



Modeling and optimization of erosion and sediment control strategies in the Fomanat region using the SWAT model

Pooria Safari Dinachali¹ | Ali Moridi² | Reza Khalili³

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: p.safaridenahali@sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_moridi@sbu.ac.ir
3. Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: re_khalili@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 7 May 2025
Received in revised form
14 July 2025
Accepted 15 August 2025
Published online 22 June 2026

Keywords:

*Flow discharge and sediment
Vegetative Filter Strip (VFS)
Erosion and sediment control
SWAT model*

ABSTRACT

Erosion and sedimentation significantly alter watershed morphology and river dynamics. While natural, excessive bed erosion can destabilize banks and increase soil loss, harming aquatic ecosystems and infrastructure. This study models and optimizes erosion control strategies in the Fomanat region (Talesh-Anzali Wetland basin) using vegetative filter strips (VFS) for sediment reduction. The SWAT model simulated the watershed, with runoff and sediment variables calibrated/validated via SUFI2 in SWAT-CUP. The Differential Evolution (DE) algorithm was then linked to SWAT for optimization, focusing on maximizing economic benefits from sediment reduction. Twenty-six decision variables including HRU-to-VFS area ratio and VFS permeability (90% flow passage) were analyzed. Results showed that VFS implementation significantly reduced sediment load while generating 82,673 million Tomans in economic benefits. Land-use changes also influenced total sediment load. Sediment removal costs (based on 2020 watershed pricing) highlighted the need for precise management, considering both financial and ecological impacts on the Anzali Wetland. Climate change effects were also integrated into the model.

Cite this article: Safari Dinachali, P., Moridi, A., & Khalili, R. (2026). Modeling and optimization of erosion and sediment control strategies in the Fomanat region using the SWAT model. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (1), 49-68. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.394722.1226>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.394722.1226>

Publisher: University of Tehran Press.



مدل سازی و بهینه سازی راه کارهای کنترل فرسایش و رسوب در منطقه فومنت با استفاده از مدل SWAT

پوریا صفری دیناچالی^۱ | علی مریدی^۲ | رضا خلیلی^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: p.safaridenahali@sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_moridi@sbu.ac.ir
۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: re_khalili@sbu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

فرسایش و رسوب گذاری تأثیرات قابل توجهی بر مورفولوژی حوضه های آبریز و دینامیک رودخانه ها دارند. اگرچه این فرایندها طبیعی هستند، تشدید فرسایش می تواند منجر به ناپایداری سواحل، افزایش اتلاف خاک و آسیب به اکوسیستم های آبی و سازه ها شود. این پژوهش به مدل سازی و بهینه سازی راه کارهای کنترل فرسایش و رسوب در منطقه فومنت (حوضه تالش-تالاب انزلی) با استفاده از فیلترهای گیاهی (VFS) پرداخته است. ابتدا حوضه آبریز با مدل SWAT شبیه سازی شد و متغیرهای رواناب و رسوب با الگوریتم SUFI2 در نرم افزار SWAT-CUP واسنجی و اعتبارسنجی گردید. سپس با اتصال الگوریتم بهینه سازی DE به مدل SWAT، فرایند بهینه سازی باهدف حداکثر سازی منافع اقتصادی ناشی از کاهش رسوب انجام شد. در این مطالعه ۲۶ متغیر تصمیم از جمله نسبت مساحت HRU به فیلتر گیاهی و نفوذپذیری فیلترها (عبور ۹۰ درصد جریان) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اجرای فیلترهای گیاهی نه تنها بار رسوبی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد، بلکه منافع اقتصادی معادل ۸۲۶،۷۳۰ میلیون ریال نیز ایجاد می کند. تغییرات کاربری اراضی نیز بر بار رسوب کل تأثیرگذار بود. محاسبه هزینه های رسوب زدایی براساس فهرست بهای سال ۱۳۹۹، لزوم مدیریت دقیق با در نظر گرفتن ملاحظات مالی و اثرات اکولوژیکی بر تالاب انزلی را نشان داد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه ها:

دبی جریان و رسوب

فیلتر گیاهی

کنترل فرسایش و رسوب

مدل SWAT

استناد: صفری دیناچالی، پوریا؛ مریدی، علی و خلیلی، رضا (۱۴۰۵). مدل سازی و بهینه سازی راه کارهای کنترل فرسایش و رسوب در منطقه فومنت با استفاده از مدل SWAT. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۱)، ۴۹-۶۸. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.394722.1226>



۱. مقدمه

پدیده فرسایش به‌عنوان سرآغاز فرایند انتقال رسوب در محیط‌های طبیعی شناخته می‌شود، این پدیده که در اثر فرایندهای طبیعی مانند بارش و جریان سطحی و همچنین فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد، باعث ناپایداری کناره‌ها و ریزش توده‌ای خاک می‌شود (Zhang *et al.*, 2023). افزایش شدت فرسایش، تغییرات قابل‌توجهی در مورفولوژی رودخانه‌ها، افزایش بار بستر، تغییر مسیر جریان و درنهایت کاهش ظرفیت انتقال آب را به‌دنبال دارد (Khalili & Moridi, 2025). در چنین شرایطی، مدیریت و کنترل فرسایش و رسوب از طریق اقدامات مؤثر و مقرون‌به‌صرفه ضروری می‌نماید (Huai *et al.*, 2021). در مناطق کشاورزی، از جمله منطقه فومنات در شمال ایران، پدیده فرسایش نه‌تنها باعث کاهش بهره‌وری خاک و از بین رفتن اراضی ارزشمند کشاورزی می‌شود، بلکه با انتقال رسوبات توسط رودخانه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان به داخل شبکه کانال‌های آبیاری و درنهایت به تالاب انزلی، تهدیدی جدی برای پایداری این اکوسیستم ارزشمند به‌شمار می‌آید. بار معلق بالای رودخانه‌ها منجر به انسداد کانال‌ها، کاهش بازده انتقال آب و ته‌نشینی در تالاب می‌شود که پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل‌توجهی به‌دنبال دارد. با توجه به موارد فوق، شناسایی و اجرای راه‌کارهایی با هزینه پایین، اثربخشی بالا و قابلیت بهینه‌سازی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر، مدل SWAT^۱ به‌عنوان ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و رسوب‌گذاری در حوضه‌های آبخیز مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل، با ترکیب داده‌های اقلیمی، خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی، قابلیت تحلیل اثر اقدامات مدیریتی را در مقیاس زمانی و مکانی داراست (Zewde *et al.*, 2024; Aboelnour *et al.*, 2025). از سوی دیگر، بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم تفاضلی (DE)^۲ در ترکیب با مدل‌های شبیه‌سازی، این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان مناسب‌ترین الگوی مدیریتی را با در نظر گرفتن قیود اقتصادی و زیست‌محیطی تعیین کرد. در این راستا، کاشت فیلترهای گیاهی به‌عنوان یکی از روش‌های غیرسازه‌ای و اقتصادی تثبیت خاک و کاهش رسوب، در مطالعات متعددی اثربخش گزارش شده و می‌تواند جایگزینی مناسب برای روش‌های پرهزینه سازه‌ای باشد (Conesa-*et al.*, 2023; Garcia *et al.*, 2023).

در پژوهش Oji *et al.* (2013)، در حوضه آبریز دریاچه زری‌بار با رویکرد شبیه‌سازی جامع SWAT، سه راه‌کار مدیریتی برتر شامل فیلتراسیون گیاهی، کنترل بار آلودگی در کانال قرلچه‌سو و کاهش مصرف کود تا ۲۵ درصد شناسایی شدند. در پژوهش Hui *et al.* (2010) با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و GIS در مدل RUSLE، مشخص شد ۳۹/۵ درصد مساحت حوضه در برابر فرسایش مقاوم است و برآورد رسوب سالانه ۱/۳۲ میلیون تن حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از مشاهدات بود. در پژوهش Cousino *et al.* (2015) اثر تغییرات اقلیمی تحت چهار سناریوی CMIP بر رواناب، رسوب و مواد مغذی در حوضه Maumee بررسی شد؛ اگرچه بارش تا ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد، تبخیر بیش‌تر سبب کاهش دبی و در نتیجه کاهش بار رسوب و مواد مغذی می‌شود.

در مطالعه Santhi *et al.* (2001) با دو سناریوی پارامتری در SWAT، سناریوی دوم ($R^2=0.05$ ، $NSE=0.63$ ، 0.91) برای برآورد رسوب ورودی به سد مناسب‌تر یافت شد و نرخ فرسایش خاک حدود ۳۹۴۴.۸۳۵ تن در کیلومتر مربع محاسبه گردید. در پژوهش Ouallali *et al.* (2020) در حوضه مدیترانه‌ای شمال غرب مراکش، مدل SWAT (۲۰۱۲) با روش بهینه‌سازی چندهدفه-۲SUFI کالیبره و اعتبارسنجی شد؛ نتایج نشان‌دهنده همبستگی معنادار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهدات جریان و رسوب بود.

Bibi & Adem (2023) در یک مطالعه در حوضه Upper Gilo با استفاده از مدل SWAT و معادله MUSLE، تولید رسوب سالانه ۱۰۲۱.۸ تن برآورد شد و ۱۷ زیرحوضه به‌عنوان مناطق بحرانی شناسایی گردید. نتایج نشان داد که اعمال

اقدامات مدیریتی مانند نوارهای فیلتر، تراس‌بندی و کشت در خطوط تراز می‌توانند رسوب را تا بیش از ۵۰ درصد کاهش دهند. این یافته‌ها اثربخشی بالای BMPها را در کنترل فرسایش و مدیریت حوضه تأیید می‌کند. (Quamar *et al.* (2025) در یک مطالعه عملکرد مدل SWAT را در شبیه‌سازی جریان و رسوب در حوضه رودخانه Song بررسی نمودند. مدل با استفاده از داده‌های میدانی جدید (۲۰۲۲-۲۰۲۳) و تحلیل حساسیت ۱۳ پارامتر، با دقت بالایی کالیبره و اعتبارسنجی شد ($R^2=0.77$ برای جریان، $R^2=0.70$ برای رسوب). نتایج نشان دادند که SWAT می‌تواند در مناطق کم داده، ابزاری مؤثر برای مدیریت منابع آب و کنترل رسوب باشد. در مطالعه حاضر، با هدف ارائه راه‌کاری کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و علمی برای کاهش رسوب در منطقه فومنات، ترکیبی از مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و رسوب با مدل SWAT و الگوریتم بهینه‌سازی DE به کار گرفته شده است. تمرکز این پژوهش بر بهینه‌سازی کاشت فیلترهای گیاهی در ۱۳ زیرحوضه واقع در حوضه تالش-تالاب انزلی بوده که بخش زیادی از رواناب و رسوبات از طریق رودخانه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان وارد کانال‌های آبیاری سنتی منطقه و در نهایت تالاب انزلی می‌شود. اگرچه مطالعات متعددی در زمینه کنترل رسوب انجام شده، اما تاکنون راه‌کار مشخص و بهینه‌شده‌ای برای کاهش رسوب در این منطقه حساس ارائه نشده است. در پژوهش حاضر، ضمن تحلیل سه سطح کنترل رسوب (کلان، بازه‌ای و موضعی)، تمرکز بر کنترل بازه‌ای و موضعی بوده که می‌تواند به کاهش رسوب، حفظ کارایی کانال‌های آبیاری، ارتقاء بهره‌وری کشاورزی و در نهایت حفاظت از تالاب انزلی منجر شود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه آبریز تالش- مرداب انزلی که حدفاصل بین مرداب انزلی تا تالش را شامل می‌شود، بخشی از حوضه آبریز دریای مازندران است. این زیرحوضه با مساحت ۶۸۴۰ کیلومتر مربع، شامل ۶۴/۴ درصد مناطق کوهستانی و ۳۵/۶ درصد نواحی کوهپایه‌ای و دشتی است. رودخانه‌های مهم این منطقه، مانند پیرسرا و قلعه‌رودخان، سالانه به ترتیب ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ تن رسوب تولید می‌کنند که باعث تغییر اکولوژی تالاب انزلی و افزایش هزینه‌های رسوب‌زدایی می‌شود. در این منطقه ۶۱ ایستگاه هواشناسی فعال است که شامل ایستگاه‌های متعلق به وزارت نیرو (۱۳ ایستگاه تبخیرسنجی و ۲۱ ایستگاه باران‌سنجی) و سازمان هواشناسی کشور (سه ایستگاه سینوپتیک، ۱۱ ایستگاه کلیماتولوژی و ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی) می‌شود (Rahimi, 2021) (شکل ۱).

۲.۱.۱. وضعیت بارش

جهت بررسی وضعیت بارندگی منطقه از جدول اطلاعاتی بارش ایستگاه‌ها شامل متوسط بارندگی سالانه، ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها جهت ترسیم وضعیت بارش منطقه در محیط GIS استفاده گردید. رژیم بارندگی این حوضه شبه مدیترانه‌ای است و مقدار بارندگی ماهانه از ۳/۱ درصد کل سالانه در تیرماه تا مقدار ۱۲/۲ درصد آن در آبان ماه متغیر است، لذا مقدار بارندگی سالانه بالا و بین حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر در مناطق ساحلی تا کم‌تر از ۶۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات متغیر است (شکل ۲-a).

۲.۱.۲. کاربری اراضی محدوده مطالعاتی

سطوح زیر کشت اراضی آبی محدوده مورد مطالعه که شامل اراضی شالیزاری، سایر کشت‌های زراعی، باغات چای و سایر

باغات می‌باشند، تعیین گردیده است (جدول ۱). بر این اساس کل اراضی آبی کشاورزی واقع در محدوده مورد مطالعه در حدود ۲۷۴۶۱۳ هکتار برآورد گردیده است که از این مقدار در حدود ۱۹۶۳۹۱ هکتار مربوط به اراضی آبی داخل شبکه سفیدرود و ۷۸۲۲۲ هکتار مربوط به اراضی آبی خارج از شبکه آبیاری سفیدرود است. در محدوده شبکه آبیاری و زه‌کشی سفیدرود، مساحت اراضی شالیزاری در حدود ۱۷۹۰۵۵ هکتار و مابقی اراضی در حدود ۱۷۳۳۶ هکتار است که اختصاص به سایر محصولات شامل باغات چای، باغات مرکبات و سایر کشت‌ها دارد. بر این اساس سطح کل اراضی آبی داخل شبکه در حدود ۱۹۶۳۹۱ هکتار برآورد شد. از این‌رو، نیاز آبی ناخالص اراضی واقع در محدوده شبکه آبیاری و زه‌کشی سفیدرود به تفکیک نواحی عمرانی مرکزی، فومنات و شرق به ترتیب در حدود ۱۱۹۲۶، ۱۱۶۷۹ و ۱۲۴۴۲ مترمکعب در هکتار برآورد گردیده است. همچنین متوسط مقدار آب مورد نیاز اراضی واقع در محدوده شبکه آبیاری و زه‌کشی سفیدرود در حدود ۱۲۰۰۸ مترمکعب در هکتار برآورد می‌گردد. این در حالی است که متوسط آب مورد نیاز ناخالص در خارج از محدوده شبکه آبیاری و زه‌کشی سفیدرود در حدود ۱۱۳۹۶ مترمکعب در هکتار است (شکل ۲-ب).

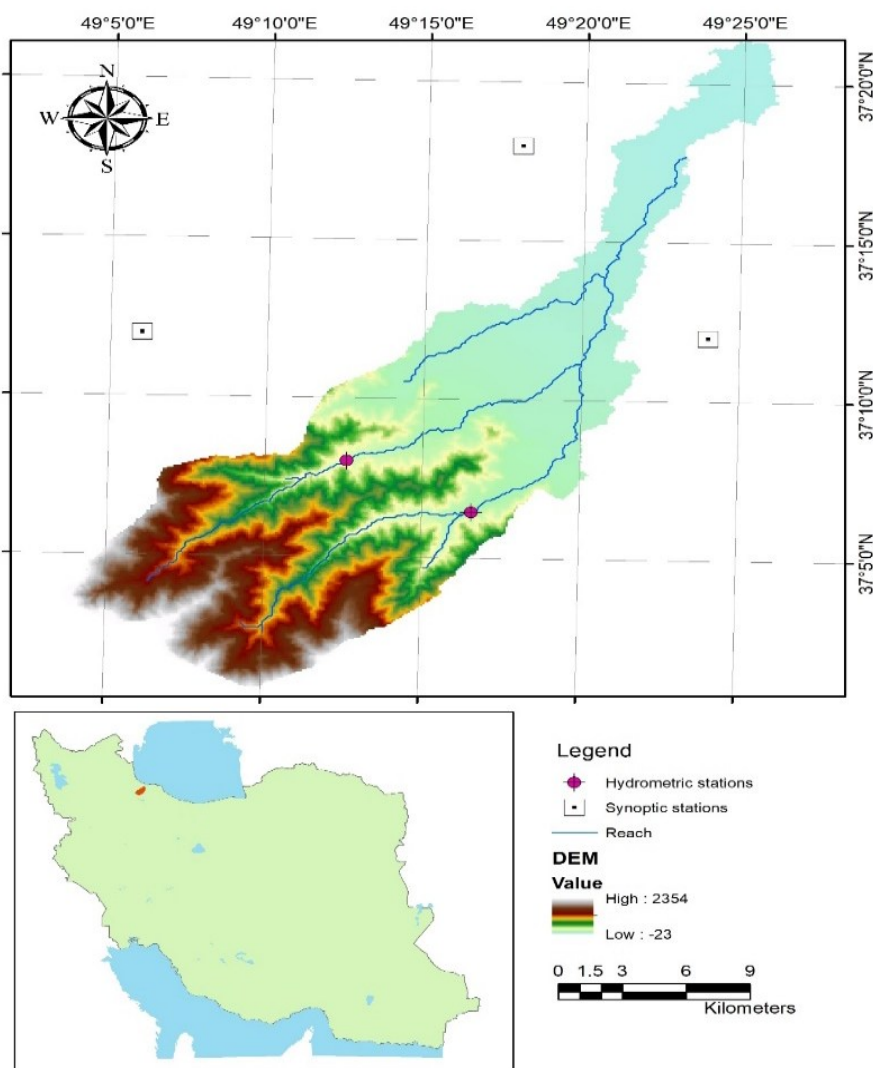


Figure 1. Study area

Table 1. Percentage of land use in the study area

| Land use | Percentage of basin area |
|--------------------|--------------------------|
| Residential areas | 0.01 |
| Rice | 47.51 |
| Wheat | 4.19 |
| Plain | 5.98 |
| Coniferous forests | 31.6 |

۳.۱.۲. ویژگی‌های شیب منطقه

در مدل SWAT شیب‌بندی منطقه به چهار قسمت تقسیم‌شده که به ترتیب جدول (۲) می‌باشند.

Table 2. Slope of the area

| Row | Slope (percentage) |
|-----|--------------------|
| 1 | 0-5 |
| 2 | 5-10 |
| 3 | 10-20 |
| 4 | 20-100 |

همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود محل ایستگاه‌های دبی سنجی پیرسرا و قلعه‌رودخان در زیرحوضه‌های با شیب کم‌تر از ۵ درصد قرار دارند. با توجه به این که مدل SWAT با نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) حوضه را مدل می‌کند، در مناطقی که شیب کم‌تری دارند اختلاف ارتفاعی کم‌تری مشاهده شده که این موضوع کار تحلیل حساسیت جهت کالیبراسیون را سخت می‌کند (شکل ۲-۳).

۴.۱.۲. ویژگی‌های خاک منطقه

نقشه خاک توسط مدل FAO تهیه شده است. در منطقه مورد مطالعه سه نوع خاک با توجه به مدل FAO وجود دارد. در جدول (۳) نوع بافت، گروه هیدرولوژیکی، هدایت هیدرولیکی اشباع، کربن آلی، رس، سیلت، شن، فرسایش‌پذیری و درصدی که حوضه را اشغال کرده است نشان داده شده است (شکل ۲-۴).

Table 3. Soil characteristics of the study area

| Soil Name | I-Rc-X-c-3119 | Ge34-3a-3064 | Be69-3c-3021 |
|--|---------------|--------------|--------------|
| Texture Type | Clay-loam | Clay-loam | Loam |
| Hydrological Group | C | C | D |
| Saturated Hydraulic Conductivity (mm/hr) | 38.36 | 13.38 | 4.83 |
| Organic Carbon (wt%) | 1.6 | 1.5 | 0.7 |
| Clay (wt%) | 39 | 39 | 24 |
| Silt (wt%) | 32 | 32 | 36 |
| Sand (wt%) | 29 | 29 | 40 |
| Erodibility | 0.27 | 0.27 | 0.3 |
| Percentage of Basin Area | 53.31 | 18.11 | 28.57 |

۵.۱.۲. بررسی تأثیر کاربری اراضی در فرسایش و رسوب منطقه

تغییر کاربری اراضی و رژیم بارش به شدت بر نرخ فرسایش اثر می‌گذارد، این امر از طریق تغییر دینامیک رسوب و هیدرولوژی صورت می‌گیرد. تغییر کاربری اراضی از عوامل اصلی تعیین‌کننده شدت فرسایش است که حتی در برخی موارد اثر آن از شدت بارش و شیب نیز بیش‌تر است. با تبدیل اراضی از جنگل به کشاورزی، خصوصیات خاک از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی، مواد آلی و نیتروژن کل موجود کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۴) و (۵) میزان رسوب تولیدی براساس کاربری اراضی و میزان کاهش رسوب با تغییر کاربری نشان داده شده است.

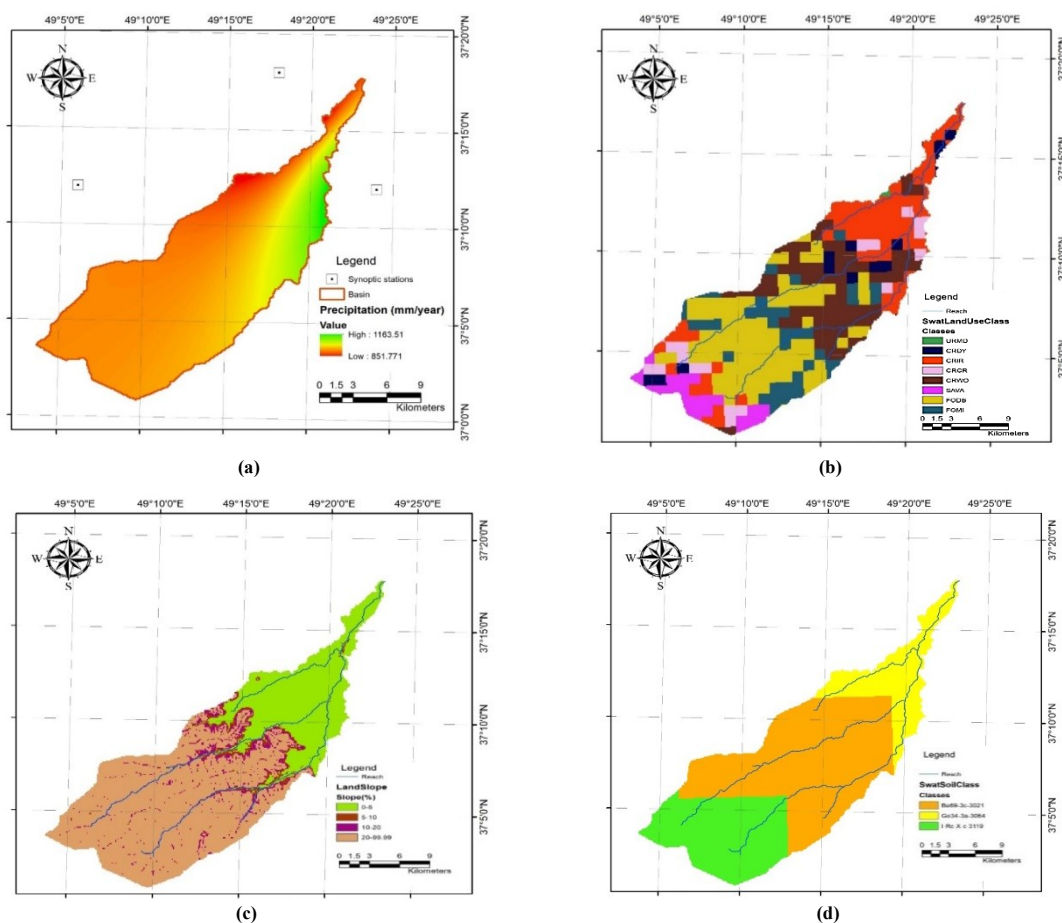


Figure 2. (a) Precipitation status, (b) Land use, (c) slope and (d) Soil characteristics of the region

Table 4. Sediment production rate according to land use in the study area

| Abbreviation name | Type | Area | SYLDT/ha | USLEt/ha | SDR |
|-------------------|---------------------------|----------|----------|----------|-------|
| CRGR | Cropland | 4833.24 | 31.92 | 57.22 | 55.78 |
| FODB | Broadleaved Fores | 16444.35 | 102.66 | 194.88 | 52.68 |
| FOMI | Mixed or Evergreen Forest | 13223.91 | 76.18 | 151.20 | 50.39 |
| ORCD | Orchard | 20004.35 | 128.44 | 228.41 | 56.23 |
| RICE | Rice | 16371.87 | 112.86 | 205.77 | 54.85 |
| SAVA | Savanna | 3220.44 | 17.71 | 38.93 | 45.48 |
| WWHT | Winter wheat | 5418.87 | 41.61 | 72.57 | 57.34 |

Table 5. Sediment reduction rate with land use change

| Abbreviation name | Type | Area | SYLDT/ha | USLEt/ha | SDR |
|-------------------|------------------|----------|----------|----------|-----------|
| FRSE | Evergreen Forest | 57187.25 | 64.465 | 121.947 | 52.863129 |
| FRST | Mixed Forest | 3962.163 | 32.846 | 55.337 | 59.356308 |
| WETN | Wetland | 1995.75 | 11.316 | 23.389 | 48.381718 |
| RICE | Rice | 16371.87 | 112.86 | 205.77 | 54.846501 |

۲.۲. ساختار مدل SWAT

معادله زیر معادله‌ی بیلان آب، معادله‌ی اصلی در شبیه‌سازی هر نوع فرایند در SWAT است.

$$SW_t = SW_0 + (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در معادله بالا SW_t مقدار اولیه آب در خاک در روز t ، SW_0 مقدار نهایی آب در خاک در روز R_{day} میزان بارندگی در روز

$Q_{surf, i}$ مقدار رواناب سطحی در روز t, i زمان برحسب روز، E_a مقدار تبخیر-تعرق در روز i مقدار آبی که در روز i وارد منطقه ریشه می‌شود و Q_{gw} مقدار آب برگشتی در روز i است. تمامی پارامترهای بالا برحسب میلی‌متر آب است. برای پیش‌بینی دقیق حرکت آب و رسوب توسط SWAT، سیکل هیدرولوژیکی مدل شده باید با آنچه در حوضه روی می‌دهد تطابق داشته باشد، بنابراین شبیه‌سازی سیکل هیدرولوژی حوضه در این مدل به دو مرحله تقسیم می‌شود. مرحله اول، کنترل‌کننده مقدار ورودی آب و رسوب از هر زیرحوضه به داخل کانال زهکش اصلی آن و مرحله دوم، به روندیابی و حرکت آب و رسوب در شبکه‌های زهکش حوضه تا خروجی آن مربوط است (Akoko et al., 2021).

۱.۲.۲. مؤلفه رواناب سطحی

رواناب سطحی زمانی اتفاق می‌افتد که شدت بارش از شدت نفوذ بیش‌تر شود. SWAT دو روش را برای شبیه‌سازی رواناب پیشنهاد می‌کند؛ روش شماره منحنی رواناب و روش نفوذ گرین امپت. حجم رواناب سطحی و نرخ دبی حداکثر برای هر HRU شبیه‌سازی و سپس کل رواناب حاصل برای حوضه روندیابی می‌شود. در روش شماره منحنی با استفاده از رابطه (۲) برای محاسبه رواناب استفاده می‌شود:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این معادله، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)، R_{day} میزان بارندگی (میلی‌متر)، I_a چکیده اولیه شامل ذخیره سطحی و نفوذ مقدم بر رواناب و S پارامتر حائل است. این پارامتر طبق رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$S = 25.4 \times \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، CN شماره منحنی رواناب است. شماره منحنی رواناب تابع نفوذپذیری خاک، پوش گیاهی، میزان رطوبت خاک و شیب است (Ostad-Ali-Askari, 2022).

۲.۲.۲. مؤلفه آب زیرزمینی

شبیه‌سازی آب زیرزمینی در SWAT به دو سیستم آبخوان کم‌عمق و آبخوان عمیق تقسیم می‌شود. آبخوان کم‌عمق با جریان داخل کانال اصلی در ارتباط است. آبی که وارد آبخوان عمیق می‌شود، فرض می‌شود در خارج از حوضه با جریان سطحی ارتباط داشته باشد. بیلان آب برای آبخوان کم‌عمق در SWAT از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$aq_{sh, i} = aq_{sh, i-1} + W_{revap, i} - W_{reavap, i} - W_{deep, i} - W_{pupm, sh, i} - Q_{gw, i} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در این رابطه، $aq_{sh, i}$ حجم آب ذخیره‌شده در آبخوان کم‌عمق در روز i (mmH₂O)، $aq_{sh, i-1}$ حجم آب ذخیره‌شده در آبخوان کم‌عمق در روز $i-1$ (mmH₂O)، $W_{revap, i}$ حجم تغذیه ورودی به آبخوان در روز i (mmH₂O)، $W_{reavap, i}$ حجم آب انتقال‌یافته به بخش خاک در واکنش به کمبود آب در روز i (mmH₂O)، $W_{deep, i}$ حجم آب نفوذی از عمق به آبخوان عمیق در روز i (mmH₂O)، $W_{pupm, sh, i}$ حجم آب حذف‌شده از عمق توسط پمپ کردن در روز i (mmH₂O) و $Q_{gw, i}$ جریان آب زیرزمینی یا جریان پایه ورودی به کانال اصلی در روز i (mmH₂O) است (Preetha & Al-Hamdan, 2020).

۳.۲.۲. مؤلفه برآورد فرسایش

به‌طور کلی فرسایش شامل جدا شدن، انتقال، شامل جدا شدن، انتقال و تجمع ذرات خاک در اثر نیروی فرساینده توسط

قطرات باران و یا جریان آب سطحی است. سطح حوضه شامل یک سری شیارها و آبراهه‌هاست. در اثر برخورد ذرات باران به‌ویژه در سطوح فاقد پوشش گیاهی، ذرات خاک از زمین جدا شده و وارد شیارها و از آنجا وارد آبراهه‌های موقت و سرانجام وارد جریان دائمی رودخانه می‌شود. حرکت و ته‌نشینی ذرات درون آبراهه می‌تواند در هر مکانی درون آبراهه‌های اصلی رخ دهد. برای هرروز با بارندگی و رواناب مشخص، تولید رسوب برای هر HRU در حوضه با استفاده از رابطه (۵) تخمین زده می‌شود:

$$Y = 11.8 \times (Q \times Area \times Pr)^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times R \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در معادله بالا، Y تولید رسوب (ton)، Q حجم رواناب (m³)، Pr نرخ دبی حداکثر (m³/s)، K فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، C فاکتور پوشش و مدیریت، P فاکتور اقدامات حفاظتی، LS کانتور توپوگرافی، R فاکتور اجزای درشت‌دانه خاک است (Elemile et al., 2021).

۴.۲.۲. مؤلفه برآورد رسوب‌دهی

مدل برای برآورد میزان فرسایش و کف‌کنی براساس تابعی از شیب آبراهه و سرعت جریان استفاده می‌کند. حداکثر غلظت رسوب انتقال‌یافته از یک بازه به‌صورت تابعی از حداکثر سرعت جریان براساس رابطه (۶) برآورد می‌شود:

$$conc_{sed, ch, mx} = C_{sp} \times V_{ch, pk}^{spexp} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این معادله، $conc_{sed, ch, mx}$ حداکثر غلظت بار رسوب قابل حمل توسط جریان (ton/m³)، C_{sp} ضریبی که توسط کاربر معرفی می‌شود، $V_{ch, pk}$ حداکثر سرعت در آبراهه (m/s)، $spexp$ ضریبی که توسط کاربر معرفی می‌شود که در معادله اصلی Bagnold برابر با ۱/۵ است. مقدار بار رسوب ته‌نشین‌شده در یک بازه نیز از طریق رابطه (۷) برآورد می‌شود:

$$sed_{deg} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) V_{ch} \quad \text{رابطه (۷)}$$

اما اگر $conc_{sed, ch, i} > conc_{sed, ch, mx}$ باشد، کف‌کنی صورت می‌گیرد و نرخ فرسایش از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$sed_{deg} = (conc_{sed, ch, mx} - conc_{sed, ch, i}) V_{ch} \times K_{CH} \times C_{CH} \quad \text{رابطه (۸)}$$

پس از محاسبه رسوب‌گذاری و کف‌کنی، مقدار نهایی رسوب در هر بازه از آبراهه از طریق رابطه (۹) تعیین می‌شود:

$$sed_{CH} = sed_{ch, i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad \text{رابطه (۹)}$$

مقدار کل بار رسوب معلق انتقال‌یافته به خارج از بازه نیز از معادله زیر (رابطه ۱۰) قابل محاسبه است:

$$sed_{out} = sed_{CH} \times \frac{V_{out}}{V_{CH}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در روابط فوق، sed_{dep} مقدار بار رسوب ته‌نشین‌شده در آبراهه (ton/m³)، $conc_{sed, ch, mx}$ غلظت اولیه رسوب آبراهه (ton/m³)، V_{ch} حجم آب موجود در بازه زمانی (m³)، K_{CH} فاکتور فرسایش‌پذیری، C_{CH} حداکثر غلظت رسوب قابل حمل در آبراهه فاکتور پوشش آبراهه، sed_{CH} مقدار بار معلق بود در بازه‌ی زمانی (ton)، sed_{out} بار رسوب خارج‌شده از آبراهه (ton) و V_{out} حجم آب خارج‌شده از آبراهه است (Xu et al., 2022).

فرسایش‌پذیری خاک در کانال به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده بستر و دیواره‌های کانال وابسته است. پوشش گیاهی با کاهش سرعت جریان آب در نزدیکی سطح بستر، به کاهش فرسایش کمک می‌کند و از این طریق بر شدت فرسایش اثرگذار است. برای سنجش تأثیر پوشش گیاهی، ضریب پوشش کانال به‌صورت نسبت فرسایش در کانال دارای پوشش گیاهی به فرسایش در کانال فاقد پوشش تعریف می‌شود. در مدل SWAT، زمانی که محاسبه انتقال رسوب براساس ابعاد مشخص برای تمام شبیه‌سازی‌ها انجام می‌شود، امکان تغییر در مقاطع کانال از جمله کف‌کنی

و تعریض لحاظ می‌شود. در چنین شرایطی، در طول دوره شبیه‌سازی، اجازه تغییر در ابعاد هندسی کانال شامل عمق و عرض کانال داده می‌شود.

کالیبراسیون مدل در یکی از ماژول‌های نرم‌افزار SWAT به نام SWAT-CUP انجام می‌شود. در این ماژول از چهار الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده است. در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی SUFI2 استفاده شده است. عدم قطعیت پارامترها موجب عدم قطعیت متغیرهای خروجی مدل می‌شود که با توزیع احتمال ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. این محدوده در SWAT با علامت اختصاری PPU95 که نشان‌دهنده پیش‌بینی با عدم قطعیت ۹۵ درصد است، نمایش داده می‌شود.

۳.۲. مدل بهینه‌سازی

در این مطالعه از الگوریتم تفاضلی تکاملی (DE) جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. الگوریتم DE کارایی بهتری از نظر همگرایی، اثربخشی و استحکام نسبت به EAهای دیگر دارد. این الگوریتم به صورت مکرر جمعیت را تکامل و بهبود می‌بخشد. در هر نسل، جمعیت جدیدی برحسب جمعیت فعلی تولید می‌شود. برای تولید فرزندان در جمعیت جدید، این الگوریتم اطلاعات مربوط به مسافت و جهت را از اعضای فعلی جمعیت استخراج و برای تنوع، انحراف تصادفی را اضافه می‌کند. اگر فرزندان در جمعیت جدید، متناسب با تابع هدف ارزش کم‌تر یا بیش‌تری نسبت به عضو از پیش تعیین شده جمعیت داشته باشند، این عضو جمعیت را جایگزین خواهد کرد. روش‌های مبتنی بر جمعیت یک رویکرد واضح برای حل مسائل چندهدفه هستند. اصول روش‌های مبتنی بر جمعیت عبارتند از تولید مجموعه داده‌های تصادفی λ در مجموعه α که با تعیین مرزهای بالا و پایین هر متغیر نتیجه می‌شود. نقاط مجموعه λ با نقاط ارجح جایگزین شود. در صورت برآورده شدن شرط توقف الگوریتم متوقف و الگوریتم DE یک تابع هدف را کمینه می‌کند و روشی مبتنی بر جمعیت است که در یافتن نقاط بهینه عمومی بسیار خوب عمل می‌کند. این الگوریتم مجموعه‌ای از نقاط $\lambda = \{x_1, x_2, \dots, x_t\}$ را در α دوباره تولید کرده و پس از پذیرش به سمت نقاط بهینه عمومی هدایت می‌کند. الگوریتم DE نقاط λ را با مقادیر جدید در هر نسل جایگذاری می‌کند. این الگوریتم به منظور تولید نقاط جدید از فرایند جهش و همگرایی استفاده می‌کند. جهت استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی DE گام‌های زیر طی می‌شود:

- مشخص کردن جمعیت اولیه با توزیع یکنواخت بین حداقل و حداکثر مقدار $\lambda = \{x_1, x_2, \dots, x_t\}$

- مشخص کردن شرط توقف الگوریتم با یافتن بدترین و بهترین نقاط λ

$$f_{max} - f_{min} \leq \varepsilon \text{ and } f_{min} = \min_{x \in \lambda} f(x) \quad f_{max} = \max_{x \in \lambda} f(x) \quad (11) \text{ رابطه}$$

در این رابطه، ε یک عدد خیلی کوچک متناسب با مسئله است. نقاطی جهت جایگزینی در λ با استفاده از روابط جهش و همگرایی تولید می‌شود

For each $x_i \in \lambda$, specify $\gamma_i^{advanced}$ (a trial vector corresponding to the target x_i)

$$\hat{x}_i^{advanced} = C + F \times (A - B) \quad (12) \text{ رابطه}$$

$$\gamma_i^{advanced} = \begin{cases} \hat{x}_{ij}^{advanced} & \text{if } randi[0,1] < C \text{ or } j \in \{1,2, \dots, n\} \\ x_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13) \text{ رابطه}$$

که در این روابط، A ، B و C نقاط تصادفی در مجموعه λ ، F ضریب مقیاس جهش (یک عدد بین صفر و یک)، C نرخ همگرایی (عدد ثابت بین صفر و یک) و n یک عدد طبیعی کم‌تر از t است. اگر $f(y_i) < f(x_i)$ آنگاه $x_i \in \lambda$ با $\gamma_i^{advanced}$ جایگزین می‌گردد، در غیر این صورت x_i باقی می‌ماند و فرایند از گام دوم دنبال می‌شود. در تمام عبارات i یک عدد صحیح است (Wang et al., 2019).

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

روند مدل‌سازی دبی جریان و دبی رسوب بدین‌صورت است که پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی اطلاعات موجود جهت ساخت مدل، مدل‌های مفهومی متفاوتی بر پایه تکنیک مدل‌سازی چندگانه در محیط SWAT ساخته شده و سپس مدل‌های عددی کمی تبدیل شدند. ساختار مدل مفهومی فومنات در حوضه تالش-تالاب انزلی شامل محدوده مدل‌سازی، توزیع اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیک، دبی جریان و رسوب مشاهداتی است. سپس در ادامه مدل‌های ماندگار و غیر ماندگار با استفاده از فرایند کالیبراسیون دو مرحله‌ای (دستی و خودکار) کالیبره شدند. مدل عددی کمی و کیفی به‌وسیله ماژول ARCSWAT ساخته شد. سپس در ماژول SWATCUP با الگوریتم بهینه‌سازی SUFI2 دبی جریان کالیبره شد. این کالیبراسیون با توجه به این‌که رودخانه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان در دشت فومنات جاری هستند به‌سختی کالیبره شدند، زیرا پارامترهای کالیبراسیون دبی جریان و رسوب مناطق دشتی و هموار به‌صورت محدود در مقالات کار شده است. با این‌حال، ضریب NS برای رودخانه پیرسرا ۰/۶۶ و رودخانه قلعه‌رودخان ۰/۷۴ به‌دست آمد.

با توجه به این‌که از داده‌های کمی ایستگاه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان تهیه شده از سازمان آب منطقه‌ای استان گیلان استفاده شده است، کالیبراسیون بر مبنای این داده‌ها صورت گرفته است و ضریب NS رسوب برای ایستگاه پیرسرا ۰/۵۱ و ایستگاه قلعه‌رودخان ۰/۶۲ به‌دست آمد. در ادامه با توجه به این‌که ۹۵ درصد کاربری اراضی منطقه به‌صورت شالیزار بود از بهینه‌سازی کاربری اراضی صرف‌نظر و بهینه‌سازی راه‌کار نوار گیاهی برای ۳۸ زیرحوضه و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و الگوریتم بهینه‌سازی (DE) و با در نظرگیری حداکثر سازی سود خالص حاصل از کم کردن هزینه رسوب‌زدایی با استفاده از کاشت نوار گیاهی برای ۱۳ زیرحوضه، به‌عنوان تابع هدف این بهینه‌سازی قرار گرفت.

۳.۱. آنالیز حساسیت و انتخاب پارامترها

با توجه به این‌که مدل SWAT دارای پارامترهای زیادی است و این پارامترها نسبت به هر منطقه مطالعاتی متفاوت می‌باشند، در فرایند کالیبراسیون، بر روی پارامترهای مؤثر بر دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی آنالیز حساسیت صورت گرفته است. جهت سهولت در مراحل واسنجی مدل، فرایندهایی مانند ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، آبراهه‌ها و وضعیت توپوگرافی در انتخاب پارامترهای مؤثر، مدنظر قرار گرفته‌اند. این مرحله از محاسبات در نرم‌افزار SWATCUP و توسط الگوریتم بهینه‌سازی SUFI2 انجام شده است. از جمله پارامترهای مؤثر بر دبی جریان و دبی رسوب به شرح جدول‌های (۶) و (۷) است.

۳.۲. نتایج کالیبراسیون دبی

حین اجرای اولیه مدل، تراز آب در هر زیرحوضه پس از محاسبه تفاضل ورودی و خروجی به‌دست می‌آید. درنهایت به‌کمک درون‌یابی، منحنی‌های هم‌تراز محاسباتی به نمایش درمی‌آید. مدلی که بتواند اختلاف تراز مشاهده‌ای و محاسباتی را به حداقل برساند، مدلی کارا و معتبر خواهد بود. این اختلاف در داده‌های مشاهده‌ای مشخص می‌شود که برای اجرای اول در حالت پایدار این مقادیر به شرح جدول (۷) می‌باشد. در این پروژه برای تعیین تغییرات تعدادی از پارامترها از جمله ضریب پوشش گیاهی و ضریب تغییرات دما و بارش، ابتدا به‌صورت خودکار دامنه تغییرات پارامترهای مذکور مشخص شد و در ادامه به روش دستی و به شیوه سعی و خطا، کالیبراسیون پارامترهای فوق انجام شد. پس از اتمام اجرا، نمودارهای نهایی تراز محاسباتی ترسیم شده و مقدار اختلاف تراز محاسباتی و مشاهده‌ای در ایستگاه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان به‌صورت نمودارهای زیر ظاهر می‌شود. حد مجاز اختلاف ضریب نش (NS) مشاهده‌ای و محاسباتی

حداقل ۰/۵ به مدل معرفی می‌شود. اگر اختلاف محاسباتی کمتر از ۰/۵ باشد، به معنی عدم صحیح بودن پارامترهای انتخابی می‌باشد.

Table 6. Parameters affecting the flow rate of the study area

| Parameters | Description | Lower Bound | Upper Bound | Calibrated Value |
|----------------|--|-------------|-------------|------------------|
| CN2.mgt | Curve number for moisture condition II | -0.4 | 0.4 | -0.1852 |
| ALPHA_BF.gw | Baseflow alpha factor | 0 | 1 | 0.0435 |
| GW_DELAY.gw | Groundwater delay time | 10 | 30 | 24.05 |
| GWQMN.gw | Threshold depth of water in shallow aquifer for return flow to occur | 0 | 2 | 1.601 |
| TLAPS.sub | Temperature lapse rate | -10 | 10 | 3.09 |
| PLAPS.sub | Precipitation lapse rate | -500 | 500 | 278.5 |
| ESCO.bsn | Soil evaporation compensation factor | 0 | 1 | 0.8545 |
| EPCO.bsn | Plant uptake compensation factor | 0 | 0 | 0 |
| SOL_BD(.).sol | Moist bulk density of the soil | -0.4 | 0.4 | 0.197 |
| SOL_AWC(.).sol | Available water capacity of the soil (mm/mm) | -0.4 | 0.4 | -0.3924 |
| SLSUBBSN.hru | Average slope length (m) | -0.4 | 0.4 | 0.476 |
| HRU_SLP.hru | Average slope steepness (m) | -0.4 | 0.4 | -0.3892 |
| OV_N.hru | Manning's n value for overland flow | 0.1 | 0.2 | 1.25 |
| LAT_TTIME.hru | Lateral flow travel time | -0.4 | 0.4 | -0.2356 |
| ESCO.hru | Soil evaporation compensation factor | 0 | 1 | 0.9425 |
| EPCO.hru | Plant uptake compensation factor | 0 | 1 | 0.6915 |
| GW_REVAP.gw | Groundwater revap coefficient | 0.02 | 0.2 | 0.0895 |
| REVAPMN.gw | Threshold depth of shallow aquifer for revap to occur | 0 | 100 | 41.35 |
| SFTMP.bsn | Snowfall temperature | -0.5 | 0.5 | 0.3195 |
| SMTMP.bsn | Snow melt base temperature | -20 | 20 | -0.78 |
| SMFMX.bsn | Maximum melt rate for snow | 0 | 20 | 10.61 |
| SMFMN.bsn | Minimum melt rate for snow | 0 | 20 | 4.19 |
| TIMP.bsn | Snowpack temperature lag factor | -0.5 | 0.5 | 0.2425 |
| SURLAG.bsn | Surface runoff lag time | 0.05 | 24 | 23.1497 |

Table 7. Effective Parameters on Sediment Discharge in the Study Area

| Parameters | Description | Lower Bound | Upper Bound | Calibrated Value |
|-----------------|--|-------------|-------------|------------------|
| R_CH_BNK_BD.rte | Bulk density of channel sediment | | | 0.0452 |
| R_SPEXP.bsn | Exponent for calculating sediment re-entrainment in the channel routing equation | | | -0.054 |
| R_SPCON.bsn | Linear parameter for calculating the maximum sediment concentration | | | -0.1004 |
| R_CH_COV1.rte | Erosion factor | | | 0.0846 |
| R_CH_COV2.rte | River vegetation factor | | | 0.0676 |
| R_USLE_P.mgt | USLE support practice factor | -0.2 | 0.2 | -0.1028 |
| R_USLE_K(.).sol | USLE soil erodibility factor | | | -0.018 |
| R_SED_CON.hru | Sediment concentration in urban runoff | | | -0.1836 |
| R_SLSOLL.hru | Slope length for lateral subsurface flow | | | 0.1236 |
| R_LAT_SED.hru | Sediment concentration in lateral and groundwater flow | | | -0.0900 |

در مرحله واسنجی رواناب ماهیانه، پارامترهای نهایی شده برای محاسبه دبی جریان جهت ارزیابی با مقادیر مشاهداتی برای سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص‌های ارزیابی شامل ضرایب R^2 و NS، با توجه به جدول (۸)، برای ایستگاه پیرسرا به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۶۶ و برای ایستگاه قلعه‌رودخان به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۷۴ به دست آمده است. در جدول (۸) فاکتور P عبارت است از درصد داده‌های مشاهداتی که در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. مقدار فاکتور P برای ایستگاه پیرسرا ۰/۷۷ و برای ایستگاه قلعه‌رودخان ۰/۷۵ به دست آمده است که این مقادیر نشانگر درصد پایین داده‌های عدم قطعیت مشاهداتی می‌باشد. همچنین فاکتور r نشان‌دهنده نسبت میانگین باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است. الگوریتم SUFI2 به دنبال طیفی از پارامترهاست که اکثر داده‌های مشاهداتی در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد واقع شوند. حالت ایده‌آل زمانی است که مقدار فاکتور p برابر ۱۰۰ درصد و مقدار فاکتور r برابر صفر باشد. از آنجایی که با کاهش فاکتور r مقدار p افزایش می‌یابد، محاسبات تا زمانی

ادامه می‌یابد که اکثر داده‌های مشاهداتی در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد تا حد ممکن کوچک شود. در جدول (۸) مقادیر فاکتور r و p برای ایستگاه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان دیده می‌شود.

Table 8. Flow calibration evaluation results

| River | P-Factor | r-Factor | R2 | NS |
|----------------|----------|----------|------|------|
| Pirsara | 0.77 | 2.06 | 0.74 | 0.66 |
| Ghaleh-Rudkhan | 0.75 | 1.6 | 0.79 | 0.74 |

جهت دستیابی به پارامترهای مؤثر بر دبی جریان، واسنجی پارامترها صورت گرفت. پارامترهایی مانند ضریب نفوذ رواناب در شرایط رطوبتی، ضریب پاسخ جریان پایه برای آب زیرزمینی میزان افت دما، میزان افت بارش، ضریب جبران تبخیر خاک برای زیرحوضه، ضریب جبران جذب گیاه، تراکم خاک، ظرفیت آب دسترس، متوسط طول شیب، متوسط تندی شیب، ضریب زیر دامنه، زمان حرکت جریان جانبی و ... واسنجی شدند. برای اطمینان از صحت کالیبراسیون، مدل برای دوره‌ای غیر از دوره کالیبراسیون اجرا می‌شود. اگر برای دوره جدید نیز مقادیر پارامترها صدق کند، صحت عملکرد مدل تأیید می‌شود. اختلاف کم ضرایب ارزیابی داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای، صحت مدل را تأیید می‌نماید (شکل ۳). میزان تغییرات دبی در طول زمان و تغییرات سطح آب در ایستگاه‌های مشاهداتی نشان از حالت ناپایدار جریان در رودخانه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان است.

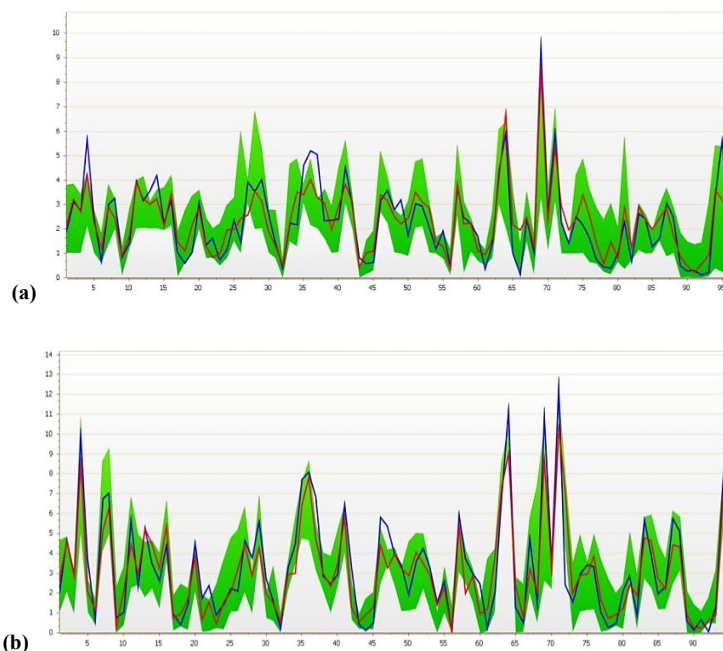


Figure 3. Discharge Calibration Graph for (a) Pirsara (b) Ghaleh-Rudkhan Station (Output from SWAT-CUP). (***)In this graph, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the average monthly flow rate in cubic meters per second.)

جهت صحت‌سنجی نتایج کالیبراسیون دبی، پارامترهای به‌دست‌آمده دبی، برای سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵، دوباره وارد نرم‌افزار SWAT_CUP شد. پس از مرحله تحلیل حساسیت، پارامترهای مؤثر بر دبی جریان و دبی رسوب به شرح جدول (۹) به‌دست آمد. از بین پارامترهای منتخب ۲۰ پارامتر برای دبی، ۱۰ پارامتر برای رسوب به‌عنوان پارامتر حساس انتخاب شدند. مقدار ضرایب R^2 و $N.S$ برای دبی ایستگاه پیرسرا و قلعه‌رودخان به‌ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۶۹ به‌دست آمد. در جدول زیر مقادیر فاکتور r و فاکتور p نشان داده شده است (جدول ۹).

Table 9. Calibration Validation Results for Discharge

| River | P-Factor | r-Factor | R2 | NS |
|----------------|----------|----------|------|------|
| Pirsara | 0.88 | 2.08 | 0.71 | 0.75 |
| Ghaleh-Rudkhan | 0.73 | 1.9 | 0.75 | 0.69 |

در شکل (۴)، نمودار دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

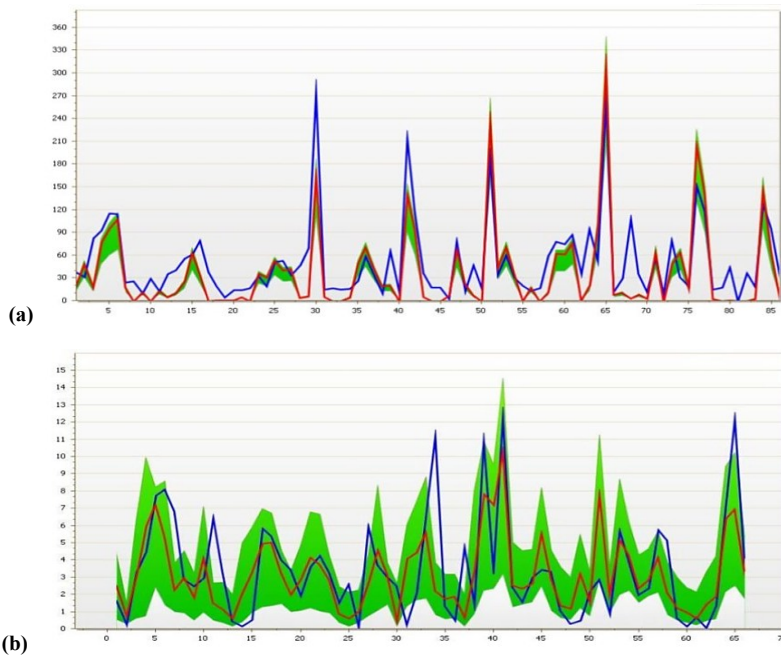


Figure 4. Discharge Validation Graph for (a) Pirsara, (b) Ghaleh-Rudkhan Station (Output from SWAT-CUP).
 (***)In this graph, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the average monthly flow rate in cubic meters per second.

۳.۳. نتایج کالیبراسیون رسوب

برای محاسبه رسوب ماهانه، آمار دبی جریان و غلظت رسوب اندازه‌گیری شده برای ایستگاه‌های پیرسرا و قلعه‌رودخان از شرکت آب منطقه‌ای اخذ گردید. سپس به منظور دقت برآورد رسوب پارامترهای مؤثر بر جریان رسوب تحلیل حساسیت شدند. جهت دستیابی به پارامترهای مؤثر بر دبی رسوب و دبی جریان واسنجی پارامترها صورت گرفت. همان‌طور که در جدول (۱۰) دیده می‌شود مقدار ضریب NS برای ایستگاه‌های قلعه‌رودخان و پیرسرا به ترتیب برابر ۰/۵۱ و ۰/۶۲ به دست آمد.

Table 10. Sediment Calibration Results

| River | P-Factor | r-Factor | R2 | NS |
|----------------|----------|----------|------|------|
| Pirsara | 0.25 | 0.34 | 0.59 | 0.51 |
| Ghaleh-Rudkhan | 0.17 | 0.41 | 0.61 | 0.62 |

جهت صحت‌سنجی نتایج کالیبراسیون رسوب، پارامترهای به دست آمده معادله رسوب، برای سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵، دوباره وارد نرم‌افزار SWAT_CUP شد. پس از مرحله تحلیل حساسیت، پارامترهای مؤثر بر دبی جریان و دبی رسوب به شرح جدول (۱۱) به دست آمد. از بین پارامترهای منتخب ۲۰ پارامتر برای دبی، ۱۰ پارامتر برای رسوب به عنوان پارامتر حساس انتخاب شدند. مقدار ضرایب R^2 و NS برای دبی ایستگاه پیرسرا و قلعه‌رودخان به ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۷۱ به دست آمد. در جدول زیر مقادیر فاکتور r و فاکتور p نشان داده شده است (جدول ۱۱).

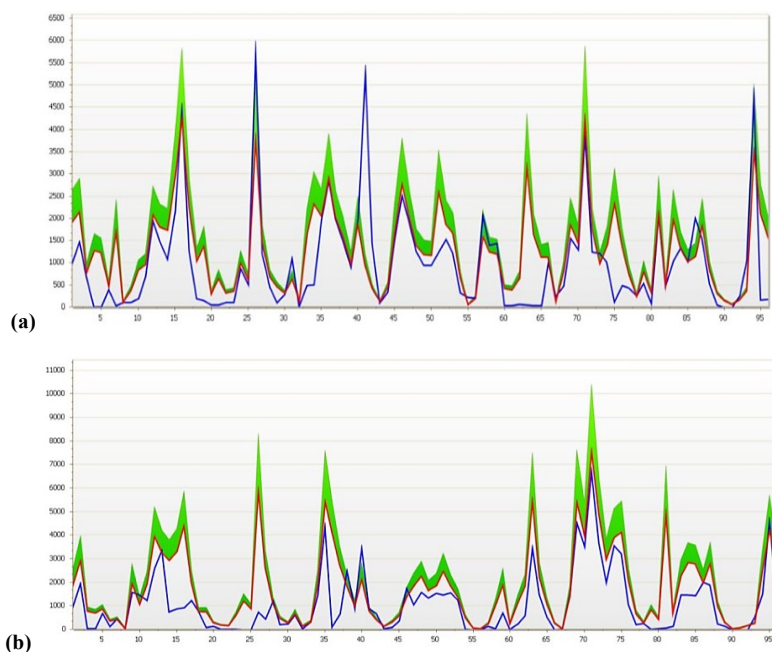


Figure 5. Sediment Calibration Graph for(a) Pirsara (b) Ghaleh-Rudkhan Station (Output from SWAT-CUP).
 (***)In this graph, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the monthly sediment in tons per month.)

Table 11. Sediment verification results

| River | P-Factor | r-Factor | R2 | NS |
|----------------|----------|----------|------|------|
| Pirsara | 0.23 | 0.54 | 0.69 | 0.55 |
| Ghaleh-Rudkhan | 0.19 | 0.31 | 0.68 | 0.71 |

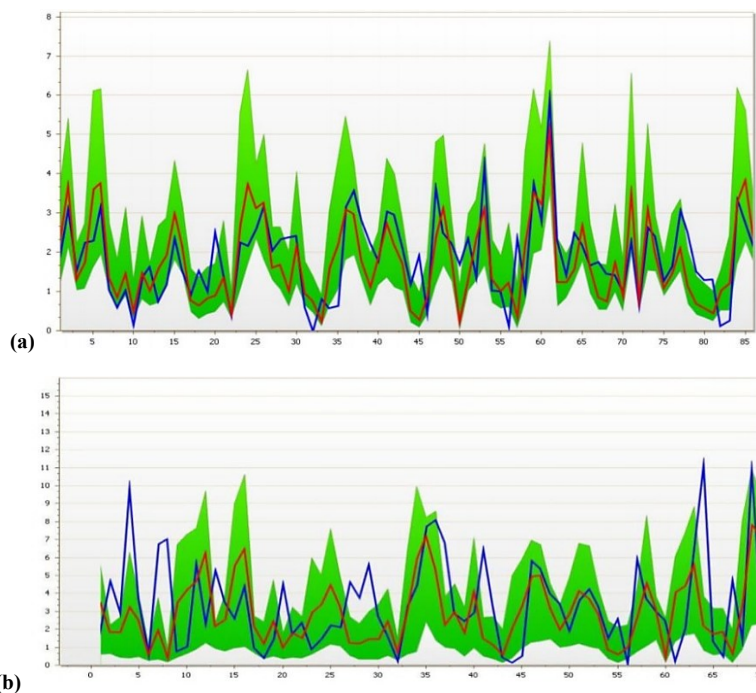


Figure 6. Sediment calibration accuracy chart of (a) Pirsara (b) Ghaleh-Rudkhan Station (SWATCUP software output).
 (***) In this chart, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the monthly sediment in tons per month.)

۴.۳. نتایج بهینه‌سازی

مقادیر پارامترهای الگوریتم DE در این پژوهش از قرار زیر است:

Maximum Number of Iterations= 100

Number of New Solutions= 30

Population Size= 30

Lower Bound of Scaling Factor= 0.2

Upper Bound of Scaling Factor= 0.8

Crossover Probability= 0.7

مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه در ۱۴۸ ساعت اجرا شد. تابع هدف تک‌هدفه شامل حداکثرکردن سود حاصل از کاهش

رسوب منطقه فومنت واقع در زیرحوضه تالش - تالاب می‌باشد (شکل ۷).

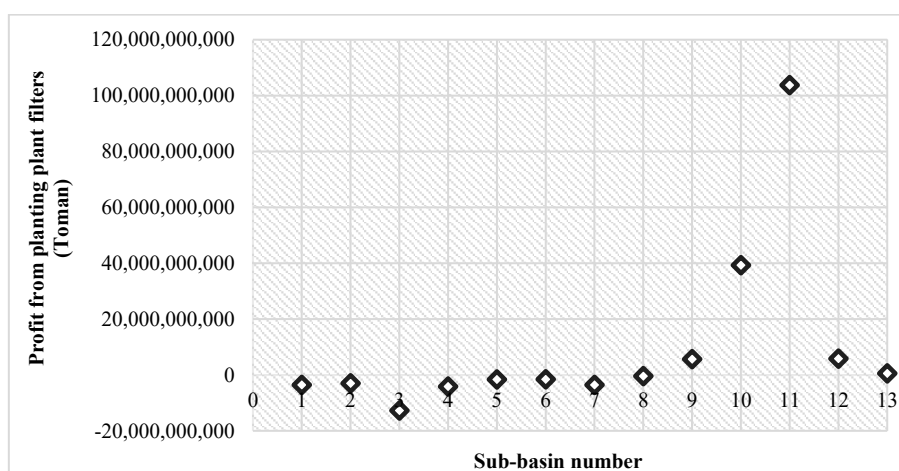


Figure 7. Net Profit Chart for Subbasins of the Study Area with Sediment Reduction via Optimal Planting of Vegetative Filter

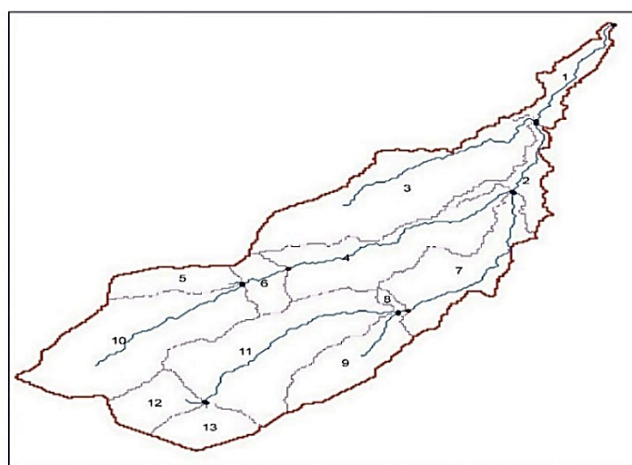


Figure 8. Subbasin Numbers of the Study Area

نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه حداقل کردن رسوب و حداکثرکردن درآمد حاصل از کاهش رسوب توسط کاشت فیلتر گیاهی در جدول (۱۲) نشان داده شده است. این مسئله بهینه‌سازی ۱۰۰ جواب بهینه دارد که هرکدام در شرایط خود

بهینه هستند و نسبت به یکدیگر برتری ندارند. نزدیک‌ترین نقاط به مراکز این خوشه‌ها به‌عنوان نقاط منتخب جهت ارائه نتایج بررسی و با شرایط حال حاضر (غیر بهینه) مقایسه شده‌اند. در زیرحوضه‌های ۱ تا ۱۳، مقدار درآمد حاصل از کاهش رسوب بیش‌تر از هزینه‌ی کاشت فیلتر گیاهی شده است. لذا در این زیرحوضه‌ها کاشت فیلتر گیاهی مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. اگر به این مسئله با دید اجرا پذیری و مقبولیت مردم نگاه کنیم، بهترین شرایط برای تصمیم‌گیری زیرحوضه بهینه ۱۱ است که نشان‌دهنده سود حاصل از کاشت فیلتر گیاهی می‌باشد. در هر زیرحوضه ۱۰، ۱۲ و ۱۳ نیز درآمد حاصل از کاهش رسوب با راه‌کار کاشت فیلتر گیاهی دیده می‌شود. همچنین سود حاصل از کاهش رسوب با راه‌کار کاشت فیلتر گیاهی در زیرحوضه‌های یک تا هشت منفی می‌باشد. لذا، کاشت فیلتر گیاهی در این زیرحوضه‌ها توصیه نمی‌شود. مقایسه بین نقاط ۱۱ و ۳ نشان می‌دهد که در زیرحوضه‌ی سه تولید رسوب کم‌تری وجود دارد. لذا کاشت فیلتر گیاهی در زیرحوضه‌ی سه مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود. درصد کاهش رسوب بیش‌تر در نقطه ۱۱ نسبت به نقطه سه، عامل اصلی درآمد بیش‌تر حاصل از کاشت فیلتر گیاهی به‌عنوان یکی از راه‌کارهای کنترل رسوب می‌باشد.

Table 12. Amount of Sediment Reduced by Vegetative Filter Planting Solution

| Subbasin Number | Area (m2) | Sediment Amount in the Absence of Vegetative Filter (ton/year) | Sediment Amount After Planting Vegetative Buffer (ton/year) | Percentage of Sediment Reduction |
|-----------------|-----------|--|---|----------------------------------|
| 1 | 10990000 | 791.28 | 692.37 | 12.5 |
| 2 | 10294000 | 751.462 | 679.404 | 9.58 |
| 3 | 54420000 | 276997.8 | 267474.3 | 3.43 |
| 4 | 36116000 | 240315.864 | 215973.68 | 10.12 |
| 5 | 11010000 | 97856.88 | 90392.1 | 7.62 |
| 6 | 8220000 | 69434.34 | 65044.86 | 6.32 |
| 7 | 27885000 | 221769.405 | 204006.66 | 8 |
| 8 | 1290000 | 19.35 | 11.61 | 40 |
| 9 | 18931000 | 185769.903 | 143875.6 | 22.55 |
| 10 | 49550000 | 2575410.8 | 2383355 | 7.45 |
| 11 | 50510000 | 2171626.94 | 1747646 | 19.54 |
| 12 | 11890000 | 263684.53 | 230666 | 12.52 |
| 13 | 10880000 | 253601.92 | 238272 | 6 |

همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود با کاشت فیلتر گیاهی مقدار رسوب کم‌تر شده است. لذا جهت بهینه‌کردن این مقدار، مدل شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار متلب (Matlab) و الگوریتم بهینه‌سازی DE، بهینه شده است.

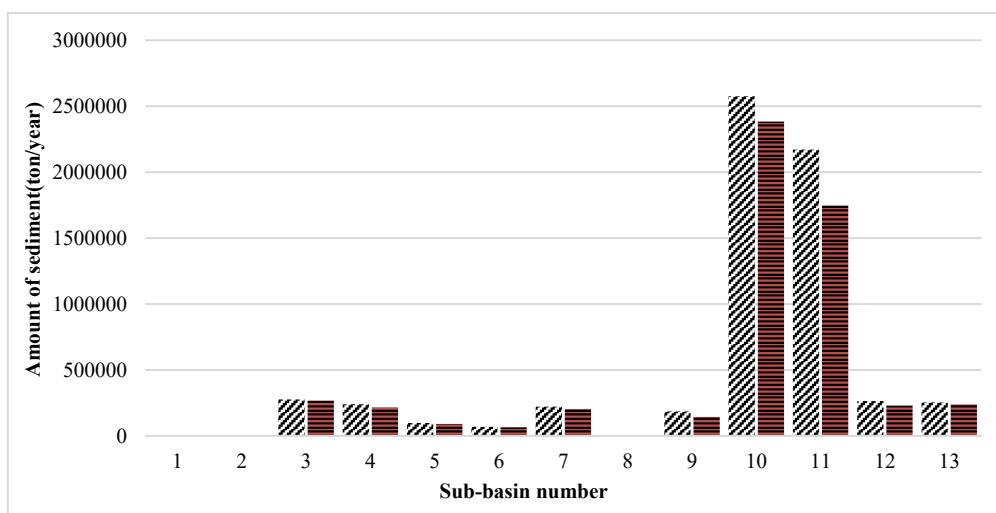


Figure 9. Comparative Chart of Sediment Reduction Before and After Planting Vegetative Filter

۵.۳. نتایج مدل بهینه تحت تأثیر کاهش رسوب

نتایج مدل بهینه تحت تأثیر کاهش رسوب در جدول (۱۳) نشان داده شده است. زیرحوضه ۱۱ با درآمدی در حدود ۵۵ میلیارد تومان بهینه‌ترین زیرحوضه جهت کاشت فیلتر گیاهی می‌باشد. درآمد حاصل از کاهش رسوب در زیرحوضه‌های ۱ تا ۸، منفی بوده است. لذا جهت کنترل رسوب این نقاط باید سایر راه‌کارهای کنترل رسوب موردبررسی قرار گیرد. کاهش رسوب کل ورودی به زیرحوضه هدف مطلوب پژوهش است. با کاشت فیلتر گیاهی مقدار رسوب کم‌شده به شرح زیر می‌باشد (جدول ۱۳).

Table 13. Profit from Sediment Reduction through Vegetative Filter Planting Solution

| Subbasin Number | Area of Vegetative Filter(m2) | Cost of Planting Vegetative Filter | Sediment Amount After Planting Vegetative Buffer (ton/year) | Profit Amount |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|---|----------------|
| 1 | 42192.52658 | 2109626329 | 692.37 | -2,094,240,329 |
| 2 | 35453.94485 | 1772697242 | 679.404 | -1,761,488,220 |
| 3 | 182037.4039 | 9101870196 | 267474.3 | -7,620,436,862 |
| 4 | 130106.5497 | 6505327483 | 215973.68 | -2,718,765,527 |
| 5 | 43886.13342 | 2194306671 | 90392.1 | -1,033,118,671 |
| 6 | 33228.09473 | 1661404736 | 65044.86 | -978,596,736 |
| 7 | 101474.4924 | 5073724620 | 204006.66 | -2,310,630,953 |
| 8 | 4967.03758 | 248351879 | 11.61 | -247,147,879 |
| 9 | 73922.88881 | 3696144441 | 143875.6 | 2,820,747,137 |
| 10 | 181492.294 | 9074614701 | 2383355 | 20,800,731,965 |
| 11 | 201370.6329 | 10068531646 | 1747646 | 55,884,059,020 |
| 12 | 42356.95438 | 2117847719 | 230666 | 3,018,368,059 |
| 13 | 44710.86322 | 2235543161 | 238272 | 149,111,061 |

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی یکی از راه‌کارهای کنترل رسوب، یعنی کاشت فیلتر گیاهی که به‌عنوان یک اقدام سازه‌ای مؤثر در کاهش رسوب شناخته می‌شود، موردبررسی قرار گرفت. در این راستا، حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد و متغیرهای رواناب و رسوب با الگوریتم SUFI ۲ در برنامه SWAT-CUP واسنجی و صحت‌سنجی گردید. در گام بعدی، با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی DE و اتصال آن به مدل شبیه‌ساز SWAT، فرایند بهینه‌سازی انجام شد. در این فرایند، تابع هدف بر بهینه‌سازی سود حاصل از کاهش رسوب از طریق کاشت فیلترهای گیاهی متمرکز شد. در یک دسته‌بندی کلی، ۲۶ متغیر تصمیم، از جمله نسبت مساحت HRU به مساحت فیلتر گیاهی و نسبت فیلتر گیاهی که ۹۰ درصد جریان از آن عبور می‌کند، موردبررسی قرار گرفت. همچنین، اثرات تغییر اقلیم بر مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده اعمال گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که اجرای این راه‌کار نه تنها موجب کاهش قابل توجه رسوبات می‌شود، بلکه بهبود درآمدی معادل ۸۲ میلیارد و ۶۷۳ میلیون تومان را نیز به‌همراه دارد. بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر مدل بهینه‌شده نشان داد که این تغییرات می‌تواند بار رسوب کل را تحت تأثیر قرار دهد. هزینه‌های رسوب‌زدایی نیز براساس فهرست‌بهای آبخیزداری سال ۹۹ محاسبه شد. با توجه به این هزینه‌ها و همچنین آلودگی و تغییرات اکولوژیکی تالاب انزلی، لزوم توجه مدیران و تصمیم‌گیران به این مسئله به‌عنوان یک ضرورت مدیریتی مطرح می‌شود. از آنجاکه بالادست منطقه مطالعاتی شامل کانال‌های آبیاری شالیزار است و اطلاعات دقیق آبدهی این کانال‌ها در دسترس نیست، مطالعات مربوط به فومنت با محدودیت‌هایی مواجه است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این کانال‌ها نیز وارد معادلات شبیه‌سازی شوند. همچنین، نمونه‌برداری‌های گسترده‌تری در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف از رودخانه‌ها صورت گیرد تا دقت نتایج افزایش یافته و خطای محاسبات کاهش یابد. علاوه بر این، با توجه به چالش‌های موجود در کالیبراسیون مدل SWAT برای مناطق دشتی که دارای تغییرات ارتفاعی کم هستند، پیشنهاد می‌شود که در توسعه مدل، راه‌کارهایی برای بهبود فرایند کالیبراسیون در این مناطق نیز در نظر گرفته شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Soil and Water Assessment Tool
2. Differential Evolution

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Aboelnour, M. A., Tank, J. L., Hamlet, A. F., Bertassello, L. E., Ren, D., & Bolster, D. (2025). A SWAT Model Depicts the Impact of Land Use Change on Hydrology, Nutrient, and Sediment Loads in a Lake Michigan Watershed. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(1), 22.
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., & Kato, T. (2021). A Review of SWAT Model Application in Africa. *Water*, 13(9), 1313.
- Bibi, T. S., & Adem, E. A. (2023). Evaluation of Best Management Practices to Reduce Sediment Yield in the Upper Gilo Watershed, Baro Akobo Basin, Ethiopia Using SWAT. *Heliyon*, 9(10).
- Conesa-García, C., Martínez-Salvador, A., Puig-Mengual, C., Martínez-Capel, F., & Pérez-Cutillas, P. (2023). Simulation of Retrospective Morphological Channel Adjustments Using High-Resolution Differential Digital Elevation Models versus Predicted Sediment Delivery and Stream Power Variations. *Water*, 15(15), 2697.
- Cousino, L. K., Becker, R. H., & Zmijewski, K. A. (2015). Modeling the Effects of Climate Change on Water, Sediment, and Nutrient Yields from the Maumee River Watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 762-75.
- Elemile, O. O., Ibitogbe, E. M., Folorunso, O. P., Ejiboye, P. O., & Adewumi, J. R. (2021). Principal Component Analysis of Groundwater Sources Pollution in Omu-Aran Community, Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-16.
- Huai, W. X., Li, S., Katul, G. G., Liu, M. Y., & Yang, Z. H. (2021). Flow Dynamics and Sediment Transport in Vegetated Rivers: A Review. *Journal of Hydrodynamics*, 33(3), 400-420.
- Hui, L., Xiaoling, C., Lim, K. J., Xiaobin, C., & Sagong, M. (2010). Assessment of Soil Erosion and Sediment Yield in Liao Watershed, Jiangxi Province, China, Using USLE, GIS, and RS. *Journal of Earth Science*, 21(6), 941-53.
- Khalili, R., & Moridi, A. (2025). A Comprehensive Review of Eutrophication in Water Resources: From Identifying Contributing Factors to Proposing Management Strategies. *Interdisciplinary Journal of Civil Engineering*, 1(1), 38-52.
- Owji, M. R., Nikkami, D., Mahdian, M. H., & Mahmoudi, S. (2013). Minimizing Runoff and Sedimentation by Optimizing Land Use (Case Study: Jajrood Watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(4), 183-99.
- Ostad-Ali-Askari, Kaveh. (2022). Investigation of Meteorological Variables on Runoff Archetypal Using SWAT: Basic Concepts and Fundamentals. *Applied Water Science*, 12(8), 177.
- Ouallali, A., Briak, H., Aassoumi, H., Beroho, M., Bouhsane, N., & Moukhchane, M. (2020). Hydrological Foretelling Uncertainty Evaluation of Water Balance Components and Sediments Yield Using a Multi-Variable Optimization Approach in an External Rif's Catchment. *Morocco. Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 775-89.
- Preetha, P. P., & Al-Hamdan, A. Z. (2020). Integrating Finite-Element-Model and Remote-Sensing Data into SWAT to Estimate Transit Times of Nitrate in Groundwater. *Hydrogeology Journal*, 28(6), 2187-2205.
- Quamar, S., Kumar, P., & Singh, H. P. (2025). Streamflow and Sediment Simulation in the Song River Basin Using the SWAT Model. *Frontiers in Water*, 7, 1500086.
- Rahimi, R. (2021). Agricultural Activities Impacts on Water Resources of Masouleh River Basin with WEAP Model. *Computational Ecology and Software*, 11(1), 46.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the Swat Model on a Large Rwer Basin with Point and Nonpoint Sources 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-88.

- Wang, L., Dang, D., Liu, Y., Peng, X., & Liu, R. (2023). Dynamic Water Environment Capacity Assessment Based on Control Unit Coupled with SWAT Model and Differential Evolution Algorithm. *Water*, 15(10), 1817.
- Wang, Q., Liu, R., Men, C., Guo, L., & Miao, Y. (2019). Temporal-Spatial Analysis of Water Environmental Capacity Based on the Couple of SWAT Model and Differential Evolution Algorithm. *Journal of Hydrology*, 569, 155-66.
- Xu, Y., Esposito, C. R., Beltrán-Burgos, M., & Nepf, H. M. (2022). Competing Effects of Vegetation Density on Sedimentation in Deltaic Marshes. *Nature communications*, 13(1), 4641.
- Zewde, N. T., Denboba, M. A., Tadesse, S. A., & Getahun, Y. S. (2024). Predicting Runoff and Sediment Yields Using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model in the Jemma Subbasin of Upper Blue Nile, Central Ethiopia. *Environmental Challenges*, 14, 100806.
- Zhang, T., Li, D., East, A. E., Kettner, A. J., Best, J., Ni, J., & Lu, X. (2023). Shifted Sediment-Transport Regimes by Climate Change and Amplified Hydrological Variability in Cryosphere-Fed Rivers. *Science Advances*, 9(45), eadi5019.