ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر فرسایش و هدررفت خاک حوضه آبخیز میناب

فرزانه میرزاده‌کوهشاهی: *دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد آب‌وهواشناسی، گروه علوم جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس*
محمد اکبریان*: *استادیار گروه علوم جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس*
اسداله خورانی: *دانشیار گروه علوم جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۵)

چکیده

تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های حوضه‌های آبخیز تأثیراتی به‌جا می‌گذارد که به‌نوبهٔ خود به تغییر در فرسایش و رسوب حوضه منجر می‌شود. این پژوهش با تأکید بر نقش عامل فرسایندگی باران، با استفاده از داده‌های ایستگاهی بارش، داده‌های خروجی دو مدل BCC-CSM2-MR و CanESM5، گزارش پنجم، سناریوهای ۲/۶، ۴/۵، ۸/۵ و مدل RUSLE به برآورد و پیش‌یابی تغییرات فرسایش خاک در حوضه آبخیز میناب پرداخته شد. عوامل مدل RUSLE محاسبه و مدل برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ اجرا شد. در مرحلهٔ بعد برای تعیین اثر تغییر اقلیم بر فرسایندگی بارش، از مدل‌های اقلیمی استفاده شد. برای ارزیابی مدل‌های اقلیمی نیز نتایج پیش‌یابی مدل‌ها در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ استخراج شد، سپس با استفاده از داده‌های واقعی و معیارهای RMSE و MAE به ارزیابی خطای مدل‌ها و سناریوها پرداخته شد. نتایج نشان داد که میانگین لایه فرسایندگی باران از ۴۱/۵۷ در سال ۲۰۱۰ به ۵۲/۰۱ در سال ۲۰۲۰ افزایش داشت. خروجی دو مدل BCC-CSM2-MR و CanESM5 نیز از افزایش میزان فرسایندگی بارش در سال ۲۰۴۰ حکایت داشت. میانگین فرسایش در سال ۲۰۱۰، ۱۳/۸ تن بر هکتار در سال بود که در سال ۲۰۲۰ با ۲۳ درصد افزایش به ۱۷/۰ تن بر هکتار در سال افزایش یافت و پیش‌یابی شد که در سال ۲۰۴۰ با ۲۵ درصد افزایش نسبت به ۲۰۱۰، به ۱۷/۳ تن بر هکتار در سال افزایش خواهد یافت. بر طبق نتایج، در آیندهٔ نزدیک (۲۰۴۰) فرسایش در بخش‌های شمالی و کوهستانی حوضه آبخیز میناب افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد دو عامل LS و R، مهم‌ترین عوامل مدل RUSLE است که بر تغییرات مکانی ـــ زمانی فرسایش در این حوضه مؤثر می‌باشد. LS متأثر از ویژگی‌های شیب حوضه از جنوب به شمال افزایش خواهد یافت، ولی فاقد تغییرات زمانی خواهد بود. R نیز متأثر از تغییر اقلیم، در سال ۲۰۴۰ نسبت به دورهٔ قبل افزایش خواهد داشت و به افزایش فرسایش در سال ۲۰۴۰ منجر خواهد شد.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، حوضهٔ میناب، پیش‌یابی فرسایش، مخاطرات اقلیمی، RUSLE.

* نویسندهٔ مسئول: M.akbarian@hormozgan.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

۱ـ مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دههٔ اخیر، به برهم خوردن تعادل اقلیمی کرهٔ زمین و تغییرات اقلیمی منجر شده‌است (Aalst, 2006). تغییر اقلیم و افزایش شرایط حدی نیز موجب این بحران می‌شود (Helmer & Hilhorst, 2006) و افزایش سیل و طوفان‌های حاره‌ای را در پی دارد (Haghtalab et al, 2013). از دیگر پیامدهای تغییر اقلیم، تغییرات فرسایش و هدررفت خاک است (Akbarian and Khoorani, 2022). عوامل مختلفی نظیر ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی، خاک، بارش، کاربری زمین و پوشش گیاهی، بر فرسایش یک حوضه اثر می‌گذارد. برخی از این عوامل نظیر عوامل اقلیمی، کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی نیز در میزان فرسایش نقشی کلیدی دارد و می‌تواند تغییرات شدیدی را در هدررفت خاک و فرسایش ایجاد کند (Colman et al, 2019 & Xu et al, 2018 & Routschek et al, 2014). برخی از آنها تقریباً ثابت است و تغییرات زمانی ندارد و برخی دیگر، با زمان تغییر می‌کند. عوامل اقلیمی جزء عواملی است که با گذر زمان دچار تغییر می‌شود (Chuenchum et al, 2020 & Teng et al, 2018). ازدیاد فعالیت‌های صنعتی و افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای، به از بین رفتن تعادل اقلیمی و تغییر اقلیم منجر می‌شود (IPCC, 2007) که به نوبهٔ خود بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز مانند تغییر در اندازه، شدت و نوع بارش، افزایش یا کاهش خشک‌سالی، تغییر کیفیت آب رودخانه‌ها و در نهایت حمل رسوب و هدررفت خاک تأثیرات زیادی دارد (Lane et al, 1999). از آنجایی‌که تلفات سالانهٔ خاک زراعی در جهان، حدود ۷۵ میلیارد تن (FAO, 2017) و برای ایران بیش از پنج میلیارد تن است (Samani et al, 2009)، تغییر اقلیم و به تبع آن تغییرات میزان فرسایش خاک به چالش زیست محیطی بزرگی در ایران و جهان تبدیل شده‌است.

تغییر اقلیم و به تبع آن تغییرات بارش، از جنبه‌های مختلفی نظیر تغییر در مقدار، شدت ـــ مدت و پراکنش بارندگی بر فرسایش و هدررفت خاک تأثیر دارد (Gabris et al, 2003). انتظار می‌رود در اثر تغییر اقلیم، قدرت فرسایندگی باران افزایش یابد (Sun et al, 2002). بارش نیز افزایش و کاهش پوشش گیاهی را در پی خواهد داشت و بارش‌های بهاری و تابستانه معمولاً با افزایش تاج‌پوشش گیاهی، میزان فرسایش خاک را کاهش می‌دهد (Gabris et al, 2003). زمانی که بارش از حدی زیادتر شود، به دلیل ابرناکی، مقدار تابش کم می‌شود و با تأثیر معکوس بر رشد گیاه، از پوشش گیاهی کاسته و به افزایش فرسایش خاک منجر می‌شود (Wang et al, 2016). الگوی مکانی بارش نیز حالت‌های مختلفی را در فرسایش خاک به وجود می‌آورد. با افزایش بارندگی، رطوبت خاک در ارتفاعات نسبت به مناطق پست سریع‌تر افزایش می‌یابد، در نتیجه میزان نفوذ به سرعت کم می‌شود و رواناب و هدررفت خاک افزایش می‌یابد (Nearing et al, 2004). برای پیش‌یابی اثرات تغییر اقلیم بر قدرت فرسایندگی باران، لازم است به پیش‌یابی بارش با مدل‌های اقلیمی و برآورد قدرت فرسایندگی باران با مدل‌های برآورد فرسایش مناسب این کار پرداخته شود.

مدل‌های اقلیمی (GCMs)، برای اهداف مدل‌سازی هیدرولوژیکی وضوح کافی ندارد؛ بنابراین، ریزمقیاس کردن خروجی‌های آنها امری لازم به نظر می‌رسد. بسیاری از مطالعات نشان داده‌است که استفاده از روش آماری علاوه بر سادگی، کارایی مناسبی در مقیاس روزانه دارد (Sigdel and Ma, 2016). برای تخمین فرسایش نیز مدل‌های زیادی وجود دارد. مدل جهانی اصلاح شدهٔ هدررفت خاک (RUSLE)، برای پیش‌بینی فرسایش خاک با در نظر گرفتن داده های بارندگی، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش زمین، توپوگرافی و سرعت جریان کاربرد دارد. از آنجایی‌که در این

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

مدل، بارش یکی از عوامل اصلی است، محققان زیادی از آن برای انعکاس نقش تغییرات آب‌وهوایی بر تغییرات فرسایش استفاده کرده‌اند. Marcinkowski و همکاران (2022) با استفاده از مدل RUSLE و دو سناریوی اقلیمی RCP 4. 5 و RCP 8.5، به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر فرسایش برای دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ در لهستان پرداختند. به گفتهٔ Galdies و همکاران (2022)، استفاده از رویکرد RUSLE-GIS می‌تواند با انعکاس تغییرات آب و هوایی به فاکتور R بر اساس آخرین پیش‌بینی‌های اقلیمی فاز ششم CMIP6، به برآورد میزان فرسایش سالانهٔ فعلی و آیندهٔ خاک در حوضه‌های آبخیز بپردازد. Chuenchum و همکاران (2020) نیز از طریق مدل RUSLE، به ارزیابی فرسایش سالانهٔ خاک حوضهٔ Lancang-Mekong چین از نظر توزیع مکانی و رابطهٔ روند رسوب‌دهی با تغییرات اقلیمی و زمین در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ پرداختند. همچنین Rani و همکاران (2019) و Talchabhadel و همکاران (2019) به برآورد اثرات تغییر آب و هوا بر عامل فرسایندگی بارش (عامل R) پرداختند و بر نقش تغییرات اقلیمی بر هدررفت خاک تأکید کردند. Segura و همکاران (2014)، تغییرات R را از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۹۰ در سراسر ایالات متحده تحت نه شرایط آب و هوایی و سه سناریو (A2، A1B، و B1) از گزارش چهارم ارزیابی کردند و به شناسایی حوضه‌هایی پرداختند که از نظر پتانسیل فرسایش خاک در برابر تغییرات آب و هوایی آینده آسیب پذیرترند. Azimi sardari و همکاران (2020) نیز با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی SDSM- DC، آیندهٔ تغییر اقلیم را در حوضهٔ میناب شبیه‌سازی و به کمک مدل RUSLE-3D، پتانسیل فرسایشی دو دههٔ آیندهٔ حوضه را پیش‌یابی کردند.

پژوهشگران علاوه بر مدل RUSLE، به تلفیق سناریوهای اقلیمی با مدل‌های فرسایشی دیگر نیز پرداخته‌اند. Anache و همکاران (2018)، رواناب و تلفات خاک حوضهٔ Cerrado را به کمک مدل WEPP و سناریوهای اقلیمی مختلف برای سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ پیش‌یابی کردند. Berberoglu و همکاران (2020) با استفاده از مدل (PESERA) و ۱۲۸ متغیر ورودی، به مدل‌سازی خطر فرسایش خاک تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ترکیه پرداختند. از دیگر محققانی که بر تلفیق مدل‌های فرسایشی و سناریوهای اقلیمی کار کردند، می‌توان به Zhang و همکاران (2005)، Zhang و همکاران (2009) و Li و همکاران (2011) اشاره کرد که از مدل فرسایشی WEPP در چین استفاده کردند. Wang و همکاران (2018) نیز از مدل فرسایش خاک (VIC-WEPP) در تلفیق با سه سناریوی تغییر اقلیم (A2، A1B و B1) از مدل‌های اقلیمی (GFDL، PCM و HadCM3)، برای منطقهٔ دریاچه‌های بزرگ امریکای شمالی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ استفاده کردند. Stefanidis و همکاران (2018) نیز به ارزیابی تغییرات فرسایش خاک در حوضه آبریز کوهستانی رودخانهٔ Portaikos در یونان مرکزی، تحت تغییرات آب و هوایی با استفاده از مدل آب و هوایی RegCM3 و مدل فرسایشی EPM پرداختند.

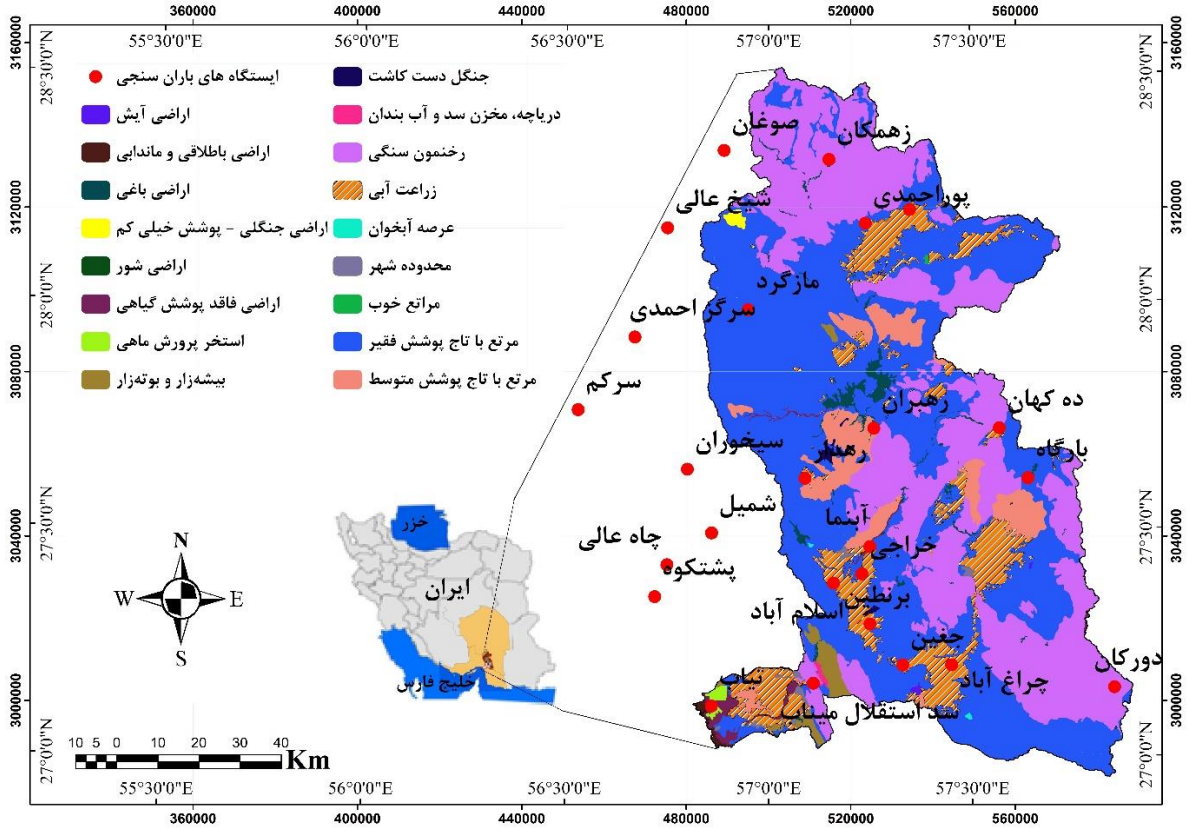
با توجه به مطالب گفته شده، استفاده از مدل‌های مختلف برای برآورد تخمین فرسایش در حوضه‌هایی که با کمبود داده و آمار مواجه است، اهمیت زیادی دارد و به نظر اغلب محققان ذکر شده، مدل جهانی اصلاح شدهٔ هدر رفت خاک (RUSLE) این توانایی را دارد که تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر میزان فرسایش را به خوبی ارزیابی کند. منطقهٔ مورد مطالعه در این تحقیق، حوضه آبخیز میناب است که از جهات گوناگون اقتصادی و اجتماعی به ویژه تأمین آب شرب بندرعباس در استان هرمزگان اهمیت زیادی دارد. استفاده از داده‌های پایگاه WordClime با روش ریزمقیاس‌سازی متفاوت، استفاده از دو مدل BCC-CSM2-MR و CanESM5 در سه سناریوی ۲/۶، ۴/۵، ۸/۵ و

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

پیش‌یابی تا سال ۲۰۴۰، از نوآوری‌های این پژوهش است. در این پژوهش سعی شده‌است با بررسی اقلیم در دوره‌های گذشته، حال و آینده، میزان تغییرات فرسایش در این دوره‌ها مشخص شود تا این اطلاعات برای برنامه‌ریزی بهتر در اختیار تصمیم‌گیران و مدیران قرار گیرد.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

حوضه آبریز میناب در محدودهٔ عرض‌های ´۴۸ °۵۶ تا ´۵۹ °۵۷ شرقی و °۲۷ تا ´۳۲ °۲۸ عرض شمالی واقع شده‌است (شکل ۱). این حوضه، یکی از زیرحوضه‌های بندرعباس ــ سدیج است که در شمال شرق استان هرمزگان و قسمت‌های شمالی آن در استان کرمان قرار دارد. پایین‌ترین نقطهٔ حوضه دارای ارتفاع مساوی سطح آب‌های آزاد (صفر) است و مرتفع‌ترین نقطهٔ آن بر اساس لایه رقومی SRTM، ۲۸۱۱ متر ارتفاع دارد. مساحت حوضه نیز ۱۰۶۱۳ کیلومتر مربع است. از نظر ژئومورفولوژی ساختمانی، این حوضه در هر سه واحد مکران، زاگرس و سنندج ـــــ سیرجان قرارگرفته‌است. رودخانهٔ میناب ــ که حاصل اتصال رودخانه‌های جغین و رودان است ــ مهم‌ترین رودخانهٔ این حوضه است که با احداث سد میناب، از منابع آبی آن برای تأمین آب شرب بندرعباس استفاده می‌شود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضهٔ میناب، کاربری اراضی و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

۳ـ مواد و روش

۳ـ۱ـ داده‌ها و مراحل اجرای پژوهش

در این پژوهش از داده‌های ماهانهٔ ایستگاه‌های هواشناسی (شکل ۱)، داده‌های بارش مستخرج از مدل‌ها و سناریوهای مختلف اقلیمی، داده‌های خاک و تصاویر ماهواره‌ای به شرح جدول ۱ استفاده شد. داده‌های اقلیمی در دوره‌های زمانی مختلف (دورهٔ پایه ۲۰۰۲- ۲۰۲۰ و دورهٔ آینده ۲۰۲۰- ۲۰۵۰) است.

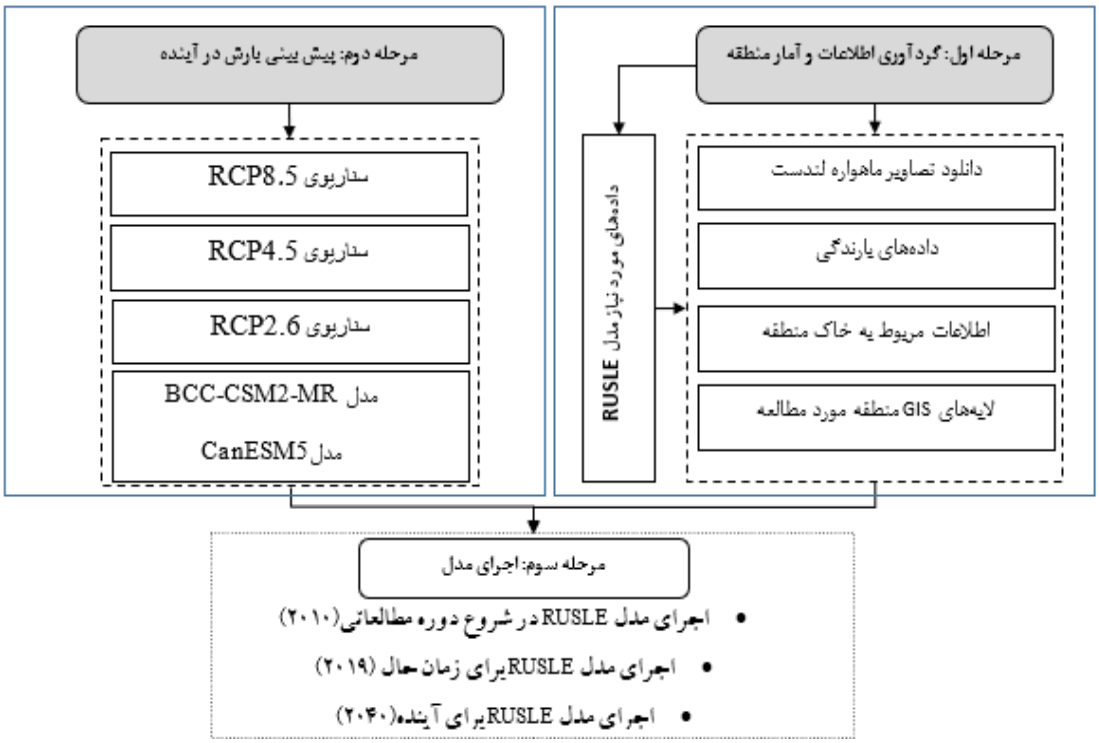
جدول ۱: داده‌های مورد استفاده در پژوهش

داده	رزولیشن / ماهیت	کاربرد	منابع داده‌ها
بارش ماهانهٔ ایستگاه‌های هواشناسی	نقطه‌ای	لایه R	سازمان هواشناسی کشور
بارش ماهانهٔ مدل‌های اقلیمی	۲۵×۲۵ کیلومتر	لایه R	gisweb.ciat.cgiar.org
بافت خاک	نقطه‌ای	عامل P	داده‌های بافت خاک (جهادکشاورزی هرمزگان) و نقشهٔ واحدهای اراضی (نویسندگان)
لایهٔ رقومی SRTM	۳۰ متر	لایه LS	earthexplorer.usgs.gov
تصاویر ماهوارهٔ لندست	۳۰ متر	عامل C	

در شکل ۲، نمودار جریانی تحقیق آورده شده‌است. در این پژوهش، مدل RUSLE در سه دورهٔ زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰، ۲۰۱۰-۲۰۲۰ و سال ۲۰۴۰ اجرا شد تا تغییرات فرسایش حوضهٔ میناب مشخص شود. در ابتدا شاخص‌های K، LS، C و P در این حوضه محاسبه شد. در ادامه برای محاسبهٔ شاخص R، از داده‌های بارندگی ماهانه در هر سال استفاده شد. برای سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۰ و ۲۰۱۰-۲۰۲۰ از داده‌های بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی داخل و اطراف حوضه (شکل ۲) و وبسایت‌های مختلف اخذ داده مانند www.worldclim.org استفاده شد. برای سال ۲۰۴۰، از مدل‌های تغییر اقلیم BCC-CSM2-MR و CanESM5 بر اساس گزارش پنجم، در سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ استفاده شد.

داده‌ها و پیش‌یابی‌های این دو مدل در سایت www.worldclim.org برای کل جهان قابل دسترس است. این پایگاه، خروجی مدل‌های اقلیمی را به روش تصحیح اریبی و با استفاده از نرم‌افزار WordClime V2.1، ریزمقیاس کرد و در اختیار کابران قرار داد. در این پژوهش، داده‌های بارش پیش‌یابی شدهٔ این مدل‌ها در سناریوهای مختلف و با دقت ده دقیقه، برای ماه‌های مختلف سال دریافت شد. فرمت اولیهٔ داده‌ها، Netcdf است. برای تبدیل به رستر نیز از نرم‌افزار arcgis استفاده شد. با در دسترس بودن لایه‌های رستری بارش، فاکتور R برای دوره‌های پیش‌یابی‌شده محاسبه شد. در هر دو مدل از سه سناریو ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ استفاده شد و در مجموع، شش حالت مختلف به‌وجود آمد و شش فاکتور R برای آینده محاسبه شد. در مرحلهٔ بعد با در دسترس بودن شاخص‌های مدل RUSLE، این مدل برای شش حالت داده‌های پیش‌یابی‌شده نیز اجرا شد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]



شکل ۲: نمودار جریانی تحقیق

۳ـ۲ـ مدل RUSLE

معادلهٔ جهانی فرسایش خاک ـــــ که توسط فائو ارائه شده‌است ـــــ روشی معمول در برآورد میزان سالانهٔ فرسایش خاک به شمار می‌رود که عوامل آن به شرح زیر است:

الف ـ عامل فرسایندگی قطرات باران (R)

عامل فرسایندگی باران، قدرت فرسایندگی باران را نشان می‌دهد که تحت‌تأثیر خصوصیات فیزیکی بارش است و به انرژی مستقیم باران، انرژی جنبشی بارندگی و حداکثر شدت بارندگی سی دقیقه‌ای بستگی دارد (ویشمایر و اسمیت ، ۱۹۷۸ به نقل از Omidvar, 2007). به دلیل فقدان دسترسی به داده‌های ساعتی بارش در این پژوهش، عامل R از رابطهٔ (1994) Renard and Freimund و با استفاده از داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه محاسبه شد. رابطهٔ بین بارش و نمایهٔ فورنیه اصلاح شده (F) به صورت زیر است:

رابطهٔ ۱

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} Pi^2}{P}$$

در این رابطه، P_i متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه iام و P متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است. برای برآورد میزان فرسایندگی باران در کل حوضه، ابتدا ۲۸ ایستگاه باران‌سنجی موجود در داخل و اطراف حوضه انتخاب شد و میانگین بارش ماهانه در دو دورهٔ اول یعنی ۲۰۰۰-۲۰۱۰ و ۲۰۱۰-۲۰۱۹ استخراج شد. در مرحلهٔ بعد، فاکتور F با استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه شد. بعد از محاسبهٔ نمایهٔ F از طریق روابط زیر، R برای هر ۲۸ ایستگاه محاسبه شد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

$$R - Factor = \left(0/07397 \times F^{1/847}\right)/17/2 \qquad F < 55MM$$ رابطهٔ ۲

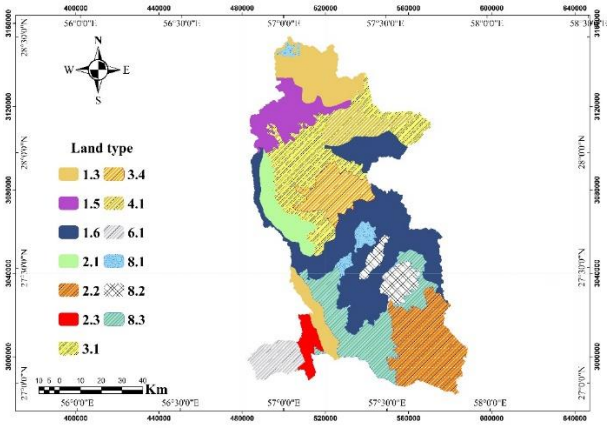
$$R - Factor = (95/77\ - 6/081 \times F + 0/4770 \times F^{2})/17/2 \quad F \geq 55MM$$ رابطهٔ ۳

ب ـ عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

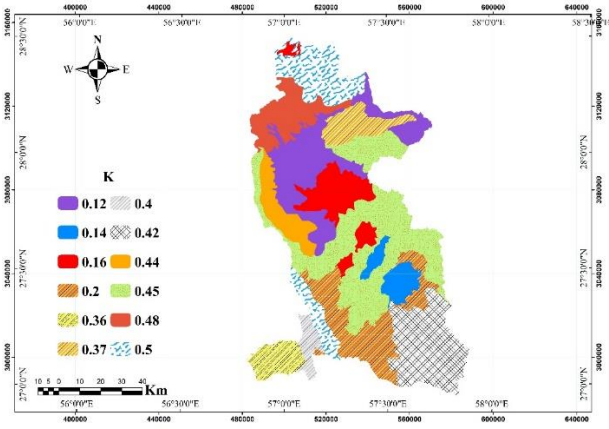
این عامل، سرعت فرسایش‌پذیری خاک در برابر واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات‌های استاندارد اندازه‌گیری می‌شود (Omidvar, 2007). در این پژوهش با مراجعه به پیشینهٔ مطالعات خاک‌شناسی حوضه، اطلاعات بافت خاک پروفیل‌های حفر شده دریافت شد (شکل ۳). سپس با ساخت نقشهٔ مکانی نمونه‌ها، به دلیل تمرکز اطلاعات بافتی در اراضی کشاورزی و نواحی دشتی به تهیهٔ نقشهٔ واحدهای اراضی با استفاده از روش ژئومورفولوژی پرداخته شد (شکل ۴). در مرحلهٔ بعد با توجه به نوع خاک و جنس لیتولوژی هر واحد اراضی، مقدار K به کمک جدول ۲ (Ahmadi, 1998) تعیین شد.

جدول ۲: مقدار K در خاک‌های مختلف (Ahmadi, 1998)

جنس زمین	مقدار K
پوشش سنگی	0.05
اراضی مقاوم در برابر فرسایش	0.1
خاک‌های ماسه‌ای نرم	0.16
خاک‌های ماسه‌ای بسیار نرم	0.42
خاک‌های لومی شنی	0.12
خاک‌های لومی مخلوط با شن بسیار نرم	0.44
خاک‌های سیلت لوم	0.48
خاک‌های لومی رسی	0.37
خاک‌های سیلتی رسی	0.25



شکل ۳: نقشهٔ واحد اراضی



شکل ۴: نقشهٔ K در حوضهٔ مورد مطالعه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

ج- عامل توپوگرافی (LS)

عامل LS در مدل RUSLE، اثر توپوگرافی را بر روی هدررفت خاک نشـــان می‌دهد وبا اســـتفاده از رابطهٔ ۴به دست می‌آید:

رابطهٔ ۴

$$LS = \left[(FlowAccumulation\ grid) \times \frac{Cell\ Size}{22.13}\right]^{0.4} \times \left[\frac{\sin(slope\ grid \times 0.01745)}{0.0896}\right]^{1.3}$$

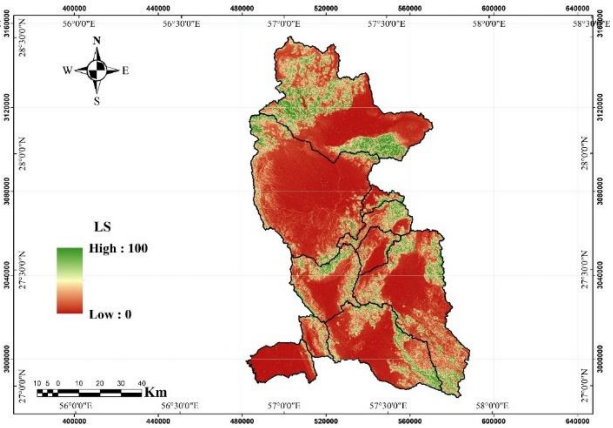
برای تهیهٔ این عامل، ابتدا مدل رقومی ارتفاع به فرمت ASCII درآمد و به نرم‌افزار SAGA GIS وارد شد. در مرحلهٔ بعد، نقشهٔ شیب حوضه تهیه و با دستور LS، شاخص LS تهیه شد (شکل ۵).

د ـ عامل پوشش (C)

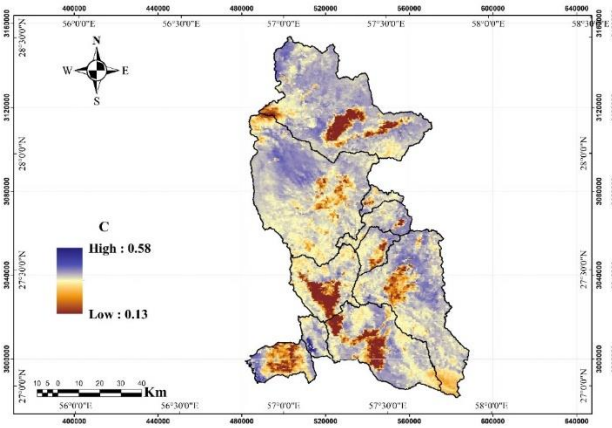
برای تهیهٔ این عامل، ابتدا لایهٔ NDVI مربوط به منطقه از روی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ به‌دست آمد. در مرحلهٔ بعد با استفاده از رابطهٔ ۵ (Prasannakumar et al, 2012)، شاخص پوشش محاسبه شد (شکل ۶).

رابطهٔ ۵

$$C = \left((1 - NDVI)/2\right)$$



شکل ۵: شاخص LS در حوضهٔ میناب

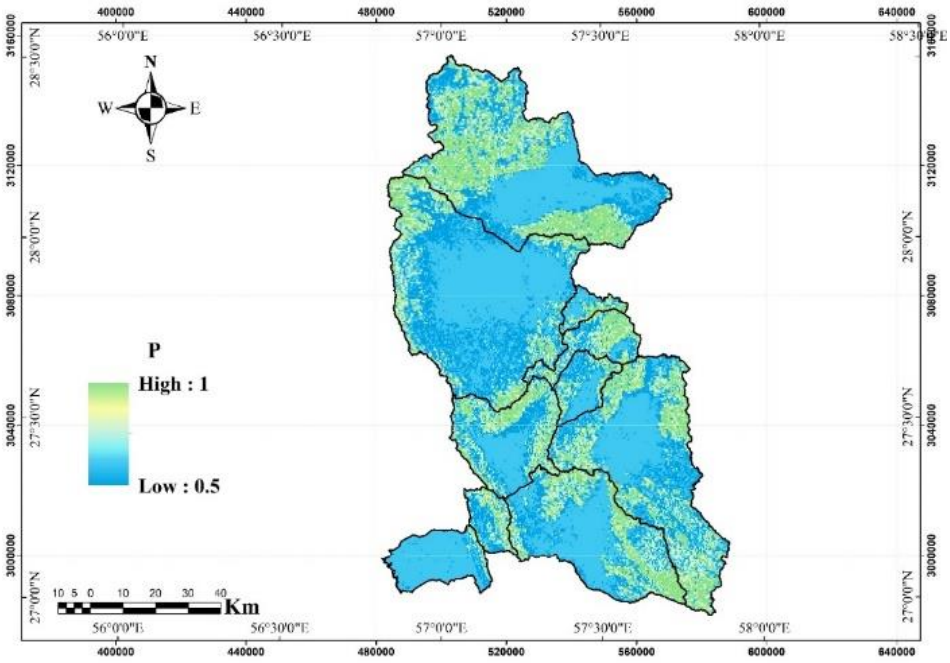


شکل ۶: شاخص C در حوضهٔ میناب

ه ـ شاخص عملیات حفاظتی (P)

در روش RUSLE ، عامل P بیانگر هدررفت خاک در شـــرایط اجرای عملیات حفاظتی نســـبت به هدررفت خاک تحت زراعت شـــخم در جهت شـــیب اســـت. مقادیر عددی این عامل، از صـــفر (عملیات حفاظتی کامل) تا یک (بدون عملیات حفاظتی) متغیر است (Mohammadi et al, 2016). در این مطالعه با استفاده از نقشهٔ شیب حوضه، عامل P از جدول ۳ استخراج شد (شکل ۷).

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]



شکل ۷: شاخص P در حوضهٔ میناب

جدول ۳: مقادیر شاخص P در شیب‌های مختلف

درصد شیب	۱-۲	۳-۵	۶-۸	۹-۱۲	۱۳-۱۶	۱۷-۲۰	۲۱-۲۵
مقدار P	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹

۳-۳- مدل‌های تغییر اقلیم و ارزیابی نتایج آنها

بعد از محاسبهٔ شاخص‌های مدل RUSLE در مرحلهٔ بعد برای تعیین اثر تغییر اقلیم بر فرسایش، از دو مدل تغییر اقلیم BCC-CSM2-MR و CanESM5 بر اساس گزارش پنجم، در سناریوهای ۲.۶، ۴.۵ و ۸.۵ استفاده شد. برای ارزیابی مدل‌های تغییر اقلیم در این پژوهش، ابتدا نتایج پیش‌یابی مدل‌ها در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ استخراج شد. داده‌های واقعی نیز از منابع مختلف مانند داده‌های سازمان هواشناسی و آب منطقه‌ای و وبسایت www.ncei.noaa.gov استخراج شد. سپس با استفاده از معیارهای زیر، خطای مدل‌ها و سناریوهای مختلف ارزیابی شد.

رابطهٔ ۶

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n}(Z_i - Z)^2}$$

رابطهٔ ۷

$$\boldsymbol{MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{12}|Z_i - Z|}$$

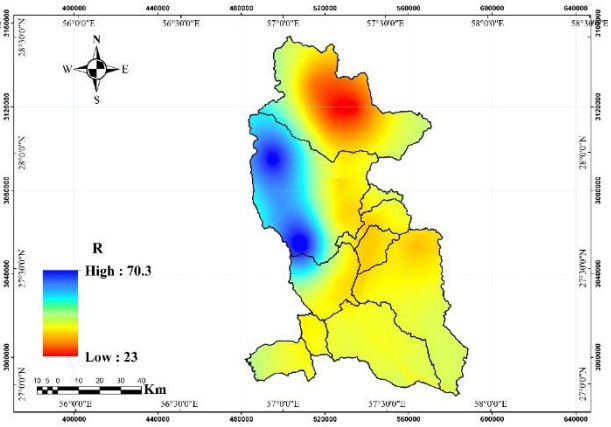
Z مقدار پیش‌یابی شده، Z_i میزان اندازه‌گیری شده در ماه i (i= 1,….,n) و m تعداد ماه‌های انتخاب شدهٔ مساوی دوازده است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

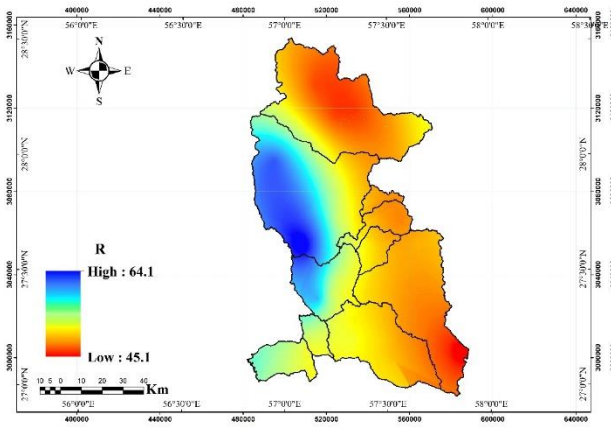
۴ـ یافته‌ها (نتایج)

۴ـ۱ـ نتایج اجرای مدل RUSLE در دو دورهٔ ۲۰۰۰-۲۰۱۰ و ۲۰۱۰-۲۰۱۹

نتایج محاسبهٔ لایهٔ فرسایندگی باران (R) در دو دورهٔ ۲۰۰۰-۲۰۰۹ و ۲۰۱۰-۲۰۱۹، در شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۴ آورده شده‌است. مقدار میانگین شاخص فرسایندگی بارش در دورهٔ اول، از ۴۱/۶ به مقدار ۵۲/۰ در دورهٔ دوم رسید که بیانگر افزایش تأثیر این عامل است.



شکل ۸: لایهٔ فرسایندگی باران در دورهٔ ۲۰۰۰-۲۰۱۰

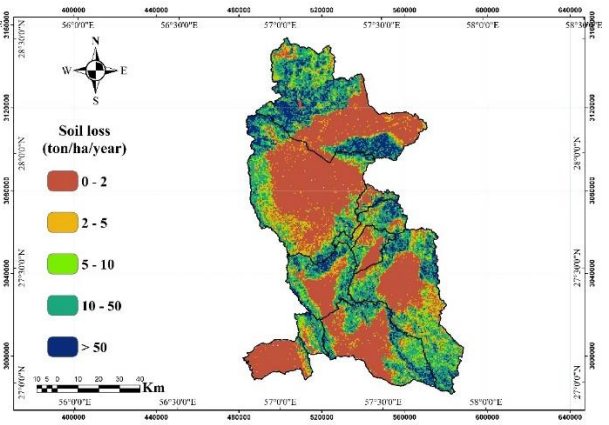


شکل ۹: لایهٔ فرسایندگی باران در دورهٔ ۲۰۱۰-۲۰۱۹

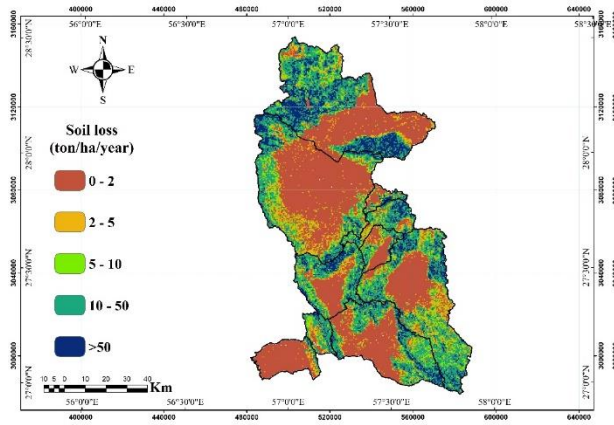
جدول ۴: پارامترهای آماری لایه‌های فرسایندگی بارش در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰

دوره آماری	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
۲۰۰۰-۲۰۱۰	۲۳/۰۶	۷۰/۳۱	۴۱/۵۷	۸/۳۲
۲۰۱۰-۲۰۲۰	۴۵/۱۰	۶۴/۱۰	۵۲/۰۱	۴/۳۲

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نتایج اجرای مدل RUSLE را به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ و جدول ۵، مقادیر کمی آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: فرسایش حوضهٔ میناب در دورهٔ ۲۰۰۰-۲۰۱۰

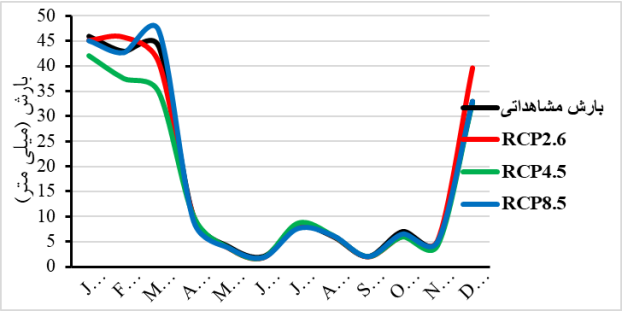


شکل ۱۱: فرسایش حوضهٔ میناب در دورهٔ ۲۰۱۰-۲۰۱۹

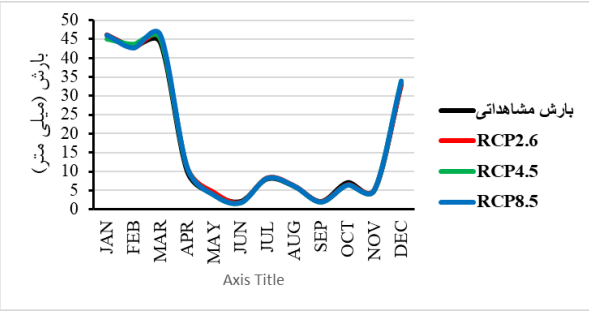
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

۴-۲- نتایج پیش‌یابی بارش و عامل فرسایندگی آن (R)

اشکال ۱۲ و ۱۳، مقایسهٔ بین پیش‌یابی مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی مورد استفاده را با داده‌های مشاهداتی (میانگین بارش ماهانه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ در ایستگاه سینوپتیک میناب) نشان می‌دهد. اختلاف چندانی بین نتایج پیش‌یابی مدل BCC-CSM2-MR و مقدار مشاهداتی وجود ندارد؛ بنابراین، می‌توان گفت مدل در سناریوهای مختلف عملکرد خوبی داشته‌است. از بین سناریوهای مورد استفاده، سناریوی ۸/۵ کمترین خطا را دارد و در انتها سناریو ۴/۵ قرار می‌گیرد (جدول ۵). در مورد مدل CanESM5 نیز اختلاف زیادی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌یابی شده وجود ندارد؛ هر چند برای سال‌های دورتر مانند ۲۰۴۰ اختلاف بیشتر می‌شود، نتایج سناریوهای مختلف نیز تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد (جدول ۵).



شکل ۱۲: مقایسهٔ نتایج مدل BCC-CSM2-MR و مقادیر مشاهداتی



شکل ۱۳: مقایسهٔ نتایج مدل CanESM5 و مقادیر مشاهداتی

جدول ۵: آماره‌های خطا در مدل‌های تغییر اقلیم استفاده شده

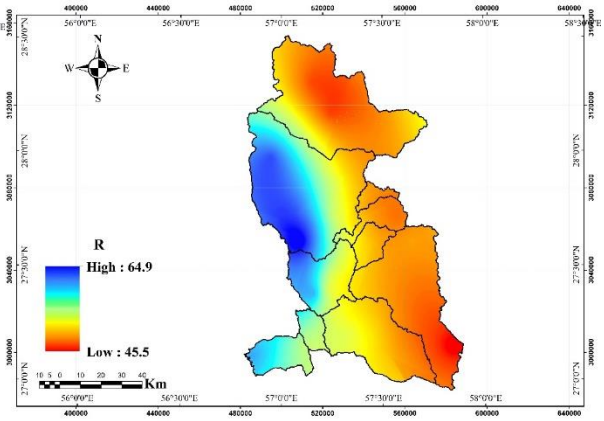
	SSP 8.5		SSP 4.5		SSP 2.6	
	CanESM5	BCC-CSM2-MR	CanESM5	BCC-CSM2-MR	CanESM5	BCC-CSM2-MR
MAD	۰/۵۲۱	۰/۵۶۰	۰/۵۴۲	۱/۸۲۰	۰/۳۷۵	۱/۳۰۷
MSE	۰/۷۹۱	۱/۰۱۶	۰/۶۷۰	۳/۲۹۴	۰/۵۲۴	۲/۳۹۰

جدول ۶، پارامترهای آماری و اشکال ۱۴ تا ۱۹، توزیع عامل فرسایندگی باران حاصل از مدل‌ها و سناریوهای مختلف اقلیمی را در حوضهٔ میناب نشان می‌دهد.

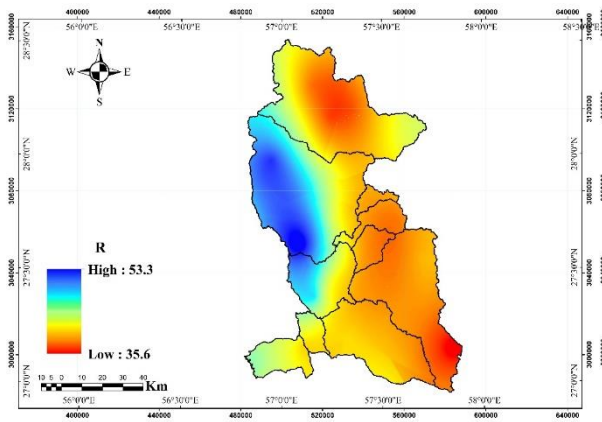
جدول ۶: پارامترهای آماری نقشه‌های فرسایندگی بارش در دو مدل و سناریوهای مختلف اقلیمی

	SSP 8.5		SSP 4.5		SSP 2.6	
	CanESM5	BCC-CSM2-MR	CanESM5	BCC-CSM2-MR	CanESM5	BCC-CSM2-MR
حداقل	۲/۷	۲/۷۱	۲/۶۹	۲/۰۶	۲/۷	۲/۶۴
حداکثر	۴/۲	۴/۲۶	۴/۱	۳/۵۶	۴/۲	۴/۱۷
میانگین	۳/۲۱	۳/۱۸	۳/۱۴۲	۲/۴۸	۳/۱۴	۳/۱۱
انحراف معیار	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۶

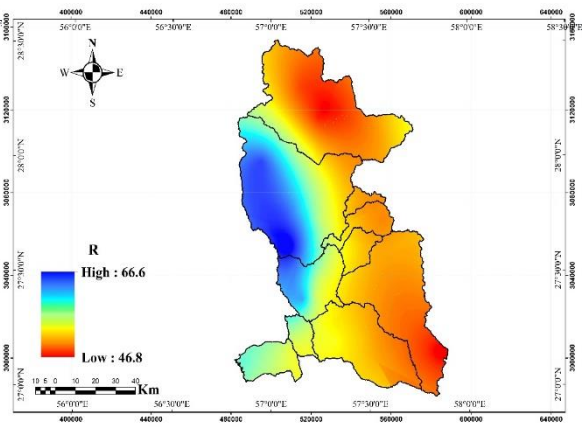
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]



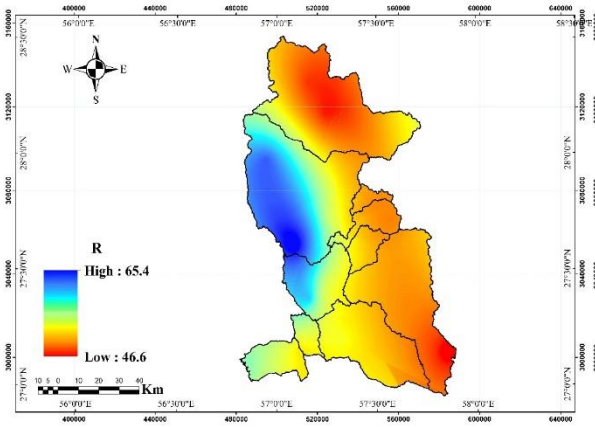
شکل ۱۴: لایهٔ R (SSP2.6 مدل BCC-CSM2-MR)



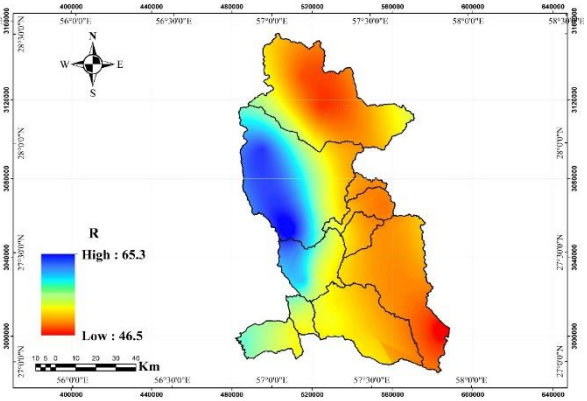
شکل ۱۵: لایهٔ R (SSP4.5 مدل BCC-CSM2-MR)



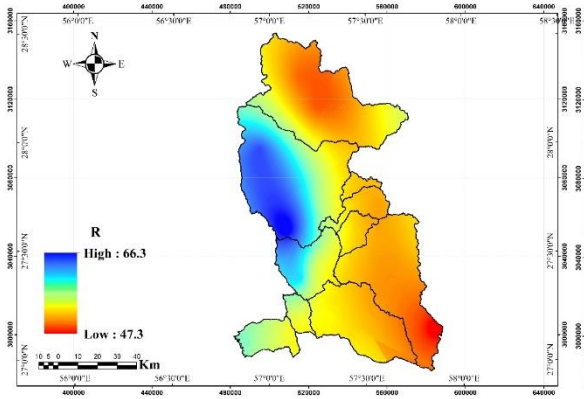
شکل ۱۶: لایهٔ R (SSP8.5 مدل BCC-CSM2-MR)



شکل ۱۷: لایهٔ R (SSP2.6 مدل CanESM5)



شکل ۱۸: لایهٔ R (سناریوی SSP4.5 مدل CanESM5)

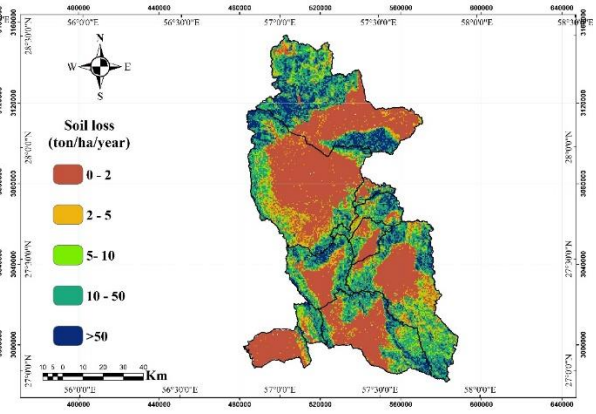


شکل ۱۹: لایهٔ R (سناریوی SSP8.5 در مدل CanESM5)

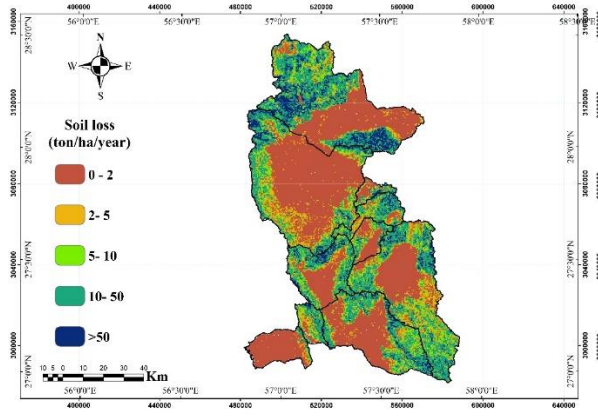
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

۴-۳- نتایج پیش‌یابی فرسایش در دورهٔ زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰

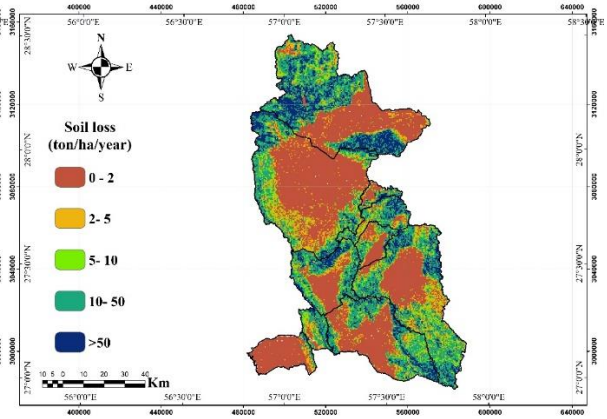
فرسایش حوضه آبریز میناب با استفاده از لایه‌های مختلف R حاصل از مدل‌ها و سناریوهای مختلف اقلیمی، به فرض ثابت بودن سایر عوامل مدل RUSLE محاسبه شد (شکل‌های ۲۰ تا ۲۵ و جدول ۷).



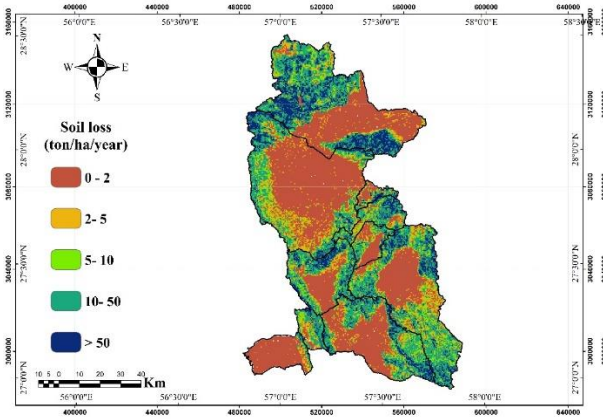
شکل ۲۰: فرسایش حوضهٔ میناب ۲۰۴۰
(سناریوی SSP2.6، مدل BCC-CSM2-MR)



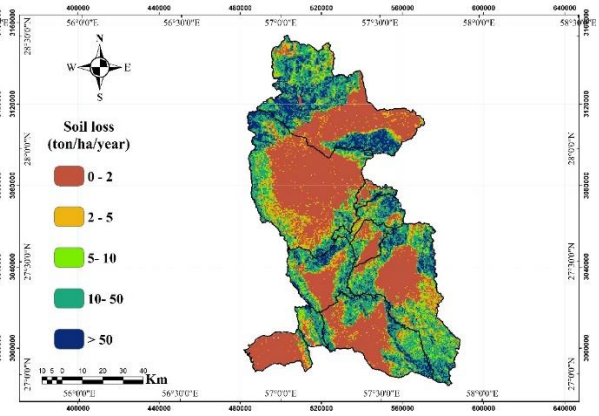
شکل ۲۱: فرسایش حوضهٔ میناب ۲۰۴۰
(سناریوی SSP4.5، مدل BCC-CSM2-MR)



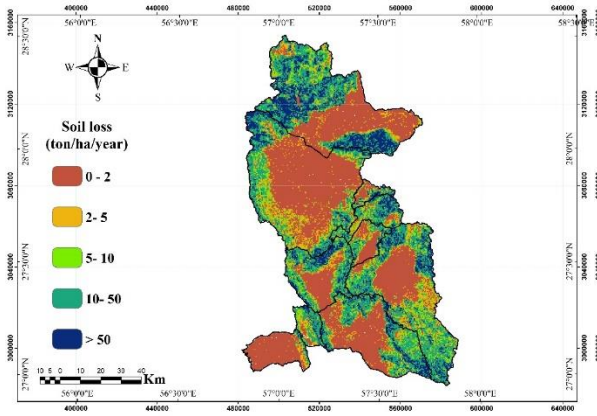
شکل ۲۲: فرسایش حوضهٔ میناب ۲۰۴۰
(سناریوی SSP8.5، مدل BCC-CSM2-MR)



شکل ۲۳: فرسایش حوضهٔ میناب ۲۰۴۰
(سناریوی SSP2.6، مدل CanESM5)



شکل ۲۴: فرسایش حوضهٔ میناب ۲۰۴۰
(سناریوی SSP4.5 در مدل CanESM5)



شکل ۲۵: فرسایش حوضهٔ میناب ۲۰۴۰
(سناریوی SSP8.5 در مدل CanESM5)

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

جدول ۷: درصد توزیع کلاس‌های فرسایشی حوضهٔ میناب در دو دورهٔ زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰، پیش‌یابی شده در مدل‌ها و سناریوهای مختلف اقلیمی

مدل	سناریو	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
BCC-CSM2-MR	SSP2.6	۴۲/۸	۹/۸	۸/۵	۲۶/۸	۱۱/۹
	SSP4.5	۴۵/۴	۱۰/۱	۹/۲	۲۷/۴	۸/۰
	SSP8.5	۴۲/۶	۹/۸	۸/۵	۲۶/۷	۱۲/۴
CanESM5	SSP2.6	۴۲/۸	۹/۸	۸/۵	۲۶/۸	۱۱/۹
	SSP4.5	۴۲/۷	۹/۸	۸/۵	۲۶/۷	۱۲/۳
	SSP8.5	۴۲/۴	۹/۸	۸/۴	۲۶/۶	۱۲/۷

متوسط شدت فرسایش حوضهٔ میناب با مدل BCC-CSM2-MR در سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 به ترتیب ۱۷/۵، ۱۷/۰ و ۱۷/۹ و برای مدل CanESM5 به ترتیب ۱۷/۸، ۱۷/۸ و ۱۸/۲ تن بر هکتار در سال است. در مدل BCC-CSM2-MR، سناریوی SSP8.5بالاترین مقدار میانگین را داشت و سناریوی SSP2.6 در رتبهٔ دوم و سناریوی SSP4.5 در رتبهٔ سوم قرار گرفت. همان گونه که قابل پیش‌بینی بود به دلیل خروجی R مشابه، هر سه سناریو مدل CanESM5 خروجی شدت فرسایش تقریباً یکسانی داشت.

۴-۴- تغییرات میانگین و کلاس‌های فرسایشی

جدول ۸، کلاس‌های فرسایسی دوره‌های آماری ۲۰۰۰-۲۰۱۰، ۲۰۱۰-۲۰۱۹ و مقادیر حاصل از میانگین‌گیری تمامی مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۴۰ را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، میانگین فرسایش حوضهٔ میناب در دورهٔ ۲۰۲۰-۲۰۴۰ برابر با ۱۷/۳ تن بر هکتار در سال، در دورهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۹ برابر با ۱۷/۰ و در دورهٔ زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰ برابر با ۱۳/۸ تن بر هکتار در سال بود.

جدول ۸: درصد توزیع کلاس‌های فرسایشی حوضهٔ میناب در دوره‌های زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰، ۲۰۱۰-۲۰۲۰ و میانگین مقادیر پیش‌یابی شدهٔ آنها در مدل‌ها و سناریوهای مختلف اقلیمی

دورهٔ آماری	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
۲۰۰۰-۲۰۱۰	۴۵/۲	۱۰/۳	۹/۲	۲۷/۶	۷/۷
۲۰۱۰-۲۰۱۹	۴۳/۰	۹/۸	۸/۵	۲۶/۹	۱۱/۸
۲۰۲۰-۲۰۴۰	۴۳/۱	۹/۸	۸/۶	۲۶/۹	۱۱/۶

۵- بحث و نتیجه‌گیری

میانگین لایهٔ فرسایندگی باران در سال ۲۰۱۰، به میزان ۴۱/۵۷ به‌دست آمد؛ در حالی که این مقدار در سال ۲۰۱۹ به ۵۲/۰۱ رسید. این روند افزایشی با نتایج Gupta and Kumar (2017) هم‌خوانی دارد. بر طبق نتایج حاصل شده، هر چند سناریوها و مدل‌های اقلیمی، مقادیر مختلفی از بارش و در پی آن عامل فرسایندگی باران را پیش‌یابی کرده‌اند، تحلیل داده‌های بارش حاصل از آنها، افزایش عامل فرسایندگی باران را در آیندهٔ نزدیک (2040) نشان می‌دهد. این نتیجه با نتایج Azimi Sardari و همکاران (2020) مطابقت دارد. با توجه به اهمیت لایهٔ فرسایندگی باران در مبحث

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

فرسایش آبی و در حوضهٔ میناب به طور خاص (Mirzadeh Koohshahi, 2022)، به نظر می‌رسد در صورت ثابت ماندن سایر عوامل تأثیرگذار بر فرسایش، در آیندهٔ نزدیک شاهد افزایش فرسایش و هدررفت خاک در حوضهٔ میناب خواهیم بود. نتایج مدل RUSLE در سه دورهٔ زمانی مورد آزمون نیز از افزایش فرسایش با گذشت زمان حکایت دارد. از آنجایی‌که LS (عامل توپوگرافی در مدل RUSLE) در بخش‌های پرشیب این حوضه آبریز مقادیر بیشتری دارد، میزان فرسایش نیز در این مناطق نسبت به بخش‌های کم‌شیب و کم‌ارتفاع بیشتر است. به نظر می‌رسد تغییرات مکانی فرسایش حوضه، تابع LS بوده و عامل فرسایندگی باران (P) نیز با گذشت زمان تغییر کرده و افزایش فرسایش را در پی داشته‌است. محققانی نظیر Gupta and Kumar (2017)، Azimi Sardari و همکاران (2020) و Talchabhade و همکاران (2020) نیز در پیش‌یابی‌های فرسایش، نتایج مشابهی به دست آورده‌اند که بر افزایش میزان هدررفت خاک در نتیجهٔ تغییر اقلیم دلالت دارد.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از دادهٔ مدل‌های اقلیمی تا پایان قرن و از گزارش ششم استفاده شود تا تغییرات در دورهٔ زمانی طولانی‌تری ارزیابی شود. همچنین با توجه به اهمیت عامل فرسایش‌پذیری خاک و نقش پوشش در آن، در تکمیل این پژوهش ـــ که به عامل فرسایندگی بارش پرداخته‌است ـــ پیشنهاد می‌شود تغییرات پوشش گیاهی در بازهٔ زمانی آینده برآورد و در مدل لحاظ شود.

منابع

1. Aalst, M. K. V., 2006. The impacts of climate change on the risk of natural disasters, Disasters, 30, 5-18. https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.2006.00303.x
2. Ahmadi, H., 1998. Applied Geomorphology, vol. 1 Water Erosion, University of Tehran Press.
3. Akbarian, M., & Khoorani, A., (2022). The impacts of climate variability on the wind erosion potentials: western region of Makran coastal plain, South of Iran, Theoretical and applied Climatology, Springer, https://doi.org/10.1007/s00704-022-04094-5 .
4. Anache, J. A.; Flanagan, D. C.; Srivastava, A.; & E. C. Wendland, 2018. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado, *Science of the Total Environment*, 622, 140-151.
5. Azimi sardari, M.; Bazrfshan, O.; Panagopolus, T.; & E. Rafiee Sardoei, 2020. Current and Future Assessment of Soil Erosion in Minab Esteglal Dam Watershed Using RUSLE 3D and Climate Change Scenarios, *Desert Management*, 7(14), 119-132. doi: 10.22034/jdmal.2020.38480.
6. Berberoglu, S.; Cilek, A.; Kirkby, M.; Irvine, B.; & C. Donmez, 2020. Spatial and temporal evaluation of soil erosion in Turkey under climate change scenarios using the Pan-European Soil Erosion Risk Assessment (PESERA) model, *Environmental monitoring and assessment*, 192(8), 1-22.
7. Chuenchum, P.; Xu, M.; & W. Tang, 2020. Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang–Mekong River by using the modified RUSLE model, *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 213-227.
8. Colman, C. B.; Oliveira, P. T. S.; Almagro, A.; Soares-Filho, B. S.; & D. B. Rodrigues, 2019. Effects of climate and land-cover changes on soil erosion in Brazilian pantanal, *Sustainability*, 11, 7053.
9. FAO., Global Soil Partnership Endorses Guidelines on Sustainable Soil Management. Available online: http: //www.fao.org/global-soil partnership /resources / highlights / detail / en /c /416516/ (accessed on 19 March 2017).
10. Gabris, G. Y.; Kertesz, A.; & L. Zambo, 2003. Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment, *Catena*, 50, 151-164.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

11. Galdies, C.; Azzopardi, D.; & A. Sacco, 2022. Estimates of soil erosion rates in a principal watershed in Gozo, Malta under current and future climatic conditions, *Catena*, 210, 105900.
12. Gupta, S., & S. Kumar., (2017). Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model− A case study in a watershed of mid-Himalayan landscape. *Journal of Earth System Science*, 126(3), 1-20.
13. Haghtalab, N.; Goodarzi, M.; Habibi Nokhandan, M.; Yavari, A.; & H. Jafari, 2013. Climate Modeling in Tehran and Mazandaran Provinces by LARSWG and Comparing Changes in Northern and Southern Central Alborz hillside, *Journal of Environmental Science and Technology*, 15(1), 37-49.
14. Helmer, M., & D. Hilhorst., (2006). Natural disasters and climate change, Disasters, 30, Issue1, Special Issue: Climate change and disasters, Pages 1-4, https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.2006.00302.x
15. IPCC, 2007: Climate Change, 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
16. Lane, M. E.; Kirshen, P. H.; & R. M. Vogel, 1999. Indicators of impacts of global climate change on US water resources, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4), 194-204.
17. Marcinkowski, P.; Szporak-Wasilewska, S.; & I. Kardel, 2022. Assessment of the soil erosion under long-term projections of climate change in Poland, *Journal of Hydrology*, p.127468.
18. Mirzadeh Koohshahi, F., 2022. Evaluation of the effects of climate change on soil erosion in Minab watershed, Thesis Submitted to University of Hormozgan in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.) in Climatology, University of Hormozgan, Bandarabbas, Iran, 85p.
19. Mohammadi, M.; Fallah, M.; Kavian, A.; Gholami, L.; & E. Omidvar, 2016. The Application of RUSLE Model in Spatial DistributionDetermination of Soil loss Hazard, *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(4), 645-658. doi: 10.22059/ije.2016.60368
20. Mohammadi, M.; Moghadaseh, F.; Ataollah, K.; Gholami, L.; & E. Omidvar, 2016. The Application of RUSLE Model in Spatial Distribution Determination of Soil loss Hazard, 3, 4, 645-658.
21. Nearing, M. A.; Pruski, F. F.; & M. R. O'Neal, 2004. Expected Climate Change Impacts on Soil Erosion Rates: a Review, *J. Soil Water Conserv*, 59 (1), 43-50.
22. Omidvar, K., 2007. An Introduction to Watershed Management, Yazd University press, Yazd, Iran, 292p.
23. Prasannakumar, V., 2012. 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. DOI:10.1016/j.gsf.2011.11.003
24. Rani, R. S.; Rejani, R.; Kumar, G. M.; Lakshmi, Y. S.; & D. K. Srinivas, 2019. Impact of Climate Change on Soil Loss in Mudhole Watershed of Telangana using GIS and RUSLE, *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development*, 34(1), 47-52.
25. Renard, K. G, & J. R. Freimund., (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *J Hydrol*. 157(1-4), 287-306. https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4.
26. Routschek, A.; Schmidt, J.; & F. Kreienkamp, 2014. Impact of climate change on soil erosion—a high-resolution projection on catchment scale until 2100 in Saxony/Germany, *Catena*, 121, 99-109.
27. Samani, A. N.; Chen, Q.; Khalighi, S.; Wasson, R. J.; & M. R. Rahdari, 2016. Assessment of land use impact on hydraulic threshold conditions for gully head cut initiation, *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 3005-3012.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

28. Segura, C.; Sun, G.; McNulty, S.; & Y. Zhang, 2014. Potential impacts of climate change on soil erosion vulnerability across the conterminous United States, *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(2), 171-181.
29. Sigdel, M., & Y. Ma., (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), 453-460.
30. Stefanidis, S., & D. Stathis., (2018). Effect of climate change on soil erosion in a mountainous mediterranean catchment (Central Pindus, Greece). *Water*. 10(10), 1469.
31. Sun, G. E.; McNulty, S. G.; Moore, J.; Bunch, C.; & J. Ni, 2002. Potential impacts of climate change on rainfall erosivity and water availability in China in the next 100 years. Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization. Beijing, China. Pp 244-250.
32. Talchabhadel, R.; Nakagawa, H.; Kawaike, K.; Yamanoi, K.; & A. Aryal, 2019. Future assessment of rainfall erosivity (R-factor) in West Rapti Basin, Nepal based on RUSLE and CMIP5 climate models, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 75(2), I_1141-I_1146.
33. Talchabhadel, R.; Nakagawa, H.; Kawaike, K.; & R. Prajapati, 2020. Evaluating the rainfall erosivity (R-factor) from daily rainfall data: an application for assessing climate change impact on soil loss in Westrapti River basin, Nepa, *Journal Modeling Earth Systems and Environment*, https ://doi.org/ 10.1007/s4080 8-020-00787 –w.
34. Teng, H.; Liang, Z.; Chen, S.; Liu, Y.; Rossel, R. A. V.; Chappell, A.; Yu, W.; & Z. Shi, 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.
35. Wang, L.; Cherkauer, K. A.; & D. C. Flanagan, 2018. Impacts of climate change on soil erosion in the Great Lakes region, *Water*, 10(6), 715.
36. Wang, R.; Zhang, S.; Yang, J.; Pu, L.; Yang, C.; Yu, L.; ... & K. Bu, 2016. Integrated use of GCM, RS, and GIS for the assessment of hillslope and gully erosion in the Mushi River Sub-Catchment, Northeast China, *Sustainability*, 8(4), 317.
37. Zhang, X. C., & M. A. Nearing., (2005). Impact of climate change on soil erosion, runoff, and wheat productivity in central Oklahoma. *Catena*. 61(2-3), 185-195.
38. Zhang, X. C.; Liu, W. Z.; Li, Z.; & F. L. Zheng, 2009. Simulating site-specific impacts of climate change on soil erosion and surface hydrology in southern Loess Plateau of China, *Catena*, 79(3), 237-242.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

Assessing Climate Change Impact on Soil Erosion in Minab Watershed, Iran

Farzaneh Mirzadeh Koohshahi: *M.Sc. Graduate Student in Climatology, Geographical Sciences Department, Faculty of Humanities, University of Hormozgan, BandarAbbas*
Mohammad Akbarian[1]: *Assistant professor, Geographical Sciences Department, Faculty of Humanities, University of Hormozgan, BandarAbbas*
Asadollah Khoorani: *Associate professor, Geographical Sciences Department, Faculty of Humanities, University of Hormozgan, BandarAbbas*

Article History (Received: 2022/11/17 Accepted: 2022/12/26)

Extended abstract

1- Introduction

The increase in greenhouse gases in the last few decades has caused a disturbance in the global climate balance and climate changes (Aalst, 2006). Climate change and the increase in extreme conditions have caused disasters (Helmer & Hilhorst, 2006), increasing floods, and tropical storms (Haqtalab et al., 2012). Other consequences of climate change are changes in erosion and soil loss (Akbarian & Khoorani, 2022). Soil loss and sediment transport have always been one of the most critical problems of land management. Climate change and, consequently, changes in precipitation affect soil erosion and loss from various aspects such as the amount, intensity-duration, and distribution of rainfall (Gabris et al., 2003). As a result of climate change, the erosive power of rain is expected to increase (Sun et al., 2002). In order to predict the effects of climate change on the erosivity of rainfall, it is necessary to predict rainfall with climate models and then estimate the erosive power of rainfall with suitable erosion estimation models. Rainfall is the most crucial active driver of soil loss that displaces soil particles (Talchabhadel, 2020). It is difficult to accurately evaluate raindrops' characteristics with soil displacement and detachment. Therefore, the empirical methods are used based on rainfall. Some of these empirical models can be used with future climate data. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) is one of the models used to predict soil erosion. Since precipitation is one of the main factors in this model, many researchers have used it to reflect upon the role of climate change on erosion changes. According to Goldies et al. (2022), using the RUSLE-GIS approach can estimate the current and future annual soil erosion rates in watersheds by reflecting climate change to the R factor based on the latest CMIP6 phase 6 climate forecasts.

Soil loss and sediment transport have always been one of the most critical problems of land management. According to the mentioned materials, the use of different models to estimate erosion is essential in the basins that are faced with a lack of data and statistics. The area studied in this research is the Minab watershed, which is vital from various economic and social aspects, especially the drinking water supply of Bandar Abbas in Hormozgan province. Accordingly, this research tried to determine the changes of erosion in these periods by examining the climate condition in the past, present, and future periods so that this information becomes available to decision-makers and managers for better planning. The Minab watershed is located in the range of 48°56° to 57°59° east and 27° to 28°32° north latitude. This basin is one of the sub-basins of Bandar Abbas-Sedich, located in the northeast of Hormozgan province and the south of Kerman province. The area of the basin is 10613 square kilometers. The Minab River, which is the result of the connection of the Jaghin and Rodan rivers, is considered the most important river in this basin. With the construction of the Minab Dam, its water resources are used to provide drinking water to Bandar Abbas.

2- Methodology

This research used monthly data from meteorological stations, precipitation data extracted from different climate models and scenarios, soil data, and satellite images. The climate data are in different periods (base period 2020-2002 and future period 2020-2050). The RUSLE model was used to study erosion changes due to climate change. First, by preparing the RUSLE model invoices, the model was

[1] **Corresponding Author: m.akbarian@hormozgan.ac.ir**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]

implemented for the 2010 and 2020 time periods. Next, two climate models, BCC-CSM2-MR and CanESM5, based on the sixth report and under scenarios 2.6, 4.5, and 8.5, were used to predict precipitation. After evaluating the models, the precipitation erosion layer in 2040 was prepared by the two models.

3- Results

The results showed that the average rain erosivity layer has increased from 41.57 in 2010 to 52.01 in 2020. There is not much difference between the prediction results of the BCC-CSM2-MR model and the observed value, so it can be said that the model performed well in different scenarios. Among the used scenarios, the 8.5 scenario has the slightest error, and the 4.5 scenario is placed at the end. In the case of the CanESM5 model, there is no significant difference between the observed and the predicted values. Although the difference increases for more distant years, such as 2040, the results of different scenarios are similar. The output of the two BCC-CSM2-MR and CanESM5 models also indicate an increase in the rate of precipitation erosion in 2040. The average erosion in 2010 was 13.8 t/ha/y, which increased to 17 t/ha/y in 2020 and was predicted to increase to 17.3 t/ha/y in 2040.

4- Discussion & Conclusions

The average rain erosion layer in 2010 was 41.57; in 2019, this value reached 52.01. According to the results, the analysis of precipitation data obtained from climate scenarios and models shows an increase in the erosivity factor of rain in the near future (2040). Considering the importance of the rainfall erosivity layer in water erosion, if other factors affecting erosion remain constant, in the near future, we will see an increase in erosion and soil loss in the Minab basin. The results of the RUSLE model in the three periods also indicate an increase in erosion over time. The spatial changes of basin erosion are a function of LS (topographic factor), and the rainfall erosivity factor (P) causing temporal changes in erosion.

Key Words: Climate change, Climate disasters, Erosion projection, Minab basin, RUSLE**.**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8]