

برآورد و مقایسه تغییرات فرسایش خاک ناشی از اتلاف پوشش گیاهی در زیر حوضه‌های شرقی آبخیز دریاچه ارومیه

اردوان زرنیدیان^{*}، رویا موسی زاده^۲، مجید رضانی مهریان^۳، سید قاسم قربان زاده زعفرانی^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

چکیده

فرسایش خاک و رسوب‌گذاری در آبخیز در صورت تشدید می‌توانند پیامدهای محیط زیستی سنگینی به همراه داشته باشند. هدف این تحقیق معرفی یک روش مدل‌سازی با کاربرد در برآورد میزان تغییرات در فرسایش خاک در طول زمان و ارزیابی اثر پوشش گیاهی بر فرسایش در محدوده‌های بحرانی است. در این تحقیق برای مدل‌سازی هم‌زمان تغییرات پوشش گیاهی و فرسایش خاک از مدل سامانه پشتیبان سیاست‌گذاری جهانی آب (WWPSS)، استفاده شد. برای ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ از داده‌های پایگاه داده‌های مدل از تصاویر ماهواره‌ای MODIS VCF استفاده شد. همچنین برای سنجش مقدار و تغییرات در فرسایش خالص خاک (فرسایش منهای رسوبگذاری در همان محل) در دو وضعیت پایه و جاری (قبل و بعد از کاهش پوشش گیاهی)، از نقشه‌ها و محاسبات حاصل از اجرای مدل بهره گرفته شد. بر اساس یافته‌های این تحقیق، میانگین درصد پوشش علفی-مرتعی حوضه مورد مطالعه در بازه زمانی مورد نظر، از ۷۸/۳۶٪ در شرایط پایه (سال ۲۰۰۰) به حدود ۴۷٪ در شرایط موجود کاهش یافته است. مقدار میانگین فرسایش خالص خاک در دو زیر حوضه آجی چای و مردوق چای به ترتیب بیش از ۲۷۷٪ و ۳۳٪ افزایش یافته است که این دو زیرحوضه را در میان چهار زیرحوضه مورد مطالعه به‌عنوان محدوده‌های بحرانی فرسایش خاک تعیین می‌نماید. در مجموع همان‌گونه که انتظار می‌رفت، اتلاف ۴۰ درصدی پوشش گیاهی در محدوده مورد مطالعه، پیامدهای مخاطره‌آمیزی را طی دوره زمانی مورد بررسی بجای گذاشته است و به‌صورت تجمعی منجر به تخریب بیش از ۸ میلیون تن خاک طی ۱۵ سال شده است. روش به کار گرفته شده در این تحقیق می‌تواند با کاربرد در ارزیابی‌های کمی و سریع محیط زیستی که نیازمند تعیین کمیت‌های دقیق‌تری از پیامدهای محیط زیستی مانند فرسایش خاک هستند، مفید واقع گردد.

واژه‌های کلیدی: پوشش گیاهی، فرسایش خاک، مدل‌سازی، مدل WWPSS، حوضه‌های شرقی آبخیز دریاچه ارومیه

زرنیدیان ا.، موسی زاده ر.، رضانی مهریان م.، قربان زاده زعفرانی ق. ۱۴۰۲. برآورد و مقایسه تغییرات فرسایش خاک ناشی از اتلاف پوشش گیاهی در زیر حوضه‌های شرقی آبخیز دریاچه ارومیه. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۱، شماره ۴. صفحه: ۷۷-۹۴.

۱- دانشیار گروه پژوهشی ارزیابی و مخاطرات محیط زیستی، پژوهشکده محیط‌زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران (مکاتبه کننده)

۲- استادیار گروه پژوهشی اقتصاد محیط‌زیست، پژوهشکده محیط‌زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مطالعات محیطی، پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی (سمت)، تهران، ایران

۴- استادیار گروه پژوهشی تنوع زیستی و ایمنی زیستی، پژوهشکده محیط‌زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران

*پست الکترونیک: azarandian@gmail.com

مقدمه

های زمانی، مالی، وسیع بودن محدوده های مطالعاتی و دشواری نمونه برداری های کافی صحرایی و میدانی، صرفاً به ارزیابی های کیفی از پیامد های مورد نظر اکتفا می شود و پیش بینی عوارض ناشی از فرسایش خاک، با عبارات توصیفی چون شدید، متوسط، کم و ... بیان می گردد. بدیهی است که اینگونه ارزیابی های توصیفی، به دلیل عدم تعیین کمیت پیامد های سوء احتمالی، نمی توانند آنطور که باید، در برنامه ریزی ها و تصمیم گیری های توسعه ای و حفاظتی برای کنترل و بهبود حفاظت محیط زیست و اجزای آن موثر واقع شوند.

با توجه به توضیحات بالا، هدف این تحقیق معرفی یک روش مدل سازی برای برآورد میزان تغییرات در فرسایش خاک در طول زمان و ارزیابی اثر پوشش گیاهی بر فرسایش به صورت کمی و همراه با نمایش محدوده های بحرانی فرسایش به صورت نقشه است. بنابراین، روش به کار گرفته شده در این تحقیق می تواند با کاربرد در ارزیابی های کمی و سریع محیط زیستی که نیازمند تعیین کمیت های دقیق تری از پیامد های محیط زیستی مانند فرسایش خاک هستند و از طرفی با محدودیت در انجام مطالعات میدانی سنگین مواجه اند، به عنوان یک رویکرد جایگزین و ممکن، تأثیر قابل توجهی در افزایش دقت برآورد های انجام شده، داشته باشند.

در دهه اخیر، حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، به دلیل اهمیت بوم شناختی دریاچه ارومیه از یکسو و مشکلات ناشی از خشکسالی بی سابقه، بهره برداری بی رویه از منابع آب حوضه دریاچه، سدسازی، تغییرات اقلیمی، کاهش تراز آب دریاچه و... کانون توجه محققین و کارشناسان مختلف علوم طبیعی بوده است (Chakherlou *et al.*, 2020). مطالعات زیادی انجام شده اند که حاکی از وقوع تغییرات چشمگیر کاهشی و بعضاً اتلاف بخش های مهمی از پوشش گیاهی مرتعی در نواحی مختلف این حوضه آبخیز به ویژه قسمت های شرقی آن در محدوده جغرافیایی استان آذربایجان شرقی هستند (Ahmadi *et al.*, 2018; Amini *et al.*, 2017; Ghorbanalizadeh *et al.*, 2020; Kamali *et al.*, 2019; Rostami *et al.*, 2019; Youneszadeh Jalili, 2015). همچنین با توجه به رابطه و اثر مستقیم فقدان پوشش گیاهی بر افزایش مقدار فرسایش خاک به دلیل قرار گرفتن در معرض مستقیم باد و باران، برخی مطالعات نیز

فرسایش خاک و رسوب گذاری در آبخیز یکی از عوامل مهم خسارت زا برای زیرساخت ها، کشاورزی و محیط زیست محسوب می شوند (Sujatha & Sridhar, 2018; Ahmadi *et al.*, 2021). اگرچه فرسایش و رسوب گذاری فرایندهایی طبیعی هستند که در سلامت بوم سازگان نقش دارند اما اگر تشدید گردند می توانند پیامدهای محیط زیستی زیادی به همراه داشته باشند. فرسایش زیاد می تواند موجب کاهش بهره وری در کشاورزی، افزایش سیلاب و نقل و انتقال آلاینده ها و تهدید زیرساخت هایی چون مخازن سد، راه ها و تأسیسات نیروگاهی شود و همچنین هزینه های تصفیه آب را افزایش می دهد (Sujatha & Sridhar, 2018). مقدار انتقال رسوب در آبخیز بستگی به عوامل متعددی دارد. انواع خاک، الگوهای بارش و شیب دارای تأثیرات زیادی بر الگوهای فرسایش و تولید هرز آب های رسوبی هستند (Mulligan *et al.*, 2013).

بررسی میزان فرسایش و تولید رسوب در زیر حوضه های آبخیز برای حفاظت از منابع آب و خاک و پوشش گیاهی ضرورت دارد (Sarai Tabrizi & Mohammadian, 2021; Khorasani, 2022; Mohamadi *et al.*, 2021). پوشش گیاهی می تواند در نگهداری خاک در محل های معین و به دام اندازی رسوب و پیشگیری از حرکت آن در سطح زمین نقش مهمی داشته باشد. بر این اساس، تغییرات در وضعیت اقلیمی و بارش که موجب دگرگونی پوشش گیاهی می شود می تواند موجب تغییر در ظرفیت تثبیت رسوب گردد (Mulligan, 2012). در این زمینه تحقیقات زیادی وجود دارد که اثرات کاربری، پوشش زمین و تغییرات آن بر فرسایش و رسوب گذاری را تصدیق می نماید. به عنوان مثال، در صورت کاهش نواحی مرتعی و درختی، پیامد آن جاری شدن گل و زمین لغزه پس از بارندگی سنگین خواهد بود. حتی در مناطقی که پوشش/ کاربری تغییر نکند، سیاست های مدیریتی مختلف می تواند بر ظرفیت تثبیت رسوب در آبخیز، اثرگذار باشد و آن را تغییر دهد. از این رو، در بسیاری از مطالعات محیط زیستی و ارزیابی های بوم سازگان، بررسی روند تغییرات احتمالی در متغیرهای مختلف بوم شناختی مانند تخریب پوشش گیاهی و پیامدهای آن بر خاک ضروری است. اما معمولاً در این گونه مطالعات، به دلیل محدودیت

از مدل سامانه پشتیبان سیاست‌گذاری جهانی آب که از این به بعد به اختصار مدل *WWPSS* نامیده می‌شود، استفاده شد. قابلیت‌های فناورانه مدل *WWPSS*، در بررسی هم‌زمان وضعیت پوشش گیاهی، هیدرولوژی و فرسایش خاک، ابزاری کارآمد را برای انجام سنجش‌های مربوط به تغییرات این موارد مهم فراهم می‌نماید و کاربست آن در هنگام ارزیابی‌های محیط زیستی که نیازمند انجام بررسی‌های مربوط به پارامترهای مختلف و متنوع فیزیو-اکولوژیک است، کمک زیادی به ارزیابان و تصمیم‌سازان محیط زیستی می‌نماید. مطالعات زیادی در سطح بین‌المللی انجام شده است که برای مدل‌سازی تغییرات پوشش گیاهی و رابطه آن با شرایط هیدرولوژیک و فرسایش خاک از این مدل استفاده نموده‌اند (Birch et al., 2014; Mulligan, 2012; van Soesbergen & Mulligan, 2014). کاربرد این مدل توسط محققین در نقاط مختلف دنیا، علیرغم اینکه مدت زیادی از معرفی آن نگذشته است، به‌طور قابل توجهی در حال افزایش است.

ون سوئسبرگن و مولیگان در یک تحقیق منتشر شده در سال ۲۰۱۲، نوآوری‌های کلیدی مدل *WWPSS* را تشریح نموده و ویژگی‌های کلیدی این مدل را، تامین کلیه داده‌های لازم توسط خود مدل بر مبنای تحت وب بودن آن و اتصال با پایگاه‌های مختلف داده‌های ماهواره‌ای و سنجش از دوری با قدرت تفکیک نسبتاً بالای ۱ کیلومتر تا ۱ هکتار دانسته‌اند. بر اساس تحقیق آنها، این مدل بر پشتیبانی از سیاست‌ها، به ویژه در برنامه‌های حفاظتی مورد نیاز در حوزه‌های هیدرولوژیک تمرکز دارد. بنابراین کمبود داده‌های هیدرولوژیکی و خاکشناختی و فوریت مشکلاتی که به دنبال دارد را در بسیاری از کشورهای کمتر توسعه یافته مورد بحث قرار داده‌اند و بر این اساس استفاده از این مدل را برای کمک به ارزیابی‌ها و مدیریت محیط زیست و منابع طبیعی توصیه نموده‌اند. در این تحقیق سنجش اثرات تهدیدهای چندگانه جنگل‌زدایی، در جنگل‌های آمازون در کشور پرو از هر دو منظر اثر فرسایش بر کیفیت و کمیت آب مورد توجه قرار گرفته است (van Soesbergen & Mulligan, 2014).

بیرچ و همکاران از این مدل برای ارزیابی شرایط پایه هیدرولوژیکی و اثرات تغییرات کاربری زمین بر آن، با

به برآورد میزان فرسایش خاک در قسمت‌های مختلف این حوضه آبخیز پرداخته‌اند.

سوری نژاد در پژوهشی کار برآورد رسوب ویژه و تعیین کانون‌های فرسایش‌پذیری زیر حوضه‌های حوضه آبخیز دریاچه ارومیه را با استفاده از *GIS* و روش تجربی *EPM* انجام داده و شدت فرسایش‌پذیری آن‌ها را محاسبه و طبقه‌بندی نموده است (Sourinejad, 2019). بر اساس نتایج این مطالعه، رسوب ۱۴/۳ درصد از زیر حوضه‌ها بین ۶ تا ۸/۴۴ تن در هکتار و حدود ۶۹/۱۹ درصد از آن‌ها بین ۲/۸۳ تا ۵/۵۴ تن در هکتار است، لذا در رده کانون‌های شدید و متوسط قرار دارند. حدود ۱۳٪ از مساحت حوضه نیز دارای کلاس فرسایشی شدید است. در سایر زیر حوضه‌ها نیز رسوب سالانه نسبتاً کم بوده و میانگین وزنی آورد سالانه رسوب در سطح کل این حوضه حدود ۴/۶۳ تن در هکتار است.

بیات و همکاران مطالعه‌ای را به کمک فن‌آوری‌های سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به منظور تعیین اثر تغییر مدیریت کاربری اراضی بر میزان فرسایش حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، انجام دادند (Biat et al., 2012). در این مطالعه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای *ETM+* عملیات صحرائی و نقشه‌های موجود، لایه‌های موردنیاز مدل تهیه و میزان فرسایش خاک در شرایط فعلی برآورد شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین و کمترین میزان فرسایش ویژه در زیر حوضه‌های مختلف دریاچه ارومیه به ترتیب ۱۱/۵۲ و ۰/۲۲۵ تن در هکتار در سال است. مقدار میانگین فرسایش برای کل حوضه ۶/۸۱ تن در هکتار در سال است. روند تغییر شدت فرسایش در اثر تغییر کاربری به صورت خطی و مثبت بوده، با افزایش و کاهش پوشش گیاهی به ازای ۵۰ درصد، به ترتیب ۷/۸۳ و ۶/۶۴- درصد در فرسایش خاک تغییر ایجاد می‌کند.

در مطالعات قبلی ذکر شده، اگرچه بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و پردازش آنها به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی (*GIS*) انجام شده است؛ اما استفاده از مدل‌های در حال تکامل بوم‌سازگان که کار تحلیل متغیرهای مختلف بوم‌شناختی از جمله پوشش گیاهی، شرایط هیدرولوژیکی و خاک را با هم مد نظر قرار نگرفته است. در این تحقیق برای مدل‌سازی هم‌زمان تغییرات پوشش گیاهی و فرسایش خاک

ارزیابی فرار گرفته است. گام های اصلی در انجام ارزیابی مورد نظر عبارتند از: (الف) بررسی روند تغییرات تراکم پوشش گیاهی در طول زمان (دوره ۲۰ ساله ۲۰۲۰-۲۰۰۰)، (ب) سنجش و بررسی تغییرات در فرسایش خاک در سطح حوضه آبخیز مورد مطالعه ناشی از روند تغییرات در پوشش گیاهی، (ج) تحلیل تغییرات فرسایش خاک در سطح زیرحوضه های آبخیز مورد مطالعه با هدف تعیین محدوده های بحرانی تر.

همانطور که قبلا بیان شد، روش مورد استفاده در این تحقیق، می تواند در انجام ارزیابی های بوم سازگان و محیط زیستی در نقاط مختلف کشور که نیازمند سنجش های اثرات متقابل عوامل مختلف اکو-هیدرولوژیکی و خاکشناختی هستند مورد استفاده قرار گیرد و بر اساس کمیت های مورد سنجش، کمک بهتری برای تدوین راهبردها و راهکار های تخفیف اثرات سوء محیط زیستی ناشی از تغییرات کاربری و سایر اقدامات و تصمیم های توسعه ای و انسانی نسبت به روش های رایج کیفی و توصیفی بنماید.

مواد و روش ها

محدوده مورد مطالعه

چهار زیرحوضه آبخیز در محدوده شرقی دریاچه ارومیه واقع در استان آذربایجان شرقی، به عنوان محدوده جغرافیایی انجام مطالعات برآورد و مقایسه تغییرات در فرسایش خاک ناشی از اتلاف پوشش گیاهی انتخاب شده است. این چهار زیرحوضه عبارتند از: آجی چای، قلعه چای، صوفی چای و مردوق چای، به مساحت تقریبی ۲۳۱۶۰ کیلومترمربع که باهم می توان آن ها را به عنوان حوضه بزرگ تر آبخیز شرق دریاچه ارومیه در نظر گرفت. دلیل بررسی متمایز فرسایش خاک در این چهار زیرحوضه وجود تفاوت های توپوگرافی، شیب، پوشش گیاهی، نوع خاک، شکل و کاربری زمین در آن هاست که بر این اساس انتظار می رود، تفاوت های بارزی در توان فرسایش پذیری خاک در هر یک از این زیرحوضه ها با همدیگر وجود داشته باشد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه (الف) و زیر حوضه های شرقی دریاچه ارومیه (ب) را در ایران، استان آذربایجان شرقی و همچنین در محدوده حوضه آبخیز کلان دریاچه ارومیه نشان می دهد.

قدرت تفکیک ۱ هکتار در جنگل هیمالیا در کشور نپال استفاده کردند (Birch et al., 2014). مطالعه آن ها با رویکرد ارزیابی و ارزشگذاری خدمات اکوسیستم های جنگلی انجام شد. برای برآورد نقش جنگل در حفاظت از خاک هیمالیا، این مطالعه به طور خاص متمرکز بر استفاده از خروجی های مدل WWPSS برای تعیین تغییرات مربوط به فرسایش خاک و بار رسوب (به عنوان شاخصی برای کیفیت آب) و بودجه سالانه آبی (به عنوان شاخصی برای تولید آب) بوده است. این مطالعه که با هدف تعیین منافع حاصله از جنگلداری انجام شده بود، نشان داد که نتایج حاصل از طرح های جنگلداری برای ذینفعان مختلف ملی و محلی سودمند بوده است و در عین حال ظرفیت برخی خدمات اکوسیستمی مانند حفاظت از خاک و کیفیت آب به واسطه افزایش پوشش گیاهی حاصل از طرح های جنگلداری و کنترل روند فرسایش خاک، ارتقاء یافته است.

در مطالعه دیگری، فریرا و همکاران، با استفاده از مدل WWPSS، به بررسی نقش متقابل تغییر کاربری زمین، تغییر اقلیم و هیدرولوژی در جنگل های برزیل پرداخته اند. بر اساس مطالعه آنان، توان جنگل در تخفیف اثرات منفی ناشی از تغییر کاربری و تغییر اقلیم بر انواع خدمات اکوسیستمی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه اثر افزایش پوشش جنگلی بر هر دو عامل کیفیت و کمیت آب مورد ارزیابی قرار گرفت که حاکی از بهبود و افزایش هر دو عامل بود. شایان ذکر است که در مدل سازی هیدرولوژیکی انجام شده در این تحقیق، پارامتر های مربوط به خاک از جمله فرسایش خالص نیز مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه احیای جنگل ها به عنوان یک راهبرد برای تخفیف پیامد های سوء ناشی از تغییرات کاربری و تغییر اقلیم پیشنهاد شد، اما نتایج مطالعه حاکی از این بود که این راهبرد به تنهایی در حفظ کمیت های مطلوب آب و خاک کافی نیست و باید به صورت مکمل، اقدامات کشاورزی پایدار نیز برای کاهش اثرات بر کیفیت آب و خاک مورد انجام قرار گیرد (Ferreira et al., 2019). بر اساس مرور ادبیات علمی موجود درباره مدل WWPSS، در این مطالعه اثرات متقابل دو پارامتر مهم بوم شناختی یعنی پوشش گیاهی و خاک در حوضه آبخیز شرق دریاچه ارومیه (به عنوان مقیاس کلان) و چهار زیرحوضه آن (به عنوان مقیاس خرد) مورد با استفاده از مدل مذکور مورد

مواد و روش ها

مدل (WW PSS)^۱، یکی از انواع مدل‌های نظام جهانی دینامیک است که در مقیاس‌های فضایی مختلف از جهانی تا منطقه‌ای و همچنین تا سطوح آبخیز تا سیمای سرزمین قابل‌استفاده است. این مدل فرایند-محور فضایی و هیدرولوژیکی، می‌تواند برای درک وضعیت پایه هیدرولوژی و منابع آبی و همچنین توان اثرات کاربری زمین، مدیریت آن و تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد. این مدل علاوه بر ابزارهای مدل‌سازی، دربردارنده مجموعه داده‌های فضایی سنجش از دوری است که به طور جهانی در دسترس است و به کاربر اجازه می‌دهد که در هر نقطه‌ای از جهان با وضوح فضایی یک هکتار تا یک کیلومتر بسته به وسعت محدوده مورد مطالعه و بدون نیاز به تهیه داده‌ها از سوی کاربران اجرا شود. همه خروجی‌های حاصل از اجرا مدل به صورت تحت وب قابل مشاهده و با دانلود در محیط GIS قابل پردازش و تجزیه و تحلیل است.

با توجه به تجارب به کارگیری این مدل در مطالعات مختلف جهانی و توسط نهاد‌های مختلف علمی و اجرایی بین‌المللی جهانی (Ravilious et al., 2017) از جمله سازمان خواربار و کشاورزی (FAO)، برنامه محیط زیست ملل متحد (UNEP) و برنامه توسعه ملل متحد (UNDP)، مهمترین مزیت‌های این مدل عبارتند از:

- قابلیت دسترسی به صورت جهانی و تحت وب
- اتصال مدل به پایگاه‌های داده‌ای ماهواره‌ای مختلف و با کیفیت بالا از جمله سنجنده مودیس
- قابلیت اجرای نسبتاً سریع با کاربرد در مطالعات ارزیابی و تصمیم‌گیری که با محدودیت زمانی مواجه‌اند

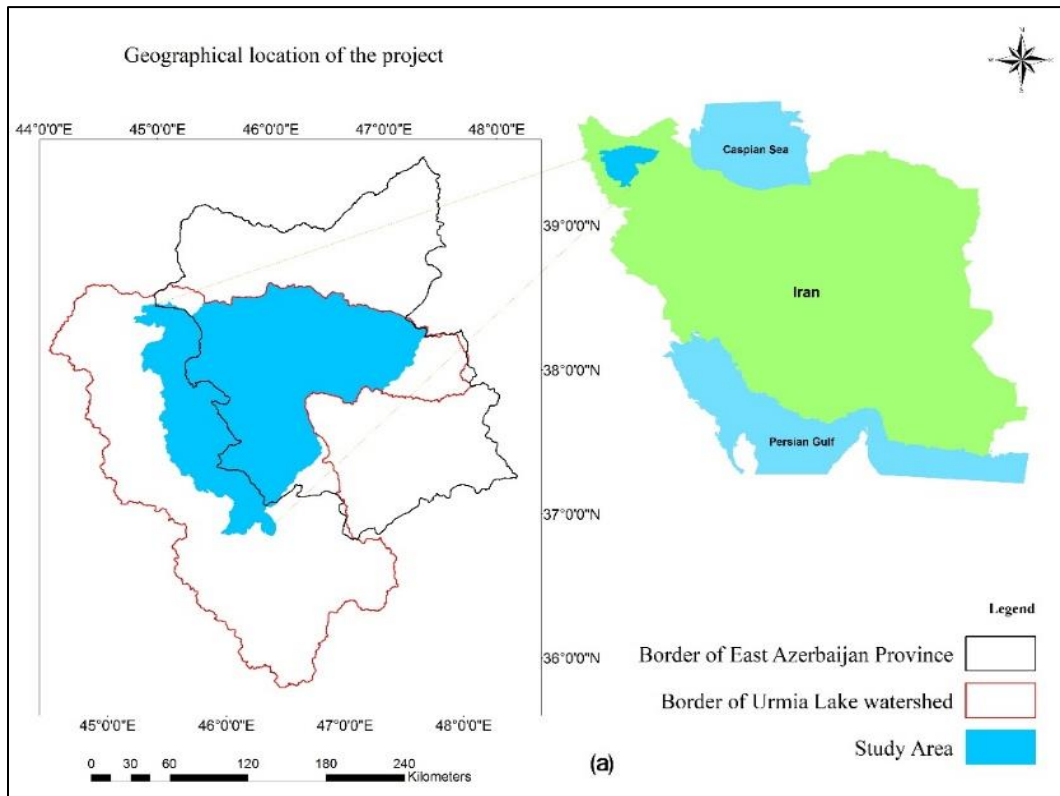
- دسترسی رایگان داده‌ها و مزیت اقتصادی آن برای مطالعاتی که فاقد منابع مالی قابل اتکا برای مطالعات میدانی هستند.

با اینحال این مدل در مقایسه با مدل‌های دیگر رایج در ارزیابی‌های کارکردی‌های اکوسیستمی مانند *INVEST* و *SWAT*، که نیازمند تولید داده‌های محلی توسط کاربر هستند دارای محدودیت‌هایی نیز است که عبارتند از:

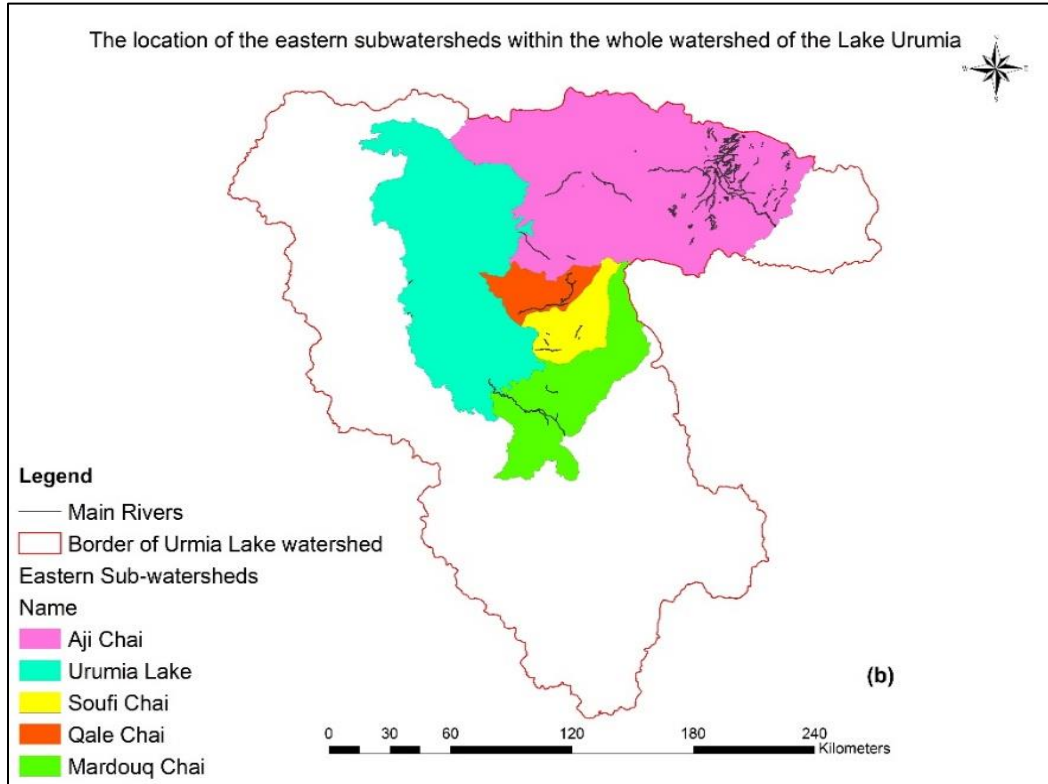
- برای مطالعاتی که نیاز به ارزیابی‌ها و سنجش‌های خیلی دقیق است، کاربرد کمتری دارد.
- از داده‌ها و مفروضات جهانی استفاده می‌کند که کالیبره نشده‌اند.
- برای محدوده‌های وسیع که وسعت آنها فراتر از شبکه‌های مستطیلی یک هکتار تا یک کیلومتری مدل هستند، باید مدل برای شبکه‌های مختلف به اندازه مساحت محدوده مورد مطالعه به طور جداگانه اجرا و سپس در محیط *GIS*، نتایج حاصل از اجرای مدل برای هر شبکه با هم تلفیق شوند.
- پردازش‌ها بر روی سرورهای مدل تحت وب اجرا می‌شوند، بنابراین فقط تعداد محدودی شبیه‌سازی می‌تواند انجام و ذخیره شود. برای انجام شبیه‌سازی‌های جدید باید نتایج دانلود و اجراهای قبلی حذف شوند.

با توجه به جمیع مزیت‌های و محدودیت‌های بالا، کاربرد این مدل در انجام مطالعات زیست‌محیطی که در حال حاضر مبتنی بر تحلیل‌های صرفاً توصیفی و کیفی درباره متغیرهای گوناگون اکو-هیدرولوژیکی است، بسیار سودمند ارزیابی می‌شود.

1 . <http://www.policysupport.org/waterworld>



شکل ۱- الف - موقعیت حوزه آبخیز شرق دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران و در محدوده استان آذربایجان شرقی
Figure 1. A. Location of the Eastern watershed of Lake Urmia in Northwestern Iran and within East Azerbaijan province



شکل ۱- ب - حوزه آبخیز دریاچه ارومیه و چهار زیرحوضه مورد مطالعه در محدوده شرقی دریاچه
Figure 1. B. Lake Urmia watershed and 4 sub-watersheds under study in the eastern part of the lake

تغییرات رخ داده در پوشش گیاهی در بازه زمانی دو دهه اخیر از قابلیت ابزار سناریو ساز مدل به نام *Policy Exercise* استفاده گردید. ابزار سناریو ساز مدل، ابزاری است که می تواند نتایج شبیه سازی های انجام شده برای وضعیت پایه یک محدوده را با تعریف قواعد جدیدی از سوی کاربر، مجدداً مورد شبیه سازی قرار دهد و خروجی جدیدی تولید نماید که مورد نظر کاربر است. به عنوان مثال، این ابزار می تواند نقشه پایه پوشش گیاهی را که در فرایند آماده سازی داده ها تولید شده است، با تعیین نرخ کاهش یا اتلاف پوشش گیاهی در یک محدوده مورد مطالعه، که از سوی کاربر تعریف می گردد، یکپارچه نموده و نقشه جدیدی را مورد شبیه سازی قرار دهد که نشان دهنده وضعیت موجود پوشش گیاهی بعد از تأثیر نرخ کاهشی اعمال شده است. در این تحقیق، برای تعیین نرخ اتلاف پوشش گیاهی از نتایج مطالعات دانشگاه صنعتی شریف در چارچوب طرح احیای دریاچه ارومیه (Kamali & Youneszadeh Jalili, 2015) استفاده و بر همین اساس نرخ اتلاف پوشش گیاهی مرتعی در بازه زمانی ۲۰ سال اخیر در محدوده های شرقی دریاچه ارومیه ۴۰٪ در نظر گرفته شد. بنابراین نرخ کاهش تراکم پوشش گیاهی و مرتعی در محدوده مورد مطالعه که در مطالعات دانشگاه صنعتی شریف بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره ای و به منظور سنجش تغییرات پوشش/ کاربری زمین انجام شده بود، به ابزار سناریو ساز نرم افزار وارد شد تا بر این اساس نقشه جاری پوشش گیاهی محدوده مورد مطالعه با انجام تغییرات لازم در نقشه پایه پوشش گیاهی تولید گردد.

روش سنجش فرسایش خاک و تعیین روند تغییرات آن در طول زمان

مدل *WWPSS* توانایی ارزیابی برخی کارکردهای کیفی / تنظیمی مربوط به شرایط هیدرولوژیک مانند فرسایش خالص خاک و رسوب را دارد (Mulligan, 2012).

در این مدل، فرسایش خاک بر اساس معادله *Thornes* محاسبه می شود (Carroll et al., 2010):

$$E = kQ^2S^{1.67}e^{-0.07V_c} \quad (1)$$

که در این معادله، E فرسایش (mm/h)، k ضریب فرسایش پذیری خاک که به صورت ثابت ۰/۲ در نظر گرفته شده است، چون اطلاعات آن در دسترس نیست. Q رواناب (mm/hour) که از مدل *FIESTA* که متصل به

روش ارزیابی تغییرات زمانی پوشش گیاهی (تعیین روند افزایش، کاهش یا اتلاف پوشش گیاهی)

پایش تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از مدل *WWPSS*، بدین صورت است که پوشش گیاهی به عنوان یکی از اجزای کلیدی در سنجش شرایط هیدرولوژیک و همچنین سناریوسازی تغییرات پوشش/ کاربری زمین، در این مدل لحاظ گردیده است. پوشش زمین در این مدل نمایش دهنده کسری از انواع پوشش درختی، علفی و اراضی بایر (لخت بدون پوشش گیاهی) در موزاییک هایی با قدرت تفکیک ۱ کیلومتر مربع یا ۱ هکتاری بسته به انتخاب کاربر است که از تصاویر ماهواره ای *MODIS VCF* (Zarandian et al., 2016) اخذ می گردد. در این تصاویر ماهواره ای، هر سلول از شبکه رستری به سه نوع پوشش درختی، گیاهی (پوشش غیرچوبی) و فاقد پوشش گیاهی (اراضی لخت و بایر) متمایز می گردد (Carroll et al., 2010).

این مدل قادر است برای هر جای جهان، با استفاده از بیش از ۱۴۰ داده ی نقشه شده و بر مبنای ویژگی های فضایی، یک شرایط پایه یا وضعیت مرجع هیدرولوژیکی مربوط به دوره زمانی سال های ۱۹۵۰-۲۰۰۰ را تعریف نماید. نقشه های پوشش گیاهی علفی، پوشش گیاهی درختی و پوشش اراضی بایر سه تا از داده های کلیدی پایه هستند که با اجرای اولیه مدل و در فرایند آماده سازی داده ها، با اتصال به پایگاه داده های جهانی ماهواره مودیس تهیه می شوند. پس از تهیه نقشه های پایه پوشش گیاهی برای سال پایه ۲۰۰۰، می توان با استفاده از ابزار سناریو ساز این مدل، با اعمال تغییرات لازم نقشه وضعیت جاری (موجود) پوشش گیاهی را نیز با کاربری نرخ تغییرات پوشش بر اساس اطلاعات موجود تولید نمود. نقشه پایه پوشش گیاهی با طی گام آماده سازی داده ها که گام اولیه در فرایند اجرای مدل محسوب می شود و انتقال خروجی آن به نرم افزار *Arc GIS 10.3* و انجام پردازش های لازم، تولید شد. گام آماده سازی شامل جمع آوری همه داده های مورد نیاز برای انجام شبیه سازی هاست، که با اتصال مدل تحت وب به پایگاه های مختلف داده ای برای محدوده مورد مطالعه تعریف شده اخذ می گردد. در این تحقیق، برای تولید نقشه پایه پوشش گیاهی محدوده مورد مطالعه، از داده های رستری ۹ موزاییک ۱ درجه ای (۱۰۰ کیلومتری) با قدرت تفکیک ۱ هکتار مدل برگرفته از تصاویر ماهواره ای *MODIS VCF* استفاده شد. سپس برای تعیین

نتایج و بحث

تحلیل تغییرات پوشش گیاهی طی بازه زمانی مورد

بررسی

شکل ۲ مقدار پوشش گیاهی علفی- مرتعی محدوده شرقی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه را در دو وضعیت پایه (الف) و موجود (ب) نشان می‌دهد. برای تعیین میزان تغییرات پوشش گیاهی از گذشته تا حال، کافی است ارزش عددی هر یک از سلول‌های رستری در نقشه‌های وضعیت پایه و جاری که نمایانگر درصد توزیع فضایی پوشش گیاهی علفی (غیردرختی) در هر سلول است، مورد مقایسه قرار گیرد. به عبارت دیگر محاسبه تفاوت بین نقشه پایه و جاری (نقشه پایه منهای نقشه جاری) در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3 و تغییرات عددی رخ داده در هر یک از دو نقشه مذکور، می‌تواند تعیین‌کننده مقدار تغییرات رخ داده باشد (ج). بر اساس نتایج حاصل از خروجی مدل (شکل های ۲الف و ۲ب)، بیشینه درصد پوشش علفی از ۱۰۰ به ۹۰٪ و میانگین آن از ۷۸/۳۶٪ در شرایط پایه به حدود ۴۷٪ در شرایط کاهش یافته است؛ بنابراین طی بازه زمانی مورد نظر، درصد پوشش گیاهی علفی- مرتعی در محدوده مورد مطالعه به‌طور میانگین حدود ۳۲٪ از بین رفته است. همچنین شکل ۲ج که حاصل تفاضل دو شکل قبل است، نشان می‌دهد که درصد تراکم پوشش گیاهی در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه از صفر تا حدود ۴۲٪ کاهش داشته است. به‌عنوان پیامد چنین تغییری پوشش بایر در محدوده مورد مطالعه افزایش یافته است. با توجه به تغییرات ناشی از کاهش منابع آبی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه و اثرات مستقیم آن بر پوشش گیاهی، بروز این تغییرات، به مفهوم تبدیل تدریجی اراضی مرتعی به بایر در محدوده مورد مطالعه قابل تفسیر است.

برآورد تغییرات فرسایش خالص خاک ناشی از شیب

تپه‌ها در اثر اتلاف پوشش گیاهی

شکل ۳ مقدار فرسایش خالص ناشی از دامنه‌ها در وضعیت پایه و موجود (قبل و بعد از اتلاف ۳۲ درصدی پوشش گیاهی) و مقدار اختلاف آن (برحسب میلی‌متر در سال) و مقدار تغییرات آن را در طول زمان (بر اساس درصد) در حوضه آبخیز شرق دریاچه ارومیه بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی آن در مدل WWPSS نشان می‌دهد.

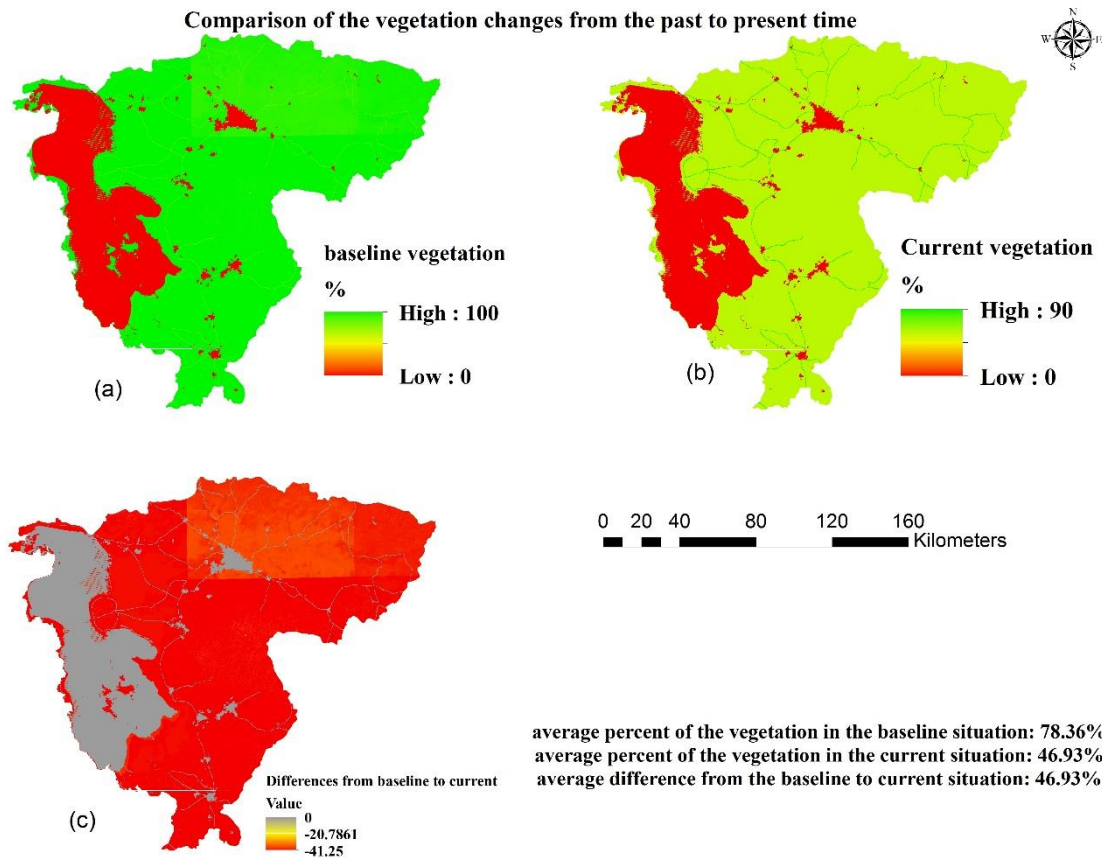
WWPSS است گرفته می‌شود. FIESTA یک مدل هیدرولوژیکی فضایی و فرایند محور است که برای پیش بینی تغییرات در جریان رودخانه به دنبال تبدیل پوشش‌های جنگلی و مرتعی به کاربری‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mulligan et al., 2013). S تانژانت گرادبان شیب است که از مدل رقومی ارتفاع SRTM گرفته می‌شود. Vc پوشش گیاهی است که از سنجنده مودیس MODIS VCF از تصاویر ماهواره‌ای لندست گرفته می‌شود (Thornes, 1990).

انتقال رسوب بر اساس ظرفیت انتقال Tc تعیین می‌شود که با توجه به قدرت جریان که تابعی از رواناب و شیب است محاسبه می‌گردد (Sexton et al., 2013):

$$T_c = Q^{1.7} \sin(s)^{0.001} (1 - V_c) \quad (2)$$

انتقال رسوب S تابعی است از ورودی رسوب از بالادست به‌اضافه فرسایش محلی، P در زمانی که ورودی رسوب و فرسایش کمتر از ظرفیت انتقال باشند. سرانجام رسوب‌گذاری درجایی (محدوده‌هایی) اتفاق می‌افتد که S بیشتر یا مساوی P باشد.

مدل برای انجام محاسبات مربوط به فرسایش خاک دو نوع خروجی کلیدی، با عناوین فرسایش خاک ناشی از دامنه‌ها و فرسایش خالص خاک (فرسایش منهای رسوب‌گذاری) ارائه می‌نماید. منظور از فرسایش، خاک تخریب یافته و منظور از رسوب‌گذاری مقداری از خاک است که در هر یک از سلول‌های شبکه رستری تجمع می‌یابد. فرسایش خالص در واقع حجمی از خاک است که نهایتاً به‌عنوان رسوب در جریان‌های آبی و رودخانه‌ها وارد می‌شود. فرسایش خالص ناشی از دامنه‌ها و فرسایش خاک نشان‌دهنده مقدار نهایی فرسایش خالص خاک در دامنه‌ها و ناشی از جریان‌های آبی و رودخانه‌ها هستند. مقدار فرسایش در مدل بر اساس میلی‌متر در هر مترمربع در سال محاسبه می‌شود. این مقدار می‌تواند بعداً به واحدهای دیگر از جمله تن در هکتار تبدیل شود. برای این کار مقدار مورد نظر را با تقسیم بر ۱۰۰۰ می‌توان به‌صورت حجم مترمکعب تبدیل و با ضرب آن در هکتار (۱۰۰۰۰ مترمربع) مقدار تن در هکتار خالص فرسایش را محاسبه نمود. برای محاسبه وزن خاک فرسایش یافته باید از ضریب محلی جرم مخصوص ظاهری خاک که معمولاً در طیفی بین ۱/۷-۱/۲ تن به ازای هر مترمکعب خاک است، استفاده نمود.



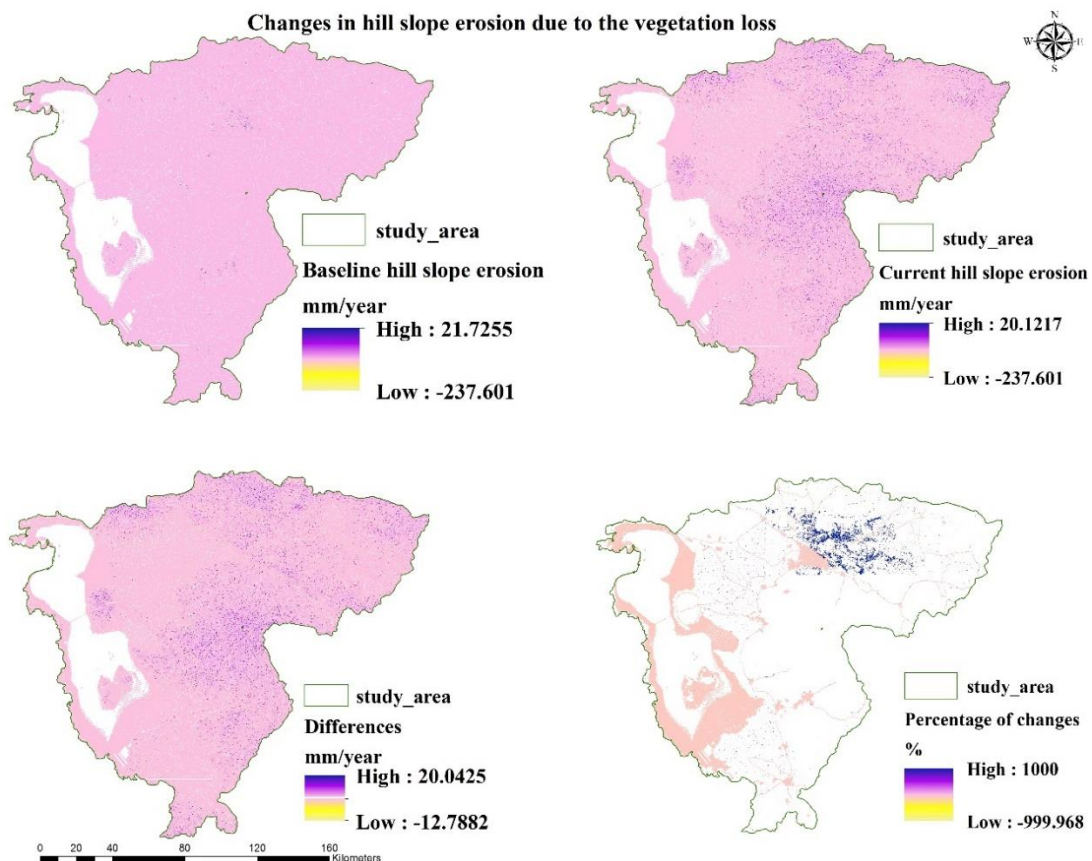
شکل ۲- وضعیت پایه پوشش گیاهی در سال ۲۰۰۰ (الف)، وضعیت موجود پوشش گیاهی در سال ۲۰۲۰ (ب) و درصد تغییرات از گذشته تا حال (ج)
 Figure 2. Baseline status of vegetation (a), current status of vegetation (b), percentage of changes from the past to the present (c)

نشان‌دهنده ثبات خاک در مقطع زمانی گذشته در محدوده‌های شیب‌دار به واسطه نقش مهم پوشش گیاهی در حفظ و تثبیت خاک است. در وضعیت موجود و بعد از اتلاف پوشش گیاهی مرتعی در اثر تغییرات اقلیمی یا تغییرات کاربری زمین، بر اساس محاسبات مدل کمینه، بیشینه و میانگین فرسایش خالص ناشی از دامنه‌ها در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب معادل $237/60$ ، $20/12$ و $0/13$ میلی‌متر در سال برآورد شده است. مقایسه این اعداد با وضعیت پایه، حاکی از ثابت ماندن عدد کمینه، کاهش عدد بیشینه (از $21/72$ به $20/12$ میلی‌متر در سال) و افزایش میانگین فرسایش ناشی از دامنه‌ها (از صفر به $0/13$) است که نتایج جالب توجهی محسوب می‌شود. این تغییرات را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که با توجه به اتلاف ۳۲ درصدی پوشش گیاهی در محدوده

بر اساس محاسبات مدل در وضعیت پایه حوضه آبخیز و قبل از اتلاف پوشش گیاهی مرتعی آن، کمینه، بیشینه و میانگین فرسایش خالص ناشی از دامنه‌ها در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب معادل $237/60$ ، $21/72$ و $0/100$ میلی‌متر در سال بوده است. اعداد منفی در مدل فرسایش *WWPSS*، نشان‌دهنده انباشت یا تجمع خاک در محدوده مورد نظر و عدم انتقال آن‌ها از بالادست به پایین‌دست در قالب رسوب‌گذاری حاصل از فرسایش است. با اطلاعات حاصل از این نقشه، چنانچه مشاهده می‌شود، در سال پایه، به دلیل وجود پوشش گیاهی قابل قبول، میزان انباشت خاک روی دامنه‌ها (اعداد کمینه منفی) نسبت به مقدار فرسایش و انتقال آن به پایین‌دست (اعداد بیشینه مثبت) خیلی بیشتر است و از طرفی میانگین فرسایش خاک ناشی از شیب تپه‌ها، صفر برآورد شده است که این وضعیت

گیاهی در حال شسته شدن است و با توجه به اینکه میانگین فرسایش خالص ناشی از دامنه‌ها به مقداری ۰/۰۱۳ میلی‌متر در سال افزایش یافته است، این نتیجه مؤید آغاز سیر فرسایشی و استمرار آن در طول زمان مورد نظر است. میانگین اختلاف بین دو وضعیت پایه و موجود ۰/۰۱۳ است. همان‌گونه که از این اعداد قابل استنتاج است، میزان فرسایش (طیف مثبت) از میزان انباشت خاک (طیف منفی) پیشی گرفته است که این نیز خود تأییدی بر روند افزایشی فرسایش خاک در محدوده‌های شیب‌دار و انتقال آن از بالادست به پایین‌دست است.

مورد مطالعه، پوشش گیاهی باقی‌مانده هنوز دارای توان لازم برای انباشت و تثبیت خاک در مناطق شیب‌دار هست که نکته امیدبخشی است اما می‌بایست به این نکته توجه نمود که این توان همیشگی نیست و در صورت تداوم اتلاف پوشش گیاهی قطعاً توان موجود تثبیت خاک با مخاطره همراه خواهد شد. از طرفی کاهش بیشینه فرسایش ناشی از دامنه‌ها در عین تثبیت کمینه آن، بدین گونه قابل استنتاج است که متأسفانه در طول زمان طی شده از وضعیت پایه تا موجود، بخش قابل توجهی از خاک منطقه مورد مطالعه در مناطق شیب‌دار به دلیل روند کاهشی تراکم پوشش



شکل ۳- مقدار (میلی‌متر در سال) و درصد تغییرات در فرسایش خالص ناشی از دامنه‌ها در حوضه آبخیز شرق دریاچه ارومیه قبل (سال ۲۰۰۰) و بعد (سال ۲۰۲۰) از اتلاف پوشش گیاهی

Figure 3. Amount (mm per year) and percentage of changes in hill slope net erosion in the Eastern watershed of Lake Urmia before and after vegetation loss

از بالادست به پایین‌دست است که می‌تواند مخاطرات اکولوژیکی و اقتصادی عمده‌ای به دنبال داشته باشد (Sujatha & Sridhar, 2018). در مدل WWPSS، مقدار فرسایش خالص خاک بر اساس مقدار کل خاک فرسایش

برآورد تغییرات در فرسایش خالص خاک در اثر اتلاف پوشش گیاهی

فرسایش خالص خاک، عبارت از تخریب خاک و انتقال رسوبات حاصله از آن از طریق جریان‌های آبی و رودخانه‌ها

۳ تن در هکتار در وضعیت موجود و پس از اتلاف ۴۰ درصدی پوشش گیاهی تغییر یافته است. البته با توجه به اینکه نوع خاک و میزان فرسایش پذیری آن در زیر حوضه‌های مختلف و به تبع خصوصیات فیزیوگرافیک و توپوگرافیک زمین نیز متفاوت است، این نرخ فرسایش باید در زیر حوضه‌ها نیز به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد که در قسمت‌های آتی مقاله تشریح شده است.

مقایسه مقدار فرسایش خاک و تغییرات آن در زیر حوضه‌های تحت مطالعه

شکل‌های ۴ تا ۷ وضعیت تغییرات فرسایش خاک را در قالب محاسبه اختلاف میان شرایط پایه و موجود (قبل و بعد از اتلاف پوشش گیاهی) برحسب میلی‌متر در سال و درصد تغییرات در میزان فرسایش در نواحی تغییر یافته را به ترتیب در زیر حوضه‌های آجی چای، قلعه چای، مردوق چای و صوفی چای ارائه می‌نماید. همچنین جزئیات بیشتر در مورد کمیت‌های تغییرات در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس محاسبات مدل، نرخ میانگین فرسایش خاک از وضعیت پایه به موجود، در زیر حوضه‌های آجی چای از ۰/۰۶۵ - به ۰/۰۳۹، قلعه چای از ۰/۰۴۱ به ۰/۶۶۴، مردوق چای از ۰/۰۳۵ - به ۱/۱۰۶ و صوفی چای از ۰/۳۴۲ به ۰/۹۱۹ میلی‌متر در سال تغییر پیدا کرده است. بدین ترتیب مقدار میانگین فرسایش خالص خاک در دو زیرحوضه آجی چای و مردوق چای به ترتیب بیش از ۲۷۷٪ و ۳۳٪ افزایش یافته است که این دو زیرحوضه را در میان چهار زیرحوضه مورد مطالعه به عنوان محدوده‌های بحرانی فرسایش خاک در محدوده جغرافیایی شرق دریاچه ارومیه نشان می‌دهد.

یافته منهای خاکی که در دامنه‌ها و کانال‌های آبی تجمع می‌یابد، محاسبه می‌شود. بر اساس محاسبات مدل در وضعیت پایه حوضه آبخیز و قبل از اتلاف پوشش گیاهی مرتعی آن، کمینه، بیشینه و میانگین فرسایش خالص ناشی از دامنه‌ها در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب معادل ۲۸۳۱۶۰/۸۷ -، ۷۷۱۸/۰۸ و ۰/۰۱۲ - میلی‌متر در سال بوده است. این اعداد حاکی از آن هستند که در وضعیت پایه، در مجموع در حوضه آبخیز شرق دریاچه ارومیه، فرسایش خاک به عنوان یک معضل زیست‌محیطی مطرح نبوده و برعکس با توجه به میانگین منفی آن، شرایط بوم شناختی حاکم بر خاک به گونه‌ای بوده که موجب تثبیت خاک نیز شده است. به عبارت دیگر در مجموع میزان تثبیت خاک بیشتر از فرسایش آن در کل حوضه آبخیز بوده است. در وضعیت موجود و بعد از اتلاف پوشش گیاهی مرتعی در اثر تغییرات اقلیمی یا تغییرات کاربری زمین، بر اساس محاسبات مدل کمینه، بیشینه و میانگین فرسایش خالص در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب معادل ۱۷۹۸۵۶/۷۳ -، ۷۸۴۷/۵۷ و ۰/۲۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. این اعداد در مجموع حاکی از کاهش ظرفیت تثبیت خاک به مقدار قابل توجهی (حدود ۳۶٪ کاهش در ظرفیت تثبیت خاک) و افزایش قابل توجه در میزان فرسایش پذیری خاک است. بر همین اساس، با اتلاف ۴۰ درصدی پوشش گیاهی از وضعیت پایه تا موجود، مقدار فرسایش در پهنه آبخیز مورد مطالعه در طیفی از ۲۸۵۶۰۰ - ۱۷۲۴۴۵ میلی‌متر در سال و به طور میانگین معادل ۰/۲۰ میلی‌متر در سال بوده است (میانگین فرسایش معادل ۳ تن در هکتار است)^۱. به عبارت دیگر میانگین فرسایش خاک از صفر در وضعیت پایه به

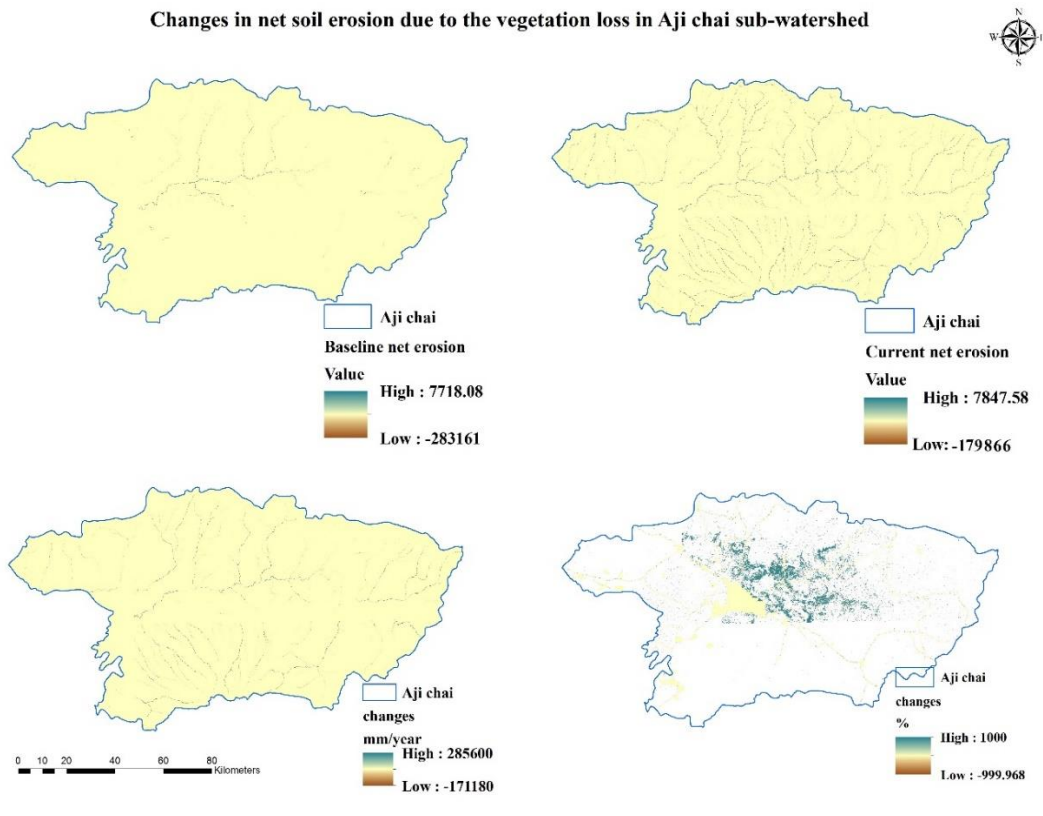
^۱ ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب به عنوان ضریب وزن مخصوص ظاهری خاک در محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

^۱ نحوه محاسبه: $10000\text{m}^2 * 0.0002\text{ m}^3/\text{m}^2 * 1.5\text{g}/\text{cm}^3 = 3\text{ ton}/\text{ha}$
 $0.2\text{ mm}/\text{m}^2 =$

جدول ۱- تغییرات در کمینه، بیشینه و میانگین فرسایش خاک در زیر حوضه‌های آبخیز شرق دریاچه ارومیه

Table 1. Changes in minimum, maximum and average soil erosion in Eastern watersheds of Lake Urmia

Changes %	Erosion (Maximum)			Changes %	Erosion (Minimum)			Changes %	Erosion (Average)		
	Difference Mm/year ¹	Current Mm/year ¹	Baseline Mm/year ¹		Difference Mm/year ¹	Current Mm/year ¹	Baseline Mm/year ¹		Difference Mm/year ¹	Current Mm/year ¹	Baseline Mm/year ¹
999.99	285600.21	7847.57	7718.08	-999.96	-71179.85	-79865.73	-83160.87	277.67	0.105	0.039	-0.065
995.99	14451.73	7206.26	5669.03	-996.31	-39372.04	-39461.01	-8105.58	0.489	0.622	0.664	0.041
999.86	128670.37	7200.27	7076.68	-984.34	-65314.92	-66161.12	-32588.12	33.213	1.142	1.106	-0.035
995.933	69546.05	7160.12	7011.15	-998.25	-54537.35	-5779.46	-67461.67	8.337	0.577	0.919	0.342



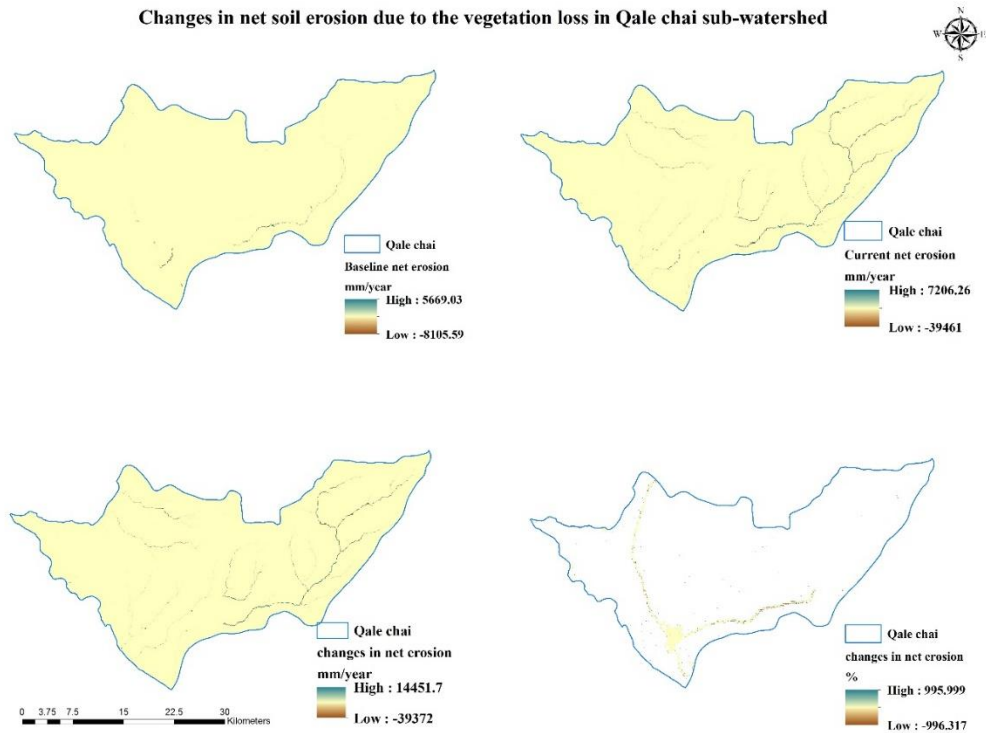
شکل ۴- تغییرات فرسایش خاک در زیر حوضه آبی چای بر حسب میلی‌متر در سال و درصد

Figure 4. Changes in soil erosion in the Aji Chai sub-watershed: (mm /year) and percentage

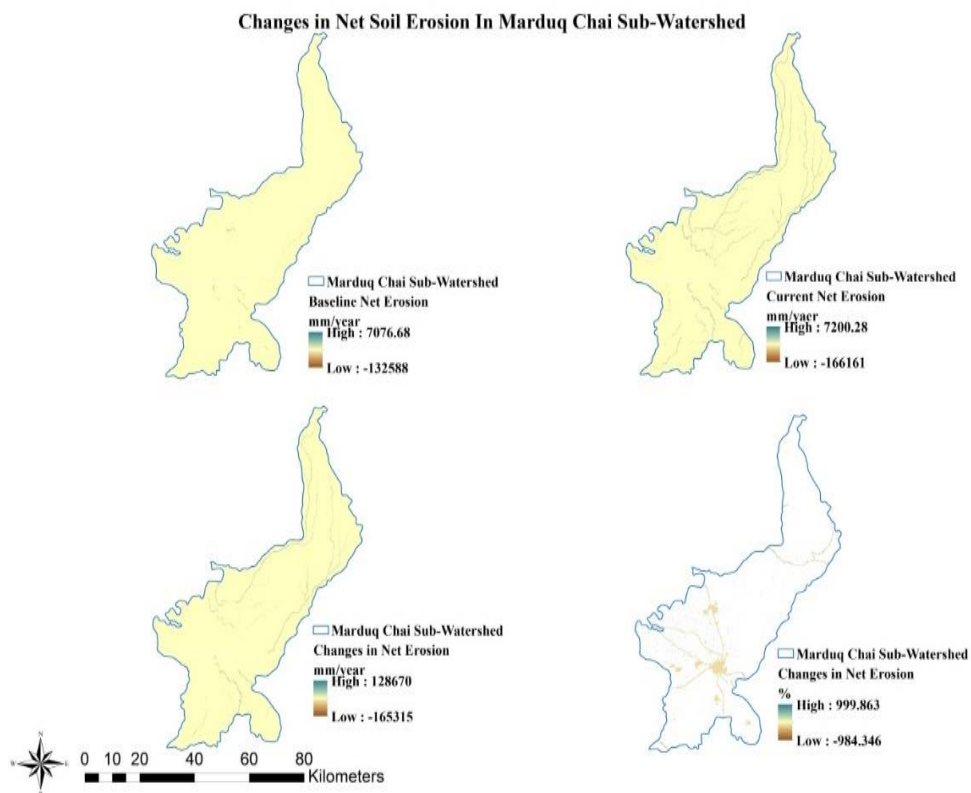
فرسایش خاک از کمتر از ۱ تن در سال به بیش از ۱۶ تن در سال رسیده و موجب اتلاف بیش از ۵ میلیون تن خاک طی ۱۵ سال شده است.

- در زیر حوضه قلعه چای نیز تقریباً شرایط مشابهی حاکم است. در این زیرحوضه نیز نرخ فرسایش خاک از کمتر از ۱ تن در سال پایه به حدود ۱۰ تن در وضعیت جاری افزایش یافته و با توجه به مساحت کوچک این زیر حوضه حدود ۱ میلیون تن خاک در اینجا اتلاف شده است.

به منظور درک شفاف‌تر از تغییرات رخ داده در میزان فرسایش خاک، جدول ۲ به مقایسه این تغییرات بر اساس واحد تن/هکتار خاک فرسایش یافته در هر یک از زیرحوضه‌ها در دو وضعیت پایه و موجود می‌پردازد. همچنین جدول ۳، مقدار خاک اتلاف شده در اثر کاهش پوشش گیاهی در طی زمان دو دهه اخیر را برحسب تن نشان می‌دهد. چنانچه از مجموعه جداول، نقشه‌ها و نمودارهای حاصل از مدل‌سازی فرسایش خاک مشهود است: وخیم‌ترین شرایط فرسایش خاک در زیر حوضه مردوق چای حادث شده است که طی دوره زمانی مذکور نرخ



شکل ۵- تغییرات فرسایش خاک در زیر حوضه قلعه چای بر حسب میلی‌متر در سال و درصد
 Figure 5. Soil erosion changes in the Qale-e-Chai sub-watershed: (mm / year) and percentage

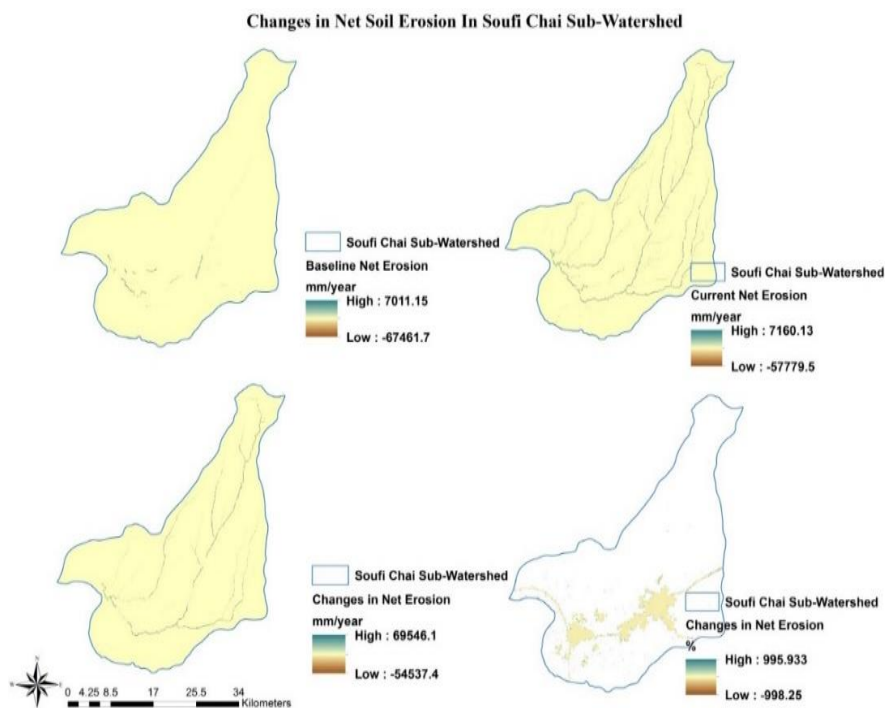


شکل ۶- تغییرات فرسایش خاک در زیر حوضه مردوق چای بر حسب میلی‌متر در سال و درصد در شرایط موجود
 Figure 6. Soil erosion changes in the Marduq Chai sub-watershed: (mm / year) and percentage

درصد یعنی ۲۷۷٪ افزایش را تجربه نموده است. این یک نتیجه بسیار شگفت‌انگیز و قابل توجه است و این‌گونه قابل تفسیر است که اگرچه نرخ فرسایش در اینجا به دلایلی چون نوع خاک یا مستعد نبودن به لحاظ فیزیوگرافی خیلی زیاد نیست، اما روند تغییرات قهقرایی است. بدین گونه که اساساً فرایند خاک‌زایی در این محدوده از نرخ منفی فرسایش (به عبارت دیگر انباشت خاک) به فرایند فرسایشی تغییر یافته است.

در زیر حوضه صوفی چای فرسایش خاک حتی در شرایط پایه نیز حداکثر و حدود ۵ تن در هکتار بوده است که این مقدار با افزایش بیش از دو برابری به نزدیک ۱۴ تن در هکتار رسیده است.

و بالاخره در زیر حوضه آجی چای که قبلاً در شرایط پایه نرخ فرسایش منفی بوده است، هم‌اکنون نرخ فرسایش نیم تن در هکتار است. حتی با این نرخ کم فرسایش، روند تغییرات در میانگین فرسایش در این زیر حوضه بیشترین



شکل ۷- تغییرات فرسایش خاک در زیر حوضه صوفی چای برحسب میلی‌متر در سال و درصد در شرایط موجود
Figure 7. Soil erosion changes in the Soufi Chai sub-watershed: (mm / year) and percentage

جدول ۲- مقایسه تناژ فرسایش سالانه خاک در هر یک از زیر حوضه‌ها در وضعیت‌های پایه و موجود

Table 2. Comparison of annual soil erosion tonnage in each of the sub-watersheds in baseline and current conditions

The name of the sub-watershed	Average erosion (Tons / hectare)	Average erosion (Tons / hectare)	Description
	Baseline	current	
Aji Chai	-0.975	0.585	In the baseline state the erosion was negative. That is, about 1 ton per hectare of soil was accumulated per year
Qale Chai	0.615	9.96	
Marduq Chai	-0.525	16.59	In the baseline state the erosion was negative. But now it has reached 16 tons per hectare
Soufi Chai	5.13	13.78	

جدول ۳- محاسبه تناژ اتلاف شده خاک در اثر اتلاف پوشش گیاهی در طی زمان

Table 3. Calculation of soil tonnage lost due to vegetation loss over time

The name of the sub-watershed	The difference of the average net soil erosion rate over time (Mm year ⁻¹)	Overall rate of difference in soil erosion over time (Tons hectare ⁻¹)	Sub-watershed area (Hectares)	Tonnage of soil lost over time (Ton)
Aji Chai	0.10	1.57	1063942	1675710/20
Qale Chai	0.62	9.33	92004	858404.59
Marduq Chai	1.14	17.30	306137	5244128.35
Soufi Chai	0.57	8.65	116240	1006060.57
Total			1578325	8172536.5

2014; Mulligan, 2012; van Soesbergen & Mulligan, 2014) در کشورهای مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته بود، برای نخستین بار در یک حوضه آبخیز مستقر در ایران نشان داد.

نتیجه‌گیری کلی

ارزیابی شرایط اکو هیدرولوژیکی حوضه آبخیز به ویژه با بررسی شرایط و اثرات متقابل متغیرهای کلیدی چون پوشش گیاهی، آب و خاک با تشدید یافتن اثرات محرکه‌هایی چون تغییر کاربری و تغییر اقلیم از اهمیت زیادی برخوردار است. در کشورهای در حال توسعه که معمولاً با فقر داده و اطلاعات مواجه هستند، معمولاً اطلاعات دقیق و قابل اتکایی از وضعیت پایه (گذشته) و روند تغییرات اکو-هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز در دسترس نیست. از این رو همیشه مشکلاتی در رابطه با مقایسه وضعیت موجود با وضعیت گذشته حوضه‌های آبخیز و سنجش کمیت تغییرات وجود دارد (Patil *et al.* 2001). در این تحقیق مقدار تغییرات در فرسایش خاص خاک ۴ زیرحوضه شرق دریاچه ارومیه با کاربست یکی از مدل‌های هیدرولوژیک مورد مدل‌سازی و ارزیابی قرار گرفت. با توجه به همخوانی نسبی نتایج حاصله با مطالعات داخلی مربوط به برآورد تغییرات پوشش گیاهی و فرسایش خاک، به نظر می‌رسد که استفاده از این روش برای انجام ارزیابی‌های سریع و کم‌هزینه پارامترهای مذکور با اتکا به روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابل اتکا باشد. به‌ویژه در انجام ارزیابی‌هایی که به دلایلی چون محدودیت منابع و کمبود داده‌ها امکان انجام عملیات فیلدی و نمونه‌برداری‌های متعدد با صرف هزینه زیاد امکان‌پذیر نیست، روش معرفی شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک روش علمی دارای سابقه کاربرد بین‌المللی و

در مجموع همان‌گونه که انتظار می‌رفت، اتلاف ۳۲ درصدی پوشش گیاهی در محدوده مورد مطالعه، پیامدهای مخاطره‌آمیز بسیار سنگینی را طی دوره زمانی مورد بررسی بجای گذاشته است و به‌صورت تجمعی منجر به تخریب بیش از ۸ میلیون تن خاک تنها طی ۱۵ سال شده است. نتایج حاصل از برآوردهای فرسایش خاک در این تحقیق در مقیاس حوضه آبخیز شرق دریاچه ارومیه که میانگین فرسایش خالص را ۳ تن در هکتار برآورد نموده است با نتایج مطالعه‌های Biat *et al.* (۲۰۱۲) که میزان فرسایش را در مقیاس کلان حوضه آبخیز دریاچه ارومیه بین ۱۱/۵۲ - ۰/۲ تن در هکتار برآورد نمودند سازگاری دارد. همچنین با نتایج مطالعه Sourinejad (۲۰۱۹) که عدد مورد نظر را در طیفی از ۵/۵۴ - ۲/۸۳ تن در هکتار برای زیرحوضه‌های دارای کلاس فرسایش متوسط برآورد نمودند، همخوانی دارد. البته تفاوت‌های اندکی در مقادیر میانگین فرسایش برآورد شده در سه مطالعه به چشم می‌خورد که ناشی از تفاوت پارامترهای فیزیو-اکولوژیک مربوط به زیر حوضه‌هاست. همچنین نتایج این مطالعه در برآورد میانگین فرسایش خاک، با مطالعه خارجی دیگری که توسط Yang و دیگران در سال ۲۰۰۳ با استفاده از مدل RUSLE برای محدوده جغرافیایی قاره آسیا انجام شده بود و رقم این میانگین را ۱۲ تن در هکتار برآورد کرده بود، همخوانی دارد. در این تحقیق، نرخ میانگین سالانه فرسایش خاک برای زیرحوضه‌های قلعه چای، صوفی چای و مردوق چای به ترتیب ۱۰، ۱۴ و ۱۶ تن در هکتار برآورد شد که سازگاری خوبی را با مطالعه بین‌المللی فوق‌الذکر نشان می‌دهد. این مطالعه روش استفاده از مدل WWPSS را که قبلاً توسط محققین خارجی (Birch *et al.*)

با محوریت گروه ارزیابی و مخاطرات محیط زیست پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار انجام شده است. بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی نویسندگان این مقاله، از دو مجموعه فوق الذکر، اعلام می گردد.

مقرون به صرفه و با حداقل نیاز به مهارت‌ها و ظرفیت‌های فنی خاص این ارزیابی‌ها، مفید واقع گردد.

سیاسگزاری

تحقیقات منجر به تهیه این مقاله، با تصویب و حمایت اداره کل حفاظت محیط زیست استان آذربایجان شرقی و

References

- Ahmadi A., Asri A., Tatian Y., and Tamartash M.R. 2018. Investigation of the effect of drying of Lake Urmia on changes in plant communities. *Rangeland Scientific Research* , 2:138-153. (In Persian)
- Ahmadi R., Nazarnejad H., and Najafi S. 2021. Water erosion susceptibility mapping using geomorphological factors in Omarabad watershed of Urmia. *Applied Soil Research*. 9(3): 43-56.
- Amini Y., Hourani A., Bakhtiari Kia M., and Arekhi M. 2017. A Statistical Assessment of Land Use and Land Cover Transitions of the Urmia Lake Basin Using Transition Matrix. *Geography and regional development*, 15(1): 171-192. (In Persian)
- Biat R., Sarreshtehdari A., Jafari Ardakani A., and Sokouti Oskuei R. 2012. Simulation of land use management effect on soil erosion of Orumiyeh lake watershed. *Watershed engineering and management* , 3:118-126.
- Birch J.C., Thapa I., Balmford A., Bradbury R.B., Brown C., Butchart H.M., Gurung H., Hughes M.R., Mulligan M., and Pandeya B. 2014. What benefits do community forests provide, and to whom? A rapid assessment of ecosystem services from a Himalayan forest, Nepal. *Ecosystem Services* , 8 : 118-127.
- Carroll M., Townshend J., Hansen M., DiMiceli CH., Sohlberg R., and Wurster K. 2010. MODIS vegetative cover conversion and vegetation continuous fields. In *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. 725-745. Part of the *Remote Sensing and Digital Image Processing* book series. Springer. New York.
- Chakherlou S., Jafarzadeh A.A., Ahmadi A., Feizizadeh B. and Shahbazi F. 2021. Performance of RS and GIS systems in estimating wind erosion in east coast of Urmia Lake. *Applied Soil Research*, 8(4): 169-180. (In Persian)
- Ferreira P., van Soesbergen A., Mulligan M., Freitas M., and Vale M.M. 2019. Can forests buffer negative impacts of land-use and climate changes on water ecosystem services? The case of a Brazilian megalopolis. *Science of the Total Environment*, 685, pp.248-258.
- Ghorbanalizadeh A., Akhane H., and Bergmeier E. 2020. Vegetation patterns of a rapidly drying up salt lake ecosystem: Lake Urmia, NW Iran. *Phytocoenologia* , 50(1):1-46. (In Persian)
- Kamali M., and Youneszadeh Jalili S. 2015. Investigation of land use changes in Urmia Lake catchment area using satellite images. Sharif Industrial University technical report. (In Persian)
- Mohamadi P., Ahmadi A., Feyzizadeh B., Jafarzadeh A.A and Rahmati M. 2021. Evaluation of pixel and object-oriented classification techniques for detection and zoning of erosion lands using sentinel-2 remote sensing data (case study: Lighvan watershed). *Applied Soil Research*. 9(1): 28-40. (In Persian)
- Mulligan M., Rubiano J., Hyman G., White D., Garcia J., Saravia M., Leon J.G., Selvaraj J.J., Gutierrez T., and Saenz-Cruz L.L. 2013. The Andes basins: biophysical and developmental diversity in a climate of change. In *Water, Food and Poverty in River Basins* (pp. 19-39) Routledge
- Mulligan M. 2012. WaterWorld: a self-parameterising, physically based model for application in data-poor but problem-rich environments globally. *Hydrology Research* , 44(5): 748-769.
- Patil GP., Brooks RP., Myers WL., Rapport DJ., and Taillie C .2001. Ecosystem health and its measurement at landscape scale: Toward the next generation of quantitative assessments. *Ecosystem Health* 7:307-316.
- Ravilious C., Goodman L., Bodin B., Runsten L., and Osti M. 2017. Using spatial information to support decisions on safeguards and multiple benefits for REDD+. Step-by-step tutorial v1. 0:

- Extracting and processing IUCN Red List species data using a vector method in a combination of QGIS, 1.
- Rostami R., Khorshiddosst A., and Mahmudzadeh M. 2019. Investigating the trend of land use changes in the cities east of Lake Urmia and identifying areas with the ability to grow salinity-friendly plants. *Applied Research in Geographical Science*, 19(55): 135-152. (In Persian)
- Sarai Tabrizi M., and Mohammadian Khorasani Sh. 2022. Effects field evaluation of the effect of watershed management operations and water resources sustainable management on reducing erosion and sediment from floods. *Applied Soil Research*, 10 (3): 104-116. (In Persian)
- Sexton J.O., Song X.P., Feng M., Noojipady P., Anand A., Huang CH., Kim D.H., Collins K.M., Channan S., and DiMiceli CH. 2013. Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error. *International Journal of Digital Earth*, 6(5) : 427-448.
- Sourinejad A. 2019. Evaluation of sedimentation intensity and erosion of Lake Urmia watershed. 14th National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Iran, Urmia. (In Persian)
- Sujatha E.R., and Sridhar V. 2018. Spatial prediction of erosion risk of a small mountainous watershed using RUSLE: a case-study of the palar sub-watershed in kodaikanal, south India. *Water* , 10 (11):1608.
- Thornes J.B. 1990. The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes. *Vegetation and erosion: Processes and environments*.41-53.
- Van Soesbergen A., and Mulligan M. 2014. Modelling multiple threats to water security in the Peruvian Amazon using the WaterWorld policy support system. *Earth System Dynamics* , 5(1) : 55-65.
- Zarandian A., Yavari A.R., Jafari H.R., and Amirnejad H. 2016. Modeling Land Use Change Impacts on Water-Related Ecosystem Services Using a Policy Support System. *Environmental Sciences* , 13(4) : 97-112. (In Persian)

Estimating and Comparing Changes in Soil Erosion due to Vegetation Loss in the Eastern Sub-watersheds of the Lake of Urmia

Ardavan Zarandian^{1*}, Roya Mousazadeh², Majid Ramezani Mehrian³, Seyed Ghasem Ghorbanzadeh Zaferani⁴

(Received: June, 2022

Accepted: February, 2023)

Abstract

Heavy soil erosion and sedimentation at the watershed level can trigger intense environmental consequences. This research proposes a modeling technique to estimate changes in incremental soil erosion over time and evaluate the effect of vegetation cover on soil erosion in critical areas. For this, the study employed the Water World Policy Support System (WWPSS) for simultaneous modeling of changes in vegetation cover and soil erosion. Changes in vegetation cover from 2000 to 2020 were studied by extracting data from the model databases received from MODIS VCF satellite images. The study further used maps and calculations of the run model to measure the amount of net soil erosion (erosion minus sedimentation in the same place) and subsequent change in its level under two baseline (before loss of vegetation cover) and current (post-vegetation loss) situations. It was found that the average percentage of grass-pasture cover in the studied watershed has declined from 78.36% (under the baseline situation in 2000) to about 47% (under the current situation). The average amount of net soil erosion in the two sub-watersheds of Aji Chai and Marduq Chai has increased by more than 277% and 33%, respectively, signifying them to be the most vulnerable sub-watersheds (among all the four studied sub-watersheds) to soil erosion at critical areas. Overall as expected, a 40% loss of vegetation in the studied watershed has provoked adversely hazardous consequences during the studied period while cumulatively leading to over 8 million tons of soil deterioration in 15 years. The proposed method is assumed to be advantageous by providing quantitative and rapid environmental assessments that entail precise quantification of environmental consequences like soil erosion.

Keywords: Vegetation, Soil Erosion, Modeling, WWPSS Model, Eastern Sub-watersheds of the Lake of Urmia

Zarandian A., Mousazadeh R., Ramezani Mehrian M., and Ghorbanzadeh Zaferani S.G. 2024. Estimation and comparison of soil erosion changes due to vegetation loss in the eastern watershed of Lake Urmia. *Applied Soil Research*, 11(4): 77-94.

1. Associate Professor, Research Group of Environmental Assessment and Risk, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, I.R. Iran. (Corresponding author)
2. Assistant Professor, Research Group of Environmental Economics, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD) Department of Environment, Tehran, I.R. Iran.
3. Assistant Professor, Department of Environmental Studies, The Institute for Research and Development in the Humanities (SAMT), Tehran, I.R. Iran.
4. Assistant Professor, Research Group of Biodiversity & Biosafety, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, I.R. Iran.

* Corresponding Author Email: azarandian@gmail.com