



Simulation of soil organic carbon losses in rangeland ecosystems using SWAT model (Case study: Yalfan Basin - Hamedan Province)

Mahnaz Norozi Nasir¹, Behnaz Attaeian² , Behnoush Farokhzadeh³, Mojgan Sadat Azimi⁴

1. Msc. Graduate Student, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: nourozi.mahnaz88@yahoo.com
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: b.attaeian@malayeru.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: <mailto:b.farokhzadeh@malayeru.ac.ir>
4. Associate Professor of Rangeland Management, Rangeland Management Department, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agriculture Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: azimi@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 23 September 2024

Received in revised form 18

November 2024

Accepted 26 November 2024

Available online 21 December 2024

Keywords:

loss of organic matter,
Sediment, Rangelands,
SWAT Model,
Yalfan Basin.

ABSTRACT

Objective: Rangelands are considered as a major carbon (C) sink to mitigate global climate change. However, ongoing disturbance from overgrazing, water erosion, land use changes, vegetation loss and soil surface degradation accelerate soil organic carbon loss in rangelands. Therefore, monitoring soil organic carbon loss in rangelands is important for integrated watershed management. This study aimed to estimate soil organic carbon loss using SWAT model in Yalfan watershed, Hamadan.

Method: For this purpose, water and suspended sediment (SS) samples were monthly collected from Yalfan river during April 2014 to April 2015 using depth-integrating sampling technique; and then samples were proceeded in the laboratory for particulate organic carbon (POC) analysis.

Results: The field assessment showed average of 26/35 ton/month of organic carbon loss during the study period in 2014-2015. While, the results showed no significant changes of monthly losses of particulate organic carbon ($p > 0.05$) during 11-month sampling. However, the linear regression analysis provided a strong empirical model to predict soil POC loss based on sediment samples ($R^2 = 0.97$). Besides the empirical model, SWAT model was also calibrated and validated for discharge and sediment transport estimation. The simulation of particulate organic carbon loss was successfully developed based on SWAT model and empirical model for a period of 13 years (2002-2014). The total amount of POC loss simulated 3227/11 mg was that less than observed value predicted. In general, based on the statistics and charts indicators used can be acceptable simulation model is showed.

Conclusions: In general, according to the available data, the loss of particulate organic carbon is almost equal to 22.8% of sediment transport.

Cite this article: Norozi Masir, M., Attaeian, B., Farokhzadeh, B., Azimi, M. (2024). Simulation of soil organic carbon losses in rangeland ecosystems using SWAT model (Case study: Yalfan Basin - Hamedan Province). *ECOHYDROLOGY*, 11 (4), 427-456. <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.380588.1838>



© Mahnaz Norozi Masir, Behnaz Attaeian, Behnoush Farokhzadeh, Mojgan Sadat Azimi.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.380588.1838>

Introduction

Rangeland ecosystems contain over one-third of the terrestrial biosphere's carbon reserves by absorbing atmospheric CO₂ through vegetation and storing it in plant tissues and soil [21]. However, soil erosion and its associated consequences remain one of today's most significant environmental challenges. Understanding the loss of organic matter and its transport in rivers is crucial for natural resource managers and planners to justify soil and water conservation measures [39]. Analyzing the changes in organic matter and soil organic carbon (SOC) reservoirs across different ecosystems, including rangelands, is essential for establishing ecosystem stability. To minimize risks and implement appropriate management practices, estimating the loss of SOC and sediment transport in watersheds is imperative. The assessment of organic matter and nutrient losses, such as SOC, from watershed surfaces is considered a vital indicator of ecosystem health, water conservation strategies, and broader environmental management. Hydrological models are crucial for estimating soil erosion and SOC loss because they account for the complexities of ecosystem processes influenced by factors such as climate, land use, and soil characteristics. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model has demonstrated high efficacy in integrating diverse data, including land use, soil types, and management practices, for large-scale watersheds. Its semi-distributed structure and process-based approach enable the simulation of hydrological cycles and the tracking of sediment and SOC erosion [46]. Furthermore, SWAT supports the evaluation of various scenarios, helping researchers assess the impacts of potential land use or climate changes [34]. In this study, the SWAT model was used to simulate daily suspended sediment loads. To achieve the research objectives, SOC loss in the Yalfan watershed was estimated and simulated by integrating the SWAT model with measured SOC levels from watershed outlet samples. The primary aim of this research was to estimate SOC loss from rangeland ecosystems using the semi-distributed and conceptual SWAT model within the Yalfan Dam watershed.

Materials and Methods

Study Area

The Yalfan watershed, one of the primary sub-basins of the Ekbatan Dam watershed, spans 16,447 hectares in Hamadan County. Geographically, it lies between 48°29'–48°35' E longitude and 34°35'–34°45' N latitude.

Research Methodology

The initial step involved collecting foundational data and maps relevant to the study topic from various organizations and agencies. These included topographical, physiographical, lithological, geomorphological, soil science, land use, meteorological, runoff, and sediment data. In collaboration with regional water experts, cross-sections of the Abshineh River were divided into segments at the Yalfan hydrometric station using the E.T.R. method, and flow depth was measured using a staff gauge. Between April 2014 and April 2015, 11 samples of water and sediment were collected at three points using a manual sampler, except during August and September due to insufficient rainfall and low water volumes.

Results

The study utilized 15 years of data (2000–2014), with a warm-up period for the model spanning 2000–2002. Model performance was evaluated using objective functions, including the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), coefficient of determination (R²), R-factor, and P-factor. Calibration results yielded NSE, R², and other performance metrics of 0.60, 0.54, and 0.32, respectively. Validation results

indicated corresponding values of 0.67, 0.59, and 0.39, with R^2 values of 0.63 (calibration) and 0.66 (validation). These outcomes align with acceptable performance standards in literature. SOC loss reduces the potential for carbon sequestration [13]. Over time, this decline significantly impacts soil properties, vegetation quality, biodiversity, and natural ecosystems such as rangelands. Vegetative cover influences hydrological cycles by enhancing rainfall infiltration, reducing runoff, and minimizing soil erosion. In rangeland-dominated ecosystems like the Yalfan watershed, much of the SOC moves during runoff events. Suspended sediment, containing fine particulate matter, carries a large portion of eroded organic material. Measurements of suspended sediment loads offer a reliable indicator of SOC loss within a watershed. Monthly analysis between April 2014 and April 2015 revealed no significant temporal variations in SOC loss ($p > 0.05$). This stability, despite rangelands comprising 71% of land use in the watershed, suggests consistent land use and management practices. The prevalence of rangeland use and perennial vegetation likely reduced soil erosion and minimized SOC loss through runoff and sediment transport. These protective measures preserved soil structure and organic matter content [19]. However, during the study period, average rainfall significantly declined compared to long-term averages, leading to reduced runoff and sediment transport rates. Consequently, SOC loss variations remained statistically insignificant.

Conclusion

Part of this study's findings showed that the regression relationships between sediment load and SOC levels ($R^2 = 0.97$) could be used to estimate SOC loss in this watershed for future periods. This approach reduces the need for repeated measurements, saving time and costs. However, this regression equation must align with observed data from the respective timeframes. Random sampling at specific intervals is recommended for validation. The SWAT model proved to be a robust tool for simulating SOC loss in watersheds. The results are applicable in scenarios with minimal land use changes, particularly in rangeland contexts. By integrating land use, soil properties, and climate conditions, SWAT enables comprehensive analyses of SOC dynamics. Using suspended sediment data as an indicator of SOC transport is also recommended. Additionally, to improve the comprehensive management of the study area, it is suggested to assess the impacts of climate changes on SOC loss using the SWAT model, explore strategies to increase SOC storage, and implement proper management practices. Moreover, it is recommended to collect continuous and accurate discharge and sediment data for future periods and calibrate and validate the SWAT model for larger watersheds, such as the Ekbatan Dam watershed, which includes the Yalfan watershed.

Author Contributions

Each author contributed significantly to the development of this manuscript. Mahnaz Norozi Nasir contributed to data collections, data analysis, and interpretation of results. Behnaz Attaeian was responsible for conceptualization, supervised the research process, data analysis, and manuscript drafting and approval of the final manuscript. Behnoush Farokhzadeh provided technical support, methodological refinements, and supervised the study. Mojgan Sadat Azimi offered theoretical insights.

Data Availability Statement

The further details regarding the data can be provided by corresponding author, Behnaz Attaeian, upon request, subject to necessary approvals.

Acknowledgements

This study was funded as part of a master's degree project by Malayer University. The authors would like to express their gratitude to the university for its financial and institutional support.

Ethical considerations

This study did not involve any ethical issues or concerns.

Funding

This research received funding from Malayer University as part of a master's degree project.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



شبیه‌سازی میزان هدررفت کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های مرتعی با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوزه آبخیز یلفان، استان همدان)

مهناز نوروزی نصیر^۱ | بهناز عطائیان^۲ | بهنوش فرخ‌زاده^۳ | مژگان السادات عظیمی^۴

۱. کارشناسی ارشد مرتعداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: nourozi.mahnaz88@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: b.attacian@malayeru.ac.ir
۳. استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: b.farokhzadeh@malayeru.ac.ir
۴. دانشیار، گروه مدیریت مرتع، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: azimi@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: مراتع از عمده‌ترین منابع ذخیره کربن اتمسفری به حساب می‌آیند که می‌توانند تغییرات اقلیمی جهانی را تعدیل کنند. از آنجاکه تداوم اختلالاتی مانند چرای بی‌رویه، فرسایش آبی، تغییر کاربری، کاهش پوشش گیاهی و تخریب خاک سطحی، هدررفت ذخایر کربن آلی را از مراتع تسریع می‌کنند، پایش هدررفت کربن آلی مراتع یکی از مؤلفه‌های مهم در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز به شمار می‌آید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲	هدف: پژوهش حاضر با هدف برآورد میزان هدررفت کربن آلی خاک با استفاده از مدل SWAT در حوضه یلفان استان همدان صورت گرفته است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸	روش تحقیق: بدین منظور نمونه‌های آب و رسوب معلق به روش انتگراسیون عمقی از رودخانه یلفان طی فروردین ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۴ جمع‌آوری و برای آنالیز کربن آلی ذره‌ای به آزمایشگاه منتقل شدند. طبق اندازه‌گیری مستقیم به‌طور متوسط ۲۶/۳۵ تن در ماده کربن آلی طی دوره مطالعاتی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ از حوضه خارج شده است.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶	یافته‌ها: درحالی‌که نتایج تغییرات معنی‌داری در هدررفت کربن آلی ذره‌ای در طول ۱۱ ماه نمونه‌برداری نشان نداد ($p > 0.05$)، اما آنالیزهای رگرسیون خطی یک مدل تجربی قوی برای پیش‌بینی هدررفت کربن آلی ذره‌ای بر پایه نمونه‌های رسوب فراهم کرد ($R^2 = 0.97$). علاوه بر مدل تجربی، مدل SWAT برای تخمین رسوب حمل‌شده، واسنجی و اعتبارسنجی شد. شبیه‌سازی هدررفت کربن آلی بر پایه مدل SWAT و مدل تجربی برای دوره ۱۳ ساله (۲۰۰۲-۲۰۱۴) موفقیت‌آمیز بود. میزان کل هدررفت کربن آلی شبیه‌سازی شده ۳۲۲۷/۱۱ میلی‌گرم در لیتر بود که از مقدار مشاهده‌ای آن کمتر پیش‌بینی شد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱	نتیجه‌گیری: درمجموع براساس شاخص‌های آماری و نموداری به‌کاررفته می‌توان گفت مدل شبیه‌سازی قابل قبولی را از خود نشان داده است. به‌طور کلی، با توجه به داده‌های در دسترس، کربن آلی هدررفتی به‌طور تقریبی ۲۲/۸ درصد از میزان رسوب حمل‌شده است
کلیدواژه‌ها: هدررفت ماده آلی، رسوبات معلق، مراتع، مدل SWAT حوزه آبخیز یلفان.	

استناد: نوروزی نصیر، مهناز؛ عطائیان، بهناز؛ فرخ‌زاده، بهنوش؛ و عظیمی، مژگان السادات. شبیه‌سازی میزان هدررفت کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های مرتعی با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوزه آبخیز یلفان، استان همدان). *اکوهیدرولوژی*، ۱۱(۴)، ۴۲۷-۴۵۶.
<http://doi.org/10.22059/IJE.2024.380588.1838>



مقدمه

اکوسیستم‌های مرتعی حاوی بیش از یک سوم ذخایر کربن زیست‌کرهٔ خاکی هستند که CO₂ اتمسفر را از طریق پوشش گیاهی جذب می‌کنند و موجب تجمع و ذخیرهٔ آن در بافت‌های گیاهی و سپس خاک می‌شوند (خانلری، تمر تاش و تاتیان، ۱۳۹۰). از طرف دیگر، هدررفت خاک و پیامدهای ناشی از آن نیز، امروزه یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیست هستند. اطلاع از هدررفت مواد آلی و انتقال آن در رودخانه‌ها اهمیت ویژه‌ای برای مدیران و برنامه‌ریزان منابع طبیعی و توجیه اقدامات حفاظت آب و خاک دارد (نور، میرنیا و رئیسی، ۱۳۸۹). به طوری که بررسی تغییرات مادهٔ آلی و مخازن کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های مختلف از جمله مراتع به منظور برقراری شرایط پایدار در اکوسیستم ضروری است. به منظور کاهش خطرهای خسارات ناشی از این امر و انجام دادن اقدامات مدیریتی مناسب، برآورد هدررفت کربن آلی و رسوب در حوزهٔ آبخیز امری ضروری است؛ زیرا اطلاع از هدررفت مواد آلی و غذایی مانند کربن آلی از سطح این حوضه به عنوان معیاری مناسب برای سلامت اکوسیستم‌ها، برنامه‌ریزی‌های حفاظت آب و مباحث محیط‌زیست تلقی می‌گردد.

اکوسیستم‌های مرتعی، قابلیت ذخیرهٔ حدود ۵۰۰ میلیارد تن کربن، معادل ۱۰ درصد کل ذخایر کربن اکوسیستم‌های خاکی و ۳۰ درصد کل کربن آلی خاک را دارا هستند (جیان، تیاگی و سینگ، ۲۰۱۰)؛ بنابراین مراتع پتانسیل بالایی در ذخیره‌سازی کربن دارند (امانی، جنیدی جعفری و چپی، ۱۳۹۳). به علاوه، مدیریت صحیح و احیای مراتع تخریب‌شده به میزان قابل توجهی، پتانسیل ترسیب کربن در اکوسیستم‌های را افزایش می‌دهد (مورتسون، شومن و اینگرام، ۲۰۰۴) اهمیت حفظ کربن آلی در خاک، فقط جلوگیری از گرمایش زیست‌کره نیست، بلکه نقش حیاتی در کیفیت و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی خاک دارد (باقری‌فام، کریمی و لکزیان، ۱۳۹۲) و عنصری ضروری در رشد گیاهان به شمار می‌رود (می، سارتوهادی و ماردیاتنو، ۲۰۱۵). فرسایش و رسوب سبب هدررفت مقدار زیادی کربن آلی خاک می‌شود که این امر خطرات و پیامدهای جدی برای خاک‌هایی با مقدار کربن آلی کم دارد. مدل‌های شبیه‌سازی در طول چند دههٔ اخیر جایگاه ویژه‌ای در دانش بشری به خود اختصاص داده‌اند که به عنوان ابزارهای مدیریتی، پایه‌ای و اجرایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل‌های هیدرولوژیکی برای برآورد فرسایش رسوب و کربن آلی خاک (SOC) ضروری هستند، زیرا پیچیدگی‌های فرایندهای اکوسیستمی را که تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند اقلیم، کاربری زمین و ویژگی‌های خاک قرار دارند، لحاظ می‌کنند. مدل SWAT به دلیل توانایی در یکپارچه‌سازی داده‌های متنوع، از جمله کاربری زمین، انواع خاک و تصمیمات مدیریتی در سطح حوزه‌های آبخیز بزرگ، به طور گسترده عملکرد مناسبی داشته است. ساختار نیمه‌توزیعی و رویکرد مبتنی بر فرایندهای مدل SWAT امکان شبیه‌سازی چرخه‌های هیدرولوژیکی و ردیابی فرسایش رسوب و کربن آلی خاک را فراهم می‌کند (تبیجانی، کی و گیری، ۲۰۲۳). علاوه بر این، این مدل از آزمایش سناریوهای مختلف پشتیبانی می‌کند که به پژوهشگران کمک می‌کند تا اثرات تغییرات احتمالی در کاربری زمین یا شرایط اقلیمی را ارزیابی کنند (اندیایه، بوسا و دایکروگر، ۲۰۱۸). در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر و تجمیعی، SWAT اطلاعات مکانی دقیق‌تری را فراهم می‌کند که می‌تواند به اعمال تصمیمات حفاظتی و هدفمند کمک کند. در حالی که مدل‌های قطعی ممکن است وضوح مکانی SWAT را نداشته باشند، اما اغلب علاوه بر اینکه به داده‌های کمتری نیاز دارند، عملکرد سریع‌تری نیز دارند و برای حوزه‌های کوچک‌تر یا شبیه‌سازی با داده‌های محدود مناسب‌اند (عباسپور، وجدانی و حقیقت، ۱۳۹۷). برنامهٔ شبیه‌سازی هیدرولوژیکی Fortran (HSPF)، توانایی‌های مشابه با مدل SWAT را دارد، اما به دلیل نیاز به تنظیم و پارامتری‌سازی زیاد، برای حوزه‌های آبخیز بزرگ مناسب نیست (بوسیکو، لاموروکس و هنری، ۲۰۲۴؛ ماپس و پریکوپ، ۲۰۲۴؛ وو، لیو و وانگ، ۲۰۱۷).

مدل‌های ساده‌تری مانند USLE نیز وجود دارند که به علت ارائهٔ تخمین‌های کلی و عدم استفاده از اطلاعات دقیق مکانی توصیه نمی‌شوند. مدل WEPP نیز که برای شبیه‌سازی فرسایش و جریان سطحی در مقیاس دامنه‌ای توصیه می‌شود، برای شبیه‌سازی دقیق فرایندهای هیدرولوژیکی و رسوبی در مقیاس حوزهٔ آبخیز بهینه نیست. مقایسهٔ عملکرد دو مدل SWAT و مدل شبکهٔ عصبی پرسپترون چندلایه (MLP¹) به منظور برآورد مقدار رسوب معلق ماهانه نشان داد که متوسط رسوب معلق شبیه‌سازی

1. Multilayer perceptron

شده سالانه به‌ترتیب ۳/۱ و ۵ تن در هکتار برای مدل‌های SWAT و MLP بود، درحالی‌که میانگین رسوب معلق اندازه‌گیری‌شده سالانه حوضه ناگوا^۱ واقع در جارخاند^۲ هند ۳/۷ تن در هکتار اندازه‌گیری شد. هر دو مدل به‌طورکلی، همبستگی و کارایی خوبی برای شبه‌سازی رسوب ماهانه در طول کالیبراسیون و اعتبارسنجی ارائه دادند، اما مدل MLP نسبت به مدل SWAT برای شبه‌سازی رسوب معلق در این حوزه مناسب‌تر بود. مدل SWAT به‌دلیل دقت بالا در شبه‌سازی داده‌های جریان و رسوب در مقیاس‌های بزرگ و ارزیابی‌های جامع حوزه آبخیز مناسب‌تر است (بول، بروکس و استون، ۲۰۲۴). بنابراین، مدل SWAT به‌علت ایجاد توازن بین دقت مکانی و کارایی محاسباتی برای شبه‌سازی رسوب و هدررفت ماده آلی در مقیاس‌های بزرگ حوزه آبخیز مناسب است و همچنین برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مدیریتی مناسب است (عباسپور، وجدانی و حقیقت، ۱۳۹۷). با وجود مزایای ذکرشده، این مدل محدودیت‌هایی نیز مانند حساسیت به کیفیت داده‌های ورودی و پیچیدگی تنظیمات و انتخاب پارامترها را دارد که می‌تواند بر دقت شبه‌سازی تأثیر بگذارد. با این حال، توانایی SWAT در شبه‌سازی سناریوهای مدیریتی و یکپارچه‌سازی پویایی رسوب و ذخیره کربن آلی، آن را به ابزاری قدرتمند برای درک رفتارهای هیدرولوژیکی و رسوب در مقیاس حوزه آبخیز تبدیل کرده است (بوسیکو، لاموروکس و هنری، ۲۰۲۴؛ تیجانی، کی و گیری، ۲۰۲۳).

بنابراین، امروزه می‌توان از مدل SWAT در شبه‌سازی پیوسته ذرات معلق و محلول در حوضه‌های بزرگ و پیچیده با شرایط مختلف آب‌وهوایی، اداپیکی و مدیریتی در بلندمدت استفاده کرد (ساوج، یورنگ و سانچز، ۲۰۱۱) و در شرایط رگباری، هدررفت ماده آلی به‌دلیل افزایش حجم رواناب و فرسایش به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش مقدار ماده آلی در واحد وزن رسوبات را می‌توان تابعی از نوع اکوسیستم (مرتعی-جنگلی) و ذخیره ماده آلی خاک منطقه دانست (بیلگو، سرپانتی و ماسه، ۲۰۰۵). بنابراین، پیچیدگی شرایط حاکم بر اکوسیستم‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف منجر به دستیابی به نتایج متفاوت می‌گردد، به‌طوری‌که هدررفت ماده آلی ناشی از جنگل‌زدایی در مناطقی با فرسایش سطحی، شیاری و خندقی به‌ترتیب ۳۱/۰۸، ۴/۲۱، ۲۱/۵۹ گرم در کیلوگرم رسوب گزارش شده است (یسوف، آسن و آلامیروف، ۲۰۱۵) در حوزه آبخیز سیو^۳ شبه‌سازی رسوب با استفاده از مدل SWAT، هدررفت سالانه کربن آلی را بین ۰/۱ تا ۲/۸ تن در کیلومتر مربع در سال برآورد کرده است (پانهالکار، ۲۰۱۴). میزان هدررفت کربن آلی خاک حوضه گیریندولو^۴ در اندونزی بر اثر فرسایش ۱۵۳ هزار تن در سال گزارش شد. تغییرات سالانه کربن آلی در نقاط مختلف جهان را می‌توان ناشی از نوسانات میزان فرسایش و مقادیر رسوب دانست (ساوج، یورنگ و سانچز، ۲۰۱۱). مقدار این هدررفت بر اثر فرسایش خاک در اراضی چای‌زار شرق استان گیلان با شیب بیش از ۵۰ درصد معادل ۱۶/۳۹ کیلوگرم در هکتار برآورد شد (جیان، تیایگی و سینگ، ۲۰۱۰). نور و میرنیا (۲۰۰۹) میزان کل هدررفت ماده آلی در حوزه آبخیز کجور استان مازندران را ۵۷/۵۶ تن گزارش کردند که به‌طور متوسط ۲/۷ تن ماده آلی در هر سیلاب از حوضه خارج شده است. نتایج مطالعات مختلف نشان‌دهنده همبستگی قوی انتقال ماده آلی ذره‌ای و رسوب معلق است، به‌طوری‌که از رسوبات معلق می‌توان برای برآورد هدررفت مواد آلی استفاده کرد (اوندا، کاتو و تاناکا، ۲۰۰۷). برآورد رسوب توسط مدل SWAT با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI2^۵ نشان داد که عدم قطعیت نتایج در داخل باندهای اطمینان ۹۵ درصد تطابق خوبی با مقادیر مشاهده‌ای داشته است (یسوف، آسن و آلامیروف، ۲۰۱۵). در شبه‌سازی دبی و رسوب متوسط ماهانه پارامترهای k (حساسیت فرسایش‌پذیری خاک) و n (ضریب زبری سطح) نیز نسبت به سایر پارامترهای به‌کارگرفته در مدل از جمله پارامترهای مهم هستند. در استفاده از این مدل معیار ناش-ساتکلیف، به‌عنوان تابع هدف در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای غلظت رسوب و دبی مورد مقبول است که می‌توان از آن برای ارزیابی کارایی مدل استفاده کرد (عباسپور، ۱۳۹۲). ساوج، یورنگ و سانچز (۲۰۱۱) مدل SWAT را برای شبه‌سازی دبی و رسوب روزانه و کربن آلی در حوزه آبخیز سیو واقع در جنوب غرب فرانسه مورد بررسی قرار دادند. داده‌های روزانه رسوب و ذرات کربن آلی برای کالیبره کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر ذرات کربن آلی، رسوب و دبی روزانه شبه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده در حوضه مشابهت زیادی دارد. با توجه به موارد فوق، شبه‌سازی فرایند رواناب و فرسایش با

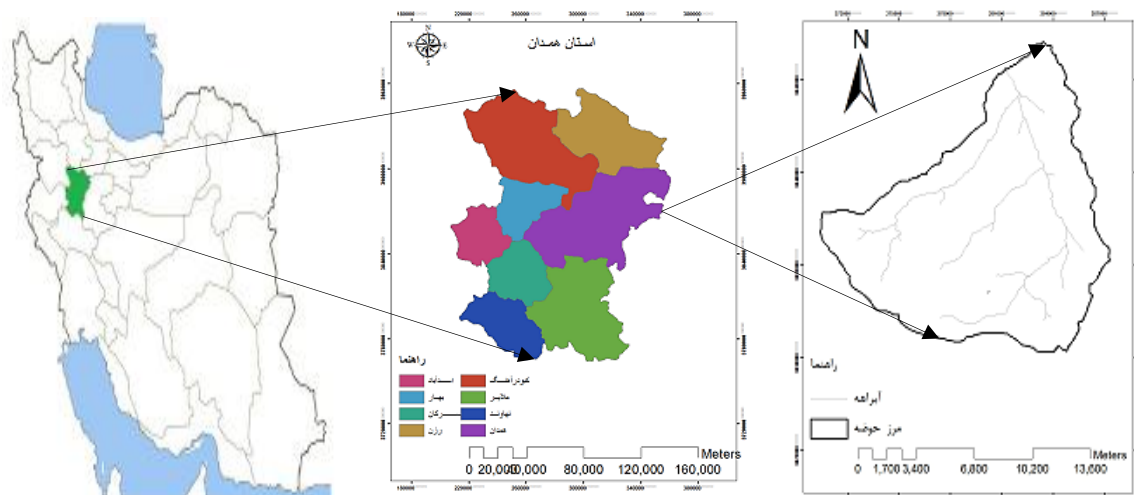
2. Nagwa
3. Jharkhand
4. Saveg
5. Girindulu
6. Sequential Uncertainty Fitting Version2

استفاده از مدل‌های مختلفی صورت می‌گیرد که از نظر درجه پیچیدگی، پارامترهای شبیه‌سازی و ماهیت متنوع هستند (کیرکلس، کامرات و کوهن، ۲۰۱۴). در این پژوهش مدل SWAT برای شبیه‌سازی بار معلق روزانه انتخاب شد و سپس با توجه به اهداف این پژوهش درخصوص برآورد و شبیه‌سازی هدررفت کربن آلی خاک در حوزه یلفان، از تلفیق مدل SWAT و اندازه‌گیری میزان کربن آلی خاک در نمونه‌های خروجی از حوزه استفاده شد. لذا تحقیق حاضر با هدف تخمین میزان هدررفت کربن آلی خاک از اکوسیستم‌های مرتعی با استفاده از مدل مفهومی و نیمه‌توزیعی SWAT در حوزه آبخیز سد یلفان انجام شد.

مواد و روش‌ها

۱. منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز یلفان، یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه سد اکباتان بوده که با مساحت ۱۶۴۴۷ هکتار در شهرستان همدان قرار گرفته و از نظر موقعیت جغرافیایی بین $29^{\circ} 48'$ تا $35^{\circ} 48'$ طول شرقی و $34^{\circ} 35'$ تا $34^{\circ} 45'$ عرض شمالی واقع شده است. از نظر آب‌وهوایی منطقه نیمه‌خشک و سرد، دمای متوسط سالانه حوضه $8/9$ درجه سانتی‌گراد است. بارش متوسط سالانه در سطح منطقه ۳۳۲ میلی‌متر بوده و حجم بارش سالانه حدود $31/5$ میلیون متر مکعب برآورد شده است (سازمان آب منطقه‌ای استان همدان). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز سد یلفان آمده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز یلفان، همدان

۲. تشریح تپ‌های مرتعی

در محدوده مورد مطالعه با وجود فشارهای شدید به منابع طبیعی تجدیدشونده، هنوز مراتع منطقه از قدرت تولید نسبی برخوردارند (جدول ۱) (چن، یوکیانگ و آوادا، ۲۰۱۲).

جدول ۱. ظرفیت تپ‌های مرتعی در طول مدت بهره‌برداری در حوضه یلفان، همدان

شماره تپ	کد تپ	مساحت تپ‌های گیاهی (درصد)	ظرفیت واحد دامی در یک دوره بهره‌برداری (۴ ماهه)
۱	As.sp+Ec.sp+Hu.pe	۶/۸	۲۱۵
۲	As.sp+Hu.pe+Stipa.sp	۲۱/۸	۸۵۵
۳	As.sp+Eu.sp	۲۰/۳	۶۷۲
۴	As.sp+Gl.sp+Eu.sp	۱۶/۵	۶۵۸
۵	As.sp+Hu.pe	۳۴/۶	۱۲۸۳
جمع	-	۱۰۰	۳۶۸۳

(نام جنس و گونه‌های گیاهی موجود در جدول که به اختصار بیان شده، عبارت‌اند از:

(Asteragalus, Echinops, Hultemia persica, Stipa barbata, Euphorbia, Glycyrrhiza

روش تحقیق

در اولین گام از انجام تحقیق برای شناخت خصوصیات حوضه، اقدام به جمع‌آوری آمار و نقشه‌های پایه در ارتباط با موضوع تحقیق از سازمان و ارگان‌های مختلف گردید. نقشه‌ها و اطلاعات توپوگرافی و فیزیوگرافی، اطلاعات سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی، آمار هواشناسی، رواناب و رسوب از جمله این آمار مورد نیاز بودند.

۱. روش نمونه‌گیری

با همکاری کارشناسان آب منطقه‌ای در محل ایستگاه هیدرومتری یلفان، به روش E.T.R¹ مقطع عرضی رودخانه آبشینه به بخش‌های سهم‌متری تقسیم شد و عمق جریان با کمک اشل قرائت شد. سپس نمونه‌های آب و رسوب از ۳ نقطه توسط نمونه‌بردار دستی در بازه زمانی فروردین ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۴ با برداشت ۱۱ نمونه انجام شد، برای ماه‌های مرداد و شهریور به دلیل نبود بارش و کافی نبودن حجم آب، امکان نمونه‌برداری وجود نداشت.

۲. آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های محتوی آب و رسوب به آزمایشگاه علوم مرتع، دانشگاه ملایر منتقل شد و تا زمان آنالیز (حداکثر ۲۸ روز)، نمونه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد (ساوج، یورنگ و سانچز، ۲۰۱۱) نگهداری شدند. ۱ لیتر از نمونه‌های آب جمع‌آوری شده برای آنالیز ریزکربن آلی ذره‌ای (POC) از فیلتر ۰/۷ μm GF/F عبور داده شد (ساوج، یورنگ و سانچز، ۲۰۱۱). به منظور حذف هرگونه کربن آلی در فیلتر، قبل از استفاده به مدت ۴ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد کوره قرار داده شد و تا زمان سرد شدن در دسیکاتور مانده و پس از آن توزین گشت که به عنوان وزن اولیه در نظر گرفته شد. به منظور حذف کربن غیرآلی (کربناته)، کاغذ صافی حاوی رسوب معلق به مدت ۱۲ ساعت در دسیکاتور محتوی HCL 2N قرار گرفت، سپس به مدت ۲۴ ساعت نمونه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و در دمای اتاق توزین گشت (صالحی، نوری و ایلدرمی، ۱۳۹۱) تفاضل وزن فیلترها قبل از عبور دادن نمونه از آن و بعد از قرار گرفتن در آون برابر غلظت رسوب معلق است که از این پس به اختصار SSC^۲ نامیده می‌شود. برای اندازه‌گیری ماده آلی از روش کاهش وزن از طریق سوزاندن (LOI^۳) استفاده شد (کامبادرلا، گاجا و یوران، ۲۰۰۱) بدین منظور فیلترهای توزین شده به مدت ۴ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره قرار داده شد و پس از سرد شدن در دسیکاتور وزن نمونه‌ها به دست آمد. برای محاسبه میزان ماده آلی موجود در رسوبات معلق از تفاضل وزن فیلترها (کامبادرلا، گاجا و یوران، ۲۰۰۱) و از ضریب ۰/۵۸ برای تبدیل میزان ماده آلی موجود در رسوبات به کربن آلی استفاده شد (شوماخر، ۲۰۰۲).

۳. مدل SWAT

1. Equal Transit Rate
2. Suspended Sediment Concentration
3. Loss on Ignition

فرایندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشد گیاه، چرخه مواد غذایی و... در این مدل به طور مستقیم و با استفاده از پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند. داده‌های مورد نیاز مدل شامل موارد زیر است: الف) داده‌های مکانی که شامل نقشه‌های خاک‌شناسی و کاربری اراضی، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، نقشه است؛ ب) داده‌های هواشناسی شامل بارندگی روزانه، ماکزیمم و مینیمم، درجه حرارت روزانه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد از ایستگاه‌های موجود در حوضه اعم از کلیماتولوژی و سینوپتیک جمع‌آوری می‌شود. چرخه هیدرولوژیکی در مدل SWAT در دو فاز زمینی و فاز آب یا روندیابی شبیه‌سازی می‌شود.

۴. فاز زمینی

فرایندهای هیدرولوژیکی شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی و جریان آب زیرزمینی و جریان آب زیرسطحی توسط این مدل شبیه‌سازی می‌شوند (نیچ، آرنولد و کینیری، ۲۰۰۵).

چرخه هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل براساس معادله بیلان آب به شکل رابطه ۱ است (نارامنگام، ۲۰۰۸).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1) \text{ رابطه}$$

SW_t : مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 : مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)، R_{day} : مقدار بارش در روز t (میلی‌متر)، Q_{surf} : مقدار رواناب سطحی در روز t (میلی‌متر)، E_a : مقدار تبخیر و تعرق در روز t (میلی‌متر)، W_{seep} : مقدار آب نفوذی به منطقه قشری در پروفیل خاک در روز t (میلی‌متر)، Q_{gw} : مقدار جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه در روز t (میلی‌متر). بخش هیدرولوژی در مدل SWAT شامل موارد ذخیره تاج‌پوشش گیاهی، نفوذ، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان بازگشتی^۲، رسوب‌گذاری و فرسایش است که به تفصیل در سایر مطالعات بیان شده است (نیچ، آرنولد و کینیری، ۲۰۰۵).

۵. فاز روندیابی

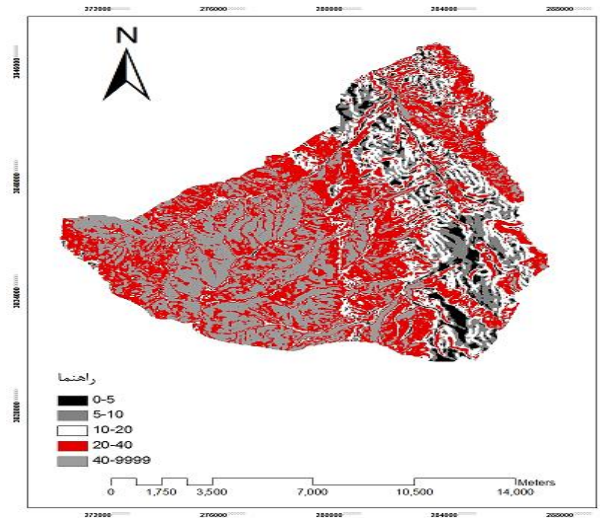
پس از آنکه مدل SWAT روند بارگذاری رسوب، آب، مواد مغذی و آفت‌کش‌ها را برای کانال اصلی مشخص کرد، بارگذاری در شبکه آبراهه حوضه را روندیابی می‌کند که شامل روندیابی جریان (نیچ، آرنولد و کینیری، ۲۰۰۵) و روندیابی رسوب (آرنولد، ویلیامز و میدمنت، ۱۹۹۵) است.

۶. آماده‌سازی و اجرای مدل

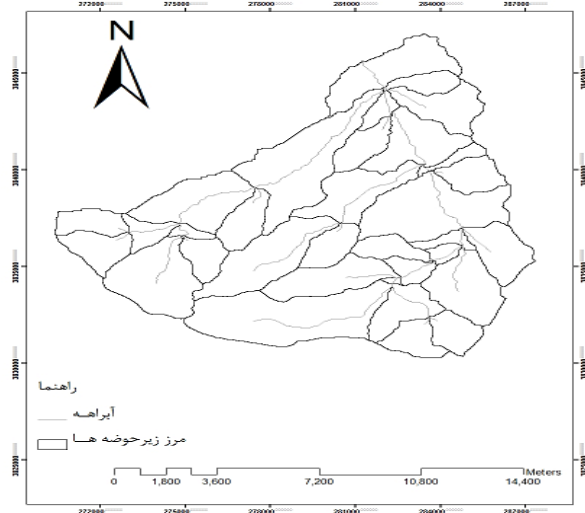
۶-۱. آماده‌سازی داده‌های ورودی

آماده‌سازی داده‌های ورودی شامل داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، نقشه شبکه آبراهه‌ای و مرز زیرحوضه‌ها، نقشه توپوگرافی، نقشه خاک‌شناسی و نقشه کاربری اراضی قبل از اجرای مدل انجام گرفت. نقشه DEM (اندازه پیکسل 20×20 متر) از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه که از اداره کل منابع طبیعی همدان تهیه شده بود، استخراج گردید (شکل ۴). نقشه شیب منطقه که در تهیه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) مورد نیاز است، در پنج کلاس شیب تهیه شد (شکل ۲). با توجه به اهمیت تقسیم‌بندی حوضه و افزایش تعداد زیرحوضه‌ها به منظور بهبود دقت پیش‌بینی (خانلری، تمرتاش و تاتیان، ۱۳۹۰) با استفاده از نقشه DEM، شبکه آبراهه‌ای مشخص و زیرحوضه‌ها تفکیک شدند (شکل ۳). پارامترهای ضروری برای ساخت فایل WGN داده‌های اقلیمی در جدول ۲ آمده است. با توجه به اهمیت تعداد ایستگاه‌ها در شبیه‌سازی دقیق‌تر از آمار ایستگاه فرودگاه همدان برای ساخت ایستگاه‌های مجازی در طول دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز یلفان از تصاویر ماهواره‌ای IRS و Landsat7 (سنجده ETM+) مربوط به سال ۲۰۱۳ استخراج گردید (شکل ۳). اطلاعات خاک‌شناسی منطقه که براساس واحدهای اراضی منطقه، در ۲۵ پلی‌گون و در ۱۳ کلاس طبقه‌بندی شده است، از اداره کل منابع طبیعی استان همدان تهیه شد (شکل ۴). پارامترهای مورد نیاز خاک‌شناسی برای ورود به بخش پایگاه داده در جدول ۳ ذکر شده است.

1. Digital Elevation Model
2. Return Flow



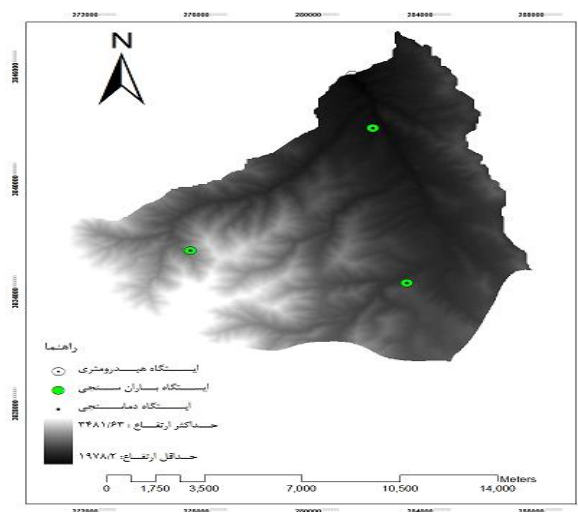
شکل ۲. نقشه طبقات شیب حوضه یلفان، همدان



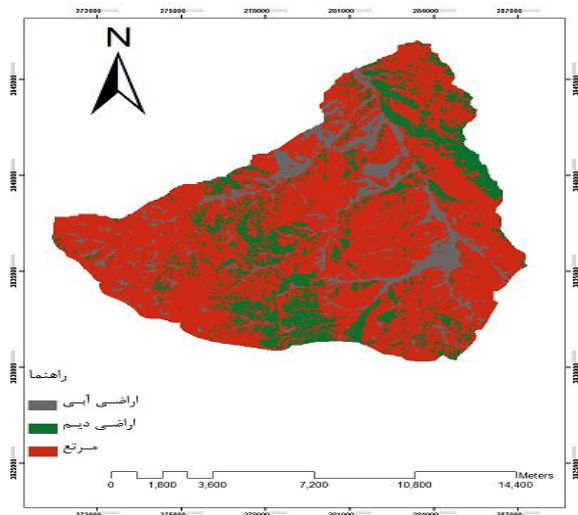
شکل ۳. نقشه زیرحوضه‌ها و خطوط جریان حوضه یلفان، همدان

جدول ۲. پارامترهای اقلیمی مورد نیاز برای ساخت فایل WGN برای مدل SWAT

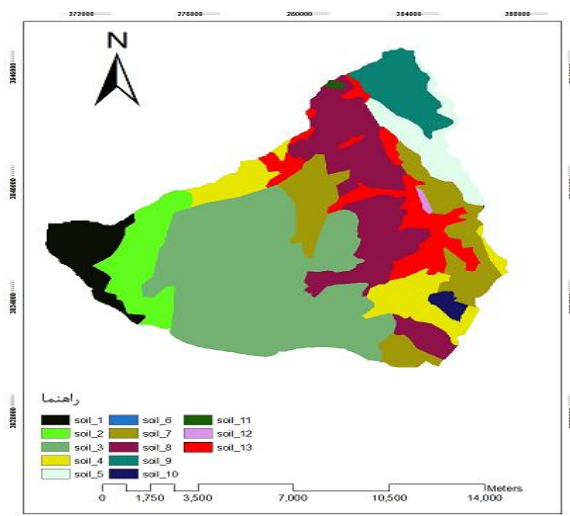
مشخصه پارامتر	نام پارامتر	ردیف
TMPMX	میانگین حداکثر دمای روزانه در هر ماه	۱
TMPMN	میانگین حداقل دمای روزانه در هر ماه	۲
TMPSTDMX	انحراف معیار حداکثر دمای روزانه در هر ماه	۳
TMPSTDMN	انحراف معیار حداقل دمای روزانه در هر ماه	۴
PCPMM	میانگین مجموع بارش در هر ماه	۵
PCPSTD	انحراف معیار بارش روزانه در هر ماه	۶
PCPSKW	ضریب چولگی بارش روزانه در هر ماه	۷
PR_W1	احتمال روز بارانی پس از یک روز خشک در هر ماه	۸
PR_W2	احتمال روز بارانی پس از یک روز بارانی در هر ماه	۹
PCPD	میانگین روزهای بارانی در ماه	۱۰
RAINHHMX	حداکثر بارش نیم‌ساعته در کل دوره آماربرداری	۱۱
SOLARAV	میانگین تابش روزانه خورشید در هر ماه	۱۲
DEWPT	میانگین دمای نقطه شبنم روزانه در هر ماه	۱۳
WINDAV	میانگین سرعت باد روزانه در هر ماه	۱۴



شکل ۴. نقشه مدل ارتفاعی رقومی منطقه به همراه موقعیت ایستگاه‌ها



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۳ حوضه یلفان، همدان



شکل ۶. نقشه خاک‌شناسی حوضه یلفان (اداره کل منابع طبیعی استان همدان)

جدول ۳. پارامترهای مورد نیاز نقشه خاک برای مدل SWAT

ردیف	نام پارامتر	مشخصه پارامتر
۱	ضخامت لایه خاک	SOL_Z
۲	حداکثر عمق ریشه‌دوانی در لایه خاک	SOL_ZMX
۳	حداکثر حجم شکاف‌ها در خاک	SOL_CRK
۴	چگالی ظاهری (gr/cm^3)	SOL_BD
۵	ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک	SOL_AWC
۶	گروه هیدرولوژیکی خاک	HYDGRP
۷	هدایت الکتریکی اشباع	SOL_EC
۸	ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	SOL_K
۹	درصد مقدار کربن آلی خاک	SOL_CBN
۱۰	درصد ذرات رس	CLAY
۱۱	درصد سیلت	SILT
۱۲	درصد شن	SAND
۱۳	درصد سنگریزه	ROCK
۱۴	ضریب آلودگی خاک مرطوب	SOL_ALB

۶-۲. اجرای مدل SWAT

در این پژوهش ابتدا نقشه DEM به مدل معرفی و با استفاده از آن رسم شبکه آبراهه‌ای توسط مدل انجام شد و پس از آن حداقل مساحت ۲۵۰ هکتار برای تشکیل زیرحوضه‌ها انتخاب شد. محل ایستگاه هیدرومتری به‌عنوان خروجی برای شکل‌گیری مرز حوضه برای مدل تعریف شد. زیرحوضه‌بندی یک حوزه آبخیز بر روی پیش‌بینی میزان رسوب و عناصر غذایی تأثیر دارد و همچنین انتقال رسوب در یک حوضه نسبت به تعداد زیرحوضه‌ها حساس است. در نهایت مدل حوضه مورد نظر را به ۳۳ زیرحوضه تقسیم کرد. در مرحله بعد، نقشه کاربری اراضی با ۳ کلاس و نقشه خاک با ۱۳ کلاس به مدل معرفی شد. نقشه طبقات شیب نیز در همین مرحله به کمک نقشه DEM در پنج طبقه شیب ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و بیش‌تر از ۴۰ درصد با استفاده از مدل فراهم گردید. سپس از تلفیق این سه نقشه رستری در محیط نرم‌افزار، نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیک به دست آمد. در مرحله بعد، مشخصات ایستگاه مرجع (ایستگاه فرودگاه همدان)، به‌همراه مختصات جغرافیایی، ارتفاع و داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی و دامسنجی که به‌صورت مجازی ساخته شدند، در فرمت dbf به مدل معرفی شد. پس از این مرحله، مدل آماده اجراست. در این پژوهش دو سال اول دوره آماری (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲) برای گرم کردن مدل و آمار سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ برای واسنجی و ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ برای اعتبارسنجی استفاده شد. در دوره گرم کردن به مدل اجازه داده می‌شود که برای پارامترها مقداردهی اولیه انجام دهد. دوره گرم کردن مدل اهمیت زیادی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی دارد، زیرا شرایط اولیه به‌ویژه رطوبت خاک در بسیاری از مواقع در حوضه نامشخص است (ملو، ویالا و نورتون، ۲۰۰۸).

۶-۳. آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

تحلیل حساسیت مدل SWAT برای بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر خروجی مدل استفاده می‌شود. پارامترهایی که تغییرات اندک آن‌ها باعث تغییرات زیادی در خروجی مدل می‌شود، به‌عنوان پارامترهای حساس شناخته می‌شوند که برای واسنجی دقیق مدل ضروری‌اند (عباسپور، یانگ و ماکسیموف، ۱۳۸۵). هدف از واسنجی، کاهش تفاوت بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده از طریق تنظیم پارامترهای تأثیرگذار است تا خروجی مدل با مشاهدات واقعی هم‌خوانی پیدا کند. این فرایند واسنجی تکرارشونده نیازمند استفاده از واسطه SWAT-CUP (عباسپور، ۱۳۸۷) است که با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند SUFI2 (عباسپور، ۱۳۹۲) برای تحلیل عدم قطعیت بهبود دقت و کارایی مدل را تسهیل می‌کند. عدم قطعیت در خروجی مدل با استفاده از بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد (p-factor) و روش نمونه‌برداری لاتین هایلبرکیوب (LH^1) اندازه‌گیری می‌شود. هدف این است که اکثر داده‌های مشاهده‌شده در این بازه قرار گیرند و در عین حال پهنای عدم قطعیت (d-factor) به حداقل برسد. مقادیر بهینه برای p-factor

بالای ۰/۵ و برای r-factor کمتر از ۱ در نظر گرفته می‌شوند (عباسپور، یانگ و ماکسیموف، ۱۳۸۵). پس از تحلیل حساسیت و واسنجی، اعتبارسنجی مدل با داده‌های مستقل (۲۰۱۱-۲۰۱۴) انجام شد تا قابلیت پیش‌بینی دقیق مدل ارزیابی شود (مرتسون، شومن و اینگرام، ۲۰۰۴). برای واسنجی، از SWAT-CUP استفاده شد و در قالب الگوریتم SUFI2 تنظیمات لازم صورت گرفت و پس از یک دوره انجام واسنجی و مقایسه نتایج، محدوده پارامترها در محدوده مجاز تعریف شده، تغییر داده شد و مجدداً واسنجی انجام شد. این کار تا رسیدن به نتایج مطلوب براساس فاکتورها و روابط مشخص شده ادامه یافت. دوره‌های آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ برای مرحله واسنجی و ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ جهت اعتبارسنجی مدل انتخاب شد تا پارامترها به صورت تکرار شونده تنظیم شوند و دقت مطلوب براساس معیارهای داده‌های سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ به دست آید. از آنجاکه مدل مبنای فیزیکی و هیدرولوژیکی دارد، لازم است قبل از شبیه‌سازی رسوب، رواناب شبیه‌سازی گردد. پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی دبی از یک مجموعه ۲۴ تایی از پارامترهای رواناب با حدود اولیه مشخص انتخاب شدند. به منظور شبیه‌سازی غلظت رسوب از پارامترهای بیان شده در جدول ۴ استفاده شد. فاکتور اقدامات مدیریتی در سطح حوضه (USLE-P) بین ۰ و ۱ متغیر است. وقتی این پارامتر برابر یک قرار داده شود، یعنی هیچ‌گونه اقدام مدیریتی در سطح حوضه انجام نشده است. با توجه به اینکه در مورد اقدامات صورت گرفته در سطح حوضه اطلاعاتی وجود نداشت، مقدار اولیه این پارامتر برابر یک فرض شد (وینچل، سرینی و اسان و دی لوزیو، ۲۰۰۷) حساسیت پارامترها براساس دو معیار T-state و P-value سنجیده می‌شود. هرچه مقدار قدرمطلق مقدار T-state بیشتر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر خواهد بود. معیار P-value نیز اهمیت T-state را نشان می‌دهد. هرچه مقدار P-value کمتر باشد، با درجه اطمینان بالاتری می‌توان گفت که پارامتر حساس است (عباسپور، ۱۳۸۷).

جدول ۴. پارامترهای ورودی به مدل برای واسنجی رسوب

حد بالا	حد پایین	تعریف پارامتر	کد پارامتر
۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	روندیابی رسوب در کانال	v_SPCON.bsn
۱	۰	فاکتور تعیین نرخ اوج برای روندیابی رسوب در کانال اصلی	v_PRF.bsn
۱/۵۰	۱	پارامتر نمایی روندیابی رسوب در کانال	v_SPEXP.bsn
۰/۳۰	۰	پارامتر فرسایش پذیری کانال	v_CH_EROD.rte
۰/۶۰	۰/۰۴	پارامتر پوشش کانال	v_CH_COV.rte
۱	۰/۱	فاکتور اقدامات حفاظتی	v_USLE_P.mgt
۲۰۰	۰	غلظت رسوب در جریان جانبی و آب زیرزمینی	v_LAT_SED.hru
۰/۳۰	-۰/۳۰	پارامتر فرسایش پذیری خاک معادله USLE	r_USLE_K.sol
۱	۰	فاکتور گیاهی معادله جهانی فرسایش خاک	r_USLE_C.sol
۲	۰/۵۰	پارامتر بیک برای روندیابی رسوب در زیرحوضه	v_APM.bsn
۰/۵	-۰/۵	شماره منحنی در شرایط رطوبتی	r_CN2.mgt
۱	۰	ضریب آلفای پایه جریان ساحلی	v_ALPHA_BNK.rte
۰/۳۰	-۰/۳۰	فاکتور جزء سنگ ریزه خاک	r_ROCK(1).sol
۲	۰/۵	پارامتر روندیابی رسوب در آبراهه فرعی	v_ADJ_PKR.bsn
۱	۰	فاکتور ذوب برف	v_SMFMX.bsn
۲/۵	۰/۹	چگالی ظاهری خاک	r_SOL_BD().sol
۱	۰	تأخیر دمای بارش برف	v_TIMP.bsn

برای ارزیابی کارایی مدل و برای به دست آوردن بهترین واسنجی و محدود کردن جواب‌ها به سمت جواب یگانه از ضرایب زیر به منظور ارزیابی مدل استفاده شد.

ضریب تبیین (R^2)

مقدار این ضریب بین ۰ تا ۱ بوده که مقدار بهینه آن عدد ۱ است و از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (عباسپور، ۱۳۸۷).

$$R^2 = \frac{[\sum_i(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، Q_{mi} مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_m میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_s میانگین مقادیر شبه‌سازی شده و $Q_{s,i}$ مقادیر شبه‌سازی شده است.

ضریب ناش-ساتکلیف (NS)

این ضریب مطابق رابطه ۳ به شکل زیر است (عباسپور، ۱۳۸۷).

$$NS = 1 - \frac{\sum_i(Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i(Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، Q_{mi} مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_m میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_s میانگین مقادیر شبه‌سازی شده و $Q_{s,i}$ مقادیر شبه‌سازی شده است.

۵-۶. شبه‌سازی کربن آلی ذره‌ای (POC)

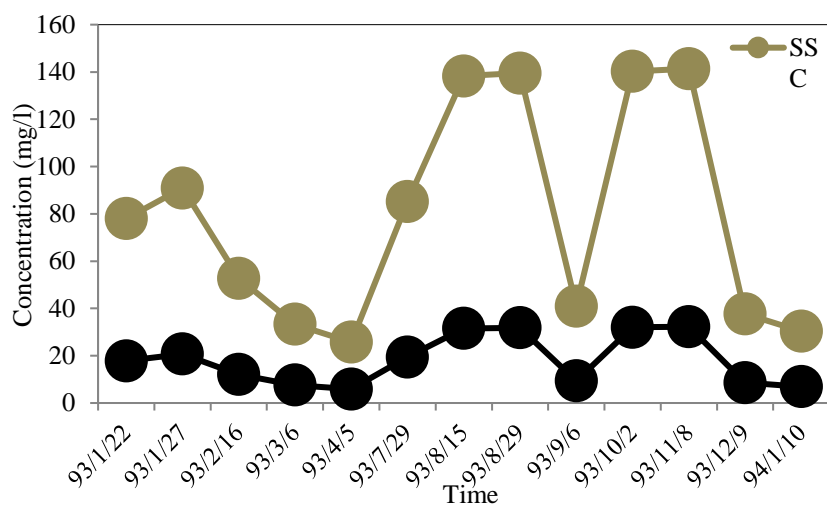
پس از اتمام نمونه‌برداری و کارهای آزمایشگاهی، ۱۱ داده مشاهده‌ای مربوط به POC و SSC به دست آمد. با توجه به اینکه مقادیر داده‌های POC و SSC آزمایشگاهی نمی‌توانند بیانگر تغییرات رخ داده در مقیاس واقعی باشند، بدین منظور از آمار SSC ثبت شده در بازه زمانی فروردین ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۴ موجود در شرکت آب منطقه‌ای استان همدان برای برآورد کربن آلی ذره‌ای هدررفتی نیز استفاده شد و با کمک داده‌های SSC میزان POC آن‌ها نیز تخمین زده شد. داده‌ها برای بررسی ضریب همبستگی و مدل‌سازی ارتباط بین دو متغیر POC و SSC آنالیز شدند. بررسی ارتباط خطی بین غلظت رسوبات معلق (متغیر مستقل) و غلظت کربن آلی (متغیر وابسته) به منظور برآورد هدررفت کربن آلی در حوزه آبخیز یلفان با دستور رگرسیون گام‌به‌گام proc stepwise انجام شد. بدین منظور، از ۱۱ داده مشاهده‌ای مربوط به غلظت کربن آلی و مقادیر متناظر غلظت رسوب استفاده شد. برای ارزیابی و تأیید رابطه به دست آمده در مرحله‌ای جداگانه دو نقطه اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفتند و سپس برای اعتبارسنجی مدل رگرسیون خطی به دست آمده به کار گرفته شدند. همچنین برای مطالعه تغییرات هدررفت ماهانه کربن آلی خاک از دستور آنالیز واریانس GLM استفاده شد. قابل ذکر است تمامی آزمون‌های آماری در نرم‌افزار (version 9.1 SAS) انجام گرفتند. پس از اینکه شبه‌سازی و کالیبراسیون میزان رسوبات معلق با استفاده از مدل SWAT انجام شد، میزان هدررفت کربن آلی براساس رابطه رگرسیونی خطی حاصل، از داده‌های رسوب معلق شبه‌سازی شده توسط مدل SWAT [۴۰] برای دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ محاسبه شد.

یافته‌ها

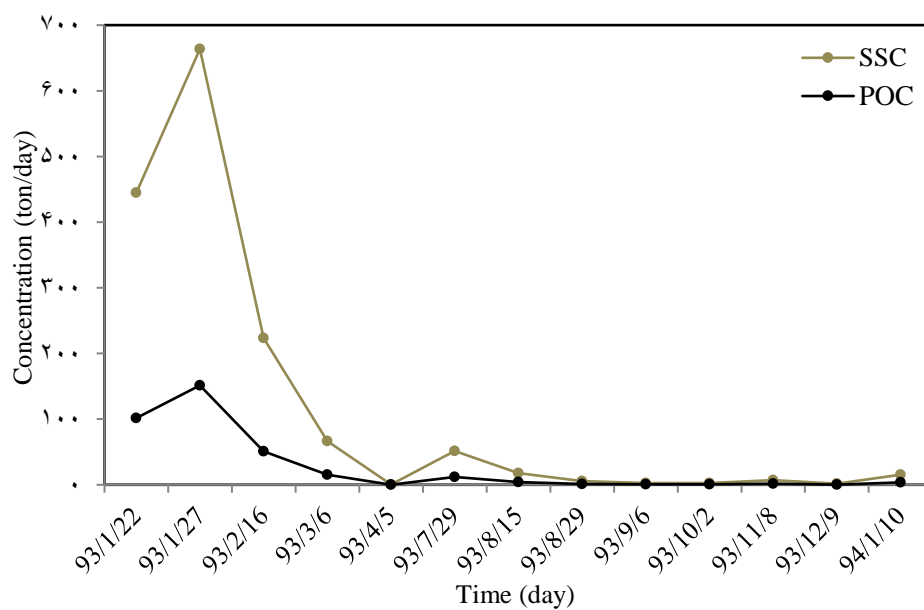
۱. روند تغییرات غلظت رسوب معلق (SSC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) در بازه زمانی ۱۱ ماهه

نتایج بیانگر تغییرات بین رسوبات معلق و کربن آلی ذره‌ای است (شکل ۷ و ۸). آنالیز آماری انجام شده نشان داد که تغییرات معنی‌داری در میزان هدررفت کربن آلی طی ماه‌های مورد مطالعه وجود ندارد ($p > 0.05$) (جدول ۵). میزان کل کربن آلی و بار معلق ایجاد شده طی این ۱۱ ماه به ترتیب ۳۴۲/۵۸ و ۱۵۰۱/۹ تن و به طور متوسط ۲۶/۳۵ تن کربن آلی و ۱۱۵/۵۳ تن بار معلق از حوضه خارج شده است. از طرف دیگر، تغییرات مقدار کربن آلی با مقادیر حداقل و حداکثر به ترتیب ۰/۰۹۶ و ۱۵۱/۳۷ تن در روز در مقایسه با غلظت رسوب با مقادیر حداقل و حداکثر ۰/۴۲ و ۶۶۳/۶۴ تن در روز به ترتیب مربوط به روزهای ۵ تیر و ۲۷ فروردین ۱۳۹۳ است که دلالت بر عدم تغییرات متناسب هدررفت کربن آلی و رسوب معلق دارد (شکل ۶). به طور کلی نتایج حاصل از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد، تفاوت معنی‌داری را بین فروردین و تیر ۱۳۹۳، آبان ۱۳۹۳، آذر ۱۳۹۳، دی‌ماه ۱۳۹۳، بهمن ۱۳۹۳ و اسفند

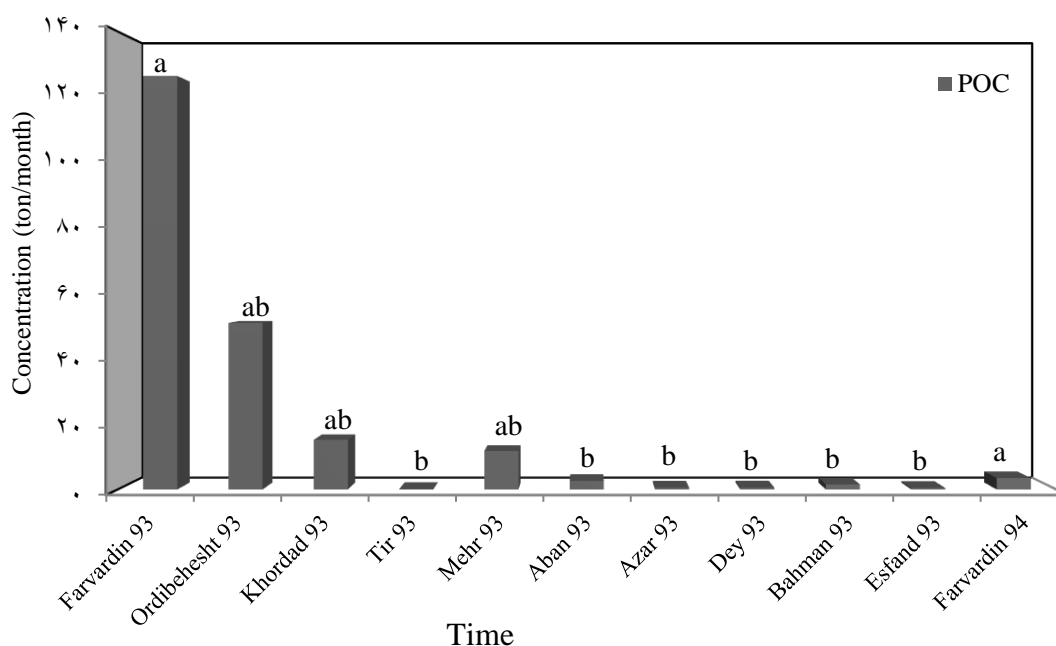
۱۳۹۳ نشان داد ولی بین فروردین ۱۳۹۳ با ماه‌های اردیبهشت ۱۳۹۳، خرداد ۱۳۹۳، مهر ۱۳۹۳ و فروردین ۱۳۹۴ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۹).



شکل ۷. روند تغییرات ماهانه میزان هدررفت کربن آلی ذره‌ای (POC) و غلظت رسوبات معلق (SS) در حوزه آبخیز یلفان، همدان



شکل ۸. روند تغییرات ماهانه میزان هدررفت کربن آلی ذره‌ای (POC) و غلظت رسوبات معلق (SS) در حوزه آبخیز یلفان، همدان



شکل ۹. مقایسه میزان هدررفت کربن آلی ذره‌ای (POC) در بازه زمانی فروردین ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۴ در حوزه آبخیز یلفان، همدان

جدول ۵. خلاصه نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها برای مطالعه میزان هدررفت ماهانه کربن آلی خاک

مقیاس زمانی	Df	f	Pr
ماهانه	۱۰	۴/۱۴	۰/۲۱

در این پژوهش، میزان کل رسوب و کربن آلی هدررفتی از نسبت‌های گزارش شده توسط (بیلگو، سرپانتی و ماسه، ۲۰۰۵؛ بول، بروکس و استون، ۲۰۲۴؛ وینچل، سرینی واسان و دی لوزیو، ۲۰۰۷) در کاربری‌های مرتعی و کشاورزی بیشتر است؛ ولی نور، مارینا و ریسی (۱۳۸۷) در حوضه کجور، مازندران با کاربری غالب جنگل و مرتع در ارتفاعات گزارش کردند در طی ۸ وقایع بارشی ثبت شده، ۵۷ تن ماده آلی همراه رسوبات از حوضه خارج شده است. می، سرتوهدی و ماردیانتو (۲۰۱۵) میزان کربن آلی هدررفتی را معادل ۱۵۳ هزار تن در سال در حوضه گیریندولو اندونزی برآورد نمودند که از میزان کل کربن هدررفتی حوضه یلفان بالاتر است. با توجه به بالا بودن مقدار کربن آلی در واحد وزن رسوبات در این پژوهش در مقایسه با برخی مطالعات گفته شده می‌توان نقش مراتع حوزه در افزایش ماده آلی خاک را محتمل دانست؛ همان‌طور که نور، مارینا و ریسی (۱۳۸۷) و بیلگو، سرپانتی و ماسه (۲۰۰۵) به این نتیجه دست یافتند. هرچند که روند کاهشی یا افزایشی میزان رسوب و کربن آلی از فروردین ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۴ یکسان بود، درصد و تناسب این تغییرات یکسان نبوده است؛ به‌طوری‌که میزان هدررفت کربن آلی ذره‌ای در مقایسه با رسوب منتقل شده و یا خاک فرسایش یافته افزایش چشمگیری نداشته است. دلیل این امر می‌تواند محدود بودن ماده آلی در خاک سطحی مراتع (مک دوول و آسبوری، ۱۹۹۴) باشد که پتانسیل هدررفت ماده آلی را در این اکوسیستم‌ها محدود می‌سازد. بالا بودن میزان هدررفت کربن آلی در فروردین ماه نسبت به ماه‌های دیگر در این حوضه را می‌توان ناشی از تغییر فصل از زمستان به بهار، افزایش میزان هوازگی و در نتیجه تأمین مواد بیشتر برای انتقال نسبت داد (مارتینز و لویز، ۲۰۰۸) از طرف دیگر، چون خاک تحت تأثیر پوشش گیاهی قرار می‌گیرد که روی آن رشد می‌کند (مک دوول و آسبوری، ۱۹۹۴)، پوشش گیاهی در این ماه در مراحل ابتدایی رشد خود قرار داشته و نتوانسته با تأثیر بر جذب بارش، تخییر و تعرق، مقدار رواناب و توازن آب از مقدار و شدت فرسایش خاک بکاهد. اراضی کشاورزی نیز با وجود اینکه مساحت اندکی در مقایسه با مراتع به خود اختصاص دادند، نقش آن‌ها در میزان فرسایش و هدررفت کربن آلی حوضه در فروردین ماه را نیز نباید نادیده گرفت. گرایش کلی در کاهش هدررفت کربن آلی در این اکوسیستم از میزان رسوب معلق تأثیرپذیری مستقیم دارد (شکل ۵ و ۶). با توجه به تغییرات ماهانه کربن آلی و رسوب در حوضه مورد مطالعه (شکل ۶) به نظر می‌رسد که کاهش هدررفت کربن آلی تا حدودی تابع دو

عامل پوشش گیاهی و بارش نیز هست که افزایش پوشش گیاهی و کاهش خاک لخت از یک طرف و رشد ریشه و فعالیت میکروارگانیسم‌های فعال در منطقه ریزوسفر که منجر به تجزیه و جذب ماده آلی توسط ریشه و افزایش بهبود مواد آلی به خاک می‌گردد از طرف دیگر، عوامل مؤثر بر کاهش هدررفت کربن آلی در تیرماه نسبت به ماه‌های دیگر هستند. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این بخش نشان می‌دهند که با توجه به نقش مهم پوشش گیاهی، هم‌زمان با کامل شدن دوره رویشی پوشش گیاهی از فروردین‌ماه به‌سمت تیرماه هدررفت ماده آلی کم می‌شود و از مهرماه تا فروردین ۱۳۹۴ نیز بسته به میزان بارش و نمونه‌های برداشت‌شده، هدررفت کربن آلی را داریم (شکل ۶). از طرفی با توجه به شکل ۶ طی مدت نمونه‌برداری افزایش مقادیر رسوب سبب افزایش نسبی هدررفت کربن آلی شده که این امر مبنی بر ارتباط معنی‌دار مقادیر غلظت رسوب و کربن آلی است. نتایج به‌دست‌آمده مبنی بر بالا بودن میزان رسوب در ماه‌های فصل بهار و کاهش آن در ماه‌های فصل تابستان با پژوهش‌های انجام‌شده توسط (مارتینز و لویز، ۲۰۰۸) همسوست که در نهایت این افزایش رسوب، هدررفت بیشتر کربن آلی را در پی دارد.

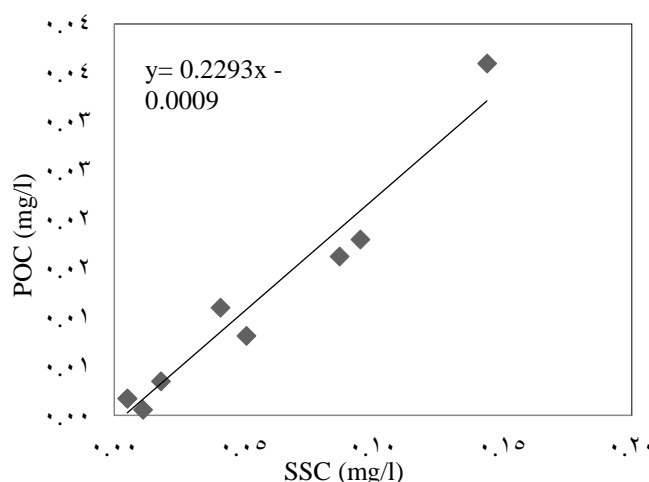
۲. بررسی روابط رگرسیونی SSC و POC

در تحلیل رگرسیونی، مقادیر مشاهداتی غلظت رسوب معلق (SSC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) به‌ترتیب به‌عنوان متغیر مستقل و وابسته با استفاده از روش رگرسیونی گام‌به‌گام مورد بررسی قرار گرفتند. رابطه رگرسیونی اولیه که بین داده‌های نه ماه اول یعنی فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مهر، آبان، آذر، دی و بهمن‌ماه ۱۳۹۳ به دست آمد، نشان‌دهنده یک رابطه قوی و مثبت بین دو پارامتر مذکور است ($R^2=0/97$) ($p<0/0001$) (شکل ۸). از آنجاکه شرط لازم برای تعیین اعتبار یک مدل هم‌خوانی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج واقعی است، برای سنجش کارایی مدل رگرسیونی میزان کربن آلی برای روزهای ۱۲ اسفند ۱۳۹۳ و ۱۰ فروردین ۱۳۹۴ براساس رابطه (۴) محاسبه شد که این مقادیر به‌ترتیب $0/0098$ و $0/0071$ گرم در لیتر محاسبه شد؛ این درحالی است که مقادیر مشاهداتی برای این روزهای نمونه‌برداری به‌ترتیب $0/0087$ و $0/0098$ گرم در لیتر بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار محاسباتی برای ۱۰ فروردین ۱۳۹۴ با عدد مشاهداتی آن فرق دارد که نتایج حاصل از آزمون t-test نشان داد تفاوت معنی‌داری در بین اعداد مشاهداتی و محاسباتی وجود ندارد ($p>0/05$) (جدول ۷، جدول ۸).

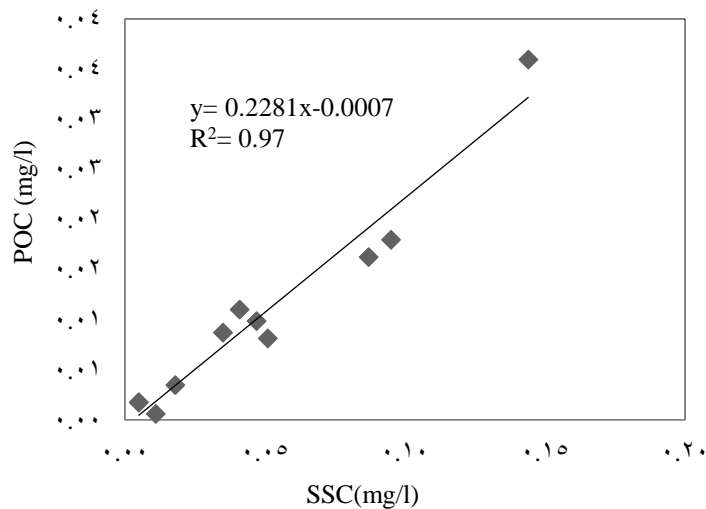
$$y=0/2293x - 0/0009$$

رابطه (۴)

لذا با توجه به جدول ۶ و ۸ و همچنین اشکال ۱۰ و ۱۱ می‌توان گفت رسوبات معلق تخمینگر مناسبی برای هدررفت کربن آلی خاک هستند و می‌توان از آن‌ها برای برآورد میزان هدررفت کربن آلی خاک استفاده کرد. در مرحله بعد، تمام داده‌های مشاهداتی (۱۱ ماهه) در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند و معادله خطی قوی ($R^2=0/97$) ($p<0/0001$) برای تخمین هدررفت کربن آلی تهیه شد (شکل ۱۱، جدول ۶).



شکل ۱۰. رابطه غلظت بار معلق (SSC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) در ماه‌های فروردین تا بهمن ۱۳۹۳، حوضه یلفان، همدان



شکل ۱۱. رابطه غلظت بار معلق (SSC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) در ماه‌های فروردین ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۴، حوضه یلفان، همدان

جدول ۶. ضریب همبستگی بین POC و SSC در بازه‌های زمانی مورد مطالعه

ردیف	بازه زمانی	معادله	
		وزن کربن آلی $y =$	وزن رسوب $x =$
۱	یازده ماه	$y = 0.2281x - 0.0007$	$x = 0.0007$
۲	نه ماه	$y = 0.2293x - 0.0009$	$x = 0.0009$

جدول ۷. نتایج حاصل از مدل رگرسیونی در حوضه یلفان، همدان

زمان	مقادیر مشاهداتی	مقادیر محاسباتی	رابطه بین POC و SSC در نه ماه اول دوره نمونه برداری
۹ اسفند ۱۳۹۳	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۹۸	$y = 0.2293x - 0.0009$
۱۰ فروردین ۱۳۹۴	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۷۱	

جدول ۸. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از آزمون t-test

زمان (روز)	مقدار مشاهداتی	مقدار محاسباتی	Pr > F
۱۰ فروردین ۱۳۹۴	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۷۱	۰/۵۰

رابطه قوی همبستگی خطی بین غلظت کربن آلی و رسوب ($R^2 = 0.97$) ($p < 0.001$) نشان‌دهنده همبستگی مستقیم و معنی‌داری میان عوامل ذکر شده است (جدول ۶). این یافته نیز بر همسویی روند تغییرات مقادیر کربن آلی و رسوبات معلق در مقیاس زمانی ماهانه دلالت دارد. دلیل این همسو بودن را می‌توان بر دارا بودن ماده آلی بیشتر در خاک سطحی محتمل دانست که در طی وقایع بارش و شروع فرسایش به دلیل خرد شدن خاک‌دانه‌های سطحی که غنی از این عناصرند (وانگ، گوروز و استیگن، ۲۰۱۰)، میزان رسوب و ماده آلی هدررفتی بیشتر می‌شود. از طرف دیگر، کنترل‌پذیری میزان ماده آلی توسط بارش (می، سرتوهدی و ماردیانتو، ۲۰۱۵) باعث می‌شود که با افزایش میزان بارندگی حمل ذرات درشت‌دانه افزایش یابد و نسبت ماده آلی به کل خاک

هدررفتی کاهش می‌یابد. همسویی روند تغییرات مقادیر کربن آلی و رسوبات معلق با یافته‌های (ساوج، یورنگ و سانچز، ۲۰۱۱) در طی دوره‌های مورد مطالعاتی آن‌ها مطابقت دارد.

۳. نتایج شبیه‌سازی رسوب

۳-۱. نتایج آنالیز حساسیت مدل SWAT نسبت به غلظت بار معلق

شبیه‌سازی رسوب با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در زمان‌های مشخص در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی صورت گرفت. داده‌های موجود که مورد استفاده قرار گرفتند، شامل ۱۰۱ داده ماهانه بار معلق مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ و ۵۵ داده بار معلق مربوط به سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ بود. دامنه عدم قطعیت و حساسیت نسبی پارامترها در هر بار شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفت و پارامترهایی که حساسیت زیادی نداشتند، به‌منظور کاهش تعداد پارامترها و افزایش سرعت شبیه‌سازی از فهرست پارامترهای مورد نظر برای واسنجی حذف شدند. پس از انجام آنالیز حساسیت برای تمام پارامترها تنها ۸ پارامتر واسنجی شد. پارامترهای حساس در مدل‌سازی غلظت رسوب به‌همراه حدود و توضیحات آن‌ها در جدول ۹ مشخص شده‌اند. در این جدول نیز مقادیر T-State و P-Value میزان حساسیت پارامترها را نشان می‌دهند.

جدول ۹. نتایج آنالیز حساسیت پارامترها در دوره واسنجی مدل SWAT در حوضه یلفان

پارامتر	درجه حساسیت	محدوده جدید پارامترها	مقدار بهینه	T-test	P-value
CN2.mgt	۱	۰/۴۷	۰/۴	۲/۷۳	۰/۰۲
SPCON.bsn	۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۲/۱۷	۰/۰۶
CH_EROD.rte	۳	۰/۳۰	۰/۱۴	۱/۶۶	۰/۱۳
PRF.bsn	۴	۰/۸۹	۰/۵۱	-۱/۰۳۲	۰/۳۳
SPEXP.bsn	۵	۱/۴۸	۱/۱۸	۰/۹۶	۰/۳۶
ADJ_PKR.bsn	۶	۱/۹۸	۱/۳۳	۰/۷۵	۰/۴۷
USLE_P.mgt	۷	۰/۸۹	۰/۳۳	-۰/۶۴	۰/۵۳
LAT_SED.hru	۸	۱۶۹/۳۰	۹۱/۰۶	۰/۴۶	۰/۶۵

براساس جدول ۹ مشخص می‌شود که پارامتر شماره منحنی در شرایط رطوبتی (CN2.mgt) حساس‌ترین پارامتر در شبیه‌سازی رسوب بود. پارامترهای روندیابی رسوب در کانال (SPCON.bsn) و فرسایش‌پذیری کانال (CH_EROD.rte) به‌ترتیب در رده دوم و سوم حساسیت قرار دارند. به‌طورکلی، نتایج نهایی ارائه‌شده در مدل تا حدود زیادی بستگی به تغییرات و حدود اولیه پارامترهای مشخص شده بستگی دارد. با توجه به اینکه جزئیات کمی در مورد اطلاعات دقیق مربوط به فرایند آنالیز حساسیت در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در منابع مختلف علمی وجود دارد (اوند، کاتو و تاناکا، ۲۰۰۷)، پارامترهای حساس شناسایی شده در این مطالعه در مطالعات جان‌زاده، فرخزاده و ایلدرمی (۱۳۹۱) و ساوج، یورنگ و سانچز (۲۰۱۱) و ویجیاک، مالاگو و بورائوی (۲۰۱۵) نیز جزء پارامترهای حساس بودند.

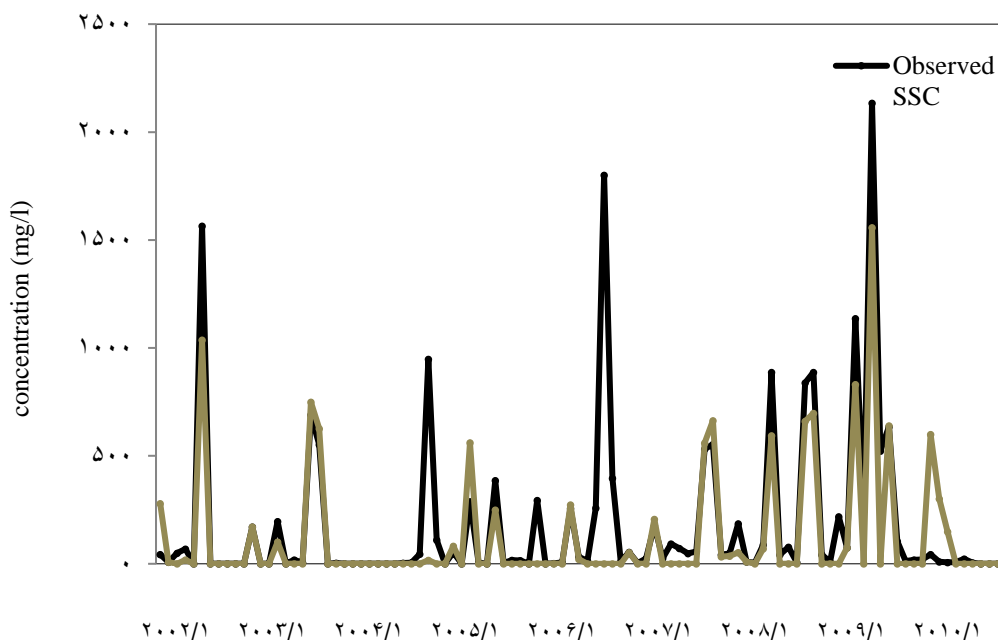
۳-۱-۱. نتایج شبیه‌سازی بار معلق در مرحله واسنجی

واسنجی مدل در دو مرحله انجام پذیرفت: ابتدا واسنجی دبی و سپس واسنجی رسوب. برای شبیه‌سازی رسوب در ابتدا پارامترهای مربوط به رواناب روزانه بعد از انجام واسنجی ثابت شدند و سپس آنالیز حساسیت پارامترهای رسوب صورت گرفت؛ چراکه مطلوبیت شبیه‌سازی رسوب وابسته به کیفیت شبیه‌سازی دبی است. نتایج واسنجی بار معلق در جدول ۱۰ و شکل ۱۲ آمده است. با توجه به جدول ۱۲ شاخص NS برابر ۰/۵۶ و R-factor و P-factor به‌ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۶۱ است که در محدوده قابل قبول قرار دارند (عباسپور، یانگ و ماکسیموف، ۱۳۸۵). همچنین مقادیر R^2 برای بار معلق مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برابر ۰/۵۹ به دست آمد که نشان از صحت مدل‌سازی در دوره واسنجی است (ابراهیمی، رفاهی و علی‌اکبر، ۱۳۹۰) با توجه به شکل ۱۲ نتایج

مدل در اکثر روزهای سال‌های آماری انطباق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد ولی در برخی نقاط نیز این انطباق مشاهده نمی‌شود و میزان رسوب شبیه‌سازی شده کوچک‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده است که این موضوع می‌تواند به دلیل ضعف مدل در شبیه‌سازی فرایندهای مربوط به ذوب برف در حوضه باشد. این امر باعث می‌شود مدل توانایی دقیق شبیه‌سازی نقاط اوج را نداشته باشد. این موضوع در کارهای محققان دیگر چون یافته‌های ساوج، یورنگ و سانچز (۲۰۱۱) نیز مشاهده شد. در تعداد محدودی از روزهای سال‌های آماری نیز میزان بار معلق شبیه‌سازی شده بیشتر از بار معلق اندازه‌گیری شده است که این امر برای مدل ضعف محسوب نمی‌شود، زیرا می‌تواند به عنوان یک ضریب اطمینان در زمان وقوع پیوستن سیلاب در نظر گرفته شود. این مطلب با یافته‌های ساوج، یورنگ و سانچز (۲۰۱۱)، پانهالکار (۲۰۱۴) و ویجیاک، مالاگو و بورائوی (۲۰۱۵) روند مشابهی دارد. از طرف دیگر، بررسی هیدروگراف در سال‌های شبیه‌سازی اوج‌هایی را نشان می‌دهد که در هیچ‌یک از تکرارهای صورت‌گرفته توسط مدل شناسایی نشده است. احتمال خطا در داده‌های این مقادیر اوج می‌تواند باعث کاهش مقدار ناش-ساتکلیف در شبیه‌سازی‌ها گردد. به‌طور کلی، با توجه به تعداد سال‌های آماری مورد استفاده در این مطالعه تعداد کم داده‌های روزانه رسوب استفاده‌شده در مرحله واسنجی، پیوسته نبودن اطلاعات رسوب، ضعف در شبیه‌سازی جریان و شاید عدم توجه کامل مدل به فرایندهای تولید رسوب را می‌توان از عوامل مؤثر در شبیه‌سازی بار معلق توسط مدل دانست که در نهایت بر روی خروجی شبیه‌سازی شده تأثیر زیادی دارند.

جدول ۱۰. نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۲)

نام شاخص	مقادیر شاخص‌های ارزیابی
NS	۰/۵۶
R ²	۰/۵۹
P-factor	۰/۶۱
R-factor	۰/۳۶



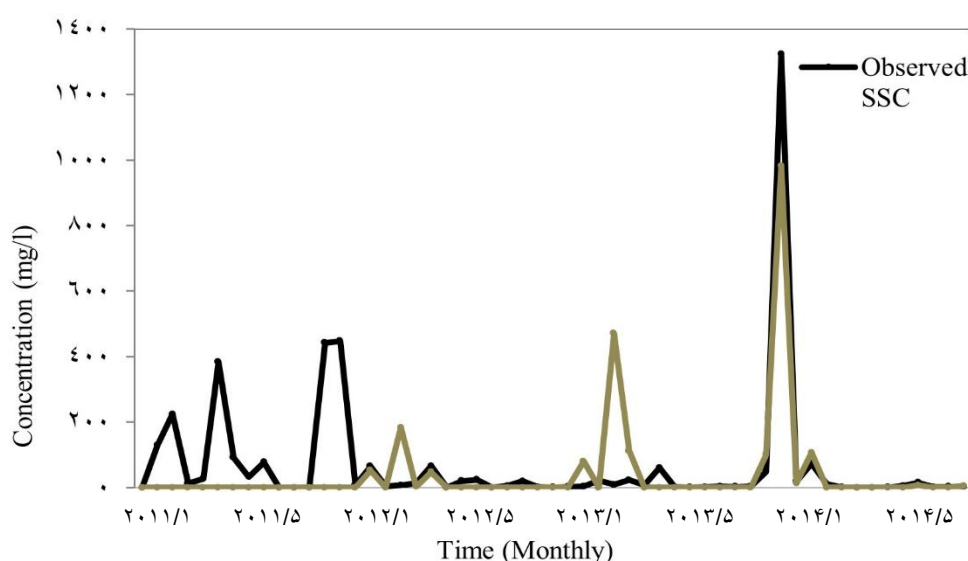
شکل ۱۲. بار معلق مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل برای دوره واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۲)

۳-۱-۲. نتایج شبیه‌سازی بار معلق در مرحله اعتبارسنجی

پس از انجام واسنجی برای بررسی اینکه مجموعه پارامترهای دوره واسنجی به‌طور مناسب انتخاب شده‌اند، اعتبارسنجی برای دوره آماری ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ صورت گرفت. نتایج اعتبارسنجی بار معلق شبیه‌سازی شده در جدول و شکل ۱۳ آورده شده است. با توجه به جدول ۱۱، شاخص‌های NS ، R^2 ، R-factor و P-factor به ترتیب ۰/۵۳، ۰/۵۵، ۰/۲۹ و ۰/۵۵ است.

جدول ۱۱. نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۱-۲۰۱۴)

نام شاخص	مقادیر شاخص‌های ارزیابی
NS	۰/۵۳
R^2	۰/۵۵
P-factor	۰/۵۵
R-factor	۰/۲۹



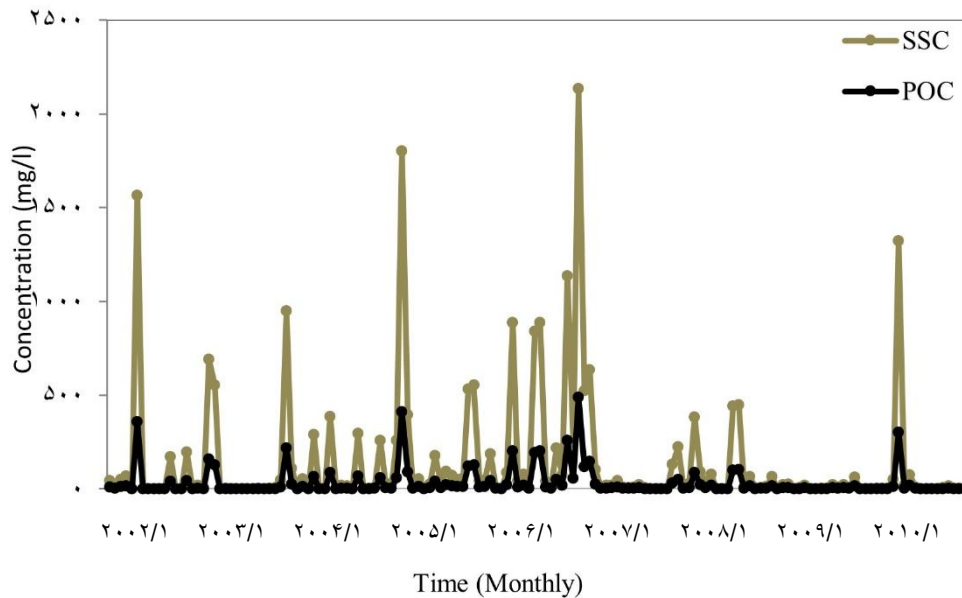
شکل ۱۳. بار معلق مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل برای دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۱-۲۰۱۴)

کیفیت برازش مدل در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی تا اندازه‌ای کاهش یافته است (شکل ۱۳ و جدول ۱۱). با توجه به جدول ۱۳ ضریب ناش-ساتکلیف کاهش سه‌درصدی نسبت به مرحله واسنجی داشته است. مقدار R-factor در این دوره نسبت به مرحله واسنجی کاهش یافته که نتیجه خوبی است. هرچند مقدار P-factor نیز در مقایسه با مرحله واسنجی کاهش یافته، با توجه به اینکه مقادیر بالاتر از ۰/۵۰ برای P-factor مطلوب هستند (عباسپور، یانگ و ماکسیموف، ۱۳۸۵)، مقدار P-factor در این مرحله نیز رضایت‌بخش است.

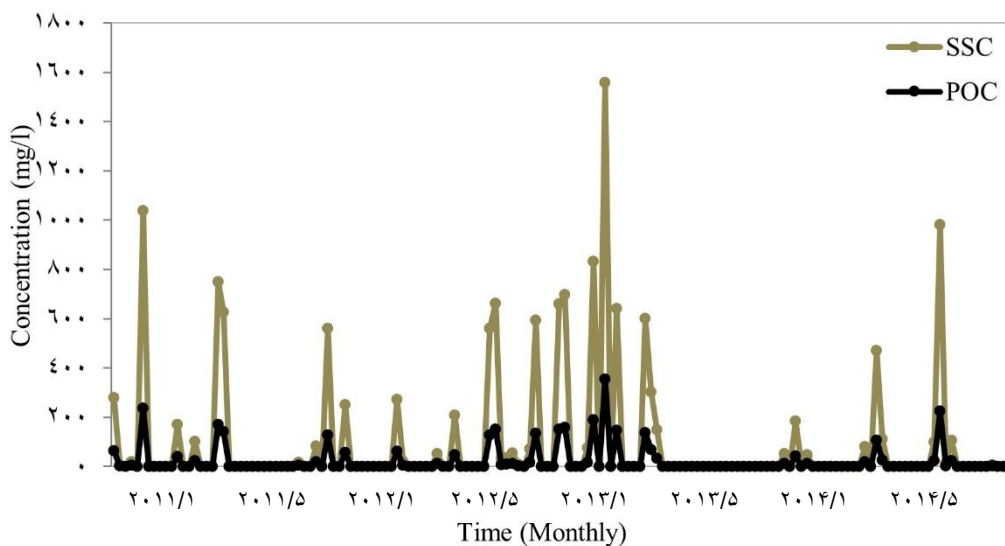
۲-۳. شبیه‌سازی کربن آلی ذره‌ای (POC) طی دوره ۱۳ ساله (۲۰۰۲-۲۰۱۴)

همان‌طور که گفته شد، پس از واسنجی و اعتبارسنجی بار معلق توسط مدل SWAT، میزان هدررفت کربن آلی ذره‌ای از داده‌های رسوب معلق شبیه‌سازی شده برای دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ با استفاده از مدل رگرسیونی خطی برازش داده شده محاسبه شد. همچنین شایان ذکر است که همانند کربن آلی ذره‌ای شبیه‌سازی شده، از آمار رسوب مشاهداتی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ و رابطه رگرسیونی، مقادیر کربن آلی آن‌ها نیز تخمین زده شد. نتایج مربوط به آن در اشکال ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده است. میزان کل هدررفت کربن آلی تخمینی و بار معلق مشاهداتی در این دوره مطالعاتی به ترتیب برابر ۵۰۴۱/۳۸، ۲۲۱۰۲/۱۱ و متوسط هدررفت کربن آلی ۳۲/۳۱ میلی‌گرم در لیتر است، درحالی‌که کل بار معلق شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT، میزان کل کربن آلی حاصل از رابطه رگرسیونی و بار معلق شبیه‌سازی شده و متوسط کربن آلی هدررفتی معادل ۱۴۱۴۷/۹۹، ۳۲۲۷/۱۱ و ۲۰/۶۸

میلی گرم در لیتر به دست آمد. بالاترین میزان کربن آلی تخمینی، ۴۸۶/۹۲ میلی گرم در لیتر است که مربوط به ۲۳ آپریل سال ۲۰۱۰ است، درحالی که با توجه به بار معلق شبیه‌سازی شده توسط مدل و رابطه ۴ مقدار شبیه‌سازی شده آن در همان روز ۳۵۵/۳۸ میلی گرم پیش‌بینی شد. کمترین میزان هدررفت کربن آلی در برخی روزها به دلیل پایین بودن میزان رسوب شبیه‌سازی شده منفی تخمین زده شد که به علت غیرواقعی بودن عدد منفی درخصوص هدررفت کربن آلی در طبیعت این اعداد برابر صفر فرض شدند.



شکل ۱۴. غلظت بار معلق مشاهداتی (SSC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) تخمین زده شده در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۲



شکل ۱۵. غلظت بار معلق (SSC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) شبیه‌سازی شده در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۲

مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده کربن آلی و رسوب معلق از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ نشان می‌دهد تغییرات غلظت کربن آلی و رسوب معلق مشاهده شده و شبیه‌سازی شده روند مشابهی دارند، اما درصد و تناسب این تغییرات همانند بازه زمانی ۱۱ ماهه به یک میزان نبوده است. با تکیه بر میزان رسوب منتقل شده می‌توان بیان کرد که عامل فرسایش در کاهش مواد آلی خاک حوضه یلفان بسیار تأثیرگذار بوده است؛ این موضوع با یافته‌های اوندا، کاتو و تاناکا، (۲۰۰۷) مطابقت دارد. از طرفی با توجه به شکل ۱۴ و ۱۵ در این دوره ۱۳ ساله، افزایش مقادیر رسوب، سهم نسبی زیاد هدررفت مواد آلی را به همراه داشته است.

همچنین ارتباط معنی‌دار روند مذکور بین رسوب معلق و ماده آلی خروجی از حوزه آبخیز را تأیید می‌کند که نتایج این بخش نیز با یافته‌های ساوج، یورنگ و سانچز (۲۰۱۱) مطابقت دارد. با توجه به مقادیر حاصل از شبیه‌سازی کربن آلی و بار معلق و همچنین آمار مشاهداتی در دسترس می‌توان گفت کربن آلی $22/8$ درصد از میزان رسوب حمل‌شده را شامل می‌شود. فرسایش خاک اثر مهمی در هدررفت ماده آلی در حوزه آبخیز یلفان، همدان دارد. همچنین رسوبات معلق موجود در جریان، زمینه‌ساز انتقال ماده آلی موجود در سطح حوضه هستند که عواقب ناخوشایندی را به دنبال خواهد داشت. هرچند که در این تحقیق ارتباط بین کربن آلی و دبی مورد بررسی قرار نگرفت، باید دانست که غلظت ماده آلی توسط دبی نیز کنترل می‌گردد و ممکن است ارتباط معنی‌دار و مثبتی بین این دو متغیر در منطقه مورد مطالعه وجود داشته باشد؛ لذا نباید نقش آن را نادیده گرفت (کهیادی، نورجانی و هاریونو، ۲۰۱۱).

بحث و نتیجه‌گیری

۱. بررسی روابط رگرسیونی غلظت رسوب معلق (SSC) و کربن آلی ذره‌ای (POC)

با توجه به اینکه تاکنون اقدام به اندازه‌گیری POC در حوضه مورد نظر نشده است و با در نظر گرفتن چالش‌هایی که در فرایند نمونه‌برداری رسوبات معلق و ذرات کربن آلی وجود داشت و همچنین نبود بارش کافی در منطقه مورد مطالعه طی دوره نمونه‌برداری، در این مطالعه تنها ۱۱ بار اقدام به نمونه‌گیری شد. بخشی از نتایج این مطالعه نشان داد که روابط رگرسیونی بین مقدار رسوب و کربن آلی حاصل از نمونه‌برداری این حوزه آبخیز می‌تواند ($R^2=0/97$) برای تخمین میزان هدررفت کربن آلی برای حوضه مذکور در دوره‌های آتی نیز مورد استفاده قرار گیرد که باعث عدم تکرار اندازه‌گیری‌ها و صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود. البته استفاده از این معادله رگرسیونی برای استفاده در بازه‌های زمانی دیگر باید با نتایج مشاهداتی حاصل‌شده در همان بازه‌های زمانی تطابق داده شود. نمونه‌گیری‌های تصادفی در فواصل زمانی مورد نظر نیز برای اعتبارسنجی معادله رگرسیونی پیشنهاد می‌گردد.

۲. برآورد هدررفت کربن آلی ذره‌ای در حوضه یلفان با استفاده از مدل SWAT

در حوضه یلفان که بخش گسترده آن را اکوسیستم‌های مرتعی تشکیل می‌دهد، ویژگی‌هایی همچون شیب متوسط بیش از ۲۸ درصد، تغییرات کاربری دیم به اراضی رهاشده (جانزاده، فرخزاده و ایلدرمی، ۱۳۹۱) و ضعیف شدن پوشش گیاهی مراتع بر اثر فشار چرای دام (چن، یوکیانگ و آوادا، ۲۰۱۲) باعث کاهش حاصلخیزی خاک و افزایش هدررفت مواد آلی و کربن آلی می‌گردند. لذا مطالعه بار معلق رسوب و هدررفت کربن آلی در راستای مدیریتی جامع حوزه‌های آبخیز ضروری به نظر می‌رسد. برای دستیابی به هدف ذکرشده استفاده از مدلی که بتواند با توجه به داده‌های در دسترس نتایج واقع‌بینانه‌ای را در اختیار کاربر قرار دهد ضروری است. در این مطالعه سعی شده است میزان هدررفت کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های بار معلق شبیه‌سازی‌شده از مدل SWAT محاسبه گردد. با توجه به داده‌های مورد نیاز موجود، آمار ۱۵ ساله از سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ برای این مطالعه در نظر گرفته شد که دوره گرم کردن مدل برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ اجرا شد. برای ارزیابی کارایی مدل در حوزه مذکور از توابع هدف شامل ضریب ناش-ساتکلیف، ضریب تبیین، R-factor و P-factor استفاده شد که در مرحله واسنجی به ترتیب برابر با $0/60$ ، $0/54$ و $0/32$ بوده و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر $0/67$ ، $0/59$ و $0/39$ و ضریب تعیین (R^2) در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی $0/63$ و $0/66$ به دست آمد. با توجه به منابع مختلف نتایج قابل قبول ارزیابی شدند (موریاسی، آرنولد و ونلیو، ۲۰۰۷؛ ژو، پانگ و لیو، ۲۰۰۹). شایان ذکر است در حوضه مورد مطالعه برای کل دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ۱۵۶ نمونه بارمعلق جمع‌آوری شده که بعضی از این نمونه‌ها در مواقع غیر سیلابی تهیه شده‌اند و این تعداد نمونه بالطبع نمی‌تواند اثر شبیه‌سازی رواناب بر رسوب را به خوبی نشان دهد. با توجه به میزان هدررفت کربن آلی خاک در این تحقیق می‌توان اظهار داشت فرسایش خاک موجب افزایش غنی‌شدگی رسوبات از کربن و انتقال آن (ویجیاک، مالاگو و بوراٹوی، ۲۰۱۵) می‌گردد. مطالعات مختلف برای درک بهتر چرخه جهانی کربن آلی نگرانی خود را از حمل‌ونقل کمی رسوب و کربن توسط جریان‌ات آبی ابراز

کرده‌اند (لی، پارک و پارک، ۲۰۱۰) هدررفت کربن آلی خاک باعث کاهش پتانسیل ترسیب کربن می‌شود (چن، یوکیانگ و آوادا، ۲۰۱۲). از طرف دیگر، کاهش پتانسیل ترسیب کربن در درازمدت با کاهش ماده آلی اثرات مستقیم و چشمگیری بر خواص خاک، کیفیت تولید پوشش گیاهی، محیط‌زیست و تنوع زیستی بر جای می‌گذارد که نتیجه آن تخریب اکوسیستم‌های طبیعی از جمله مراتع است. وجود پوشش گیاهی در سطح یک حوضه به دلیل تأییراتی که بر اجزای سیکل هیدرولوژی حوضه می‌گذارد، از عوامل کاهش‌دهنده سیل‌خیزی است. بنابراین نقش و تأثیر پوشش گیاهی بر افزایش نفوذ آب باران به خاک و کاهش میزان رواناب و فرسایش خاک از یک طرف و تأییری که وجود ماده آلی در خاک بر پوشش گیاهی دارد (می، سرتوه‌دی و ماردیاتنو، ۲۰۱۵). از سوی دیگر، جزء مباحث اساسی حفاظت خاک و آبخیزداری هستند و از آنجاکه براساس نقشه کاربری اراضی استفاده‌شده در این پژوهش ۷۱/۷۰ درصد از اراضی حوضه مذکور را مراتع تشکیل می‌دهد، می‌توان گفت نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق متأثر از وجود اکوسیستم‌های مرتعی موجود در سطح حوضه در طی این دوره مطالعاتی است و برای کاهش میزان فرسایش و هدررفت کربن آلی و افزایش پتانسیل ترسیب کربن، مناسب‌ترین راه‌حل ایجاد و تقویت پوشش گیاهی و حفاظت آن است که این امر به‌نوبه خود باعث افزایش مواد آلی در خاک می‌گردد. نتایج حاصل از آنالیز بارمعلق و کربن آلی در این پژوهش نشان داد که بین این دو متغیر ارتباط مثبت قوی و معنی‌داری وجود دارد ($R^2 = 0.97$). بنابراین، استفاده از داده‌های بارمعلق در مطالعه و پیش‌بینی هدررفت کربن آلی قابل استناد است. در مناطقی که اکوسیستم‌های مرتعی مانند حوضه یلفان همدان غالب‌اند، بخش عمده‌ای از کربن آلی خاک (SOC) طی رخدادهای رواناب به حرکت درمی‌آید. معمولاً بار معلق که شامل ذرات رسوبی ریز است، حاوی بخش زیادی از ماده آلی فرسایش‌یافته است. از آنجاکه بارمعلق و هدررفت کربن آلی هر دو نشان‌دهنده مقدار خاک جابه‌جاشده و ماده آلی همراه آن است، اندازه‌گیری‌های بار معلق می‌تواند شاخصی قابل اعتماد از هدررفت کربن آلی حوضه آبخیز ارائه دهد. در مطالعات اخیر (لی و کیم، ۲۰۲۴؛ جونز و براون، ۲۰۲۴). نیز همبستگی تولید رسوب ناشی از رواناب با هدررفت کربن آلی، به‌ویژه در حوضه‌های آبخیز با پوشش گیاهی ثابت، تأیید شده است. داده‌های بار معلق اندازه‌گیری عملی و مقرون‌به‌صرفه‌ای را برای بررسی تغییرات هدررفت کربن آلی ناشی از تغییرات فصلی یا رویدادهای روانابی ارائه می‌دهد (اسمیت، دوی و وایت، ۲۰۲۴). در مورد حوضه یلفان، جایی که کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی بین سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ ناچیز بوده، بار معلق و دینامیک فرسایش حوضه تغییرات هدررفت کربن آلی را منعکس کرده است.

بررسی روند تغییرات میزان هدررفت کربن آلی در مقیاس زمانی ماهانه نشان داد که هدررفت ماهانه کربن آلی در فاصله زمانی فروردین ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۴ تغییرات معنی‌داری از خود نشان نداده است ($p > 0.05$)؛ لذا تغییرات ماهانه هدررفت کربن آلی در حوزه یلفان مشاهده نشد. عدم تغییرات معنی‌دار هدررفت کربن آلی (OC) در حوزه یلفان طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۴، به‌رغم اینکه ۷۱ درصد از کاربری اراضی آن را اکوسیستم‌های مرتعی تشکیل می‌دهد، می‌توان ناشی از عوامل متعددی دانست. عدم تغییر کاربری اراضی و مدیریت در این حوضه به ثبات سطح کلی ذخایر OC کمک کرده است (اسمیت، دوی و وایت، ۲۰۲۴). غالب بودن کاربری مرتعی و وجود پوشش گیاهی چندساله در این مراتع، تاحدی فرسایش خاک را کاهش داده و از دست رفتن کربن آلی از طریق رواناب و انتقال رسوب را به حداقل رسانده است. این پوشش حفاظتی به حفظ ساختار خاک و محتوای مواد آلی کمک می‌کند (جونز و براون، ۲۰۲۴). از طرفی طبق آمار منتشرشده در پورتال اداره کل هواشناسی استان همدان، متوسط بارندگی طی دوره مطالعه با کاهش چشمگیری نسبت به میانگین بلندمدت ایستگاه همراه بوده است. این امر منجر به نرخ‌های کاهش و یکنواخت رواناب و انتقال رسوب شده و در نتیجه تغییرات هدررفت کربن آلی در این دوره معنی‌دار نبوده است.

در مجموع به نظر می‌رسد که مدل SWAT ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی هدررفت کربن آلی (OC) در حوضه آبخیز است. نتایج تحقیق حاضر به شرایطی که تغییرات کاربری فاحشی رخ نداده، به‌ویژه هنگامی که با کاربری مرتعی سروکار داریم، قابل تعمیم است. توانایی این مدل در یکپارچه‌سازی عواملی مانند کاربری زمین، خصوصیات خاک، و شرایط اقلیمی، امکان تجزیه و تحلیل جامعی از پویایی‌های OC را فراهم می‌کند. با شبیه‌سازی فرسایش، انتقال رسوب و رواناب، مدل SWAT توانایی بررسی تغییرات هدررفت کربن آلی از حوضه آبخیز را دارد. علاوه بر این، استفاده از داده‌های بار معلق به‌عنوان شاخصی برای مطالعه انتقال کربن آلی در حوضه آبخیز پیشنهاد می‌گردد. به‌طور کلی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق، پیشنهاد می‌شود

به منظور مدیریت جامع منطقه مورد مطالعه، اثر تغییرات اقلیم بر هدررفت کربن آلی با استفاده از مدل SWAT، بررسی راه کارهای مناسب برای افزایش ذخیره کربن آلی و اعمال مدیریت صحیح پژوهش‌هایی صورت گیرد و همچنین یک دوره داده پیوسته و دقیق دبی و رسوب برای دوره‌های آتی تهیه شود و دقت مدل مورد نظر برای حوزه آبخیز بزرگ‌تر یعنی سد اکباتان که دربرگیرنده حوضه یلفان، همدان است، واسنجی و اعتبارسنجی شود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش تحت حمایت دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست دانشگاه ملایر انجام شده است.

References

- Abbaspour, K.C. (2009). *User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs*. Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 95 p. (in Persian)
- Abbaspour, K.C. (2014). SWAT-CUP 2012. SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. eawag, Zurig, 105 p. (in Persian)
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., & Mieleitner, J. (2007). Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333, 413- 430. (in Persian)
- Abbaspour K. C., Vejdani M., & Haghghat, S. (2019). Application of SWAT model in water allocation planning. *Water Resources Research*, 45(5), 1034-1052. (in Persian)
- Amani, S., Junidi Jafari, H., & Chepi, K. (2013). *Evaluation of ecological potential for tourism use using GIS (case study of the central part of Marivan city)*. The third national conference of Iran's natural resources research focusing on the environment, 120p. (in Persian)
- Arnold, J. G., Williams, J. R., & Maidment, D. R. (1995). Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydrauliv Engineering*, 183(2), 121-135.
- Bagherifam, S., Karimi, A.R., Lekzian, A., & Izanlou, A. (2012). The effect of land management on changes in soil organic carbon, particle size distribution and grain soil stability during several toposequences in the semi-arid areas of North Khorasan. *Journal of Water and Soil Protection Research*, 20(4), 51-73. (in Persian)
- Bilgo, A., Serpantie, G., Masse, D., Fournier, J., & Hien, V. (2005). *Carbon, nitrogen, and fine particles removed by water erosion on crops, fallows, and mixed plots in Sudanese savannas (Burkina Faso)*. In: Roose, E.R., R. Lal, C. Feller, B. Barthes, and B.A. Stewart (eds.), *Soil erosion and carbon dynamic*. CRC press, Boca Raton, (pp.125-142).
- Boll, J., Brooks, E. S., Easton, Z. M., & Steenhuis, T. S. (2024). *Comparison of WEPP and SWAT for watershed hydrology and erosion prediction*. International Symposium on Erosion and Landscape Evolution, 11, Article 11087.
- Busico, G., Lamouroux, N., & Henry, C. (2024). Advances in SWAT modeling for sediment and nutrient load assessment in agricultural landscapes. *Journal of Hydrological Engineering*, 29(1), 1090-1104.
- Cahyadi, A., Nurjani, E., Haryono, E., & Enky Nugraha, H. (2011). Estimation of Soil organic carbon loss by runoff and It's role on management of ungauged watershed. Proceedings of International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (3rd APTECS), Surabaya, (pp. 609-613).
- Cambardella, C.A., Gajda, A.M., Doran, J.W., Wienhold, B.J., & Kettler, T.A. (2001). Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition., In: Lal, R., Kimble, J.M.m Follett, R.F., and Stewart, B.A., (eds.), *Assessment methods for soil carbon*. CRC, Boca Raton, FL, (pp. 349-359).
- Chen, Y., YuQiang, L.I., Awada, T., HAN, J., & Qing, Y. (2012). Carbon sequestration in the total and light fraction soil organic matter along a chronosequence in grazing exclosures in a semiarid degraded sandy site in China. *Journal of Arid Land*, 4(4), 411–419.
- Consulting Engineers for Abriz Project. (2007). *Detailed-implementation studies of Ekbatan Dam watershed management*. Hamedan Province Watershed Natural Resources Directorate.
- Derner, J.D., & Schuman, G.E. (2007). Carbon sequestration and rangelands: A synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62(2), 77-85.

- Ebrahimi, R., Refahi, H. Q., Ali-Akbar, A., & Mirnia, S. Kh. (2012). Investigating the loss of highly consumed nutrients due to soil erosion in sloping lands under tea cultivation in the east of Gilan province. *Journal of research and construction*, 15(1), 85-76. (in Persian)
- Jain, S. K., Tyagi, J., & Singh, V. (2010). Simulation of runoff and sediment yield for a himalayan watershed using SWAT model. *Water Resource and Protection*, 2, 267-281.
- Janzadeh, R., Farkhzadeh, B., Ilderami, A., & Akhan, S. (2013). Investigating the effect of land use change on runoff and suspended load using the SWAT model (case study: Yelfan watershed). Malayer University, Iran. (in Persian)
- Jones, A., & Brown, B. (2024). Vegetation cover and soil erosion: A comprehensive study. *Environmental Science Journal*, 45(3), 234-245.
- Kavian, A., Asgarian, R., Jafarian Jolodar, Z., & Bahman Yar, M.A. (2012). The effect of soil characteristics on the production of runoff and sediment on a farm scale (a case study of a part of agricultural lands around Sari city). *Danesh Water and Soil Science*, 23(4), 45-57. (in Persian)
- Khanlari, A., Tamertash, R., & Tatian, M.R. (2012). Investigating the effect of Qarq on the potential of carbon deposition in the pastures of Sarkhkalai Sari. *Journal of Man and Environment*, 26, 27-35. (in Persian)
- Kim, J.G., Park, Y., Yoo, D., Kim, N.W., Engel, B.A, Kim, S.J. (2009). Development of a SWAT patch for better estimation of sediment yield in steep sloping watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), 963-972.
- Kirkels, F.M.S.A., Cammeraat, L.H., & Kuhn, N.J. (2014). The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes- A review of different concepts. *Geomorphology*, 226, 94-105.
- Lee, M., Park, G., Park, M., Park, J.Y., Lee, J., Kim, S. (2010). Evaluation of non-point source pollution reduction by applying best management practices using a SWAT model and quickbird high resolution satellite imagery. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6), 826-833.
- Lee, C., & Kim, D. (2024). Soil texture and organic carbon retention: Implications for erosion control. *Soil Science Review*, 28(2), 112-120
- Martinez-Zavala, L., & Jordan Lopez, A. (2008). Bellinfante N. Seasonal variability of runoff and soil loss on forest road backslopes under simulated rainfall. *Catena*, 74, 73-79.
- Mello, C. R., Viala, M. R., Norton, L. D., Silva, A. M., & Weimar, F. A. (2008). Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basian. *Catena*, 75, 235-247.
- Mey, D., Sartohadi, J., Mardiatno, D., & Marfai, M. A. (2015). Prediction of soil organic carbon loss due to erosion in Girindulu Watershed of Central Java. *Journal of Degraded and Mining Lands*, Management, 2(3), 327-334.
- McDowell, W.H., & Asbury, C.E. (1994). Export of carbon, nitrogen, and major ions from three tropical montane watersheds. *Journal of Oceanography*, 39, 111-125.
- Mortenson, M.C., Schuman, G.E., & Ingram, L.J. (2004). Carbon sequestration in rangelands interseeded with Yellow-Flowering Alfalfa (*Medicago sativa* ssp. *falcata*). *Environmental Management*, 33, 475-481.
- Moriyasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. (2007). Modele valuation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 50(3), 885-900.
- Mapes, K. L., & Pricope, N. G. (2024). Evaluating SWAT model performance for runoff, percolation, and sediment loss estimation in low-gradient watersheds. *Hydrology*, 7(2), Article 21.

- Naramangam, S. (2008). *Modeling the impacts of agricultural management practices on water quality in the little Miami River Basin*. Doctorate of Philosophy (ph.d): Geography. University of Cincinnati, 217p.
- Ndiaye, M., Bossa, A. Y., Diekkrüger, B., Schütt, B., & Hiepe, C. (2018). SWAT applications in developing countries: Challenges and perspectives in the West African Sahel. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 10(4), 605-614.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). Soil and water assessment tool theoretical documentation. Blackland Research Center, *Texas Agricultural Experiment Station*, 494 p.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King, K. W. (2002). *Soil and water assessment tool: Theoretical documentation*. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 458p.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King, K. W. (2011). *Soil and water assessment tool. theoretical documentation: Version 2009*. Grassland, soil and water research laboratory. Agricultural Research Service.
- Noor, H., Mirnia, S., & Raisi, M.B. (2009). Estimation of loss of soil organic matter in Hyrcanian ecosystems (case study: Kejur watershed). *Environmental Science*, 8(1), 107-114. (in Persian)
- Noor, H., & Mirnia, S.Kh. (2010). Loss of soil organic matter in Kajur watershed. *Water and Soil Conservation Research*, 18(3), 207-211. (in Persian)
- Onda, Y., Kato, H., Tanaka, Y., Tsujimura, M., Davaa, G., & Oyunbaatar, D. (2007). Analysis of runoff generation and soil erosion processes by using environmental radionuclides in semiarid areas of Mongolia. *Journal of Hydrology*, 333, 124-132.
- Salehi, S., Nouri, H., Ilderami, A.R., & Chepi, K. (2013). *Investigating the effect of different rainfall intensities on runoff simulation using SWAT model (case study: Green Dam watershed)*. Malayer University, Iran, 85p. (in Persian)
- Panhalkar, S.S. (2014). Hydrological modeling using SWAT model and geoinformatic techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.03.001>.
- Sauvage, S., Oeurng, C., & Sánchez-Pérez, J.M. (2011). Assessment of hydrology, sediment and yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 401, 145-153.
- Schumacher, B.A. (2002). *Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments, Ecological Risk Assessment Support Center Office of Research and Development US*. Environmental Protection Agency, NV 89193-3478, 1-25.
- Smith, J., Doe, R., & White, L. (2024). Sustainable rangeland management and carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 50(4), 567-575.
- Tijjani, S. B., Qi, J., Giri, S., & Lathrop, R. (2023). Modeling land use and management practices impacts on soil organic carbon loss in an agricultural watershed in the Mid-Atlantic region. *Water*, 15(20), 3534.
- Tolson, B.A., & Shoemaker, C.A. (2004). *Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville reservoir*. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell Univ, 159p. Ithaca, N. Y.
- Vigiak, O., Malago, A., Bouraoui, F., Vanmaercke, M., & Poesen, J. (2015). Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Science of the Total Environment*, *Science of the Total Environment*, 538, 855–875.
- Wang, Z., Govers, G., Steegen, A., Clymans, W., Van den Putte, A., Langhans, C., Merckx, R., Van Oost, K. (2010). Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area. *Geomorphology*, 124, 65-74.

- Wany, E. L., & Swaify, S.A. (1998). Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a wellaggregated and uniformly textured Oxisol. *Geoderma*, 75, 251-265.
- Winchell, M., Srinivasan, R., DiLuzio, M., & Arnold, J. (2007). *ArcSWAT Interface for SWAT2009 Users Guide*. Grassland, soil and water research service.
- Worku, Y. A., Moges, A., & Kendie, H. (2024). Comparison of SWAT and WEPP for modeling annual runoff and sediment yield in Agew Mariyam watershed, Northern Ethiopia. *International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources*, 5(1), Article.
- Wu, Y., Liu, S., Wang, X., & Arnold, J. G. (2017). Reservoir sedimentation simulation with SWAT model for watershed sedimentation studies. *Journal of Hydrology*, 16, 75-87.
- Xu, Z.X., Pang, J.P., Liu, C.M., & Li, J.Y. (2009). *Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model*. Hydrol. Process, DOI: 10.1002/hyp. P: 12.
- Yesuf, H.M., Assen, M., Alamirew, T., & Melesse, A.M. (2015). Modeling of sediment yield in maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. *Catena*, 127, 191-205.
- Zhang, F., He, X., Gao, X., Zhang, C., & Keli, T. (2005). Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the loess plateau of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108, 85–97.