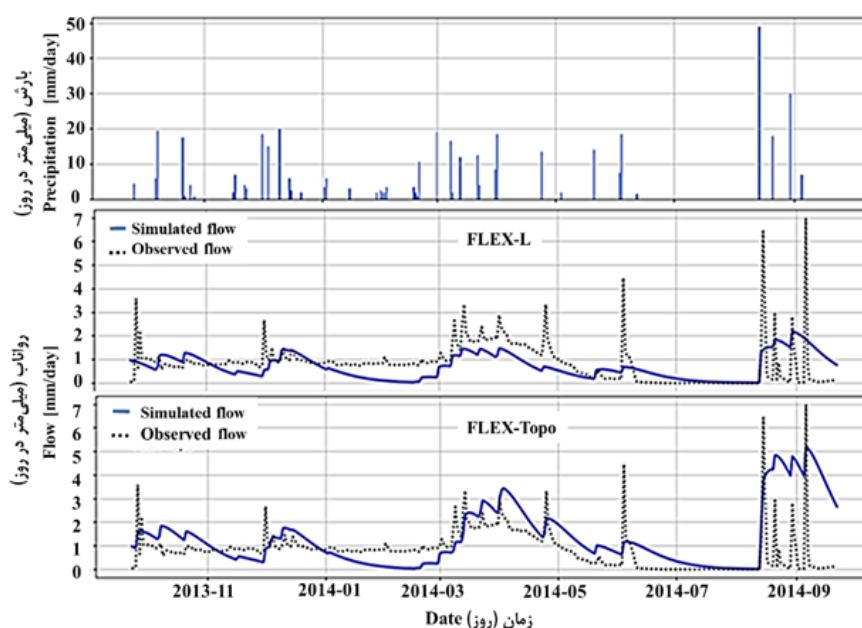
جدول ۶- ویژگی‌های چشم‌اندازهای هیدرولوژی و مکانیسم تولید رواناب در حوزه آبخیز لسی تمر.

Table 6. Characteristics of Hydrological Landscapes and Runoff Generation Mechanisms in the Tamer loess watershed.

مکانیسم تولید رواناب Runoff Generation Mechanism	شیب Slope	نوع کاربری Land Use	مساحت Area (km ²)	چشم‌انداز هیدرولوژی Hydrological Landscape
پایین‌دست: اشباع شده Saturation Overland Flow بالادست: رواناب سطحی هورتنی Hortonian Overland Flow	کم شیب Low slope (<26%)	کشاورزی Agriculture	264.8	اراضی پست حاشیه رودخانه Lowland areas along rivers
جریان زیرقشری Subsurface Storm Flow	بسیار پرشیب Very slope (>100%)	بوته و درختچه‌های طبیعی Natural shrubs and bushes	609	دامنه‌های پرشیب Hillslopes
رواناب سطحی هورتنی Hortonian Overland Flow	کم شیب Low slope (<26%)	کشاورزی Agriculture	688	فلات Plateau

۲۰۱۳ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۴) و در بخش پایین رواناب‌های مشاهده‌شده (خط‌چین مشکی) و شبیه‌سازی‌شده (خط آبی) توسط مدل‌های FLEX-L و FLEX-topo نمایش داده‌شده‌اند، بیش‌ترین بارش در تاریخ‌های ۲۳ مرداد ۱۳۹۳ (۱۴ آگوست ۲۰۱۴) و ۸ شهریور ۱۳۹۳ (۳۰ آگوست ۲۰۱۴) به ترتیب با بارش‌های ۴۹ و ۳۰ میلی‌متر، رواناب‌ها در FLEX-L به ترتیب ۲/۵ و ۲ میلی‌متر و در FLEX-topo حدود ۵ و ۵/۵ میلی‌متر شبیه‌سازی‌شده‌اند. مدل FLEX-Topo در این سال آبی توانسته رواناب‌های اوج را نسبت به مدل FLEX-L دقیق‌تر شبیه‌سازی کند. این مقایسه نشان می‌دهد که هر دو مدل توانسته‌اند روند کلی تغییرات رواناب را بازسازی کنند، اما در بازه‌های اوج رواناب، به‌ویژه پس از بارش‌های سنگین، مدل FLEX-Topo عملکرد دقیق‌تر و واکنش سریع‌تری نسبت به FLEX-L داشته و اوج‌های رواناب را با شدت و زمان‌بندی بهتری شبیه‌سازی کرده است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل FLEX-Topo دقت بیشتری در شبیه‌سازی دینامیک رواناب روزانه در این حوزه آبخیز داشته است.

اجرای مدل‌های FLEX-L و FLEX-Topo در حوزه آبخیز لسی تمر: در این پژوهش، مدل‌های مفهومی هیدرولوژی FLEX شامل FLEX-L و FLEX-Topo با هدف بررسی پاسخ هیدرولوژی حوزه آبخیز تمر تحت شرایط مختلف اقلیمی و توپوگرافی اجرا شدند. این مدل‌ها مبتنی بر ساختار مفهومی FLEX-Topo هستند که با رویکردی نیمه‌توزیعی، ناهمگنی مکانی حوضه را با تفکیک آن به چشم‌اندازهای هیدرولوژی متمایز، نظیر اراضی پست، دامنه‌های شیب‌دار و فلات، در نظر می‌گیرند (۱۹ و ۲۷). برای ارزیابی توانایی هر مدل در بازنمایی فرآیندهای هیدرولوژیک و پاسخ‌دهی به ناهمگنی‌های مکانی حوضه، شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارش برای سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ به‌صورت جداگانه انجام گرفت. به‌عنوان نمونه، نتایج شبیه‌سازی مربوط به سال آبی ۱۳۹۳ در شکل ۹، سال ۱۳۹۸ در شکل ۱۰ و سال ۱۴۰۲ در شکل ۱۱ ارائه‌شده‌اند. هم‌چنین، جهت بررسی عملکرد کلی مدل‌ها، شبیه‌سازی رواناب برای دوره ده‌ساله با استفاده از هر دو مدل در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. طبق شکل ۹ که در بخش بالایی آن میزان بارش در سال آبی ۱۳۹۳ (۲۳ سپتامبر

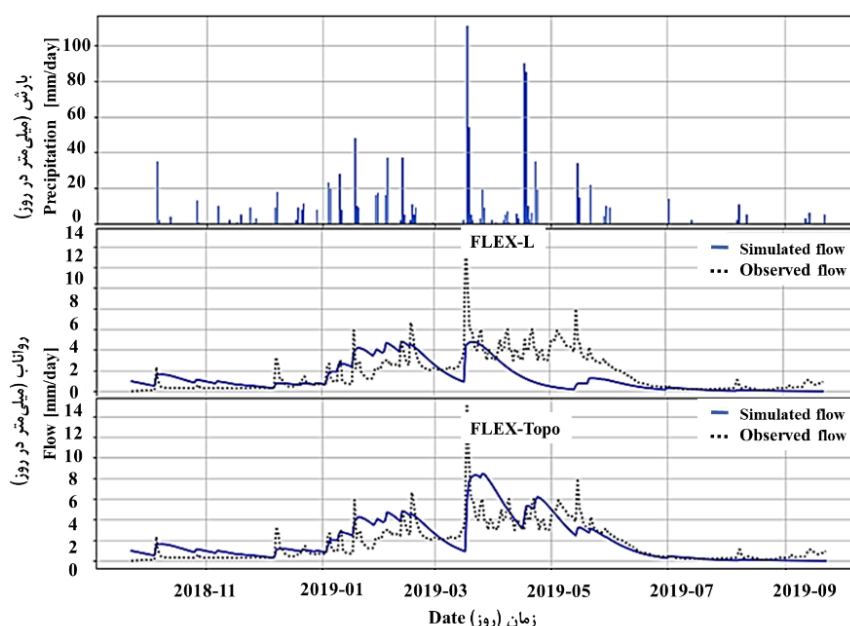


شکل ۹- نمودار خطی- ستونی مقادیر بارش و رواناب‌های شبیه‌سازی شده در سال آبی ۱۳۹۳.

Figure 9. Line – column chart of precipitation and simulated runoff values in the 2014 water year.

اوج‌های رواناب، مقادیر شبیه‌سازی شده آن کمتر از مقدار واقعی است. در مقابل، مدل FLEX-Topo در شبیه‌سازی دوره‌های با رواناب بالا عملکرد دقیق‌تری دارد، هرچند ممکن است در دوره‌های کم‌بارش، روانابی بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی کند. به‌طور کلی، هر دو مدل توانایی مناسبی در بازنمایی روند تغییرات رواناب دارند، اما برای ارتقای دقت در شبیه‌سازی رویدادهای شدید، تنظیم دقیق‌تر پارامترها و بهبود کیفیت داده‌های ورودی توصیه می‌شود.

بر اساس شکل ۱۰، در سال آبی ۱۳۹۸ مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیک با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد که در تاریخ ۱۵ بهمن ۱۳۹۷ (۵ مارس ۲۰۱۹)، اوج بارش با مقدار حدود ۱۰۰ میلی‌متر همراه با رواناب قابل‌توجهی رخ داده است. در این رویداد، مدل FLEX-L میزان رواناب را ۶ میلی‌متر و مدل FLEX-Topo مقدار ۸ میلی‌متر پیش‌بینی کرده‌اند. ارزیابی عملکرد این دو مدل نشان می‌دهد که مدل FLEX-L در دوره‌های کم‌رواناب دقت بالاتری دارد، اما در زمان وقوع

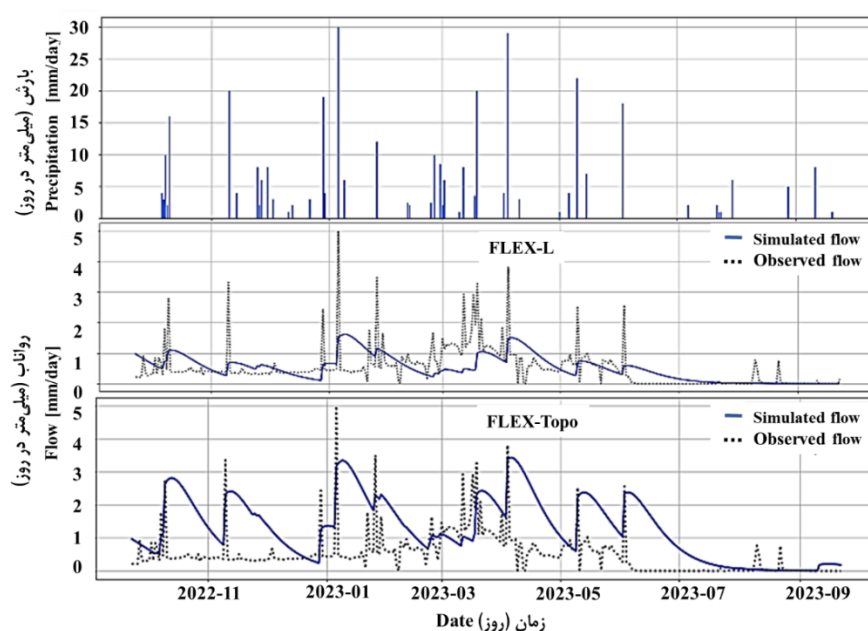


شکل ۱۰- نمودار خطی- ستونی بارش و رواناب‌های شبیه‌سازی‌شده در سال آبی ۱۳۹۸.

Figure 10. Line – column chart of precipitation and simulated runoff values in the 2019 water year.

شبیه‌سازی‌شده توسط آن حدود ۲۰۵ میلی‌متر در روز است، درحالی‌که مدل FLEX-Topo توانسته اوج‌های رواناب را با دقت بیش‌تری شبیه‌سازی کند و در برخی موارد تا حدود ۴ میلی‌متر در روز نیز رواناب را برآورد کرده است. به‌طورکلی، مدل FLEX-Topo هم از نظر زمان وقوع و هم از نظر شدت، تطابق بهتری با داده‌های مشاهداتی دارد، درحالی‌که مدل FLEX-L رواناب‌ها را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است.

شکل ۱۱ شبیه‌سازی رواناب سال آبی ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد، بیشترین بارش‌ها به‌ترتیب در تاریخ‌های ۱۴ دی، ۲۰ اسفند و اوایل اردیبهشت با مقادیر حدود ۳۰، ۲۸ و ۲۰ میلی‌متر میلی‌متر رخ داده‌اند و منجر به وقوع رواناب‌های قابل‌توجهی با اوج‌هایی تا حدود ۴ میلی‌متر در روز شده‌اند. رواناب مشاهداتی در این دوره چندین اوج مشخص دارد که شدت آن‌ها به‌طور میانگین بین ۳ تا ۴ میلی‌متر در روز ثبت شده است. مدل FLEX-L در شبیه‌سازی رواناب‌ها عملکرد محافظه‌کارانه‌تری داشته و بیشینه رواناب

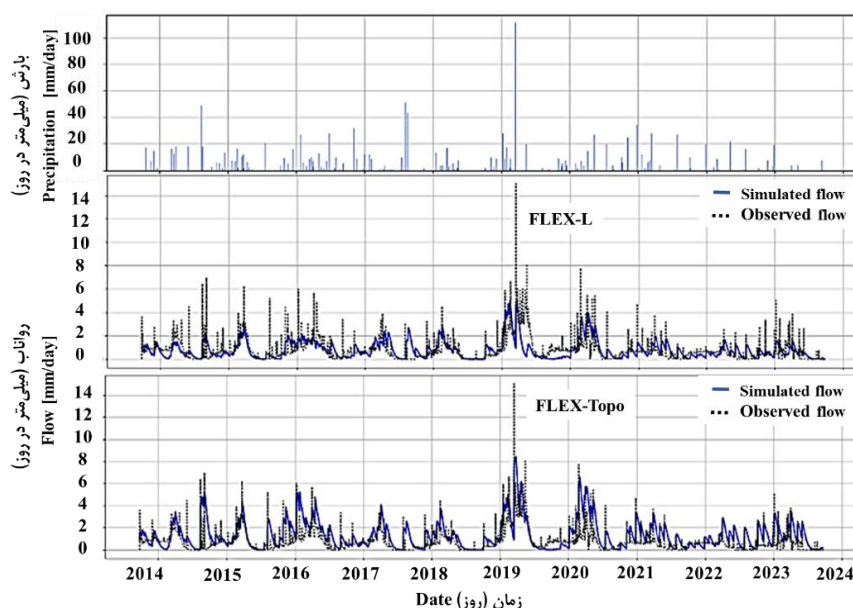


شکل ۱۱- نمودار خطی- ستونی بارش و رواناب‌های شبیه‌سازی‌شده در سال آبی ۱۴۰۲.

Figure 11. Line – column chart of precipitation and simulated runoff values in the 2023 water year.

برآورد کرده است. در مقابل، مدل FLEX-Topo با بهره‌گیری از توپوگرافی و لحاظ کردن ناهمگنی مکانی، توانسته است در بازه‌های زمانی مذکور اوج‌های رواناب را دقیق‌تر بازنمایی کرده و تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی داشته باشد. در سال‌هایی مانند ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ که شدت و پراکنش بارش یکنواخت‌تر بوده، عملکرد هر دو مدل به یکدیگر نزدیک‌تر شده است.

در شکل ۱۲، مقایسه نتایج این دو مدل از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که هر دو مدل توانسته‌اند روند کلی تغییرات رواناب را بازسازی کنند، اما در بازنمایی اوج‌های جریان تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود. مدل FLEX-L در شبیه‌سازی جریان‌های کم و یکنواخت عملکرد قابل‌قبولی دارد و به‌خوبی نوسانات جریان پایه را دنبال می‌کند، اما در بازتولید اوج‌های جریان، به‌ویژه در سال‌هایی مانند ۱۳۹۴، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸، مقادیر اوج را کمتر از مقدار واقعی



شکل ۱۲- نمودار خطی- ستونی بارش و رواناب‌های شبیه‌سازی‌شده از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲.

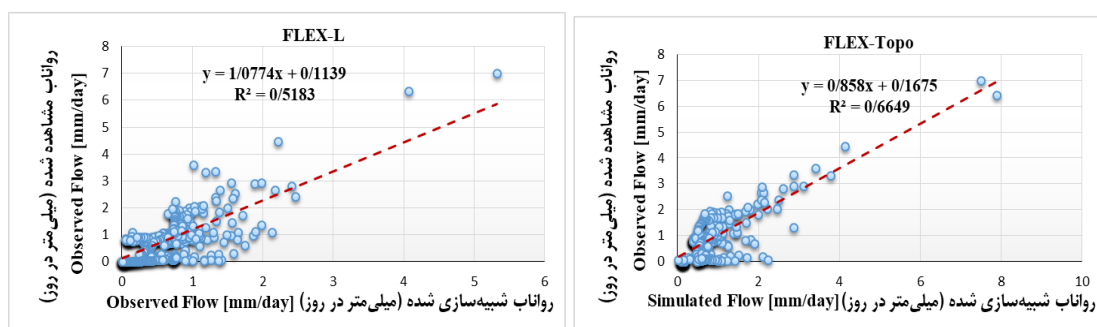
Figure 12. Line-column chart of precipitation and simulated runoff from water years 2014 to 2023.

نیمه‌توزیعی FLEX-Topo در مناطق کوهستانی، توان بالایی در بازتولید دقیق‌تر جریان‌های سطحی و زیرسطحی دارد (۱۸). هم‌چنین، مطالعه سینکوس و همکاران (۲۰۲۳) تأکید می‌کند که مدل‌هایی که ناهمگنی مکانی را در نظر می‌گیرند، در شرایط بحرانی و وقوع رواناب‌های اوج، عملکرد بسیار پایدارتری نسبت به مدل‌های یکپارچه دارند (۴۲). در نهایت، مطالعه اوغاهی و روان (۲۰۲۵) نیز با استفاده از یک چارچوب متشکل از مدل‌های فیزیکی و یادگیری عمیق، بر اهمیت توصیف ساختارهای فیزیکی و توپوگرافی در بازتولید دقیق جریان‌ها تأکید می‌کند (۴۳). در مجموع، هم نتایج پژوهش حاضر و هم شواهد منابع به‌روز علمی بر این نکته تأکید دارند که بهره‌گیری از مدل‌های نیمه‌توزیعی مانند FLEX-Topo با تکیه بر داده‌های توپوگرافی و ساختار فضایی، نه تنها موجب افزایش دقت شبیه‌سازی رواناب می‌شود، بلکه امکان تحلیل بهتری از پاسخ‌های هیدرولوژی مختلف در چشم‌اندازهای متنوع را فراهم می‌سازد.

مقایسه خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده توسط دو مدل FLEX-Topo و FLEX-L نشان داد که مدل FLEX-Topo به دلیل استفاده صریح از اطلاعات توپوگرافی و طبقه‌بندی حوضه به واحدهای چشم‌انداز هیدرولوژی، قابلیت بالاتری در بازنمایی ناهمگنی‌های مکانی و فرآیندهای غالب در بخش‌های مختلف حوضه دارد. این برتری به‌ویژه در بازتولید رواناب در مناطق پایین‌دست و نواحی با شیب‌های متفاوت مشهود بوده است. در مقابل، مدل FLEX-L به‌عنوان یک مدل یکپارچه، علی‌رغم توانایی در بازنمایی روند کلی جریان، به دلیل نادیده گرفتن ویژگی‌های مکانی، در بازتولید دقیق رواناب به‌ویژه در روزهای اوج و نواحی ناهمگون عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داد. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین ازجمله قراری (۲۰۱۴)، فسنیا و همکاران (۲۰۱۶) و ساوانیه (۲۰۱۰) هم‌راستا است که بر اهمیت بهره‌گیری از شاخص‌های توپوگرافی و ساختارهای نیمه‌توزیعی در مدل‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای هیدرولوژی تأکید کرده‌اند (۱۹، ۲۳، ۴۱). به‌طوری‌که گائو (۲۰۲۲) نشان دادند استفاده از مدل

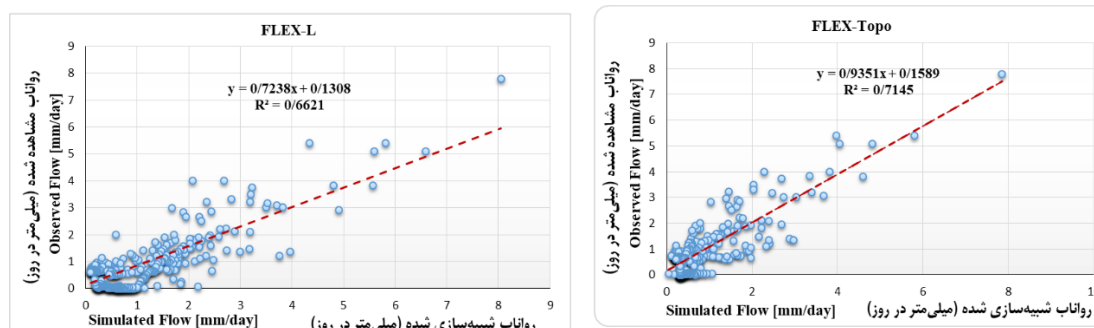
اطراف خط برابری (۱:۱) دارند که بیانگر همخوانی بهتر بین جریان‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده است. در مقابل، در مدل FLEX-L میزان پراکندگی داده‌ها بیش‌تر بوده و در برخی بازه‌ها انحراف از خط برابری مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانی و توپوگرافی در ساختار مدل FLEX-Topo موجب بهبود عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز لسی‌تر شده است.

شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ پراکنش یک‌به‌یک جریان مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده را در دوره‌های مختلف زمانی توسط دو مدل هیدرولوژیکی FLEX-L و FLEX-Topo در حوزه آبخیز لسی‌تر نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو مدل توانسته‌اند روند کلی تغییرات جریان را بازتولید کنند، اما دقت شبیه‌سازی در مدل FLEX-Topo بالاتر است. در این مدل، نقاط داده‌ها تمرکز بیشتری در



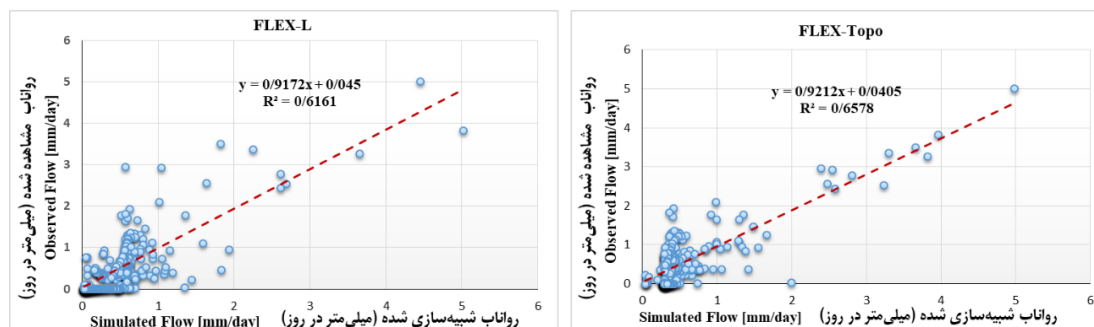
شکل ۱۳- پراکنش یک به یک جریان مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در سال آبی ۱۳۹۳.

Figure 13. One-to-one scatter of observed and simulated streamflow in Water Year 2014.



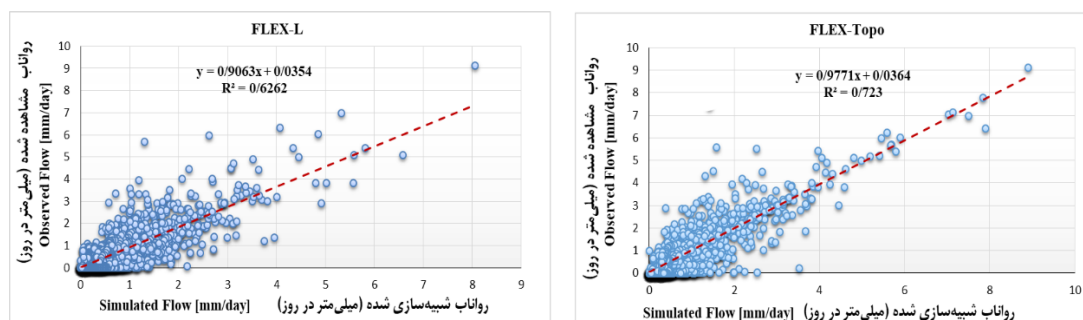
شکل ۱۴- پراکنش یک به یک جریان مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در سال آبی ۱۳۹۸.

Figure 14. One-to-one scatter of observed and simulated streamflow in Water Year 2020.



شکل ۱۵- پراکنش یک به یک جریان مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در سال آبی ۱۴۰۲.

Figure 15. One-to-one scatter of observed and simulated flow in 2023.



شکل ۱۶- پراکنش یک به یک جریان مشاهده شده و شبیه‌سازی شده از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲.

Figure 16. One-to-one scatter of observed and simulated streamflow from Water Year 2014 to 2023.

جدول ۴ نتایج ارزیابی عملکرد دو مدل هیدرولوژی FLEX-Topo و FLEX-L را نشان می‌دهد. هر دو مدل در شبیه‌سازی رواناب عملکرد قابل‌قبولی دارند، اما شاخص‌های آماری حاکی از برتری مدل FLEX-Topo در تمامی معیارها است؛ به‌طوری‌که این مدل مقادیر بالاتری از ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و شاخص کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) و مقدار کم‌تری از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نسبت به FLEX-L به دست آورده است. این نتایج با یافته‌های گائو و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد که نشان می‌دهد لحاظ کردن ویژگی‌های فیزیکی حوضه، به‌ویژه ناهمگنی‌های توپوگرافی، موجب بهبود قابل‌توجه دقت مدل می‌شود.

جدول ۷- ارزیابی آماری عملکرد مدل‌های هیدرولوژی FLEX-L و FLEX-topo.

Table 7. Statistical evaluation of the performance of the hydrological models FLEX-L and FLEX-topo.

ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	کلینگ-گوپتا KGE	نش-ساتکلیف NSE	مدل Model
2.9	0.67	0.62	FLEX-L
1.8	0.72	0.69	FLEX-topo

مکانی، توانست رواناب را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند؛ و عملکرد بهتری نسبت به مدل FLEX-L داشت. در مقابل، مدل FLEX-L علی‌رغم توانایی در بازنمایی روند کلی جریان، به دلیل ساختار ساده و عدم توجه به ویژگی‌های مکانی، در

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر، دو مدل هیدرولوژی FLEX-L و FLEX-Topo در حوزه آبخیز لسی تمر مورد بررسی قرار گرفتند. مدل FLEX-Topo به دلیل استفاده از توپوگرافی و در نظر گرفتن ناهمگنی‌های

رسمی داخلی و برداشت‌های میدانی گردآوری شده و از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشد.

تعارض منافع

این مقاله فاقد هرگونه تعارض منافع بوده و مراتب مورد تأیید تمامی نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به شکل ذیل است:

نویسنده اول: انجام مراحل اجرایی تحقیق شامل جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، اجرای مدل‌های هیدرولوژی، تحلیل نتایج، تهیه نقشه‌ها و نگارش مقاله؛ نویسنده دوم: مسئول مکاتبات، طراحی تحقیق و روش‌شناسی، هدایت علمی پژوهش، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله؛ نویسنده سوم: انتخاب مدل‌های هیدرولوژی، نظارت بر اجرای مدل‌ها، مشارکت در تفسیر نتایج؛ نویسنده چهارم: مشارکت در تدوین مبانی نظری مقاله، بازبینی علمی متن؛ نویسنده پنجم: مشارکت در تحلیل نظری و تقویت محتوای علمی مقاله.

اصول اخلاقی

در مورد اصول اخلاقی انجام و انتشار تحقیق، نویسندگان تأکید می‌کنند که تمامی مراحل این پژوهش مطابق با اصول اخلاقی تحقیق، منشور زیست‌محیطی و رهنمودهای معتبر بین‌المللی برای انجام و انتشار پژوهش رعایت شده است. همچنین، همه نویسندگان پایبندی کامل به این اصول را تأیید کرده و مسئولیت صحت و اصالت یافته‌های ارائه‌شده را می‌پذیرند.

شبیه‌سازی جریان‌های اوج با محدودیت‌هایی روبه‌رو است. مدل FLEX-Topo با هدف شبیه‌سازی دقیق رفتار هیدرولوژی چشم‌اندازهای مختلف اجرا شد در هر یک از این واحدها، فرآیند غالب هیدرولوژی متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که در دامنه‌های شیب‌دار رواناب سطحی، در دشت‌های جنگلی و مرتعی جریان زیرسطحی و در مناطق پست حاشیه رودخانه رواناب اشباع‌شده نقش اصلی را دارند. ساختار مدل و مقداردهی پارامترها به‌گونه‌ای طراحی شد که ویژگی‌های هیدرولوژی خاص هر واحد را منعکس کرد. در پایان، خروجی واحدها با توجه به نسبت مساحت هر چشم‌انداز تجمیع گردید و رواناب کل حوزه آبخیز محاسبه شد. این رویکرد سبب افزایش دقت مدل در چشم‌اندازهای مختلف گردید. یافته‌های پژوهش، بر اهمیت به‌کارگیری مدل‌های نیمه‌توزیعی در حوزه‌های آبخیز با چشم‌اندازهای مختلف تأکید دارد. همچنین، با توجه به وجود پدیده فرسایش پایینگ در این منطقه، پیشنهاد می‌شود که اثر این فرآیند نیز در چارچوب مدل‌های هیدرولوژی موردتوجه قرار گیرد تا شبیه‌سازی‌ها از دقت بیشتری برخوردار باشند و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت منابع آب، واقع‌بینانه‌تر انجام شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان به‌دلیل همکاری و در اختیار گذاشتن آمار و داده‌های هیدرومتری موردنیاز برای انجام این تحقیق، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

داده‌ها و اطلاعات

این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان است. داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده، از منابع

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت معاونت آموزشی و پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در قالب پژوهانه دانشجویی نویسنده اول و

هم‌چنین طرح پژوهشی مصوب صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور با شماره طرح ۴۰۱۴۱۲۰ برخوردار بوده است.

منابع

1. Wen, Y., Li, M., Xu, R., Qiu, D., Gao, P., & Mu, X. (2024). Spatial distribution characteristics and influencing factors of shallow and deep soil moisture under ecological restoration in the loess plateau, China. *Hydrological Processes*, 38(3), 15109.
2. Li, Y., Shi, W., Aydin, A., Beroya-Eitner, M. A., & Gao, G. (2020). Loess genesis and worldwide distribution. *Earth-Science Reviews*, 201, 102947.
3. Zhuang, J., Kong, J., Zhu, Y., & Peng, J. (2024). The structural evolution of undisturbed loess due to water infiltration. *Scientific Reports*, 14(1), 14880.
4. Roberts, H. M. (2019). Loess. In *Aeolian Geomorphology: A New Introduction* (pp. 107-132).
5. Ghanavati, A., & Mohammadi, Z. (2013). Analysis of the spatial distribution of loess deposits in the south and southeast of the Caspian Sea. *Journal of Natural Geography Research*, 45, 29-44. [In Persian]
6. Ragimi, M., & Rahimi, A. (2020). Mineralogical investigation of Quaternary loess deposits in Golestan Province, Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 242, 399-404. [In Persian]
7. Ownegh, M. (1991). Investigation of the Geomorphological Evolution of the Qarah Su (Gorgan) Watershed [PhD Dissertation, Islamic Azad University, Science and Research Branch].
8. Zhou, G., Xu, L., Huang, X., Li, Y., Zhang, H., & Dong, Y. (2023). Synergistic effect of rainfall and pipe leakage erosion on the formation and development of loess caves in Weinan city, Loess Plateau, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 82(19), 435.
9. Javidan, N., Kavian, A., Pourghasemi, H. R., Conoscenti, C., & Jafarian, Z. (2019). Data mining technique (maximum entropy model) for mapping gully erosion susceptibility in the gorganrood watershed, Iran. In *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions* (pp. 427-448). Cham: Springer International Publishing.
10. Ghandhari, S., Amini, A., Solgi, A., & Rezaei, H. (2019). Analysis of loess sediment texture in Golestan province according to the microstructure parameters. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11(4), 244-255.
11. Gichamo, T. Z., & Tarboton, D. G. (2019). Ensemble streamflow forecasting using an energy balance snowmelt model coupled to a distributed hydrologic model with assimilation of snow and streamflow observations. *Water Resources Research*, 55(12), 10813-10838.
12. Duan, Z., Tuo, Y., Liu, J., Gao, H., Song, X., Zhang, Z., Yang, L., & Mekonnen, D. F. (2019). Hydrological evaluation of open-access precipitation and air temperature datasets using SWAT in a poorly gauged basin in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 569, 612-626.
13. Rintis, H., & Setyoasri, Y. P. (2016). Rainfall-discharge simulation in Bah Bolon Catchment area by Mock method, NRECA method, and GR2M method. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 845, pp. 24-29).
14. He, M., Noh, S. J., & Lee, H. (2024). Editorial to the Special Issue "Recent Advances in Hydrological Modeling". *Hydrology*, 11(7), 108.

15. Pandi, D., Kothandaraman, S., & Kuppusamy, M. (2021). Hydrological models: A review. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 12(3), 223-242.
16. Singh, S., Mishra, K., Chavan, R., & Tiwari, H. L. (2023, December). Advancements and Challenges in Hydrological Modeling: A Comprehensive Review. In International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering (pp. 423-442).
17. Kavetski, D., Thyer, M., McInerney, D., Gupta, H., Westra, S., Maier, H., & Tague, C. (2024, April). Virtual Hydrological Laboratories to develop the next generation of conceptual models and support decision-making under change. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 9070).
18. Gao, H., Han, C., Chen, R., Feng, Z., Wang, K., Fenicia, F., & Savenije, H. (2022). Frozen soil hydrological modeling for a mountainous catchment northeast of the Qinghai-Tibet Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(15), 4187-4208.
19. Gao, H., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gharari, S., & Savenije, H. H. G. (2014). Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. *Hydrology and Earth System Sciences*.
20. Gao, H., Ding, Y., Zhao, Q., Hrachowitz, M., & Savenije, H. H. G. (2017). The importance of aspect for modelling the hydrological response in a glacier catchment in Central Asia. *Hydrological Processes*, 31(16), 2842-2859.
21. Gao, H., Sabo, J. L., Chen, X., Liu, Z., Yang, Z., Ren, Z., & Liu, M. (2018). Landscape heterogeneity and hydrological processes: A review of landscape-based hydrological models. *Landscape Ecology*, 33, 1461-1480.
22. Fenicia, F., Savenije, H. H., Matgen, P., & Pfister, L. (2008). Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water Resources Research*, 44(1).
23. Savenije, H. H. G. (2010). HESS Opinions "Top-down or bottom-up?" Hydrological modelling towards a new grand compromise. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 201-206.
24. Bahremand, A., & Hosseinalizadeh, M. (2022). Development of conceptual hydrological FLEX-Topo model for loess watersheds influenced by piping and tunnel erosion in Golestan Province of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29(1), 115-133. [In Persian]
25. Gnann, S., & Wagener, T. (2022, May). The role of topography in the global hydrological cycle. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. 22-2955).
26. Loritz, R., Kleidon, A., Jackisch, C., Westhoff, M., Ehret, U., Gupta, H., & Zehe, E. (2019). A topographic index explaining hydrological similarity by accounting for the joint controls of runoff formation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9), 3807-3821.
27. Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., & Savenije, H. H. G. (2011). Hydrological landscape classification: Investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3275-3291.
28. Fenicia, F., Kavetski, D., & Savenije, H. H. (2011). Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. *Water Resources Research*, 47(11).
29. Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gao, H., & Savenije, H. H. G. (2014). Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4839-4859.
30. Janssen, M. A., Pritchard, C., & Lee, A. (2020). On code sharing and model documentation of published individual and agent-based models. *Environmental Modelling and Software*, 134, 104873.

31. Dal Molin, M., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2020). SuperflexPy 1.2.0: An open source Python framework for building, testing and improving conceptual hydrological models. *Geoscientific Model Development Discussions*, 20, 1-39.
32. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
33. Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.
34. Samaniego, L., Rakovec, O., Martinez de la Torre, A., Sutanudjaja, E., Shrestha, P. K., Blyth, & Thober, S. (2022, May). Multivariate evaluation of four high-resolution hydrological models at global scale. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. 22-4372).
35. Yi, L., Zhang, W., & Li, X. (2018). Assessing hydrological modelling driven by different precipitation datasets via the SMAP soil moisture product and gauged streamflow data. *Remote Sensing*, 10(12), 1872.
36. Müller-Plath, G., & Lüdecke, H. J. (2024). Normalized coefficients of prediction accuracy for comparative forecast verification and modeling. *Research in Statistics*, 2(1), 2317172.
37. Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Nobre, A. D., & Melesse, A. M. (2018). Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. *Environmental Modelling and Software*, 102, 1-12.
38. Megersa, T., & Nedaw, D. (2022, April). The role of land use/cover type in influencing hydrological component of a watershed in Chanco and Sorsa Sub-watersheds, East Wollega Zone, Oromia, Ethiopia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1016, No. 1, p. 012001).
39. Poliakov, V., & Voropai, H. (2025). Modeling of Subsurface Runoff and Surface Runoff during Storm Precipitation in Low-Slope Undeformed and Surface-Deformed Soils on Agricultural Lands. In Sustainable Soil and Water Management Practices for Agricultural Security (pp. 105-134).
40. Niu, J., Zhang, K., Li, X., & Bao, H. (2024). Integrated Catchment Classification Across China Based on Hydroclimatological and Geomorphological Similarities Using Self-Organizing Maps and Fuzzy C-Means Clustering for Hydrological Modeling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2024, 1-30.
41. Fenicia, F., Kavetski, D., Savenije, H. H., & Pfister, L. (2016). From spatially variable streamflow to distributed hydrological models: Analysis of key modeling decisions. *Water Resources Research*, 52(2), 954-989.
42. Cinkus, G., Mazzilli, N., Jourde, H., Wunsch, A., Liesch, T., Ravbar, N., & Goldscheider, N. (2023). When best is the enemy of good—critical evaluation of performance criteria in hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(13), 2397-2411.
43. Ougahi, J. H., & Rowan, J. S. (2025). Enhanced streamflow forecasting using hybrid modelling integrating glacio-hydrological outputs, deep learning and wavelet transformation. *Scientific Reports*, 15(1), 2762.

