

Modeling and Optimization of Erosion and Sediment Control Strategies in the Fomanat Region Using the SWAT Model

Pooria safari dinachali¹ | Ali Moridi^{2✉} | 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

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.

Keywords: Flow discharge and sediment, Vegetative Filter Strip (VFS), Erosion and sediment control, SWAT model.

مدل سازی و بهینه سازی راهکارهای کنترل فرسایش و رسوب در منطقه فومانات با

استفاده از مدل SWAT

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

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: p.safaridenahali@sbu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، 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:

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 راهکارهای کنترل فرسایش و رسوب در منطقه فومانات (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، فرآیند 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٪ 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 بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۹، لزوم مدیریت دقیق با در نظر گرفتن ملاحظات مالی و اثرات اکولوژیکی بر تالاب انزلی را نشان داد.

کلمات کلیدی: دبی جریان و رسوب، فیلتر گیاهی، کنترل فرسایش و رسوب، مدل SWAT.

مقدمه:

پدیده ی فرسایش به عنوان سرآغاز فرآیند انتقال رسوب در محیط های طبیعی شناخته می شود، این پدیده که در اثر فرآیندهای طبیعی مانند بارش و جریان سطحی و همچنین فعالیت های انسانی رخ می دهد، باعث ناپایداری کناره ها و ریزش توده های خاک می شود (Zhang et al. 2023). افزایش شدت فرسایش، تغییرات قابل توجهی در مورفولوژی رودخانه ها، افزایش بار بستر، تغییر مسیر جریان و در نهایت کاهش ظرفیت انتقال آب را به دنبال دارد (Khalili and Moridi 2025). در چنین شرایطی، مدیریت و کنترل فرسایش و رسوب از طریق اقدامات مؤثر و مقرون به صرفه ضروری می نماید (Huai et al. 2021). در مناطق کشاورزی، از جمله منطقه فومانات در شمال ایران، پدیده فرسایش نه تنها باعث کاهش بهره وری خاک و از بین رفتن اراضی ارزشمند کشاورزی می شود، بلکه با انتقال رسوبات توسط رودخانه های پیرسرا و قلعه رودخان به داخل شبکه کانال های آبیاری و نهایتاً به تالاب انزلی، تهدیدی جدی برای پایداری این اکوسیستم ارزشمند به شمار می آید. بار معلق بالای رودخانه ها منجر به انسداد کانال ها، کاهش بازده انتقال آب و ته نشینی در تالاب می شود که پیامدهای زیست محیطی و اقتصادی قابل توجهی به دنبال دارد. با توجه به موارد فوق، شناسایی و

اجرای راهکارهایی با هزینه‌ی پایین، اثربخشی بالا و قابلیت بهینه‌سازی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر، مدل SWAT¹ به‌عنوان ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی فرآیندهای 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 دارا است (Aboelnour et al. 2025; Zewde et al. 2024). از سوی دیگر، بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم تفاضلی (DE²) 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 غیر سازه‌ای و اقتصادی تثبیت خاک و کاهش رسوب، در مطالعات متعددی اثربخش گزارش شده و می‌تواند جایگزینی مناسب برای روش‌های پرهزینه‌ی سازه‌ای باشد (Conesa-García et al. 2023; L. Wang et al. 2023).

Oji et al. (2013) در حوضه آبریز دریاچه زری بار با رویکرد شبیه‌سازی جامع SWAT، سه راهکار مدیریتی برتر شامل فیلتراسیون گیاهی، کنترل بار آلودگی در کانال قزلچه‌سو و کاهش مصرف کود تا ۲۵٪ شناسایی شدند. *Hui et al.* (2010) با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و GIS در مدل RUSLE، مشخص شد ۳۹/۵٪ مساحت حوضه در برابر فرسایش مقاوم است و برآورد رسوب سالانه ۱/۳۲ میلیون تن حدود ۲۰٪ بیش‌تر از مشاهدات بود. *Cousino, Becker, and Zmijewski* (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.

Santhi et al. (2001) با دو سناریوی پارامتری در SWAT، سناریوی دوم ($R^2=0.5-0.7$, $NSE=0.63-0.91$) برای برآورد رسوب ورودی به سد مناسب‌تر یافت شد و نرخ فرسایش خاک حدود ۳۹۴۴۸۳۵ تن در کیلومتر مربع محاسبه گردید (*Ouallali et al.* 2020). *al.* در حوضه‌ای مدیریت‌شده شمال غرب مراکش، مدل SWAT ۲۰۱۲ با روش بهینه‌سازی چندهدفه-SUFI ۲ کالیبره و اعتبارسنجی شد؛ نتایج نشان‌دهنده همبستگی معنادار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهدات جریان و رسوب بود.

Bibi and 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 زیر حوضه به‌عنوان مناطق بحرانی شناسایی گردید. نتایج نشان داد که اعمال اقدامات مدیریتی مانند نوارهای فیلتر، تراسبندی و کشت در خطوط تراز می‌تواند رسوب را تا بیش از ۵۰ درصد کاهش دهند. این یافته‌ها اثربخشی بالای BMPها را در کنترل فرسایش و مدیریت حوضه تأیید می‌کند. *Quamar, Kumar, and Singh* (2025) در یک مطالعه عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان و رسوب در حوضه رودخانه Song بررسی شد. 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، باهدف 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 زیر حوضه 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 این تحقیق، 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- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه:

زیر حوضه آبریز تالش-مرداب انزلی که حدفاصل بین مرداب انزلی تا تالش را شامل می‌شود، بخشی از حوضه آبریز دریای مازندران است. این زیر حوضه با مساحت ۶۸۴۰ کیلومترمربع، شامل ۶۴.۴٪ مناطق کوهستانی و ۳۵.۶٪ 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).

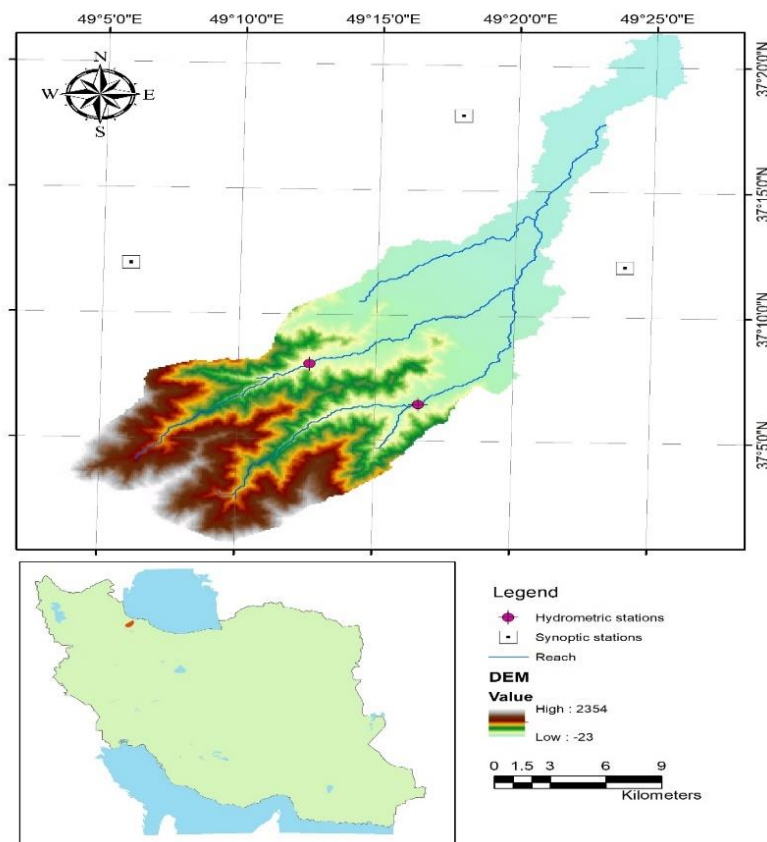


Figure 1. Study area

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-ا).

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 این رو نیاز آبی ناخالص اراضی واقع در محدوده شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود به تفکیک نواحی عمرانی مرکزی، فومنت 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).

Table 1. Percentage of land use in the study area

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

۲-۱-۳- ویژگی‌های شیب منطقه

در مدل SWAT شیب بندی منطقه به چهار قسمت تقسیم شده که به ترتیب جدول (۲) می‌باشند.

Table 2. Slope of the area

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

همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود محل ایستگاه‌های دبی سنجی پیرسرا و قلعه رودخان در زیر حوضه‌های با شیب کمتر از پنج درصد قرار دارند. با توجه به اینکه 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-ج).

۲-۱-۴- 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، فرسایش پذیری و درصدی که حوضه را اشغال کرده است نشان داده شده است (شکل ۲-د).

Table 3. Soil characteristics of the study area

Be69-3c-3021	Ge34-3a-3064	I-Rc-X-c-3119	Soil Name
loam	Clay-loam	Clay-loam	Texture Type
D	C	C	Hydrological Group
4.83	13.38	38.36	Saturated Hydraulic Conductivity (mm/hr)
0.7	1.5	1.6	Organic Carbon (wt%)
24	39	39	Clay (wt%)

36	32	32	Silt (wt%)
40	29	29	Sand (wt%)
0.3	0.27	0.27	Erodibility
28.57	18.11	53.31	Percentage of Basin Area

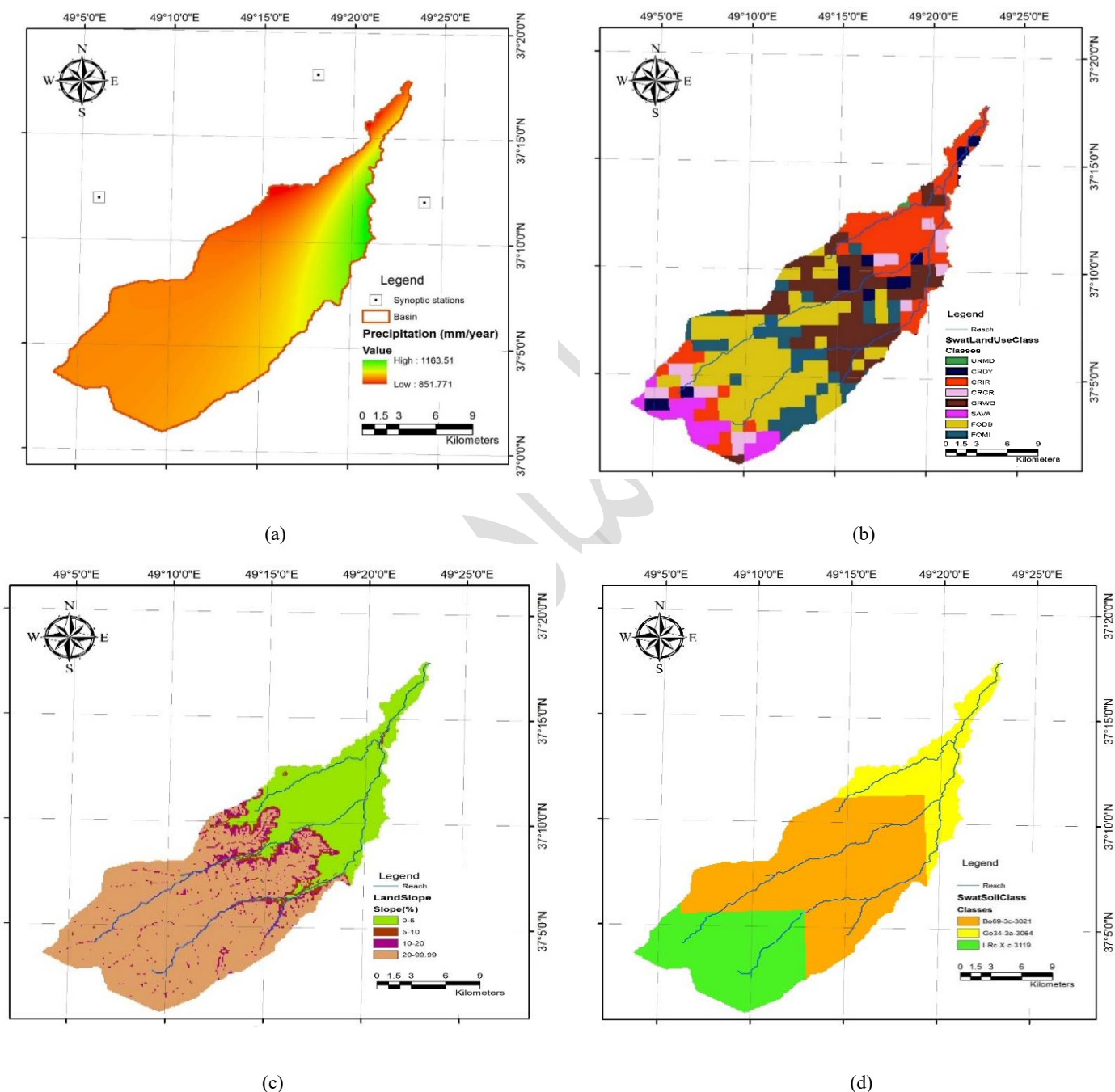


Figure 2. (a) Precipitation status, (b) Land use, (c) slope and (d) Soil characteristics of the region

۵-۱-۲- بررسی تأثیر کاربری اراضی در فرسایش و رسوب منطقه

تغییر کاربری اراضی و رژیم بارش به شدت بر نرخ فرسایش اثر می گذارد، این امر از طریق تغییر دینامیک رسوب و هیدرولوژی صورت می گیرد. تغییر کاربری اراضی از عوامل اصلی تعیین کننده ی 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 شکل ۴ و ۵ میزان رسوب تولیدی بر اساس کاربری اراضی و میزان کاهش رسوب با تغییر کاربری نشان داده شده است.

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

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

Table 5. Sediment reduction rate with land use change

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

۲-۲-۲- ساختار مدل SWAT

معادله زیر معادله‌ی بیلان آب، معادله‌ی اصلی در شبیه‌سازی هر نوع فرآیند 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 i ، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ، t زمان برحسب روز، E_a مقدار تبخیر - تعرق در روز i ، W_{seep} 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. مرحله‌ی اول، کنترل‌کننده‌ی مقدار ورودی آب و رسوب از هر زیر حوضه به داخل کانال زهکش اصلی آن و مرحله‌ی دوم، به روندیابی و حرکت آب و رسوب در شبکه‌های زهکش حوضه تا خروجی آن مربوط است (Akoko et al. 2021).

۲-۲-۱- 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 از فرمول زیر 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 (mm)، R_{day} میزان بارندگی (mm)، I_a چکیده اولیه شامل ذخیره سطحی و نفوذ مقدم بر رواناب و s پارامتر حائل است. این پارامتر طبق فرمول زیر به دست می آید:

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

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

شبیه سازی آب زیرزمینی در SWAT به دو سیستم آبخوان کم عمق و آبخوان عمیق تقسیم می شود. آبخوان کم عمق با جریان داخل کانال اصلی در ارتباط است. آبی که وارد آبخوان عمیق می شود، فرض می شود در خارج از حوضه با جریان سطحی ارتباط داشته باشد. بیلان آب برای آبخوان کم عمق در SWAT از طریق فرمول زیر محاسبه می شود:

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

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

۲-۲-۳ مؤلفه برآورد فرسایش

به طور 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 آبراهه ها است. در اثر برخورد ذرات باران بخصوص در سطوح فاقد پوشش گیاهی، ذرات خاک از زمین جدا شده و وارد شیارها و از آنجا وارد آبراهه های موقت و سرانجام وارد جریان دائمی رودخانه می شود. حرکت و ته نشینی ذرات درون آبراهه می تواند در هر مکانی درون آبراهه های اصلی رخ دهد. برای هرروز با بارندگی و رواناب مشخص، تولید رسوب برای هر HRU در حوضه از معادله زیر تخمین زده می شود:

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

که در معادله بالا Y تولید رسوب (ton)، Q حجم رواناب (m^3)، Pr نرخ دبی حداکثر $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ ، K فاکتور فرسایش پذیری خاک، C فاکتور پوشش و مدیریت، P فاکتور اقدامات حفاظتی، LS کانتور توپوگرافی، R فاکتور اجزای درشت دانه خاک است (Elemile et al. 2021).

۴-۲-۲- مؤلفه برآورد رسوب دهی

مدل برای برآورد میزان فرسایش و کف کنی بر اساس تابعی از شیب آبراهه و سرعت جریان استفاده می‌کند. حداکثر غلظت رسوب انتقال یافته از یک بازه به صورت تابعی از حداکثر سرعت جریان بر اساس معادله زیر برآورد می‌شود:

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

در این معادله $conc_{sed, ch, mx}$ حداکثر غلظت بار رسوب قابل حمل توسط جریان C_{sp} ($\frac{ton}{m^3}$)، ضریبی که توسط کاربر معرفی می‌شود، $V_{ch, pk}$ حداکثر سرعت در آبراهه (m/s)، $sp exp$ ضریبی که توسط کاربر معرفی می‌شود که در معادله اصلی Bagnold برابر با ۱.۵ است. مقدار بار رسوب ته‌نشین شده در یک بازه نیز توسط معادله زیر 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، کف کنی صورت می‌گیرد و نرخ فرسایش از معادله زیر 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 رسوب گذاری و کف کنی، مقدار نهایی رسوب در هر بازه از آبراهه از معادله زیر تعیین می‌شود:

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

مقدار کل بار رسوب معلق انتقال یافته به خارج از بازه نیز از معادله زیر قابل محاسبه است:

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

در روابط فوق sed_{deg} مقدار بار رسوب ته‌نشین شده در آبراهه $\left(\frac{ton}{m^3}\right)$ ، $conc_{sed, ch, mx}$ غلظت اولیه رسوب آبراهه $\left(\frac{ton}{m^3}\right)$ ، V_{ch} حجم آب موجود در بازه زمانی K_{CH} فاکتور فرسایش پذیری، 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 خارج شده از آبراهه (ton) و V_{out} حجم آب خارج شده از آبراهه است (Xu et al. 2022).

فرسایش پذیری خاک در کانال به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد تشکیل دهنده 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 به صورت نسبت فرسایش در کانال دارای پوشش گیاهی به فرسایش در کانال فاقد پوشش تعریف می‌شود. در مدل SWAT، زمانی که محاسبه انتقال رسوب بر اساس 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 دریکی 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 نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی با عدم قطعیت ۹۵ درصد است، نمایش داده می‌شود.

۲-۳- 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 چند هدفه هستند. اصول روش‌های مبتنی بر جمعیت عبارت‌اند 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 مجدداً تولید کرده و پس از پذیرش به سمت نقاط بهینه‌ی عمومی هدایت می‌کند. الگوریتم DE نقاط λ را با مقادیر جدید در هر نسل جایگذاری می‌کند. این الگوریتم به منظور تولید نقاط جدید از فرآیند جهش و همگذاری 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

$$f_{max} - f_{min} \leq \varepsilon \text{ and } f_{min} = \min_{x \in \lambda} f(x) \quad f_{max} = \max_{x \in \lambda} f(x) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

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

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

$$\hat{x}_i^{advanced} = C + F \times (A - B) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$\gamma_i^{advanced} = \begin{cases} \hat{x}_{ij}^{advanced} & \text{if } randi[0,1] < C \text{ or } j \in \{1,2,\dots,n\} \\ x_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که A, B و C نقاط تصادفی در مجموعه λ ، F ضریب مقیاس جهش (یک عدد بین صفر و یک)، C نرخ همگذاری (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 فرآیند از گام دوم دنبال می‌شود. در تمام عبارات i یک عدد صحیح است. (Q. Wang et al. 2019)

۳- بحث:

روند مدل‌سازی دبی جریان و دبی رسوب بدین صورت 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 فونمات در حوضه‌ی 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 فرآیند کالیبراسیون دو مرحله‌ای (دستی و خودکار) کالیبره شدند. مدل عددی کمی و کیفی به وسیله 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 فونمات جاری هستند به سختی کالیبره شدند؛ زیرا پارامترهای کالیبراسیون دبی جریان و رسوب مناطق دشتی و هموار به صورت محدود در مقالات کار شده است. با این حال ضریب NS برای رودخانه‌ی پیرسرا ۰.۶۶ و رودخانه‌ی قلعه-رودخان ۰.۷۴ به دست 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 به دست آمد. در ادامه با توجه به اینکه ۹۵ درصد کاربری اراضی منطقه به صورت شالیزار بود از بهینه‌سازی کاربری اراضی صرف نظر و بهینه‌سازی راهکار نوار گیاهی برای ۳۸ زیر حوضه 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 زیر حوضه، به عنوان تابع هدف این بهینه‌سازی قرار گرفت.

۱-۳- آنالیز حساسیت و انتخاب پارامترها

با توجه به اینکه مدل SWAT دارای پارامترهای زیادی است و این پارامترها نسبت به هر منطقه‌ی مطالعاتی متفاوت می‌باشند، در فرآیند کالیبراسیون، بر روی پارامترهای مؤثر بر دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه‌های منطقه‌ی مطالعاتی آنالیز حساسیت صورت گرفته است. جهت سهولت در مراحل واسنجی مدل، فرآیندهایی 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 جدول (۶ و ۷) است.

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

Calibrated Value	Upper Bound	Lower Bound	Description	Parameters
-0.1852	0.4	-0.4	Curve number for moisture condition II	CN2.mgt
0.0435	1	0	Baseflow alpha factor	ALPHA_BF.gw
24.05	30	10	Groundwater delay time	GW_DELAY.gw
1.601	2	0	Threshold depth of water in shallow aquifer for return flow to occur	GWQMN.gw
3.09	10	-10	Temperature lapse rate	TLAPS.sub
278.5	500	-500	Precipitation lapse rate	PLAPS.sub

0.8545	1	0	Soil evaporation compensation factor	ESCO.bsn
0	0	0	Plant uptake compensation factor	EPCO.bsn
0.197	0.4	-0.4	Moist bulk density of the soil	SOL_BD(.,).sol
-0.3924	0.4	-0.4	Available water capacity of the soil(mm/mm)	SOL_AWC(.,).sol
0.476	0.4	-0.4	Average slope length(m)	SLSUBBSN.hru
-0.3892	0.4	-0.4	Average slope steepness(m)	HRU_SLP.hru
1.25	0.2	0.1	Manning's n value for overland flow	OV_N.hru
-0.2356	0.4	-0.4	Lateral flow travel time	LAT_TTIME.hru
0.9425	1	0	Soil evaporation compensation factor	ESCO.hru
0.6915	1	0	Plant uptake compensation factor	EPCO.hru
0.0895	0.2	0.02	Groundwater revap coefficient	GW_REVAP.gw
41.35	100	0	Threshold depth of shallow aquifer Threshold depth of shallow aquifer for revap to occur	REVAPMN.gw
0.3195	0.5	-0.5	Snowfall temperature	SFTMP.bsn
-0.78	20	-20	Snow melt base temperature	SMTMP.bsn
10.61	20	0	Maximum melt rate for snow	SMFMX.bsn
4.19	20	0	Minimum melt rate for snow	SMFMN.bsn
0.2425	0.5	-0.5	Snowpack temperature lag factor	TIMP.bsn
23.1497	24	0.05	Surface runoff lag time	SURLAG.bsn

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

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

۳-۲- نتایج کالیبراسیون دبی

حین اجرای اولیه مدل، تراز آب در هر زیر حوضه پس از محاسبه‌ی تفاضل ورودی و خروجی به دست می‌آید. در نهایت به کمک 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 به صورت خودکار دامنه تغییرات پارامترهای مذکور مشخص شد و در ادامه به روش دستی و به شیوه‌ی 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 قلعه رودخان به صورت نمودارهای زیر ظاهر می‌شود. حد مجاز اختلاف

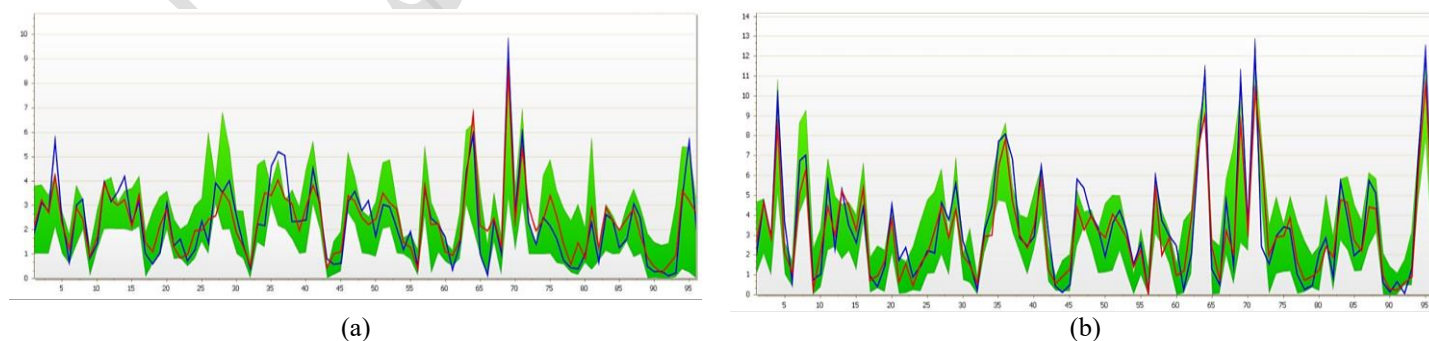
ضریب نش (NS) مشاهده‌ای و محاسباتی حداقل ۰.۵ به مدل معرفی می‌شود. اگر اختلاف محاسباتی کمتر از ۰.۵ باشد، به معنی عدم صحیح بودن پارامترهای انتخابی می‌باشد.

در مرحله واسنجی رواناب ماهیانه، پارامترهای نهایی شده برای محاسبه‌ی 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 زیر، 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 نشان‌دهنده‌ی 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 ایده آل زمانی است که مقدار فاکتور p برابر ۱۰۰ درصد و مقدار فاکتور r برابر صفر باشد. از آنجائی 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 زیر 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 زیر حوضه، 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 دوره‌ی 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.



***In this graph, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the average monthly flow rate in cubic meters per second.

Figure 3. Discharge Calibration Graph for (a) Pirsara (b) Ghaleh-Rudkhan Station (Output from SWAT-CUP)

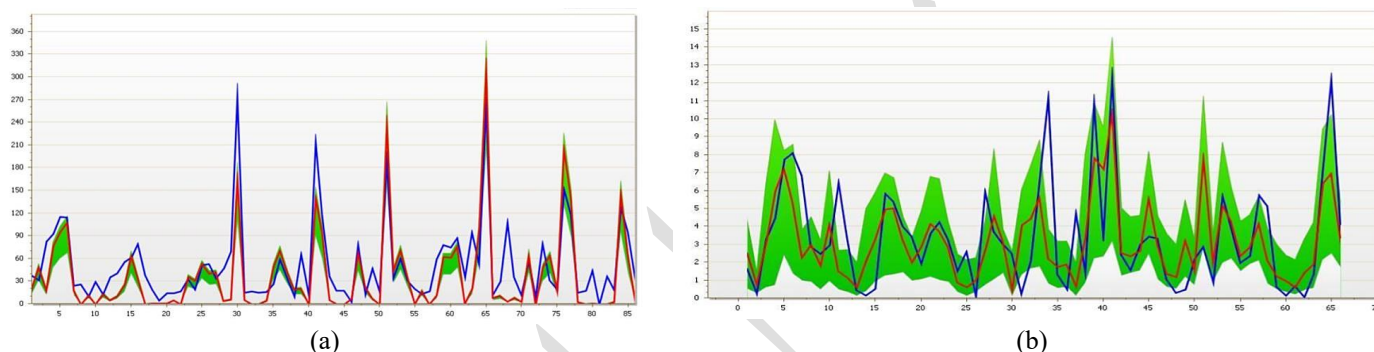
جهت صحت‌سنجی نتایج کالیبراسیون دبی، پارامترهای به دست آمده دبی، برای سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵، مجدداً وارد نرم‌افزار SWAT_CUP شد. پس از مرحله تحلیل حساسیت، پارامترهای مؤثر بر دبی جریان و دبی رسوب به شرح جدول زیر به دست آمد. از بین پارامترهای منتخب ۲۰ پارامتر برای دبی، ۱۰ پارامتر برای رسوب به عنوان پارامتر حساس انتخاب شدند. مقدار ضرایب R^2

و N.S برای ایستگاه پیرسرا و قلعه رودخان به ترتیب برابر ۰.۷۵ و ۰.۶۹. به دست 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 شبیه سازی شده نشان داده شده است.



***In this graph, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the average monthly flow rate in cubic meters per second.

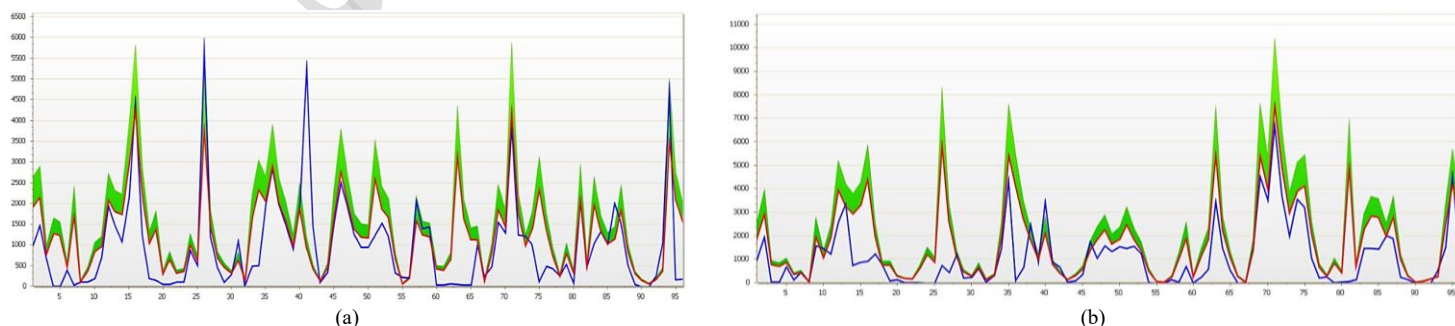
Figure 4. Discharge Validation Graph for (a) Pirsara (b) Ghaleh-Rudkhan Station (Output from SWAT-CUP)

۳-۳- نتایج کالیبراسیون رسوب

برای محاسبه رسوب ماهانه، آمار دبی جریان و غلظت رسوب اندازه گیری شده برای ایستگاه های پیرسرا و قلعه رودخان از شرکت آب منطقه ای 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. همان طور که در جدول (۱۰) دیده می شود مقدار ضریب NS برای ایستگاه های قلعه رودخان 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



*** In this graph, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the monthly sediment in tons per month

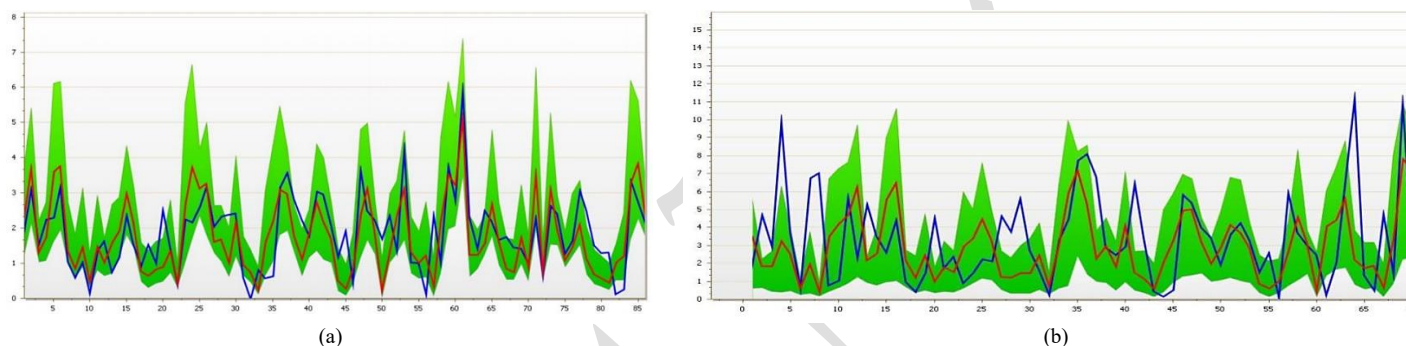
Figure 5. Sediment Calibration Graph for (a) Pirsara (b) Ghaleh-Rudkhan Station (Output from SWAT-CUP)

جهت صحت سنجی نتایج کالیبراسیون رسوب، پارامترهای به دست آمده معادله رسوب، برای سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵، مجدداً وارد نرم افزار SWAT_CUP شد. پس از مرحله تحلیل حساسیت، پارامترهای مؤثر بر دبی جریان و دبی رسوب به شرح جدول زیر 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 N.S برای دبی ایستگاه پیرسرا و قلعه رودخان 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).

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



*** In this chart, the horizontal axis is the month and the vertical axis is the monthly sediment in tons per month

Figure 6. Sediment calibration accuracy chart of (a) Pirsara (b) Ghaleh-Rudkhan Station (SWATCUP software output).

۳-۴- نتایج بهینه سازی

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 بهینه سازی تک هدفه در ۱۴۸ ساعت اجرا شد. تابع هدف تک هدفه شامل حداکثر کردن سود حاصل از کاهش رسوب منطقه فومنت واقع در زیر حوضه تالش-تالاب می باشد (شکل ۷).

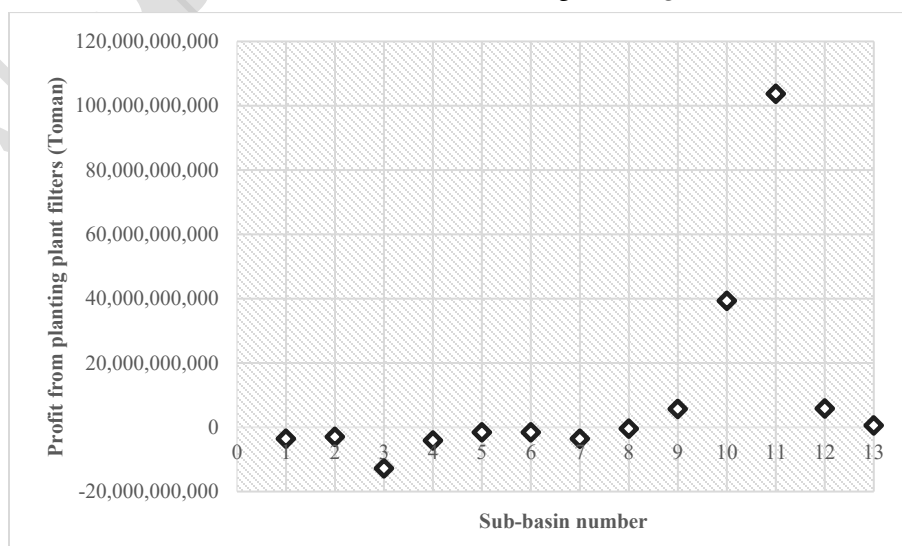


Figure 7. Net Profit Chart for Subbasins of the Study Area with Sediment Reduction via Optimal Planting of Vegetative Filter.

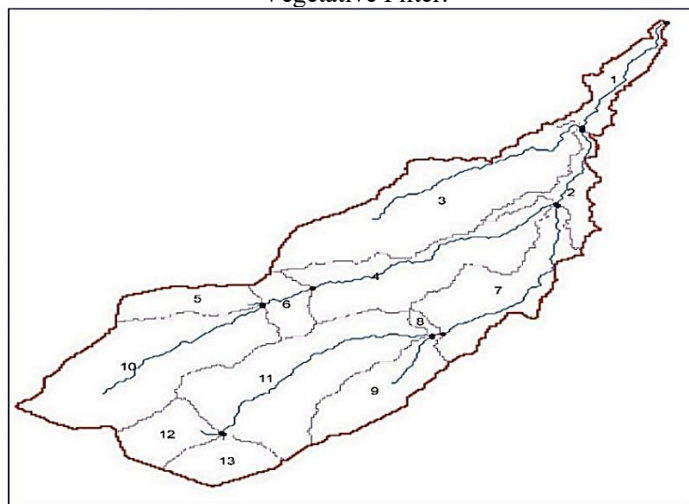


Figure 8. Subbasin Numbers of the Study Area

نتایج بهینه‌سازی تک هدفه حداقل کردن رسوب و حداکثر کردن درآمد حاصل از کاهش رسوب توسط کاشت فیلتر گیاهی در جدول (۱۲) نشان داده شده است. این مسئله بهینه‌سازی ۱۰۰ جواب بهینه دارد که هر کدام در شرایط خود بهینه هستند و نسبت به یکدیگر برتری ندارند. نزدیک‌ترین نقاط به مراکز این خوشه‌ها به عنوان نقاط منتخب جهت ارائه نتایج بررسی و با شرایط حال حاضر (غیر بهینه) مقایسه شده‌اند. در زیر حوضه‌های نه تا ۱۳، مقدار درآمد حاصل از کاهش رسوب بیشتر از هزینه‌ی کاشت فیلتر گیاهی شده است. لذا در این زیر حوضه‌ها کاشت فیلتر گیاهی مقرون به صرفه خواهد بود. اگر به این مسئله با دید اجرا پذیری و مقبولیت مردم نگاه کنیم، بهترین شرایط برای تصمیم‌گیری زیر حوضه بهینه ۱۱ است که نشان‌دهنده‌ی سود حاصل از کاشت فیلتر گیاهی می‌باشد. در هر زیر حوضه نه، 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 زیر حوضه‌های یک تا هشت منفی می‌باشد. لذا کاشت فیلتر گیاهی در این زیر حوضه‌ها توصیه نمی‌شود. مقایسه بین نقاط ۱۱ و ۳ نشان می‌دهد که در زیر حوضه‌ی سه تولید رسوب کمتری وجود دارد. لذا کاشت فیلتر گیاهی در زیر حوضه‌ی سه مقرون به صرفه نخواهد بود. درصد کاهش رسوب بیشتر در نقطه ۱۱ نسبت به نقطه سه، عامل اصلی درآمد بیشتر حاصل از کاشت فیلتر گیاهی به عنوان یکی از راهکارهای کنترل رسوب می‌باشد.

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

Percentage of Sediment Reduction	Sediment Amount After Planting Vegetative Buffer(ton/year)	Sediment Amount in the Absence of Vegetative Filter(ton/year)	Area (m2)	Subbasin Number
12.5	692.37	791.28	10990000	1
9.58	679.404	751.462	10294000	2
3.43	267474.3	276997.8	54420000	3
10.12	215973.68	240315.864	36116000	4
7.62	90392.1	97856.88	11010000	5
6.32	65044.86	69434.34	8220000	6
8	204006.66	221769.405	27885000	7
40	11.61	19.35	1290000	8
22.55	143875.6	185769.903	18931000	9

7.45	2383355	2575410.8	49550000	10
19.54	1747646	2171626.94	50510000	11
12.52	230666	263684.53	11890000	12
6	238272	253601.92	10880000	13

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

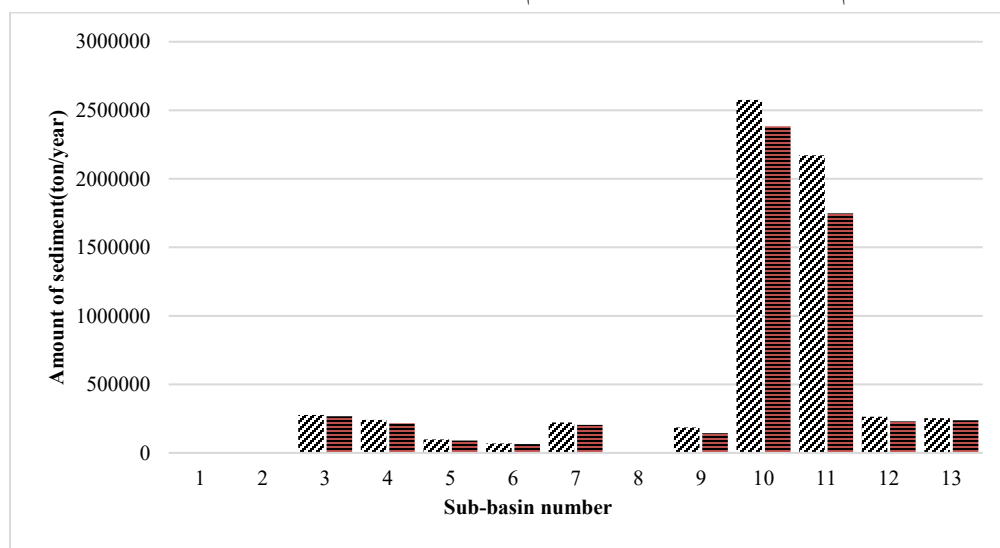


Figure 9. Comparative Chart of Sediment Reduction Before and After Planting Vegetative Filter

۳-۵ نتایج مدل بهینه تحت تأثیر کاهش رسوب

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

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

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

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی یکی از راهکارهای کنترل رسوب، یعنی کاشت فیلتر گیاهی که به‌عنوان یک اقدام سازه‌ای مؤثر در کاهش رسوب شناخته می‌شود، مورد بررسی 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 شبیه‌سازی SWAT، فرآیند بهینه‌سازی انجام شد. در این فرآیند، 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، مورد بررسی 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 به همراه 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 بر اساس 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 افزایش‌یافته 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 فرآیند 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*

- 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, Reza, and Ali Moridi. (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., Nikkani, 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, Rahil. (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.