

پیش‌بینی اثر ترکیبی تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر فرسایش خاک در ایران با استفاده از داده‌های جهانی GloSEM

هادی معماریان^{۱*}، مرتضی اکبری^۲

۱. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲. استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۱۲؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

فرسایش خاک فرایندی پیچیده با اثر نامطلوب محیط زیستی است. امروزه، در مقیاس جهانی، با مدل‌سازی تأثیر عوامل طبیعی و انسانی بر شدت فرسایش خاک، امکان تعیین پیش‌ران‌های اصلی بوم‌سازگان، برای سیاست‌گذاری کارآمد در مدیریت بهینه خاک فراهم شده است. بنابراین، در مطالعه حاضر برای پیش‌بینی فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز ایران از داده‌های اعتبارسنجی شده پروژه برآورد جهانی فرسایش خاک در پایگاه GloSEM شامل سناریوی پایه (۲۰۱۵) و پیش‌بینی‌های آینده (۲۰۷۰) فرسایش خاک با اثر تغییر اقلیم در ۳ سناریوی اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 بر عامل فرسایش باران (R) و اثر تغییر کاربری اراضی در ۳ سناریوی تلفیقی SSP1-RCP2.6، SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 بر عامل پوشش گیاهی (C) و عامل حفاظت خاک (P) است، استفاده شد. نتایج نشان داد آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز مرکزی، جنوبی و شرق کشور از تغییرات ترکیبی اقلیم و کاربری اراضی بیشتر از سایر حوضه‌هاست. به طوری که در این آبخیزها، حتی بدون در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم، روند تغییرات فرسایش خاک بین سناریوی پایه (۲۰۱۵) با سناریوهای SSP5-RCP8.5 و SSP2-RCP4.5 افزایشی بوده، ولی در آبخیزهای مرطوب یا نیمه‌مرطوب شمالی و غربی کشور کاهش یافته است. با در نظر گرفتن اثر ترکیبی تغییر کاربری و اقلیم، روند تغییرات فرسایش خاک بین سناریوی پایه (۲۰۱۵) با سناریوهای SSP1-RCP2.6 (با میانگین افزایش ۱۸۴ درصد)، SSP2-RCP4.5 (با میانگین افزایش ۲۴۳ درصد) و SSP5-RCP8.5 (با میانگین افزایش ۳۴۱ درصد) در تمامی آبخیزها به جز آبخیز ارس افزایشی بوده است. نتایج تحقیق بیانگر آسیب‌پذیری بیش از ۱۰ برابری حوضه‌های آبخیز مرکزی ایران ناشی از تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی تا سال ۲۰۷۰ است.

کلیدواژگان: پیش‌بینی فرسایش خاک، تخریب سرزمین، مدل‌های اقلیمی، مدل جهانی فرسایش خاک، مدیریت حوضه‌های آبخیز.

مقدمه

فرسایش خاک فرایندی پیچیده با تأثیرات آشکار و پنهان اجتماعی-اقتصادی و محیطی است [۱]. این فرایند، چالشی مهم برای زمین‌های حاصلخیز در سراسر جهان محسوب می‌شود. عواقب هشداردهنده این تهدید، عملکرد کم محصولات زراعی، کاهش دسترسی به آب سالم و شیرین، افزایش آسیب‌پذیری ناشی از تغییرات اقلیم، ناامنی غذایی و در نهایت، فقر خواهد بود [۲ و ۳]. شدت فرسایش خاک بستگی به عوامل زیادی از جمله توپوگرافی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، شبکه هیدروگرافی، رژیم بارش، کاربری اراضی و پوشش سطحی زمین و شیوه‌های نامناسب مدیریت اراضی دارد [۴-۶]. اگرچه فرسایش خاک فقط یکی از جلوه‌ها و جنبه‌های تخریب سرزمین است، اما می‌توان آن را مهم‌ترین عامل تلقی کرد، زیرا با کاهش کیفیت مواد مغذی در خاک هزینه‌های تولید مواد غذایی افزایش می‌یابد و در نتیجه، باعث خسارت‌های اجتماعی-اقتصادی و محیطی می‌شود [۷]. آخرین گزارش سازمان ملل در مورد منابع جهانی خاک بیانگر آن است که بیشتر منابع خاک در شرایط متوسط، ضعیف و یا بسیار ضعیف است و تأکید می‌شود که فرسایش خاک هنوز هم یک تهدید بزرگ محیط زیستی در سراسر جهان است [۸]. شخم زدن اراضی، شیوه‌های نامناسب کشاورزی، همراه با جنگل‌زدایی و چرای بیش از حد دام، از دلایل اصلی فرسایش خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی است [۹ و ۱۰]. این عوامل باعث ایجاد یک سری اثر نامطلوب در خدمات بوم‌سازگان^۱ مانند از دست دادن مواد مغذی، کاهش ذخیره کربن، کاهش تنوع زیستی، کاهش پایداری خاک و در نهایت، کاهش امنیت غذایی می‌شود [۱۱-۱۳]. عوامل اصلی انسانی فرسایش خاک، تغییرات کاربری اراضی و تغییر اقلیم است که در یک فرایند پیچیده هیدرولوژیکی منجر به تشدید فرسایش خاک می‌شوند [۱۴ و ۱۵]. خطر کاهش امنیت غذایی متأثر از تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های بزرگ قرن پیش رو است که تأثیر آن بر عملکرد محصولات کشاورزی در آماره‌های مختلف قابل مشاهده است [۱۶]. تغییرات اقلیمی به روش‌های مختلفی بر مصرف و امنیت مواد

غذایی تأثیر می‌گذارد، مانند تأثیر بر ایمنی غذا از طریق زنجیره عرضه، تأثیر بر سلامت مواد غذایی، تأثیر بر بهره‌وری کشاورزی و عملکرد محصول و تأثیر بر اقتصاد جامعه که به کاهش قدرت خرید مردم و یا افزایش حق الزحمه تولید غذا منجر می‌شود [۱۷-۱۹]. ماده ۱ کنوانسیون مبارزه با بیابان‌زایی سازمان ملل متحد^۲، که در مارس ۲۰۲۰ توسط ۱۹۷ کشور تصویب شد، فرسایش خاک را دلیل اصلی تخریب زمین می‌داند که به نوبه خود از طریق تأثیرات منفی بر کشاورزی، امنیت غذایی و بوم‌سازگان به فقر و نابرابری کمک می‌کند [۲۰ و ۲۱]. شواهد علمی نشان می‌دهد گرم شدن کره زمین در حال حاضر نابرابری اقتصادی را در دنیا افزایش داده [۲۲ و ۲۳] و بر روند افزایشی مهاجرت نیز تأثیر گذاشته است [۲۴]. امروزه، تلاش زیادی برای مدل‌سازی پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم و کاربری زمین بر فرسایش خاک در حال انجام است. تا کنون فقط دو پروژه برای برآورد جهانی فرسایش خاک در آینده، در مقیاس بزرگ (۵۰ کیلومتر یا بیشتر) و با استفاده از پیش‌بینی‌های قدیمی آب‌وهوایی انجام شده است. مطالعات هن و همکاران (۲۰۲۰) نیز از تأثیر تغییر اقلیم و کاربری زمین بر افزایش رسوب و کاهش میزان مواد مغذی خاک در استان گوئیژووی چین حکایت دارد [۲۵]. همچنین، بررسی کوگو و همکاران (۲۰۲۰) در غرب کنیا نشان داد مناطق شیب‌دار و با پوشش گیاهی تُنک، تأثیر بسیار زیادی بر فرسایش خاک داشته است [۲۶]. چن و همکاران (۲۰۲۰) نیز در حوضه‌های آبخیز جنوبی تایوان، با بررسی اثر تغییرات اقلیم بر تغییر عملکرد رسوب، انتقال رسوب و توزیع رسوب فرسایش در مقیاس آبخیز نشان دادند حجم کل فرسایش و عملکرد کل رسوب در آبخیز به ترتیب ۲۵ درصد و ۶۵ درصد افزایش یافته است [۲۷]. در دیگر مطالعات نیز می‌توان به تحقیق فو و همکاران (۲۰۲۱) در شهر لیانگ چنگ کشور مغولستان اشاره کرد که در بررسی تأثیر تغییر پوشش زمین در فرسایش خاک با استفاده از داده‌های سنجش از دور و با استفاده از مدل جهانی فرسایش نشان دادند تغییر کاربری زمین و تغییر فرسایش‌دگی بارندگی تأثیر قابل توجهی بر فرسایش خاک داشته است [۲۸].

2. United Nations Convention to Combat Desertification

1. Ecosystem

خاک، توسعه و بهبود خواهد بخشید [۲۹]. از نظر علمی، چارچوب مدل‌سازی ارائه‌شده، یک سری از پیشرفت‌های روش‌شناختی و داده‌های استاندارد را برای برقراری ارتباط با رشته‌های مشابه و نزدیک ایجاد می‌کند و حرکتی جدید به سمت علم داده‌های بازتولید و با دسترسی آزاد محسوب می‌شود [۳۴].

پیشینه تحقیق

در ایران نیز بر اساس گزارش‌های موجود، میزان فرسایش آبی خاک در برخی از عرصه‌های تخریب‌شده به ۳۰ تا ۴۰ تن در هکتار در سال می‌رسد و در برخی دیگر از مناطق مانند جنگل‌های بکر و یا مراتع تخریب‌نشده ناچیز است [۳۵]. درباره مقدار فرسایش خاک آمار متفاوتی ارائه شده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند مقدار تخریب خاک و تولید رسوب در ایران حدود یک میلیارد تن در سال است. به طوری که بر اساس اندازه‌گیری‌های مستقیم در کرت‌های فرسایش، تلفات خاک از سطح اراضی مرتعی، جنگلی و دیم‌زارها بسیار کمتر از یک تن در هکتار در سال است و در اراضی ماری که از سازندهای حساس به فرسایش محسوب می‌شوند، تا ۳۴ تن در هکتار در سال برآورد شده است. در اراضی شخم‌خورده دیم کشور نیز مقدار فرسایش خاک بیشتر از ۱۰ تن در هکتار ثبت شده است [۳۶ و ۴۵]. نتایج بررسی‌های خواجهی و همکاران (۲۰۱۵) بر اساس داده‌های حاصل از پلات‌های آزمایشی در چندین نقطه از کشور، نشان می‌دهد متوسط تلفات خاک در کاربری‌های جنگل، مرتع، دیم و اراضی ماری به ترتیب ۰/۰۰۳، ۰/۰۹، ۱/۱۷، و ۱۹/۹ تن در هکتار در سال بوده است. بر همین اساس، متوسط تلفات در اقلیم‌های خیلی مرطوب، نیمه‌مرطوب، مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و خشک به ترتیب ۰/۰۲، ۲/۰۷، ۱/۵۹، ۱/۵۷، و ۱/۴۲ تن در هکتار در سال برآورد شد [۳۷]. مطالعات نشان داده است که وجود تشکیلات زمین‌شناسی حساس به فرسایش در غرب ایران مانند سازند آغاچاری و گچساران [۳۸]، توپوگرافی سخت (شیب و ارتفاع زیاد)، تغییرات کاربری اراضی (دیمزارهای وسیع در دامنه‌های پرشیب) [۳۹ و ۴۰]، همراه با بارش‌هایی با شدت نسبتاً زیاد، فرسایش خاک و تولید رسوب را در برخی از حوضه‌های آبخیز کشور افزایش خواهد داد [۴۱-۴۳].

یانگ و همکاران (۲۰۰۳) بر اساس داده‌های پیش‌بینی‌شده اقلیمی و کاربری اراضی، مدل‌سازی را با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده^۱ در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام داده‌اند. اما این مدل‌سازی دیگر با دانش فعلی ما از تغییرات اقلیمی آینده همخوانی ندارد و فرسایش خاک را بیش از میزان واقعی برآورد می‌کند [۲۹]. علاوه بر آن، ایتو (۲۰۰۷) نیز تأثیر تغییر کاربری اراضی و اقلیم را بر فرسایش خاک در سلول‌های ۵۵ کیلومتری (سال ۱۹۰۱ تا ۲۱۰۰) شبیه‌سازی و پیامدهای آن را بر چرخه کربن بررسی کرد. از زمان انجام این پروژه‌ها تا کنون، پیشرفت‌های چشمگیری در مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی با استفاده از فناوری‌های جدید فضایی و ماهواره‌ای انجام شده است [۳۰].

در حال حاضر، پیشرفت‌های اخیر در علم سنجش از دور، دسترسی بیشتر به داده‌های رصد زمین و افزایش توانایی در پردازش مجموعه‌های بزرگ‌داده، امکان ایجاد شاخص‌های جدید پوشش گیاهی و محصولات پوشش زمین را با تفکیک مکانی و دقت بیشتر فراهم کرده است [۳۱]. این موضوع برای مجموعه داده‌های آب‌وهوایی منتشرشده اخیر، از جمله پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی اصلاح‌شده اریبی به‌دست‌آمده از متغیرهای زیست‌اقلیمی متعدد، صادق است [۳۲]. بر اساس این داده‌ها و از طریق روش‌های درون‌یابی فضایی، امکان محاسبه جهانی فرسایش‌دگی باران فراهم شده که بیشتر از حجم بارندگی، با شدت بارندگی مرتبط است [۳۳]. در جدیدترین پروژه برآورد جهانی فرسایش خاک که توسط تیمی از دانشمندان دانشگاه‌های اروپایی و کارشناسان اتحادیه اروپا انجام شده [۳۴] و مبتنی بر علم سنجش از دور است، از آخرین پیش‌بینی‌های مربوط به تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی استفاده شده است. این پروژه سیاست‌گذاران را قادر می‌سازد تا میزان فرسایش را اندازه‌گیری کنند، نقاط داغ احتمالی را بشناسند و با تعامل با ذی‌نفعان، تأثیرات مخرب احتمالی را کاهش دهند. علاوه بر این، بینش ما را در مورد اثر بالقوه کشاورزی حفاظتی بر کاهش فرسایش خاک و نیاز به ابزارهای سیاست‌گذاری مؤثرتر برای حفاظت از

1. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

امروزه سیاست‌گذاران بر لزوم اجرای رویکردهای مبتنی بر شواهد تأکید دارند و مدیریت و برنامه‌ریزی حوضه‌های آبخیز و اجرای عملیات مختلف مهندسی و زیست‌مهندسی نیز در این عرصه‌ها نیازمند داشتن آمار دقیق از متغیرها و پیش‌ران‌های اصلی بوم‌سازگان است. یکی از محدودیت‌های مهم مدیریتی منابع طبیعی و بوم‌سازگان در ایران، نداشتن اطلاعات دقیق از میزان فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز اصلی و فرعی کشور است. در این زمینه به‌جرت می‌توان گفت که نوعی ابهام و سردرگمی بین سازمان‌های مختلف متولی منابع طبیعی و محیط زیست ایران وجود دارد و همین ابهام باعث شده که گاهی اوقات آمار غیرواقعی و اغراق‌آمیزی از میزان فرسایش خاک در کشور ارائه شود که موجب اشتباه در تصمیم‌گیری‌ها خواهد شد. البته تا کنون گزارش‌های موردی متعددی که به برخی از آنها در مقدمه اشاره شد، دربارهٔ میزان فرسایش خاک در حال حاضر و یا در آینده متأثر از تغییر اقلیم و کاربری اراضی منتشر شده است، اما گزارشی که بتواند بر اساس یک مدل یکپارچه و معتبر میزان فرسایش آبی را در سناریوهای مختلف اقلیمی و کاربری اراضی در حال حاضر و در شرایط آینده برای کل کشور پیش‌بینی کند، تا کنون ارائه نشده است. بنابراین، مطالعهٔ حاضر تلاشی است مبتنی بر داده‌های حاصل از مدل‌های جهانی پیش‌بینی فرسایش خاک متأثر از تغییر اقلیم و کاربری اراضی برای آگاهی‌دادن به سیاست‌گذاران ملی به‌منظور مدیریت هوشمندانه منابع طبیعی در حوضه‌های آبخیز کشور. ضمن اینکه پژوهش پیش رو سعی دارد به این پرسش کلیدی پاسخ دهد که اثر ترکیبی تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم به عنوان پیش‌ران‌های اصلی فرسایش خاک حوضه‌های آبخیز کشور در آینده چگونه است؟

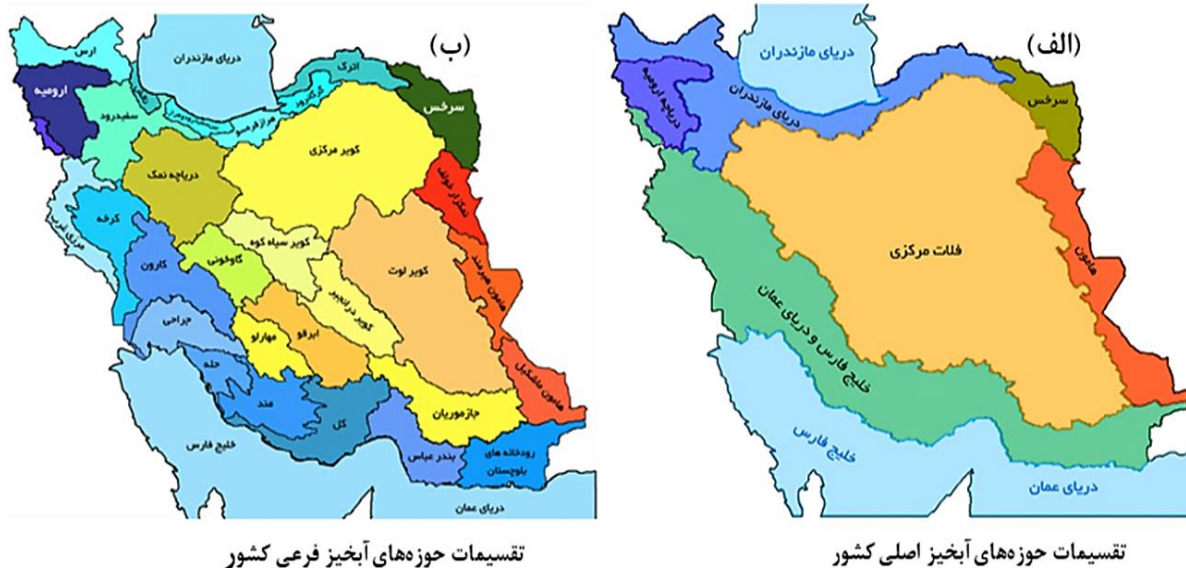
مواد و روش‌ها

بر اساس تقسیمات آبخیزداری، عرصهٔ حوضه‌های آبخیز حدود ۱۲۵ میلیون هکتار از مساحت کشور ایران را در بر می‌گیرد. عرصهٔ حوضه‌های آبخیز کشور شامل ۶ آبخیز بزرگ (بر اساس تقسیمات تمآب، وزارت نیرو) برابر با مساحت کل کشور، که هر یک از این آبخیزها خود به آبخیزهای کوچک و تا چندین رده نیز کوچک‌تر تقسیم

بارش نیز در حوضه‌های آبخیزی مانند قره‌قوم، اترک، قره‌سو-گرگان، هراز-قره‌سو، و ارس که همگی در نوار شمالی کشور قرار دارند، بیشتر تحت تأثیر جریان‌های قطبی سیبری هستند که سرد و خشک‌تر است و دامنهٔ نوسان کمتری دارد [۴۴]. همین موضوع می‌تواند بر شاخص فرسایش باران و کاهش یا افزایش عدم قطعیت مدل‌سازی فرسایش در این مناطق نیز مؤثر باشد. علاوه بر آن، آسیب‌پذیری آبخیزهای مرکزی، جنوبی و شرق کشور از تغییرات ترکیبی کاربری اراضی و تغییر اقلیم بیشتر از سایر آبخیزهاست [۴۵-۴۸]. از نظر فرسایش باران، ۳ ناحیه در کشور بیشترین قدرت فرسایشی باران را دارند. ۲ ناحیهٔ پرباران که در نوار ساحلی شمال و ارتفاعات زاگرس واقع هستند و ناحیهٔ سوم که در نوار ساحلی جنوب کشور قرار دارد، به دلیل بارش‌های شدید کوتاه‌مدت دارای فرسایشی زیاد است [۳۶]. هرچند مطالعات صادقی و حزباوی (۲۰۱۵) نشان داد در یک دورهٔ ۲۳ ساله (۱۹۷۰ تا ۱۹۹۹) توزیع فضایی فرسایشی سالانهٔ باران در مناطق شمالی روند کاهشی و به سمت مناطق جنوبی، کشور روند افزایشی داشته، ولی همواره تغییرات نامحسوس اقلیمی افزایش خطر فرسایش خاک را به دنبال داشته است [۴۹]. دربارهٔ تأثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک، مطالعات انجام‌شده در ایران بیانگر آن است که تغییر کاربری اراضی در طولانی‌مدت باعث کاهش مادهٔ آلی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، ظرفیت تبادل، کیفیت و کمیت خاک می‌شود [۵۰-۵۲]. تبدیل اراضی مرتعی و جنگلی به کشاورزی از مهم‌ترین عوامل تغییر کاربری به شمار می‌رود [۱۰ و ۳۵]. عوامل دیگری نیز همچون افزایش جمعیت، افزایش دام و چرای بی‌رویه (۱۲۴ میلیون واحد دامی، ۲/۲ برابر ظرفیت مجاز مراتع کشور)، مدیریت نامناسب مراتع، برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و همچنین، معدن‌کاوی باعث تخریب سرزمین و فرسایش خاک می‌شوند. براساس گزارش‌های رسمی کشور، ۸۹ درصد اراضی کشاورزی (۱۴/۷ میلیون هکتار از ۱۶/۵ میلیون هکتار اراضی کشاورزی در ایران) در استان‌های خوزستان، خراسان رضوی، فارس، آذربایجان غربی و شرقی، سیستان و بلوچستان، ایلام، لرستان، کرمان و اصفهان بوده که بیانگر وسعت تبدیل اراضی در کشور است [۵۳ و ۵۴].

آبخیز کوچک‌تر؛ ۵- حوضه آبخیز مرزی شرق با ۳ آبخیز کوچک‌تر؛ ۶- حوضه آبخیز قره‌قوم. شکل ۱ تقسیمات حوضه‌های آبخیز اصلی و فرعی ایران را نمایش می‌دهد [۳۵].

می‌شوند. این ۶ آبخیز بزرگ عبارت‌اند از: ۱- حوضه آبخیز دریای خزر با ۷ آبخیز کوچک‌تر؛ ۲- حوضه آبخیز خلیج فارس و دریای عمان با ۹ آبخیز کوچک‌تر؛ ۳- حوضه آبخیز دریاچه ارومیه؛ ۴- حوضه آبخیز فلات مرکزی با ۹



شکل ۱. تقسیمات حوضه‌های آبخیز اصلی (الف) و فرعی (ب) ایران [۳۵]

(<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets>) استفاده شد. این مجموعه داده شامل سناریوی پایه (۲۰۱۵) و پیش‌بینی‌های آینده (۲۰۷۰) فرسایش خاک بر اساس تغییرات کاربری اراضی و اثر تغییرات اقلیمی است. بنابراین، نقشه‌ها و داده‌های رستری، دانلود شد و سپس، برای حوضه‌های آبخیز کشور، با استفاده از جعبه‌ابزار Spatial Analyst در محیط ArcGIS خلاصه‌گیری و نتایج به صورت جدول‌ها و نمودارهای مختلف ارائه شد. جدول ۱ نشان‌دهنده ۱۴ مدل گردش عمومی جو^۳ استفاده‌شده در پایگاه GloSEM^۴ است. درخور یادآوری است که مدل‌های گردش عمومی مانند GFDL-CM3 در مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم در نقاط مختلف ایران استفاده شده و نتایج آن نیز در برخی پژوهش‌ها رضایت‌بخش [۵۵] و در بعضی دیگر نامطلوب بوده است [۵۶].

تفاوت در عرض جغرافیایی شمال و جنوب کشور و وجود دشت‌ها، ارتفاعات و اقلیم‌های متفاوت سیمای بسیار متنوعی به سرزمین پهناور ایران بخشیده است، به گونه‌ای که نواحی رویشی و گونه‌های گیاهی بسیار زیادی در آن مستقر شده‌اند. براساس گزارش‌های سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، مهم‌ترین عوامل انسانی تخریب سرزمین عواملی همچون افزایش جمعیت، چرای مفرط، برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق پساب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی، تغییر کاربری اراضی، برداشت غیر معادن سطحی، مدیریت نامناسب مراتع و مدیریت غیر اصولی اراضی کشاورزی هستند [۳۵].

داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق

در این مطالعه از داده‌های اعتبارسنجی‌شده قابل دسترس و حاصل از پروژه مشترک مرکز داده‌های خاک اتحادیه اروپا^۱ و گروه کاری سازمان ملل متحد^۲

3. GCM, General Circulation Model
4. Global Soil Erosion Modeling platform, GloSEM

1. ESDAC, The European Soil Data Centre
2. United Nations' Working Group

جدول ۱. مدل‌های اقلیمی استفاده‌شده در پایگاه GloSEM و مؤسسه‌های آماده‌سازی پروژه CMIP5 [۵۵]

مؤسسه‌های تحقیقاتی تدوین‌کننده مدل	مدل
MOHC, Met Office Hadley Center, UK NOAA, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	HadGEM2-ES GFDL-CM3 MIROC5
MIROC, Center for Climate System Research, Japan	MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM
IPSL, Institute Pierre Simon Laplace, France	IPSL-CM5A-LR
CNRM, Météo-France/Center National de Recherches Meteorologiques, France	CNRM-CM5
MPI-M, Max Planck Institute for Meteorology, Germany	MPI-ESM-LR
NCC, Norwegian Climate Center, Norway	NorESM1-M
BCC, Beijing Climate Center, China	BCC-CSM1.1
MRI, Meteorological Research Institute, Japan	MRI-CGCM3
NASA, Goddard Institute of Space Studies, USA	GISS-E2-R
NCAR, National Center for Atmospheric Research, USA	CCSM4
NIMR/KMA, National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration, South Korea	HadGEM2-AO

روش کار

پایگاه مدل‌سازی جهانی فرسایش خاک مبتنی بر مدل جهانی فرسایش برای ایجاد یک چارچوب جامع‌تر مدل‌سازی در برآورد سناریوهای جهانی فرسایش خاک در آینده، توسعه داده شده است. این پایگاه به صورت پویا و به‌روز شده از سناریوهای تغییر اقلیم و کاربری اراضی-SSP^۱ RCP جدید تصویب‌شده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ استفاده می‌کند تا میزان فرسایش خاک را در دوره‌های زمانی آینده شبیه‌سازی کند. GloSEM با چندین سناریوی کاربری اراضی آینده (۲۰۷۰) برگرفته از پروژه (LUH^۳) و سناریوهای آینده اقلیمی مرکز تحقیقات مشترک اتحادیه اروپا^۴ ترکیب و همراه شده است. در این پایگاه عدم قطعیت نتایج پیش‌بینی‌ها به وسیله روش تلفیقی زنجیره مونت کارلو-مارکوف^۵ (MCMC) بررسی و اعتبارسنجی شده است. انتشار خطا^۶ نیز که ریشه مربع مجموع مربعات عدم قطعیت‌های مختلف است، بررسی و نتایج آن به همراه ارزیابی‌های عدم قطعیت مدل در پیوست مقاله‌ای که توسط بورلی و همکاران (۲۰۲۰)^۷ تدوین شده، قابل دستیابی است. در ارزیابی عملکرد، اعداد حاصل از پیش‌بینی‌های پایگاه GloSEM (شکل ۲) با سایر

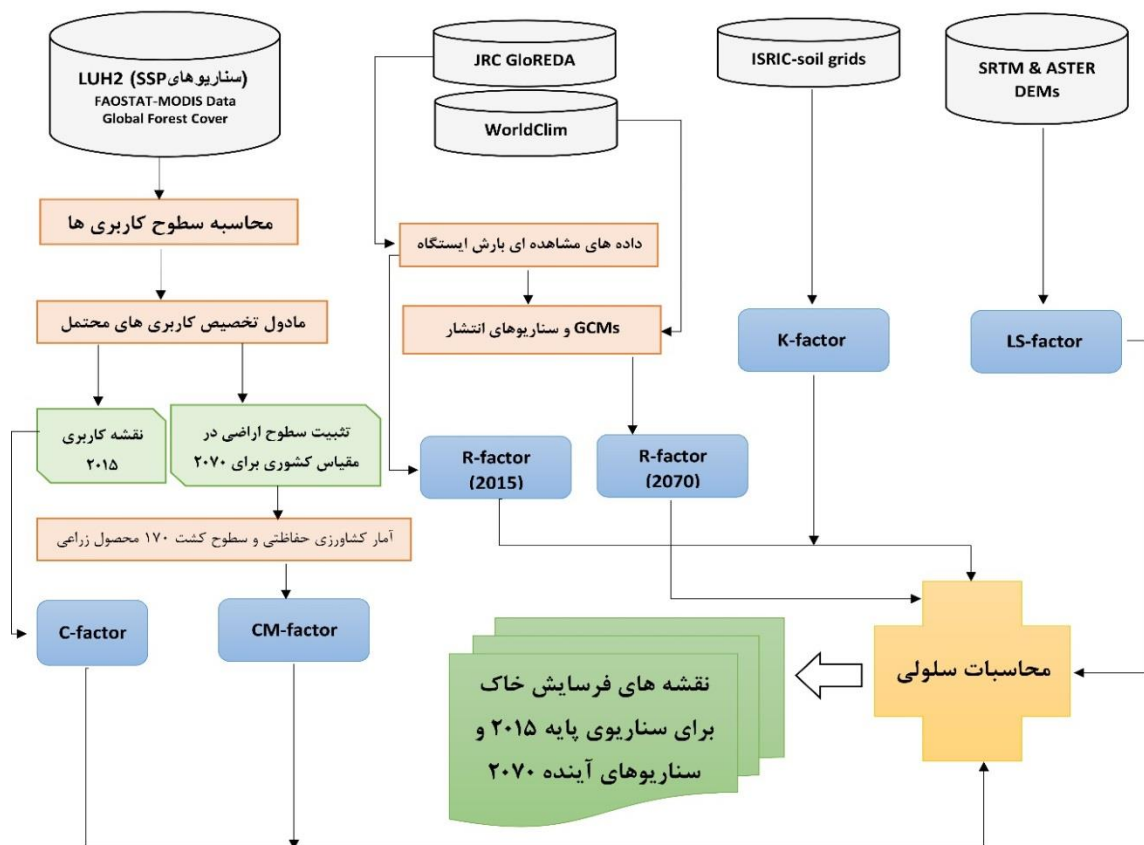
برآوردهای جهانی فرسایش خاک نیز مقایسه شده است [۳۴]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در این پایگاه تأثیر تغییر اقلیم در ۳ سناریوی RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5 بر عامل فرسایش باران (R) در مدل جهانی فرسایش خاک، تأثیر احتمالی تغییر کاربری اراضی در ۳ سناریوی تلفیقی SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 بر عامل پوشش گیاهی مدل جهانی فرسایش خاک (C) و تأثیر احتمالی کشاورزی حفاظتی بر عامل حفاظت خاک (P) ارزیابی و مدل‌سازی شده و تأثیر جمعی آنها بر فرسایش توسط مدل جهانی فرسایش خاک محاسبه شده است.

مشخصات خلاصه سناریوهای انتشار گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده‌شده در GloSEM در جدول ۲ ارائه شده است. درخور یادآوری است چون سناریوهای RCP4.5 و RCP6 نزدیک به هم هستند و هر دو متوسط محسوب می‌شوند، یک سناریو یعنی RCP4.5 که هم‌خوانی بیشتری با سناریوی کاربری اراضی SSP2 دارد، در بانک اطلاعاتی پروژه GloSEM انتخاب شده است.

سناریوهای کاربری اراضی استفاده‌شده در پایگاه GloSEM؛ SSP1، SSP2 و SSP5

در سناریوی SSP1، جهان با حفظ محیط زیست و بدون تخریب و آلودگی، پیوسته به سمت یک مسیر پایدار، در حرکت است. استفاده از زمین به‌شدت تنظیم و قانونمند می‌شود، برای مثال میزان جنگل‌زدایی در مناطق گرمسیری به‌شدت کاهش می‌یابد. بازده محصول در مناطق کم‌درآمد و متوسط به‌سرعت در حال افزایش است

1. Shared Socio-economic Pathway-Representative Concentration Pathway
2. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC
3. Land Use Harmonization
4. Joint Research Centre
5. Monte Carlo Markov Chain
6. Error propagation
7. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070)



شکل ۲. نمودار جریان‌ی فرایند مدل‌سازی در پایگاه GloSEM [۳۴]

جدول ۲. سناریوهای مختلف روند انتشار غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای [۵۶ و ۵۷]

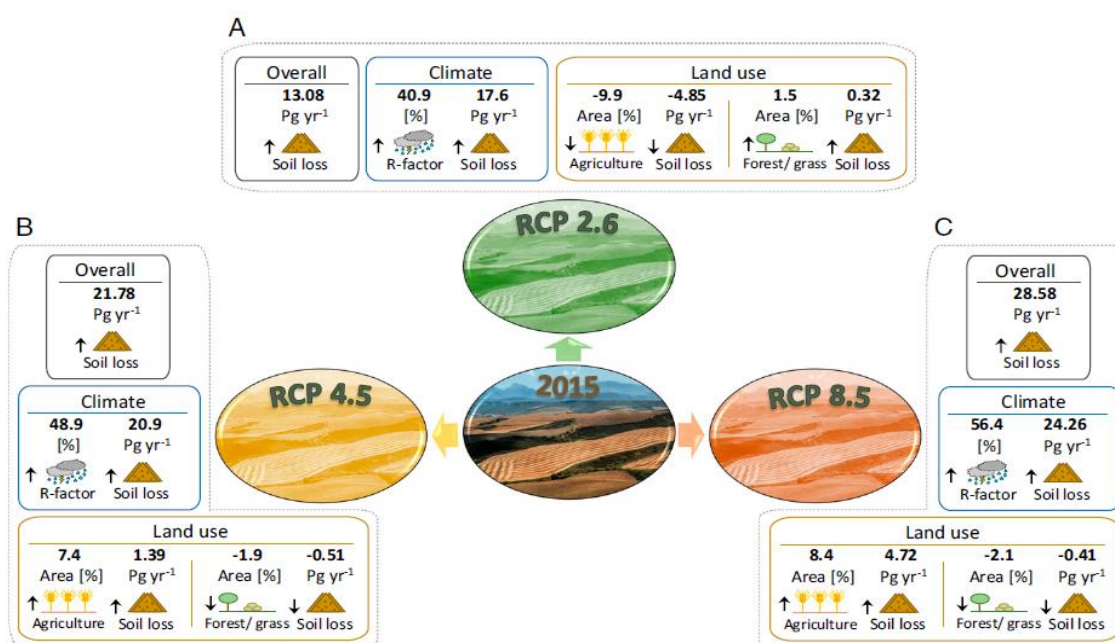
سناریو	واداشت تابشی	غلظت دی‌اکسید کربن	روند	گروه مدل‌سازی
RCP2.6	حداکثر مقدار آن ۳ وات بر متر مربع و سپس، کاهش می‌یابد	۴۹۰ ppm قبل از سال ۲۱۰۰ و سپس کاهش می‌یابد	اوجی و کاهشی	IMAGE
RCP4.5	۴/۵ وات بر متر مربع و بعد از سال ۲۱۰۰ ثابت می‌ماند	۶۵۰ ppm و بعد از سال ۲۱۰۰ ثابت می‌ماند	ثابت و بدون تغییر	GCAM
RCP8.5	بیشتر از ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰	۱۳۷۰ ppm تا سال ۲۱۰۰	افزایشی	MESSAGE

الگوهای تاریخی را دنبال می‌کنند. تغییر کاربری زمین خیلی قانونمند نیست و جنگل‌زدایی در مناطق گرمسیری همچنان ادامه دارد. در سناریوی SSP2، همکاری بین‌المللی برای کاهش تغییرات اقلیمی به دلیل مرحله انتقال به قیمت یکنواخت کربن تا سال ۲۰۴۰ به تأخیر می‌افتد. در این مرحله انتقال، انتشار از تولیدات کشاورزی در سطح انتشارات بخش انرژی قیمت‌گذاری می‌شود، در حالی که جلوگیری از جنگل‌زدایی و درخت‌کاری تا قبل از سال ۲۰۳۰ تشویق و حمایت نمی‌شود [۵۸]. در سناریوی SSP5، جهان با هدایت اقتصادهای صنعتی و نوظهور،

و منجر به توسعه سریع‌تر در کشورهای با درآمد زیاد می‌شود. رژیم‌های غذایی سالم با کالری حیوانی کم و ضایعات کم غالب خواهند شد. در یک اقتصاد باز و جهانی، مواد غذایی در سطح بین‌المللی تجارت می‌شود. در این سناریو، همکاری‌های بین‌المللی برای کاهش تغییرات اقلیمی از اوایل دوره آغاز می‌شود (پس از سال ۲۰۲۰) و تمام آلاینده‌های ناشی از استفاده از زمین بر اساس قیمت کربن در بخش انرژی قیمت‌گذاری می‌شوند [۵۸]. در سناریوی SSP2، جهان مسیری را طی می‌کند که در آن روندهای اجتماعی، اقتصادی و فناوری همان

می‌تواند تأثیرات منفی گسترده‌ای در سطح جهانی، منطقه‌ای و کشور داشته باشد. محاسبات بیانگر این است که تشدید شرایط اقلیمی حتی در سناریوی SSP1-RCP2.6 می‌تواند میانگین فرسایش خاک را به صورت جهانی تا ۳۰ درصد افزایش دهد [۳۴]. شکل ۳ نمودار جریان‌های سناریوهای تلفیقی پیش‌بینی‌شده تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد.

ایمان فزاینده‌ای به بازارهای رقابتی، نوآوری و جوامع مشارکتی برای تولید سریع فناوری و توسعه سرمایه انسانی به عنوان مسیر توسعه پایدار دارد. تغییر کاربری زمین قانونمند و تحت کنترل نیست، یعنی جنگل‌زدایی گرمسیری همچنان ادامه دارد، اگرچه با گذشت زمان با سرعت کمتری رو به کاهش است [۵۸]. افزایش قابل توجه انتشار پیش‌بینی‌شده در ترکیب سناریوهای تغییر کاربری اراضی و آب‌وهوا در آینده



شکل ۳. نمودار جریان‌های سناریوهای تلفیقی پیش‌بینی‌شده تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی [۳۰]

A تا C نشان‌دهنده تغییرات در عامل R (به درصد)، تغییرات در سطح اراضی کشاورزی و جنگل و مرتع (به درصد) نسبت به سناریوی پایه و میزان فرسایش بر حسب پتاگرم (۱۰^۹ تن) در سال برای سناریوهای SSP1-RCP2.6 (A)، SSP2-RCP4.5 (B) و SSP5-RCP8.5 (C) در مقیاس جهانی است [۳۴ و ۵۷].

حوضه‌های آبخیز مناطق غربی و شمال غربی کشور به دلیل تغییرپذیری زیاد در متغیرهای باران و کاربری اراضی عدم قطعیت بیشتری (۰/۱۵ تا بیش از ۰/۱) دارند [۳۴]. در ادامه بررسی‌های بوری و همکاران (۲۰۲۰)، مقایسه متقابل نتایج GloSEM با مقادیر به‌دست‌آمده با ارزیابی‌های منطقه‌ای فرسایش خاک نیز انجام شد. انحراف‌های جزئی (کمتر از ۵ درصد) برآوردهای GloSEM با آنچه در مطالعات مستقل کمیسیون اروپا و وزارت کشاورزی ایالات متحده ارائه شده است، اولین شواهد قابل قبول بودن تخمین‌های مدل را ارائه می‌دهد. همچنین، نشان می‌دهد این تخمین‌ها تا سطح نزدیک به ارزیابی‌های منطقه‌ای، با

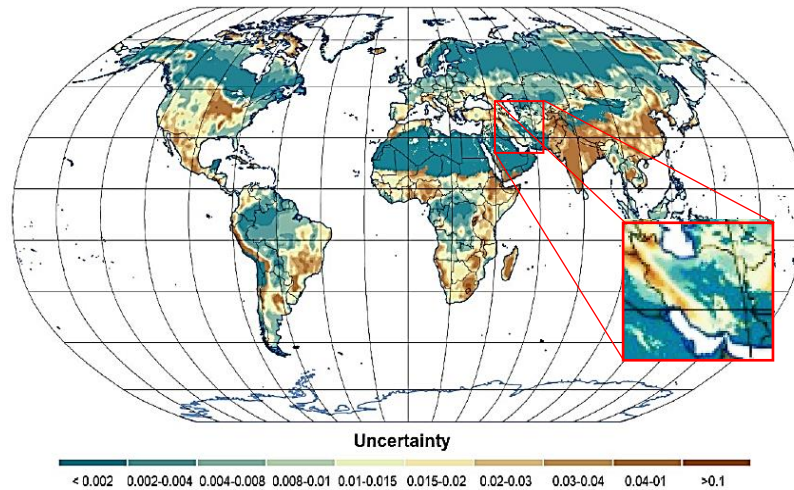
نتایج و بحث

بررسی خطا و عدم قطعیت مدل

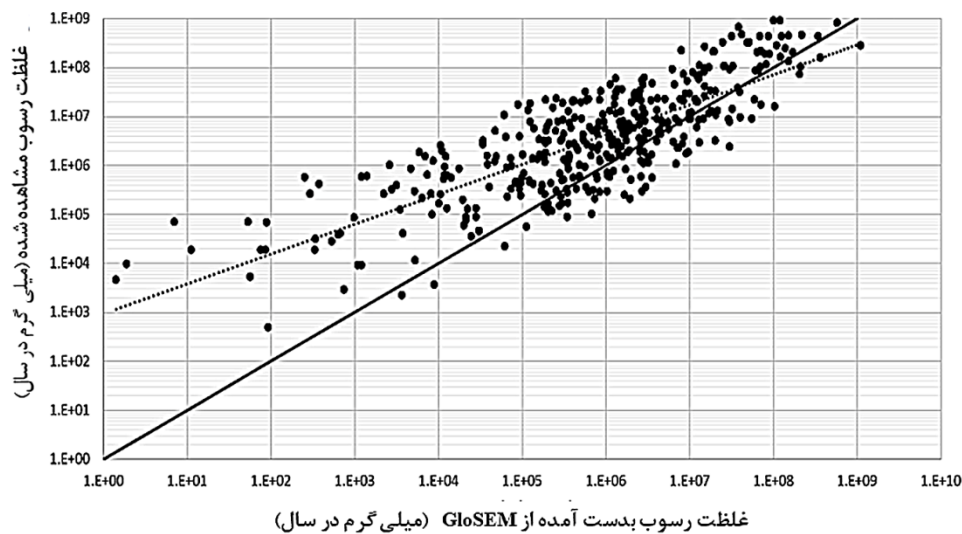
مطالعات بوری و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد عدم قطعیت مکانی مدل در شکل ۴ به عنوان انحراف استاندارد مقادیر شبیه‌سازی‌شده MCMC نشان داده شده است. این نقشه نشان‌دهنده توزیع جهانی فضایی واریانس تخمین‌زده‌شده حاصل از مدل است که برای بررسی خطای احتمالی در مناطق مختلف جهان استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش از ۸۰ درصد از سطح کشور در محدوده عدم قطعیت کم تا متوسط (کمتر از ۰/۰۲ تا ۰/۱۵) قرار می‌گیرند و بخش زیادی از

جهانی و ۶۵ درصد از واریانس قاره‌ای در غلظت رسوب مشاهده‌شده و بیش از ۸۳ درصد برای سه قاره آمریکا شمالی، آسیا و اروپا بود [۳۴]. مقایسه‌های مختلف دیگری نیز توسط بورلی و همکاران (۲۰۲۰) [۳۴] انجام شده است که همگی بر صحت نتایج GloSEM تأکید دارند.

وضوح بیشتری، قابل اعتماد و معتبر هستند [۳۴]. در مقایسه پتانسیل غلظت رسوب به‌دست‌آمده از پایگاه GloSEM با غلظت رسوب ۳۹۸ ایستگاه رسوب‌سنجی منتخب در سرتاسر دنیا (شکل ۵) مشاهده شد که برآوردهای GloSEM قادر به توجیه ۶۴ درصد از واریانس



شکل ۴. انحراف معیار ارزش‌های شبیه‌سازی‌شده توسط الگوریتم مونت کارلو-مارکوف (MCMC)، معرف میزان عدم قطعیت مدل [۳۴]



شکل ۵. مقایسه نتایج غلظت رسوب به‌دست‌آمده از GloSEM با غلظت رسوب مشاهده‌شده در ایستگاه‌های منتخب رسوب‌سنجی در سرتاسر دنیا [۳۴]

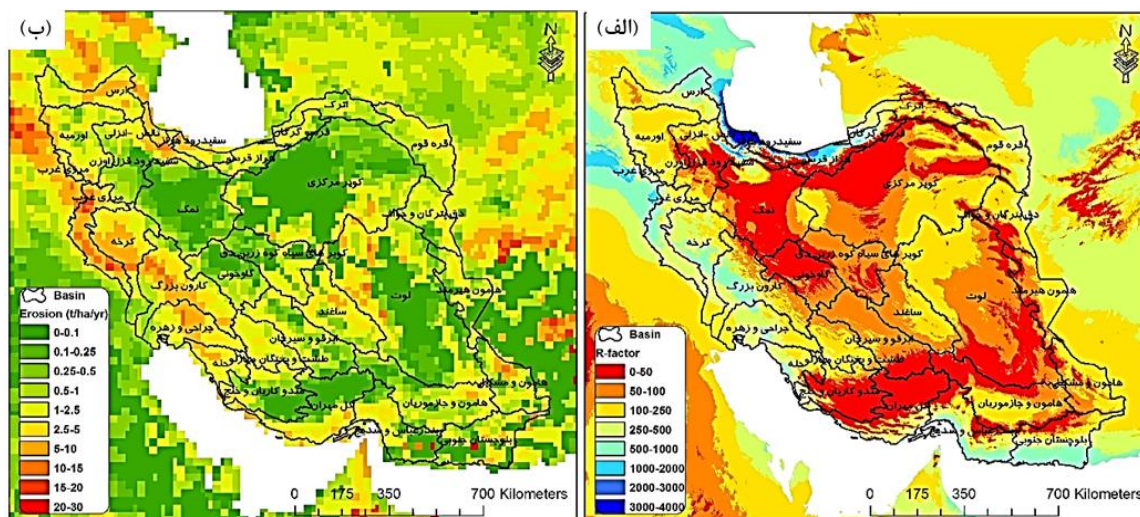
ارزیابی فرسایش خاک

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد در سناریوی پایه (۲۰۱۵)، بیشترین میزان شاخص فرسایش باران با رقم ۱۹۶۴/۴ و ۱۰۵۴ (مگاژول میلی‌متر بر هکتار*ساعت*سال) به ترتیب مربوط به آبخیزهای آبخیز تالش-انزلی و سفیدرود-هراز است. علاوه بر آن، وجود تشکیلات

درخور یادآوری است که مقایسه نتایج پایگاه GloSEM با مطالعات فرسایش خاک انجام‌شده در ایران موضوع مهمی برای اعتبارسنجی دقیق مدل است که به یک کار گسترده تحقیقاتی، فراخوان نتایج مطالعات و جمع‌آوری بانک اطلاعاتی از سرتاسر ایران نیاز دارد و به عنوان یک کار پژوهشی مهم در آینده پیشنهاد می‌شود.

و تولید رسوب در حوضه آبخیز رودخانه‌های مرزی غرب کشور ایجاد کند. نتایج مطالعات نیک‌کامی و همکاران (۲۰۱۳) نیز به زیاد بودن فرسایندهای باران در ارتفاعات دامنه‌های غربی زاگرس به دلیل بارش‌هایی با شدت زیاد اشاره دارد [۳۶].

زمین‌شناسی حساس به فرسایش مانند سازند آجاجاری و گچساران [۳۸]، توپوگرافی با شیب و ارتفاع زیاد، تغییرات کاربری همراه با دیمزارهای وسیع در دامنه‌های پرشیب [۴۰]، همراه با بارش‌های با شدت نسبتاً زیاد توانسته است پتانسیل زیادی را در زمینه فرسایش خاک



شکل ۶. نقشه‌های الف) عامل فرسایندهای باران ب) فرسایش خاک در سناریوی پایه (۲۰۱۵) محاسبه‌شده توسط پایگاه GloSEM [۳۴]

و در نتیجه، میانگین فرسایش آبی در آنها بیشتر از میانگین به‌دست‌آمده در حوضه‌های آبخیز درجه ۱ یا ۲ بوده که در این مطالعه از آنها استفاده شده است. در حوضه‌های آبخیز درجه ۱ یا ۲، سطوح دارای شیب کم و توپوگرافی مسطح، فراوان هستند و بی‌شک میزان فرسایش در آنها بر میانگین فرسایش حوضه آبخیز تأثیر می‌گذارد و در نتیجه، میزان میانگین، کمتر از حوضه‌های آبخیز کوهستانی با وسعت کم خواهد شد. برای اثبات این ادعا، تعدادی از حوضه‌های آبخیز کوچک بیشتر با مساحت کمتر از ۵۰ هزار هکتار (از حوضه‌های آبخیز درجه ۳) انتخاب شد و میانگین فرسایش در آنها با استفاده از داده‌های سناریوی پایه GloSEM محاسبه شد. نتایج نشان داد میانگین فرسایش در این حوضه‌ها حدود ۳/۲ تن در هکتار در سال است که تقریباً دو برابر میانگین کشوری بر اساس داده‌های GloSEM است و در برخی از این حوضه‌های آبخیز نیز تا ۱۸ تن در هکتار در سال محاسبه شد. ضمن اینکه در مطالعه حاضر در محاسبات با مقیاس کشوری، کلیه حوضه‌های خشک و فراخسک کشور نیز در نظر گرفته شده که میزان فرسایش آبی در آنها کمتر از

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، حوضه آبخیز مرزی غرب با شاخص R برابر با ۳۸۲ (Mj.mm/ha.h.yr) دارای بیشترین میزان فرسایش خاک (۷/۶ تن در هکتار در سال) بوده و با شرایط مشابه (R~300) حوضه آبخیز جراحی و زهره پس از آبخیزهای مرزی غرب، تالش-انزلی (۶/۶ تن در هکتار در سال) و سفیدرود-هراز (۳/۹ تن در هکتار در سال) رقم نسبتاً زیاد ۳/۸ تن در هکتار در سال میانگین فرسایش خاک را دارد. مهم‌ترین عامل در زیاد بودن میزان فرسایش خاک در آبخیز تالش-مرداب انزلی نیز عامل بارش است [۴۱]، که البته در ترکیب با توپوگرافی و مدیریت اراضی توانسته است پتانسیل رسوب‌زدایی زیادی ایجاد کند.

در برخی از منابع، میانگین فرسایش آبی در کشور بسیار بیشتر از رقم به‌دست‌آمده در این مطالعه ارائه شده است که دلیل آن به این موضوع برمی‌گردد که مبنای این آمار بر اساس مطالعات موردی است که در بیشتر موارد در حوضه‌های آبخیز درجه ۳، ۴ یا ۵ و با مساحت کمتر از ۵۰ هزار هکتار انجام شده است. حوضه‌های آبخیز با مساحت کم، بیشتر کوهستانی هستند و توپوگرافی شدیدتری دارند

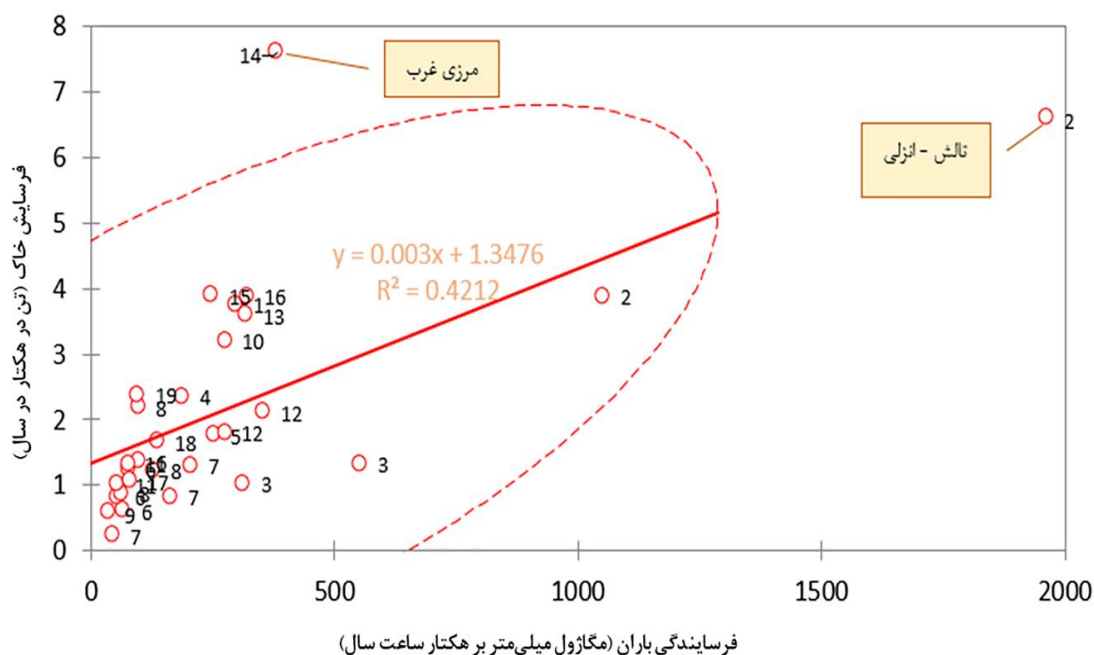
حوضه‌های نیمه‌مرطوب، نیمه‌خشک و در برخی موارد کمتر از حوضه‌های آبخیز مرطوب کشور است. برای مثال، میانگین فرسایش آبی در حوضه آبریز بیابان لوت و کویر مرکزی ایران با وسعت ۱۰ میلیون هکتار، به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۳ تن در هکتار در سال به دست آمد. بی‌شک این عددها موجب افت در میزان میانگین کشوری می‌شود.

جدول ۳. میزان فرسایش خاک و عامل فرساینده‌ی باران بر اساس سناریوی پایه (۲۰۱۵) در حوضه‌های آبخیز اصلی همراه با کاربری‌های غالب در هر آبخیز

کد کاربری	کاربری غالب	فرساینده‌ی باران (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال)	فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)	مساحت (کیلومتر مربع)	حوضه آبخیز
۱	پوشش گیاهی دشت شور-تپه‌های شنی و کشاورزی آبی و جنگل بلوط و ارس	۲۹۹/۸	۳/۸	۴۰۷۲۴	جراحی و زهره
۲	جنگل راش و بلوط و پهن‌برگ خزری و کشاورزی آبی	۱۹۶۴/۴	۶/۶	۶۸۱۲	تالش-انزلی
		۱۰۵۴/۰	۳/۹	۱۱۱۵۰	سفیدرود-هراز
۳	جنگل راش و بلوط و مراتع مرغوب و استپی و کشاورزی آبی	۵۵۵/۷	۱/۳	۱۸۶۱۴	هراز-قره‌سو
		۳۱۶/۱	۱/۰	۱۳۵۹۱	قره‌سو-گرگان
۴	دیمزار و مراتع مرغوب استپی و کشاورزی آبی	۱۹۰/۲	۲/۳	۵۱۶۷۷	ارومیه
۵	کشاورزی دیم و آبی و مراتع مرغوب و استپی و کوهستانی	۲۵۲/۷	۱/۷	۵۹۱۸۲	سفیدرود-قرن‌اوزن
		۷۸/۰	۱/۲	۲۱۴۸۱۷	لوت
۶	کویر و مراتع کوهستانی	۷۰/۱	۰/۶	۲۳۱۰۸۸	کویر مرکزی
		۵۶/۳	۰/۸	۴۹۸۲۴	کویرهای سیاه‌کوه و زرین‌دق
		۹۹/۹	۱/۴	۳۵۶۱۸	هامون-هیرمند
۷	مراتع کوهستانی و کشاورزی آبی	۴۷/۳	۰/۲	۹۳۱۱۵	دریاچه نمک
		۲۰۷/۵	۱/۳	۴۵۵۴۸	قره‌قوم
		۱۶۵/۸	۰/۸	۲۷۴۰۵	اترک
۸	مراتع کوهستانی و کویر	۶۵/۴	۰/۹	۵۸۲۸۴	ابرقو و سیرجان
		۹۹/۶	۲/۲	۵۱۹۵۸	ساغند
۹	مراتع کوهستانی و کویر و کشاورزی آبی	۱۳۰/۱	۱/۲	۳۴۲۸۵	دق پترگان و خواف
		۳۵/۳	۰/۶	۴۲۱۳۱	گاوخونی
۱۰	مراتع کوهستانی، تپه‌ماهوری و دشتی و پوشش گیاهی دشت شور-تپه‌های شنی و کشاورزی آبی	۲۷۶/۸	۳/۲	۲۱۱۸۹	حله
		۵۶/۹	۱/۰	۴۸۲۸۹	مند و کاریان و خنج
۱۱	مراتع کوهستانی، تپه‌ماهوری و مخروط‌افکنه‌ای	۷۶/۹	۱/۳	۶۳۱۴۳	کل‌مهران
		۲۷۵/۳	۱/۸	۴۵۹۱۰	بندرعباس و سدیج
۱۲	مراتع کوهستانی، تپه‌ماهوری و مخروط‌افکنه‌ای و پوشش گیاهی دشت شور-تپه‌های شنی	۳۵۶/۲	۲/۱	۵۰۹۸۷	بلوچستان جنوبی
		۳۱۹/۹	۳/۶	۳۹۴۲۳	ارس
۱۳	مراتع متوسط کوهستانی و مرغوب و استپی	۳۱۹/۹	۳/۶	۳۹۴۲۳	ارس
کد کاربری	کاربری غالب	فرساینده‌ی باران (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال)	فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)	مساحت (کیلومتر مربع)	حوضه آبخیز
۱۴	مراتع مرغوب و استپی و پوشش گیاهی دشتی و کشاورزی آبی	۳۸۲/۰	۷/۶	۳۹۳۶۸	مرزی‌غرب
۱۵	مراتع مرغوب و استپی و جنگل بلوط و ارس و کشاورزی آبی	۲۵۰/۳	۳/۹	۶۶۷۲۸	کارون بزرگ
۱۶	مراتع مرغوب و استپی و کشاورزی آبی و دیم	۳۳۲/۲	۳/۹	۵۱۹۲۷	کرخه
۱۷	مراتع و پوشش گیاهی دشت شور-تپه‌های ماسه‌ای	۸۱/۲	۱/۰	۷۲۸۹۲	هامون و جازموریان
۱۸	مراتع و کشاورزی آبی	۱۳۸/۵	۱/۶	۳۲۱۵۱	طشت و بختگان مهارلو
۱۹	مراتع و مناطق کویری	۹۸/۸	۲/۴	۳۸۹۳۶	هامون و مشکیل
در تمام حوضه‌های آبخیز اصلی کشور		۱۶۲/۴	۱/۷۱	۱۶۴۸۷۹۵	میانگین کشور

و همکاران (۲۰۱۳) و صادقی و حزباوی (۲۰۱۵) این نتایج را تأیید می‌کنند [۳۶ و ۴۹]، اما در بخش‌های کوهستانی و غربی ایران بارش‌های و کم پراکنده مانع از رشد پوشش گیاهی انبوه در سطح خاک می‌شوند و باران‌های شدید خاک‌های بدون پوشش را در معرض فرسایش قرار می‌دهند [۴۵].

شکل ۷ نشان می‌دهد حوضه‌های آبخیز تالش-انزلی و مرزی غرب با کاربری‌های غالب به ترتیب «جنگل راش و بلوط و پهن‌برگ خزری و کشاورزی آبی» و «مراتع مرغوب و استپی و پوشش گیاهی دشتی و کشاورزی آبی» خارج از محدوده اطمینان ۹۹ درصد خط رگرسیون (بین R و فرسایش) قرار می‌گیرند. هرچند نتایج مطالعات نیک‌کامی



شکل ۷. میزان فرسایش در برابر عامل فرساینده باران بر اساس سناریوی پایه (۲۰۱۵) در حوضه‌های آبخیز اصلی کشور (برچسب نقاط نشان‌دهنده کد کاربری مندرج در جدول ۳ است)

مدل‌سازی که تأثیر فقط تغییر کاربری دیده می‌شود) بی‌شک با افزایش عملکرد و سطح تاج پوشش گیاهی با مقدار کاهشی فرسایش در سناریوهای SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 مواجه خواهیم بود. ضمن اینکه مدیریت اراضی مرتعی تا حدودی میزان فرسایش خاک در اراضی کشاورزی را جبران می‌کند [۳۴]. اما این موضوع در مناطق خشک مرکزی و شرق کشور معکوس است، چراکه خاک توان و ظرفیت افزایش سطح اراضی کشاورزی را ندارد و فشار بیش از حدی بر منابع زمین وارد می‌شود که خود باعث افزایش میزان فرسایش آبی خواهد شد. البته از تأثیر چرای مفرط دام و فشار بیش از حد دام بر منابع جنگلی و مرتعی در این مناطق تحت سناریوهای SSP2 و SSP5 نمی‌توان غافل بود [۴۵ و ۵۸].

جدول ۴ بیانگر آن است که در بیشتر حوضه‌های آبخیز خشک داخلی و شرقی کشور مانند گاوخونی، ابرقو و سیرجان، هامون و جازموریان، لوت، ساغند، دق پترگان و خواف، هامون-هیرمند، حتی بدون در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم، روند تغییرات فرسایش خاک بین سناریوی پایه (۲۰۱۵) با سناریوهای SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 به صورت افزایشی است. اما این موضوع در حوضه‌های آبخیز مرطوب یا نیمه‌مرطوب شمالی و غربی کشور مانند ارس، سفیدرود-هراز، هراز-قره‌سو، قره‌سو-گرگان، اترک، مرزی غرب، کرخه، کارون بزرگ و ارومیه روند کاهشی دارد. در مناطق مرطوب با افزایش سطح اراضی کشاورزی به دلیل در نظر نگرفتن تأثیر افزایش شدت بارش‌ها در نتیجه تغییر اقلیم (در این شکل از

جدول ۴. میزان فرسایش در حوضه‌های آبخیز کشور تحت سناریوهای فقط تغییر کاربری اراضی پیش‌بینی‌شده برای سال ۲۰۷۰ و مقایسه آنها با سناریوی پایه (۲۰۱۵)

سناریو				حوضه‌های آبخیز
SSP-RCP8.5	SSP-RCP4.5	SSP-RCP2.6	2015	
۳/۱۴	۳/۶۱	۳/۴۶	۳/۵۹	ارس
۶/۱۴	۶/۳۸	۷/۵۲	۶/۵۷	تالش انزلی
۱/۶۷	۱/۶۸	۱/۸۰	۱/۷۴	سفیدرود- قزل‌اوزن
۳/۵۷	۳/۸۵	۴/۰۰	۳/۸۶	سفیدرود- هراز
۱/۱۴	۱/۲۹	۱/۳۴	۱/۳۳	هراز- قره‌سو
۰/۷۲	۰/۸۶	۱/۰۱	۱/۰۲	قره‌سو- گرگان
۰/۷۴	۰/۷۹	۰/۸۲	۰/۸۱	اترک
۶/۴۱	۶/۴۸	۷/۴۷	۷/۶۱	مرزی غرب
۳/۰۳	۳/۱۳	۳/۷۶	۳/۸۷	کرخه
۳/۵۸	۳/۷۴	۳/۸۸	۳/۸۸	کارون بزرگ
۳/۵۴	۳/۷۴	۳/۷۰	۳/۷۵	جراحی و زهره
۳/۰۸	۳/۱۵	۳/۱۱	۳/۱۹	حله
۰/۹۸	۱/۰۰	۰/۹۷	۱/۰۰	مند و کاریان و خنج
۱/۳۲	۱/۳۱	۱/۳۰	۱/۳۱	کل مهران
۱/۷۹	۱/۸۵	۱/۷۹	۱/۷۹	بندرعباس و سدیح
۲/۰۹	۲/۰۴	۲/۰۹	۲/۰۹	بلوچستان جنوبی
۱/۸۷	۱/۹۷	۲/۳۲	۲/۳۳	ارومیه
۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	دریاچه نمک
۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	گاوخونی

سناریو				حوضه‌های آبخیز
SSP-RCP8.5	SSP-RCP4.5	SSP-RCP2.6	2015	
۱/۶۰	۱/۶۲	۱/۶۳	۱/۶۵	طشت و بختگان مهارلو
۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۶	ابرقو و سیرجان
۱/۰۵	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۴	هامون و جازموریان
۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	لوت
۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۵۹	کوبر مرکزی
۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۱	کوبرهای سیاه‌کوه زرین دق
۲/۲۰	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	ساغند
۱/۲۲	۱/۲۱	۱/۲۱	۱/۲۱	دق پترگان و خواف
۱/۳۶	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	هامون هیرمند
۲/۳۷	۲/۴۲	۲/۳۸	۲/۳۷	هامون و مشکیل
۱/۲۶	۱/۲۸	۱/۳۰	۱/۲۹	قره‌قوم

می‌شود، با در نظر گرفتن اثر ترکیبی تغییر کاربری اراضی و اقلیم، روند تغییرات فرسایش خاک بین سناریوی پایه (۲۰۱۵) با سناریوهای SSP1-RCP2.6، SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 در تمامی حوضه‌های آبخیز به‌جز آبخیز ارس به صورت افزایشی است. در آبخیز ارس همان‌طور که در نقشه‌های جهانی R نیز دیده می‌شود، میزان شاخص R در سناریوی RCP2.6 نسبت به سناریوی پایه به‌شدت کاهش می‌یابد و بنابراین، با توجه به تأثیر معنادار شاخص فرسایش باران بر میزان فرسایش خاک، میزان فرسایش نیز کاهش معناداری را نشان می‌دهد [۳۴].

نتایج مدل‌سازی ثابت می‌کند که تغییرات اقلیمی عامل

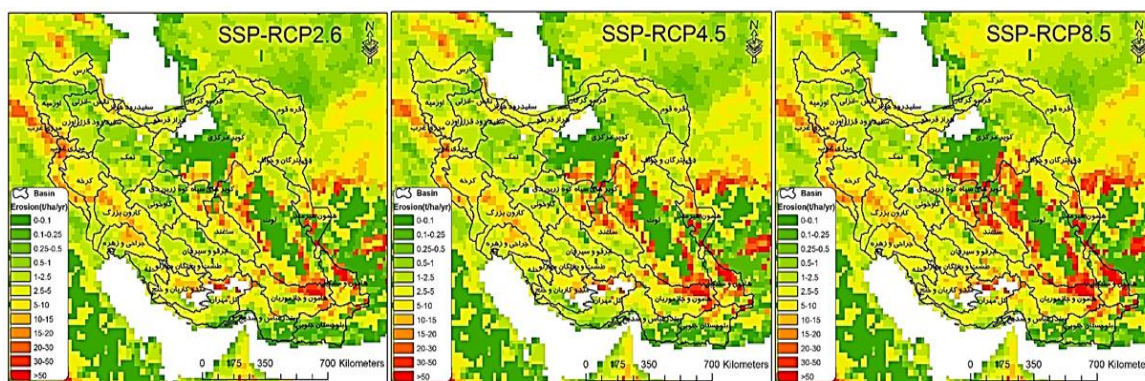
نتایج به‌دست‌آمده نشان داد تغییر کاربری اراضی در بخش‌های شمالی کشور به دلیل تأثیر بر کاهش ماده آلی خاک، ذخیره کربن خاک، کیفیت و کمیت خاک، ظرفیت تبدالی و همچنین، تغییر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به همراه قدرت فرساینده باران، باعث فرسایش خاک در این مناطق شده است [۵۰-۵۲]. اما در بخش‌های غربی و جنوبی کشور، علاوه بر تغییر کاربری اراضی مرتعی و جنگلی به کشاورزی دیم و آبی [۵۳]، تعداد دام‌ها بر ظرفیت مراتع نیز فرسایش خاک را تشدید کرده است [۵۴].

همان‌طور که در شکل ۸ و جدول ۵ نیز مشاهده

RCP8.5، نیز بیشترین (۱۳۸۲ درصد) و کمترین (۲۱ درصد) میزان افزایش میزان فرسایش نسبت به سناریوی پایه به ترتیب در حوضه آبخیز هامون- جازموریان و حله به دست آمد. به این ترتیب حوضه آبخیز هامون- جازموریان بیشترین تغییرات و تأثیرپذیری را نسبت به تغییرات کاربری و اقلیم از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نیز دیده می‌شود، این آبخیز به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و به تبع آن، افزایش شاخص فرساینده‌گی باران بوده که همراه شدن این عامل با پوشش گیاهی ضعیف (مراعت و پوشش گیاهی دشت شور- تپه‌های ماسه‌ای) بر تشدید فرسایش آبی افزوده است. توضیح اینکه این نتایج در مطالعات صادقی و حزباوی (۲۰۱۵) با اشاره به اینکه توزیع فضایی فرساینده‌گی سالانه باران در مناطق شمالی روند کاهشی و به سمت مناطق جنوبی کشور روند افزایشی داشته، انطباق دارد [۴۹]. حوضه آبخیز هامون- جازموریان دارای اقلیم بیابانی و رژیم بارندگی آن مدیترانه‌ای با بارش غالب زمستانی است که به علت ضعیف بودن پوشش گیاهی، بارندگی‌های رگباری در این آبخیز منجر به ایجاد سیلاب و فرسایش شدید خاک می‌شود [۴۵]. نتایج مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق کشور نیز به اثر فرساینده‌گی باران و فرسایش‌پذیری خاک به دلیل برخی فعالیت‌های انسانی همچون تغییر کاربری اراضی، شخم در جهت شیب، چرای مفرط دام اشاره دارد، به‌گونه‌ای که میانگین فرسایش خاک در دیم‌زارها ۷ برابر مراعت، مرتع با چرای شدید به قرق، حدود ۵/۲ برابر بوده است [۳۶ و ۴۵].

اصلی تغییر در فرسایش خاک است. شبیه‌سازی ترکیبی کاربری زمین و اقلیم افزایش قابل توجهی در میانگین جهانی فرسایش خاک، در مجموع ۳۰+ درصد (در سناریوی SSP1-RCP2.6)، ۵۱+ درصد (در سناریوی SSP5-RCP8.5)، و ۶۶+ درصد (در سناریوی SSP5-RCP8.5)، نشان می‌دهد [۳۴]. مقایسه چند سناریو (شکل ۲) نشان می‌دهد اگرچه تغییرات آینده استفاده از زمین می‌تواند به‌ویژه از طریق گسترش یا کاهش سطح اراضی زراعی بر روند فرسایش جهانی خاک تأثیر بگذارد، اما اقلیم جهانی که بالقوه به سمت چرخه‌های هیدرولوژیکی شدیدتر حرکت می‌کند، به عنوان یک عامل اصلی افزایش فرسایش خاک در آینده عمل خواهد کرد [۳۴]. اما در عرض‌های جغرافیایی معتدل و مناطقی مانند خاورمیانه علاوه بر اقلیم، مدیریت زمین و نقش سیاست‌گذاران محیط زیست نیز بسیار مهم و تأثیرگذار بر میزان فرسایش خاک است.

شکل ۹ نشان داد آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز مرکزی، جنوبی و شرق کشور از تغییرات ترکیبی کاربری اراضی و اقلیم بیشتر از سایر آبخیزهاست [۴۲]. در سناریوی SSP1-RCP2.6، بیشترین (۹۱۹ درصد) و کمترین (۰/۵ درصد) میزان افزایش میزان فرسایش نسبت به سناریوی پایه به ترتیب در حوضه آبخیز هامون- جازموریان و دریاچه ارومیه دیده می‌شود. در سناریوی SSP2-RCP4.5، نیز بیشترین (۱۱۴۰ درصد) و کمترین (۷ درصد) میزان افزایش میزان فرسایش نسبت به سناریوی پایه به ترتیب در حوضه آبخیز هامون- جازموریان و سفیدرود- هراز مشاهده می‌شود. در سناریوی SSP5-

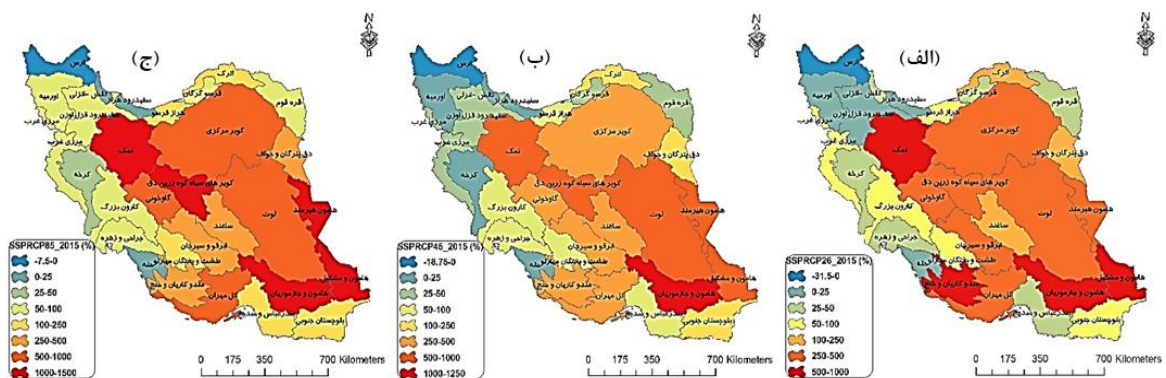


شکل ۸. نقشه‌های میزان فرسایش خاک تحت سناریوهای مختلف تغییر ترکیبی کاربری و اقلیم (میانگین ۱۴ مدل)، پیش‌بینی شده برای

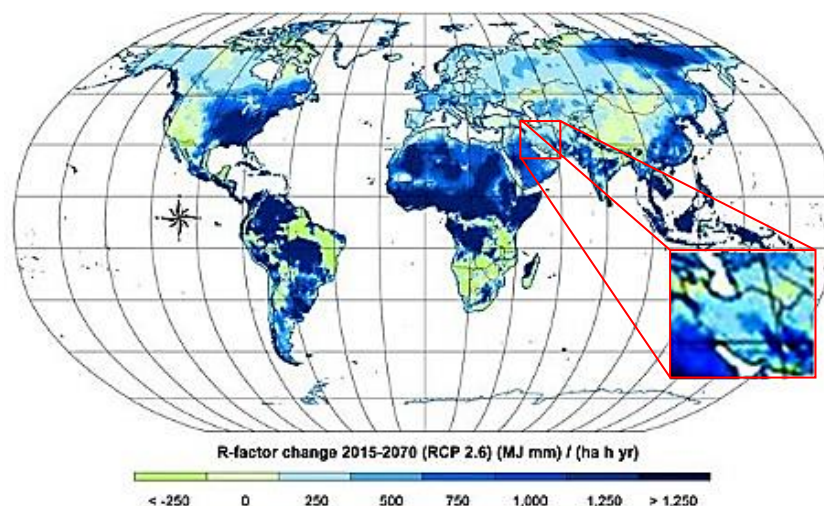
جدول ۵. میزان فرسایش در حوضه‌های آبخیز کشور تحت سناریوهای ترکیبی تغییر کاربری و تغییر اقلیم (میانگین ۱۴ مدل) پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۷۰ و مقایسه آنها با سناریوی پایه (۲۰۱۵)

سناریو				حوضه‌های آبخیز
SSP-RCP8.5	SSP-RCP4.5	SSP-RCP2.6	2015	
۳/۳۲	۲/۹۱	۲/۴۶	۳/۵۹	ارس
۸/۱۷	۷/۳۹	۸/۴۶	۶/۵۷	تالش انزلی
۳/۰۲	۲/۲۶	۲/۰۹	۱/۷۴	سفیدرود- قزل‌اوزن
۴/۸۲	۴/۱۲	۴/۲۰	۳/۸۶	سفیدرود- هراز
۳/۰۸	۲/۶۱	۲/۲۹	۱/۳۳	هراز- قره‌سو
۱/۵۶	۱/۳۴	۱/۵۰	۱/۰۲	قره‌سو- گرگان
۲/۲۶	۱/۷۱	۱/۶۷	۰/۸۱	اترک
۱۲/۱۰	۱۰/۴۶	۱۲/۵۳	۷/۶۱	مرزی غرب
۵/۳۱	۴/۴۲	۵/۵۱	۳/۸۷	کرخه
۷/۷۰	۶/۵۸	۶/۶۴	۳/۸۸	کارون بزرگ
۵/۹۶	۵/۷۷	۵/۶۲	۳/۷۵	جراحی و زهره
۳/۸۷	۳/۹۰	۳/۵۷	۳/۱۹	حله
۵/۰۹	۴/۷۶	۶/۱۷	۱/۰۰	مند و کاریان و خنج
۸/۰۷	۶/۱۶	۶/۶۰	۱/۳۱	کل مهران
۴/۰۳	۳/۱۷	۲/۵۴	۱/۷۹	بندرعباس و سدیح
۵/۲۶	۴/۶۷	۳/۵۳	۲/۰۹	بلوچستان جنوبی
۳/۸۱	۲/۶۵	۲/۳۵	۲/۳۳	ارومیه
۲/۵۵	۱/۸۱	۱/۳۸	۰/۲۳	دریاچه نمک
۳/۹۴	۲/۹۰	۲/۰۸	۰/۵۵	گاوخونی
۴/۱۷	۳/۱۰	۲/۷۷	۱/۶۵	طشت و بختگان مهارلو

سناریو				حوضه‌های آبخیز
SSP-RCP8.5	SSP-RCP4.5	SSP-RCP2.6	2015	
۵/۰۶	۳/۵۹	۳/۲۴	۱/۸۶	ایرقو و سیرجان
۴۵/۴۶	۱۲/۹۶	۱۰/۶۴	۱/۰۴	هامون و جازموربان
۱۳/۴۳	۹/۹۶	۷/۱۸	۱/۲۵	لوت
۴/۶۸	۳/۳۴	۲/۳۹	۰/۵۹	کوبیر مرکزی
۹/۴۱	۶/۸۲	۴/۸۱	۰/۸۱	کوبیرهای سیاه‌کوه زرین دق
۱۱/۶۳	۷/۸۵	۷/۵۰	۲/۱۷	ساغند
۵/۲۸	۳/۷۷	۲/۷۴	۱/۲۱	دق پترگان و خواف
۱۶/۸۶	۱۲/۰۵	۸/۰۰	۱/۳۵	هامون هیرمند
۲۶/۳۱	۲۱/۵۰	۱۵/۰۲	۲/۳۷	هامون و مشکیل
۲/۳۸	۱/۸۳	۱/۷۸	۱/۲۹	قره‌قوم



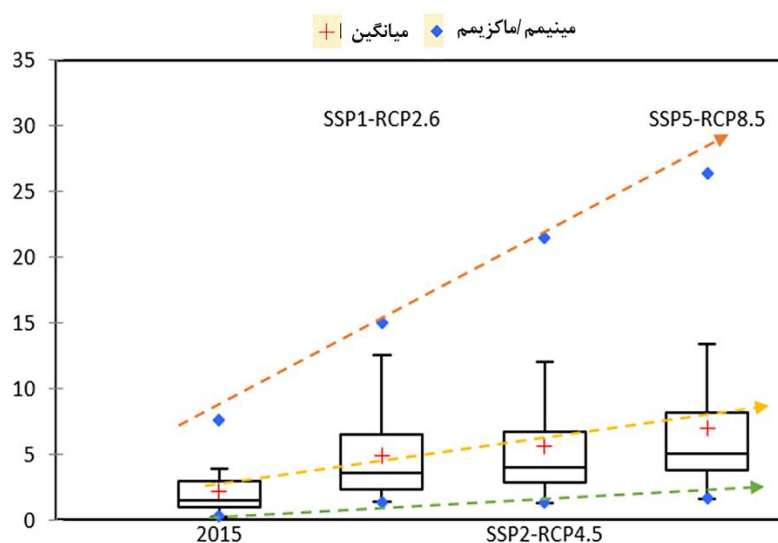
شکل ۹. تغییرات میزان فرسایش خاک (بر حسب درصد) در سناریوهای (الف) SSP1-RCP2.6؛ (ب) SSP2-RCP4.5؛ (ج) SSP5-RCP8.5 نسبت به سناریوی پایه در حوضه‌های آبخیز اصلی کشور



شکل ۱۰. نقشه جهانی میزان تغییرات R در سال ۲۰۷۰ (در سناریوی RCP2.6) نسبت به سال ۲۰۱۵

تغییرات متعلق به سنجۀ بیشینه فرسایش خاک است که روند معنادار به شدت افزایشی (۲۵۰ درصد نسبت به ۲۰۱۵) را نشان می‌دهد. این موضوع ثابت می‌کند که تغییر ترکیبی اقلیم و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر مقادیر حدی پدیده‌هایی مانند سیلاب و فرسایش خاک دارند [۴۲].

همان‌طور که در نمودارهای جعبه‌ای شکل ۱۱ دیده می‌شود، دامنه تغییرات فرسایش خاک در سناریوی پایه ۲۰۱۵ از سایر سناریوها کمتر است. شاخص‌های آماری کمینه، میانگین و بیشینه روند افزایشی را از سناریوی پایه تا سناریوی SSP5-RCP8.5 دنبال می‌کنند. اما بیشترین شیب



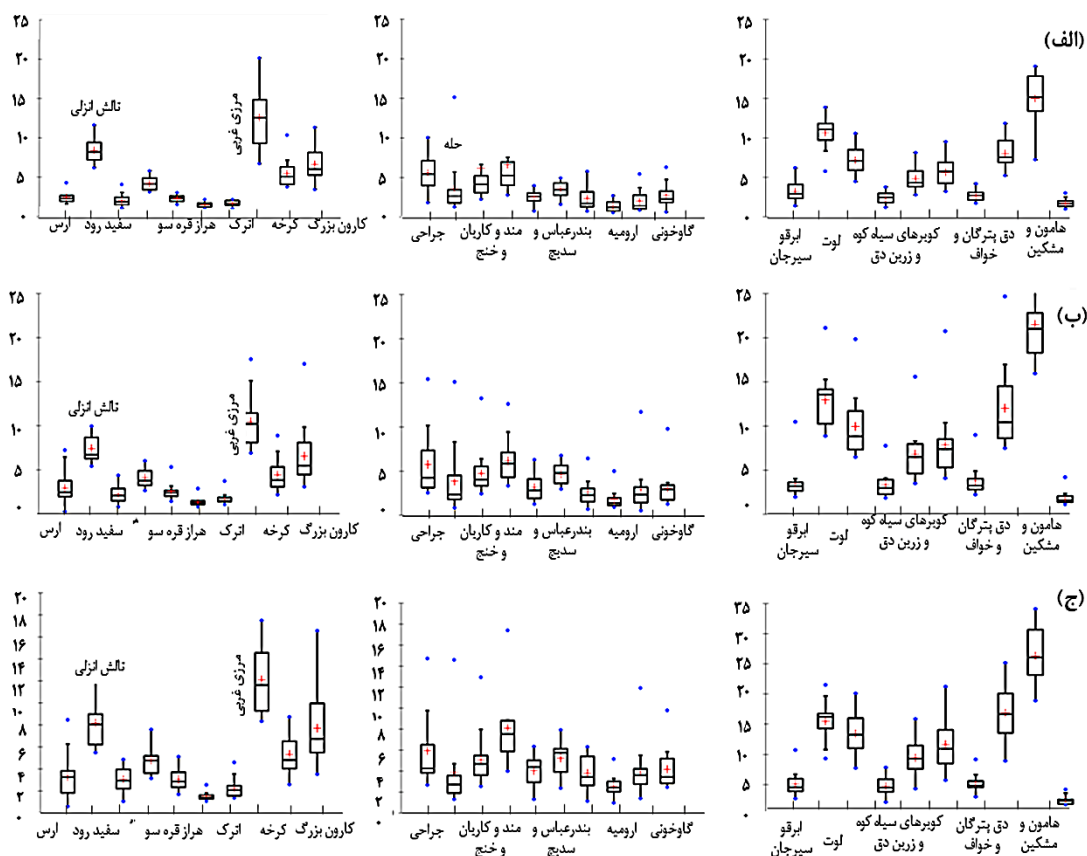
شکل ۱۱. نمودارهای جعبه‌ای میزان فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز کشور تحت سناریوهای ترکیبی تغییر کاربری و تغییر اقلیم (میانگین ۱۴ مدل) پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۷۰ و مقایسه آنها با سناریوی پایه (۲۰۱۵)

مشکیل، جراحی و زهره و هامون- هیرمند دیده می‌شود. بی‌شک افزایش دامنه تغییرات مدل‌ها نشان از عدم قطعیت بیشتر مدل‌سازی فرسایش در این حوضه‌های آبخیز است. دلایل آن می‌تواند در پیچیدگی و تنوع زیاد (توپوگرافی، اقلیم و پوشش گیاهی) این آبخیزها، دخالت

شکل ۱۲ که بر اساس نتایج حاصل از ۱۴ مدل گردش عمومی مندرج در جدول ۵ و تحت سناریوی SSP1-RCP2.6 به دست آمده نشان‌دهنده این است که بیشترین میزان تغییرات فرسایش خاک ناشی از مدل‌سازی در حوضه‌های آبخیز رودخانه‌های مرزی غرب، هامون-

قطعیت بیشتر مدل در فرایند مدل‌سازی این آبخیزهاست [۵۵ و ۵۷]. کمترین ضریب تغییرات و عدم قطعیت حاصل از مدل‌سازی با ۱۴ مدل گردش عمومی در حوضه‌های آبخیز قره‌قوم، اترک، قره‌سو - گرگان، هراز - قره‌سو، و ارس دیده می‌شود که همگی در نوار شمالی کشور قرار دارند. بارش در این آبخیزها بیشتر تحت تأثیر جریان‌های قطبی سیبری است که سرد و خشک است و دامنه نوسان کمتری دارد [۴۴].

زیاد انسان در تغییر کاربری‌ها و برداشت منابع (عدم قطعیت بیشتر در شاخص C) [۴۰]، و تحت تأثیر بودن این آبخیزها از جریان‌های مستقیم و نوسانی مونسون استوایی در جنوب و مدیترانه‌ای و حاره‌ای و قطبی در غرب و شمال غرب (عدم قطعیت بیشتر در شاخص R) باشد [۴۲ و ۴۳]. در حوضه‌های آبخیزی مثل حله و کل مهران ارزش بیشینه با چارک چهارم فاصله زیادی دارد و میانگین بر میانه انطباق ندارد که خود ناشی از عدم



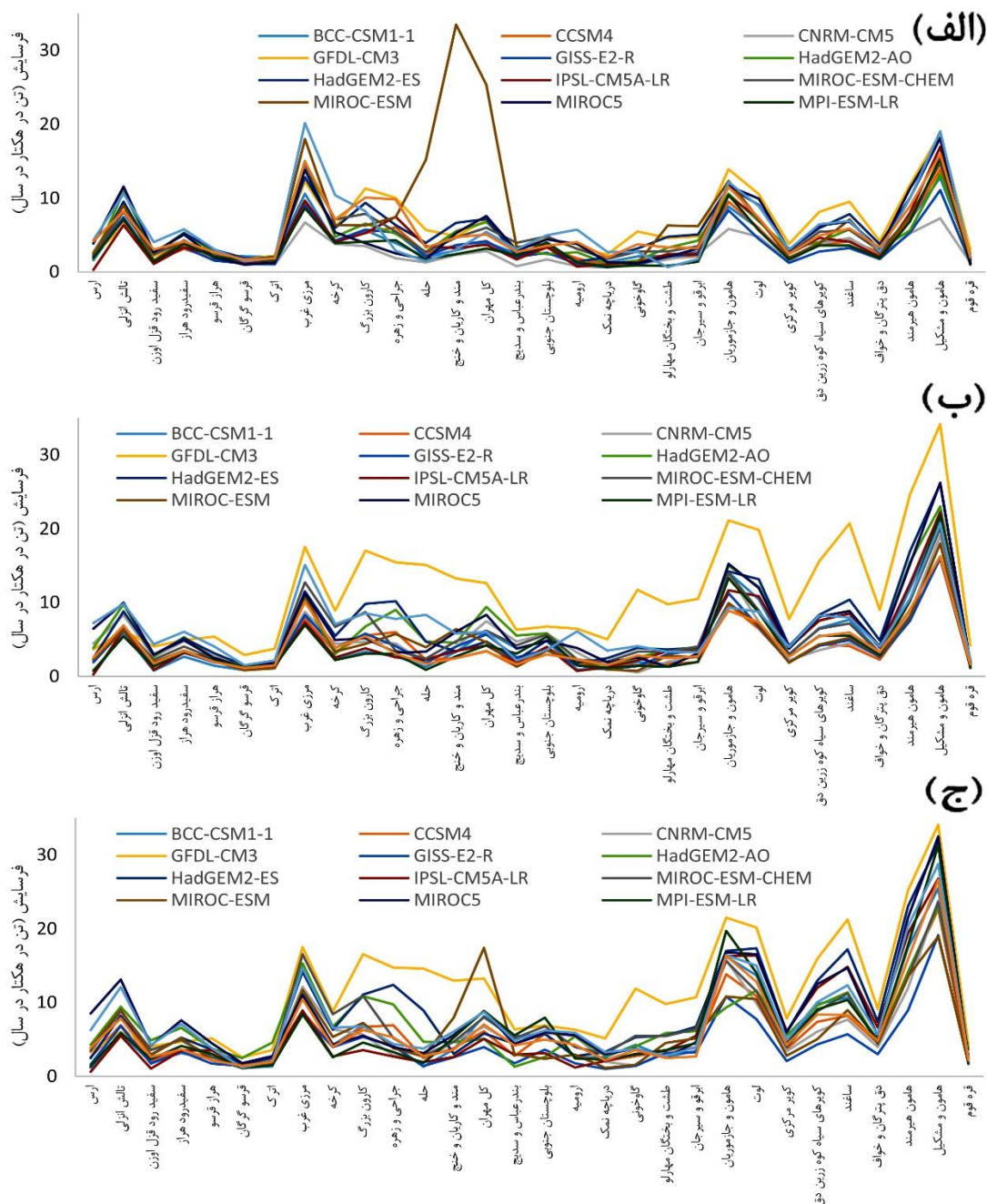
شکل ۱۲. نمودارهای جعبه‌ای میزان فرسایش در حوضه‌های آبخیز کشور تحت سناریوی ترکیبی تغییر کاربری و تغییر اقلیم الف- (SSP-0) RCP2.6) ب- (SSP-RCP4.5) و ج- (SSP-RCP8.5) پیش‌بینی شده توسط ۱۴ مدل گردش عمومی جو برای سال ۲۰۷۰

پایین‌تر از سایر آبخیزهاست. با بررسی نمودارهای جعبه‌ای حاصل از نتایج مدل‌سازی تحت سناریوی SSP5-RCP8.5 مشخص می‌شود (شکل ۱۲) که واگرایی نتایج مدل‌های چهارده‌گانه بیشتر شده و بی‌شک عدم قطعیت نتایج بیشتر خواهد شد. البته باز هم حوضه‌های آبخیز قره‌قوم، دق پترگان، خواف، اترک و قره‌سو - گرگان کمترین میزان ضریب تغییرات را نشان می‌دهند. نتایج حاصل از شکل ۱۳ نیز مبین این نکته است که

مدل‌سازی بر اساس سناریوی SSP2-RCP4.5 نیز (شکل ۱۲) منجر به واگرایی بیشتری در نتایج مدل‌ها شده و در نتیجه، با عدم قطعیت بیشتری در بیشتر حوضه‌های آبخیز به جز قره‌قوم، دق پترگان و خواف، کویر مرکزی، ابرقو و سیرجان، دریاچه نمک، اترک، قره‌سو - گرگان و هراز - قره‌سو مواجه خواهیم شد. آنچه مشخص است، عدم قطعیت و واگرایی بین مدل‌ها در این سناریو در حوضه‌های آبخیز خشک مرکزی بدلیل تنوع و پیچیدگی کمتر،

تغییر اقلیم در نقاط مختلف ایران استفاده شده و نتایج آن نیز در برخی پژوهش‌ها رضایت‌بخش [۴۷]، و در بعضی دیگر نامطلوب [۴۸] بوده است. بنابراین، ارزیابی عملکرد تک‌تک این مدل‌ها در حوضه‌های آبریز نیازمند داشتن آمار مشاهده‌ای و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با این آمار است که خود موضوعی برای پژوهش‌های کاربردی آینده خواهد بود.

از سناریوی SSP1-RCP2.6 بسمت SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 واگرایی نتایج مدل‌های چهارده‌گانه بیشتر شده، به طوری که در سناریوهای SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 مدل گردش عمومی GFDL-CM3 اختلاف معناداری با سایر مدل‌ها پیدا می‌کند. البته مدل گردش عمومی GFDL-CM3 در مطالعات ارزیابی اثر



شکل ۱۳. میزان فرسایش خاک تحت سناریوی ترکیبی تغییر کاربری و تغییر اقلیم الف - (SSP-RCP2.6)، ب - (SSP-RCP4.5) و ج - (SSP-RCP8.5) پیش‌بینی شده توسط ۱۴ مدل گردش عمومی جو برای سال ۲۰۷۰ در حوضه‌های آبخیز کشور

نتیجه‌گیری

بزرگی از اهداف تعریف‌شده در برنامه توسعه پایدار ملل متحد^۱ است. این امر به‌ویژه برای دستیابی به:

۱. جهانی‌سازی از تخریب زمین تا سال ۲۰۳۰ (هدف ۱۵)؛

۲. حفظ کیفیت خاک برای دستیابی به امنیت غذایی (هدف ۲)؛

۳. اطمینان از دسترس بودن و مدیریت پایدار منابع آب (هدف ۶)؛

۴. پایان دادن به فقر (هدف اول)؛

۵. کاهش نابرابری (هدف ۱۰)؛

۶. اقدام برای مقابله با گرم شدن کره زمین (هدف ۱۳) صادق است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در روند آینده تغییرات اقلیم و کاربری اراضی تا سال ۲۰۷۰، حوضه‌های آبخیز هامون- جازموریان، هامون- هیرمند، کویرهای سیاه‌کوه زرین‌دق، دریاچه نمک، لوت، کویر مرکزی، و گاوخونی بیشترین آسیب‌پذیری را ناشی از فرسایش خاک خواهند داشت. بی‌شک با کاهش امنیت غذایی و زیست‌پذیری در این آبخیزها که هم‌اکنون نیز با کاهش شدید منابع در دسترس مواجه‌اند، روند مهاجرت‌های اکولوژیک تشدید شده و فشار مضاعفی بر حوضه‌های آبخیز غرب، شمال غرب و شمال کشور وارد می‌شود که در نهایت، منجر به تخریب بیشتر سرزمین ایران خواهد شد.

مقایسه نتایج حاصل از پایگاه GloSEM در سناریوی پایه (۲۰۱۵) با نتایج مشاهده‌ای حاصل از اجرای مدل جهانی فرسایش در مقیاس حوضه آبخیز که توسط محققان در سراسر کشور انجام شده است، دریچه پژوهشی مطلوبی را نیز برای تحقیقات آینده باز کرده و به اعتبارسنجی بیشتر این پایگاه در سطح کشور کمک می‌کند.

منابع

- [1]. Akbari M, Ownegh M, Asgari H, Sadoddin A, Khosravi H. Soil Erosion Risk Assessment Using the CORINE Model (Case Study: Semi-Arid Region in Golestan Province). Desert Ecosystem Engineering Journal. 2016; 12: 63-78 [Persian]

با در نظر گرفتن اثر ترکیبی تغییر کاربری و اقلیم، روند تغییرات فرسایش خاک بین سناریوی پایه (۲۰۱۵) با سناریوهای SSP1-RCP2.6، SSP2-RCP4.5 و SSP5-RCP8.5 در تمامی حوضه‌های آبخیز به‌جز حوضه آبخیز ارس به صورت افزایشی است. نتایج مدل‌سازی نیز ثابت می‌کند که تغییرات اقلیمی عامل اصلی تغییر در فرسایش خاک است. مطالعات نشان داد آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز مرکزی، جنوبی و شرق کشور از تغییرات ترکیبی کاربری اراضی و تغییر اقلیم بیشتر از سایر آبخیزهاست. به طوری که در کلیه سناریوها، بیشترین (۹۱۹ تا ۱۳۸۲ درصد) میزان افزایش فرسایش نسبت به سناریوی پایه در حوضه آبخیز هامون- جازموریان به دست آمد. شاخص‌های آماری کمینه، میانگین و بیشینه روند افزایشی را از سناریوی پایه تا سناریوی SSP5-RCP8.5 دنبال می‌کنند. اما بیشترین شیب تغییرات متعلق به سنجه بیشینه فرسایش خاک است که روند معنادار به‌شدت افزایشی (۲۵۰ درصد نسبت به ۲۰۱۵) را نشان می‌دهد. این موضوع ثابت می‌کند که تغییر ترکیبی اقلیم و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر مقادیر حدی پدیده‌هایی مانند سیلاب و فرسایش خاک دارد. بر اساس نتایج حاصل از ۱۴ مدل گردش عمومی بیشترین میزان تغییرات فرسایش خاک ناشی از مدل‌سازی در حوضه‌های آبخیز رودخانه‌های مرزی غرب، هامون- مشکیل، جراحی و زهره و هامون- هیرمند دیده می‌شود. کمترین ضریب تغییرات و عدم قطعیت حاصل از مدل‌سازی با ۱۴ مدل گردش عمومی در آبخیزهای قره قوم، اترک، قره‌سو - گرگان، هراز- قره‌سو، و ارس دیده می‌شود که همگی در نوار شمالی کشور قرار دارند.

محاسبات بیانگر این است که تشدید شرایط اقلیمی حتی در سناریوی SSP1-RCP2.6 می‌تواند میانگین فرسایش خاک را به صورت جهانی تا ۳۰ درصد افزایش دهد. همان‌طور که یافته‌های این تحقیق نیز نشان می‌دهد، افزایش ناشی از تغییرات اقلیم در فرسایش خاک، همراه با تخریب سرزمین و از دست دادن خدمات اصلی بوم‌سازگان، تهدیدی جدی برای دستیابی به مجموعه

- [2]. Demirci A, Karaburun A. Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece Lake watershed, northwest Turkey. *Environmental Earth Sciences*. 2011; 66: 903–913. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1300-9>.
- [3]. Xu L, Xu X, Meng X. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: a case study of Bohai Rim, China. *Catena*. 2013. 100: 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.012>
- [4]. Imbrenda V. Indicators for the estimation of vulnerability to land degradation derived from soil compaction and vegetation cover. *European Journal of Soil Science*. 2014; 65: 907–923. <https://doi.org/10.1111/ejss.12184>
- [5]. Montanarella L. Agricultural policy: Govern our soils. *Nature*. 2015. 528: 32–33
- [6]. Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson P, Smith P. Climate-smart soils. *Nature*. 2016; 532: 49–57
- [7]. Telles TS, Guimarães M, Dechen SC. The costs of soil erosion. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2011; 35: 287–298
- [8]. FAO. Healthy Soils Are the Basis for Healthy Food Production (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. 2015; pp. 1–4. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/645883cd-ba28-4b16-a7b8-34babbb3c505/>. Accessed 11 August 2020
- [9]. Montgomery DR. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007; 104: 13268–13272
- [10]. Akbari M, Neamatollahi E, Neamatollahi P. Evaluating land suitability for spatial planning in arid regions of eastern Iran using fuzzy logic and multi-criteria analysis. *Ecological Indicators*. 2019; 98: 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.ecoli.2018.11.035>.
- [11]. Robinson et al. Soil Natural Capital in Europe; A framework for state and change assessment. *Scientific Reports*. 2017; 7: 6706
- [12]. Li J, Richter DD. Effects of two-century land use changes on soil iron crystallinity and accumulation in Southeastern Piedmont region, USA. *Geoderma*. 2011; 173-174:184–191.
- [13]. Qiu L, X. Wei X, Zhang J, Cheng W, Gale C, Long T. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland. *Plant and Soil*. 2012; 355: 299-309.
- [14]. O’Neal MR, Nearing MA, Vining RC, Southworth J, Pfeifer RA. Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. *Catena*. 2005; 61, 165–184
- [15]. Nabati J, Nezami A, Neamatollahi E, Akbari M. GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicators*. 2020; 117: 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>.
- [16]. Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*. 2011; 333: 616-620
- [17]. Brevik EC, Slaughter L, Singh BR, Steffan JJ, Collier D, Barnhart P, Pereira P. Soil and Human Health: Current Status and Future Needs Show less, Air, Soil and Water Research. 2020; 13: 1–23. <https://doi.org/10.1177/1178622120934441>
- [18]. Liu C, Hofstra N, Franz E. Impacts of climate change on the microbial safety of pre-harvest leafy green vegetables as indicated by *Escherichia coli* O157 and *Salmonella* Spp. *International Journal of Food Microbiology*. 2013; 163: 119–128
- [19]. Butler C, McFarlane R. Climate Change, Food Security, and Population Health in the Anthropocene, *Encyclopedia of the Anthropocene*. 2018; 2: 453-459
- [20]. UNCCD. Land degradation, poverty and inequality. <https://www.unccd.int/publications/land-degradation-poverty-and-inequality>. 2019; Accessed 11 August 2020.
- [21]. Robinson D, Panagos P, Borrelli P, Jones A, Montanarella L, Tye A, Obst CG. Soil natural capital in Europe; A framework for state and change assessment. *Scientific Reports*. 2017; 7: 6706
- [22]. Diffen NS, Burke M. Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019; 116: 9808–9813
- [23]. Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Titttonell P, Smith P, Cerdà et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*. 2016; 2(2): 111-128.
- [24]. Missirian W. Asylum applications respond to temperature fluctuations. *Science*. 2017; 358: 1610–1614

- [25]. Han H, Yang J, Ma G, Liu Y, Zhang L, Chen S, Ma S. Effects of land-use and climate change on sediment and nutrient retention in Guizhou, China. *Ecosystem Health and Sustainability*. 2020; 6(1): 1810592. <https://doi.org/10.1080/20964129.2020.1810592>
- [26]. Kogo BK, Kumar L, Koech R. Impact of Land Use/Cover Changes on Soil Erosion in Western Kenya. *Sustainability*. 2020; 12: 9740. <https://doi.org/10.3390/su12229740>
- [27]. Chen CN, Tfwala SS, Tsai CH. Climate Change Impacts on Soil Erosion and Sediment Yield in a Watershed. *Water*. 2020; 12: 2247; <https://doi.org/10.3390/w12082247>
- [28]. Fu A, Cai Y, Sun T, Li F. Estimating the Impact of Land Cover Change on Soil Erosion Using Remote Sensing and GIS Data by USLE Model and Scenario Design. *Scientific Programming*. 2021; 6633428. <https://doi.org/10.1155/2021/6633428>
- [29]. Yang D, Kanae S, Oki T, Koike T, Musiake K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*. 2003; 17: 2913–2928
- [30]. Ito A. Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100. *Geophysical Research Letters*. 2007; 34: L09403
- [31]. Liu L, Zhang X, Gao Y, Chen X, Shuai X, Mi J, Finer-Resolution Mapping of Global Land Cover: Recent Developments, Consistency Analysis, and Prospects, *Journal of Remote Sensing*, 2021; 38: 5289697. <https://doi.org/10.34133/2021/5289697>
- [32]. Fick SE, Hijmans RJ. World Clim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017; 37: 4302–4315
- [33]. Panagos et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*. 2017; 7: 4175
- [34]. Borrelli P, Robinson DA, Panagos P, Lugato E, Yang JE, Alewell et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117(36): 21994-22001.
- [35]. Forest, Range and Watershed Management Organization. Landscape Study of Watersheds. Deputy of Watershed Management, Watershed Annual Report. 2007-2008; 27 pp. [Persian]
- [36]. Nikkami DM, Arabkhedri A. Sarreshtedari L, Dadmarz L. Investigation and determination of the most appropriate erosivity index in different regions of Iran. Final report of the research project. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. 2013; 120 p [Persian]
- [37]. Khajavi E, ArabKhedri M, Mahdian MH, Shadfar S. Investigation of water erosion and soil loss values with using the measured data from Cs-137 method and experimental plots in Iran. *Journal of Watershed Management Research*. 2015; 6(11): 137-151 [Persian]
- [38]. Feyz Nia S. Resistance of rocks to erosion in different climates of Iran. (2001); 95-116. [Persian]
- [39]. Goodarzi M, Pourhashemi M, Zahra Azizi Z. Investigation on Zagros forests cover changes under the recent droughts using satellite imagery, *Journal of Forest Science*. 2019; 65: 9-17. <https://doi.org/10.17221/61/2018-JFS>
- [40]. Tajbakhsh SM, Memarian H, Moradi K, Afshar AA. Performance comparison of land change modeling techniques for land use projection of arid watersheds. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2018; 4(3): 263-280.
- [41]. Azad Gholami Kasmakhi F, Rezaei P, Gandomkar A. Seasonal Analysis of Days of Heavy Rainfall in Talesh-Anzali Basin, *Journal of Natural Environmental Hazards*. 2020; 9(25): 17-40. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.30614.1533> [Persian]
- [42]. Vaghefi SA, Keykhai M, Jahanbakhshi F, Sheikholeslami J, Ahmadi A, Yang H, Abbaspour KC. The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*. 2019; 9(1): 1-11.
- [43]. Babaeian I, Modirian R, Karimian M, Zarghami M. Simulation of climate change in Iran during 2071-2100 using PRECIS regional climate modelling system. 2015; [Persian]
- [44]. Alizadeh A. Principles of applied hydrology. Mashhad: Emam Reza University. 2008 [Persian]
- [45]. Arabkhedri M. A Review on Major Water Erosion Factors in Iran, *Journal of Land Management*. 2014; 2(1): 17 - 26. [Persian]
- [46]. Ebrahimzadeh I, Esmaeil Nejad M. The Future Challenge of Climatic Refugees Regional Developments Case study: South Khorasan, *Geography and Development Iranian Journal*. 2017; 15(48): 1-18. DOI:10.22111/gdij.2017.3347 [Persian]

- [47]. Sharafati A, Pezeshki E. A strategy to assess the uncertainty of a climate change impact on extreme hydrological events in the semi-arid Dehbar catchment in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 2020; 139(1): 389-402
- [48]. Afshar AA, Hasanzadeh Y, Besalatpour AA, Pourreza-Bilondi M. Climate change forecasting in a mountainous data scarce watershed using CMIP5 models under representative concentration pathways. *Theoretical and applied climatology*. 2017; 129(1): 683-699
- [49]. Sadeghi SHR, Hazbavi Z. Trend analysis of the rainfall erosivity index at different time scales in Iran. *Natural Hazards*. 2015; 77(1): 383-404. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1607-z>
- [50]. Taghipour M, Yaghmaeian Mahabadi N, Shabanpour M. Effect of Land Use Change on Organic Carbon Storage in Aggregates and Bulk Soil in Tootkabon Area, Guilan Province. *Iranian Journal of Soil Research*. 2020; 33(4): 577-590. [Persian]
- [51]. Ramezani H, Rasooli N. Effects of Land Use Changes and Parent Materials on Some Soil Properties in Guilan Province. *Iranian Journal of Soil Research*. 2015; 29(2): 221-231 [Persian]
- [52]. Mozaffari H, Moosavi AA, Sepaskhah AR. Effect of Land Use on of Some Physical and Chemical Properties of a Calcareous Soil. *Journal of Soil Research*. 2019; 33(4): 525-541 [Persian]
- [53]. Jalali H. *Agriculture in Iran*. Agricultural Office of Statistics Center of Iran. <https://www.amar.org.ir>. 2018. Accessed 12 April 2020.
- [54]. Ministry of Agriculture, Deputy Minister of Livestock Production, *Livestock Population Statistics in 2009*. <https://dla.maj.ir>. Accessed 22 April 2021.
- [55]. Memarian H, Bilondi MP, Komeh Z. Parameter Optimization of KINEROS2 Using Particle Swarm Optimization Algorithm within R Environment for Rainfall-Runoff Simulation. In *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. 2019; 117-146.
- [56]. IPCC. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014; 1132 pp.
- [57]. Memarian H, Afshar AA, Abbas Nia M, Majidi M. *Modeling the effects of climate change on water resources*, Isfahan University Jihad Publishing. 2019. [Persian]
- [58]. Popp A, Calvin K, Fujimori S, Havlik P, Humpenöder F, Stehfest et al. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*. 2017; 42: 331-345.