

ارزیابی اثر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کندران)

فاطمه تیموری^۱، ام‌البنین بذرافشان^{۲*}، الهام رفیعی ساردویی^۳

۱. کارشناس ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

۲. استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان

۳. استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه جیرفت

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۲/۲۳)

چکیده

تغییرات جهانی اقلیم و کاربری اراضی می‌تواند به شدت بر میزان فرسایش و توانایی خاک برای حفظ کشاورزی و به تبع آن، بر امنیت غذایی منطقه‌ای یا جهانی تأثیر بگذارد. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی اثر تغییر اقلیم و تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش با استفاده از مدل RUSLE است. از این‌رو، تغییرات آب و هوایی براساس دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 با استفاده از مدل آماری برای دوره‌های ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۲۰۳۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) استفاده شدند. مدل LCM برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین و پوشش گیاهی در حوضه آبخیز کندران استفاده شد. نتایج نشان داد فاکتور فرسایش باران (R-factor) و عامل پوشش گیاهی (C-factor) در مدل RUSLE تحت تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی و نیز تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی قرار دارند. به طوری که میزان فاکتور فرسایش‌پذیری از ۷۶/۳۸ در دوره پایه به ۸۳/۷ در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۸۲/۳ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$ در دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. همچنین، فاکتور پوشش گیاهی از ۰/۲۲۵ در دوره پایه به ۰/۴۳ در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۰/۵۶ در ۲۰۳۱-۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. میانگین فرسایش خاک در دوره پایه ۹/۸ (تن در هکتار در سال) بود که طی دو دهه آینده (۲۰۱۶-۲۰۳۰) با استفاده از دو سناریوی بررسی شده، به طور متوسط ۱۶ درصد (۱۱/۳۷) و طی پنج دهه آینده ۲۰ درصد (۱۰/۳) بر میزان فرسایش افزوده می‌شود.

کلیدواژگان: تغییرات اقلیمی، تغییر پوشش زمین، مدل LCM، مدل RUSLE، مدل SDSM.

مقدمه

در سطح جهانی، فرسایش خاک یکی از شکل‌های مهم تخریب خاک است، به همین علت فرسایش خاک آثار نامطلوب گسترده‌ای روی تخریب خاک، تولیدات کشاورزی، کیفیت آب، سیستم‌های هیدرولوژیکی و محیط زیست دارد و بنابراین، به عنوان مشکل اساسی برای پایداری زیست انسان‌ها شناخته شده است [۱]. نوع و شدت فرسایش خاک در یک منطقه تابع عوامل مختلفی همچون شرایط اقلیمی، پستی و بلندی، نوع خاک و کاربری اراضی است. در این میان، اهمیت تغییر اقلیم و کاربری اراضی به دلیل کارکرد مؤثر انسان در آن نسبت به دیگر عوامل، می‌تواند زیاده‌تر باشد. بنابراین، علاوه بر تغییر اقلیم و تغییرات اجتماعی و اقتصادی، تغییر کاربری نیز تأثیرات بسیار زیادی در تعادل آبی حوضه آبخیز دارد [۲]. تأثیرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی در تعامل با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. در واقع، تغییرات اقلیمی تأثیرات مستقیم و غیر مستقیم بر فرسایش خاک دارد [۳]. مدل‌های گردش جهانی (GCMS) ابزاری هستند که برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی حال و آینده استفاده می‌شوند. مدل‌های عددی یکی از انواع مدل‌های گردش جهانی هستند که فرایندهای مختلف فیزیکی برای سیستم زمین-اتمسفر-اقیانوس را نشان می‌دهند [۴]. معمولاً آشکارسازی تغییرات، فرایند مربوط به تشخیص مناطق تغییر یافته در دو تصویر و دو زمان متفاوت است. روش‌های متعددی برای آشکارسازی تغییرات محیطی به کار گرفته می‌شود که از مهم‌ترین آنها می‌توان به استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و سیستم اطلاعات جغرافیایی اشاره کرد. تصاویر ماهواره‌ای به دلیل ارائه اطلاعات به‌هنگام، تنوع اشکال، رقومی بودن و امکان پردازش در تهیه نقشه‌های کاربری اراضی اهمیت زیادی دارند. بنابراین، می‌توان گفت که استفاده از داده‌های سنجش می‌تواند شناخت مناسبی درباره چگونگی سنجش از دور در محیط تغییرات کاربری اراضی ارائه دهد و راه کارهای مدیریتی آن را بیان کند [۵]. یکی از مدل‌های پرکاربرد برآورد فرسایش و رسوب که می‌توان تأثیرات تغییر اقلیم را با استفاده از آن به دست آورد، مدل RUSLE است. بین شش عامل مؤثر در مدل یادشده، امکان پیش‌بینی فرسایشی باران (R-factor) با سناریوهای تغییر اقلیم وجود دارد، اما از تغییرات کاربری

اراضی و پوشش گیاهی^۱ به عنوان یکی از عوامل مهم و مؤثر بر تغییرات زیست‌محیطی در مقیاس زمانی و مکانی یاد می‌شود که متأثر از تغییرات اقلیم در سطح محلی و منطقه‌ای است [۶]. تغییرات اقلیم روی الگوی بارش و در پی آن، کاربری اراضی که موتور محرکه آن فعالیت‌های انسانی است (از طریق اقتصاد کلان، تغییر در تکنولوژی استفاده از زمین، ساختارهای اجتماعی و اقتصادی)، تأثیر می‌گذارد [۷].

در این زمینه، مطالعات متعددی صورت پذیرفته است. برای مثال، توانگر و همکارانش اثر تغییر اقلیم بر عامل فرسایشی باران در سواحل جنوبی خزر را بررسی کردند. به این منظور، آنها از خروجی‌های مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوی انتشار A1B استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها نشان می‌دهد عامل فرسایشی طی قرن اخیر در بیشتر نقاط شمال کشور افزایش خواهد بود [۸]. سگورا و همکارانش [۹] تأثیر تغییرات اقلیمی بر آسیب‌پذیری فرسایش خاک در ایالات متحده آمریکا را بررسی کردند. آنها برای نخستین بار تغییرات عامل فرسایشی باران در نه اقلیم مختلف توسط سه مدل گردش عمومی و با سه سناریوی B1، A2 و A1B را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که روند در قسمت‌های مختلف متفاوت است. هوانگ و لو [۱۰] طی بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر تولید رسوب در پارک ملی یانگ‌مینگ‌شان تایوان به این نتیجه رسیدند که تولید رسوب زمین‌های جنگلی و کشاورزی به ترتیب ۶/۹ درصد و ۹/۵ درصد کاهش داشته و به میزان ۰/۲۵ تن در هکتار شده است. دلگادو و همکارانش [۱۱] طی بررسی تأثیرات بارش و کاربری اراضی بر تولید رسوب در حوضه آبخیز رودخانه بلیساریو در آرژانتین نشان دادند مناطق مختلف حوضه پاسخ‌های متفاوتی در تولید رسوب دارند و یک رویداد بارش در شرایط مشابه در سال ۲۰۱۱ در مقایسه با سال ۱۹۶۶، ۴۰۰ درصد افزایش تولید رسوب در بالادست و ۱۰۰ درصد افزایش در پایین‌دست حوضه آبخیز را نشان می‌دهد. سرپا و همکارانش [۱۲] تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی بر فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش و مقایسه آنها در دو حوضه خشک و مرطوب در منطقه مدیترانه را بررسی کردند. در پژوهش یادشده برای شبیه‌سازی جریان و رسوب تولیدی

1. LULCC: Land Use and Land Cover Change

فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز کندران و تغییر در الگوهای بارش منطقه، پیش‌بینی میزان فرسایش اراضی در آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی برای اقدامات آبخیزداری متناسب با شرایط حوضه برای کنترل فرسایش و کاهش تولید رسوب، امری ضروری است. مطالعات متعددی در زمینه برآورد فرسایش و یا پیش‌بینی آن در آینده با استفاده از عامل فرسایش‌دگی باران صورت پذیرفته، اما تحقیقی که هم‌زمان به پیش‌بینی دو عامل فرسایش‌دگی باران (R-factor) و پوشش زمین (C-factor) و آثار آن بر میزان فرسایش و رسوب در آینده طی دوره‌های زمانی مختلف پردازد، دیده نشده است. برای این اساس، اهداف تحقیق حاضر به صورت زیر قابل گسترش است:

۱. برآورد فرسایش با استفاده از مدل RUSLE در حوضه آبخیز کندران طی دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۵)؛
۲. ریزمقیاس‌نمایی باران با استفاده از مدل SDSM و برآورد فاکتور فرسایش‌دگی باران با استفاده از سناریوهای RCP2.5 و RCP8.5 برای دوره‌های (۲۰۱۶-۲۰۳۰) و (۲۰۳۱-۲۰۵۰)؛
۳. پیش‌بینی میزان تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از LCM طی دوره‌های زمانی یادشده، در آینده؛
۴. پیش‌بینی فرسایش و رسوب با استفاده از مدل RUSLE و بهره‌گیری از سناریوهای تغییر اقلیم و تغییرات پوشش گیاهی در آینده.

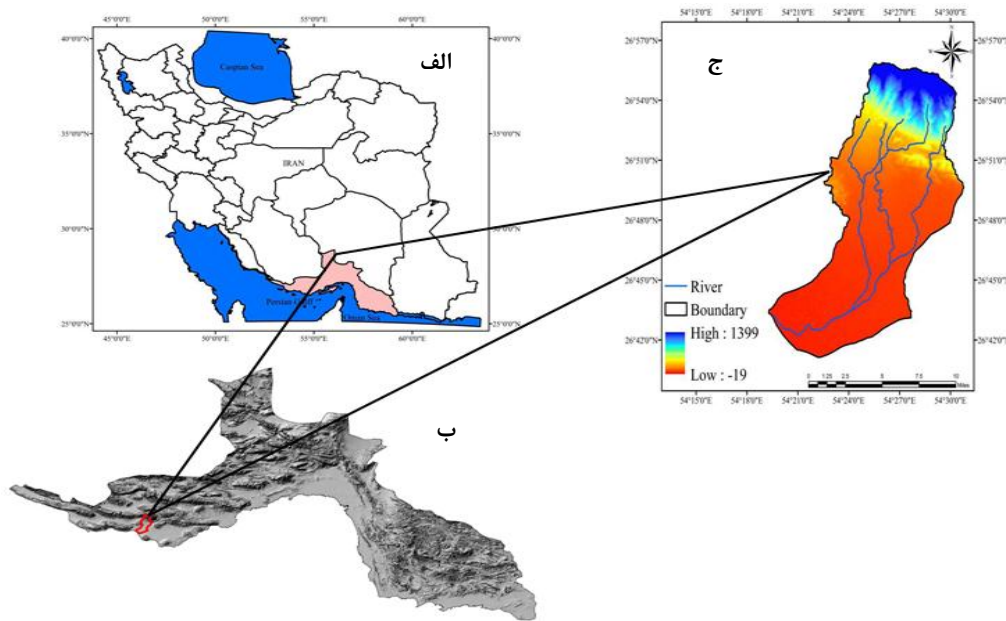
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

محدوده مطالعه شده از نظر تقسیم‌بندی سیاسی-اداری در استان هرمزگان، شهرستان بندرلنگه و در بخش مرکزی آن واقع شده است. گستره مطالعه شده براساس سیستم مختصات کارتیزین (درجه، دقیقه و ثانیه) در حدود طول‌های شرقی ۵۴ درجه، ۱۹ دقیقه و ۱۱ ثانیه تا ۵۴ درجه، ۳۰ دقیقه و ۴۰ ثانیه و عرض‌های شمالی ۲۶ درجه، ۴۰ دقیقه و ۵۷ ثانیه تا ۲۶ درجه، ۵۶ دقیقه و ۴ ثانیه قرار دارد. این منطقه از شمال به کوه سفید، از جنوب به بندر حسینه و خلیج فارس، از شرق به روستای سورو و از غرب به روستای مراغ محدود می‌شود [۱۷].

رودخانه از مدل SWAT و به منظور پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، از سناریوهای A1 و A1B استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که هر دو عامل تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی سبب کاهش فرسایش در هر دو حوضه خشک و مرطوب شده است. زارع و همکارانش [۱] به شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرسایش خاک تحت تأثیر سناریوهای تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز کسلیان واقع در شمال کشور ایران پرداختند. آنها در مطالعه یادشده برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از سه سناریوی A2، B1 و IPCM4 و همچنین برای برآورد میزان فرسایش و رسوب از مدل RUSLE استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد فاکتور فرسایش‌دگی باران در مدل RUSLE تأثیر مستقیمی بر تغییرات اقلیمی دارد، به طوری که میزان فعلی فرسایش که ۲۱/۸۲ تن در هکتار در سال بوده است، با افزایش ۱۰-۳۵ درصدی فاکتور فرسایش‌دگی، فرسایش خاک ۱۰-۳۲ درصد طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. عرفانیان و همکارانش [۱۳] خطر فرسایش را با استفاده از مدل USLE و تکنیک فازی ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد مدل یادشده به خوبی قادر به برآورد مناطق خطرپذیر فرسایش در منطقه است. ترابیان مقدم و همکارانش [۱۴] در برآورد فرسایش‌دگی باران در جنوب غرب ایران، گزارش دادند که استفاده از میانگین‌های بارش و شدت بارش سالیانه در یک مدل رگرسیون چندگانه برای برآورد ضرایب فرسایش‌دگی سالیانه قابل اعتمادتر از هنگامی است که از معادله‌های رگرسیون ساده برای این منظور استفاده شود. سید علیپور و همکارانش [۱۵] به مقایسه مدل سزیم ۱۳۷ و RULE-3D در برآورد فرسایش در مناطق لسی پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل RUSLE-3D مناسب مناطق لسی نیست. رحمتی و همکارانش [۱۶] دقت و کارایی مدل‌های USLE، MUSLE-E و MUSLE-S در برآورد مقدار فرسایش تک‌رخداد بارشی در حوضه آبخیز سنگانه مشهد را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده ارتباط آماری و همبستگی معنادار (ضریب همبستگی ۰/۵۳۹) مقادیر برآوردی روش‌های MUSLE-E و MUSLE-S با رسوب مشاهداتی است.

با توجه به تغییرات گسترده کاربری اراضی، رهاسدن سطح غالب اراضی کشاورزی (زراعی و باغی) به اراضی بایر و روند قهقرایی وضعیت اراضی مرتعی، روند صعودی تولید



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مطالعه شده: (الف) کشور ایران، (ب) استان هرمزگان، (ج) حوضه آبخیز کندران

روش‌ها

تحقیق حاضر شامل سه مرحله است: مرحله نخست، برآورد تأثیرات تغییر اقلیم بر فاکتور فرساینده‌گی باران طی سناریوهای مختلف؛ مرحله دوم، پیش‌بینی تغییر کاربری اراضی طی دو دوره در آینده و مرحله سوم، برآورد فرسایش در آینده با وارد کردن مقادیر پیش‌بینی‌شده فاکتور فرساینده‌گی باران (R-factor) و تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی (C-factor) در مدل RUSLE طی دوره‌های آینده که در ادامه به تشریح آنها می‌پردازیم.

مدل RUSLE

مدل اصلاح‌شده USLE، یعنی RUSLE، توسط رینارد و همکارانش در سال ۱۹۹۷ معرفی شد [۱۸]. بین مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب، مدل اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک، به دلیل اینکه امکان کمی‌سازی فاکتورهای اثرگذار بر فرسایش و رسوب و بررسی توزیع مکانی و شبکه‌ای دقیق فرسایش با استفاده از فناوری سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، توسط بسیاری از محققان به‌ویژه زارع و همکارانش [۱] اصغری و همکارانش [۵]، توانگر و همکارانش [۸]، محمدی و همکارانش [۴۰] و بسیاری از پژوهشگران دیگر در ایران مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، RUSLE با در نظر گرفتن دو فاکتور فرسایش‌پذیری و پوشش گیاهی که عموماً تحت تأثیر تغییر اقلیم و تغییرات انسان‌ساخت هستند،

امکان مدل‌سازی برآورد فرسایش در آینده را میسر می‌سازد (رابطه ۱):

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

که در آن A مقدار خاک فرسایش‌یافته برحسب تن در هکتار، R عامل فرساینده‌گی بارندگی (1h-y-MJ mmha-1)، K ضریب فرسایش‌پذیری و حساسیت ذاتی خاک (t ha h-1 MJ-1mm-1)، L طول شیب، C عامل پوشش گیاهی و P عامل حفاظت خاک هستند.

فاکتور فرساینده‌گی باران (R)

بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد در بسیاری از نقاط دنیا، فاکتور R همبستگی زیادی با فرسایش خاک دارد. فاکتور R برای دوره‌های مختلف، از حاصل ضرب انرژی جنبشی باران (E) در بیشترین شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I₃₀) به دست می‌آید. به علت کمبود داده در این مقیاس، اغلب از مقادیر متوسط بارندگی سالیانه، به منظور برآورد فاکتور R در مدل‌های RUSLE و USLE استفاده می‌شود که رابطه شاخص فورنیر، F، به صورت رابطه ۲ است [۱۹]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P} \quad (2)$$

در رابطه یادشده، P_i: متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه iام و P متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است. به

$$L = \frac{1}{4} [AS / (22/13)]^{1/4} \quad (6)$$

$$S = \left[\frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^{1/3} \quad (7)$$

در معادله یادشده، AS: مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی (مترمربع بر متر) و β زاویه شیب بر حسب درجه است. در مطالعه حاضر، نقشه فاکتور LS از نقشه DEM و با استفاده از ماژول توپوکوپ نرم افزار Arcview 2/3 استخراج شد. در ضمن، در مطالعه حاضر نقشه شیب با استفاده از تحلیلگر GIS و در محیط Arcview از روی مدل رقومی ارتفاع ساخته شده برای حوضه تهیه شد.

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C)

با افزایش پوشش گیاهی، فرسایش خاک کاهش می یابد. بنکوبی و همکارانش [۲۲] و بیسمن و همکارانش [۲۳] گزارش دادند که فاکتور پوشش گیاهی به همراه درجه شیب و طول شیب در فرسایش خاک و تولید رسوب حساسیت بیشتری دارند. اما پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده از فناوری سنجش از دور به دست می آید. برای تصویر لندست این شاخص به صورت رابطه ۸ به دست می آید:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (8)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می دهد. مقادیر NDVI بین -۱ و +۱ در نوسان است. بعد از انجام تبدیل خطی معکوس از نمونه های تعلیمی، رابطه بین C و NDVI می تواند به صورت رابطه ۹ ایجاد شود:

$$C = ((1 - NDVI) / 2) \quad (9)$$

در نتیجه، مقدار C در هر سلول می تواند محاسبه شود. از آنجا که مقادیر فاکتور C بین صفر و یک است، مقدار صفر به پیکسل های با مقادیر منفی و عدد یک به پیکسل هایی با مقدار بیشتر از یک اختصاص خواهد یافت.

فاکتور عملیات حفاظتی (P)

کشت و کار در اراضی شیب دار، به عملیات حفاظتی برای

منظور برآورد میزان فرسایش باران در کل حوضه، از ایستگاه های باران سنجی اطراف آن استفاده شد.

در روابط ۳ و ۴ که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) برای مناطق فاقد داده های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده است، مقدار فاکتور R برای ایستگاه های شاخص برآورد شد [۵].

$$F < 55MMR - Factor = (0.07397 \times F^{1.47}) / 17.2 \quad (3)$$

$$R - Factor = (95/77 - 6/0.81 \times F + 0/4770 \times F^2) / 17.2 \quad (4)$$

در اطراف حوضه بیش از ۲۰ ایستگاه وجود دارد، که فاکتور یادشده برای هر ایستگاه محاسبه شده و با استفاده از روش میان یابی کریجینگ به کل حوضه تعمیم داده شد.

فاکتور فرسایش پذیری خاک (K)

سرعت فرسایش پذیری خاک به ازای واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات استاندارد اندازه گیری می شود [۷]. فاکتور K با بافت، میزان ماده آلی، نفوذپذیری ساختمان خاک رابطه دارد، اما با نوع تیپ خاک همبستگی زیادی دارد [۲۰]. فاکتور فرسایش پذیری خاک در مدل RUSLE از طریق نمودار (ویشمایر، ۱۹۷۱) و در برخی خاک ها از رابطه جبری زیر استفاده می شود (رابطه ۵) [۱۹].

$$K = \frac{2}{73} \times 10^{-6} M^{1/2} (12 - a) + \frac{3}{25} \times 10^{-2} (b - 2) + \frac{2}{5} \times 10^{-2} (c - 3) \quad (5)$$

در معادله یادشده، M: قطر ذره (درصد سیلت + درصد شن بسیار ریز) \times (درصد رس - ۱۰۰)، a: درصد ماده آلی، b: کد ساختمان خاک و C: کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک هستند. در مطالعه حاضر، تمام عوامل اشاره شده از گزارش تفصیلی حوضه گابریک استخراج شده و نقشه فاکتور K در محیط GIS تهیه شد.

فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S)

فاکتورهای S و L در مدل RUSLE، بیان کننده تأثیر توپوگرافی روی فرسایش خاک است [۱۰]. تأثیرات ویژه توپوگرافی روی فرسایش خاک توسط فاکتور LS (بدون واحد) برآورد می شود. برای محاسبه فاکتورهای S و L از روابط ۶ و ۷ استفاده می شود [۲۰]:

با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار زیاد هستند. RCP 8.5، RCP 6 و RCP 4.5 اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶ وات بر مترمربع (W/M2) تخمین زده‌اند [۲۵]. مدل SDSM نوعی ابزار رگرسیون بنیان چندگانه است و امروزه به عنوان پرکاربردترین مدل ریزمقیاس‌نمایی و بهترین مولد داده شرطی در سطح جهان شناخته شده است. عملکرد و ساختار مدل SDSM در چهار مرحله خلاصه می‌شود: واسنجی مدل، ارزیابی مدل و تولید سناریوهای آتی [۲۶].

در مرحله انتخاب بهترین متغیرهای مستقل، از آنجا که احتمال می‌رود پیش‌گویی شبکه‌های نزدیک به منطقه مطالعاتی نیز بر بارش و دمای ایستگاه‌ها تأثیرگذار باشند، برای افزایش دقت مدل، علاوه بر داده‌های شبکه مربوط به حوضه، از داده‌های چهار شبکه مجاور و نزدیک به ایستگاه‌ها نیز استفاده شد. بعد از آن، کالیبراسیون مدل انجام پذیرفت و با سعی و خطا و در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی، بهترین دوره از بین آنها سری‌ای انتخاب شد که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشته باشد. برای آزمون کارایی مدل، از معیارهای R^2 ، RMSE، MAE و ضریب NSE استفاده شد [۲۷].

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل SDSM طی مرحله صحت‌سنجی، ۱۰۰ سری داده روزانه تولید شد. از بین آنها سری‌ای انتخاب شد که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشت. به منظور بررسی میزان حساسیت مدل SDSM به خروجی مدل جهانی، شاخص‌های بارش و دما با استفاده از داده‌های تاریخی مدل CanESM2 طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۵ شبیه‌سازی شده و سپس با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند. سپس، توانایی مدل بزرگ‌مقیاس در تولید سناریو برای دوره‌های آتی ارزیابی شد. پس از این مراحل، با استفاده از داده‌های دوره زمانی آینده مدل بزرگ‌مقیاس مد نظر، داده‌های بارش طی دوره زمانی (۲۰۳۰-۲۰۵۰) تحت دو سناریوی تأییدشده IPCC برآورد شد و در نهایت به مقایسه نمودارهای داده‌های پایه مشاهداتی و محاسباتی برای دوره پایه و آینده پرداخته شد.

حفظ آب و خاک نیاز دارد. این عملیات سبب کاهش سرعت هرزآب تا زیر حد آستانه بروز فرسایش می‌شود و به همین دلیل از قدرت فرساینده‌گی آب و ظرفیت حمل آن می‌کاهد. عملیات حفاظتی شامل کشت کنتوری، سیستم ترانس‌بندی، آبراهه‌های پوشش‌دار و... است. فاکتور P، نسبت خاک فرسایش‌یافته در شرایط انجام عملیات حفاظتی به فرسایش ایجادشده در شرایط استاندارد یعنی شخم در جهت شیب است [۱۹]. فقط با توجه به اینکه در حوضه بررسی شده هیچ‌گونه عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته، ارزش P براساس کاربری و پوشش اراضی مختلف تعیین شده است.

پس از ارزیابی عوامل مؤثر در تولید فرسایش و رسوب حوضه مطالعه شده، شاخص همپوشانی برای لایه‌ها انجام گرفت. به بیان دیگر، در این حالت سلول‌های هم‌مختصات با همدیگر ترکیب و تلفیق می‌شوند. برای این حالت، داده‌ها باید ساختار رستر داشته باشند تا امکان تلفیق آنها وجود داشته باشد. بنابراین، با استفاده از روی هم‌اندازی لایه‌ها، نقشه فرسایش برای حوضه مطالعه‌شده به دست می‌آید.

مدل SDSM برای کوچک‌مقیاس کردن مقادیر بارندگی

در پژوهش حاضر به منظور برآورد داده‌های بارش آینده از مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM 4.2.9 استفاده شد. مدل CanESM2 نوعی مدل جامع و جفت‌شده و چهارمین نسل از مدل‌های گردش عمومی جفت‌شده (CGCM4) بوده و جزء سری مدل‌های CMIP5 و گزارش پنجم (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) است [۲۴]. جدول ۱ مشخصات این مدل را نشان می‌دهد. در گزارش پنجم دقت شبیه‌سازی و وضوح مکانی مدل‌ها نسبت به گزارش پیشین افزایش یافته است. همچنین، در سناریوهای RCP، محدوده وسیع‌تر و مستدل‌تری از خط سیرهای تولید گازهای گلخانه‌ای (GHGs) نسبت به سناریوهای SRES در AR4 ارزیابی شده است. به طور کلی، عدم قطعیت‌ها در گزارش اخیر کاهش یافته است. سناریوهای RCP شامل یک سناریوی کاهش‌ی سخت‌گیرانه (RCP 2.6)، دو سناریوی حد واسط (RCP 4.5 و RCP 6) و یک سناریوی بدبینانه (RCP 5.5)

جدول ۱. مشخصات مدل canSEM2

نام مدل	قدرت تفکیک اتمسفری (درجه) (طول * عرض)	قدرت تفکیک افقانی (درجه) (طول * عرض)	گروه مؤسس	دوره شبیه‌سازی تاریخی / آینده	سناریوهای شبیه‌سازی
CanESM2 (۲۰۱۰)	۲.۸۱° × ۲.۸۱°	۱.۴۱° × ۱.۴۱°	CCCMA (کانادا)	۲۰۰۵-۱۸۵۰ ۲۱۰۰-۲۰۰۶	RCP۲/۶ RCP۴/۵ RCP۸/۵

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی

برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مطالعه شده از تصاویر ماهواره Landsat سنجنده‌های TM، OLI، ETM+ و TIRS (1995، 2005، 2015) استفاده شد. از آنجا که تفکیک و شناسایی پدیده‌ها به لحاظ رنگ نتایج بهتری ارائه می‌دهد، ولی نمایش داده‌های حاصل از اسکنرها در تک‌باندها با استفاده از گام‌های خاکستری است، تصویر رنگی کاذب هر تاریخ با استفاده از ترکیب باندهای ۲ (سبز)، ۳ (قرمز)، ۴ (مادون قرمز نزدیک) تولید شد [۲۸]. این تصاویر به تجسم انواع کاربری‌ها در منطقه کمک می‌کنند. از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده خوارزمیک بیشترین احتمال برای تهیه نقشه‌های پوشش اراضی استفاده شد.

نخستین گام در انجام طبقه‌بندی نظارت‌شده، تعریف مناطقی است که به عنوان نمونه‌های تعلیمی برای هر کلاس استفاده می‌شوند. برای این مرحله با تفسیر بصری تصویر رنگی کاذب و با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه‌شده به وسیله سازمان نقشه‌برداری کشور نمونه‌های تعلیمی برای هر کلاس تعریف شد. ۱۳ کلاس کاربری به صورت برون‌زدگی سنگی، حوضچه پرورش ماهی، زراعت، زراعت رهاشده، زمین بایر، مرتع، مرتع مشجر، مسیل، مسکونی، نخلستان، نخلستان رهاشده، گالی و گنبد نمکی در منطقه مشخص شد. سپس، نمونه‌های تعلیمی به شیوه رقومی کردن روی صفحه تولید و تفکیک شدند. پس از مرحله تعیین نمونه‌های تعلیمی، نوبت به طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای می‌رسد که در تحقیق حاضر از روش طبقه‌بندی کننده بیشترین احتمال استفاده شد [۲۹]. به منظور حذف قطعات کوچک و ساده‌سازی تصاویر به دست آمده از طبقه‌بندی، از فیلتر Mode استفاده شد.

ارزیابی صحت طبقه‌بندی

برای ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شده برای تصویر سال ۲۰۱۵ در مجموع ۳۳۱ نقطه با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب مکانی در منطقه زده شد. سپس، این نقاط

واقعیت زمینی با تصویر طبقه‌بندی شده مقایسه شدند و ضرایب کاپا [۲۹] برای هر طبقه و کاپای کلی محاسبه شد. ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شده سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ با استفاده از تفسیر بصری و نقاط کنترل زمینی که طی زمان تغییر نکردند، محاسبه شد.

آشکارسازی تغییرات

آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی ابزاری ضروری برای تجزیه و تحلیل‌های محیط زیست، برنامه‌ریزی و مدیریت است. در تحقیق حاضر، نقشه‌های پوشش زمین سال‌های ۱۹۹۵ با ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۵ با ۱۹۹۵ و ۲۰۱۵ برای تجزیه و تحلیل و آشکارسازی تغییرات منطقه، وارد مدل LCM شدند. مدل‌ساز تغییر سرزمین، نرم‌افزاری برای ایجاد توسعه پایدار بوم‌شناختی است که برای تشخیص مسئله مبهم و رو به افزایش تغییرات سرزمین و نیازهای تحلیلی حفظ تنوع زیستی طراحی و ساخته شده است و به صورت برنامه عمودی درون سامانه نرم‌افزاری IDRISI وجود داشته، همچنین به صورت افزونه‌ای در نرم‌افزار ArcGIS نیز در دسترس است. مدل‌ساز تغییر سرزمین، ابزاری را در اختیار قرار می‌دهد که به کمک آن می‌توان به ارزیابی و مدل‌سازی تجربی تغییرات کاربری اراضی و تأثیرات آن بر زیستگاه‌ها و تنوع زیستی پرداخت. بنابراین، مراحل مدل‌سازی در چهار مرحله صورت می‌گیرد: ۱. بررسی تغییرات؛ ۲. مدل‌ساز نیروی انتقال؛ ۳. مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی؛ ۴. ارزیابی صحت مدل‌سازی.

مدل‌ساز نیروی انتقال

در این بخش از مدل‌سازی، نیروی انتقال از یک کاربری (مانند مرتع) به کاربری دیگر (نظیر زراعت) با توجه به متغیرهای توضیحی^۱ (مانند شیب، نزدیکی به جاده)، مدل می‌شود. به این مفهوم که هر پیکسل از تصویر برای تغییر از یک کاربری به نوع دیگر چقدر پتانسیل دارد. خروجی این قسمت، نقشه نیروی برای هر تغییر (برای مثال، از کاربری

1. Explanative variabls

سرزمین ارائه شود [۳۲]. سپس، مدل سازی با استفاده از مدل پیش‌بینی سخت و دوره‌آسنجی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ اجرا شد [۲۷]. در پایان، برای پیش‌بینی تغییرات پوشش حوضه آبخیز کندران از نقشه‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۵ استفاده شد.

یافته‌ها

نتایج به دست آمده ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی با استفاده از مدل SDSM

داده‌های بارش برای دوره‌آینده نزدیک ۲۰۱۶-۲۰۵۰ تحت سناریوهای مختلف برای چهار ایستگاه سینوپتیک اطراف منطقه مطالعه‌شده تولید شد. در شکل ۲ مقادیر میانگین ماهانه بارش در ایستگاه بندرلنگه و داده‌های پیش‌بینی‌شده تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 ارائه شده است. براساس شکل ۲، در دو سناریوی بررسی‌شده، میزان بارش نسبت به دوره پایه افزایش یافته است.

جدول ۲، میانگین بارش سالانه داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده در ایستگاه‌های مطالعه‌شده طی دو دوره زمانی آینده ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۲۰۱۶-۲۰۵۰ تحت سناریوهای استفاده‌شده را نشان می‌دهد. تمامی سناریوها افزایش محسوسی از میزان بارش را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهند و در بین سناریوهای بررسی‌شده RCP8.5، بیشترین مقدار را برآورد کرده است.

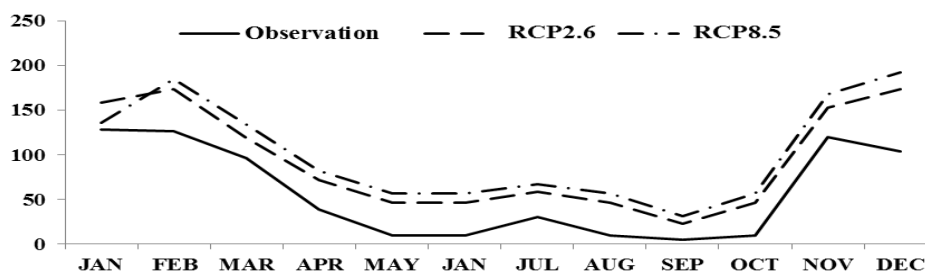
شکل ۳، مقدار R-factor را در دوره‌های بررسی‌شده و سناریوها نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بیشترین میزان R در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ تحت سناریوی RCP8.5 با مقدار $1.83 \text{ h-1 y-1 MJ mm ha-1}$ و در دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ تحت سناریوی RCP8.5 با مقدار $1.82 \text{ h-1 y-1 MJ mm ha-1}$ است. به طور کلی، در آینده شاهد افزایش روند عامل فرساینده‌گی باران در منطقه مطالعه‌شده خواهیم بود.

مرتع به اراضی زراعی) خواهد بود. برای انتخاب زیرمدل‌هایی که بیشترین صحت را داشته باشند، ضروری است که مدل چندین مرتبه با سناریوهای مختلف اجرا شود. بعد از انجام این مرحله، شش زیرمدل برای مدل‌سازی نیروی انتقال با استفاده از پرسپترون چندلایه شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شدند. در تحقیق حاضر زیرمدل‌ها عبارت‌اند از: مرتع به زمین بایر، مرتع به زراعت، نخلستان به مسیل، برون‌زدگی سنگی به مرتع، زراعت به مسکونی، نخلستان رهاشده به گالی. همچنین، متغیرهای استفاده‌شده در مدل عبارت‌اند از: ۱. مدل رقومی ارتفاع، ۲. شیب، ۳. فاصله از جاده، ۴. فاصله از جریان، ۵. فاصله از مسکونی.

برای تعیین همبستگی بین متغیرهای مستقل و میزان تغییر (متغیر وابسته) از ضریب همبستگی کرامر استفاده شد. متغیرهای استفاده‌شده در تحقیق حاضر در اغلب مطالعات مدل‌سازی، تغییرات کاربری اراضی هستند. برای مثال، نزدیکی به جاده، شهر و حاشیه جنگل/ غیر جنگل در جنوب کامرون متغیرهای مهمی در مدل‌سازی تغییرات جنگل گزارش شد [۳۰]. ارتفاع و نزدیکی به جاده نیز عوامل مهمی در تغییرات جنگل در زمین‌های کم‌ارتفاع در سوماترا تشخیص داده شدند [۳۱]. نقشه انتقال از کل کاربری‌ها به اراضی کشاورزی و نقشه انتقال از کل کاربری‌ها به مناطق مسکونی تولید و سپس با استفاده از ابزار تغییر شکل احتمال شواهد و نقشه پوشش اراضی سال قدیمی‌تر در ورودی مدل متغیرهای کیفی تولید شدند.

مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی

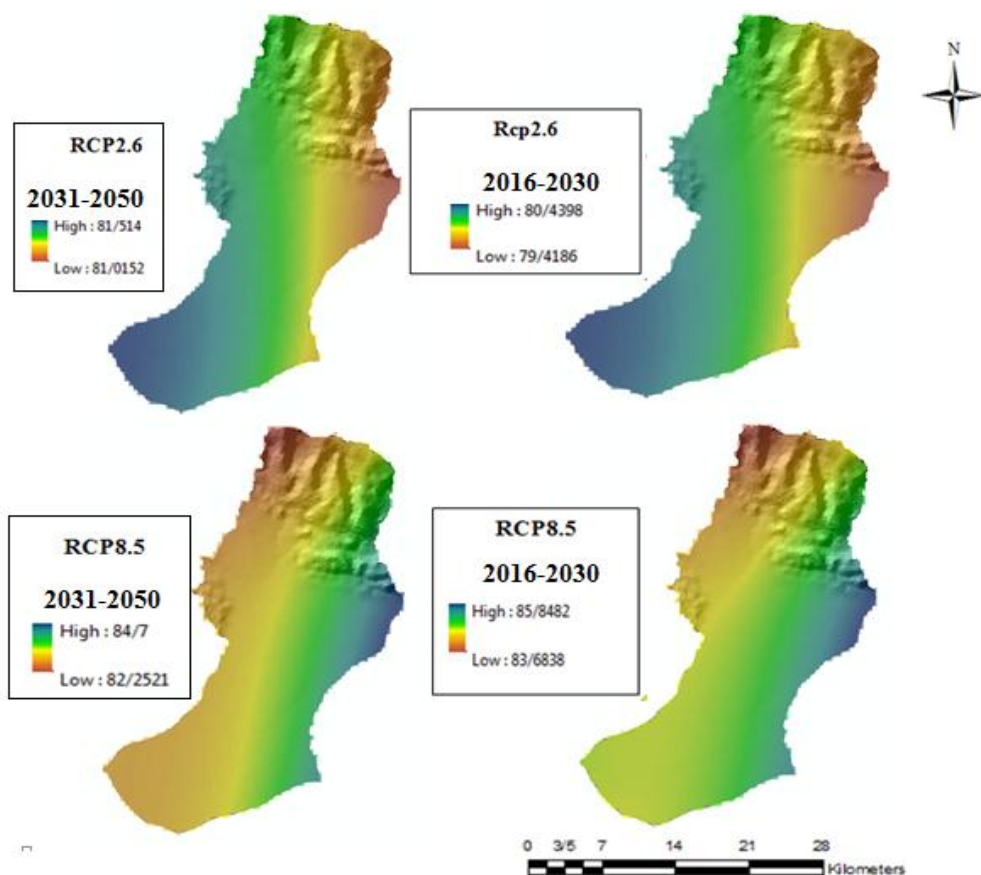
احتمال انتقال محاسبه‌شده از هر کاربری به کاربری دیگر با استفاده از زنجیره مارکوف محاسبه شد. در مدل مارکوف حالت سیستم در زمان دوم می‌تواند براساس حالت سیستم در زمان یکم پیش‌بینی شود و در نتیجه آن ماتریس احتمالات انتقال به مشابه پایه مدل‌سازی پیش‌بینی تغییر کاربری



شکل ۲. نمودار مقایسه میانگین ماهانه بارش مشاهده‌ای و تولیدشده سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 بندرلنگه

جدول ۲. میانگین بارش سالانه تحت سناریوهای مدل SDSM در ایستگاه‌های بررسی شده

ایستگاه	سناریوی RCP8.5		سناریوی RCP2.6		داده‌های مشاهداتی (۱۹۸۲-۲۰۱۵)
	۲۰۳۰-۲۰۳۱	۲۰۱۶-۲۰۳۰	۲۰۳۰-۲۰۳۱	۲۰۱۶-۲۰۳۰	
بندر لنگه	۶۸	۹۳	۷۲	۸۶	۵۷
جزیره کیش	۶۷	۵۸	۵۲	۵۳	۵۰
بندر چارک	۱۵۳	۱۷۸	۱۴۹	۱۵۶	۱۴۶
بستک	۱۶۲	۱۵۳	۱۲۹	۱۳۳	۱۱۷



شکل ۳. نقشه عامل فرساینده باران تحت سناریوهای بررسی شده

معنا که از وسعت اراضی مرتعی کاسته شده و بر اراضی غیرمرتعی افزوده می‌شود. همچنین، مساحت تغییرات کاربری‌ها طی دوره گذشته و آینده در جدول ۴ و شکل ۴ ارائه شده است. پس از برآورد تغییرات پوشش گیاهی، فاکتور C در مدل RUSLE برای دو دوره یادشده برآورد شد (شکل ۶). براساس نتایج به دست آمده، میزان فاکتور پوشش گیاهی در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ بین ۰/۲۶ تا ۰/۶۲ و در دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ بین ۰/۳۸ تا ۰/۷۲ متغیر است. بنابراین وضعیت پوشش گیاهی نیز در دو دوره آینده بهبود و در دوره دوم شاهد روند روبه رشد بیشتر آن خواهیم بود.

پیش‌بینی کاربری اراضی و پوشش گیاهی با استفاده از

مدل LCM

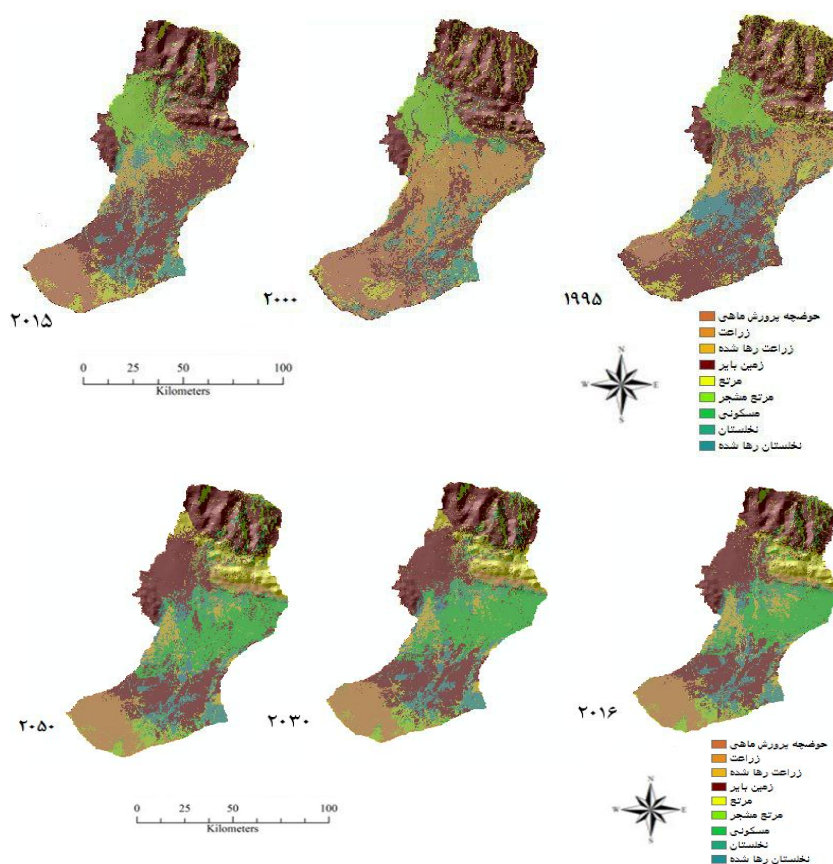
ماتریس احتمال انتقال با استفاده از زنجیره مارکوف، یکی از ورودی‌های مهم برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در شبکه عصبی مصنوعی است. ماتریس احتمال انتقال طی سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۵۰ در جدول ۳ ارائه شده است. در منطقه مطالعه شده براساس جدول ۳، نه طبقه کاربری اراضی وجود دارد. با توجه به نتایج به دست آمده از طریق مدل LCM بیشترین احتمال تغییر کاربری اراضی از مرتع با زمین بایر و حوضچه پرورش ماهی بوده است. به این

جدول ۳. ماتریس احتمال انتقال تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۵۰

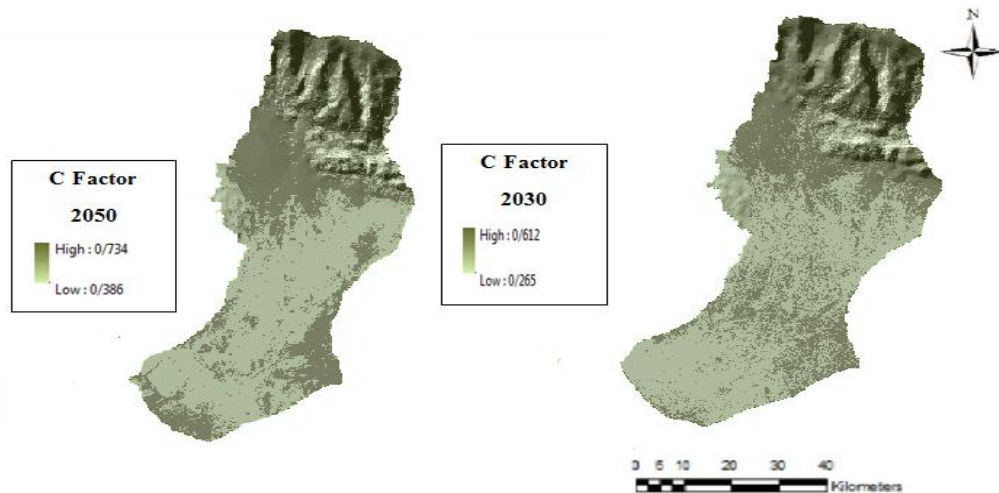
کاربری اراضی	مرتع	حوضچه پرورش ماهی	زراعت	زراعت رهاشده	زمین بایر	مرتع مشجر	مسکونی	نخلستان	نخلستان رهاشده
مرتع	-	۰/۰۳	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۲۸	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۶
پرورش ماهی	۰/۰۲	-	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۲
زراعت	۰/۰۱	۰/۰۴	-	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۸
زراعت رهاشده	۰/۰۰۱۱	۰/۰۶	۰/۰۰۲	-	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۶
زمین بایر	۰/۱۳	۰/۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	-	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱
مرتع مشجر	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	-	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۰۹
مسکونی	۰/۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲۳	-	۰/۰۶	۰/۰۸
نخلستان	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	-	۰/۱۱
نخلستان رهاشده	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۱۴	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۸	-

جدول ۴. مساحت کاربری اراضی در دوره‌های زمانی بررسی شده به کیلومتر مربع

کاربری	سال ۱۹۹۵	سال ۲۰۰۰	سال ۲۰۱۵	سال ۲۰۱۶	سال ۲۰۳۰	سال ۲۰۵۰
مرتع	۲۸/۲۴	۲۸/۲	۳۶/۶۴	۳۵/۴۸	۳۳/۸۴	۳۲/۷۵
پرورش ماهی	۱۰/۶	۱۲/۲	۲۴/۹۷	۲۹/۲۸	۳۱/۱۳	۳۲/۱۴
زراعت	۳/۸	۵/۱	۱	۱	۱	۱
زراعت رهاشده	۳۲/۷	۶/۷	۲۲/۳	۱۵/۵۱	۱۱/۲۷	۱۰/۸۳
زمین بایر	۳۴/۳	۲۷/۱	۲۱/۵۹	۱۷/۸۴	۱۷/۶۳	۷۱/۱۷
مرتع مشجر	۲۲/۱	۲۲/۸	۲۴/۹۴	۲۴/۹۴	۲۴/۹۴	۲۴/۹۴
مسکونی	۴/۴	۶/۷	۱۰/۵	۱۰/۵۱	۱۰/۵۱	۱۰/۵۱
نخلستان	۳/۱۳	۹/۳۱	۹/۴	۹/۴	۹/۴	۹/۴
نخلستان رهاشده	۲۱/۲	۷/۸	۱۲/۷	۱۲/۷۶	۱۲/۸	۱۲/۹



شکل ۴. نقشه پوشش اراضی منطقه طی دوره‌های بررسی شده



شکل ۵. نقشه عامل پوشش گیاهی (C-factor) در دوره‌های زمانی ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۲۰۲۱-۲۰۵۰

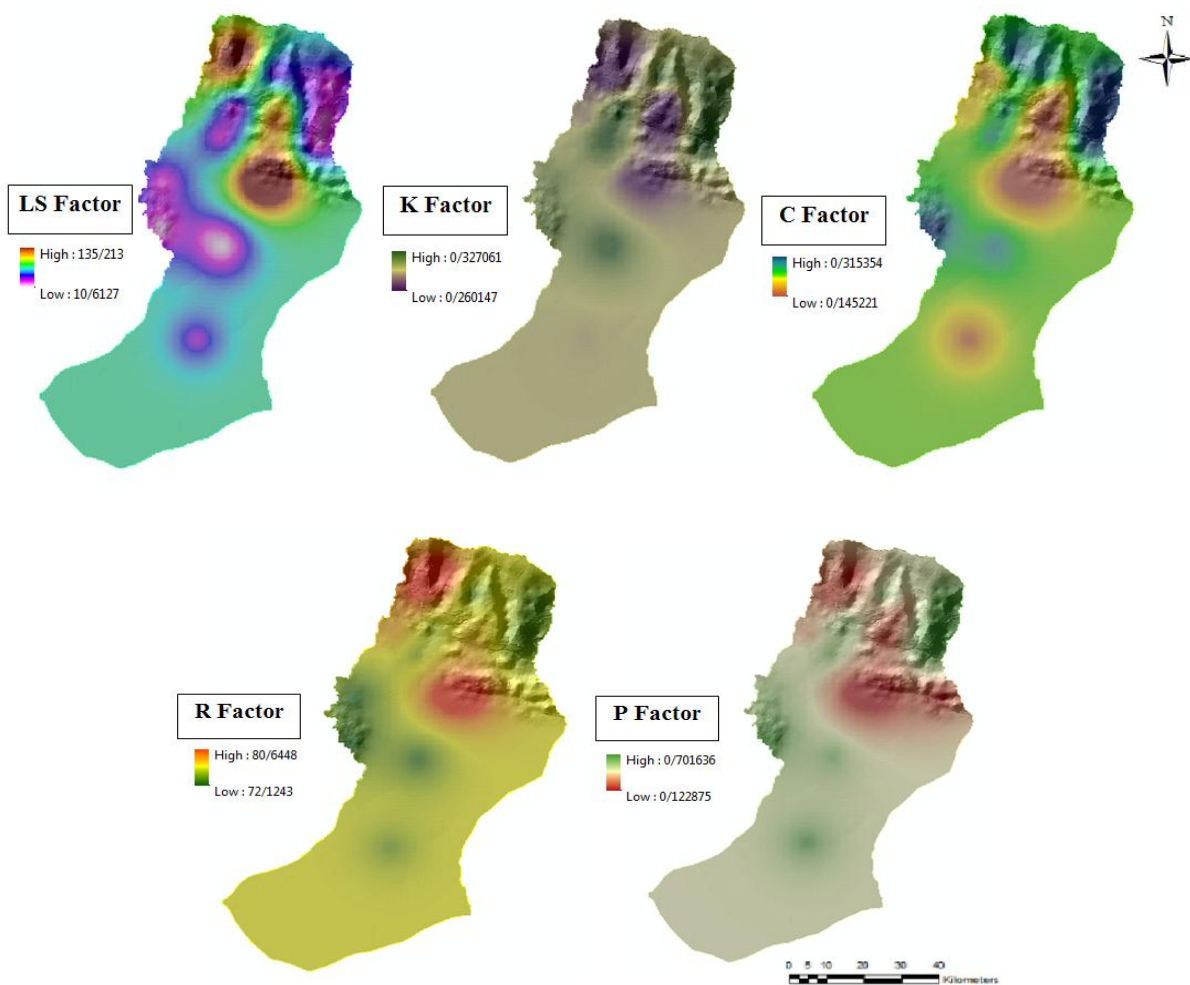
هکتار سال برآورد شد.

در نهایت، با جای‌گذاری دو عامل فرسایش‌دهی باران (R-factor) و عامل پوشش گیاهی (C-factor) و ثابت در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر در معادلهٔ RUSLE، میزان فرسایش خاک در دو دورهٔ زمانی آینده در سناریوهای مختلف پیش‌بینی و محاسبه شد (شکل ۸). نتایج بیان‌کنندهٔ آن است که با توجه به افزایش میزان بارش و به تبع آن، افزایش عامل فرسایش‌دهی باران و همچنین بهبود وضعیت پوشش گیاهی و افزایش عامل C، میزان فرسایش خاک نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به جدول ۵، بیشترین میزان فرسایش پیش‌بینی شده مربوط به دورهٔ زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۰ نسبت به دورهٔ پایه است، متوسط میزان فرسایش برآوردشده توسط دو سناریو در این دوره، ۱۱/۴۵ (تن در هکتار طی یک سال) است. این در حالی است که میزان فرسایش در دورهٔ ۲۰۳۱-۲۰۵۰، ۱۰/۲ (تن در هکتار در سال) است. میزان پوشش گیاهی در دورهٔ نخست نسبت به دورهٔ دوم کمتر و میزان فرسایش برآوردشده بیشتر است. در هر دو دورهٔ زمانی، میزان فرسایش تحت سناریوی RCP8.5 به واسطهٔ بیشتر بودن فاکتور فرسایش‌پذیری خاک و کمتر بودن پوشش گیاهی، نسبت به سناریوی دیگر بیشتر است. در مورد میزان رسوب ویژه و نسبت تحویل رسوب نیز همین گونه است.

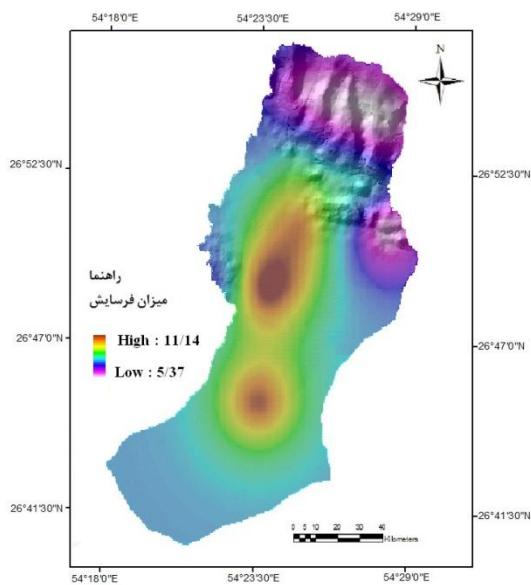
نتایج به‌دست‌آمده از برآورد فرسایش و رسوب با استفاده

از مدل RUSLE

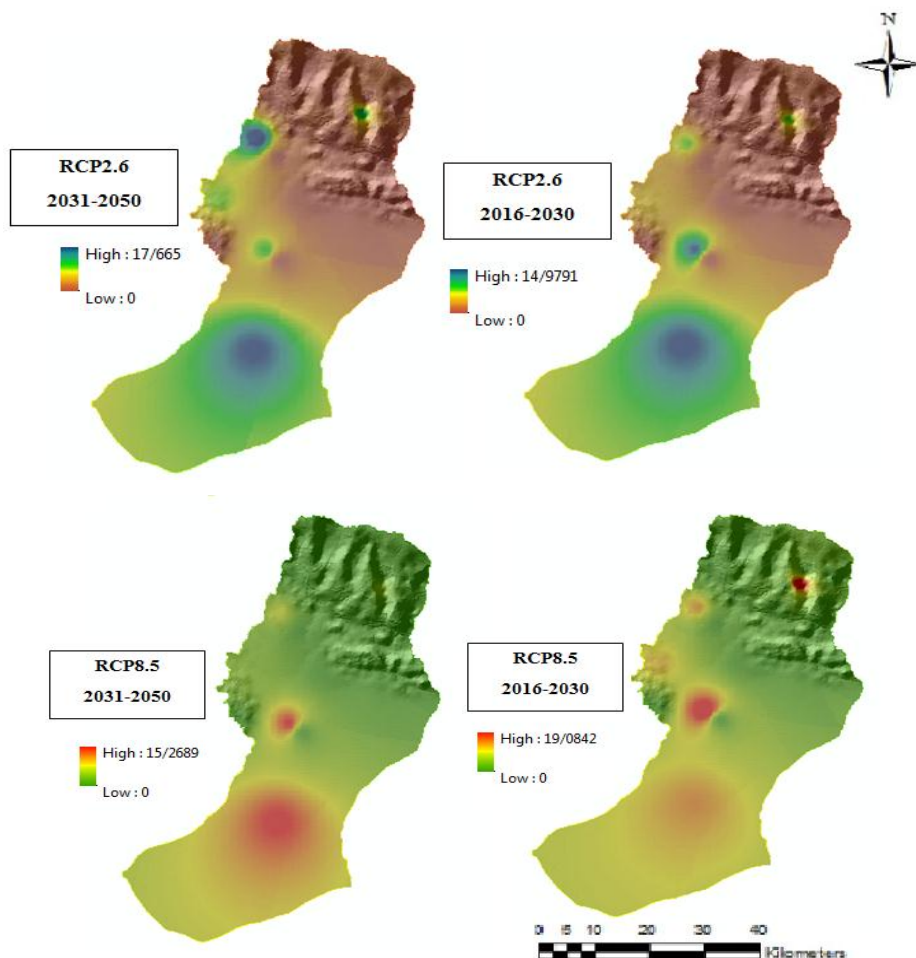
برای تهیهٔ نقشهٔ میزان رسوب‌دهی حوضهٔ آبخیز کندران، پنج لایهٔ تولیدشده شامل لایه‌های شیب و طول شیب به‌صورت لایهٔ ارتفاعی، لایهٔ فرسایش‌پذیری خاک، حفاظت خاک، پوشش گیاهی و فرسایش‌دهی باران در محیط GIS با یکدیگر ترکیب شده و نقشهٔ نهایی به دست آمد. شکل ۶ تصویر فاکتورهای تولیدشده در روش RUSLE و شکل ۷، میزان فرسایش حوضهٔ آبخیز کندران را در دورهٔ پایه نشان می‌دهد. با تجزیه و تحلیل نقشه‌های به‌دست‌آمده فاکتور فرسایش‌دهی باران (R-factor) ۷۲-۸۰؛ فرسایش‌پذیری خاک (K-factor) ۰/۳۲-۰/۲۶، مقادیر فاکتور پوشش گیاهی (C-factor) ۰/۱۴-۰/۳۱ و فاکتور مدیریت زمین (P-factor) ۰/۱۲ تا ۰/۷۲ است. بررسی نقشهٔ خطر فرسایش خاک نشان داد مناطق کم‌ارتفاع حوضه با پوشش گیاهی فقیر قرار دارند و فاکتورهای پوشش گیاهی، بارندگی و فرسایش‌پذیری خاک به‌ترتیب در اولویت‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بخش بزرگی از حوضه دارای کلاس فرسایش کم بوده که بیشتر در بخش‌های کناری حوضه واقع شده است. مقادیر فرسایش خاک در منطقهٔ مطالعه‌شده در دورهٔ پایه ۹/۶۸ تن در



شکل ۶. لایه‌های استفاده‌شده در مدل RUSLE در سال ۲۰۱۵



شکل ۷. نقشه فرسایش خاک حوضه آبخیز کندران در سال ۲۰۱۵



شکل ۸. نقشه فرسایش پیش‌بینی شده در دو دوره آینده تحت سناریوهای مختلف

جدول ۵. نتایج به‌دست آمده از پیش‌بینی میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز کندران با استفاده از مدل RUSLE تحت سناریوهای استفاده‌شده

سناریو	فرسایش ویژه (تن در هکتار در سال)		نسبت تحویل رسوب (SDR)		رسوب ویژه (m ³ / Km ² .Year)	
	۲۰۳۰-۲۰۵۰	۲۰۱۶-۲۰۳۰	۲۰۳۰-۲۰۵۰	۲۰۱۶-۲۰۳۰	۲۰۳۰-۲۰۵۰	۲۰۱۶-۲۰۳۰
RCP2.6	۹/۸۴	۱۱/۳	۰/۴۳	۰/۸	۶/۳۷	۶/۸۶
RCP8.5	۱۰/۵۲	۱۱/۴۵	۰/۵۳	۰/۵۹	۸/۴۲	۸/۷۲
متوسط	۱۰/۲	۱۱/۳۷	۰/۴۸	۰/۷	۷/۴	۷/۸

بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف پیش‌بینی میزان فرسایش در آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی با استفاده از معادله جهانی خاک RUSLE، در حوضه آبخیز کندران صورت پذیرفته است. بر این اساس، فاکتور فرساینده‌گی باران (R-factor) که تحت تأثیر مستقیم تغییر اقلیم است، با استفاده از سناریوهای گزارش پنجم و دو دوره پیش‌بینی

شد. فاکتور پوشش زمین (C-factor) که تحت تأثیر مستقیم اقلیم و فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد، نیز طی دو دوره یادشده با استفاده از مدل LCM پیش‌بینی شد و با دو فاکتور یادشده به همراه چهار فاکتور دیگر مدل RUSLE، تغییرات هدررفت خاک و رسوب در آینده نزدیک ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۲۰۳۱-۲۰۵۰ پیش‌بینی شد. نتایج به‌دست‌آمده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش

نتایج به دست آمده از پیش‌بینی R-factor در حوضه آبخیز بررسی شده نشان داد با توجه به افزایش بارش، شاهد افزایش آن در آینده هستیم. افزایش بارش سبب افزایش فرسایش‌پذیری خاک می‌شود. پژوهشگران بسیاری از جمله زارع و همکارانش [۱]، محمدی و همکارانش [۴۲] و [۴۳] نیز به این نکته اشاره کرده‌اند.

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با مدل LCM تا سال ۲۰۵۰ نشان داد بیشترین احتمال تبدیل کاربری اراضی زمین از مرتع به زمین بایر و حوضه پرورش ماهی وجود دارد، به طوری که از مساحت مراتع کاسته شده و بر مساحت دو کاربری یادشده اضافه می‌شود. بر این اساس، در دو دوره بررسی شده، نقشه تغییرات پوشش گیاهی تهیه و C-factor استخراج شد.

تغییرات C-factor، در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ کمتر از دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ برآورد شد، ولی عموماً میزان تغییرات آن نسبت به گذشته افزایش نشان می‌دهد. با توجه به افزایش بارش، افزایش پوشش گیاهی نیز قابل پیش‌بینی است.

در نهایت، با ثابت گرفتن چهار فاکتور و پیش‌بینی C-factor و R-factor، در دوره‌های بررسی شده، میزان فرسایش با مدل RUSLE برآورد شد. نتایج نشان داد با توجه به افزایش بارش و افزایش R-factor، C-factor بهبود یافته و به تبع فرسایش می‌یابد. به طور کلی، میزان فرسایش از ۹/۸ به ۱۲/۳۲ (تن بر هکتار در سال) در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۱۱/۰۶ در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. همچنین، میزان تحویل رسوب و رسوب ویژه از ۶/۲ به ۷/۸ (مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال) طی دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ و ۷/۴ در دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ افزایش می‌یابد.

در نهایت، نتایج تحقیق حاضر نشان داد براساس سناریوهای تغییر اقلیمی و تغییر کاربری اراضی تا سال ۲۰۳۰، ۱۶ درصد و تا سال ۲۰۵۰، ۲۰ درصد بر میزان فرسایش افزوده خواهد شد. بنابراین، فرسایش و هدررفت خاک امری اجتناب‌ناپذیر است که به برنامه‌ریزی مدیریتی و کاهش آثار ناشی از آن نیاز دارد.

منابع

[1]. Zare M, Nazari A.A, Mohammadi M, Teimourian T, Bazrafshan J. Simulation of soil erosion under the influence of climate change scenarios, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016; 75: 1405.

در چهار ایستگاه اطراف حوضه آبخیز کندران نشان داد میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه در دو سناریوی بررسی شده افزایش می‌یابد. چنان که به طور متوسط در دو سناریوی طی سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۰ حدود ۲۳ درصد و در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰، ۱۵ درصد میزان بارش افزایش می‌یابد. بیشترین میزان برآوردشده بارش طبق انتظار، مربوط به سناریوی RCP8.5 (سناریوی بدبینانه) در دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۰ بود. کوچکی و همکارانش [۳۳] با استفاده از خروجی‌های مدل GFDL و نیز عباسی و همکارانش [۳۴] با استفاده از مدل ECHAM4 کاهش بارش را در جنوب ایران محتمل می‌دانند. در حالی که، ناطقی و همکارانش [۳۵] طی انجام پژوهشی در جنوب ایران افزایش بارش را احتمال می‌دهند. لیلولد و همکارانش [۳۶] طی پژوهشی با استفاده از گزارش چهارم و سناریوی A1B، افزایش بارش را در خلیج فارس و خلیج عرب محتمل می‌دانند. همچنین، سلومون و همکارانش [۳۷] افزایش بارش را تا سال ۲۰۵۰ در مناطق حاره‌ای تا ۲۵ درصد احتمال می‌دهند. بنابراین، به نظر می‌رسد افزایش بارش در آینده در این حوضه محتمل است. از طرفی، طبق نظر پری و همکارانش [۳۸] اختلاف در پیش‌بینی‌های اقلیمی انواع مدل‌های GCM، ناشی از فرضیات به کار گرفته شده، شیوه ریزمقیاس‌نمایی و منطقه مطالعه شده است که در بسیاری از پژوهش‌ها نیز آمده است.

نتایج به دست آمده از استفاده از دو سناریوی بررسی شده نشان داد سناریوی RCP8.5 بیشترین مقادیر را برآورد کرده است. وجه مشخصه این سناریو، روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است و بدون به کارگیری هیچ گونه سیاست کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP 8.5 پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ منجر می‌شود. در این هنگام غلظت دی‌اکسید کربن به ppm ۱۰۰۰ رسیده و همچنان روند افزایشی خواهد داشت. افزایش فاکتورهای هیدرواقلیمی با استفاده از این گزارش توسط بسیاری از پژوهشگران نظیر آقاخانی افشار و همکارانش [۳۹]؛ عزیزآبادی فراهانی و همکارانش [۴۰] و گودرزی و فاتحی‌فر [۴۱] اشاره کرد.

- [2]. Arun Mondal D. Kh, Sananda K, Pramod Kumar M, Mishra P. K and Rituraj Sh. Impact of Climate Change on Future Soil Erosion in Different Slope, Land Use, and Soil-Type Conditions in a Part of the Narmada River Basin, India, *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014; 20(6): 1-13.
- [3]. Simonneaux V, Cheggour A, Deschamps C, Mouillot F, Cerdan O, Le Bissonnais Y. Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-aridmountainous watershed (High Atlas, Morocco). *J. Arid Environ*, 2015; 122: 64-75.
- [4]. Deepak K.h, Arun M, Sananda K, Prabhaskumar M. Climate change impact on soil erosion in the Mandakini River Basin, North India, *Springer*, 2017; 7(3):2373-2383.
- [5]. Asghari Esrazankrood P, Mrgari L, Piroozi A. Investigation of Land Use Change Changes and its Effect on Erosion Using RS and GIS (Case Study, Nair County), *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 2018; 8 (4): 62-49.[persian]
- [6]. Mishra V. N, Rai P. K, Mohan K. Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: a case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute " Jovan Cvijic", SASA*, 2014; 64(1): 111-127
- [7]. Paroissien J. B, Darboux F., Couturier, A, Devillers B, Mouillot F, Raclot D, Le Bissonnais Y. A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Journal of environmental management*, 2015; 150:57-68.
- [8]. Tavangar S.h, Moradi H, Masha-Boani, A.S, Azari M. Prediction of climate change effect on rainfall erosion on the southern coast of the Caspian Sea, *Engineering and Watershed Management*, 2016; 3(4): 424-414.[persian]
- [9]. Segura C, Sun G, McNulty S, Zhang Y. Potential impacts of climate change on soil erosion vulnerability across the conterminous United States. *J. SoilWater Conserv*, 2014; 69 (2): 171-181.
- [10]. Haan C.T, Barfield B.J, and Hayes J.C. Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press, San Diego, 1994; 588p.
- [11]. Delgado M. I, Gaspari F. J, Kruse E. E. Land Use Changes and Sediment Yield on a Hilly Watershed in Central-East Argentina. *Soil & Water Res*. 2015; 10 (3): 189-197.
- [12]. Serpa D, Nunes J.P, Santos J, Sampaio E, Jacinto R, Veiga S, Lima J.C, Moreira M, Corte-Real J, Keizer J.J, Abrantes N. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Sci. Total Environ*, 2015; 538: 64-77.
- [13]. Erfanian M, Ghaharahmani Saatloo P, Saadat H. Assessment of Soil Erosion Risk using a Fuzzy Model in Gharnaveh Watershed, Golestan. *J. Water and Soil Conserv*, 2015, 21(6), 135-154.
- [14]. Torabian moghadam E, Naderi, M, Mohammadi J, Fatahi, R. Temporal and Spatial variations of Rainfall Erosivity in Southwest of Iran. *J. Water and Soil Conserv*, 2015, 21(4), 139-157.
- [15]. Seyedalipour H, Feiznia S, Ahmadi H, Zare M, Hosseinalizadeh, M., Comparison of Soil Erosion by 137CS and RUSLE-3D for Loess Deposits North-East of Iran (Study Area: Aghemam Catchment). *J. Water and Soil Conserv*, 2014, 21(5), 27-47.
- [16]. Rahmati, S. JavadiTabalvandani M, Rangavar, A, Faramarz, M. Evaluating of efficiency and accuracy of USLE, AOF, MUSLE-S and MUSLE-E models on estimating of event-based erosion amount (Case study: Sanganeh soil conservation research Institute of Mashhad). *J. Water and Soil Conserv*, 2014, 21(4), 215-229.
- [17]. Hafez Karaj Consulting Engineer. Identification studies - Explanation of erosion and sedimentation of Kondaran watershed. 2013.[persian]
- [18]. Refahi Hussein. Water erosion and its control, Tehran University, Fourth Edition, 1999; 671 p.
- [19]. Renard K. G, Freimund J.R. use monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE, *J. Hydrol*, 1994; 157: 287-306.
- [20]. Wischmeier W.H. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil and Water Conservation*, 1971; 26: 189-193.
- [21]. Moore I.D, Wilson J.P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *J. Soil and Water Conservation*, 1993; 47(15): 423-428.
- [22]. Benkobi L, Trlica M.J, and Smith J.L. Evaluation of a refined surface cover subfactor for use in RUSLE. *J. Range Manage*, 1994; 47(12): 74-78.
- [23]. Biesemans J, Meirvenne M.V, and Gabriels D. Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *J. Soil Water Conservation*, 2000; 55(6): 35-42.
- [24]. Arora V. K, Scinocca J. F, Boer G. J, Christian J. R, Denman K. L, Flato G. M, Kharin, V. V, Lee W. G. and Merryfield W. J.

- Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 2011; 38(5): 1-6.
- [25]. IPCC. Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York. 2013.
- [26]. Wilby R. L, Dawson C. W, Murphy C, Connor P. O', Hawkin E. tati tical own caling Mo l – ci ion ntric(SDSM-DC): conceptual basis and applications. *Climate Research*, 2014; 61(3): 251-268.
- [27]. Taei Semiromi S, Moradi H. R, Khodagholi, M. Simulation and prediction some of climatic variables by multiple linear model SDSM and atmospheric general circulation models (case study: Neishabour). *Journal of Human & Environment*, 2014; 12(28):1-16.
- [28]. Khoi D.D, Murayama Y.. Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam. *Remote Sensing*, 2010; 2 (5): 1249–1272.
- [29]. Schulz J.J. Factors influencing vegetation cover change in Mediterranean Central Chile (1975–2008). *Applied Vegetation Science*, 2011; 14 (4): 1-12.
- [30]. Merten, B., E.F., Lambin, Spatial modeling of tropical deforestation in southern Cameroon: spatial disaggregation of diverse deforestation processes. *Applied Geography*, 1997, 17 (2), 143-162.
- [31]. Linkie M , Smith R.J, Leader-Williams N. Mapping and predicting deforestation patterns in the lowlands of Sumatra. *Biodiversity and Conservation*, 2004; 13 (10), 1809-1818.
- [32]. Fan F, Wang Y, Wang Z. Temporal and spatial change detecting (1998–2003) and predicting of land use and land cover in Core corridor of Pearl River Delta (China) by using TM and ETM⁺ images. *Environmental Monitoring Assessment*, 2008; 137 (1-3), 127-147.
- [33]. Koocheki A, Nassiri Mahallati M, Jafari L. Evaluation of Climate Change Effect on Agricultural Production of Iran: I. Predicting the Future Agroclimatic Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 2016;4(13): 651-664.[persian]
- [34]. Abbasi F, Babaian A, Habibi Nokhandan M, Goli Mokhtari L, Malbousi S.H, Asgari S.H. Assessing the impact of climate change on Iran's temperature and precipitation over the coming decades, or the MAGICC-SCENGEN model, *Natural Geography Research*. 2011; 5(72): 91-109. [persian]
- [35]. Nateghi S, Nohegar A, Ehsani A, Bazrafshan O. Coastal desert land use monitoring using change vector analysis technique during 2001 to 2014 (Case study: Qeshm Island), 2016; 23(2): 416-404. [persian]
- [36]. Lelieveld J, Hadjinicolaou P, Kostopoulou E, Chenoweth, J, El Maayar, M, Giannakopoulos C, Xoplaki E. Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Climatic Change*, 2012; 114(3-4): 667-687.
- [37]. 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [38]. Aghakhaniafshar A, Hasanzadeh Y, Besalarpour A.A, Poureza M. Seasonal Changes of Precipitation and Temperature of Mountainous Watersheds in Future Periods with Approach of Fifth Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (Case study: Kashafrood Watershed Basin). *J. Soil and Water*, 2016, 30(5); 118-1732.
- [39]. Azizabadi Farahani M, Bakhtiari, B, Ghaderi, K, Rezapour, M. Impact of climate change on severity- duration and frequency of Gherasoo watershed using copula. *J. Soil and Water Res*, 2016, 47(4): 754-743.
- [40]. Goodarzi M, Fatehifar A. Flood hazard mapping affected climate change using RCP8.5 and SWAT (Shahrchai watershed). *Scien J Manage Syst*, 2017, 53(19): 99-117.
- [41]. Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., and Livermore, M., Climate change and world food security: a new assessment. *Global Environmental Change* 1999, 9: S51-S67.
- [42]. Mohammadi, S., Karimzadeh, H., Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2), 551-569. doi: 10.22059/ije.2018.239777.706.
- [43]. Mohammadi, M., Fallah, M., Kavian, A., Gholami, L., Omidvar, E. (2016). The Application of RUSLE Model in Spatial Distribution Determination of Soil loss Hazard. *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(4), 645-658. doi: 10.22059/ije.2016.60368.