



شبیه‌سازی وضعیت آبی فرسایش و رسوب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی مطالعه‌ی موردی حوضه آبریز حاجیلر چای

علی بی‌غم^۱، سیداسدالله حجازی^{۲*}، محمدحسین رضائی مقدم^۳، جمشید یاراحمدی^۴، فریبا کریمی^۵

- ۱- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۲- دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۳- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۴- استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران
- ۵- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

چکیده

تغییرات میزان فرسایش و رسوب حوضه یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر بخش‌های مختلف زیست انسانی و حیات طبیعی تأثیر می‌گذارد و پیش‌بینی این تغییرات بصورت کمی، که عمدتاً تحت نوسانات دمایی و تغییر اقلیم در مناطق مختلف صورت می‌گیرد، جهت کنترل میزان فرسایش و رسوب در دوره‌ی آبی ضروری هست. در تحقیق حاضر به بررسی و پیش‌بینی تغییرات فرسایش و رسوب در حوضه آبریز حاجیلر با استفاده از مدل‌های GeoWEPP و SWAT اقدام گردید بر این اساس ابتدا با استفاده از داده‌های وضع موجود ایستگاه سینوپتیک اهر و بهره‌گیری از مدل SDSM به بررسی تغییرات دوره‌ی آماری ۲۰۲۰-۲۰۴۰ در سه سناریوی RCP8.5-RCP4.5-RCP2.6 اقدام گردید، سپس شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات فرسایش و رسوب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل‌های مطرح صورت گرفت. خروجی مدل SDSM حاکی از افزایش دما و کاهش بارندگی برای حوضه در افق ۲۰۴۰ اشد و بررسی نتایج شبیه‌سازی میزان رسوب مدل‌ها نشان داد که در حوضه مورد مطالعه مدل GeoWEPP با انتخاب روش دامنه دارای سطح مناسبی در برآورد میزان رسوب نسبت به آمار مشاهده‌ای می‌باشد که مدل‌نهایی جهت پیش‌بینی میزان رسوب در دوره‌ی مذکور حوضه انتخاب گردید. با استفاده از نتایج ریز مقیاس شده مدل گردش عمومی جو، تغییرات رسوب در دوره‌ی آماری ۲۰۲۰-۲۰۴۰ تحت سه سناریو مطرح فوق، به ترتیب ۱/۹۷، ۴/۴۵، ۲/۹۸- نسبت به دوره مشاهده‌ای برآورد گردید. آگاهی از روند تغییرات فرسایش و رسوب در حوضه آبریز حاجیلر منجر به کنترل مناسب رسوب و ایجاد اقدامات از پیش تعیین شده جهت حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی در دوره‌های آینده گردد.

کلمات کلیدی: فرسایش و رسوب، SDSM، SWAT، GeoWEPP، حاجیلر چای، شمال غرب ایران.

۱- مقدمه

ارزیابی تغییرات میزان فرسایش و رسوب با رویکردی بر تغییرات اقلیمی و پیامدهای احتمالی آن بر فرآیندهای طبیعی و انسانی حوضه، تأثیر زیادی جهت حل چالش‌های مدیران و برنامه‌ریزان محیطی در دوره‌های آینده خواهد گذاشت. طبق خروجی‌های مدل گردش عمومی جو (GCM) دمای سطح زمین در کل جهان تا پایان قرن ۲۱ برای همه سناریوهای تعریف شده تغییر اقلیم به جز یک سناریو احتمالاً تا ۱/۵ درجه نسبت به دوره پایه (۱۹۰۰-۱۸۵۰) افزایش خواهد داشت و طبق تحقیق هم‌لت و همکاران^۲ (۲۰۰۷) مام مدل‌های AOGCMs مانند SDSM, LARS-WGS و غیره، پیش‌بینی می‌کنند که در قرن حاضر تحت تأثیر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، میزان دما، شدت و مقدار بارش افزایش خواهند یافت.

در حیطه فرسایش و رسوب، مدل‌های فرآیندی SWAT^۳ و WEPP^۴ از جمله مدل‌های کاربردی بوده که در سرتاسر دنیا پروژه‌های زیادی با استفاده از این مدل‌ها انجام صورت پذیرفته است. استفاده از مدل‌های یاد شده در محیط GIS در قالب برنامه‌های Arc SWAT و GeoWEPP باعث گردیده تا امکان اتصال به برنامه ArcGIS فراهم شود و به تبع آن، شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در فرمت رستری در محیط GIS در مقیاس‌های متفاوت، برای حوضه‌های متنوع از نظر خصوصیات مختلف توپوگرافی، اقلیمی، خاک، پوشش زمین ممکن می‌گردد.

در این تحقیق که از مدل هیدرولوژیکی نیمه فیزیکی و نیمه‌توزیعی SWAT و مدل توزیعی WEPP در ارزیابی تغییرات فرسایش و رسوب تحت اثر تغییر اقلیم در حوضه حاجیلرچای استفاده شده است، تحقیقات متعددی در زمینه فرسایش و رسوب با استفاده از مدل SWAT, GeoWEPP گرفته است. مدل SWAT که توسط جف آرنولد برای سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا در اوایل ۱۹۹۰ تهیه گردیده است یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوضه‌های آبریز بوده و برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر دبی، رسوب، عناصر غذایی و ... در حوضه‌های آبریز گسترده و متنوع با کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط محیطی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی مدت ارائه گردیده است. این مدل از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (MUSLE)^۵ برای شبیه‌سازی فرسایش خاک و میزان رسوب بهره می‌گیرد و در بازه‌های زمانی سالانه، ماهانه، روزانه و ساعتی قابلیت تحلیل و ارائه نتایج را دارد (آرنولد و همکاران، ۱۹۹۸). جهت شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم گذشته در حوضه سن جاکینتو تگزاس، موتیه^۶ و همکاران (۲۰۰۲)، از مدل SWAT استفاده کردند، نتایج مطالعه نشان

1- General Circulation Model
 2- Hamelt et al.
 3- Soil and Water Assessment Tool
 4- Water Erosion Prediction Project

5- Modified Universal Soil Loss Equation
 6- muttiah

داد که افزایش جریان رودخانه می‌تواند سیلابی شدن بیشتر را به همراه داشته باشد این در حالی است که فراوانی جریان‌های نرمال و جریان‌های کمینه کاهش یافته بود. در حوضه آبریز زاینده‌رود ارزیابی عملکرد مدل SWAT توسط آب‌آبایی و سهرابی (۱۳۸۸) در رابطه با شبیه‌سازی دبی جریان رودخانه زاینده‌رود انجام گردید. در مرحله اول، با توجه به پارامترهای ضریب راندمان (COE) بین ۸۰/۱-۶۰/۲ درصد، راندمان NS بین ۷۹-۵۹/۴ درصد و ضریب همبستگی (R2) بین ۸۲-۷۲/۶ درصد نتایج خروجی مدل مورد تأیید قرار گرفت. در مرحله اعتبارسنجی، مقادیر ضریب راندمان، راندمان NS و ضریب همبستگی به ترتیب در حدود ۷۲-۶۰/۴، ۱-۶۹-۶۰/۱ و ۶۴/۷-۷۰/۸ درصد برای ایستگاه‌های مختلف برآورد شدند. بهترین خروجی قابل تأیید مربوط به ایستگاه پل کله و ضعیف‌ترین خروجی مربوط به ایستگاه قلعه شاهرخ تعیین گردید. نتایج نهایی واسنجی نشان داد که مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی شدت دبی رودخانه گردد. در تحقیق حوضه‌های کشاورزی در جنوب کانزاس مرکزی با استفاده از مدل نیمه توزیعی AnnAGNPS و مدل SWAT، پاراجولی^۱ و همکاران (2009) مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب بهتر یافتند. با شبیه‌سازی داده‌های بارش در ایستگاه سد لتیان، پهلوان و زهرایی (۱۳۹۳) با استفاده از مدل‌های SDSM و LARS-WG به این نتیجه رسیدند که در دوره‌ی اخیر شدت بارش‌های حدی افزایش یافته است و این روند می‌تواند در بیست سال آینده نیز مداومت یابد. طی مطالعه‌ی در حوضه سد زاگرس در استان کرمانشاه، بی‌غم و همکاران (۱۳۹۶) اقدام به بررسی و کارآمدی مدل هیدروفیزیکی در برآورد میزان رسوب تولید شده در حوضه از طریق مقایسه مقدار رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه رسوب سنجی پل شاه نمودند، نتایج نهایی با میزان دقت بالای ۷۰ درصد بار رسوب برآورد شده توسط مدل مذکور را ارائه داد. اثر تغییر اقلیم بر فرسایش خاک را اسدی و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبریز ناورود گیلان از طریق برخی متغیرهای اقلیمی، مدل گردش عمومی جو و سه سناریوی A1B، A2 و B1، اطلاعات دو ایستگاه اقلیمی رشت و بندر انزلی با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT و مدل LARS-WG بررسی نمودند، در نهایت میزان خطر فرسایش خاک را با تلفیق نسخه اصلاح شده معادله‌ی جهانی هدر رفت خاک، GIS و سنجش از دور در حال حاضر و دو دوره‌ی ۲۰ ساله آبی، در حوضه آبریز ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد خطر فرسایش در دوره پایه بین صفر تا بیش از ۷۷ تن در هکتار در سال، برای دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶، بین صفر تا بیش از ۱۱۵ تن در هکتار در سال و در دوره‌ی ۲۰۹۹-۲۰۸۰ بین صفر تا بیش از ۹۸ تن در هکتار در سال متغیر می‌باشد و میزان فرسایش پذیری خاک در نواحی بدون پوشش گیاهی به علت افزایش شدت بارندگی در حوضه افزایش خواهد داشت. با استفاده از مدل‌های سری CMIP5 و با سناریوهای RCP در ۷۳۵ ایستگاه هواشناسی سراسر چین، یو^۲ و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که میانگین دمای سالانه

۱،۸ درجه سانتی‌گراد کمتر از حد برآورد شده می‌باشد. در حالی که میانگین بارش سالانه ۲۶۳ میلی‌متر بیشتر از داده‌های مشاهداتی در دوره‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ برآورد گردیده است. اثر تغییر اقلیم در فرسایش خاک با استفاده از مدل آماری RUSLE براساس دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5، توسط تیموری و همکاران (۱۳۹۸) برای دوره‌های ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۲۰۳۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره‌ی پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) و مدل LCM را برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین در حوضه آبریز کندران مورد استفاده قرار گرفت. طبق نتایج این تحقیق میانگین فرسایش خاک در دوره‌ی پایه ۹/۸ (تن در هکتار در سال) بود که طی دو دهه‌ی آینده (۲۰۱۶-۲۰۳۰) با استفاده از دو سناریوی بررسی شده، به طور متوسط ۱۶ درصد (۱۱/۳۷) و طی پنج دهه‌ی آینده ۲۰ درصد (۱۰/۳) بر میزان فرسایش افزوده می‌گردد. بررسی کارایی مدل SWAT در برآورد دبی‌های روزانه حوضه‌های فاقد آمار با رویکرد منطقه‌بندی در مناطق خشک توسط صیاد و همکاران (۱۳۹۹) انجام یافت. نتایج ارزیابی عملکرد مدل PBIAS, R², NSE به ترتیب برای دوره واسنجی ۰/۶۵، ۰/۶۵ و ۱۰/۷ و برای دوره صحت‌سنجی برابر ۰/۴۷، ۰/۶۳ و ۱۱/۸۸- به دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول شبیه‌سازی دبی روزانه در حوضه خشک در مقیاس روزانه است. با هدف آشکارسازی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر دبی و رسوب، رضائی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۱) اقدام به شبیه‌سازی داده‌ها با مدل SWAT کردند. نتایج دقت شبیه‌سازی داده‌های ماهانه با استفاده شاخص ارزیابی NS در مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی برای دبی و رسوب را به ترتیب معادل ۰/۶۵ و ۰/۴۹ نشان می‌دهد که با توجه به دامنه‌های تفسیری مورد استفاده در تحقیقات گذشته، قابل قبول ارزیابی گردیده است و حاکی از کارایی رضایتبخش مدل SWAT در شبیه‌سازی مولفه‌های تأثیر تغییرات کاربری بر رسوب و دبی است.

مدل WEPP در سال ۱۹۹۹ در قالب یک برنامه نرم‌افزاری کاربر پسند، به عنوان جایگزینی برای مدل جهانی فرسایش خاک توسعه یافت. مدل WEPP یک مدل کامپیوتری پیشرفته است که می‌تواند میزان فرسایش و رسوب را بر روی دامنه‌ها و در داخل آبراهه‌ها و حوضه آبریز برآورد کند. در منطقه جرجیز در کشور چین، شین^۱ و همکاران (۲۰۰۹) دو مدل پروژه‌ی پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP) و برنامه‌ی ارزیابی آب و خاک (SWAT) را برای شبیه‌سازی بازده رواناب و رسوب سطح حوضه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج خروجی از هر دو مدل در مقایسه با NS و داده‌های واقعی منطقه نشان داد که نتایج هر دو مدل مورد تأیید می‌باشند. ارزیابی کارایی مدل WEPP در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه آنالوچه و گرگک توسط صدایی و همکاران (۱۳۸۸) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق رسوب و رواناب مدل دامنه‌ای WEPP در پلات‌های سالنی ارزیابی شد نتایج R² و NS رواناب کاربری دیم‌زارهای رها شده به ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۶۸ و برابری رسوب

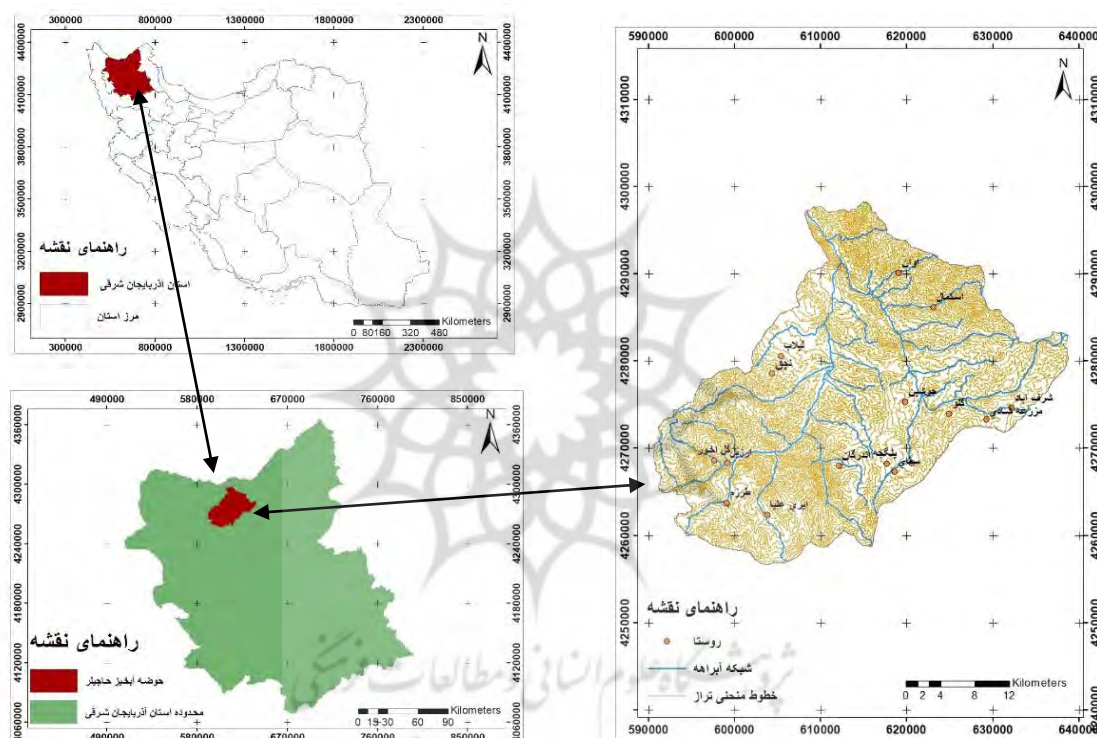
همین کاربری به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۱ و در کاربری مرتع به ترتیب ۰/۷ و ۰/۷۲ می‌باشد که این نتایج نشان دهنده ارزیابی مناسب این مدل در مقیاس دامنه‌ای می‌باشد. در اراضی مارنی منطقه‌ی خواجه، صادق‌زاده و یاراحمدی (۱۳۹۲) به ارزیابی مدل WEPP در برآورد میزان فرسایش و رسوب اقدام کردند. نتایج پژوهش نشان داد که مدل WEPP از کارایی خوبی در شبه‌سازی فرسایش و رسوب برخوردار می‌باشد، به طوری که مقایسه آماری بین نتایج به دست آمده از این روش با نتایج آزمون t نرم‌افزار STATGRAPHICS و داده‌های مشاهده‌ای نشان داد اختلاف معنی‌دار نتایج در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد. در حوضه آبریز سولچای در اردبیل طولابی (۱۳۹۴)، به ارزیابی کارایی مدل WEPP در برآورد رسوب پرداخت و مقایسه نتایج برآوردی مدل WEPP با رسوب مشاهده‌ای نشان داد که مقادیر شبه‌سازی شده رسوب در حالت‌های دامنه و حوضه آبریز به مقدار رسوب مشاهده‌ای نزدیک‌تر بوده و در مقایسه با روش حالت مسیر جریانی نتایج قابل قبول‌تری نشان می‌دهد. در حوضه آبریز چرداول احمدی و همکاران (۱۳۹۶) اقدام به مقایسه مدل‌های WEPP و هیدروفیزیکی در برآورد میزان فرسایش خاک و تولید رسوب کردند و نتایج تحقیق نشان داد که مدل WEPP در برآورد میزان فرسایش خاک و تولید رسوب دارای دقت بیشتری بوده و برآورد میزان فرسایش خاک و تولید رسوب در این مدل به میزان واقعی رسوب در ایستگاه هیدرومتری نزدیک‌تر می‌باشد. حوضه آبریز حاجیلرچای به علت ساختار لیتولوژیکی فرسایشی و محدود بودن اراضی قابل کشت با توجه به تراکم جمعیتی زیاد با پراکنش ۵۸ نقطه‌ی مسکونی، بدون هیچ‌گونه تحقیقی در مورد برآورد و بررسی تغییرات فرسایش و رسوب بوده و نیازمند شناخت توان تولید رسوب و فرسایش در دوره حال و میزان تغییرات آن در سال‌های آتی می‌باشد. مطالعات وضعیت فرسایش و رسوب در شرایط حال و آتی و ایجاد آگاهی لازم جهت انجام فعالیت‌های مدیریتی پیشگیرانه در راستای کنترل اثرات منفی فرسایش و رسوب در حوضه از اهداف دیگر تحقیق حاضر است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز حاجیلرچای در استان آذربایجان شرقی با مساحت ۱۰۶۸۰۰ هکتار که از محدوده‌های زهکش حوضه ارس می‌باشد در مختصات جغرافیایی طول "۴۶°۰۱'۴۸" تا "۴۶°۰۴'۱۳" شرقی و عرض "۳۸°۲۶'۱۳" تا "۳۸°۴۹'۳۹" شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی کشور در محدوده شهرستان ورزقان و دهستان‌های آن جوشی، دیزم، سینا و ارزی می‌باشند. حداکثر ارتفاع منطقه ۳۲۵۸ متر و حداقل آن ۶۵۰ متر از سطح دریا، حداکثر بارندگی سالانه ۴۰۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۵/۸۰ درجه سانتی‌گراد است. از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی کوپن دارای اقلیم مدیترانه‌ای بوده و دارای رودخانه اصلی دائمی

بوده که از ارتفاعات آهکی جنوب غرب منطقه (آبشار گول آخور) سرچشمه گرفته و از طریق بستر موجود و با جمع آوری آبراهه‌های فرعی در مرکز به سمت شمال به رودخانه ارس می‌ریزد.



شکل (۱): موقعیت منطقه (محدوده) مورد مطالعه در ایران
Fig (1): The position of the study area in Iran

برای انجام مطالعات هواشناسی حوضه، از ایستگاه سینوپتیک اهرکه در محدوده نزدیک حوضه مورد مطالعه قرار دارد و از نظر ارتفاعی و عوارض محیطی مشابه منطقه می‌باشد، به عنوان معرف دما و اقلیم منطقه استفاده شده است.

۲-۲- روش تحقیق

در این تحقیق از نسخه ۵,۳ مدل SDSM و سه سناریو RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 از گزارش پنجم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده شد و جهت استفاده از داده‌های بزرگ مقیاس مدل‌های گردش عمومی جو در مقیاس نقطه‌ای و ایستگاهی در سطح حوضه، ابتدا خروجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های ایستگاهی ریزمقیاس گردید، سپس تغییرات فرسایش و رسوب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز حاجیلرچای با استفاده از

مدل‌های WEPP و SWAT شبیه‌سازی شد. بررسی نتایج شبیه‌سازی میزان رسوب مدل‌ها نشان داد که در حوضه مورد مطالعه مدل GeoWEPP با انتخاب روش دامنه دارای سطح مناسبی در برآورد میزان رسوب نسبت به آمار مشاهده‌ای می‌باشد که مدل نهایی در پیش‌بینی میزان رسوب دوره مذکور حوضه انتخاب گردید.

در مرحله بعد نتایج تغییرات متغیرها در افق ۲۰۴۰ نسبت به دوره مبنا (۲۰۰۵-۱۹۸۶) مورد بررسی قرار گرفت، در نهایت داده‌های پیش‌بینی شده تحت سه سناریوی RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 به مدل GeoWEPP معرفی و تغییرات فرسایش و رسوب تحت سه سناریوی مذکور در مدل برآورد و پیش‌بینی گردید. برای ارزیابی تغییرات فرسایش و رسوب حوضه آبریز تحت تأثیر تغییر اقلیم، از دو متغیر بارش و دما به عنوان موثرترین عوامل بر میزان رواناب و رسوب استفاده گردید.

۱-۲-۲- مدل SWAT

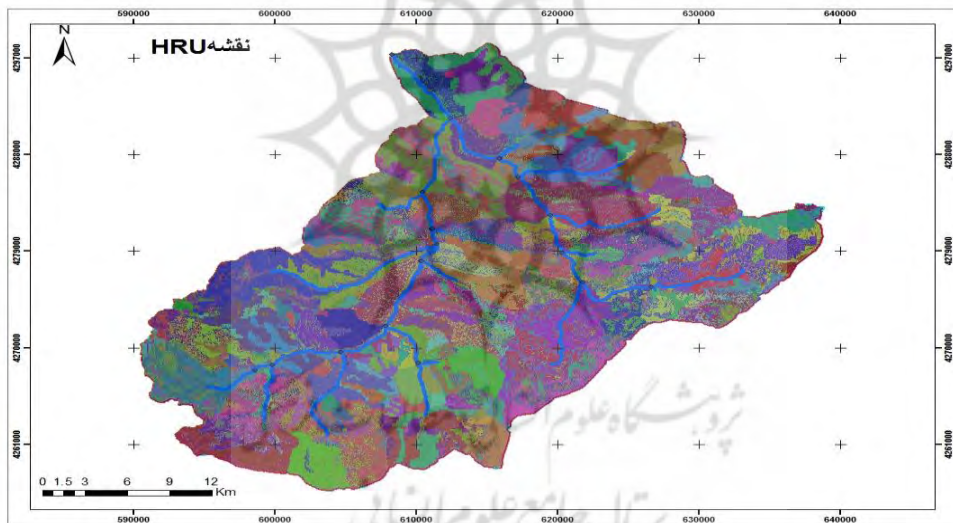
برای آماده‌سازی و اجرای مدل SWAT از نقشه و اطلاعات مدل ارتفاع رقومی، خاک، کاربری اراضی، داده‌های هیدرولوژیک و هواشناسی استفاده شد. در ابتدا مدل ارتفاع رقومی به افزونه Arc SWAT 10 در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 معرفی شد و با اضافه کردن یک خروجی در محل ایستگاه هیدرومتری پهناور، حوضه حاجیلرچای به ۳۳ زیرحوضه تفکیک شد. سپس اطلاعات پیش‌بینی شده بارندگی و دماهای کمینه و بیشینه در مدل وارد گردید. پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه و تهیه فایل‌های ورودی، مراحل اجرای مدل به شرح SWAT در زیر صورت گرفت:

- وارد کردن مدل رقومی ارتفاعی و تعیین زیرحوضه‌ها و مشخصات فیزیکی از قبیل مساحت، طول آبراهه اصلی و غیره. - وارد کردن نقشه کاربری، خاک و اطلاعات شیب و تولید واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی براساس اطلاعات مورد نظر. - معرفی داده‌های هواشناسی به صورت روزانه. - استخراج پارامترهای هیدرولوژیکی، - کالیبراسیون مدل بر اساس الگوریتم SUFII-2. در این مدل زیرحوضه‌ها به بخش‌های پاسخ هیدرولوژی بر اساس نقاط متقاطع لایه‌های رستری یا وکتوری کاربری‌های زمین، انواع خاک‌ها، زمین‌شناسی و شیب طبق رابطه ۱، تقسیم می‌شوند که بر این اساس نقشه واحدهای HRU^۱ تهیه گردید (شکل ۲) برای هر HRU محاسبات طبق رابطه ۱ در مدل انجام می‌گیرد (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۸).

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

SWt : مقدار نهایی آب خاک (mm)

- SW_0 : مقدار اولیه آب خاک در روز i ام (mm)
 T : زمان (روزانه)، R_{day} : مقدار بارش در روز i ام (mm)
 Q_{srf} : مقدار رواناب سطحی در روز i ام (mm)
 E_a : مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (mm)
 W_{seep} : مقدار آب ورودی از زون غیراشباع در نیمرخ خاک در روز i ام (mm)
 Q_{gv} : مقدار جریان بازگشتی در روز i ام (mm).



شکل (۲): نقشه HRU استخراج شده از مدل SWAT
Fig. (2): HRU map of extracted from SWAT model

در این پژوهش جهت ارزیابی شبیه‌سازی‌های مدل از دو شاخص آماری ضریب تعیین و معیار نش-ساتکلیف^۱ بهره گرفته شد. سپس با توجه به موجود بودن داده‌های مربوط به بار رسوب روزانه بین سال‌های ۲۰۱۴ - ۱۹۸۹، از داده‌های مزبور برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. در این مطالعه سه سال قبل از دوره انتخاب شده برای واسنجی مدل به عنوان دوره گرم کردن انتخاب و مدل از سال ۲۰۱۴ - ۱۹۸۹ اجرا شد. به منظور آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT، از الگوریتم نیمه خودکار SUFI-2 استفاده شد.

1- Nash-Sutcliffe

۲-۲-۲- مدل WEPP و اجرای آن

مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی که به اختصار WEPP گفته می‌شود، در سال ۱۹۸۵ پایه‌گذاری شده است و یک تکنولوژی جدید پیش‌بینی فرسایش است که بر پایه مفاهیم اساسی اقلیمی، هیدرولوژیکی، فیزیک خاک، علوم گیاهی، هیدرولیک و مکانیسم‌های فرسایش بنا شده است (رفاهی، ۱۳۸۸). برای اجرای این مدل پارامترهای عوامل اقلیمی، خصوصیات خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی مورد نیاز می‌باشد. اطلاعات مربوط به فایل اقلیم از ایستگاه سینوپتیک اهر به دست آمد و فایل مربوطه در همین محیط ساخته شد. اطلاعات خاک از طریق بررسی نتایج آزمایشگاهی پروفیل‌های خاک تا عمق ۱/۵ به دست آمد. ابزار مدیریت اراضی شامل مجموعه‌ای از شیوه‌های مدیریتی و خصوصیات گیاهی و روش‌های خاک ورزی مورد استفاده در منطقه است که از طریق خصوصیات و پارامترهای کاربری و پوششی منطقه تهیه گردید.

مدل WEPP در سه حالت حوضه آبریز، دامنه و مسیرهای جریان میزان رسوب را برآورد می‌کند که در این تحقیق پس از اجرای مدل و انتخاب بهترین روش برآورد رسوب، که در این تحقیق حالت دامنه تعیین شد (شکل ۳) و در نهایت با معرفی سری‌های روزانه دما و بارش ریزمقیاس شده توسط مدل SDSM تحت سه سناریو RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 به مدل، سری‌های زمانی ماهانه رواناب و رسوب حوضه حاجیلرچای در ایستگاه هیدرومتری پهناور برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ توسط مدل شبیه‌سازی شد.

۳- یافته‌ها و بحث

جهت بررسی تغییرات دما و پیش‌بینی دمای حوضه حاجیلرچای از مدل ریزمقیاس نمایی آماری RCP استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل این مدل، انتخاب متغیرهای غالبی می‌باشد. این امر ناشی از آن است که مشخصات مدل و نتایج، مستقیماً تحت تأثیر متغیرهای مستقل می‌باشد (سنتر و همکاران، ۱۹۹۶).

در مدل SDSM ارتباط آماری بین متغیرهای مشاهده شده یا پیش‌بینی‌شونده با متغیرهای بزرگ مقیاس یا پیش‌بینی‌کننده بر اساس همبستگی ارزیابی می‌شود. بر اساس ضرایب همبستگی بین داده‌های مشاهده شده با متغیرهای پیش‌بینی روزانه با استفاده از نرم‌افزار SDSM در محدوده حوضه حاجیلرچای، از بین ۲۶ متغیر آزمون شده ۴ متغیر در بخش دما و ۳ پارامتر در بخش بارش، دارای بیشترین همبستگی ($P\text{-Value}=0$) با داده‌های مشاهده‌ای حداکثر و حداقل دما و میزان بارش را داشتند. همان‌طوری‌که از نتایج مندرج در جدول ۱ برمی‌آید، بیشترین میزان همبستگی پیش‌بینی‌کننده‌های NCEP با عنصر بارش را میانگین فشار سطح دریا ($ncepmslpgl$)، جهت باد در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال ($ncep8thgl$) و میانگین دما در ارتفاع ۲ متری ($nceptempgl$)، با متوسط حداکثر دما؛ میانگین فشار سطح دریا ($ncepmslpgl$)، جهت باد در ارتفاع ۵۰۰

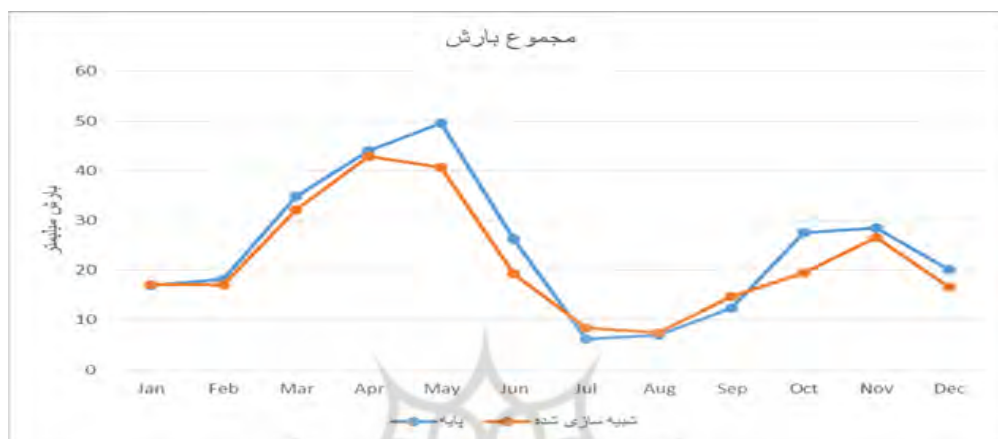
هکتوپاسکال (ncepp500gl)، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح (nceps850gl) و میانگین دما در ارتفاع ۲ متری (nceptempgl)، و با متوسط حداقل دما؛ سرعت جریان هوا ژئواستروفیک در نزدیک سطح زمین (ncepplfgl)، جهت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (ncepp500gl)، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح (nceps850gl) و میانگین دما در ارتفاع ۲ متری (nceptempgl) به خود اختصاص داده‌اند. بررسی‌های نشان می‌دهد که میزان این همبستگی در متوسط حداکثر و حداقل دما قوی‌تر از بارش است و جدول ۱ میزان همبستگی بین عناصر را با پارامترهای پیش‌بینی‌کننده نشان می‌دهد این میزان همبستگی با نتایج اکثر پژوهش‌های رفرنس داده همخوانی دارد.

جدول (۱): میزان همبستگی بین عناصر بارش و دما با پارامترهای پیش‌بینی‌کننده NCEP

Table (1): The Correlation between precipitation and temperature elements with NCEP predictor parameters

دمای حداقل		دمای حداکثر		بارش	
P-Valua	پیش‌بینی‌کننده همبستگی	P-Valua	پیش‌بینی‌کننده همبستگی	P-Valua	پیش‌بینی‌کننده
جزئی	منتخب	جزئی	منتخب	منتخب	منتخب
-۰/۱۲	Ncepplfgl	۰	Ncepmslpgl	۰/۰۲	Ncepmslpgl
۰/۰۶۸	Ncepp500gl	۰	Ncepp500gl	۰/۰۷	Ncepmslpgl
۰/۰۲۶	Ncepp850gl	۰	Ncepp850gl	۰	Ncepmslpgl
۰/۴۴۹	nceptempgl	۰	nceptempgl		



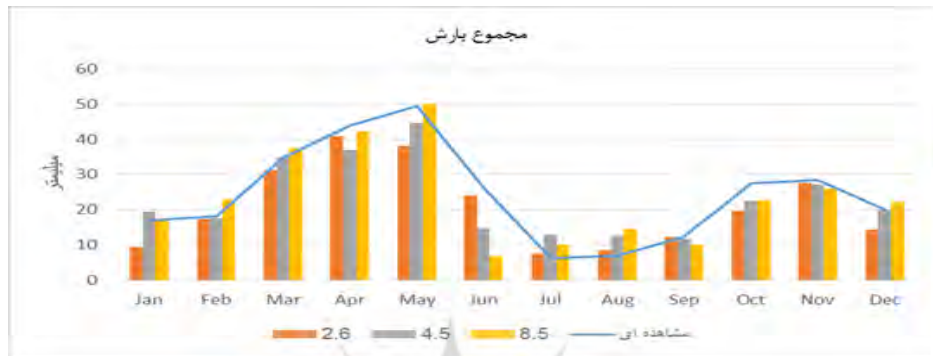


شکل (۳): مقایسه‌ی مقادیر عنصرهای بارش و دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله‌ی واسنجی مدل SDSM
Fig. (3): Comparison of observed and simulated values of rainfall and temperature elements in the calibration phase of the SDSM model

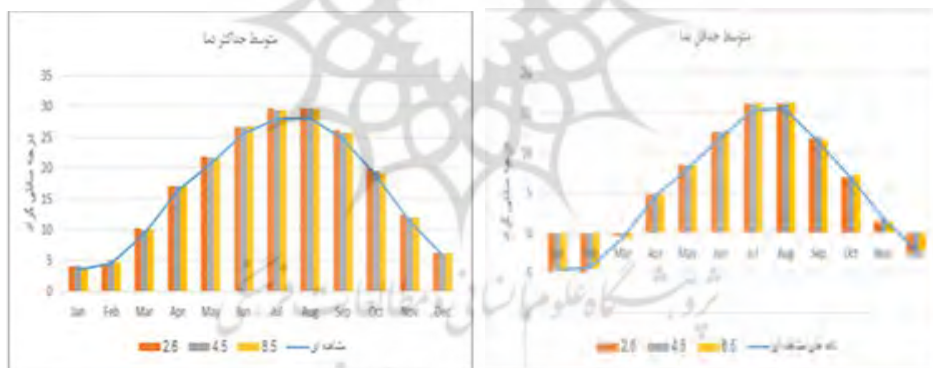
پس از انتخاب بهترین پیش‌بینی‌کننده‌ها، به دلیل اینکه SDSM5.3 از رابطه رگرسیونی استفاده می‌کند و کل پارامترها را محاسبه می‌کند کل داده‌های آماری مشاهده‌ای یعنی از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ برای واسنجی اختصاص داده شد. نتایج این واسنجی به نمودار در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طوری که در نمودارها مشخص است، اختلاف چندانی بین مقادیر داده‌های پایه و مقادیر برآورد شده در داده‌های دما توسط مدل وجود نداشته اما در داده‌های بارش نسبت به داده‌های دما اختلافات بیشتر است.

همانطور که مطرح شد با توجه به نتایج جدول ۱ داده‌های دما همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی نسبت به بارش داشته‌اند این بدان علت است که تغییرپذیری دما نسبت به بارندگی کمتر است و دما یک متغیر پیوسته می‌باشد که کمتر تحت تأثیر ناهنجارهای زمانی قرار می‌گیرد. در حالی که بارندگی یک پارامتر گسسته است و تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی می‌باشد.

طبق برآورد (شکل ۴) بارش ماهانه در تمامی سناریوها (RCP2.6 و RCP4.5, RCP8.5)، در افق ۲۰۴۰ در اکثر ماه‌های سال بخصوص در ماه‌های فوریه تا ژوئیه کمتر از میزان بارش ماهانه در دوره‌ی پایه می‌باشد ولی برای ماه‌های ژوئیه تا سپتامبر سال افزایش نسبی بارش نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد ترسالی طولانی مدت در منطقه رخ ندهد بلکه در بیشتر سال‌ها خشکسالی بدون تغییر و یا با تغییرات قابل چشم‌پوشی دیده شود. شکل ۵ نیز اختلاف دما در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال، به طور کلی پیش‌بینی می‌شود که در افق ۲۰۴۰ دما به طور متوسط نسبت به دوره پایه افزایش یابد.



شکل (۴): مجموع بارش ماهانه در سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ به ازای سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه
Fig. (4): Total monthly rainfall in the years 2020 to 2040 for different scenarios compared to the base period



شکل (۵): میانگین دمای حداقل و دمای حداکثر در سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ به ازای سناریوها نسبت به دوره پایه
Fig. (5): Average minimum and maximum temperature in the years 2020 to 2040 for different scenarios compared to the base period

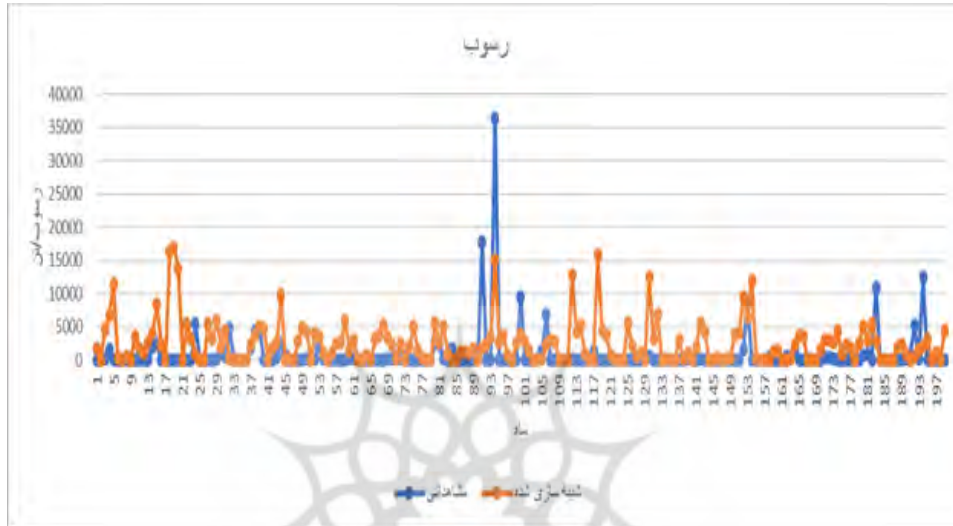
واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر رسوب خروجی از حوضه داشتند، از طریق کنترل حساسیت انواع آنها در محیط نرم افزار SWAT_CUP مشخص گردیدند. نتایج حاصل از انجام تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف برای رسوب در جدول ۲ نشان داده شده است. درجه تأثیر پارامترهای مهم در شبیه سازی رسوب خروجی از زیرحوضه ها با مقادیر T-Stat و P-Value مشخص شده است بدین ترتیب که هر متغیر مقدار عددی T-Stat بیشتری داشته و همچنین مقدار P-Value آن نزدیک صفر باشد، تأثیر بیشتری بر روی برآورد رسوب دارد.

جدول (۲): نتایج تحلیل آنالیز حساسیت مدل و مقادیر T-Stat و p-Value مربوط به پارامترهای رسوب
Table (2): The results of model sensitivity analysis and T-Stat and p-Value related to sediment parameters

پارامتر	توضیحات	واحد	T-Stat	P-Value
CN2.mgt	شماره منحنی نفوذ در شرایط در لایه سطحی	بدون بعد	۹/۲۱	۰/۰۸
SOL-AWC.sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک در لایه سطحی	میلی‌متر آب بر میلی‌متر خاک	۰/۵۸	۰/۲۹
V_CH_EROD.rte	فاکتور فرسایش‌پذیری کاتال	بدون بعد	۲۷	۰/۰۸
SFTMP.bsn	درجه حرارت ریزش بر (سانتی‌گراد)	سانتی‌گراد	۰/۸۵	۰/۲۵
SOL_CBN.sol	مقدار کربن آلی	بدون بعد	۰/۴	۰/۳۲
SNO50COV.bsn	پارامتر خطی برای محاسبه حداکثر مقدار رسوب	بدون بعد	۱/۷۳	۰/۴
ALPHA_BF.gw	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی	بدون بعد	۳/۱۰	۰/۰۳
GW_DELAY.gw	زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستایی	روز	۰/۸	۰/۳۸
SOL_k.sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی	میلی‌متر بر ساعت	۰/۷۳	۰/۵۱
SURLAG.bsn	زمان تأخیر رواناب سطحی	بدون بعد	۰/۵۴	۰/۰۵

در این پژوهش از مدل SWAT در محدوده پارامترهای واسنجی شده، جهت تخمین رسوب ناشی از تغییرات به وجود آمده در اقلیم حوضه حاجیلرچای در طی دوره‌ی ۱۸ ساله (۱۹۸۶-۲۰۱۴) استفاده گردید نتایج بررسی‌ها طبق شکل ۶ و جداول ذیل نشان داد خروجی رسوب مدل SWAT با آمار رسوب واقعی مشاهده شده حوضه در ایستگاه هیدرومتری انطباق کمتری دارد.



شکل (۶): نمودار مقایسه تغییرات میزان رسوب مشاهده‌ای با رسوب شبیه‌سازی شده توسط SWAT
Fig. (6): A comparison chart of observed and simulated sediment changes by SWAT

جدول (۳): آمار رسوب مشاهده‌ای شده ماهانه با رسوب برآورده شده توسط مدل SWAT
Table (3): Monthly observed sediment statistics with simulated sediment by SWAT model

ماه	مشاهده‌ای	شبه‌سازی شده
ژانویه	۴۵۴/۵۴	۳۱۶۹/۱۸
فوریه	۴۷۰/۳۴	۵۰۴۵/۳۴
مارس	۱۲۶۶/۱۷	۲۱۹۹/۷۷
آوریل	۲۶۶/۸۸	۲۰۳۰/۶۷
می	۴۷۰/۵۷	۲۲۰۰/۴۴
ژوئن	۳۳۸۷/۴۱	۲۴۳۱/۲۸
ژوئیه	۵۶۷/۷۳	۳۱۴۰/۶۳
آگوست	۱۱۷/۸۱	۲۳۰۷/۵۴
سپتامبر	۱۷۳/۸۶	۲۱۹۱/۰۵
اکتبر	۷۶۹/۰۵	۱۹۷۱/۴۲
نوامبر	۹۴۰/۷۸	۲۶۰۶/۸۱
دسامبر	۱۱۵۲/۳۷	۱۳۱۴/۷۰

جدول (۴): نتایج میزان رسوب و مقادیر برآورد شده توسط مدل Arc SWAT

Table (4): The results of observed sediment amount and estimated values by the ArcSWAT model

مشاهده‌ای	شبه‌سازی	پارامتر
۴/۷۴	۱/۲۳	رسوب ویژه (تن در هکتار در سال)
۵۰۵۶۴۳	۱۳۱۸۱۲/۸۱	رسوب کل (تن در سال)

برآورد رسوب با مدل WEPP

عوامل عناصر خاک، اقلیم، کاربری و پوشش اراضی، توپوگرافی و آبراهه فاکتورهای مورد نیاز مدل WEPP است. در جدول ۵ داده‌های ابزار اقلیم که شامل اطلاعات بارندگی و دمای منطقه می‌باشد و در جدول ۶ نتایج آزمایشات انجام شده خاک ارائه شده است. پس از آماده‌سازی سایر موارد مورد نیاز برای اجرای مدل WEPP در نهایت مقادیر فرسایش و رسوب به دست آمد که در جدول ۷ نتایج محاسبات ارائه شده است. برای بررسی صحت پیش‌بینی‌های انجام شده، از داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری پهناور که مربوط به دوره زمانی ۲۰ ساله می‌باشد استفاده گردید.

روش منتخب در این تحقیق دامنه بوده و بررسی‌ها نشان داد این روش نزدیکترین برآورد به داده‌های مشاهداتی را دارد. بعد از انتخاب روش با معرفی داده‌های ریزمقیاس شده توسط مدل SDSM تحت سه سناریو RCP2.6 و RCP4.5، RCP8.5 با رسوب مقدار، برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۰ محاسبه شد که در جدول ۸ ارائه گردید.

جدول (۵): عوامل محاسبه شده برای ابزار اقلیم

Table (5): Calculated factors for the climate tool

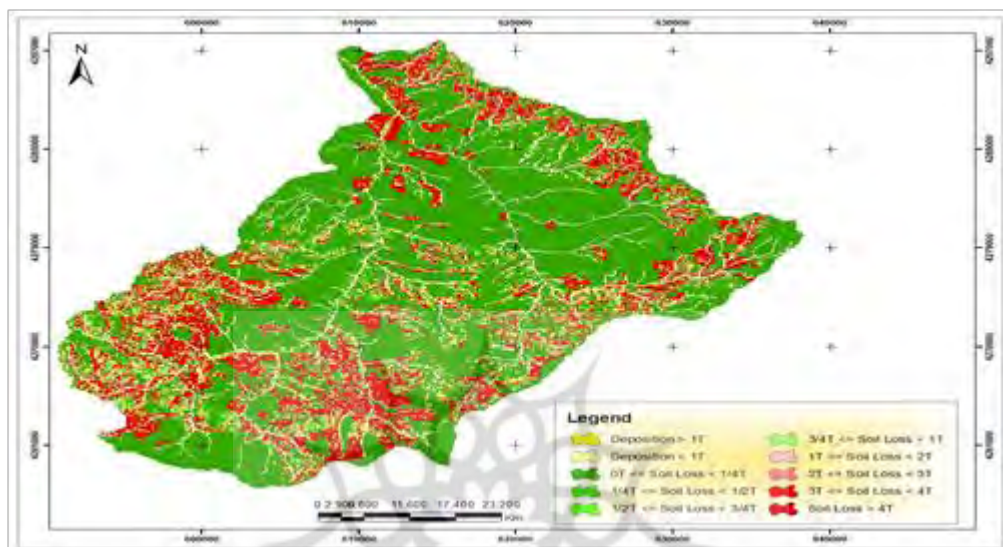
پارامترها	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
A	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۱
B	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۱۵
C	۳/۳۹	۲/۱۸	۱/۹۱	۲/۰۳	۱/۸۴	۱/۷	۳/۸۲	۲/۵۲	۲/۱۵	۲/۵۶	۲/۳۱	۲/۵۹
D	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۴۹	۰/۵۲	۰/۴۲
E	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۳	۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۶
F	۳۸/۲۲	۳۸/۲۲	۴۰/۸۶	۴۹/۷۴	۶۱/۳	۶۹/۸۳	۷۸/۷۲	۸۲/۵۷	۷۶/۲۹	۶۶/۲	۵۲/۴۷	۴۳/۰۸
J	۲۳/۶۴	۲۵	۳۱/۴۹	۴۰/۴۲	۴۶/۸۷	۵۳/۸۵	۵۹/۸۱	۵۹/۷۶	۵۲/۶۹	۴۴/۷۹	۳۴/۹۷	۲۷/۹۶
H	۸/۷۲	۹/۳۷	۱۰/۸	۹/۷۵	۸/۰۳	۶/۹۲	۶/۱۹	۷/۱۳	۸/۶۲	۹/۸	۹/۹۹	۹/۶۴
K	۹/۲۱	۹/۰۶	۸/۲۲	۶/۹۲	۶/۹۲	۴/۲۸	۴/۰۹	۴/۱۲	۵/۱۶	۶/۱۳	۷/۷۶	۸/۸۵

A: میانگین بارش ماهانه (اینچ)، B: انحراف معیار بارندگی ماهانه، C: ضریب چولگی بارندگی ماهانه، D: احتمال یک روز مرطوب بعد از یک روز مرطوب، E: احتمال یک روز مرطوب بعد از یک روز خشک، F: میانگین دمای حداکثر (درجه سانتیگراد)، J: میانگین دمای حداقل (درجه سانتیگراد)، H: انحراف معیار دمای حداکثر و K: انحراف معیار دمای حداقل.

جدول (۶) : عوامل اندازه‌گیری شده برای ابزار خاک

Table (6): Measured factors for soil tools

شماره پروفیل	عمق خاک (mm)	رس (%)	ماسه (%)	سلیت (%)	مواد آلی (%)	ظرفیت تبادل کاتیونی (MEQ/100GR)	سنگریزه (%)
۱	۱۵۰	۵	۰۶/۶	۳۴/۴	۴/۴۵	۸	۱۸
	۳۵۰	۱۲	۷۱/۶	۱۶/۴	۱/۸۵	۷	۵
۲	۲۰۰	۵/۴	۷۴/۲	۲۰/۴	۰/۲۷	۸/۵	۶۵
	۴۰۰	۱۱/۴	۵۴/۲	۳۴/۴	۱/۲۱	۸/۱	۳۰
۳	۱۵۰	۳۷/۴	۴۲/۲	۲۰/۴	۰/۶	۲۰/۱	۱۵
	۴۰۰	۲۵/۴	۴۶/۲	۲۸/۴	۰/۲۷	۱۸/۲	۵
	۹۰۰	۱۰/۴	۶۴/۲	۲۵/۴	۰/۱۴	۱۲/۲	۲
۴	۳۰۰	۲۱	۱۹/۶	۴۹/۴	۱/۷۶	۱۲/۱	۲۵
	۱۰۰۰	۲۲	۲۹/۶	۴۸/۴	۰/۷۴	۱۲/۱	۵
۵	۲۰۰	۴۱/۸	۲۱/۲	۳۷	۲/۰۵	۳۵	۵
	۴۰۰	۵۰/۸	۱۷/۲	۳۲	۰/۴۷	۴۰	۱۵
	۱۰۰۰	۴۱/۸	۲۴/۲	۳۴	۰/۲۱	۳۷	۱۵
۶	۱۵۰	۰/۴	۸۴/۲	۱۵/۴	۰/۳۱	۶/۱	۵
	۳۵۰	۲/۴	۶۸/۲	۲۹/۴	۰/۲۳	۶/۵	۲
۷	۱۵۰	۱۶/۸	۴۸/۲	۳۵	۱/۳۹	۱۰/۱	۵
	۴۵۰	۱۵/۸	۵۰/۲	۳۴	۱/۲۱	۹/۸	۲
۸	۳۰	۲۵	۵۵/۶	۱۹/۴	۰/۷۶	۱۰	۲۵
	۶۰۰	۲۸	۵۴/۶	۱۷/۴	۰/۶	۹/۶	۱۰
	۸۰۰	۲۹	۵۰/۶	۲۰/۴	۰/۷۴	۸/۷	۵
	۱۳۰۰	۳۰	۵۰/۶	۱۹/۴	۰/۴۹	۸/۷	۲
۹	۱۸۰	۱۵/۴	۳۹/۲	۴۵/۴	۳/۱۴	۱۱/۱	۳۵
	۴۰۰	۲۰/۴	۴۲/۲	۳۷/۴	۲/۰۱	۱۲/۱	۱۰
۱۰	۲۰۰	۴۵	۲۴/۶	۳۰/۴	۲/۰۷	۳۰	۱۸
	۵۰۰	۴۳	۲۵/۶	۳۱/۴	۱/۴	۲۸	۵



شکل (۷): نقشه شبیه‌سازی فرسایش و توان تولید رسوب حوضه توسط مدل WEPP

Figure (7): Erosion simulation map and basin sediment production capacity by WEPP model

جدول (۷): آمار مشاهده ای رسوب و مقادیر برآورد شده توسط مدل WEPP

Table (7): Observational sediment statistics and values estimated by the WEPP mode

مشاهده‌ای	شبیه‌سازی	پارامتر
۴/۷۴	۳/۱۱	رسوب ویژه (تن در هکتار در سال)
۵۰۵۶۴۳	۳۳۲۵۱۷	رسوب کل (تن در سال)

جدول (۸): مقادیر برآورد شده توسط مدل WEPP در دوره‌ی آتی به روش دامنه

Table (8): Values estimated by the WEPP model in the future period using the domain method

پارامترها	rcp2.6	rcp4.5	rcp8.5
رسوب کل (تن در سال)	۵۱۵۵۸۷/۳۱	۵۲۸۱۳۶/۵۰	۴۹۲۱۸۱/۴۸
رسوب ویژه (تن در هکتار در سال)	۴/۸۳	۴/۹۵	۴/۶۱
درصد تغییرات	۱/۹۷	۴/۴۵	-۲/۶۸

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تغییرات فرسایش و رسوب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در حوضه حاجیلرچای با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی توسط مدل SDSM در دوره‌ی زمانی ۲۰۲۰ الی ۲۰۴۰ مورد بررسی قرار گرفت. جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های از سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده گردید و متغیرهای اقلیمی بارندگی و درجه حرارت به عنوان دو متغیر اصلی اقلیمی منطقه بررسی گردید. نتایج حاصله از این مدل نشان‌دهنده‌ی افزایش متوسط دمای حداقل و دمای حداکثر در دوره‌ی مذکور نسبت به دوره‌ی پایه و کاهش متوسط میزان بارندگی و همچنین تغییر زمان بارندگی از فصل‌های بارش در کلیه سناریوها می‌باشد. برای شبیه‌سازی رسوب حوضه آبریز حاجیلرچای برای دوره‌های آتی با بهره‌گیری از خروجی‌های مدل اقلیمی از مدل‌های SWAT و WEPP استفاده گردید و آنالیز حساسیت و اعتبارسنجی مدل SWAT در نرم‌افزار SWAT_CUP انجام شد. در مدل WEPP با مقایسه‌ی نتایج خروجی روش‌های مختلف برآورد رسوب در آن مشخص گردید روش دامنه به مقدار رسوب مشاهده‌ای نزدیک‌تر است. با بارگذاری اطلاعات اقلیمی سناریوهای مختلف مذکور در مدل‌های مطرح شده میزان رسوب برآوردی تا افق ۲۰۴۰ مشخص گردید که نشان‌دهنده‌ی افزایش مقدار رسوب تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP4.5 و کاهش مقدار رسوب در سناریوی RCP8.5 می‌باشد. با توجه به نتایج برآوردی نسبت به این تغییرات باید تمهیدات مناسب حفاظتی و آبخیزداری در حوضه صورت گرفته و بدین طریق میزان فرسایش‌پذیری خاک را در دوره‌ی آتی به حد کمتری رساند.

۵-منابع

- Ababai, B. & Sohrabi, T. (2009). Evaluation of SWAT model performance in Zayandeh Rood watershed, *Water and Soil Conservation Research*, 16, 41-58. (In Persian)
- Ahmadi, H., Jafari, M., Golkarian, A., silk, I., Laughlin, J. (2007). Estimation of erosion and sedimentation using the WEPP model, a case study in Bararieh Neishabur watershed, *Research and construction in natural resources*, 75, 161-172. (In Persian)
- Ahmadi, M., Mokhtari, D., Hijazi, SA. Nik Sarasht, M. (2017). Comparison of WEPP and hydrophysical models to estimate soil erosion and sediment production case study: Cherdavel watershed, *Environmental Erosion Research*, 27, 1-24. (In Persian)
- Andaryani, S., Trolle, D., Nikjoo, M.R., Rezaiimoghadam, M. H., Mokhtari, D. (2019). Forecasting near-future impacts of land use and climate change on the Zilbier river hydrological regime, northwestern Iran, *Environmental Earth Sciences*, 78(188), 1-14.
- Alizadeh, H., Zahrai, B. (2014). Statistical exponential downscale of precipitation to evaluate the effects of climate change on extreme events in urban areas, First conference and festival on climate change and a way to a sustainable future, Tehran, *Environment Organization*. (In Persian)
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the Americal Water Resources Association*, 34(1), 37-89.
- Asadi, H., Jafari, M., Ashrafzadeh, Ah. (2016). soil erosion in Navroud watershed, *Soil protection and watershed research*, 25(2), 235-250. (In Persian)
- Bigham, A. &, Bigdali, A. (2016). Evaluation and estimation of erosion and sedimentation by hydrophysical method in GIS environment in Zagros dam area, 5th National Conference of Geomorphology Society of Iran, Mashhad, (In Persian)
- Hamlet, A.F., Lettenmier, D. (2007). Effects of 20th-century warming and climate variability on flood risk in the western U.S, *Water resources*, 43(6), 1-17
- Muttiah, R.S., & wurbs, R.A. (2002). Modeling the impact of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, 27(3), 407-409
- Parajuli, P.B., Nelson, N.O., Frees, L.D, Mankin, K. R. (2009). Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas, *Hydrol*, 23, 748-763.
- Refahi, H. (2017). Water erosion and its control, University of Tehran Press, (In Persian)
- Rezaiimoghadam, M.H., Mokhtari, D., Samandar, N. (2022). The effect of land use change on discharge and sediment changes in the Ujanchai watershed using the SWAT model. *Hydrogeomorphology*, 9(30), 1-24. (In Persian)

- Sadeghzadeh, M., Yarahmadi, J. (2013). Evaluation of the WEPP model in estimating the amount of erosion and sedimentation in the marl lands of Khajeh region, *Quantitative geomorphological researches*, 2(1), 97-112. (In Persian)
- Sayyad, D., Ghazavi, R., Omidvar, A. (2020). Investigating the effectiveness of the swat model in estimating the daily discharges of basins without statistics, with the approach of zoning in dry areas, *Hydrogeomorphology*, 7(25), 161-182. (In Persian)
- Sedai, L. (2009). Evaluating the efficiency of the WEPP model in estimating erosion and sedimentation (case study: Analouche and Gregak basins), Master's thesis in Agricultural Engineering, *Soil Science*, Faculty of Agriculture, Shahr Kurd University. (In Persian)
- Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Hong, Y.H., Li, Q., Xu, L., Liu, R.M. (2009). A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area, *Agricultural Water Management*, 96, 1435-1442.
- Taheri Tizro, A., Khodamoradpour, M., Mashhadian, M.J. (2018). Evaluation of RegCM4 Regional Climate Model simulations for the land surface water budget components (A case study in Toyserkan plain, Hamedan province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5), 1-24. (In Persian)
- Teymuri, F., Bazrafshan, A., Rafi Sardoi, E. (2019). Evaluation of the effect of climate change and land use change on soil erosion in Kandran watershed, *Ecohydrology*, 6(2), 353-368. (In Persian)
- Tulabi, S., Abedini, M., IsmailiAuri, A. (2015). Evaluating the effectiveness of the WEPP model in estimating the sedimentation of the Solachai-Ardebil watershed, *Watershed management research paper*, 6(1), 184-192. (In Persian)
- Yue, T.X., Zhao, N., Fan, Z., Li, J. (2016). CMIP5 Downscaling and Its Uncertainty in China. *Global and Planetary Change*, 414, 30-37.