



ارزیابی حال و آینده مقدار فرسایش خاک در حوزه آبخیز سد استقلال میناب با بهره‌گیری از مدل RUSLE-3D و سناریوهای تغییر اقلیم

محمد رضا عظیمی سردری^۱، ام‌البنین بذرافشان^{۲*}، توماس پاناگوپولوس^۳، الهام رفیعی ساردوئی^۴

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳. استاد، مرکز تحقیقات دینامیک سازمانی و مکانی، دانشگاه آگرا، پردیس گامبلاس، فارو، پرتغال

۴. استادیار دانشکده منابع طبیعی، گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

* نویسنده مسئول: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۴

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی مقدار کمی فرسایش خاک در دوره حاضر و پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم طی افق زمانی ۲۰۳۰ بر آن انجام شد. برای این منظور از داده‌های بارش روزانه ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ در ایستگاه‌های موجود و داده‌های NCEP بهره‌گیری شد. اقلیم دوره آینده از مدل‌های گردش عمومی جو CanESM2 و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM با سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی شد. مقدار عامل فرساینده باران در سناریوهای مختلف برآورد و در پایان مقدار فرسایش خاک توسط مدل RUSLE-3D برآورد شد. نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش در آینده نشان‌دهنده افزایش آن از ۱۴۶/۷ میلی‌متر به ۱۷۸/۶۱ میلی‌متر در دوره آینده است که با این وجود، به دلیل افزایش شدت بارندگی‌ها، در تمامی سناریوها مقدار عامل فرساینده باران در آینده بیش‌تر از دوره پایه خواهد شد. در واقع مقدار فرساینده باران به‌طور متوسط از $28/78 \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ به $34/33 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ افزایش خواهد یافت. مقدار فرسایش در دوره پایه با استفاده از مدل $10/16 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ برآورد شد، و با توجه به ثابت فرض کردن دیگر متغیرهای مدل RUSLE-3D و افزایش مقدار فرساینده باران در آینده، با سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۵٪، ۱۰ و ۳ درصد افزایش و مقدار فرسایش نیز به ترتیب به ۱۱/۷، ۱۱ و ۱۰/۵ تن در هکتار در سال خواهد رسید. بنابراین، افزایش مقدار بارش موجب افزایش عامل فرساینده باران و در نتیجه نرخ فرسایش خاک افزایش خواهد یافت. لذا، ارزیابی وضعیت حال و پیش‌بینی فرسایش خاک در آینده در حوزه آبخیز سد استقلال میناب، اطلاعات مفیدی را برای حفظ محیط طبیعی و حفاظت خاک ارائه می‌نماید.

واژگان کلیدی: هدررفت خاک، ریزمقیاس‌نمایی، مدل‌سازی فرسایش، پیش‌بینی بارش

■ مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین تهدیدهای محیط-زیست در کره زمین تبدیل شده است (۶ و ۳۶) که کیفیت آب، زیستگاه‌های گیاهی و جانوری و تأمین خدمات بوم-نظام را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (۲۲ و ۱۳).

افزایش ظرفیت رطوبت و مقدار بخار آب جو منجر به تغییر در ویژگی‌های بارندگی و رژیم بارش و در نتیجه، وقوع بارش‌های شدید می‌شود. تغییر اقلیم موجب تغییر ویژگی‌های بارش نظیر مقدار، شدت فراوانی و نوع بارش می‌شود و ویژگی مقادیر حدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸). تغییر در بیلان آبی که ناشی از تغییرات اقلیمی است، قادر است بسیاری از فرآیندها در طبیعت مانند فرسایش، پایداری شیب، تغییر کانال و انتقال رسوب را تحت تأثیر قرار دهد (۱۵). با تغییر اقلیم انتظار می‌رود فرسایش خاک به دلایل گوناگون تشدید یابد که بیش از همه به تغییر قدرت عامل فرسایش باران بر می‌گردد. افزایش قدرت فرسایش باران به طور مستقیم فرسایش خاک را تشدید می‌کند (۱۹). مطالعات انجام شده در آمریکا طی یک دوره ۸۰ ساله نشان می‌دهد، که با تغییر اقلیم، فرسایش باران می‌تواند بین ۱۶ تا ۵۸ درصد افزایش یابد (۱۸).

تغییر اقلیم تأثیر بسیار زیادی بر روی فرسایش و هدرفت خاک دارد (۱۶) و در بین پارامترهای تأثیرپذیر از تغییر اقلیم، بارش و به تبع آن قدرت فرسایش باران بیش‌ترین تأثیرپذیری را دارند (۴۱ و ۲۶). این عامل یکی از متغیرهای اساسی در مدل‌های مربوط به فرسایش خاک می‌باشد به طوری که در معادله جهانی فرسایش خاک^۱ تحت عنوان عامل فرسایش باران بکار می‌رود (۱۰).

معتبرترین روش برای پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی، بهره‌گیری از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو است. این مدل‌ها اقدام به پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی برای دوره‌های آینده با توجه به تأثیر تغییر اقلیم می‌کند. مدل SDSM^۲ یکی از معروف‌ترین این مدل‌ها و از مولدهای داده‌های تصادفی هواشناسی است که برای تولید داده‌های دمای کمینه و بیشینه، تابش، بارش و تبخیر-تعرق مرجع در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم حال

و آینده به کار می‌رود. این مدل دارای بانک اطلاعاتی از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو است و توانایی ارزیابی و شبیه‌سازی با سناریوی‌های تغییر اقلیمی را دارد (۲۷) و (۲۸). یکی از مهم‌ترین مدل‌های برآورد مقدار فرسایش، مدل جهانی هدر رفت خاک اصلاح شده^۳ است (۹، ۲۹، ۳۵، ۴ و ۲۳) که برآوردهای دقیق‌تری از عامل‌های بارش، پوشش، خاک و فرسایش خاک دارد (۲۴) و استفاده از ابزارهای مفیدی همانند سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، امکان تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی را فراهم آورده است (۱۴ و ۲۱). با بهره‌گیری از این روش بررسی‌های زیادی در ایران و جهان صورت انجام شده- است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

محققان در سواحل جنوبی خزر به پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر عامل فرسایش باران پرداختند. لذا به این منظور از خروجی‌های مدل اقلیمی HadCM3^۴ و سناریوی انتشار A1B استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد، روند عامل فرسایش باران در طول قرن اخیر در شمال کشور افزایشی بوده است (۳۰). همچنین، پژوهشی در ایالات متحده به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر فرسایش خاک در نه اقلیم مختلف، توسط دو مدل گردش عمومی HadCM3 و CGCM1 و با سه سناریوی B1، A2 و A1B انجام شد. نتایج حاکی از افزایش عامل فرسایش باران و افزایش فرسایش خاک بین ۱۶ تا ۵۸ درصد است (۲۵).

محققان به شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرسایش خاک تحت تأثیر سناریوهای تغییرات اقلیمی در حوزه آبخیز کسلیان پرداختند. در پژوهش مذکور، برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از سه سناریوی A2، B1 و IPCM4 و همچنین برای برآورد مقدار فرسایش و رسوب از مدل RUSLE استفاده کردند. نتایج نشان داد که عامل فرسایش باران در مدل RUSLE تأثیر مستقیمی از تغییرات اقلیمی دارد، به طوری که مقدار فعلی فرسایش که ۲۱/۸۲ تن در هکتار در سال بوده است با افزایش ۱۰-۳۵٪ عامل فرسایش باران، فرسایش خاک ۳۲-۱۰٪ در طول سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت (۳۸).

^۳ RUSLE^۴ Hadley Climate Model 3^۱ USLE^۲ Statistical Down Scaling Model

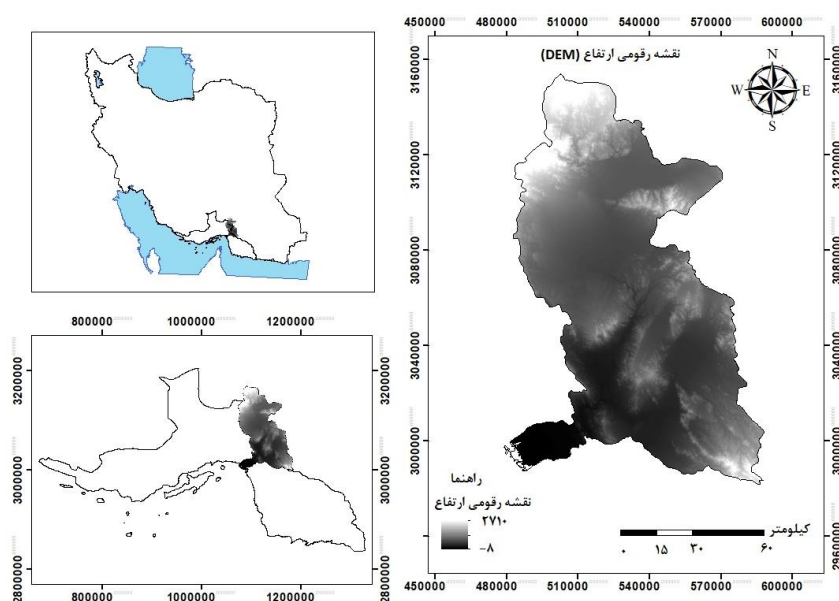
آینده، مدیران را در استفاده بهتر از پتانسیل‌های حوزه مورد نظر یاری دهد.

بنابراین هدف از پژوهش حاضر به صورت زیر است: (۱) برآورد فرسایش خاک در دوره پایه در حوزه آبخیز سد استقلال میناب؛ (۲)، پیش بینی عامل فرسایش باران در سال ۲۰۳۰ با پیش بینی‌های آب و هوایی CMIP5 با سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5؛ و (۳) پیش‌بینی فرسایش خاک در سال ۲۰۳۰ با عامل فرسایش باران پیش‌بینی شده. لذا در پژوهش حاضر، فرض بر این است که فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه به طور عمده تحت تأثیر آب و هوا و تغییر آن است.

■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز سد استقلال میناب با مساحتی معادل ۱۰۵۱۹۰۰ هکتار از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوزه‌های آبخیز سواحل دریای عمان و خلیج فارس در استان هرمزگان است. حدود ۶۰ درصد از وسعت آن در استان کرمان و ۴۰ درصد در استان هرمزگان قرار دارد (۱۷). این حوزه آبخیز در ناحیه شرقی ایران و شمال شرقی شهرستان میناب و در فاصله بین ۴۸' ۵۶° تا ۵۹' ۵۷° شرقی و ۲۷° تا ۲۸° ۳۲' عرض شمالی واقع گردیده است (شکل ۱) و دارای اقلیم گرم و فراهشک و متوسط بارش ۱۹۲/۵ میلی‌متر است (۳).

نتایج پیش‌بینی فرسایش خاک به کمک دو سناریوی گزارش پنجم و مدل RUSLE-3D در فلات تبت نشان داد که عامل فرسایش باران و متعاقباً مقدار هدررفت خاک تا افق ۲۰۵۰ در هر دو سناریو افزایش می‌یابد (۳۲). در بسیاری از حوزه‌های آبخیز به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به دلیل عدم وجود رودخانه‌های دائمی، پرهزینه بودن، صرف وقت زیاد و عدم امکان نصب تجهیزات رسوب‌سنجی، امکان اندازه‌گیری مستقیم رسوب وجود ندارد و حوزه آبخیز سد استقلال میناب نیز از این لحاظ مستثنی نبوده است. از طرفی این حوزه از نظر شکل، کشیده است و رودخانه آن در صورت بارش رگباری دارای رژیم سیلابی هستند. آمارهای موجود نشان می‌دهد که این بارندگی‌ها از شدت زیادی برخوردار است و موجب فرسایش زیاد در حوزه می‌شود (۲۰). در مورد نرخ کمی فرسایش در حوزه آبخیز سد استقلال اطلاعات کمی وجود دارد. از طرفی، این حوزه طی دو دهه گذشته تغییرات جهانی اقلیم را تجربه کرده و روند فزاینده بارش‌های سنگین و حدی منجر به افزایش فرسایش و رسوب و در نتیجه کاهش حجم مخزن دریاچه شده است (۲۰). لذا با توجه به دانش محدود در زمینه تخمین فرسایش خاک در این حوزه، شبیه‌سازی تغییر اقلیم و تهیه نقشه آینده مقدار فرسایش گامی مهم در مدیریت حوزه آبخیز سد استقلال میناب می‌باشد و آگاهی از شرایط پیش‌رو در



شکل ۱. نمایی از موقعیت قرارگیری حوزه آبخیز سد استقلال در استان هرمزگان و ایران

مدل RUSLE-3D

در این پژوهش، هدف پیش‌بینی پتانسیل هدر رفت سالیانه خاک بود. بدین منظور، مدل تجدید نظر شده سه بعدی هدر رفت خاک، در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی به کار برده شد. این مدل مقدار فرسایش آبی را با شش عامل مطابق رابطه ۱ برآورد می‌کند (۳۷):

$$A=R*K*LS*C*P \quad (1)$$

که در آن A مقدار خاک فرسایش یافته برحسب تن در هکتار در سال، R عامل فرساینده‌گی سالانه باران، K ضریب فرسایش‌پذیری و حساسیت ذاتی خاک بر حسب تن در هکتار به ازای واحد فرساینده‌گی، L طول شیب، S مقدار شیب (بدون بعد)، C عامل پوشش گیاهی و P عامل حفاظت خاک است (جدول ۱).

مدل‌سازی تغییر اقلیم

در این تحقیق از خروجی مدل CanESM2^۱ استفاده شده است. این مدل از چهارمین نسل مدل‌های آب

وهوایی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب وهوای کانادا تهیه شد و زیر نظر سازمان محیط زیست آن کشور توسعه یافته است. در این مدل کل سطح زمین بصورت ۶۴*۱۲۸ سلول، شبکه‌بندی شده است، این مدل در ایران به‌عنوان بهترین مدل معرفی شده است (۳۸). هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود از سناریوهای جدید RCP^۲ به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است (۱۲). سناریوهای جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌باشند که بر پایه مقدار واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند (۳).

دلیل بزرگ مقیاس بودن داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو، برای مطالعات منطقه‌ای باید ریزمقیاس شوند.

جدول ۱. عامل‌های مدل RUSLE-3D

عامل	رابطه	معرفی عامل رابطه
عامل فرساینده‌گی باران (R)	$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P} \quad (2)$	F: عامل فرساینده‌گی باران؛ P _i : متوسط بارندگی در ماه نام و P متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر)
عامل‌های طول شیب (L) و درجه شیب (S)	$R = (0.07397 F^{1.847}), F < 55mm \quad (3)$ $R = (95.77 - 6.081F + 0.477 F^2), F \geq 55mm$	A: مساحت سطح مشارکت‌کننده بالادست به متر مربع و S مقدار عامل شیب است که از رابطه ۵ به دست می‌آید. B: زاویه شیب بر حسب درجه است.
عامل مدیریت پوشش (C)	$L = \frac{1}{4} [AS / 22.13]^{0.4} \quad (4)$	C: کاربری و پوشش زمین
عامل عملیات حفاظتی (P)	$S = \left[\frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^{0.33} \quad (5)$	P: عملیات حفاظتی
	براساس جدول ارائه شده توسط USDA(1972)	
	براساس جدول ارائه شده توسط ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸)	

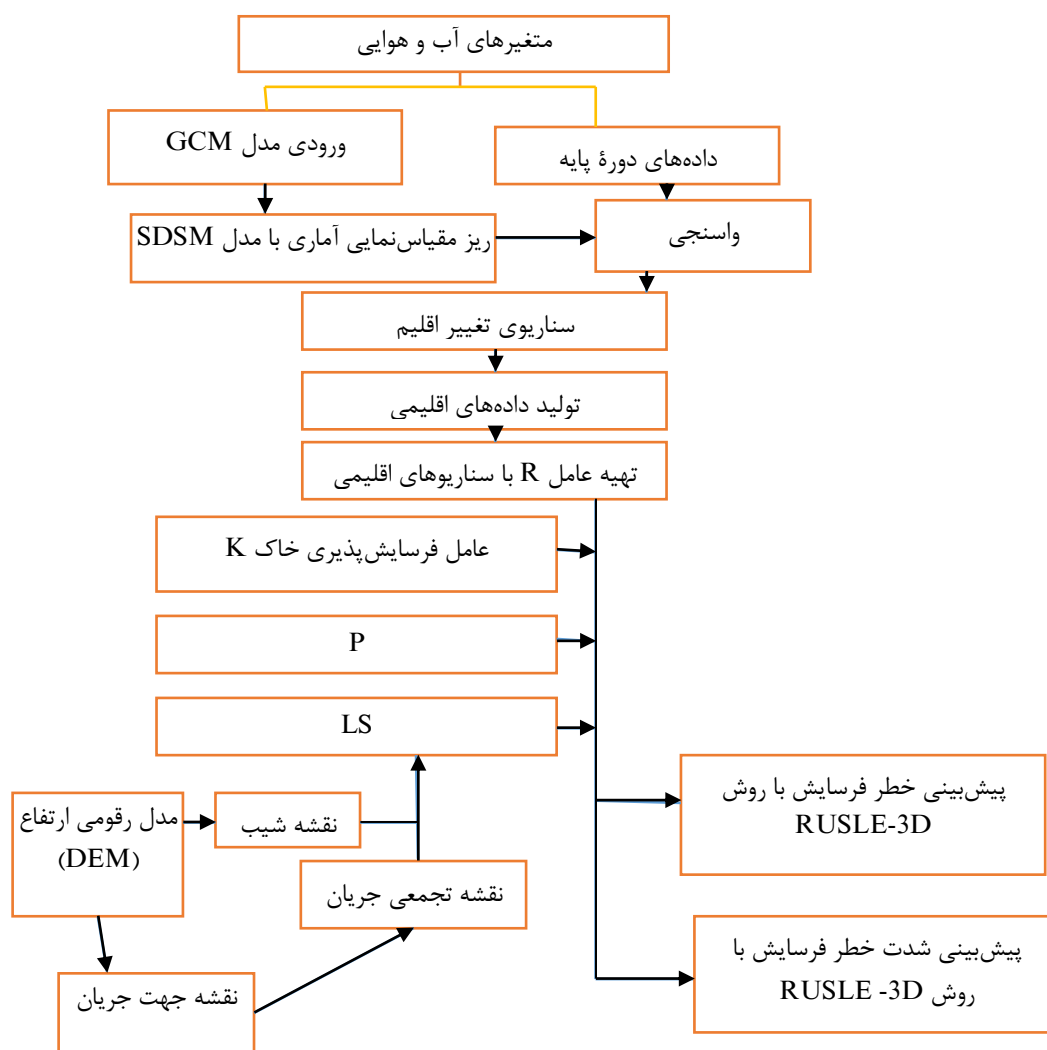
^۱ Canada Earth System Model 2^۲ Representative Concentration Pathway

استفاده شدند (جدول ۲). داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی کانادا (۱۱) به دو دوره‌ی ۱۵ ساله (۲۰۰۰-۱۹۸۵) و پنج ساله (۲۰۰۵-۲۰۰۱) تقسیم شدند. از دوره اول برای کالیبره کردن مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات استفاده شد. از دوره دوم، به منظور حصول اطمینان از این که مدل توانایی شبیه‌سازی داده‌ها را خارج از محدوده زمانی کالیبراسیون دارد، برای ارزیابی مدل استفاده گردید. سپس با استفاده از مدل SDSM کالیبره شده، بارش برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ شبیه‌سازی شد. برای مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده، از سه معیار آماری میانگین خطای مطلق (MAE) درصد اربیبی (PBIAS) و ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید. روندنمای تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این تحقیق از مدل آماری SDSM^۱ استفاده شد. این مدل که در قالب یک نرم‌افزار طراحی شده است، داده‌های روزانه هواشناسی ایستگاه مورد نظر را به عنوان ورودی گرفته و در چند مرحله خروجی مدل را بر پایه داده‌های روزانه در منطقه مورد نظر ریزمقیاس می‌کند (۳ و ۳۳).

در نهایت برای پیش‌بینی بارش در آینده از مدل گردش عمومی CanESM2 و برای شبیه‌سازی بارش روزانه از مدل SDSM با سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. لذا از بین متغیرهای مرکز ملی پیش‌بینی محیطی کانادا^۲ متغیرهایی انتخاب شد که دارای کمترین خطا و بیشترین همبستگی باشد.

برای واسنجی کردن مدل SDSM داده‌های ایستگاه‌های مشاهده‌ای بندرعباس، حاجی‌آباد، میناب و جیرفت



شکل ۲. روندنمای مراحل تحقیق

^۱ Statistical Downscaling Model

^۲ National Centers for Environmental Prediction; NCEP

نتایج و بحث

واسنجی مدل‌های تغییر اقلیم

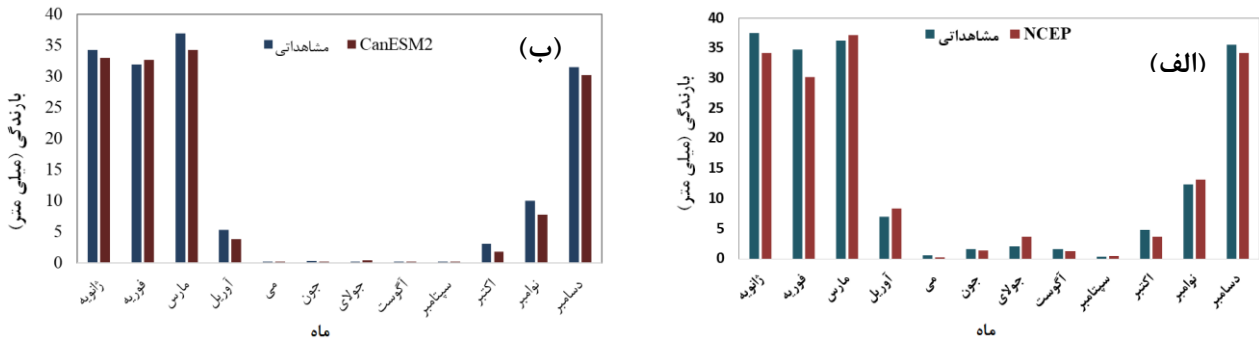
نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها مبتنی بر آماره‌های مربوطه بر طبق جدول ۲، بیانگر این است که NCEP و سناریوها در برآورد مقدار بارش تمامی ایستگاه‌ها دارای کارایی و دقت نسبتاً خوبی می‌باشند. نتایج مقادیر متوسط ماهانه بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه میناب طی دوره‌های واسنجی ۱۹۸۵-۲۰۰۰ و دوره‌های صحت سنجی ۱۹۸۵-۲۰۰۵ به ترتیب حاصل از پیش‌بینی کننده‌های بزرگ‌مقیاس مشاهداتی (NCEP) و مدل گردش عمومی جو (CanESM2) ارائه شد (شکل ۳). نتایج ارزیابی دقت مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش بر اساس شاخص R^2 ، RMSE، MAE، در ایستگاه‌های بندرعباس، میناب، حاجی‌آباد و جیرفت (جدول ۲) نشان داد که انطباق زیادی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و

مشاهداتی وجود داشته که مقادیر پایین RMSE و MAE و زیاد بودن مقدار R^2 در تمامی ایستگاه‌ها نشان‌دهنده همین انطباق است و نشان می‌دهد مدل SDSM از توانایی قابل قبولی در کوچک‌مقیاس‌سازی داده‌های بارش در مدل IPCC5 برخوردار است. لذا می‌توان از مدل مذکور برای تولید داده‌های اقلیمی طی دوره آینده بهره‌گیری کرد.

نتایج سناریوهای مختلف RCP نشان داد که هر سه سناریو افزایش مقدار بارندگی را پیش‌بینی می‌کنند. تحقیق صورت گرفته توسط محققان (۱۱) با استفاده از گزارش چهارم تغییر اقلیم و سناریوی A1B نشان داد، روند بارش در خلیج فارس افزایشی است. همچنین برخی محققان (۲۷)، افزایش بارش را تا سال ۲۰۵۰ در مناطق حاره‌ای تا ۲۵٪ محتمل می‌دانند.

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی مدل پیش‌بینی کننده NCEP و CanESM2 در مرحله واسنجی و صحت سنجی

مدلسازی	مدل/دوره	ایستگاه	ضریب همبستگی	میانگین مربعات ریشه خطا	میانگین خطای مطلق
واسنجی	NCEP ۱۹۸۵-۲۰۰۰	بندرعباس	۰/۸۳	۲/۸۹	۰/۴۰
		میناب	۰/۸۳۱	۱/۸۷	۰/۵۷
		جیرفت	۰/۸۳	۰/۱۳	۰/۱۵
		حاجی‌آباد	۰/۸۳۶	۰/۹۲	۰/۴۸
صحت‌سنجی	NCEP ۲۰۰۵-۲۰۰۱	بندرعباس	۰/۸۳	۱/۶۷	۱
		میناب	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۱۵۶
		جیرفت	۰/۷۹۶	۰/۷۴	۱/۱۰
		حاجی‌آباد	۰/۸۳	۱/۵۰	۱
صحت‌سنجی	CanESM2 ۱۹۸۵-۲۰۰۵	بندرعباس	۰/۹۶	۰/۰۹	۱/۳۴
		میناب	۰/۹۱	۱/۵۱	۰/۳۸
		جیرفت	۰/۹۳	۱/۲۸	۰/۰۸
		حاجی‌آباد	۰/۸۹	۲/۲۰	۱/۸۱

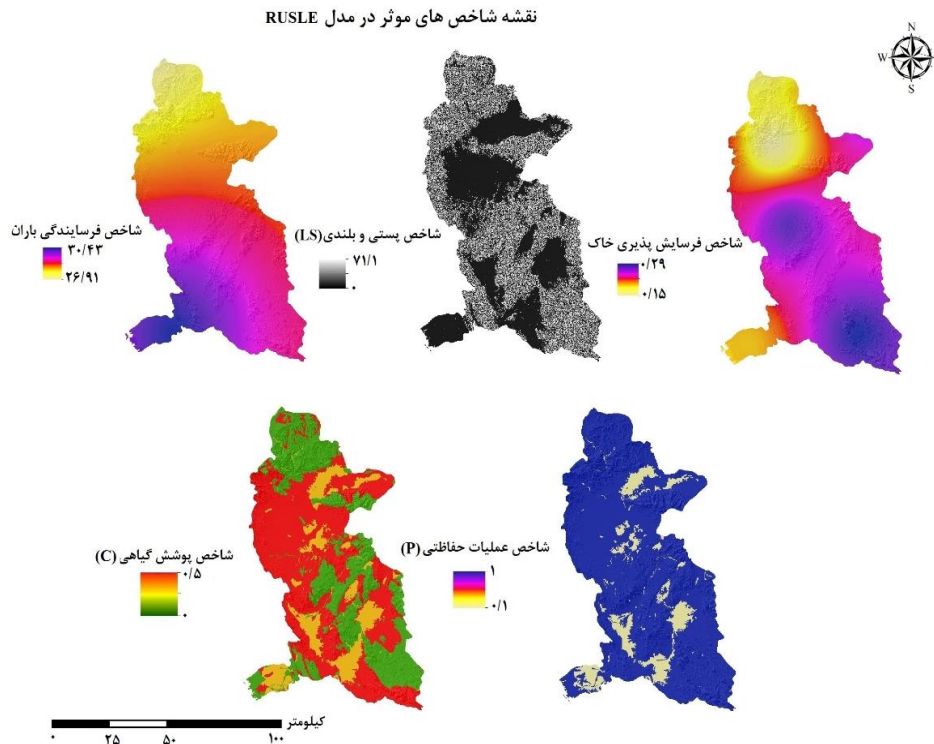


شکل ۳. مقایسه مقدار میانگین ماهانه بارش مشاهداتی و برآورد شده از NCEP در مرحله واسنجی (الف) (۱۹۸۵-۲۰۰۰) و CanESM2 در مرحله صحت سنجی (۱۹۸۵-۲۰۰۵) در ایستگاه میناب

است که مقدار آن بین ۳۴/۲ و ۴۰/۶ می باشد و در کل شاهد افزایش روند عامل فرسایش باران در دوره آینده خواهیم بود.

لذا در صورتی که روند افزایش بارش سالانه ادامه داشته باشد مقدار فرسایش باران با هر سه سناریو افزایش خواهد یافت. نتایج پژوهش حاضر با نتایج محققان (۳۱، ۳۸، ۳۹ و ۱۲) مبنی بر افزایش فرسایش باران در دوره های آتی مطابقت دارد. در واقع نتایج نشان می دهد که مقدار تغییرات شاخص فرسایش باران با مقدار بارندگی سالانه مرتبط است.

برآورد فرسایش باران در دوره پایه و آینده عامل فرسایش باران براساس رابطه ۲ و ۳، در دوره پایه برای منطقه مورد مطالعه برآورد گردید که دامنه تغییرات آن در این تحقیق از $26 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ تا 30 است، بطوری که مقدار تغییرات آن از بالادست به پائین دست افزایش می یابد (شکل ۴). بطور متوسط، مقدار R-factor در دوره پایه $27/78 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ بوده که تحت سناریوی RCP2.6 به $37/27$ ، در سناریوی RCP4.5 به $33/81$ و در سناریوی RCP8.5 $31/92$ افزایش خواهد یافت (شکل ۵). با توجه به نتایج به دست آمده بیشترین مقدار R در دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ تحت سناریوی RCP2.6

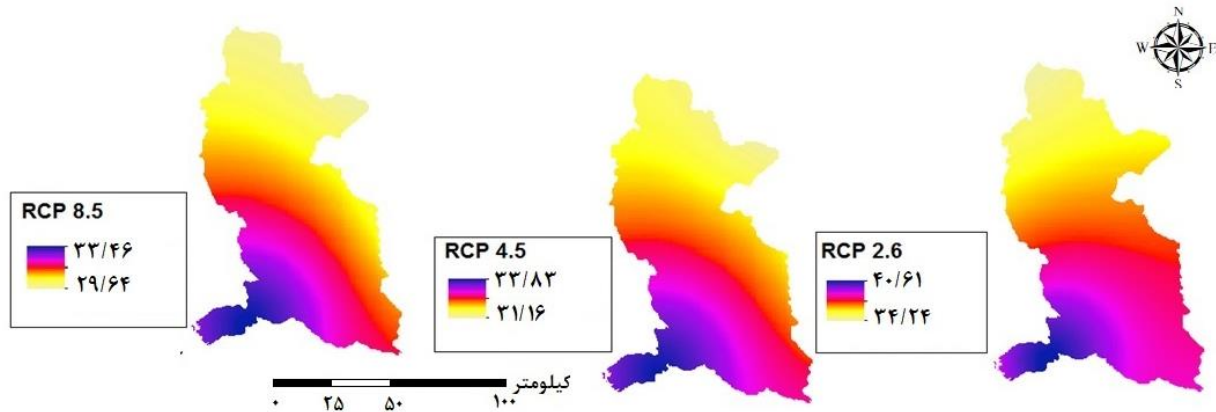


شکل ۴. عوامل مؤثر در برآورد فرسایش در مدل 3D-RUSLE در دوره (۱۹۹۵-۲۰۱۵)

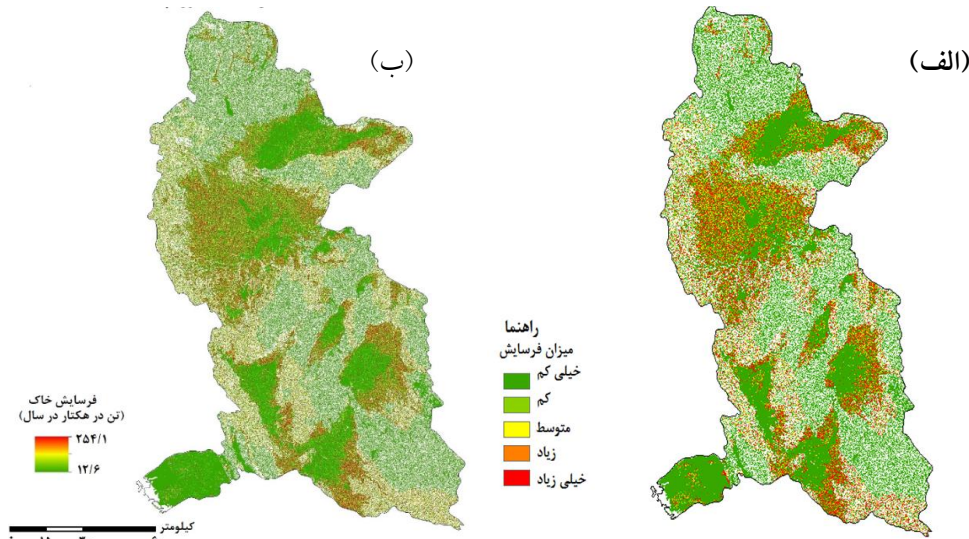
و نقشه نهایی به دست آمد. لازم به ذکر است که در این تحقیق فرض بر این است که، عامل پوشش گیاهی و مدیریت زمین در آینده ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ نقشه عامل فرساینده باران تحت سناریوهای مختلف و در شکل ۶ نقشه خطر فرسایش با استفاده از روش RUSLE-3D برای دوره پایه ارائه شده است.

برآورد فرسایش با استفاده از مدل RUSLE-3D در دوره‌ی پایه و آینده

جهت تهیه نقشه‌ی مقدار فرسایش حوزه‌ی آبخیز سد استقلال میناب، پنج لایه تولید شده شامل لایه‌های شیب و طول شیب به صورت لایه‌ی ارتفاعی، لایه‌ی فرسایش پذیری خاک، حفاظت خاک، پوشش گیاهی و فرساینده‌ی باران در محیط GIS با یکدیگر ترکیب شده



شکل ۵. نقشه‌ی عامل فرساینده‌ی باران تحت سناریوهای مدل SDSM (۲۰۳۰-۲۰۱۵)



شکل ۶. نقشه طبقه بندی فرسایش خاک (الف) و نقشه خطر فرسایش خاک (ب) در دوره پایه

شده است (جدول ۳). بیش از ۸۹٪ حوزه آبخیز مورد مطالعه، در طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم می‌باشد که به طور عمده این طبقه‌ها قسمت عمده‌ای از حوضه را دربر می‌گیرد. ۱۱/۳٪ از حوضه نیز دارای فرسایش زیاد تا شدید قرار دارد که در حاشیه اراضی کشاورزی واقع شده‌اند.

باتجزیه و تحلیل نقشه‌های به دست آمده عامل فرسایش پذیری خاک k دارای مقادیر ۰/۱۵-۰/۲۹ بوده است و مقادیر عامل پوشش گیاهی ۰-۱ است که مقدار ۱ مربوط به اراضی شهری می‌باشد.

مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه ۱۰/۱۶ تن در هکتار در سال متغیر می‌باشد و در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ طبقه خطر طبقه بندی

جدول ۳. درصد و مساحت طبقه‌های طبقه‌بندی شده فرسایش در روش RUSLE-3D (۱۹۹۵-۲۰۱۵)

طبقه خطر	مقدار هدر رفت خاک (ton ha ⁻¹ yr ⁻¹)	مساحت (هکتار)	مساحت (%)
خیلی کم	۰/۰۳-۱۰	۵۱۰۲۹۵/۶	۴۸/۰۳
کم	۱۰-۳۵	۱۹۰۰۵۷/۴	۱۷/۸۸
متوسط	۳۵-۵۰	۱۳۵۸۶۰/۲	۱۲/۸۷
زیاد	۵۰-۱۰۰	۱۲۱۱۰۳/۷	۱۱/۳۹
خیلی زیاد	<۱۰۰	۱۰۵۱۳۳	۹/۸۹

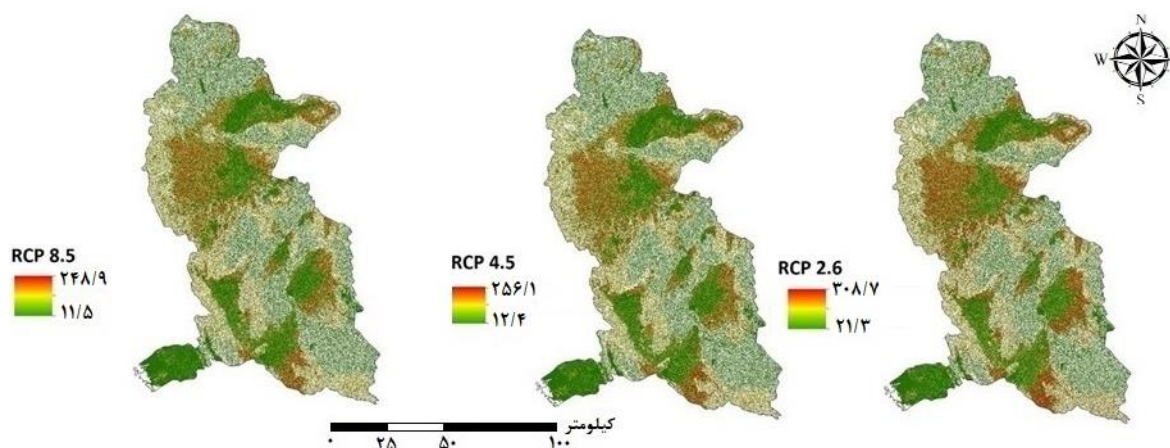
دارد که نشان دهنده حساسیت زیاد مدل به دو عامل است.

با جایگذاری عامل فرساینده باران (R) و ثابت در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر در فرمول مدل برآورد فرسایش (RUSLE-3D)، مقدار فرسایش خاک در دوره-ی زمانی آینده در سناریوهای مختلف RCP پیش‌بینی و محاسبه شد (شکل ۷).

رابطه ریاضی بین هر یک از ۵ عامل متغیرهای مستقل و نرخ فرسایش که متغیر وابسته است، با رابطه رگرسیونی بررسی شد (جدول ۴). ضریب رگرسیون اثر هر متغیر مستقل روی متغیر وابسته و تغییرپذیری متغیر وابسته براساس متغیر مستقل نشان می‌دهد. بر طبق نتایج عامل‌های مدیریت پوشش گیاهی و توپوگرافی دارای بالاترین ضریب تبیین بوده و بیش‌ترین تأثیر را روی برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE-3D

جدول ۴. صحت‌سنجی مدل RUSLE

معادله رگرسیونی	ضریب همبستگی	عامل‌های مدل RUSLE
E=0.83R-143	۰/۶۹	R
E=0.78K-103.6	۰/۴۷	K
E=0.95LS+271.5	۰/۹	LS
E=1.035C+323.5	۰/۹۳	C
E=0.68P+31.5	۰/۰۷۶	P



شکل ۷. نقشه خطر فرسایش پیش‌بینی شده در دوره آینده با سناریوهای مختلف RCP

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف تخمین مقدار فرسایش خاک تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از معادله جهانی خاک RUSLE-3D، در حوزه آبخیز سد استقلال میناب صورت پذیرفته است. براین اساس، عامل فرساینده باران R-factor که به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییر اقلیم است، با استفاده از سناریوهای گزارش پنجم در دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ پیش‌بینی گردید و با در نظر گرفتن سایر عامل‌ها در مدل RUSLE-3D، تغییرات هدر رفت خاک در آینده مورد پیش‌بینی قرار گرفت.

نتایج سناریوهای مختلف RCP نشان داد که هر سه سناریو افزایش مقدار بارندگی را پیش‌بینی می‌کنند. لذا افزایش بارش در آینده در این حوضه محتمل است. در صورتی که روند افزایش بارش سالانه ادامه داشته باشد مقدار فرساینده باران تحت هر سه سناریو افزایش خواهد یافت. در واقع نتایج نشان می‌دهد که مقدار تغییرات شاخص فرساینده باران با مقدار بارندگی سالانه مرتبط است.

نتایج حاکی از آن است که با توجه به افزایش مقدار بارش و به تبع آن افزایش عامل فرساینده باران، مقدار فرسایش خاک نیز افزایش خواهد یافت (جدول ۵). بیش‌ترین مقدار فرسایش پیش‌بینی شده در دوره‌ی آبی تحت سناریوی RCP 2.6 بوده است که در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۵-۲۰۳۰، مقدار آن ۱۱/۷ تن در هکتار در سال محاسبه گردیده است. لذا، افزایش مقدار فرسایش در دوره آبی در تمام سناریوها محتمل می‌باشد.

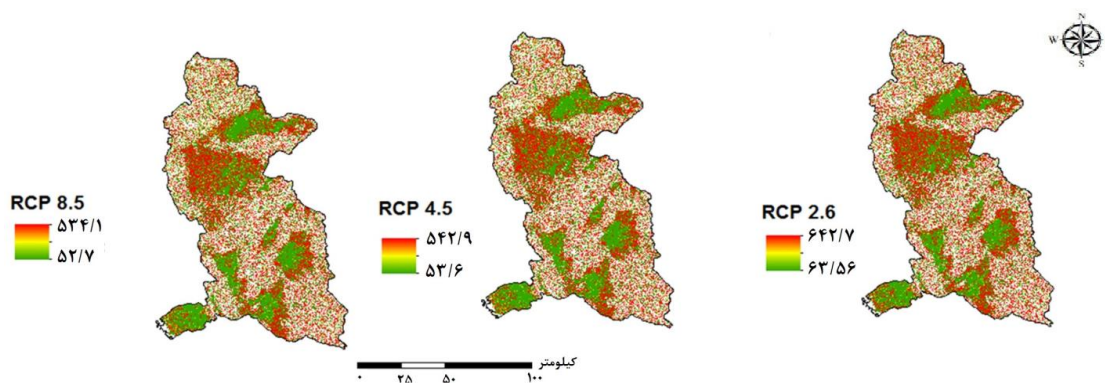
برای تهیه نقشه خطر فرسایش در دوره آینده تمامی متغیرهای ذکر شده در مدل RUSLE-3D به همراه سناریوهای مورد بررسی، مدل گردید و مقدار خطر فرسایش به‌دست آمد.

نقشه پتانسیل فرسایش پیش‌بینی شده (شکل ۸) در تمامی سناریوها نشان دهنده افزایش پتانسیل فرسایش در دوره آینده است. در سناریوی RCP 2.6 خطر فرسایش بیش‌تر از دیگر سناریوها است. نتایج محققین (۱۸، ۴۰، ۳۹، ۱۶ و ۳۸) نیز حاکی از افزایش فرسایش خاک به علت تغییر اقلیم و افزایش عامل R می‌باشد.

جدول ۵. نتایج حاصل از پیش‌بینی مقدار فرسایش ویژه با استفاده از مدل RUSLE-3D

تحت سناریوهای مورد استفاده در دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۳۰)

فرسایش (ton/ha/year)	سناریو	دوره Period
۱۶/۱۰	-	دوره پایه
۱۱/۷	RCP2.6	دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰
۱۱	RCP4.5	
۱۰/۵	RCP8.5	



شکل ۸. نقشه‌ی پتانسیل فرسایش پیش‌بینی شده در دوره‌ی آبی تحت سناریوهای مختلف

آنجائی که در تحقیق فوق، تنها مقدار عامل R در آینده پیش‌بینی شد و دیگر عامل‌ها مانند C که تأثیرپذیر تغییر اقلیم است، پیش‌بینی نشده است، لذا مدل فوق دارای عدم قطعیت است.

نتایج نشان داد که در دوره آتی در همه سناریوهای RCP مقدار فرسایش به علت افزایش عامل R و افزایش بارندگی افزایش خواهد یافت. بطوری‌که، مقدار فرسایش در دوره پایه ۱۰/۱۶ تن در هکتار در سال برآورد گردید، که با سناریوی RCP2.6 به مقدار ۱۵٪، سناریوی RCP4.5 به ۱۰٪ و سناریوی RCP8.5 به مقدار ۳٪ افزایش خواهد یافت. افزایش مقدار بارش موجب افزایش عامل فرسایش‌دهی باران شده و در نتیجه افزایش آن، موجب افزایش نرخ فرسایش می‌شود.

ارزیابی و حال و پیش‌بینی فرسایش خاک در آینده در حوزه آبخیز سد استقلال، اطلاعات مفیدی را برای حفظ محیط‌زیست و حفاظت خاک ارائه می‌نماید. همچنین پیشنهاد می‌شود، دیگر عامل‌های مؤثر بر فرسایش خاک، مانند کاربری اراضی و ارزیابی اثرات آن در آینده بر فرسایش خاک، مورد بررسی و پیش‌بینی قرار گیرد.

نتایج حاصل از بررسی عامل فرسایش‌دهی در آینده نشان‌دهنده افزایش مقدار بارش از ۱۴۶/۷ به ۲۰۰/۱ میلی‌متر در سناریوی RCP2.6، ۱۷۲/۵ میلی‌متر در سناریوی RCP4.5 و ۱۳۴/۱۴ در RCP8.5 میلی‌متر در دوره آتی خواهد رسید که با توجه به افزایش مقدار بارندگی، مقدار عامل فرسایش‌دهی باران نیز از $37/27 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ به $28/78 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ در سناریوی RCP2.6، $33/81$ در سناریوی RCP4.5 و $31/92$ در سناریوی RCP8.5 و افزایش خواهد یافت.

طبق یک اصل کلی، با افزایش ارتفاع مقدار بارش و به تبع آن عامل R افزایش می‌یابد (۱، ۲، ۱۸ و ۱۶)، در این تحقیق به دلیل عدم تبعیت تغییر بارش از تغییر ارتفاع، با افزایش ارتفاع مقدار عامل R کاهش یافته است که با یافته‌های محققانی چون (۵، ۳۱، ۷) همسو است.

نتایج حاصل از تلفیق عامل‌های مؤثر در فرسایش نشان داد که بیش‌ترین ارتباط فرسایش خاک با عامل مدیریت پوشش گیاهی می‌باشد، به طوری که در مناطقی که پوشش گیاهی دارای تراکم کم و فقیر بوده به همان نسبت دارای بیش‌ترین مقدار C و خطر فرسایش بیش‌تر بوده است. از

References

1. Amanambu, A. C., Li, L., Egbinola, C. N., Obarein, O. A., Mupenzi, C., & Chen, D. (2019). Spatio-temporal variation in rainfall-runoff erosivity due to climate change in the Lower Niger Basin, West Africa. *Catena*, 172, 324-334.
2. Asadi, H., Jafari, M., Ashrafzadeh, A., & Sharifi, A. (2018). Forecasting the effect of climate change on soil erosion hazard in Navrood watershed. *Water and Soil Conservation*, 25(2), 235-250 (in Farsi).
3. Azimi Sardari, M. R., Bazrafshan, O., Panagopoulos, T., & Sardooi, E. R. (2019). Modeling the Impact of Climate Change and Land Use Change Scenarios on Soil Erosion at the Minab Dam Watershed. *Sustainability*, 11(12), 3353.
4. Babaei, M., Hosseini, S., Nazari Samani, A., Almodaresi, S. (2016). Assessment of soil erosion using RUSLE 3D, case study: Kan Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(2), 165-181 (in Farsi).
5. Biswas, S. S., & Pani, P. (2015). Estimation of soil erosion using RUSLE and GIS techniques: a case study of Barakar River basin, Jharkhand, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(4), 42.
6. Erfanian, M., Ghaharrahmani Saatloo, P., & Saadat, H. (2015). Assessment of soil erosion risk using a fuzzy model in Gharnaveh Watershed, Golestan. *Water and Soil Conservation*, 21(6), 135-154 (in Farsi).
7. Fang, G., Yuan, T., Zhang, Y., Wen, X., & Lin, R. (2019). Integrated study on soil erosion using RUSLE and GIS in Yangtze River Basin of Jiangsu Province (China). *Geosciences*, 12(5), 173.

8. IPCC, (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
9. Jetten, V., Govers, G., & Hessel, R. (2003). Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes*, 17(5), 887-900.
10. Klike, A. & Eitzinger J. (2010). Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. *Agriculture Science*, 148, 529-541.
11. Lelieveld, J., Hadjinicolaou, P., Kostopoulou, E., Chenoweth, J., El Maayar, M., Giannakopoulos, C., & Xoplaki, E. (2012). Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Climatic Change*, 114 (3-4), 667-687.
12. Litschert, S. E., Theobald, D. M., & Brown, T. C. (2014). Effects of climate change and wildfire on soil loss in the Southern Rockies Ecoregion. *Catena*, 118, 206-219.
13. Mendoza, M. E., Granados, E. L., Geneletti, D., Pírez-Salicrup, D. R., & Salinas, V. (2011). Analysing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975–2003). *Applied Geography*, 31(1), 237-250.
14. Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., & Iverson, L. R. (1996). Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Geographical Information Systems*, 10(5), 629-641.
15. Mukundan, R., Pradhanang, S. M., Schneiderman, E. M., Pierson, D. C., Anandhi, A., Zion, M. S. & Steenhuis, T. S. (2013). Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. *Geomorphology*, 183(1), 110-119.
16. Mullan, D., Favis-Mortlock, D., & Fealy, R. (2012). Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 18-30.
17. Nahal Tahmasebi, M. (2008). Investigating the pollution of surface water resources in the Esteghlal Minab basin. The Report of Hormozgan Regional Water Organization, Bandar Abbas.
18. Nearing, M. A. (2001). Potential changes in rainfall erosivity in the US with climate change during the 21st century. *Soil and Water Conservation*, 56(3), 229-232.
19. Nearing, M.A., Pruski, F.F., & Oneal, M.R. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Soil and Water Conservation*, 59(1), 43–50.
20. Nohegar A, Torabi B, Holisaz A, & Biniyaz M. (2013). Soil Erosion Model Implication (Case Study: Minab Basin). *Environmental Erosion Research*, 3(2), 53-64.
21. Ouyang, D. and Bartholic J. (2001). Web-based GIS application for soil erosion prediction. Proceedings of an international Symposium-Soil Erosion Research for the 21st Century Honolulu, HI. 3-5.
22. Paroissein, J., Darboux, F., Couturier A., Devillers, B., Mouillot, F., Raclot, D., & Le Bissonnais, L. (2015). A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Environmental Management*, 150, 57–68.
23. Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., & Geetha, N. (2013). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 209-215.
24. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder, D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*, 703, 30-33.
25. Segura, C., Sun, G., McNulty, S., & Zhang, Y. (2014). Potential impacts of climate change on soil erosion vulnerability across the conterminous United States. *Soil and Water Conservation*, 69(2), 171-181.

26. Shiono, T., Ogawa, S., Miyamoto, T., & Kameyama, K. (2013). Expected impacts of climate change on rainfall erosivity of farmlands in Japan. *Ecological engineering*, 61, 678-689.
27. Sigdel, M., & Ma, Y. (2016). Evaluation of future precipitation scenario using statistical downscaling model over humid, subhumid, and arid region of Nepal—a case study. *Theoretical and applied climatology*, 123(3-4), 453-460.
28. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K.B, Tignor M, & Miller, H.L. (Eds.), Climate Change. (2007). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom.
29. Tang, Q., Xu, Y., Bennett, S. J., & Li, Y. (2015). Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 73(4), 1715-1724.
30. Tavangar, S.H., Moradi, H., Masha-Bavani, A., & Azari, M. (2017). Forecasting climate change impact on rainfall erosivity factor in the southern coast of Caspian Sea. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 414-424 (in Farsi).
31. Teimouri, F., Bazrafshan, O., & Rafiei Sardoei, E. (2019). Assessment of Climate Change and Land Use Change on Soil Erosion (Case study: Kondaran watershed). *Ecohydrology*, 6(2), 353-368 (in Farsi).
32. Teng, H., Liang, Z., Chen, S., Liu, Y., Rossel, R. A. V., Chappell, A. ... & Shi, Z. (2018). Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models. *Science of the Total Environment*, 635, 673-686.
33. Tukimat, N. N. A., Othman, A. S., Ahmad, S. W., & Muthusamy, K. (2018). Evaluation of Climate Variability Performances using Statistical Climate Models. *Sains Malaysiana*, 47(1), 77-84.
34. USDA, (1972). Hydrology in SCS National Engineering Handbook, Section 4; US Department of Agriculture: Washington, DC, US.
35. Vaezi, A. R., Bahrami, H. A., Sadeghi, S. H. R., & Mahdian, M.H. (2010). Estimation of erodibility factor (K) using the RUSLE model in some soils of the semi-arid regions in northwest of Iran. *Water and Soil Conservation*, 17(3), 105-124 (in Farsi).
36. Walker, D. J., & Young, D. L. (1986). Assessing soil erosion productivity damage. *Soil Conservation: Assessing the National Resources Inventory*, 2, 21-62.
37. Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion. Losses: a guide to conservation planning, Agriculture Handbook, Vol. 537. US Department of Agriculture, Washington.
38. Zare, M., Samani, A. A. N., Mohammady, M., Teimurian, T., & Bazrafshan, J. (2016). Simulation of soil erosion under the influence of climate change scenarios. *Environmental Earth Sciences*, 75(21), 1405.
39. Zhang, X.C., Liu, W.Z., & Zheng, F.L. (2009). Simulating site-specific impacts of climate change on soil erosion and surface hydrology in southern Loess Plateau of China. *Catena*, 79, 237-242.
40. Zhang, Y. G., Nearing, M. A., Zhang, X. C., Xie, Y., & Wei, H. (2010). Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China. *Hydrology*, 384(1-2), 97-106.
41. Zhang, Y., Tan, Y. W., Stormer, H. L., & Kim, P. (2005). Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene. *Nature*, 438(7065), 201.
42. Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T. & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75, 319-325.

Current and Future Assessment of Soil Erosion in Minab Esteglal Dam Watershed Using RUSLE 3D and Climate Change Scenarios

M. R. Azimi Sardari ¹, O. Bazrafshan ^{*2}, T. Panagopoulos ³, E. Rafiei Sardooi ⁴

1. Ph.D Candidate, Science and Watershed Management Engineering, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran.
 2. Associate Professor, Science and Watershed Management Engineering, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran.
 3. Research Center for Spatial and Organizational Dynamics (CIEO), University of Algarve, Gambelas Campus, 8005 Faro, Portugal.
 4. Assistant Professor, Faculty of Natural resources engineering, Department of Natural science, University of Jiroft, Jiroft, Iran.``
- * Corresponding Author: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

Received date: 02/06/2019

Accepted date: 25/11/2019

Abstract

The purpose of this study was to evaluate soil erosion in the present period and to predict soil erosion potential under the impact of climate change over time horizon of 2030. Daily rainfall data and NCEP data during 1985-2015 were used. The future climate was projected using the second generation earth system model (CanESM2) and downscaled using the SDSM model under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios. Rainfall erosivity (R-factor) was estimated for different scenarios and soil erosion were simulated using RUSLE 3D. Results showed that rainfall increases from 146.7 to 178.61 mm in the future and R-factor increases from 28.7 to 34.33 MJ mm ha⁻¹ y⁻¹, respectively. However, due to increasing rainfall intensity in all scenarios and stations, the amount of rainfall erosivity in the future is more than the baseline period. The amount of soil erosion is estimated 10.16 ton ha⁻¹ y⁻¹ at baseline period. Considering the constant assumption of other variables in the RUSLE 3D model and the increase in future rainfall erosivity, the erosion rate under RCP2.6 scenarios increased to 15%, RCP4.5 to 10% and RCP8.5 to 3%, respectively.. Accordingly, the increase of rainfall increases the rainfall erosivity factor and consequently increases the erosion rate. Therefore, assessing the present and predicting future soil erosion in the Minab Esteglal dam watershed, provides useful information for environmental and soil conservation.

Keywords: Soil erosion; Downscaling; Erosion modeling; Rainfall prediction