

برآورد فرسایش خاک و انتقال رسوب در حوضه آبخیز بادآور، لرستان با استفاده از مدل SWAT

سمیه خالقی - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
کاظم نصرتی* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
رحیم عباسپور - دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳

چکیده

فرسایش خاک یکی از نگرانی‌های زیست محیطی قرن حاضر است. از اثرات فرسایش محلی می‌توان به هدر رفت لایه سطحی خاک و به تبع آن انتقال عناصر غذایی و کاهش توان تولید خاک اشاره کرد. این مطالعه با هدف برآورد فرسایش و رسوب در بالادست حوضه آبخیز بادآور لرستان انجام شده است. حوضه آبخیز بادآور هر ساله به دلایل مختلف با فرسایش خاک مواجه است، که در این بین تغییر کاربرد اراضی، شیوه نامناسب شخم زمین، چرای بی‌رویه دام‌ها، از بین بردن پوشش گیاهی منطقه سبب گردیده که سالانه مقادیر زیادی از خاک منطقه دچار فرسایش شده و از دسترس خارج گردد. لذا شناسایی مناطق پرخطر فرسایش جهت کنترل و کاهش فرسایش و تولید رسوب ضروری است. بنابراین مدل‌سازی فرسایش خاک این حوضه با مدل SWAT انجام گرفت که مهمترین ورودی‌های آن شامل اطلاعات خاک، کاربری اراضی، شیب، ارتفاع، داده‌های اقلیمی (بارش، حداکثر و حداقل دما، رطوبت نسبی) و هیدرولوژی (دبی و رسوب) می‌باشد. همچنین جهت تعیین مهمترین عوامل در تولید رسوب از تحلیل عاملی استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مقدار رسوب خروجی از حوضه ۷۱۷۰ تن در سال می‌باشد. پس از اجرای مدل، مقدار رسوب شبیه‌سازی شده با رسوب مشاهداتی در طی سالهای ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۳ مورد مقایسه قرار گرفت و با استفاده از ضریب تعیین (R^2)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و شاخص توافق (D) و ضریب همبستگی (r) مورد اعتبار سنجی قرار گرفت که ارقام هر کدام به ترتیب برابر 0.95، ۰.۰۳، ۰.۹۷ و ۰.۹۷ می‌باشد، که گویای صحت نسبتاً خوب نتایج می‌باشد. همچنین تحلیل عاملی نشان داد که نقش کاربری اراضی در رسوب زایی منطقه مورد مطالعه از سایر عوامل بیشتر می‌باشد.

واژگان کلیدی: فرسایش، رسوب، تحلیل عاملی، SWAT، بالادست حوضه بادآور.

مقدمه

فرسایش خاک یکی از نگرانی‌های عمده زیست محیطی قرن حاضر است. بیش از ۸۰ درصد از اراضی کشاورزی جهان تحت تأثیر فرسایش قرار دارند (بلنکو و لال^۱، ۲۰۰۸)، که از این طریق سالانه چندین میلیون هکتار از اراضی کشاورزی جهان تخریب می‌شوند. در دهه‌های اخیر فرسایش خاک توسط آب، با تغییر آب و هوا و کاهش تدریجی منابع طبیعی نسبت به جمعیت‌های انسانی به یک مسأله جهانی تبدیل شده است. علاوه بر این، خاک به شیوه‌های مختلف در معرض خطرات بیشتری از جمله؛ فعالیت‌های نامناسب کشاورزی، قطع درختان جنگلی، چرای بیش از حد، آتش سوزی جنگل و فعالیت‌های ساخت و ساز قرار گرفته است (ترانوا^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). ایران از جمله کشورهایی است که فرسایش خاک در آن بسیار زیاد است. میزان فرسایش خاک در کشور ۲ تا ۲/۵ میلیارد تن گزارش شده است در حالی که طبق پیش‌بینی‌های سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO) طی ۱۰ الی ۲۰ سال آینده میزان فرسایش خاک کشور به ۴/۵ میلیارد در سال خواهد رسید و در صورت به وقوع پیوستن این مقدار بسیار نگران‌کننده و فاجعه‌آمیز است و نیاز به چاره‌اندیشی بسیار اصولی دارد. همچنین از اثرات محلی فرسایش می‌توان به هدر رفت لایه سطحی خاک و به تبع آن انتقال عناصر غذایی و کاهش توان تولید خاک را نام برد. از اثرات برون محلی به ته نشین شدن رسوب در پشت مخازن آب و کاهش ظرفیت آن‌ها و مشکلات انتقال رسوب و آلاینده‌ها را نام برد (نصرتی و همکاران، ۱۳۹۵). لذا با توجه به خسارات جبران‌ناپذیر ناشی از فرسایش خاک، حفاظت خاک و کنترل فرسایش ضروری است و برنامه‌های حفاظت از خاک تحقق نمی‌یابد مگر اینکه برآورد دقیقی از میزان فرسایش و انتقال رسوب داشته باشیم.

روش‌ها و مدل‌های متنوعی در زمینه برآورد میزان فرسایش و انتقال رسوب در حوضه‌ها ارائه شده است که یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در این خصوص SWAT^۳ است. مدل ارزیابی آب و خاک SWAT (آرنولد^۴ و همکاران، ۱۹۹۸؛ آرنولد و همکاران، ۲۰۱۲) که یک مدل نیمه توزیعی با توانایی شبیه‌سازی حوضه (بریگنتی^۵ و همکاران، ۲۰۱۹) در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی است. این مدل هیدرولوژیکی برای ارزیابی رسوب (یوسف^۶ و همکاران، ۲۰۱۵؛ ویجیاک^۷ و همکاران، ۲۰۱۷؛ عبدالوهاب^۸ و همکاران، ۲۰۱۸)، تأثیر کاربری اراضی (چوتو و فتن^۹، ۲۰۱۹؛ زیگر و هوبارت^{۱۰}، ۲۰۱۶)، تولید جریان رواناب (هالوز^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸)، کیفیت آب (هوانگا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۹؛ باو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۹)، تغییرات اقلیمی و تغییرات کمی و کیفی آب (جیاو^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرانسسیسکونی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۶؛ یانگ^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۸) کاربرد دارد. این مدل بر اساس اطلاعات خاک، آب و هوا، کاربری اراضی، توپوگرافی، و پارامترهای معادله جهانی هدر رفت خاک (MUSLE)، فرسایش و انتقال رسوب را برآورد می‌نماید.

1 - Blanco and Lal

2 - Terranova

3 - Soil and Water Assessment Tool

4 - Arnold

5 - Brighenti

6 - Yesuf

7 - Vigiak

8 - Abdelwahab

9 - Choto and Fetene

10 - Zeiger and Hubbart

11 - Hallouz

12 - Hoanga

13 - Bauwe

14 - Jiao

15 - Francesconi

16 - Yang

مطالعات متعددی در زمینه فرسایش خاک و رسوبگذاری در مناطق مختلف با استفاده از کارهای آزمایشگاهی، بررسی‌های میدانی و مدلسازی انجام گرفته است. همچنین تحقیقات گسترده‌ای نیز به مطالعه فرسایش و رسوبگذاری با استفاده از مدل SWAT پرداخته‌اند از جمله: اسکندری (۱۳۸۹) به مطالعه روند تولید رسوب در حوضه نورآباد لرستان و رودخانه بادآور پرداخت. بدین منظور داده‌های دبی و رسوب ایستگاه هیدرومتری نورآباد جمع‌آوری گشته و بر اساس بازه‌های زمانی روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه تفکیک شدند. مدل سازی رابطه سنجی بین پارامترهای رواناب و رسوب بر اساس آنالیز رگرسیون نمایی تحلیل شده و همچنین در مدل هیدروژئومورفولوژی نیز ارتباط بین دبی و پارامترهای ژئومورفولوژیکی به عنوان متغیرهای مستقل و رسوب به عنوان متغیر وابسته مورد مطالعه قرار گرفت. زارع‌گاریزی و همکاران (۱۳۹۵) به شناسایی و اولویت بندی مناطق بحرانی حوضه قره‌سو در استان گیلان از نظر فرسایش و رسوب و با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج نشان داد که علی‌رغم کمبود و عدم قطعیت داده‌های موجود، کارایی مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرسایش و رسوب در حوضه قره‌سو نسبتاً قابل قبول است. بررسی توزیع مکانی شاخص‌های فرسایش و رسوب نیز بیانگر این است که زیر حوضه‌های بحرانی از نظر شاخص رسوبدهی در واحد سطح، بیشتر در مناطق بالادست حوضه هستند در حالی که زیر حوضه‌های حساس از نظر غلظت رسوب در مناطق میانی حوضه و زیر حوضه‌های حساس از نظر بار رسوب عمدتاً در پایین دست قرار دارند. غفاری (۱۳۹۷) به پهنه بندی شدت فرسایش در حوضه سد قشلاق با استفاده از مدل SWAT پرداخت. بر اساس نتایج، SWAT از قابلیت مناسب برای شناسایی مناطق بحرانی برخوردار است. بر اساس نقشه به دست آمده از شدت فرسایش، سطح حوضه به پنج کلاس فرسایشی با شدت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم شد و از ۱۰۲ زیر حوضه منطقه مطالعه، ۵۵ درصد از کل بار رسوب حوضه، تنها مربوط زیر به ۱۵ زیر حوضه است که این مناطق بحرانی بیشتر در شمال و شمال شرق حوضه قرار داشته و دارای کاربری زراعت دیم و مرتع داری بر روی اراضی شیب دار هستند. کرمی و بیاتی خطیبی (۱۳۹۸) به مدلسازی فرسایش خاک و اولویت بندی تولید رسوب در حوضه سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های MUSEL و SWAT پرداختند. بررسی تغییرات مکانی فرسایش و تولید رسوب نشان داد که اراضی حوضه سد ستارخان از نظر متوسط سالانه رسوب از یکدیگر تفاوت دارند. مناطق بحرانی با مقادیر تولید رسوب زیاد و خیلی زیاد در بالادست حوضه در بخش‌های شمالی، شمال شرقی، غرب و جنوب غربی قرار دارند. نتایج ارزیابی مدل نیز حاکی از کارایی خیلی خوب در پیش‌بینی فرسایش و رسوب است. حسون و فرقانی تهرانی (۱۳۹۸) به مطالعه مطالعه کیفیت آب و رسوب رودخانه بادآور با نگرش زیست محیطی پرداختند. نتایج نشان داد علاوه بر عوامل طبیعی، عوامل انسانی (تخلیه فاضلاب‌های خانگی و رواناب‌های کشاورزی) مهم‌ترین فرایندهای کنترل‌کننده غلظت یون‌های اصلی در آب رودخانه بادآور هستند. غلظت عنصر سرب زیاد بوده و آب رودخانه آلوده است و رسوبات حاوی مقدار زیادی ماده آلی و کربنات کلسیم هستند. ویجیاک و همکاران (۲۰۱۷) جریان رسوب در حوضه رودخانه دانوب را با استفاده از مدل SWAT مدلسازی کردند. نتایج نشان داد که مدلسازی در مقیاس حوضه رضایت بخش بوده و بر طبق مدل، بیشتر رسوب تولیدی ناشی از فرسایش تپه‌ها بوده است. تجزیه و تحلیل عاملی نیز نشان داد که تخمین کمتر از واقعیت مدل با مناطق آلبی و کارستی و با مناطق لرزه‌ای زیاد در ارتباط است. حلوز و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل SWAT به مدلسازی انتقال دبی و رسوب در حوضه هارازا در شمال غرب الجزایر پرداختند. نتایج ناشی از واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی دبی ماهانه خوب بود و میانگین کل رسوب سالانه در حوضه وادی هارازا ۵۴,۲۴ تن در هکتار برآورد شد. دارامولا^۱ و همکاران (۲۰۱۹) بار رسوبی در حوضه آبریز کادونا در نیجریه را با استفاده از مدل SWAT تخمین زدند. ارزیابی مدل SWAT نشان داد که این مدل برای پیش‌بینی دبی و رسوب، رضایت بخش بوده است. همچنین بار رسوب معلق تخمینی در حدود ۸۴,۱ تن در هکتار در سال در دوره مورد بررسی بوده و حوضه‌های ۶۷، ۷۱ و ۶۲ مستعد فرسایش بالاترین مقدار رسوب به

^۱ - Daramola

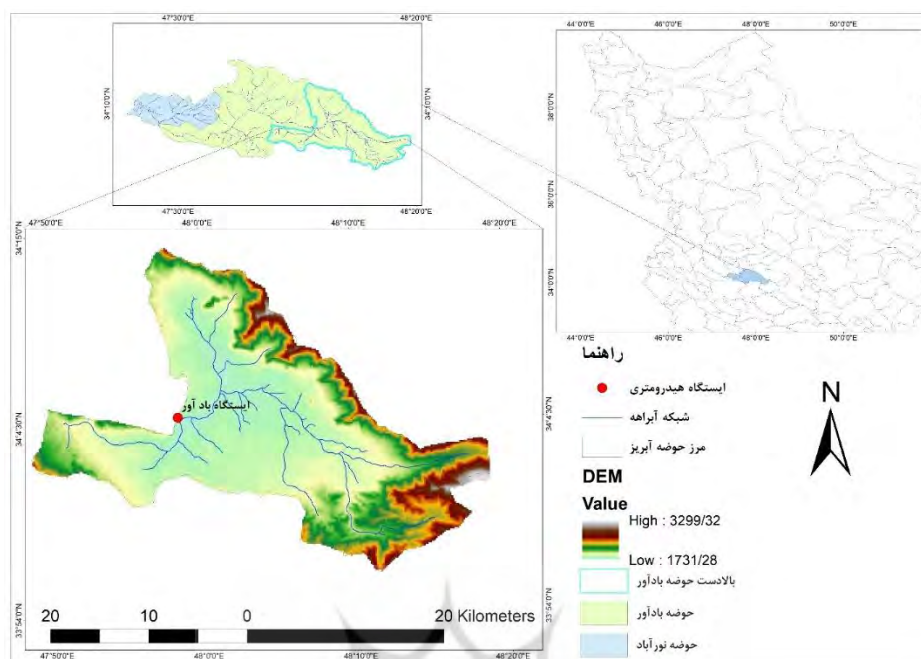
ترتیب ۷۹,۴، ۷۵,۱ و ۷۳,۸ تن در ساعت هستند. به دلیل نزدیکی حوضه های فرسایشی به سد، بهترین روش مدیریت برای پایداری سد توصیه می شود.

حوضه آبخیز بادآور با بارش متوسط سالانه ۵۲۶,۵۷ میلی متر (بر اساس آمار اخذ شده از وزارت نیرو از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۱)، خاک را دچار فرسایش کرده است، این عامل در کنار عامل تغییر کاربرد اراضی در سال های اخیر، شیوه نامناسب شخم زمین، چرای بی رویه دامها، از بین بردن پوشش گیاهی منطقه سبب گردیده که سالانه مقادیر زیادی از خاک منطقه دچار فرسایش شده و از دسترس خارج گردد. خاکی که دچار فرسایش شده نه تنها برای حوضه مورد مطالعه بلکه برای حوضه های زیر دست سبب زیان می شود که یکی از آنها پرشدن سد پایین دست از جمله سد کرخه می باشد. بنابراین لازم است مناطق پرخطر فرسایش شناسایی گردد تا جهت کنترل و کاهش فرسایش و تولید رسوب اقدامات لازم به عمل آید. بنابراین و با توجه به اینکه مدل SWAT در زمینه فرسایش و انتقال رسوب در مناطق مختلف به کار گرفته شده و نتایج مطلوبی بدست داده لذا در این پژوهش از مدل SWAT جهت شناسایی مناطق پرخطر فرسایش در بالادست حوضه بادآور استفاده شده تا سهم عوامل مختلف در فرسایش منطقه شناسایی شود.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بالادست حوضه بادآور است که حوضه بادآور خود بخشی از حوضه نورآباد می باشد (شکل ۱). حوزه آبخیز بادآور جزو یکی از سرشاخه های کرخه است که در استان لرستان واقع شده و در تقسیمات سیاسی جزو شهرستان دلفان می باشد. موقعیت قرارگیری آن از طول جغرافیایی $48^{\circ}48'$ تا $48^{\circ}18'$ و عرض جغرافیایی $33^{\circ}55'$ تا $34^{\circ}4'$ است. وسعت منطقه مورد مطالعه ۵۸۴ کیلومتر مربع که معادل ۵۸۳۱۱ هکتار می باشد. بخش بزرگی از منطقه مورد مطالعه در یک دشت واقع شده است که اطراف آنرا حصار کوهستانی فرا گرفته است. بیشترین ارتفاع حوضه ۳۲۹۹، کمترین ارتفاع حوضه ۱۷۳۱ و ارتفاع متوسط حوضه ۲۵۱۵ متر می باشد. بیشترین شیب منطقه را ۵-۰ درجه با ۳۷,۱۵ درصد مساحت و کمترین شیب منطقه بیش از ۶۰ درجه با ۱,۹۵ درصد مساحت می باشد. بر اساس اطلاعات حاصل از سازمان جنگل ها و مراتع از مهم ترین کاربری های منطقه می توان به باغ، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، مرتع خوب، مرتع ضعیف، جنگل تنک و پراکنده اشاره کرد. بیشترین سهم از کاربری اراضی منطقه به زمین های کشاورزی اختصاص دارد و مرتع در رتبه بعدی است. از نظر زمین شناسی، این حوضه مشتمل بر واحدهای سنگی زاگرس مرتفع و زون سندج-سیرجان است که به طور عمده نابرجا و از نظر رخساره های با گستره های مجاور خود متفاوت می باشد. واحدهای سنگی زون زاگرس مرتفع، ارتفاعات بخش جنوب غربی حوضه بادآور را تشکیل می دهند. بخش بزرگتر حوضه را نیز زون سندج-سیرجان می پوشاند. سازندهای محدوده مورد مطالعه شامل سازند امیران، واحدهای چینه ای زون سندج-سیرجان، رسوبات کواترنری، واحدهای رسوبی دگرگونی سنقر-کنگاور و امرالله می باشند. بیشتر وسعت منطقه را رسوبات کواترنری تشکیل داده اند که مستعد فرسایش می باشد. بر طبق آمار اخذ شده از وزارت نیرو (تماب) در دوره آماری سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۱، متوسط بارندگی سالانه حوضه بادآور ۵۲۶,۵۷ میلی متر بوده و همچنین حوضه بادآور دارای متوسط درجه حرارت سالانه ۱۰,۵ درجه سانتی گراد می باشد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

آماده سازی داده ها

ابتدا داده های مورد نیاز برای مدل سازی آماده شدند این داده ها شامل مدل ارتفاعی رقومی، نقشه زمین شناسی، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و داده های اقلیمی و هیدرولوژی بودند. نقشه مدل ارتفاعی رقومی DEM حوضه، از روی نقشه توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور با قدرت تفکیک ۳۰ متر تهیه شد. در مدل SWAT از مدل رقومی ارتفاع در جهت استخراج شیب حوضه، شبکه آبراهه، حوضه های حوضه و خصوصیات مورفومتری آبخیز حوضه مانند مساحت، محیط، طول و... استفاده می شود. همچنین نقشه زمین شناسی نیز از روی نقشه های زمین شناسی اخذ شده از سازمان زمین شناسی کشور به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و مربوط به شیت های شماره ۵۶۵۷، ۵۶۵۸ و ۵۵۵۸ تهیه گردید. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از سازمان جنگل ها و مراتع اخذ گردید که دارای مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ بوده و پس از اطمینان از صحت و دقت کافی مورد استفاده قرار گرفت. از مهم ترین کاربری های منطقه می توان به باغ، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، مرتع خوب، مرتع ضعیف، جنگل تنک و پراکنده اشاره کرد.

همچنین نقشه خاک از مهمترین داده های مورد استفاده در مدل SWAT می باشد که مستلزم کار میدانی و آزمایشگاهی است. ابتدا نقشه زمین شناسی و کاربری اراضی با هم تلفیق شد تا تمام عوارض و کاربری ها منطقه مورد نظر را پوشش دهد، سپس با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به ۶۰۰ پیکسل تقسیم گردید و با استفاده از سیستم نمونه برداری سیستماتیک تصادفی، پیکسل ها انتخاب و هر کدام نشانه گذاری شدند. در نمونه برداری سیستماتیک تصادفی انتخاب پیکسل ها کاملاً بصورت تصادفی می باشد. سپس در روی زمین، ۳۹ نقطه نمونه برداری با استفاده از وسایل و تجهیزاتی مانند رینگ، چکش، دستگاه GPS، کیسه مخصوص نمونه انجام شد. پس از انجام نمونه برداری، نمونه ها به محیط آزمایشگاه انتقال داده شدند و آزمایش های لازم روی هر نمونه انجام گرفت. مدل SWAT برای تهیه نقشه خاک به اطلاعاتی از قبیل: گروه هیدرولوژیکی خاک، بافت خاک، فرسایش پذیری خاک، هدایت الکتریکی، PH خاک، وزن مخصوص خاک، کربنات کلسیم، میزان رطوبت نیازمند است که این اطلاعات پس از جمع آوری نمونه های خاک از منطقه و آزمایش هر کدام از نمونه ها در آزمایشگاه دانشگاه شهید بهشتی بدست آمدند که پس از معرفی ویژگی های فوق به مدل، نقشه خاک منطقه مورد مطالعه بدست آمد.

در نهایت داده های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک نورآباد از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۱ از سازمان هواشناسی و سایت مولد داده های اقلیمی (WGEN) اخذ گردید که شامل داده های بارش، حداقل و حداکثر دمای روزانه، رطوبت نسبی می باشند. بر طبق ساختار ویرایشی مدل SWAT در قالب فایل های با فرمت ASCLL با پرسوند TXT برای تمام ایستگاه ها حوضه بصورت جداگانه آماده گردید. داده های هیدرومتری نیز شامل آمار بلند مدت رواناب و رسوب می باشد که برای این تحقیق از آمار ایستگاه بادآور مربوط به سال های ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۳ از وزارت نیرو اخذ گردید.

شبیه سازی فرسایش و انتقال رسوب با مدل SWAT

مدل SWAT در دو واحد زیر حوضه و واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) مورد استفاده قرار می گیرد (نیتش^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). در مدل SWAT هر حوضه به چند زیر حوضه و هر زیر حوضه به چند HRU^۲ که از نظر کاربری ارضی، ویژگی های خاک و توپوگرافی و مدیریتی و رفتارهای هیدرولوژیکی همگن هستند، تقسیم می شوند (ویجیاک و همکاران، ۲۰۱۷). در مدل SWAT فرسایش و بار رسوب برای هر HRU با استفاده از معادله اصلاح شده جهانی هدر رفت خاک MUSLE برآورد می شود (رابطه ۱). در مدل MUSLE میانگین سالانه فرسایش خاک تابعی از انرژی باران و رواناب است:

$$Sed = 11/8(Q_{surf} q_{peak} area_{hru})^{0.56} K_{USLE} C_{USLE} P_{USLE} LS_{USLE} CFRG \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، Sed، مقدار بار رسوب در یک روز (تن)؛ Q_{surf} ، مقدار رواناب سطحی (میلی متر در هکتار)؛ q_{peak} ، بیشینه شدت رواناب (متر مکعب بر ثانیه)؛ $area_{hru}$ ، مساحت هر HRU (هکتار)؛ K_{USLE} ، فاکتور فرسایش پذیری خاک؛ C_{USLE} ، فاکتور مدیریت و پوشش؛ P_{USLE} ، فاکتور روش های حفاظتی؛ LS_{USLE} ، فاکتور توپوگرافی و شیب، $CFRG$ ، فاکتور سنگریزه های درشت دانه می باشد.

برای شبیه سازی فرسایش و انتقال رسوب در بالادست حوضه بادآور با استفاده از مدل SWAT، در مرحله اول با وارد کردن نقشه رقمی ارتفاع و تعیین محدوده و مساحت حوضه بر اساس شبکه هیدروگرافی، و محل ایستگاه هیدرومتری بادآور به عنوان خروجی حوضه آبخیز تعریف و در نهایت حوضه به چند زیر حوضه تقسیم می شود. سپس با روی هم انداختن نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و نقشه شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تهیه می شود. در نهایت داده های اقلیمی (بارش، حداقل و حداکثر دمای روزانه، رطوبت نسبی) از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۱ به مدل معرفی می شوند. سپس، سایر اطلاعات مورد نیاز به صورت دستی و در جداول نرم افزار وارد می شوند و در نهایت دستور اجرای مدل داده شده و نتایج استخراج می گردند.

اعتبار سنجی مدل

اعتبار سنجی مدل عبارت است از فرآیندی که پس از واسنجی مدل که در آن قابلیت یک مدل انتخاب شده برای یک منطقه و پیش بینی صحیح دوره ای غیر از دوره واسنجی بررسی می شود. زمانی می توان گفت یک مدل اعتبارسنجی شده است که صحت و قابلیت پیش بینی آن دوره اعتبار سنجی با مقدار خطای قابل قبول اثبات شده باشد. لازم به ذکر است که عبارت اعتبار سنجی یک مدل به یک منطقه خاص اشاره دارد و نباید این تصور غلط به وجود آید یک مدل برای تمامی نقاط اعتبار سنجی شده است (رفسگارد^۳، ۲۰۰۷).

^۱ - Neitsch

^۲ - Hydrologic Response Unit

^۳ - Refsgaard

برای اعتبار سنجی میزان رسوب بدست آمده از مدل SWAT، ۲۰ درصد از آمار رسوب سالهای ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۲ در نظر گرفته می‌شود و با آمار دبی رسوب در ایستگاه هیدرو متری مقایسه می‌شود. چندین روش برای محاسبه خطا بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی وجود دارد.

- ضریب تعیین (R^2): مقدار بهینه این شاخص آماری یک می‌باشد، به عبارتی هر چه مقدار این شاخص به عدد یک نزدیکتر باشد مدل از صحت بیشتری برخوردار است و نشان می‌دهد که رابطه بدست آمده صحیح تر است و برعکس هر چه این شاخص به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده این است که رابطه استخراج شده از صحت کمتری برخوردار است (رضانی پور و همکاران، ۱۳۹۶) (رابطه ۲).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right]^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

- خطای جذر میانگین مربعات (Root Mean Square Error): $RMSE$ ، خطای جذر میانگین مربعات؛ Obs ، دبی رسوب اندازه‌گیری شده از ایستگاه هیدرومتری؛ $Pred$ ، دبی رسوب بدست آمده از مدل SWAT، n : تعداد سال‌های مورد نظر (رابطه ۳). این رابطه تنها بزرگی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد و برای مقایسه دو مدل ایجاد مشکل می‌کند. هر چه مقدار این شاخص به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده دقت بالای مدل است. تامپسون (۱۹۹۹) شاخصی را به نام شاخص توافق (d) برای بیان توافق و همگنی داده‌های برآوردی و اندازه‌گیری شده ارائه کرد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - y_{pred})^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

- شاخص توافق (d): مقادیر d بین صفر و یک می‌باشند. هر چه شاخص به یک نزدیکتر باشد بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده هماهنگی بیشتری وجود دارد (نصرتی، ۱۳۸۵) (رابطه ۴).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

- ضریب همبستگی (r): معادله ضریب همبستگی (r) از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن y_{act} مقادیر واقعی و y_{est} مقادیر برآورد شده است (رابطه ۵). هر چه مقدار r به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده نزدیکی بیشتر مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی است.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{pred} - \bar{y}_{pred})(y_{obs} - \bar{y}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{pred} - \bar{y}_{pred})^2 \sum_{i=1}^n (y_{obs} - \bar{y}_{obs})^2}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

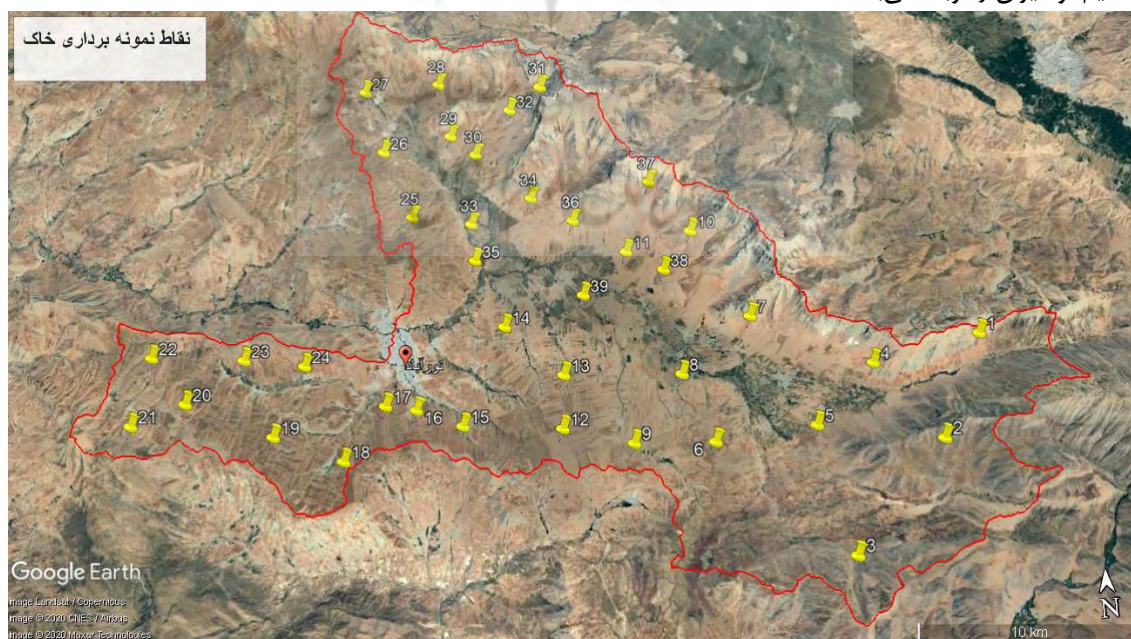
تحلیل عاملی

جهت شناخت مهمترین عامل فرسایش و تولید رسوب در منطقه از تحلیل عاملی استفاده شد. در بسیاری از مطالعات بر اساس فرضیه‌ها و تئوری‌های مورد بررسی حجم زیادی از داده‌ها جمع‌آوری می‌گردد. تحلیل عاملی می‌تواند به عنوان روشی در کاهش داده‌های مورد استفاده قرار گیرد تا مجموعه داده که شامل تعداد زیادی متغیر است، به تعداد مناسب و معقول کاهش یابد. هنگامی که تعدادی از داده‌های اصلی دارای همبستگی قوی باشند، می‌توان داده‌های اصلی را از تعداد

زیاد متغیر به تعدادی عامل کاهش داد. به منظور بیان بهتر می‌توان از تفسیر هندسی در توضیح هدف تحلیل عاملی استفاده نمود. چنانچه مجموعه‌ای داده‌ی با n مشاهده با p متغیر داشته با شیم می‌توان تعداد نقاط مشاهده را در مقابل یک یا تعدادی از متغیرها ترسیم نمود. مثلاً چنانچه سه متغیر را در نظر بگیریم و تعداد داده‌های مشاهداتی را در یک نمودار رسم کنیم مجموعه نقاط به شکل لوزی و یا دایره دیده می‌شوند. تحلیل عاملی بر اساس توجیه بیشترین سهم تغییرات مجموعه داده است (نصرتی، ۱۳۹۲).

بحث و یافته‌ها

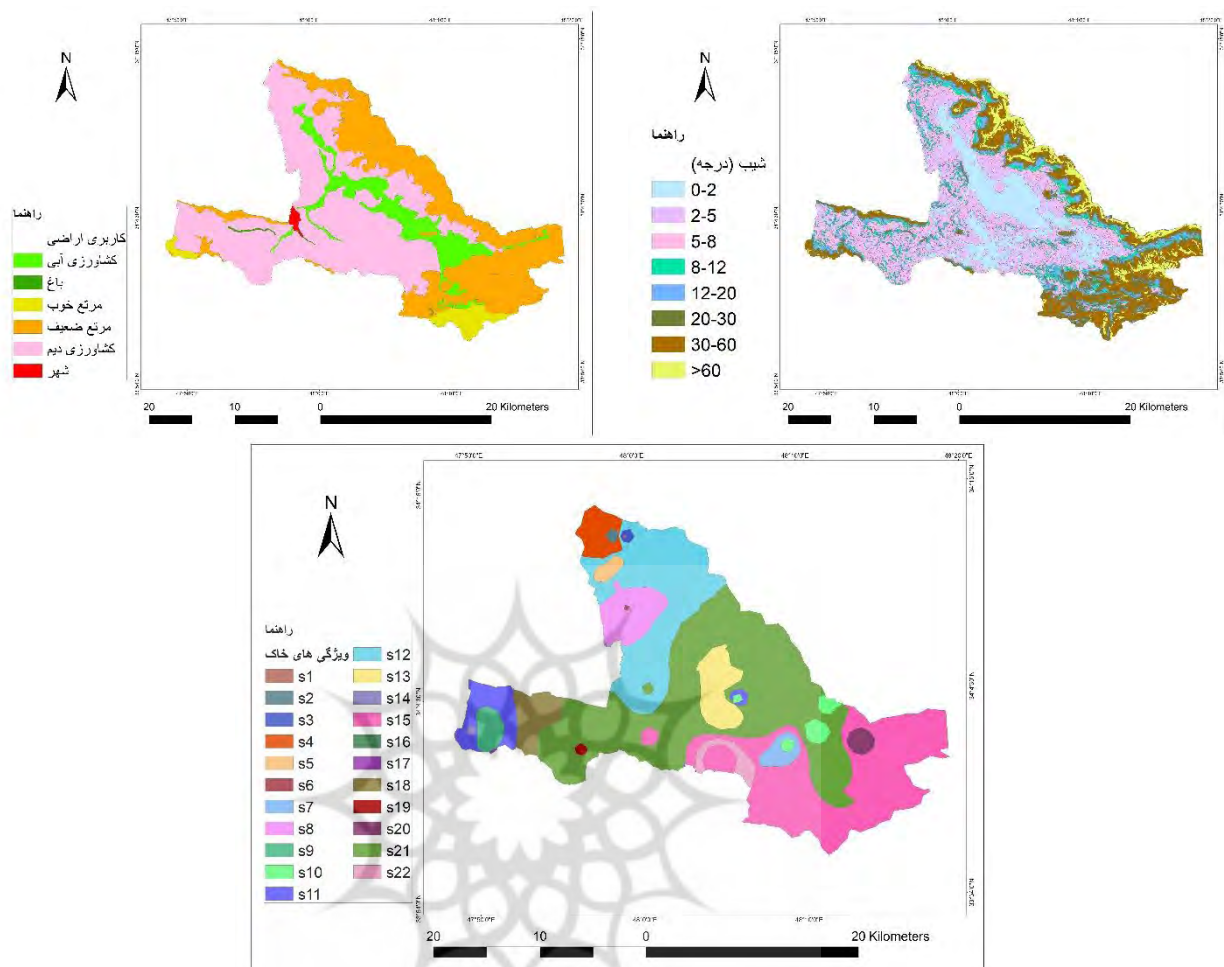
در ابتدا نقشه کاربری اراضی، مدل ارتفاعی رقومی، شیب و نقشه خاک تهیه شد. برای تهیه نقشه خاک بر اساس ۳۹ نقطه نمونه برداری شده (شکل ۲)، ویژگی‌های خاک (گروه هیدرولوژیکی خاک (HSG)، بافت خاک (TEXTURE)، فرسایش پذیری خاک (K)، هدایت الکتریکی (EC)، PH خاک، کربنات کلسیم (OC)، درصد مواد آلی (OM)، میزان رطوبت) طبق جدول ۱ در آزمایشگاه بدست آمد. سپس آمار و اطلاعات تهیه شده به فرمت‌های ویژه (باید توجه داشت که مدل SWAT تنها قادر به شناخت اطلاعاتی است که قبلاً در Database آن تعریف شده‌اند. این اطلاعات بصورت GRID یا SHP می‌باشد و می‌توان این اطلاعات را بصورت TXT یا DBF تهیه کرد) تبدیل و به مدل SWAT معرفی شد. مدل با پردازش نقشه‌های ورودی، مدل رقومی ارتفاع، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و شیب (شکل ۳) پس از رویهم‌گذاری به منظور شبیه‌سازی جزئیات مکانی، حوضه به ۳۳ زیرحوضه تقسیم شد و سپس بر اساس کاربری اراضی، شیب، ارتفاع و خصوصیات خاک، ۵۳ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تعیین گردید. لازم به ذکر است که در نقشه خاک، کدها بر اساس ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه دارد نام گذاری شده‌اند و این خصوصیات خاک قبلاً از طریق نمونه برداری و کارهای آزمایشگاهی بدست آمده است، که خاک منطقه مورد مطالعه به ۲۲ پلیگون با ویژگی‌های مجزا تقسیم شده است. مثلاً S1 دارای ویژگی‌های مخصوص خود از جمله میزان ماسه، رس، سیلت، بافت، گروه هیدرولوژیک خاک، فرسایش پذیری خاک، هدایت الکتریکی، PH خاک، وزن مخصوص خاک، کربنات کلسیم، و میزان رطوبت می‌باشد.



شکل ۲: پراکنش نقاط نمونه برداری خاک منطقه مورد مطالعه

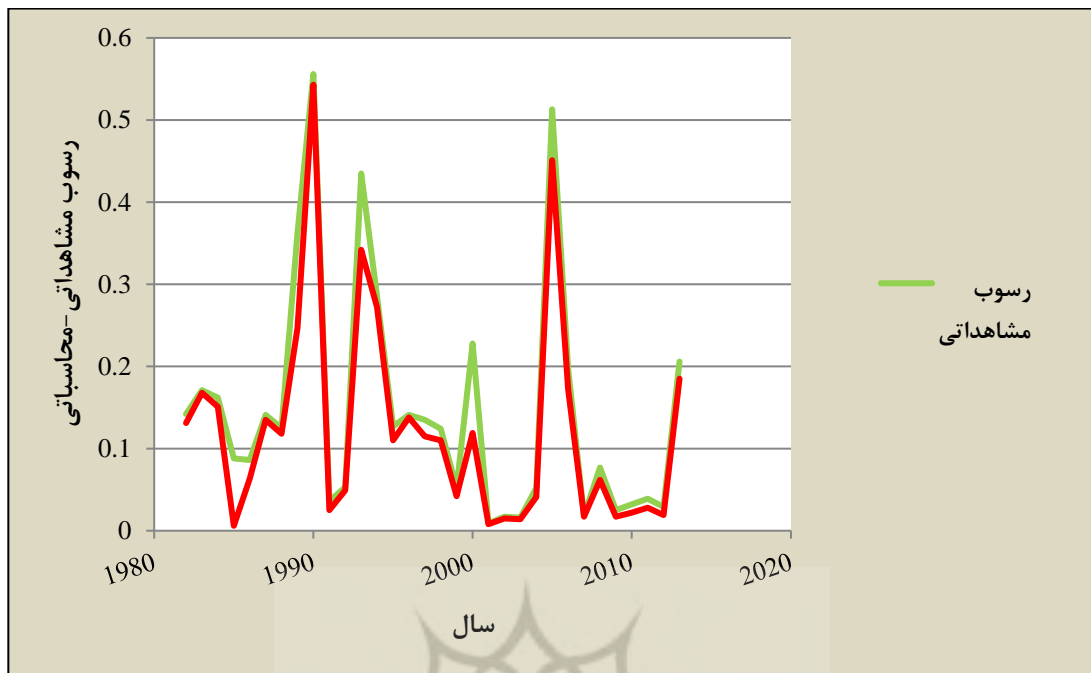
جدول ۱: پارامترهای اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه

OC	EC	PH	K	OM	HSG	TEXTURE	CLAY	SILT	SAND	نمونه
.525	%35	7.2	0.37	.905	C	clay loam	28	51.6	20.4	1
.75	%52	7.1	0.16	1.29	C	silty clay loam	36.72	49.6	13.68	2
1.2	%34	6.9	0.42	2.06	C	clay loam	32.72	46.88	20.4	3
.75	%35	7.2	0.45	1.29	C	silt loam	20	65.6	14.4	4
1.2	%32	7.1	0.50	2.06	C	silt loam	14	71.6	14.4	5
.225	%34	6.9	0.33	.38	C	silt clay loam	32	51.6	16.4	6
.705	%35	7	0.46	1.21	C	silt loam	19	58.4	22.6	7
1.14	%34	7.2	0.24	1.96	C	silty clay	44	47.6	8.4	8
.525	%35	7.1	0.36	.905	C	silt clay loam	33.2	66.4	.4	9
.75	%33	6.9	0.42	1.29	C	silt loam	26	67.6	6.4	10
.555	%37	6.8	0.28	.956	C	clay loam	28	27.6	44.4	11
1.11	%36	6.9	0.33	1.91	C	silt clay loam	10.4	59.6	30	12
1.08	%34	7.2	0.24	1.82	C	silt clay loam	38	47.6	14.4	13
1.485	%33	7.1	0.254	2.56	C	silty clay	42.72	52.88	4.4	14
.375	%32	7.1	0.25	.646	C	silty clay	42.77	42.88	14.4	15
.75	%32	7.2	0.24	1.29	C	clay	48.72	42.88	8.4	16
1.095	%40	7.3	0.10	1.88	C	clay	56.72	32.88	10.4	17
1.245	%48	7.1	0.27	2.16	C	silt clay loam	32	48.88	19.12	18
.06	%33	7.3	0.40	.103	C	silt loam	8	30.88	61.12	19
.975	%48	7.2	0.27	1.68	C	silt clay loam	38	56.88	5.12	20
.645	%32	7.3	0.20	1.11	C	clay	40.72	34.88	24.4	21
.9	%50	7.3	0.196	1.55	C	clay	41.28	35.6	23.12	22
1.05	%35	7.2	0.20	1.81	C	clay	44	32.88	23.12	23
1.875	%32	7.3	0.07	3.23	C	clay	62.72	20.88	16.4	24
1.125	%52	7.1	0.18	1.93	C	silty clay	48	42.88	9.12	25
1.445	%48	7.2	0.16	2.49	C	clay clay loam	40	26.88	33.12	26
1.125	%37	7.2	0.14	1.93	C	clay	50.72	32.88	16.4	27
.735	%51	7.3	0.36	1.26	C	loam	20	64.88	33.12	28
1.125	%41	7.2	0.24	1.93	C	silty clay	44	46.88	9.12	29
.795	%33	7.3	0.17	1.37	C	clay	48.72	38.88	12.4	30
1.08	%37	7.1	0.20	1.86	C	silty clay	42	40.88	17.12	31
.93	%34	6.9	0.30	1.60	C	silt clay loam	38	56.6	4.4	32
.885	%51	6.8	0.44	1.52	C	silt loam	14	56.88	29.12	33
.06	%39	7.1	0.34	.103	C	silty clay loam	37.28	45.6	17.12	34
.975	%33	6.9	0.23	1.68	C	silt clay loam	38	43.6	18.4	35
1.245	%34	7.1	0.22	2.14	C	silty clay silt clay loam	40	47.6	12.4	36
.93	%33	6.9	0.23	1.60	C	clay loam	31.12	35.6	33.28	37
1.065	%30	7.1	0.12	1.83	C	clay	58	32.88	9.12	38
1.05	%51	7.2	0.24	1.81	C	clay loam	34.72	32.88	32.4	39

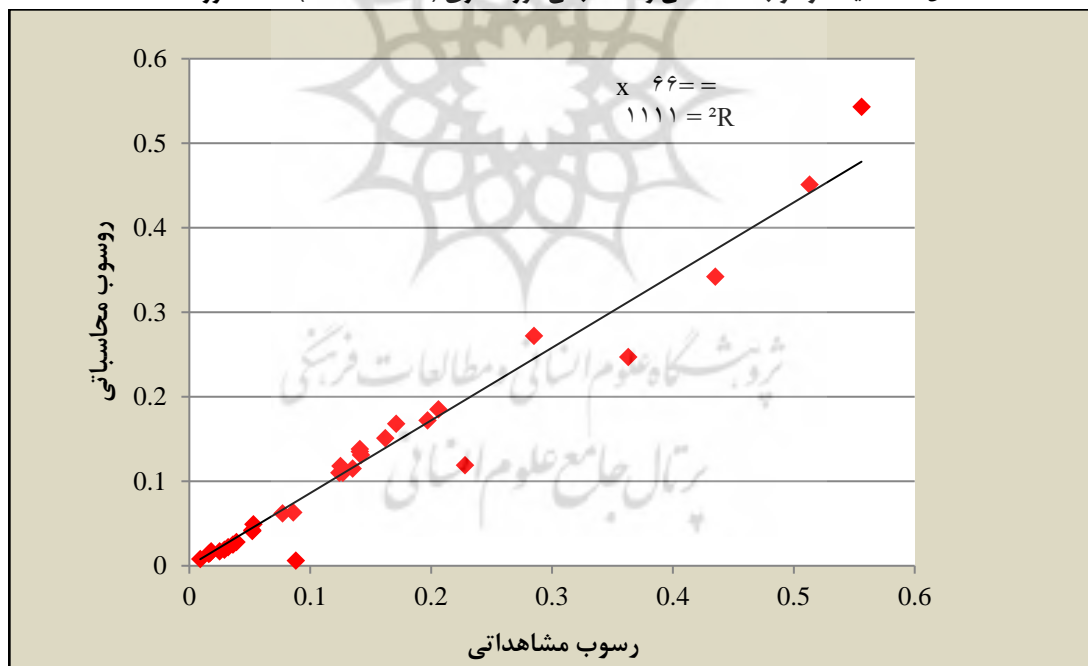


شکل ۳: نقشه شیب، کاربری اراضی و خاک منطقه مورد مطالعه

پس از ورود داده‌ها و نقشه‌ها به مدل میزان فرسایش و انتقال رسوب شبیه سازی شد. مدل SWAT فرسایش و بار رسوب را برای تمام زیرحوضه‌ها را با استفاده از معادله هدر رفت خاک RUSLE برآورد کرده است. مقدار رسوب زیر حوضه‌ها در مدل RUSLE تابعی از میانگین فرسایش خاک و انرژی باران است. مدل مقدار رسوب برای هر زیر حوضه را متناسب با ویژگی‌های مانند بیشینه رواناب سطحی، مساحت هر زیر حوضه، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، فاکتور مدیریت و پوشش، روش‌های حفاظتی خاک، توپوگرافی، بافت خاک منطقه و مقدار آب قابل دسترس محاسبه کرده و در نهایت برای هر زیر حوضه به صورت سالانه مقدار رسوب را برآورد کرده است. آنچه از مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ مربوط به رسوب مشاهداتی و محاسباتی استنتباط می‌شود این است که نتایج مقدار رسوب محاسباتی و مشاهداتی نزدیک به هم می‌باشد و برای اطمینان از میزان دقت رسوب محاسباتی با مشاهداتی از طریق روابط، ضریب تعیین (R^2)، مجذور میانگین خطای مربعات (RMSE) ضریب همبستگی (r) و شاخص توافق (d) مورد اعتبار سنجی قرار گرفتند که مقادیر هر کدام از آن‌ها برابر 0.95، 0.3، 0.97 و 0.97 می‌باشد، نتایج شاخص‌های بکارگرفته شده دقت رسوب محاسباتی را در مقایسه با رسوب مشاهداتی بر طبق جدول ۲ نشان می‌دهند.



شکل ۴: مقایسه رسوب مشاهداتی و محاسباتی دوره آماری (۱۹۸۲-۲۰۱۳) منطقه مورد مطالعه



شکل ۵: نمودار رگرسیون مقادیر سالانه رسوب مشاهداتی و محاسباتی دوره اعتبار سنجی (۱۹۸۲-۲۰۱۳)

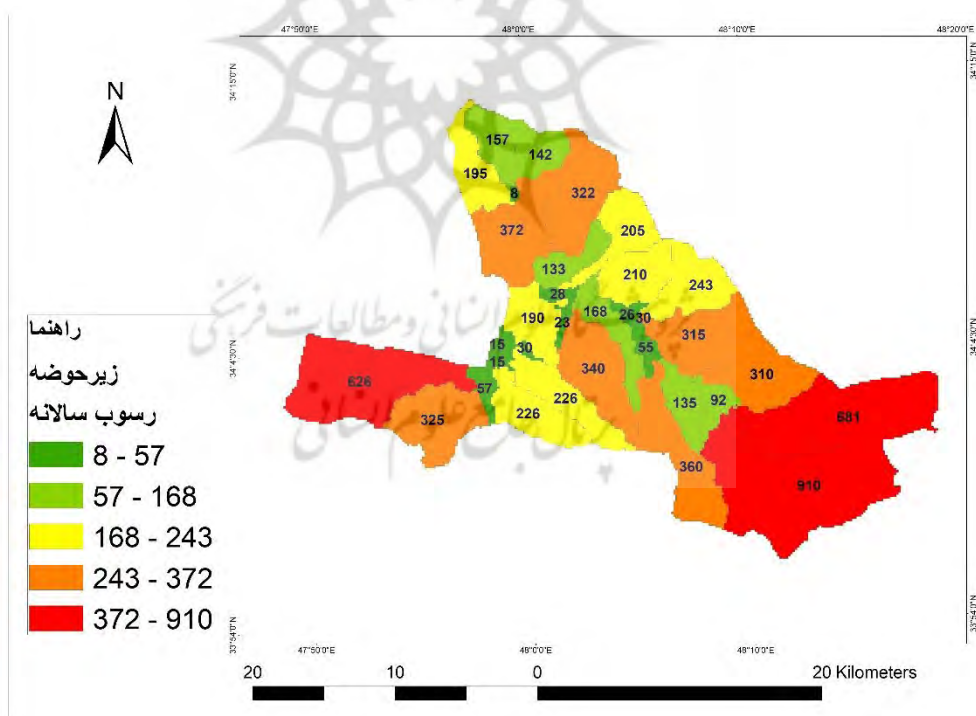
رسوب تولیدی در هر کدام از زیر حوضه‌ها

برای تعیین سهم رسوب تولیدی هر کدام از زیر حوضه‌ها، حوضه آبخیز مورد مطالعه، نقشه تولید رسوب تهیه شد، و مشخص شد که هر زیر حوضه با توجه به خصوصیات فیزیوگرافی، کاربری اراضی، خاک، شیب تا چه اندازه در تولید رسوب سالانه نقش داشته است. در بررسی عوامل موثر بر فرسایش خاک و تولید رسوب به طور ریشه‌ای نمی‌توان عامل اصلی مشخص و معینی را به طور صد در صد به عنوان عامل اصلی فرسایش آبی در یک منطقه معرفی نمود، بلکه شرایط فرسایش موجود در منطقه را باید معلول تاثیر متقابل مجموعه‌ای عوامل موثر در ایجاد فرسایش دانست. عوامل

بی‌شماری را می‌توان به عنوان عوامل موثر در فرسایش خاک و تولید رسوب معرفی نمود. مقایسه بین زیر حوضه‌ها نشان می‌دهد (جدول ۲ و شکل ۶) دو زیر حوضه شماره ۲۴ و ۳۳ با مساحت به ترتیب ۸/۷۴ و ۹/۱۰ وسعت تقریباً برابر دارند اما مقدار رسوب تولیدی در هر کدام از آنها متفاوت می‌باشد که این هر دو زیر حوضه از نظر ویژگی‌های کاربری، خاک شناسی، شیب، ارتفاع و فرسایش پذیری مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج در جدول ۲ نشان می‌دهد که از عوامل مهم تاثیر گذار در تولید رسوب می‌توان به نوع کاربری اراضی اشاره کرد. به طور کلی مدل بر اساس اطلاعات ورودی یک نقشه تولید رسوب تهیه کرده است که سهم هر کدام از این زیر حوضه‌ها را در تولید رسوب نشان می‌دهد (جدول ۳). مقدار کل رسوب زیر حوضه‌ها جمع شده و مقدار کل رسوب شبیه سازی شده حوضه بدست آمد و با مقدار رسوب مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری بادآور اعتبار سنجی شد.

جدول ۲: مقایسه رسوب در زیر حوضه‌های شماره ۲۴ و ۳۳

زیر حوضه	مساحت (%)	رسوب تولیدی (T/y)	اراضی آبی	اراضی دیم	مرتع ضعیف	فرسایش پذیری	شیب (درجه)	بافت	ارتفاع (متر)
۳۳	۹/۱۰	۹۱۰	۸/۲۱	۵/۸۱	۶۵/۰۷	۳۳i	۱۵-۰	Silt-clay	۱۹۸۲
۲۴	۸/۷۴	۶۲۶	۰.۹٪	۷۷/۸۶	۱۴/۴۶	۲۹٪	۱۵-۰	Clay-loam	۱۸۵۵



شکل ۶: نقشه زیر حوضه‌ها و سهم هر کدام از تولید رسوب سالانه (تن) در منطقه مورد مطالعه

جدول ۳: مقدار رسوب تولیدی در هر زیر حوضه

مقدار رسوب سالانه رسوب (تن) محاسباتی	زیر حوضه	مقدار رسوب سالانه رسوب (تن) محاسباتی	زیر حوضه
۱۵	۱۸	۱۵۷	۱
۳۰	۱۹	۱۴۲	۲

۵۵	۲۰	۱۹۵	۳
۱۵	۲۱	۸	۴
۱۳۵	۲۲	۳۷۲	۵
۳۱۵	۲۳	۳۲۲	۶
۶۲۶	۲۴	۱۳۳	۷
۵۷	۲۵	۲۰۵	۸
۲۲۶	۲۶	۲۱۰	۹
۳۱۰	۲۷	۲۸	۱۰
۲۲۶	۲۸	۱۶۸	۱۱
۹۲	۲۹	۲۳	۱۲
۲۲۵	۳۰	۲۶	۱۳
۶۸۱	۳۱	۳۴۳	۱۴
۳۶۰	۳۲	۳۰	۱۵
۹۱۰	۳۳	۳۴۰	۱۶
۷۱۷۰	مجموع	۱۹۰	۱۷

– اعتبار سنجی

جهت اعتبار سنجی مدل SWAT از روابط: میانگین خطای مربعات RMSE، ضریب تعیین R^2 ، ضریب همبستگی (r) و شاخص توافق d استفاده شده است که مقادیر هر کدام از آنها در جدول ۴ آمده است. مشاهده این شاخص در مرحله اعتبار سنجی نشان می‌دهد که مدل در مرحله اعتبار سنجی موفق عمل کرده است. در مرحله اعتبار سنجی نتایج رضایت بخش بوده است و همچنین متوسط بار رسوب که در دوره شبیه سازی محاسبه شده است ۷۱۷۰ تن در سال برآورد شده است.

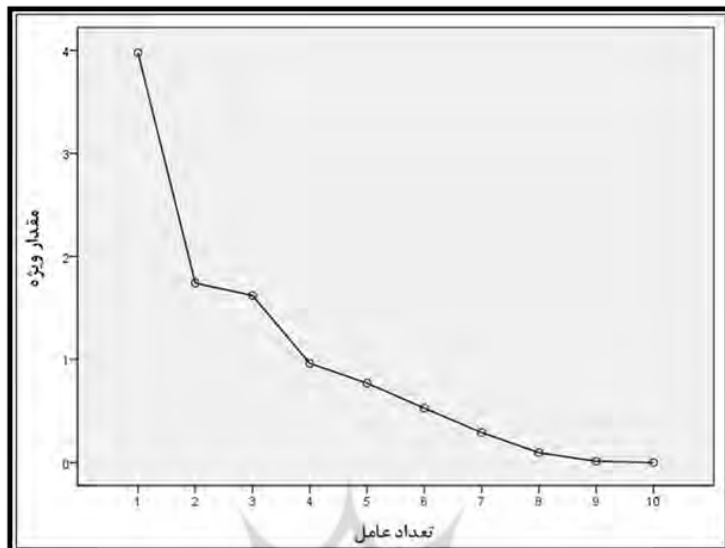
جدول ۴: شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل

نتایج	شاخص‌های ارزیابی مدل
0.95	R^2 (ضریب تعیین)
۰.۰۳	RMSE (خطای جذر میانگین مربعات)
0.97	d (شاخص توافق)
0.97	r (ضریب همبستگی)

تعیین مهم‌ترین عوامل در تولید رسوب منطقه مورد مطالعه

برای تحلیل عوامل موثر در میزان رسوب منطقه مورد مطالعه به واحدهای کاری مطالعاتی که سهم تولید رسوب و فرسایش با توجه به ویژگی‌های مانند کاربری اراضی، پوشش گیاهی، زمین شناسی، ویژگی‌های خاکشناسی و توپوگرافی تعیین شدند و با استفاده از روش تحلیل عاملی عامل‌های مهم شناسایی شدند. در این روش قابلیت داده‌ها برای آزمون مورد برر سی قرار گرفتند. آزمون کفایت و کرویت داده‌ها و همچنین تحلیل همبستگی بین متغیرها از آزمون‌های ابتدایی این تحلیل می‌باشد. چنانچه مقدار آماره کفایت داده‌ها به عدد یک نزدیکتر باشد دلیل بر معنی دار بودن آزمون بوده و نشانه کفایت داده می‌باشد. همچنین آزمون کرویت داده‌ها بر اساس آمار کای اسکوتر معنی دار می‌باشد. در مرحله بعدی تحلیل داده‌ها تعداد عامل‌ها و یا مولفه‌های حاصل از روش مولفه‌های اصلی است که بر اساس تعداد محورهای که

تغییرات داده‌ها در برابر متغیرها را توجیه می‌کند تعیین شدند که تعداد سه عامل به عنوان عامل اصلی شنا سایی شدند (شکل ۷).



شکل ۷: رابطه بین عامل‌ها و مقادیر ویژه

نتایج تحلیل عاملی نشان داد که سه عامل با مقادیر ویژه بیش از یک و توجیه در مجموع ۷۳ درصد واریانس انتخاب شدند. نتایج بار عاملی واریمکس نشان داد که پارامترهای مساحت حوضه، تولید رسوب و میزان رس دارای بار عاملی مثبت قوی است و با پارامتر درصد مساحت اراضی کشاورزی آبی دارای بار عاملی منفی قوی می‌باشد که می‌تواند دلیل تاثیر منفی اراضی کشاورزی در تولید رسوب باشد و با افزایش درصد کاربری اراضی کشاورزی آبی میزان فرسایش و تولید رسوب زیرحوضه‌ها افزایش می‌یابد. عامل دوم فرسایش پذیری با میزان سیلت (silt) بیشترین بار عاملی مثبت و قوی داشته است. و با شن دارای بار عاملی منفی قوی می‌باشد که این عامل ۲۳ درصد واریانس را توجیه می‌کند. عامل سوم پارامترهای بدست آمده با میزان رسوب و فرسایش بار عاملی مثبت و قوی با فرسایش پذیری ندارد. در نتیجه و با توجه به تحلیل عاملی بدست آمده می‌توان گفت که کاربری اراضی بر میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز بیش از سایر عوامل ایجاد فرسایش تاثیر دارد (جدول ۵).

جدول ۵: بار عامل‌ها

عامل	بار عاملی		
	۱	۲	۳
مساحت	.۷۰	.۳۶	.۳۸
رسوب	.۷۰	.۳۶	.۳۷
کشاورزی آبی	-.۸۴	-.۰۲	.۱۲
کشاورزی دیم	.۴۵	.۰۴	-.۸۳
مرتع ضعیف	.۳۳	-.۰۶	.۸۱
فرسایش پذیری	.۳۸	.۷۲	-.۰۷
شن	.۳۳	-.۸۲	.۰۰
ماسه	-.۱۹	.۹۴	-.۰۰
رس	.۷۸	.۰۳	-.۰۵
ارتفاع	.۵۷	.۱۶	.۰۲
واریانس	۳۲/۶۴	۲۳/۹۵	۱۶/۷۸

نتیجه گیری

به‌طور کلی نتایج حاصل از اجرای مدل SWAT و بررسی شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی این مدل نشان می‌دهد که در صورت داده‌های ورودی مناسب و دقیق دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی فرسایش و انتقال رسوب می‌باشد. نتایج نشان داد که مدل علی‌رغم اینکه متوسط سالانه رسوب شبیه‌سازی را به نسبت مقادیر مشاهداتی کمتر برآورد نموده است (که این مسئله می‌تواند تحت تاثیر عوامل متعدد دیگری باشد که در پیش‌بینی لحاظ نشده‌اند) اما از دقت قابل قبولی برخوردار است چون از روش اعتبارسنجی برای ارزیابی دقت در میزان رسوب پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای نتایج بهتری حاصل شد. بررسی شاخص‌ها و نمودارهای به‌دست‌آمده در مرحله اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی رسوب سالانه نشان می‌دهد که مدل در مرحله اعتبارسنجی موفق عمل کرده است. مدل‌سازی به خوبی میزان رسوب را برآورد و پیش‌بینی نموده است و نتایج مدل مطلوب می‌باشد. بر اساس مشاهده حجم رسوب تولیدی حوضه آبخیز بادآور پارامترهای مختلف کاربری اراضی، پارامترهای اقلیمی، نوع خاک و دخالت انسان بر مقدار فرسایش و تولید رسوب دخالت دارند، که از بین عوامل ذکر شده نقش کاربری اراضی در مقدار رسوب تولیدی منطقه مورد مطالعه بیشتر از سایر عوامل می‌باشد. در نهایت نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده توانایی و دقت قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب سالانه حوضه مورد مطالعه می‌باشد. یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات زارع گاریزی و همکاران (۱۳۹۵)؛ غفاری (۱۳۹۷)؛ کرمی و بیاتی خطیبی (۱۳۹۸)؛ ویجی‌اک و همکاران (۲۰۱۷)؛ حلوز و همکاران (۲۰۱۸) و دارامولا و همکاران (۲۰۱۹) که به‌طور کلی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب و جریان رودخانه‌ها را مورد مطالعه قرار داده بودند و علی‌رغم کمبود و عدم قطعیت داده‌های موجود، نسبتاً قابل قبول و رضایت‌بخش بوده است، همخوانی دارد.

منابع

- اسکندری، م.، ۱۳۸۹. مطالعه روند تولید رسوب در حوضه نورآباد لرستان؛ مطالعه موردی رودخانه بادآور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه اصفهان.
- حسونند، ن.، فرقانی تهرانی، گ.، ۱۳۹۸. مطالعه ژئوشیمیایی آب و رسوب رودخانه بادآور، استان لرستان با نگرش زیست‌محیطی، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، شماره ۴، صص ۱۰۵-۱۲۸.
- رضوانی پور، الف.، مساعدی، الف.، مصداقی، م.، ۱۳۹۶. تعیین مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق بر اساس آماره‌های خطاسنجی (مطالعه موردی-تعدادی از زیرحوضه‌های کشف رود)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، شماره ۱۵، صص ۱۱۲-۱۲۴.
- زارع گاریزی، الف.، طالبی، ع.، فرامرز، م.، ۱۳۹۵. شناسایی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی حوضه آبخیز از نظر فرسایش و رسوب با مدل SWAT. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. شماره ۴، صص ۳۶۱-۳۵۰.
- غفاری، ک.، ۱۳۹۷. پهنه‌بندی شدت فرسایش با استفاده از مدل SWAT در حوضه سد قشلاق. فصلنامه جغرافیا و توسعه، سال شانزدهم. شماره ۵۰، صص ۷۴-۵۵.
- کرمی، ف.، بیاتی خطیبی، م.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی فرسایش خاک و اولویت‌بندی تولید رسوب در حوضه سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های MUSLE و SWAT، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۸، صص ۱۱۵-۱۳۷.
- نصرتی، ک.، شهبازی، ا.، ۱۳۸۷. برآورد جریان کمینه به روش هیبرید در شمال شرق ایران، نشریه دانشکده منابع طبیعی، شماره ۶، صص ۸۴۱-۸۲۹.
- نصرتی، ک.، ۱۳۹۲. روش‌های کاربردی در پژوهش علمی. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

- نصرتی، ک.، امینی، م.، حدادچی، الف.، زارع، م. ر.، ۱۳۹۵. تعیین سهم زیرحوضه‌ها در تولید رسوب با استفاده از ویژگی‌های پذیرفتاری مغناطیسی رسوبات و مدل ترکیبی عدم قطعیت (مطالعه موردی: حوضه آبخیز آشان، شهرستان مراغه)، مجله علوم آب و خاک، شماره ۷۸، صص ۱۴۱-۱۵۵.
- Abdelwahaba, O.M.M., Riccib, G.F., De Girolamoc, A.M. and Gentile, F., 2018. Modelling soil erosion in a Mediterranean watershed: Comparison between SWAT and AnnAGNPS models. *Environmental Research*, 166, pp. 363–376.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Griensven, A Van, VanLiew, M.W., Kannan, N. and Jha, M.K., 2012. Swat: model use, calibration, and validation. *ASABE*, 55, pp. 1491–1508.
- Bauwe, A., Eckhardt, K.U. and Lennartz, B., 2019. Predicting dissolved reactive phosphorus in tile-drained catchments using a modified SWAT model. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2, pp. 198-209.
- Blanco H. and Lal, R., 2008. *Principles of Soil conservation and management*, Springer, New York.
- Brighentia, T. M., Bernardi Bonumá, N., Grisonc, F., de Almeida Motac, A., Kobiyamad, M. and Luiz Borges Chaffe, P., 2019. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. *Ecological Engineering*, 127, pp. 103-113.
- Daramola, J., Ekhwan, T.M., Mokhtar, J., Lam, K.C. and Adeogun, G.A., 2019. Estimating sediment yield at Kaduna watershed, Nigeria using soil and water assessment tool (SWAT) model. *Heliyon*, 5, pp. 1-8.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Alirahmani, S. and Keddar, A. 2018. Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). *Water Science*, 32, pp. 79–88.
- Hoanga, B.H., Hiena, H.N., Dinha, N.T.N., Thaoa, N.A., Ha, P.T.T., Kandasamyd, J. and Nguyend, T.V., 2019. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2, pp. 210-223.
- Jiao, W., Ouyang, W., Hao, F., Huang, H., Shan, Y. and Geng, X., 2014. Combine the soil water assessment tool (SWAT) with sediment geochemistry to evaluate diffuse heavy metal loadings at watershed scale. *Journal of Hazardous Materials*, 280, pp. 252–259.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R., 2011. Soil and Water Assessment tool –theoretical documentation. Texas Water Resources Institute Technical report 406. University System College Station, Texas, U.S, Texas A&M (<http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>, accessed 17.12.2014).
- Refsgaard, J.C., 2007. *Hydrological Modelling and River Basin Management*, Phd Thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland Danish Ministry of the Environment. P: 90.
- Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R. and Iaquina P., 2009. Soil Erosion Risk Scenarios in the Mediterranean Environment using RUSLE and GIS: An Application Model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology*, 112, pp. 228–245.
- Vigiak, O., Malagó, A., Bouraoui, F., Vanmaercke, M., Obreja, F., Poesen, J., Habersack, H., Fehér, J. and Grošelj, S., 2017. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Science of the Total Environment*, 599–600, pp. 992–1012.
- Yang, Q., Almendinger, J.E., Zhang, X., Huang, M., Chen, X., Leng, G., Zhou, Y., Zhao, K., Asrar, G.R., Srinivasan, R. and Li, X., 2018. Enhancing SWAT simulation of forest ecosystems for water resource assessment: A case study in the St. Croix River basin. *Ecological Engineering*, 120, pp. 422–431.

- Yesuf, H.M., Assen, M., Alamirew, T. and Melesse, A.M., 2015. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. *Catena*, 127, pp. 191–205.
- Zeiger, S.J. and Hubbart, J.A., 2016. Science of the Total Environment A SWAT model validation of nested-scale contemporaneous stream flow, suspended sediment and nutrients from a multiple-land-use watershed of the central USA. *Sci. Total Environ*, 572, pp. 232–243.

