بوم‌شناسی کاربردی/ سال سیزدهم / شماره چهارم / ۱٤۰۳/ صفحات ۱ تا ۲۰

ارزیابی و ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی پیشگیری از فرسایش خاک و تثبیت رسوب در تالاب بین‌المللی حرای خورخوران

اردوان زرندیان *[۱]، مجید رمضانی مهریان [۲]، فاطمه محمدیاری [۳]، رویا موسی‌زاده [٤] و نسرین عزیزی [٥]

(تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰۱/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۲٥)

چکیده

اکوسیستم‌های حرا نقش مهمی در کاهش فرسایش خاک و تثبیت رسوب دارند. این پژوهش به ارزیابی و ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی پیشگیری از فرسایش خاک و انتقال رسوب در تالاب بین‌المللی حرای خورخوران در استان هرمزگان پرداخته است. مدل SDR از مجموعه InVEST با استفاده از معادله RUSLE برای شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش، انباشت و تثبیت رسوبات به کار گرفته شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که میزان فرسایش سالیانه در محدوده مورد مطالعه بین ۰ تا ۳٥۰ تن در هکتار متغیر است، درحالی‌که در صورت فقدان پوشش گیاهی، این مقدار ممکن است تا ٤۳۰ تن در هکتار افزایش یابد. یافته‌ها نشان داد که پوشش گیاهی سالانه از فرسایش ٤۲۱۱۲ تن خاک و انتقال ٤۸۹۳۷ تن رسوب به مجاری آبی جلوگیری می‌کند. ارزش اقتصادی این خدمات به ترتیب ٤۳/۳۷ میلیارد تومان برای پیشگیری از فرسایش خاک و ۱۹٦/٦ میلیارد تومان برای پیشگیری از انتقال رسوب برآورد شد که مجموعاً حدود ۲٤۰ میلیارد تومان است. این نتایج اهمیت حفظ پوشش گیاهی در مدیریت منابع طبیعی را برجسته کرده و مدل SDR را به عنوان ابزاری مؤثر در برآورد کمی و نقشه‌سازی توزیع خدمات اکوسیستمی مورد نظر معرفی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، معادله RUSLE، نقشه‌سازی خدمات، نگهداشت خاک، مدل InVEST SDR، روش هزینه جایگزینی

۱. گروه پژوهشی ارزیابی و مخاطرات محیط زیستی، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیطزیست، تهران، ایران.
۲. گروه مطالعات محیطی، پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی (سمت)، تهران، ایران.
۳. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
٤. گروه پژوهشی اقتصاد محیطزیست، پژوهشکده محیطزیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران.
٥. گروه زیستگاه‌های آبی، دفتر حفاظت از زیست‌بوم‌ها و سواحل دریایی، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران
*مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: azarandian@gmail.com

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

مقدمه

بوم‌سازگان‌های طبیعی که دارای پوشش گیاهی متراکم هستند، نقش اساسی در تدارک خدمات بوم‌شناختی پیشگیری از فرسایش خاک و تثبیت رسوبات دارند. این خدمات موجب کاهش سرعت جریان آب، تقویت ساختار خاک و جلوگیری از انتقال رسوبات اضافی به منابع آبی می‌شوند (۳). جنگل‌ها و مراتع با پوشش گیاهی مناسب، بالاترین پتانسیل تثبیت رسوب را دارا هستند، در حالی که زمین‌های بایر و کاربری های انسان–ساخت این ویژگی ها را ندارند. بنابراین، مدیریت صحیح کاربری اراضی می‌تواند به بهبود کیفیت این خدمات بوم شناختی منجر شود (۱۸).

تالاب خورخوران در سواحل جنوبی ایران در استان هرمزگان، یک بوم‌سازگان حیاتی با جنگل‌های حرا و تنوع زیستی غنی محسوب می‌شود. این تالاب نقش مهمی در جلوگیری از فرسایش سواحل، به دام انداختن رسوبات، تصفیه آلاینده‌ها، بهبود کیفیت آب ایفا می‌کند و درعین‌حال از معیشت جوامع محلی پشتیبانی می‌نماید. همچنین سیستم ریشه‌ای پیچیده جنگل‌های حرا به‌طور مؤثری انرژی امواج را کاهش داده و از فرسایش خطوط ساحلی جلوگیری می‌کنند (۳۶) و رسوبات منتقل‌شده توسط جریانات جزرومدی و رودخانه‌ای را به دام انداخته و باعث حفظ پایداری سواحل و افزایش تاب‌آوری در برابر افزایش سطح دریا و رویدادهای شدید آب‌وهوایی می‌شود (۱۵). علاوه بر این، تجمع مواد آلی حاصل از تجزیه پوشش گیاهی حرا به تشکیل خاک کمک کرده و به ذخیره‌سازی کربن و کاهش تغییرات اقلیمی یاری می‌رساند (۷). بااین‌حال، فشارهای محیطی فزاینده مانند آلودگی، تغییرات اقلیمی و تخریب زیستگاه، تهدیدی جدی برای پایداری آن محسوب می‌شوند.

تدارک خدمت بوم‌شناختی پیشگیری از فرسایش برای حفظ حاصلخیزی خاک، جلوگیری از تخریب زمین و محافظت از کیفیت آب با کاهش رسوب‌گذاری در محیط‌های آبی ضروری است (۲۳). تثبیت رسوب اما به فرآیندی اشاره دارد که در آن رسوبات جدا شده و جابه‌جا شده توسط آب یا باد، در یک مکان خاص به‌دام‌افتاده و ته‌نشین می‌شوند. این خدمت بوم‌شناختی موجب جلوگیری از ورود مقادیر زیاد رسوبات به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و سواحل می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش کیفیت آب و ازبین‌رفتن زیستگاه‌های آبی شود (۳۲).

مدل نسبت تحویل رسوب (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade offs- Sediment Delivery Ratio, InVEST SDR) ابزاری پرکاربرد برای کمی‌سازی و نقشه‌برداری از فرسایش خاک و تثبیت رسوبات است (۳۷). این مدل نقش بوم سازگان‌های طبیعی مانند جنگل‌ها، تالاب‌ها و مراتع در کنترل حرکت رسوبات و کاهش فرسایش خاک را ارزیابی می‌کند. با در نظر گرفتن عواملی مانند کاربری زمین، پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک و توپوگرافی، این مدل میزان رسوبی را که از نواحی بالادست به آب‌های سطحی منتقل می‌شود و ظرفیت بوم سازگان ها برای تثبیت این رسوب‌ها را تخمین می‌زند. همچنین برای ارزیابی تأثیرات تغییرات کاربری زمین و تدابیر حفاظتی بر کیفیت خاک و آب مفید است و به ذینفعان کمک می‌کند تا راهبردهای مؤثری برای کنترل فرسایش و مدیریت رسوبات طراحی کنند (۹ و۲۵).

با وجود توسعه مدل‌های مختلف برای شبیه‌سازی فرسایش خاک و انتقال رسوب، انتخاب مدل مناسب نقش مهمی در دقت نتایج و کارآمدی آن در سیاست‌گذاری و مدیریت منابع دارد. مدل InVEST SDR، به‌دلیل نیاز به داده‌های در دسترس، قابلیت تحلیل فضایی، و سادگی اجرا، به‌عنوان ابزاری کارآمد در ارزیابی خدمات اکوسیستمی مرتبط با نگهداشت خاک و رسوب مطرح شده است.

مدل InVEST SDR در سال‌های اخیر و در پاسخ به نیاز روزافزون کارشناسان محیط‌زیست و بوم‌شناسی برای استفاده از مدل‌هایی با کاربرد ساده‌تر، داده‌های ورودی کمتر، زمان اجرای سریع‌تر، و قابلیت نقشه‌سازی دقیق خدمات بوم شناختی توسعه یافته است. برخلاف مدل‌های پیچیده‌تر مانند ابزار ارزیابی خاک و آب (Soil and Water Assessment Tool, SWAT) و پروژه پیش بینی فرسایش آبی (Water Erosion Prediction Project, WEPP) که نیاز به حجم زیادی از داده‌های هیدرولوژیکی و

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

مدیریتی دارند، مدل SDR امکان ارزیابی سریع و عملیاتی خدمات بوم‌شناختی را برای مناطق دارای اطلاعات محدود فراهم می‌آورد.

برای مقایسه، مدل SWAT یکی از مدل‌های جامع و قدیمی در حوزه شبیه‌سازی چرخه آب، رسوب، و کیفیت آب در مقیاس حوضه آبخیز است. در مطالعه‌ای توسط آرنولد و همکاران (۱۹۹۸)، این مدل توانست تأثیر تغییرات کاربری زمین و اقدامات مدیریتی را بر انتقال رسوب با دقت بالا شبیه‌سازی کند. با این حال، نیاز به داده‌هایی مانند دبی رودخانه، بارندگی روزانه، و اطلاعات مدیریتی دقیق از محدودیت‌های اصلی این مدل در بسیاری از مناطق، به‌ویژه مناطق حفاظت‌شده یا فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری، محسوب می‌شود (۲).

از سوی دیگر، مدل WEPP که مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی است، توانایی بالایی در شبیه‌سازی مکانیسم‌های دقیق فرسایش سطحی و شیاری دارد. مطابق بررسی فلاناگن و همکاران (۲۰۰۷)، این مدل در مقیاس‌های کوچک مانند مزارع یا سطوح شیب‌دار کاربرد مؤثری دارد، اما اجرای آن در مقیاس‌های بزرگ و بدون دسترسی به داده‌های دقیق خاک‌شناسی و اقلیمی بسیار دشوار است (۱٤).

در مقابل، مدل InVEST SDR با استفاده از ورودی‌هایی مانند نقشه کاربری اراضی، توپوگرافی، شاخص فرسایندگی باران و فرسایش‌پذیری خاک، قادر است بدون نیاز به کالیبراسیون پیچیده، خدمات بوم‌شناختی مانند تثبیت رسوب و پیشگیری از فرسایش خاک را در قالب نقشه‌های دقیق ارزیابی و به تصمیم‌گیران ارائه دهد. این ویژگی‌ها، به‌ویژه در مناطق حساسی مانند تالاب‌های حرای جنوب ایران، آن را به مدلی مناسب برای تحلیل وضعیت و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی تبدیل کرده است.

بر این اساس، در این پژوهش از مدل InVEST SDR برای ارزیابی کمی و نقشه‌سازی دو خدمت بوم‌شناختی شامل پیشگیری از فرسایش خاک و تثبیت رسوب در تالاب بین‌المللی حرای خورخوران استفاده شده و ارزش اقتصادی این خدمات نیز با بهره‌گیری از روش‌های اقتصادی مناسب برآورد گردیده است.

آبیسینقا و همکاران (۲۰۲٤) مدل InVEST SDR را در حوضه رودخانه‌ای در سریلانکا برای ارزیابی فرسایش خاک و انتقال رسوب به کار گرفتند. نتایج نشان داد که میزان فرسایش سالانه خاک بین ۰ تا ۲۷۷/۲۵ تن در هکتار در سال متغیر بود. میانگین سالانه صدور رسوب ۰/۱۸ تن در هکتار بود، درحالی‌که در برخی مناطق این مقدار به بیش از ۱۸ تن در هکتار می‌رسید (۱).

گاشاو و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای را در حوضه آبخیز کوگا واقع در حوضه بالادستی رودخانه نیل آبی در اتیوپی با استفاده از مدلSDR انجام دادند. نتایج نشان داد که میزان فرسایش خالص سالانه ۲۷/۳، انتقال رسوب ۵/۱ و انباشت رسوب ٦ تن در هکتار بود. این مطالعه حاکی از فرسایش خاک بالاتر از حد مجاز و لزوم اجرای اقدامات حفاظتی خاک و آب بود (۱۵).

چن و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای تغییرات زمانی و مکانی فرسایش خاک در حوضه دریاچه چینگ‌های چین را با استفاده از مدل InVEST SDR بررسی کردند. هدف این تحقیق، تجزیه‌وتحلیل تغییرات فرسایش خاک و تثبیت رسوب بود که در آن عوامل مختلفی چون کاربری اراضی، پوشش گیاهی، خصوصیات خاک و توپوگرافی را در نظر گرفته شد. این مطالعه نشان داد که تغییرات فضایی و زمانی قابل‌توجهی در فرسایش خاک وجود دارد که دیدگاه‌های ارزشمندی را برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر فرسایش فراهم کرد (٦).

اوگوگدال و همکاران (۲۰۲۰) از مدل InVEST SDR برای حوضه اوریکا در مراکش استفاده کردند تا مناطق آسیب‌پذیر در برابر فرسایش آبی را شناسایی کنند. این مطالعه از داده‌های فضایی شامل بارش، خصوصیات خاک، توپوگرافی و پوشش اراضی برای برآورد خطر فرسایش خاک در سراسر حوضه استفاده کرد. نتایج نشان داد که میانگین فرسایش خاک ۲۵۸/٤۸ تن در هکتار در سال است که به‌طور قابل توجهی از آستانه فرسایش قابل تحمل فراتر می‌رود (۳۰). مطالعه‌ای دیگر که در سریلانکا برای

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

مدل‌سازی فرسایش خاک و خطر انتقال رسوب در مناطق کشاورزی انجام شد، میانگین سالانه فرسایش خاک در این مناطق را ۱۲٤/۲ تن در هکتار برآورد نمود که در محدوده‌ای بین ۰/۱ تا ٦۹۰۳ تن در هکتار متغیر بود و بخش‌های زیادی از اراضی در کلاس‌های خطر فرسایش متوسط تا بسیار بالا قرار گرفتند (۲۱).

مرج و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل InVEST SDR به مدل‌سازی خدمت تثبیت رسوب در دره کشمیر، هند، پرداختند. هدف این تحقیق تعیین کمیت تثبیت رسوب توسط بوم سازگان‌های این منطقه و شناسایی محدوده های در معرض خطر بالای فرسایش بود. این مطالعه نشان داد که به ویژه جنگل‌ها و تالاب‌ها، مسئول تثبیت حدود ۱/٦ میلیون تن رسوب در سال هستند که به‌طور قابل توجهی کیفیت آب را بهبود می‌بخشند. (۲۷).

بنابراین، بر اساس مطالعات پیشین، مدل InVEST SDR به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی و درک فرایندهای انتقال، انباشت و تثبیت رسوب و همچنین پیشگیری از فرسایش خاک در مناطق مختلف جغرافیایی شناخته شده است. این مدل کاربردهایی در مقیاس‌های مختلف از ارزیابی‌های محلی تا ملی دارد و به تدوین راهبردهای مؤثر برای مدیریت رسوب و حفظ کیفیت خاک و آب کمک می‌کند.

خروجی‌های مدل InVEST SDR که شامل مقادیر صدور رسوب و فرسایش خاک اجتناب‌شده در اثر کارکرد پوشش گیاهی است، می‌تواند برای برآورد ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی مرتبط با حفظ خاک و تثبیت رسوب استفاده شود. با کمی‌سازی رسوبی که در صورت نبود اکوسیستم‌های طبیعی مانند جنگل‌ها، تالاب‌ها و مراتع از دست می‌رفت، این مدل اطلاعات ارزشمندی در مورد فواید این اکوسیستم‌ها در پیشگیری از فرسایش خاک و حفظ باروری خاک ارائه می‌دهد. داده‌های انتقال رسوب اجتناب‌شده (Avoided Sediment Export) می‌تواند برای محاسبه صرفه‌جویی‌های هزینه‌ای از کاهش رسوب در رودخانه‌ها، سدها و تأسیسات تصفیه آب استفاده شود. علاوه بر این، مقادیر فرسایش خاک اجتناب‌شده می‌تواند به بهره‌وری کشاورزی مرتبط شود، زیرا فرسایش خاک به‌طور مستقیم بر عملکرد محصولات زراعی تأثیر می‌گذارد. ارزش اقتصادی این خدمات می‌تواند با استفاده از روش‌هایی مانند رویکرد هزینه جایگزینی، که در آن هزینه بازسازی زمین‌های فرسوده یا تصفیه آب با رسوبات مقایسه می‌شود، برآورد شود. چندین مطالعه نشان داده‌اند که این رویکرد مفید است و حفظ مناظر طبیعی برای کنترل فرسایش می‌تواند صرفه‌جویی‌های هزینه‌ای قابل توجهی فراهم کند و به شیوه‌های مدیریت پایدار اراضی و منابع آب کمک کند (۸ ، ۲۰ و۲۳).

هدف این مقاله تعیین مقدار تثبیت رسوب و پیشگیری از فرسایش خاک توسط بوم‌سازگان تالابی حرای خورخوران و تهیه نقشه‌هایی برای این خدمات بوم‌شناختی است. همچنین، پس از تعیین کمیت تدارک این خدمات، در گام بعدی، ارزش اقتصادی آن با استفاده از روش‌های مناسب برآورد می‌شود. این تحلیل می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای مدیریت منابع آبی و حفاظت از تالاب در برابر تهدیدات محیط‌زیستی، به‌ویژه فرسایش خاک و رسوب، به کار رود.

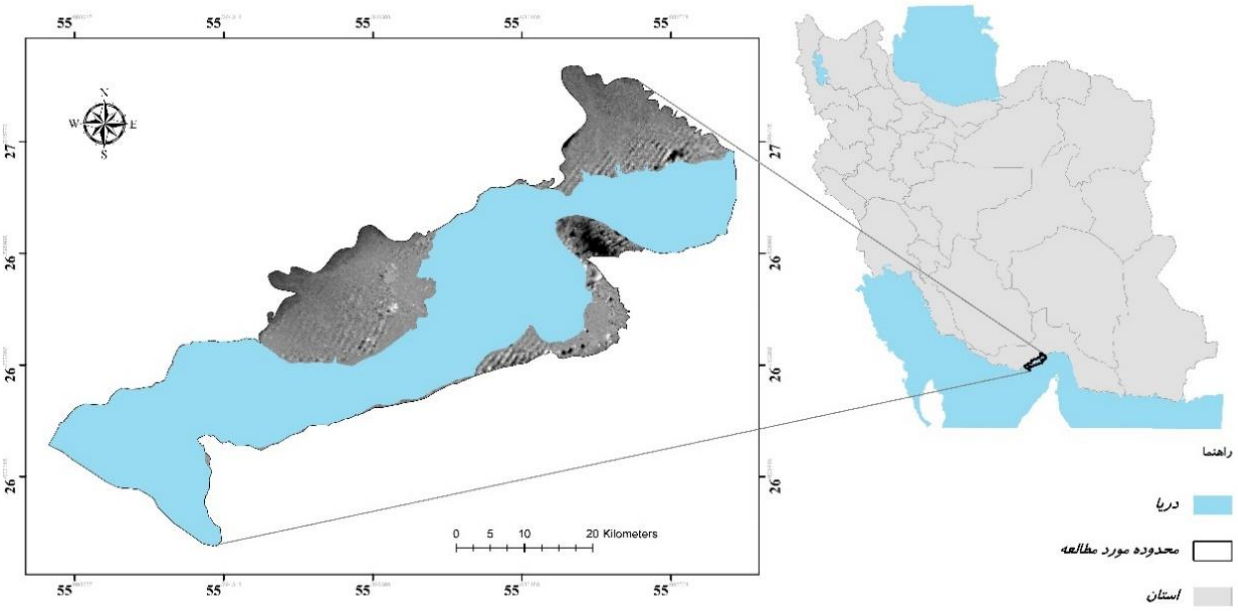
مواد و روش‌ها

- **توصیف منطقه مطالعه**

تالاب بین‌المللی حرای خورخوران یکی از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های حرای ایران است که در شمال غربی جزیره قشم در استان هرمزگان واقع شده است. این تالاب زیستگاه طبیعی انواع گونه‌های پرندگان مهاجر، آبزیان، سخت‌پوستان و ماهیان ساحلی به شمار می‌رود. تنوع زیستی بالا، شوری نسبتاً پایین آب، جریان‌های جزر و مدی منظم و بستر گلی و حاصل‌خیز، از ویژگی‌های اکولوژیکی برجسته این تالاب است . تالاب بین‌المللی خورخوران در نزدیکی شهر بندر خمیر (با جمعیت حدود ۱۳ هزار نفر) و روستای بندر لافت در جزیره قشم (با جمعیت حدود ۸ هزار نفر) واقع شده است. این دو مرکز جمعیتی مهم‌ترین سکونتگاه‌های انسانی پیرامون تالاب به شمار می‌روند.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]



شکل ۱. محدوده حریم بوم‌شناختی تالاب حرای خورخوران

در این تحقیق، محدوده مطالعاتی بر اساس حریم بوم‌شناختی تعیین‌شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست در یک پروژه مطالعاتی برای این تالاب انتخاب شده است. این حریم شامل مناطقی است که بیشترین ارتباط هیدرولوژیکی، زیستگاهی و عملکردی را با تالاب دارند و برای حفظ پایداری آن اهمیت ویژه‌ای دارند. تالاب حرای خورخوران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود تحت‌تأثیر عواملی مانند نوسانات سطح آب، ورود آلاینده‌ها و تغییرات کاربری اراضی قرار دارد که می‌تواند بر توان آن در تثبیت رسوب و پیشگیری از فرسایش اثر بگذارد. شکل ۱ محدوده مطالعاتی این تحقیق را نشان می‌دهد.

- **روش کار مدل**

مدل InVEST SDR با یکپارچه‌سازی چندین ورودی محیطی، میزان صدور (Export) و تثبیت (Retention) رسوب و به تبع آن پیشگیری از فرسایش خاک را در یک پهنه مطالعاتی تخمین می‌زند. این مدل از معادله جهانی اصلاح‌شده فرسایش خاک (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) برای محاسبه فرسایش بالقوه خاک استفاده می‌کند (۳۶) که شامل عواملی مانند فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و شیوه‌های مدیریت پوشش زمین است. مدل با تحلیل تجمع جریان و شیب زمین، نواحی‌ای را که احتمال رسوب‌گذاری یا تحویل (Delivery) رسوب به آبراهه‌ها وجود دارد، شناسایی می‌کند. (۳۲). جدول ۱ پارامترهای محاسباتی مهم در مدل InVEST SDR را نشان می دهد:

برای درک شفاف چگونگی کارکرد مدل SDR، در ادامه نحوه انجام محاسبات مدل به طور خلاصه تشریح شده است:

- **تخمین فرسایش خاک مبتنی**: مدل مقدار فرسایش خاک را در هر سلول شبکه با استفاده از معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) محاسبه می‌کند:

$$A = P \times C \times S \times L \times K \times R$$

که در آن:

A فرسایش سالانه خاک (تن در هکتار در سال)، R عامل فرسایندگی باران(MJ·mm/ha·h·year) ، K عامل فرسایش‌پذیری خاک(t·ha·h/ha·MJ·mm) ، L عامل طول شیب (بدون بعد)، S مقدار شیب (بدون بعد)، C عامل مدیریت پوشش گیاهی (بدون بعد) و P عامل شیوه‌های حمایتی (بدون بعد) است.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

جدول ۱. پارامتر های مهم محاسباتی در مدل InVEST SDR

پارامتر	تعریف	منبع
فرسایندگی بارش(R)	نمایانگر توانایی بارش در ایجاد فرسایش خاک است که با استفاده از داده‌های بارش محاسبه می‌شود.	(۳۶ و ۴۱)
فرسایش‌پذیری خاک(K)	معیاری از حساسیت خاک به فرسایش است که تحت‌تأثیر بافت خاک، ماده آلی و ساختار آن قرار دارد.	(۱۲ و ۴۱)
طول شیب(L)	طول افقی شیب که بر نحوه جریان آب و انتقال رسوب تأثیر دارد.	(۴۲)
مقدار شیب(S)	درجه شیب که بر سرعت جریان آب و پتانسیل فرسایش تأثیر دارد.	(۲۸)
مدیریت پوشش(C)	نوع پوشش زمین یا گیاهان که دارای تأثیر محافظتی در برابر فرسایش خاک است.	(۴۱)
عملیات پشتیبانی(P)	شیوه‌های مدیریت مانند ترانس‌ها یا نوارهای حفاظتی که فرسایش و انتقال رسوب را کاهش می‌دهند.	(٤ و ۱۸)
تجمع جریان	مقدار تجمع جریان آب در یک سلول شبکه (در نقشه رستری) که به تخمین مسیرهای تحویل رسوب کمک می‌کند.	(۱۱)
محدوده حوضه آبریز	منطقه جغرافیایی که رسوب تولید می‌شود و شامل نوع پوشش/کاربری زمین است.	(۲۵)

- **محاسبه انتقال رسوب (تجمع جریان و شاخص اتصال‌پذیری):** مدل با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model, DEM) مقدار تجمع جریان را محاسبه کرده و سپس شاخص اتصال‌پذیری رسوب (Connectivity Index , IC)را برای تعیین میزان حرکت رسوب در سراسر چشم‌انداز برآورد می‌کند:

$$IC = log_{10}\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right)$$

که در آن:

D_{up} مساحت حوزه بالادست که می‌تواند منبع رسوب باشد و D_{dn} طول مسیر جریان پایین‌دست تا نزدیک‌ترین رودخانه است (٤).

- **محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR):** نسبت تحویل رسوب، با استفاده از یک تابع تجربی که اتصال‌پذیری رسوب را به کارایی انتقال رسوب مرتبط می‌کند، محاسبه می‌شود:

$$SDR = \frac{1}{(\beta - \gamma^{IC})_e + 1}$$

که در آن:

SDR نسبت تحویل رسوب، β و γ پارامترهای کالیبراسیون بر اساس ویژگی‌های سرزمین (لندسکیپ) و IC شاخص اتصال‌پذیری رسوب است.

- **برآورد میزان رسوب وارد شده به آب‌ها:** میزان نهایی رسوبی که به رودخانه‌ها می‌رسد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = SDR \times A$$

که در آن:

E مقدار رسوب منتقل شده به رودخانه‌ها (تن در هکتار در سال)، A مقدار فرسایش خاک برآورد شده با RUSLE و SDR نسبت تحویل رسوب است.

این محاسبات به برآورد میزان رسوبی که به آبراهه‌ها می‌رسد کمک کرده و برای مدیریت حوزه‌های آبخیز و کنترل فرسایش مفید است.

داده‌های مورد نیاز

برای اجرای مدل در محدوده تالاب حرای خورخوران، از مجموعه‌ای از داده‌های مکانی و محیطی استفاده شده است که بر دقت نتایج مدل تأثیر دارند. جدول ۲ مهم‌ترین داده‌های ورودی

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

جدول ۲. داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل InVEST SDR

نوع داده	توضیحات	منبع/مرجع
مدل رقومی ارتفاع (DEM)	داده رستری که ارتفاع زمین را نمایش می‌دهد و برای محاسبه جهت جریان، شیب و تجمع جریان استفاده می‌شود.	تصویر ماهواره‌ای ASTER
نقشه کاربری/پوشش زمین (Land Use Land (Cover, **LULC**	داده رستری که انواع مختلف کاربری زمین را دسته‌بندی می‌کند و برای تعیین ضرایب C و P ضروری است.	تهیه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش‌ازدور، پایگاه‌های داده ملی کاربری زمین (۳۹)
عامل فرسایندگی بارش (R)	میزان تأثیر بارش بر فرسایش خاک که از داده‌های بلندمدت بارندگی استخراج می‌شود.	داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی (۳۲)
عامل فرسایش‌پذیری خاک(K)	نشان‌دهنده حساسیت خاک به فرسایش بر اساس بافت، ماده آلی و ساختار خاک است.	نقشه‌های خاکFAO ، پایگاه داده جهانی خاک (۱۳)
عامل طول و شیب دامنه (LS)	از DEM استخراج شده و تأثیر توپوگرافی بر فرسایش را مشخص می‌کند.	محاسبه‌شده از DEM با استفاده از ابزارهای GIS (٤٢)
عامل مدیریت پوشش (C)	ضریب بدون بعد که تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش فرسایش را نشان می‌دهد.	مقادیر تجربی از منابع علمی (٤١)
عامل اقدامات حفاظتی (P)	نشان‌دهنده شیوه‌های حفاظتی مانند تراس‌بندی برای کاهش فرسایش است.	بررسی‌های کشاورزی، داده‌های میدانی (٣٦)
حوضه آبخیز/شبکه رودخانه‌ها	داده‌های وکتوری یا رستری که هیدرولوژی منطقه مورد مطالعه را برای مسیریابی رسوبات مشخص می‌کند.	HydroSHEDS، پایگاه‌های داده ملی هیدرولوژی (۲۵)
جدول زیست‌فیزیکی	فایل CSV که کلاس‌های LULC را به ضرایب C و P مرتبط می‌کند.	مبتنی بر مطالعات محلی و منابع علمی (۲۸)

مورد نیاز که برای اجرای مدل در این تحقیق تهیه و استفاده شده‌اند را با تشریح جزئیات لازم نشان می‌دهد:

در این تحقیق از مدل رقومی ارتفاع با وضوح مکانی ۳۰ متر ماهواره ASTER استفاده شد. همچنین نقشه کاربری / پوشش زمین بر اساس روش طبقه‌بندی سخت، پیکسل پایه و هیبرید (ترکیب نظارت شده و نشده) از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در سال ۲۰۲۳ استخراج شد. برای محاسبه فاکتور R، بعد از تعیین ایستگاه‌های شاخص در محدوده مورد مطالعه، بارندگی ماهیانه و سالیانه در این ایستگاه‌ها در بازه زمانی ۳۵ ساله تهیه و ارزیابی شد. فاکتور R یا همان فرسایندگی باران بر اساس حاصل‌ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای برآورد شد (۳٦) و با درونیابی در محیط Arc GIS 10.2 به سطح منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شد. برای فاکتور k شاخص فرسایش پذیری خاک نیز از نقشه پایگاه داده های جهانی خاک که توسط فائو عرضه شده است استفاده شد (۲۹). به منظور تسهیل در تجزیه و تحلیل نتایج و بهبود خوانایی نقشه های خروجی مدل، در این مطالعه با استفاده از ابزار Arc Hydro در نرم افزار Arc GIS پنج زیرحوضه آبخیز استخراج شد. جدول بیوفیزیکی به عنوان یک ورودی کلیدی ویژگی های مدیریتی عامل پوشش گیاهی و شیوه های حفاظتی را برای هر نوع کاربری

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

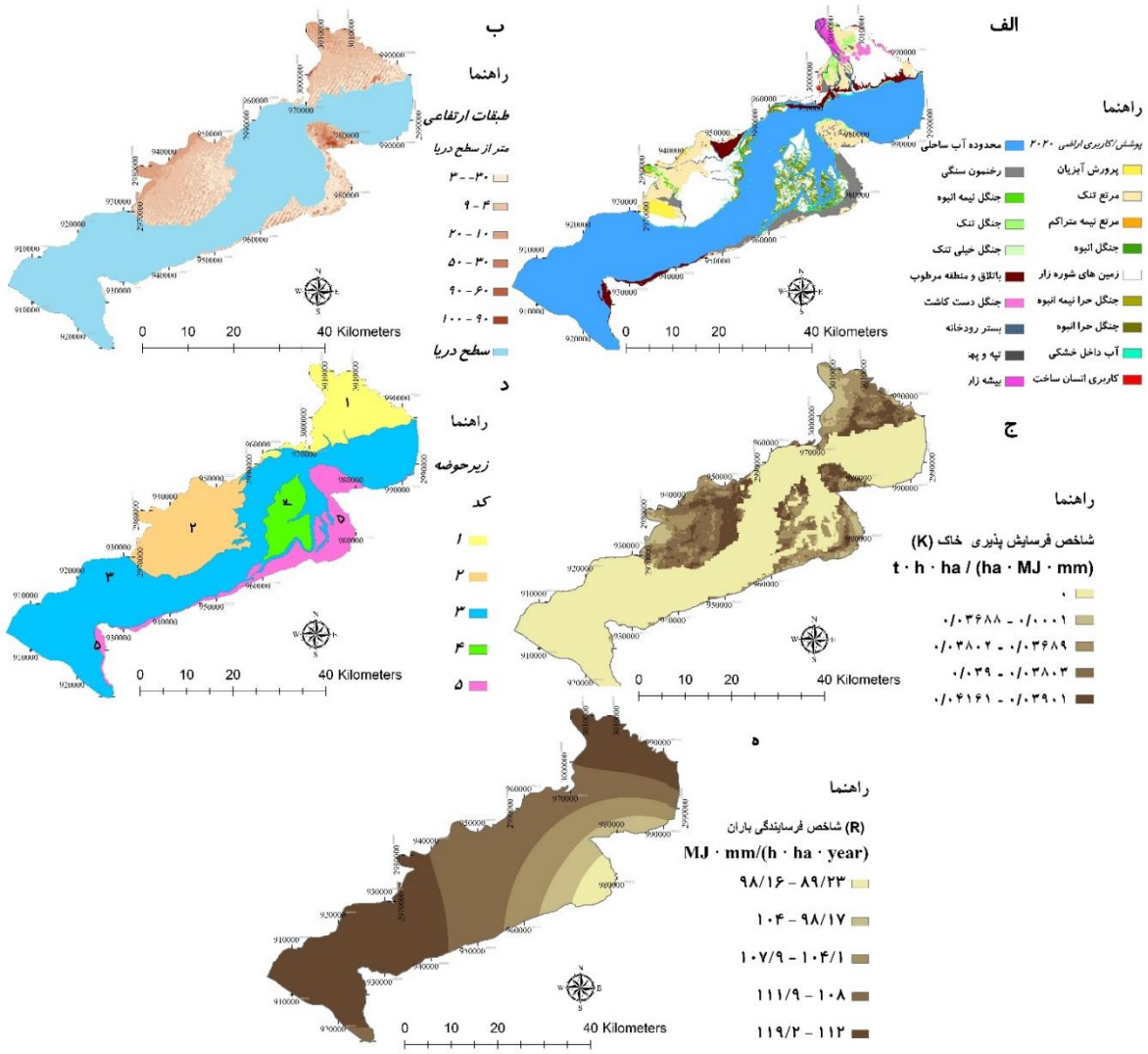
جدول ۳. داده های مورد استفاده در خصوص ویژگی های عامل پوشش گیاهی بر اساس انواع پوشش/کاربری زمین برگرفته از مرور منابع موجود (۱۳ و ۳۶).

نوع پوشش کاربری زمین	عامل C	عامل P
جنگل خیلی تنک	۰/۴۵	۰/۷
جنگل تنک	۰/۳۵	۰/۷
جنگل کم‌تراکم	۰/۳۳	۰/۶
جنگل نیمه متراکم	۰/۲۴	۰/۵
جنگل متراکم	۰/۱۵	۰/۵
مرتع کم‌تراکم	۰/۴۵	۰/۹
مرتع نیمه متراکم	۰/۲۴	۰/۸
مرتع متراکم	۰/۱۰	۰/۵
حرای نیمه انبوه	۰/۱۱	۰/۵
حرای انبوه	۰/۱۱	۰/۵
بوته‌زار	۰/۳۰	۰/۶
شوره‌زار	۱	۱
بدنه آبی	۱	۱
کشاورزی	۰/۵	۰/۶۵
سکونتگاه	۱	۱
صخره	۱	۱
باتلاق	۱	۱
رودخانه	۱	۱
نواحی شنی	۰/۹	۱

زمین مشخص می کند. این دو عامل در جدول بیوفیزیکی به صورت یک نسبت عددی بین صفر تا یک برای هر نوع ئوشش/ کاربری زمین تعیین می شوند. در مورد عامل مدیریت پوشش گیاهی، این ضریب بیانگر تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش یا افزایش فرسایش است به طوری که مقادیر کمتر (نزدیک به ۰) نشان می‌دهند که احتمال فرسایش کمتر است، یعنی پوشش گیاهی از خاک محافظت می‌کند. بر عکس مقادیر بیشتر (نزدیک به ۱) نشان‌دهنده پوشش ضعیف یا عدم پوشش گیاهی هستند، که باعث افزایش فرسایش می‌شود. در مورد عامل شیوه حفاظتی، این ضریب میزان تأثیر اقدامات مدیریتی و حفاظتی را بر کاهش فرسایش نشان می‌دهد. به طوری که مقدار ۱ نشان می‌دهد که هیچ اقدام کاهش‌دهنده فرسایش انجام نشده است یا اطلاعاتی در مورد این اقدامات وجود ندارد، بنابراین این عامل بر خروجی RUSLEتأثیری نخواهد داشت. مقادیر کمتر از ۱ نشان می‌دهند که اقدامات مدیریتی مانند تراس‌بندی انجام شده است، که باعث کاهش فرسایش می‌شود. جدول ۳ داده های جدول بیوفیزیکی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد که بر اساس مرور منابع ملی و بین المللی درباره عامل پوشش گیاهی در کاربری های مختلف اراضی تهیه شده است. همچنین شکل ۲ داده های ورودی مدل را که به صورت نقشه های رستری جهت اجرا تهیه شده اند نشان می دهد. بر این اساس، شاخص فرسایش‌پذیری

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]



شکل ۲. داده های نقشه ای ورودی مدل InVEST SDR در محدوده مورد مطالعه: الف) نقشه پوشش/ کاربری زمین، ب) مدل رقومی ارتفاع، ج) شاخص فرسایش پذیری خاک (K)، د) زیرحوضه های آبخیز، ه) شاخص فرسایندگی باران (R)

خاک (عامل K) در بازه ۰/۰۴۱ t · h · ha / (ha · MJ · mm) - ۰/۰۰۰۱ متغیر است (شکل ۲ ج)، در حالی که شاخص فرسایش ناشی از بارندگی(عامل R) مقادیری بین MJ · mm/(h · ha · year) ۸۹–۱۱۹ دارد که در تعیین میزان فرسایش بالقوه نقش اساسی ایفا می‌کنند (شکل ۲ ه). همچنین، مدل رقومی ارتفاع (DEM) اطلاعات مهمی درباره تأثیر شیب و ارتفاع ارائه می‌دهد (شکل ۲ ب).

علاوه بر داده های جدول بیوفیزیکی، برای اجرای مدل نیاز به تنظیم یکسری ضرایب عددی است که شامل موارد ذیل هستند:

- **آستانه تجمع جریان:(Threshold Flow Accumulation)** این مقدار، تعیین‌کننده تعداد پیکسلی است که باید در نقشه رقومی ارتفاع به هم متصل شوند تا به‌عنوان یک مسیر جریان اصلی در نظر گرفته شوند. محدوده عددی این پارامتر بین ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ است که اعداد بزرگتر فقط مسیر های اصلی را در نقشه مشخص می کنند. در این تحقیق با توجه به وضعیت توپوگرافی و وضعیت آبراهه های محدوده مورد مطالعه به صورت آزمون و خطا عدد ۵۰۰ در نظر گرفته شد.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]
[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

- **پارامتر K (Borselli K Parameter)**: این پارامتر میزان تأثیر شیب و مسافت در کاهش انتقال مواد مغذی را تعیین می‌کند. در این تحقیق از مقدار پیش‌فرض مدل (عدد ۲) استفاده شد که برای مناطق زهکشی طبیعی استفاده می‌شود.
- **پارامتر IC (Borselli IC0)**: این پارامتر بر مدل‌سازی ارتباط هیدرولوژیکی و انتقال رسوب تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق این پارامتر به مقدار پیش‌فرض مدل ۰/۵ تنظیم شد.
- **حداکثر مقدار نسبت تحویل رسوب (Maximum SDR Value)**: تابعی از بافت خاک است. این مقدار به‌عنوان کسری از ذرات سطحی خاک که ریزتر از شن درشت (۱۰۰۰ میکرومتر) هستند، تعریف می‌شود (۴۱). این پارامتر می‌تواند برای کالیبراسیون در مطالعات پیشرفته استفاده شود. در این تحقیق با توجه به عدم دسترسی به این اطلاعات در محدوده مورد مطالعه، از مقدار پیش فرض مدل (عدد ۰/۸) استفاده شد.
- **حداکثر مقدار مجاز برای پارامتر طول شیب (Maximum L Value)**: مقدار L بر عامل شیب و مقدار آن مؤثر است و نقشی مهم در محاسبه فرسایش دارد و باید بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی منطقه مطالعه تنظیم شود. مطالعات علمی مقدار این پارامتر را بین ۱۲۲ تا ۳۳۳ گزارش کرده‌اند (۱۰ و ۳۶). در مناطق دشتی و هموار (مانند سواحل خلیج فارس و قشم) مقدار L کمتر (بین ۱۲۲ تا ۱۸۰) مناسب‌تر است. بنابراین مقدار این پارامتر نیز همان مقدار پیش فرض مدل (عدد ۱۲۲) تنظیم شد.

در گام نهایی، با استفاده از داده‌های ورودی تهیه شده، مدل InVEST SDR اجرا شد. سپس خروجی‌های حاصل از اجرای مدل در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس مورد تحلیل قرار گرفت. خروجی حاصل از اجرای مدل شامل نقشه‌های مربوط به مناطقی با بالاترین ظرفیت تثبیت رسوب و مناطقی که بیشترین رسوب را به منابع آبی منتقل می‌کنند، است. این خروجی‌ها در قسمت بعدی به‌عنوان نتایج تحقیق مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

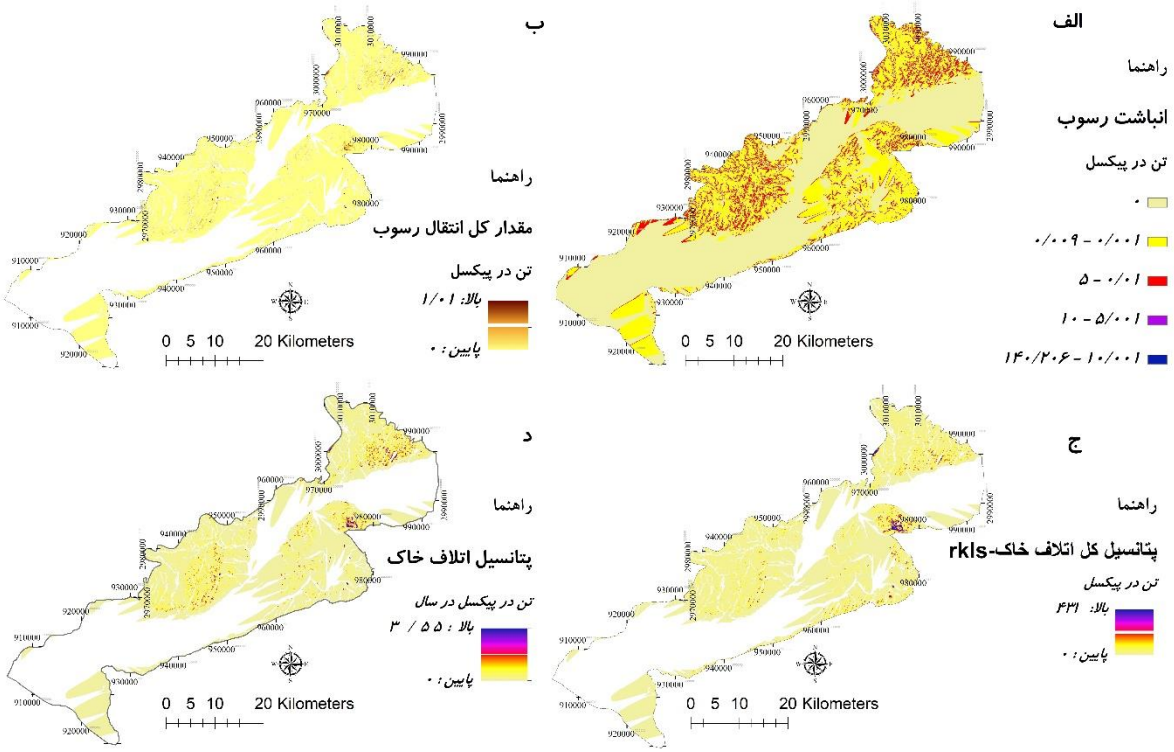
- **روش ارزشگذاری اقتصادی**: در این تحقیق، برای برآورد ارزش اقتصادی خدمت پیشگیری از فرسایش از روش هزینه جایگزینی استفاده شد (۳۴). روش هزینه جایگزینی یکی از روش‌های رایج ارزشگذاری خدمات بوم شناختی است که بر مبنای هزینه‌هایی که برای جایگزینی یا احیای خدمات تخریب شده صرف می‌شود، ارزش این خدمات را تخمین می‌زند (۲۲). به عنوان مثال، در صورتی که یک منطقه جنگلی به دلیل فعالیت‌های انسانی دچار فرسایش خاک شود، دولت یا دیگر نهادها مجبور خواهند شد هزینه های استفاده از روش‌های مهندسی و عملیاتی برای تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش هزینه‌هایی مانند احداث سدها، پوشش گیاهی مصنوعی و دیگر روش‌های مهندسی را متحمل شوند. در این حالت، هزینه‌هایی که برای جایگزینی یا جبران خدمات بوم شناختی از دست رفته باید پرداخت شود، برابر با هزینه جایگزینی است که بوم سازگان به‌طور طبیعی فراهم می‌کرده است. برای ارزشگذاری خدمت پیشگیری از انتقال رسوب، از دو روش هزینه خسارت اجتناب‌شده و انتقال منفعت (۳۵) استفاده شد. روش هزینه خسارت اجتناب‌شده به تخمین هزینه‌هایی می‌پردازد که در صورت انتقال رسوب و آسیب به منابع آبی باید برای جبران خسارت صرف شود. در این روش، به طور معمول هزینه‌های بهبود کیفیت منابع آبی و تصفیه آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. روش انتقال منفعت نیز بر اساس انتقال ارزش‌های اقتصادی از مطالعات قبلی است که به‌وسیله تعدیلات لازم برای شرایط محلی و زمانی جدید، می‌توان ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی را برآورد کرد.

نتایج

تأثیر عوامل محیطی (توپوگرافی، بارش و پوشش/ کاربری زمین) بر انباشت و انتقال رسوب: توزیع مکانی انباشت (Accumulation) و انتقال رسوب (شکل‌های ۳- الف و ب) تحت تأثیر عوامل توپوگرافی و اقلیمی قرار دارد. مناطقی با مقادیر

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]



شکل ۳. خروجی های مدل InVEST SDR با فرمت رستری (پیکسل های ۱۰ متر مربعی) شامل انباشت رسوب (الف)، انتقال رسوب (ب)، پتانسیل اتلاف خاک در شرایط فقدان پوشش گیاهی (ج) و اتلاف سالیانه خاک بر اساس معادله USLE بر حسب تن/پیکسل/سال (د)

بالای K و R ، فرسایش شدیدتر و پویایی بالاتر انتقال رسوب را تجربه می‌کنند.

محدوده ارتفاعی منطقه موردمطالعه ۰ تا ۱۰۰ متر است و فاقد تغییرات ارتفاعی چشمگیر است، ازاین‌رو، شیب عامل اصلی در انباشت و انتقال رسوب محسوب می‌شود. بر اساس خروجی‌های مدل، مقدار انتقال سالیانه رسوب در محدوده مورد مطالعه بین ۱-۰ تن در پیکسل (۱۰۰-۰ تن در هکتار با توجه به قدرت تفکیک ۱۰ متری نقشه رستری) متغیر است که بیشترین مقادیر انتقال رسوب در شیب‌های بالاتر ثبت شده است. این بدان دلیل است که در شیب‌های بالاتر، سرعت حرکت آب بیشتر می‌شود و به‌تبع آن توان حمل رسوب افزایش می‌یابد. در مورد انباشت رسوب، مقادیر خروجی مدل بین ۱٤-۰ تن در هر پیکسل (۱٤۰۰-۰ تن در هکتار) در سال متغیر است. مناطق با شیب‌های کمتر، به دلیل کاهش سرعت جریان آب، رسوب‌ها را در خود نگه می‌دارند و انباشت رسوب در این مناطق بیشتر است.

کاربری/پوشش زمین (شکل ۲-الف) تأثیر قابل‌توجهی بر الگوهای انتقال و انباشت رسوب دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کارایی تنظیم رسوب در میان انواع پوشش‌های مختلف زمین به‌طور چشمگیری متفاوت است. پوشش جنگلی حرّا بالاترین اثربخشی را در جلوگیری از انتقال رسوب دارند، به‌طوری که مقدار انتقال رسوب در آن‌ها بین حداقل صفر تا حداکثر ٤/٥ (با میانگین ۰/۰۰٤۸) تن در هکتار متغیر است. اراضی شوره زار، انسان-ساخت و کشاورزی به ترتیب بالاترین نرخ انتقال رسوب را تجربه می‌کنند، به طوری که میانگین مقدار انتقال رسوب در آنها به ترتیب معادل ۱/۲، ۰/۷۸ و ۰/۷۲ تن در هر هکتار قرار دارد. فقدان یا پوشش گیاهی محدود در این مناطق، موجب افزایش فرسایش خاک و افزایش تحرک رسوب می‌شود. پوشش

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]
[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

های جنگلی تُنک و بوته‌زارها در محدوده خشکی کارایی متوسطی در حفظ رسوب دارند. میانگین انتقال رسوب در این پوشش ها بین ۰/۰۳۰ –۰/۰۲۸ تن در هکتار متغیر است. میانگین انتقال رسوب در اراضی شوره زار، انسان–ساخت و کشاورزی به ترتیب ۲۵۰، ۱٦٤ و ۱۵۰ برابر جنگل های انبوه حرا برآورد شد. همچنین این مقدار در پوشش های جنگلی تنک و بوته زار ها حدود ٦ برابر جنگل های حراست. این محاسبات نشان دهنده کمترین میزان انتقال رسوب در محدوده های حراست و تاثیر مطلوب این نوع پوشش جنگلی را بر پیشگیری از انتقال رسوبات به رودخانه ها نشان می دهد.

برآورد مقدار اتلاف خاک (Soil Loss)

مقدار اتلاف سالیانه خاک ۳/۵–۰ تن در پیکسل (۳۵۰–۰ تن در هکتار) برآورد شد (شکل ۳–د). مدل به‌منظور برآورد تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش فرسایش و اتلاف خاک نیز محاسباتی را با فرض فقدان عامل پوشش گیاهی انجام می‌دهد که نتیجه آن در شکل ۳–ج نشان داده شده است. براین‌اساس در شرایط عدم حضور پوشش گیاهی به‌ویژه جنگل‌های حرای محدوده مورد مطالعه، میزان اتلاف سالیانه خاک می‌تواند تا ٤/۳ تن در پیکسل (٤۳۰ تن در هکتار) و به میزان بیش از ۲۰٪ افزایش یابد. بدیهی است چنین امری می‌تواند پیامدهای سوء بسیاری از جمله کدورت و آلودگی منابع آبی (در اثر مواد مغذی ناشی از کودهای شیمیایی) در اثر افزایش شدید انتقال رسوبات و تهدید گونه‌های آبزی به همراه داشته باشد.

ارزیابی و تحلیل توزیع فضایی خدمات بوم‌شناختی پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش

خروجی‌های اصلی و نهایی حاصل از اجرای مدل InVEST SDR در این تحقیق، تهیه نقشه و تعیین کمیت‌های دو خدمت بوم‌شناختی پیشگیری از انتقال رسوب و پیشگیری از فرسایش به واسطه حضور پوشش گیاهی در محدوده مورد مطالعه است. شکل ٤ نتایج مورد نظر را با فرمت رستری با واحد تن در پیکسل (شکل های ٤ الف وب) و وکتوری با واحد تن در زیرحوضه (شکل های ٤ ج و د) نشان می دهد.

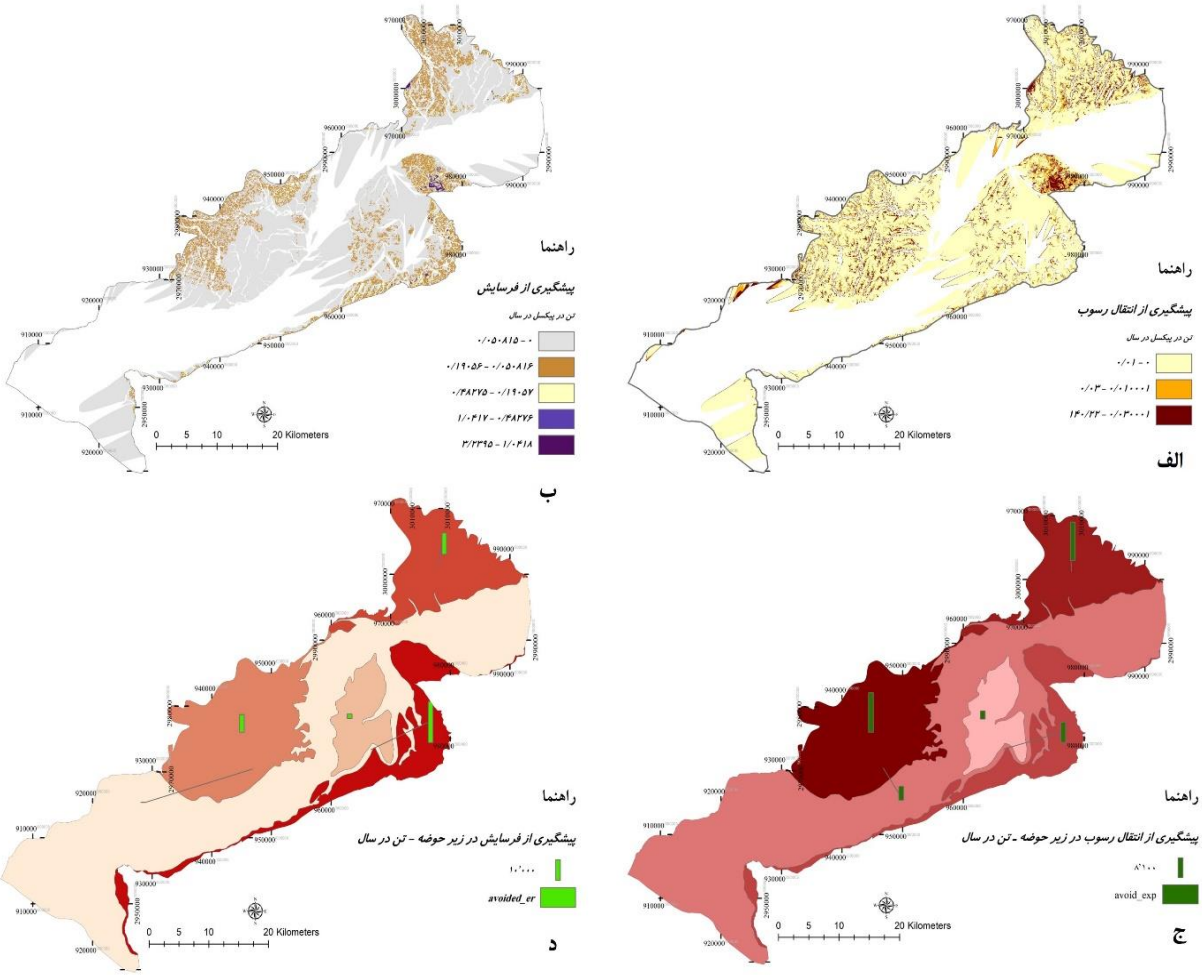
براین‌اساس نرخ پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش در محدوده مورد مطالعه به ترتیب در بازه‌های ۱٤۰–۰ و ۳–۰ تن در پیکسل در سال (۱٤۰۰–۰ و ۳۰۰–۰ تن در هکتار) برآورد شده است. این مقادیر نشان‌دهنده کارایی بوم‌سازگان تالابی حرا در کاهش فرسایش و انتقال رسوب هستند. مناطق با نرخ بالای پیشگیری از فرسایش معمولاً دارای پوشش گیاهی متراکم و شیب ملایم هستند که به تثبیت خاک کمک می‌کنند. برعکس، مناطق با نرخ بالای پیشگیری از انتقال رسوب معمولاً در نزدیکی آبراهه‌ها و با پوشش گیاهی مناسب قرار دارند که به کاهش سرعت جریان آب و جلوگیری از حمل رسوب کمک می‌کنند.

نقشه‌های خدمات بوم‌شناختی با فرمت وکتوری (پلیگون)، ارزیابی خدمات پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش را در مقیاس زیرحوضه‌ای امکان‌پذیر می‌سازند. زیرحوضه‌هایی که دارای پوشش گیاهی متراکم و شیب‌های ملایم هستند، عملکرد بهتری در کاهش فرسایش و کنترل انتقال رسوب دارند. در مقابل، زیرحوضه‌هایی که پوشش کشاورزی و سطوح خاک بدون پوشش دارند، مستعد افزایش تلفات رسوب بوده و نیازمند مدیریت هدفمند برای کاهش اتلاف خاک هستند. براین‌اساس کمیت خدمت بوم‌شناختی پیشگیری از انتقال رسوب در بازه ۳۳۱۰–۱٦۱۹٦ تن در سال در زیرحوضه های محدوده مورد مطالعه برآورد شد. این مقدار برای خدمت بوم شناختی پیشگیری از فرسایش نیز در طیفی از ۲۰۳۸۲–۳۸ تن در سال برآورد شد.

نتایج نهایی حاصل از مدل‌سازی خدمات مورد نظر در محدوده مورد مطالعه در قالب جدول ٤ ارائه شده است. بر این اساس،کمیت دو خدمت بوم شناختی ممانعت از ورود رسوب به منابع آبی و اجتناب از فرسایش خاک به واسطه پوشش گیاهی به ترتیب معادل ٤۸۹۳۷ و ٤۲۱۱۲ تن درسال است که نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه پوشش گیاهی در حفاظت از منابع آب و خاک در این محدوده است.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]



شکل ٤. خروجی های نهایی حاصل از اجرای مدل InVEST SDR در محدوده مورد مطالعه: پیشگیری از انتقال رسوب بر حسب تن در پیکسل (الف)، پیشگیری از فرسایش بر حسب تن در پیکسل (ب)، پیشگیری از انتقال رسوب بر حسب تن در زیر حوضه (ج) و پیشگیری از فرسایش بر حسب تن در زیر حوضه (د).

جدول ٤. خلاصه‌ای از خروجی‌های مدل InVEST SDR برای هر یک از زیرحوضه‌ها (تن/سال)

کد زیرحوضه	انباشت رسوب	انتقال رسوب	کل اتلاف خاک	اجتناب صدور	اجتناب فرسایش
١	١٩٣٩٢/٠٤	٢١١٧/٨٥	١٧٣٩٩/٦٧	١٥٥٦٨/٩٥	١٠٧٥٣/٦٨
٢	٢٠٤٧٧/٢١	٢٣٠٨/٧٧	٢٠٦٩٨/٣٠	١٦١٩٦/٦١	٨٧٧٧/٦٤
٣	٧٧٧٩/٧٩	٣٦/٧٧	٢٥٢/٣٤	٥٦٤٦/٠٥	٣٨/٨٤
٤	٤١٧١/٩٣	٤٤٤/٤٠	٤٩٥٩/٦٢	٣٣١٠/٤٥	٢١٥٨/٦٥
٥	٩٠٠١/٦٧	٨١١/٢١	٨٦٨٧/٥٥	٨٢١٥/٤٧	٢٠٣٨٢/٦٢
جمع	٦٠٨٢٢/٦٥	٥٧١٩/٠٢	٥١٩٩٧/٤٨	٤٨٩٣٧/٥٤	٤٢١١١/٤٨

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

جدول ۵. برآورد ارزش اقتصادی خدمت پیشگیری از انتقال رسوب در زیر حوضه‌های محدوده مورد مطالعه

کد زیرحوضه	مساحت زیرحوضه (هکتار)	انتقال رسوب اجتناب شده بر حسب تن در هریک از زیرحوضه‌ها	ارزش خدمت پیشگیری از انتقال رسوب اجتناب شده (ریال)	ارزش خدمت پیشگیری از انتقال رسوب (ریال / هکتار)
۱	۲۳۸۹۳/۸٤	۱۵۵٦۸/۹۵۲	٦۲۵٤۵٦٦۵۱۵۵/٦	۲٦۱۷٦٤۸/۱۱
۲	۳۵۷۸۵/۷۹	۱٦۱۹٦/٦۱۱	٦۵۰٦۷۱۸۱٤۵۲/۵	۱۸۱۸۲٤۰/۷٤
۳	۱۰٦۵۲۹/۸۰	۵٦٤٦/۰۵۱	۲۲٦۸۲۰٦٦۲۸٦/۸	۲۱۲۹۱۷/۵۷
٤	۱۱۳۹۳/۸۵	۳۳۱۰/٤۵۰	۱۳۲۹۹۱۷۸۹۱۵/۸	۱۱٦۷۲۲٤/۳۳
۵	۲۰۳۹۳/۰۳	۸۲۱۵/٤۷۸	۳۳۰۰٤۳۱۰۰٦۲/۸	۱٦۱۸٤۱۱/۲۹
جمع	۱۹۷۹۹٦/۳۱	٤۸۹۳۷/۵٤۲	۱۹٦۵۹۸٤۰۱۸۷۳/۵	۹۹۲۹۳۹/۷۲

برآورد ارزش اقتصادی خدمات پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش خاک

ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت بوم شناختی پیشگیری از انتقال رسوب با استفاده از روش هزینه خسارت اجتناب شده و انتقال منفعت انجام شده است. ابتدا با استفاده از یافته‌های مطالعه ای با عنوان "ارزیابی هزینه‌های حذف رسوبات از مخازن آبی در اتحادیه اروپا"، میانگین هزینه‌های تخمین حذف رسوبات در اتحادیه اروپا و سوییس به دلار برای سال ۲۰۲۳ با استفاده از محاسبه گر نرخ تورم آمریکا به روزرسانی شد و ۲٤ دلار به ازای هر مترمکعب برآورد گردید. سپس این ارزش منتقل شده با استفاده از روش استانداردسازی سطح قیمت برای کشور تعدیل و استانداردسازی گردید. به طوریکه هزینه حذف رسوبات، ۱۳/۱ دلار (٦۰۲٦۰۰۰) به ازای هر مترمکعب تخمین زده شد. از آنجاییکه یک مترمکعب وزن خاک به طور متوسط معادل۱.۵ تن می‌باشد، لذا در محدوده مورد مطالعه هزینه حذف رسوبات یک تن خاک معادل ٤۰۱۷۳۳۳/۳۳ ریال برآورد گردیده است. بنابراین ارزش کل خدمت پیشگیری از انتقال رسوب در زیر حوضه‌های محدوده مورد مطالعه (حرای خورخوران و قشم)، ۱۹٦۵۹۸٤۰۱/۸۷ میلیون ریال (۱۹٦/٦ میلیارد تومان) برآورد گردیده است. جدول ۵ برآورد ارزش اقتصادی خدمت پیشگیری از انتقال رسوب را در زیر حوضه‌های محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد.

در این تحقیق همچنین، برای تعیین ارزش اقتصادی حفاظت خاک (پیشگیری از فرسایش)، از روش هزینه جایگزینی مواد مغذی (Nutrients Replacement Cost Method, NRCM) استفاده شد. حاصلخیزی خاک به توانایی آن در تأمین شرایط رشد گیاهان گفته می‌شود و می‌توان آن را به تأمین نیاز به مواد مغذی نیتروژن (N)، فسفر (P)، و پتاسیم (K) تعریف کرد. روش هزینه جایگزینی، مواد مغذی هزینه خرید کود شیمیایی لازم برای احیای خاک فرسوده را محاسبه می‌کند. این هزینه‌ها بر اساس تخلیه مواد مغذی مذکور و قیمت خرده‌فروشی کود شیمیایی برآورد شد. سپس با تعیین میانگین غلظت ذرات مغذی خاک محدوده مطالعه با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده در استان هرمزگان (بر اساس واحد ppm یا mg/kg) تعیین ارزش ریالی یک میلی‌گرم از ذرات مغذی بر اساس قیمت کودهای فسفر، ازت و پتاس (ریال/میلی‌گرم)، تعیین قیمت یک کیلوگرم از خاک بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده (ریال/کیلوگرم) و در نهایت محاسبه میانگین وزنی ارزش یک کیلوگرم خاک (ریال)، ارزش هر تن خاک بر اساس مواد مغذی ۱۰۳۰ ریال برآورد شد. سپس با ضرب این مقدار در نقشه خاک، ارزش کل خدمت پیشگیری از فرسایش خاک در محدوده مورد مطالعه برابر با ٤۳۳۷٤/۷۹ میلیون ریال (٤۳/۳۷ میلیارد تومان) برآورد گردید.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

جدول ٦. برآورد ارزش اقتصادی خدمت پیشگیری از فرسایش خاک در زیر حوضه‌های محدوده مورد مطالعه

کد زیرحوضه	مساحت زیرحوضه (هکتار)	فرسایش اجتناب شده (تن در زیرحوضه)	ارزش خدمت پیشگیری از فرسایش خاک (ریال)	ارزش خدمت پیشگیری از فرسایش خاک (ریال / هکتار)
١	٢٣٨٩٣/٨٤	١٠٧٥٣/٦٨١	١١٠٧٦٢٩١١٣١/٢	٤٦٣٥٦٢/٦٢
٢	٣٥٧٨٥/٧٩	٨٧٧٧/٦٤٥	٩٠٤٠٩٧٤٦٦٣/٠٣	٢٢٢٦٤١/٤٧
٣	١٠٦٥٢٩/٨٠	٣٨/٨٤٤	٤٠٠٠٩٥٧٩/٧٨	٣٧٥/٥٧
٤	١١٣٩٣/٨٥	٢١٥٨/٦٥٣	٢٢٢٣٤١٢٣٢٨/٧٧	١٩٥١٤١/٤٤
٥	٢٠٣٩٣/٠٣	٢٠٣٨٢/٦٢٦	٢٠٩٩٤١٠٤٦٣٢/١	١٠٢٩٤٧٤/٥١
جمع	١٩٧٩٩٦/٣١	٤٢١١١/٤٥	٤٣٣٧٤٧٩٢٣٣٤/٨٨	٢١٩٠٦٨/٦٩

برآورد ارزش اقتصادی خدمت پیشگیری از فرسایش خاک به تفکیک زیر حوضه‌های محدوده مطالعاتی در جدول ٦ نشان داده شده است.

بحث

در مقایسه نتایج تحقیق حاضر با مطالعات پیشین، مشاهده می‌شود که مقادیر گزارش‌شده در زمینه انتقال رسوب، انباشت رسوب و فرسایش خاک تفاوت‌هایی دارند که ناشی از ویژگی‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی و دیگر عوامل محیطی است. در تحقیق حاضر، میزان انتقال سالیانه رسوب در محدوده ٠ تا ١٠٠ تن در هکتار (با میانگین ٠/٥٠٨ تن در هکتار) برآورد شده است، که این مقدار در مقایسه با نتایج برخی از مطالعات دیگر، نظیر مطالعه آبیسینقا و همکاران (٢٠٢٤) که میانگین انتقال رسوب در آن ٠/١٨ تن در هکتار است (١)، بالاتر قرار دارد. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ویژگی‌های توپوگرافی، بارش و نوع پوشش گیاهی متفاوت در مناطق مختلف باشد.

نتایج مطالعه حاضر در خصوص انباشت رسوب با میانگین ٢/٧٦ تن در هکتار در محدوده خورخوران با نتایج مطالعه گاشاو و همکاران (٢٠٢١) در زیرحوضه کوگا (٦ تن در هکتار) (١٥) مقایسه شد. اگرچه این دو مقدار از نظر عددی تفاوت دارند، اما به‌طور کلی نشان‌دهنده روند مشابهی در فرآیندهای انباشت رسوب در مناطق مختلف هستند. در هر دو مطالعه، انباشت رسوب بیشتر در مناطق با شیب‌های ملایم و کاهش سرعت جریان آب مشاهده شده است که به تثبیت رسوب کمک می‌کند. این مقایسه نشان‌دهنده کارایی مشابه اکوسیستم‌ها در تثبیت رسوب در مناطق مختلف جغرافیایی است، اگرچه عواملی مانند ویژگی‌های منطقه‌ای و شرایط اقلیمی می‌توانند تأثیرات قابل‌توجهی بر این مقادیر داشته باشند.

با توجه به تفاوت قابل توجه در مقادیر فرسایش خاک برآورد شده، نتایج تحقیق حاضر که میزان فرسایش خاک را به طور میانگین ٤/٦١ تن در هکتار برآورد کرده است، در مقایسه با مطالعه گاشاو در زیرحوضه کوگا که مقدار فرسایش خاک را ٢٧/٣ تن در هکتار گزارش کرده (١٥)، نشان‌دهنده تفاوت‌هایی در شدت فرسایش خاک در این دو منطقه است. این تفاوت می‌تواند علاوه بر عوامل محیطی، ناشی از نوع کاربری اراضی متفاوت در این دو منطقه باشد. به طور خاص، مطالعه گاشاو در نواحی با شیب‌های بیشتر و شرایط کشاورزی ممکن است باعث تشدید فرسایش خاک شده باشد. در حالی که منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر با ویژگی‌های خاص خود، همچون شیب‌های ملایم‌تر و پوشش گیاهی حرا، مقادیر کمتری از فرسایش خاک را نشان می‌دهد. این یافته‌ها بر اهمیت توجه به شرایط محیطی و مدیریتی در ارزیابی دقیق‌تر فرسایش خاک و ارائه راهکارهای حفاظتی تأکید دارد.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

علاوه بر این، در تحقیق حاضر، تأثیر پوشش گیاهی در کاهش فرایندهای فرسایش و انتقال رسوب به‌وضوح مشهود است. این نتایج مشابه با مطالعات دیگر است که نشان‌دهنده اهمیت پوشش گیاهی در کنترل فرسایش و تثبیت رسوب هستند. برای مثال، در مطالعه مرج و همکاران (۲۰۲۲) در هیمالیا (۲۷)، اکوسیستم‌های طبیعی مانند جنگل‌ها و تالاب‌ها، به‌طور مؤثری رسوب را کاهش داده و کیفیت آب را بهبود می‌بخشند. این نتایج تأکید می‌کند که پوشش گیاهی می‌تواند نقش حیاتی در مدیریت منابع خاک و آب ایفا کند و در کاهش هزینه‌های ناشی از فرسایش و انتقال رسوب کمک کند.

در نهایت، کمیت خدمات اکوسیستمی پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش در این تحقیق در مقیاس زیرحوضه‌ای به‌طور دقیق ارزیابی شده است. مقادیر گزارش‌شده برای خدمات پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش در تحقیق حاضر مشابه با مطالعات دیگر است، اما همچنان ممکن است به‌واسطهٔ تفاوت‌های محیطی و خصوصیات خاص هر منطقه متفاوت باشد. به‌طورکلی، نتایج این تحقیق و مقایسه آن با مطالعات پیشین نشان‌دهنده اهمیت مدل SDR به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی فرایندهای انتقال رسوب، انباشت و تثبیت آن در مناطق مختلف جغرافیایی است. بدیهی است که پس از انجام این شبیه‌سازی‌ها، امکان تعیین کمیت و نقشه‌سازی دو خدمت بوم‌شناختی پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش خاک به‌نحوی‌که در این مقاله تشریح شد فراهم می‌گردد که یک روش بسیار مناسب برای استفاده از نتایج آن در فرایند ارزش‌گذاری اقتصادی این خدمات است.

استفاده از مدل SDR InVEST در برآورد فرسایش، انتقال رسوب و خدمات اکوسیستمی مرتبط، در حالی که ارزشمند است، با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. یکی از محدودیت‌های اصلی آن وابستگی به فرضیات ساده‌سازی‌شده درباره ویژگی‌های سرزمین، مانند یکنواختی در خصوصیات خاک و پوشش گیاهی است که ممکن است به‌طور دقیق تنوع پیچیده محیط‌های واقعی را منعکس نکند (٦). علاوه بر این، خروجی‌های مدل به شدت به کیفیت و وضوح داده‌های ورودی، از جمله الگوهای بارش، توپوگرافی، فرسایش پذیری خاک (عامل K)، فرسایندگی باران (عامل R) و کاربری اراضی حساس است. داده‌های نادرست یا با وضوح پایین می‌توانند منجر به نتایج جانبدارانه شوند، به‌ویژه در مناطقی که سیمای سرزمینی غیر همگنی دارند. محدودیت دیگر این است که مدل تأثیرات پویا و تعاملی شیوه‌های مدیریت زمین، مانند چرخش محصول یا چرا، را که می‌توانند به‌طور قابل توجهی نرخ‌های فرسایش و دینامیک رسوب را تغییر دهند، به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرد (۳٦). با وجود این محدودیت‌ها، مدل InVEST SDR مزایای قابل توجهی در ارزیابی خدمات اکوسیستم مرتبط با خاک دارد. این مدل ابزاری قدرتمند برای کمی‌سازی و نقشه‌برداری خدمات اکوسیستمی (۲۱)، مانند تثبیت رسوب و کنترل فرسایش، به روشی فضایی و مقیاس‌پذیر را فراهم می‌آورد. این مدل در مطالعات متعدد در سطح جهانی به‌طور موفقیت‌آمیز به کار رفته است و قابلیت اثربخش آن را در کمک به تصمیم‌گیرندگان برای درک و مدیریت خدمات اکوسیستمی مرتبط نشان داده شده است.

بر اساس نتایج نهایی این تحقیق، ارزش اقتصادی سالانه خدمات اکوسیستمی پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش خاک در زیرحوضه‌های خورخوران و قشم به ترتیب معادل ۱۹٦/٦ و ٤۳/۳۷ میلیارد تومان برآورد گردید. مجموع این دو خدمت اکوسیستمی، به ارزش ۲۳۹/۹۷ میلیارد تومان در سال می‌رسد که نشان‌دهنده اهمیت این خدمات در حفظ خاک و کاهش هزینه‌های ناشی از تخریب آن است. این برآورد اقتصادی نشان می‌دهد که هرگونه اتلاف این خدمات می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری در زمینه کاهش حاصلخیزی خاک و افزایش هزینه‌های احیای آن گردد. در صورت از دست رفتن این خدمات، هزینه‌های قابل توجهی برای جبران آن و حفظ عملکرد اکوسیستم‌ها صرف خواهد شد. این نتایج به‌ویژه در مناطق با حساسیت بالا نسبت به فرسایش خاک و انتقال رسوب، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از مدل InVEST SDR برای برآورد خدمات بوم‌شناختی پیشگیری از انتقال رسوب و فرسایش خاک در زیرحوضه‌های خورخوران و قشم ابزاری مؤثر برای کمی‌سازی و نقشه‌برداری این خدمات است. ارزش اقتصادی این خدمات نیز نشان‌دهنده اهمیت آن‌ها در کاهش هزینه‌های ناشی از فرسایش و کاهش حاصلخیزی خاک است. این نتایج تأکید می‌کند که حفاظت از این خدمات نه‌تنها از نظر زیست‌محیطی بلکه از منظر اقتصادی نیز ضروری است و می‌تواند از هزینه‌های گزاف برای احیای خاک جلوگیری کند.

برای بهبود دقت و قابلیت استفاده از این مدل در مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود که به جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تری از ویژگی‌های محلی و شرایط زیست‌محیطی توجه شود. همچنین، استفاده از مدل‌های ترکیبی که بتوانند تأثیرات تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی را شبیه‌سازی کنند، می‌تواند به‌دقت پیش‌بینی‌ها افزوده و کارایی مدل را در ارزیابی خدمات بوم‌سازگان بهبود بخشد. علاوه بر این، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی و ارزیابی اثرات آن‌ها در بهبود وضعیت فرسایش و انتقال رسوب، می‌تواند به شناسایی راهکارهای مناسب برای حفاظت از خاک و منابع آبی در آینده کمک کند.

در نهایت، نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری برای سیاست‌گذاران و مدیران محیط‌زیست در جهت اجرای راهکارهای حفاظتی مؤثر در مقابله با فرسایش خاک و حفاظت از منابع طبیعی در مناطقی با حساسیت بالا نسبت به تخریب خاک و آلودگی منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله از یک طرح پژوهشی که توسط دفتر حفاظت از زیست‌بوم‌ها و سواحل دریایی سازمان حفاظت محیط‌زیست حمایت شده است، مشتق شده است. بدین‌وسیله از حمایت‌های آن دفتر تشکر و قدردانی می‌نماییم.

منابع

1. Abeysingha, N. S., Padminda, H. B. G. D. M., Amarasekara, T., Ray, R. L. and Samarathunga, D. K. 2025. The use of InVEST-SDR model to evaluate soil erosion and sedimentation in the closer catchment of a proposed tropical reservoir in Sri Lanka. *International Journal of Sediment Research* 40: 253–268.
2. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 73–89.
3. Bhattarai, R. and Dutta, D. 2007. Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS at catchment scale. *Water Resources Management* 21(10): 1635–1647.
4. Borselli, L., Cassi, P. and Torri, D. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena* 75(3): 268–277.
5. Chen, W., Li, J., Yang, X., Zhao, Y. and Han, Y. 2023. Spatiotemporal changes in soil erosion and sediment retention in the Qinghai Lake Basin. *Science of the Total Environment* 894: 164842.
6. Cinco-Castro, D., Flores-Verdugo, F., Herrera-Silveira, J. A. and Flores de Santiago, F. 2022. Organic carbon accumulation in mangrove soils: role in climate change mitigation. *Ecological Indicators* 139: 108904.
7. Costanza, R. 2020. The value of ecosystem services: A new approach to economic valuation. *Ecological Economics* 169: 106554.
8. Dashtbozorgi, F., Hedayatiaghmashhadi, A., Dashtbozorgi, A., Ruiz–Agudelo, C. A., Fürst, C., Cirella, G.T. and Naderi, M. 2023. Ecosystem services valuation using InVEST modeling: Case from southern Iranian mangrove forests. *Regional Studies in Marine Science*, 60: 102813.
9. Debie, A. and Awoke, A. 2024. Modeling of soil erosion using InVEST SDR model in upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment* 10: 311–325.
10. Desmet, P. J. J. and Govers, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51(5): 427–433.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

11. Douglas-Mankin, K. R., Srinivasan, R. and Arnold, J. G. 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: current developments and applications. *Transactions of the ASABE* 53(5): 1423–1431.
12. Flanagan, D. C., Gilley, J. E. and Franti, T. G. 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASABE* 50: 1603–1612.
13. Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M. and Worqlul, A. 2021. Evaluation of soil erosion risk and sediment yield in the Koga watershed, upper Blue Nile basin. *Environmental Earth Sciences* 80(6): 1–14.
14. Gijsman, R. K., van der Werf, G. R. and Verburg, P. H. 2024. Coastal ecosystems and sea-level rise: Sediment retention capacity of mangroves. *Nature Climate Change* 14: 215–222.
15. Hiederer, R. 2013. Mapping soil properties for Europe–spatial representation of soil database attributes. Available online at http://publications.jrc.ec.europa.eu. Accessed 11 September 2025.
16. Jafari Takhtinajad, R., Abbaspour, M. and Rajabifard, A. 2019. Impact of land use changes on sediment retention service. *Environmental Monitoring and Assessment* 191(2): 77.
17. Jian, X., Wang, L. and Zhao, Q. 2024. Economic valuation of sediment retention ecosystem services in river basins. *Journal of Environmental Management* 341: 117041.
18. Kabolizadeh, M., Rangzan, K. and Mohammadi, S., 2023. Estimation of soil erodibility (k-factor) in Iran using SoilGrids and HWSD spatial databases. *Watershed Management Research*, 36(1): 13-33. (In Persian).
19. Karunaratne, S. B., Jayasinghe, R. P., Dissanayake, H. A. and Amarasiri, S. L. 2022. Assessment of soil erosion risk using InVEST SDR in agricultural landscapes of Sri Lanka. *Land Degradation & Development* 33(3): 540–553.
20. Koetse, M. J., Brouwer, R. and van Beukering, P. 2015. Economic valuation of ecosystem services in environmental policy. *Ecological Economics* 118: 10–21.
21. Kondolf, G. M. and Piégay, H., 2016. Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK.
22. Kubiszewski, I., Costanza, R. and Dorji, L. 2020. The value of ecosystem services in Bhutan. *Ecological Economics* 169: 106504.
23. Liu, Y., Wang, R., Yang, J. and Bai, Y. 2021. Ecosystem service functions of vegetation in controlling soil erosion. *Journal of Cleaner Production* 295: 126408.
24. Lu, H., Moran, C. J. and Prosser, I. P. 2005. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. *Environmental Modelling & Software* 20(6): 679–689.
25. Marques, S. M., Campos, F. S., David, J. and Cabral, P. 2021. Modelling sediment retention services and soil erosion changes in Portugal: A spatio-temporal approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4): 262.
26. Meraj, G., Farooq, M., Singh, S. K., Islam, M. N. and Kanga, S. 2022. Modeling the sediment retention and ecosystem provisioning services in the Kashmir valley, India, Western Himalayas. *Modeling Earth Systems and Environment* 8: 3859–3884.
27. Morgan, R. P. C, 2009. *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons. Chichester, UK.
28. Nachtergaele, F., van Velthuizen, H., Verelst, L., Batjes, N., Dijkshoorn, K., van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L. and Petri, M. 2010. Harmonized world soil database. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, 34–37.
29. Ougougdal, H. A., Khebiza, M. Y., Messouli, M. and Bounoua, L. 2020. Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: A case study of the Ourika watershed, Morocco. *Scientific African* 10: e00646.
30. Padminda, H. B. G. D. M., Abeysingha, N. S., Amarasekara, T., Ray, R. L. and Samarathunga, D. K. 2025. The use of InVEST-SDR model to evaluate soil erosion and sedimentation in the closer catchment of a proposed tropical reservoir in Sri Lanka. *International Journal of Sediment Research* 40: 253–268.
31. Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C. and Chattopadhyay, N. 2017. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports* 7: 4175.
32. Petsch, D. K., Silva, D. M. L. and Ortega, J. C. G. 2023. Sediment retention services of forested riparian zones in tropical watersheds. *Ecological Indicators* 153: 110448.
33. Raihan, A. 2023. A review on the integrative approach for economic valuation of forest ecosystem services. *Journal of Environmental Science and Economics* 2: 1–18.
34. Rankinen, K., Granlund, K., Etheridge, R. and Seuri, P. 2014. Valuation of nitrogen retention as an ecosystem service on a Finnish agricultural catchment. *Agricultural Systems* 129: 17–25.
35. Renard, K.G. 1995. Predicting Soil Erosion by Water; A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook, 703, pp.367.
36. Sánchez-Núñez, D. A., Mancera-Pineda, J. E. and Aguirre-León, A. 2019. Mangrove root structure and sediment retention: Implications for coastal protection. *Ocean & Coastal Management* 174: 70–79.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

37. Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., and Douglass, J. 2014. InVEST user's guide. The Natural Capital Project. Available online at http://www.naturalcapitalproject.org/InVEST.html. Accessed 11 September 2025.
38. Treitz, P. and Rogan, J. 2004. Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning* 61(4): 269–310.
39. Vigiak, O., Bouraoui, F., Grizzetti, B., de Roo, A. and La Notte, A. 2012. Dynamic assessment of water erosion risk using scenario analysis in the European Union. *Environmental Science & Policy* 19–20: 75–89.
40. WisWischmeier, W. H. and Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No. 537. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. USA.
41. Wrb, I.W.G. 2006. World reference base for soil resources. World soil resources reports, 103, pp.1-128.
42. Zhou, Y. and Li, X. 2020. Calculation of slope length factor for RUSLE using GIS and digital elevation model. *Environmental Modelling & Software* 124: 104608.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]

IJAE
Iranian Journal of Applied Ecology

Assessment and Economic Valuation of Ecosystem Services for Soil Erosion Prevention and Sediment Retention in the Khorkhoran International Mangrove Wetland

Ardavan Zarandian [1*], Majid Ramezani Mehrian [2], Fatemeh Mohammadyari [3], Roya Mousazadeh [3] and, Nasrin Azizi [5]

(Received: April 17-2025; Accepted: June 15-2025)

Abstract

Mangrove ecosystems play a crucial role in reducing soil erosion and retaining sediment. This study evaluates and economically values the ecosystem services related to prevention of soil erosion and sediment transfer in the Khorkhoran International Mangrove Wetland in Hormozgan province. The SDR model (from the InVEST suite) and the RUSLE equation was applied to simulate the spatial distribution of erosion, sediment accumulation, and retention. The modeling results showed that annual soil loss in the study area ranged from 0 to 350 tons per hectare, with the potential to increase up to 430 tons per hectare in the absence of vegetation cover. The findings indicated that vegetation prevents approximately 42,112 tons of soil erosion and 48,937 tons of sediment transfer to water bodies annually. The economic value of these services was estimated at 43.37 billion IRR for soil erosion prevention and 196.6 billion IRR for sediment transfer prevention, totaling approximately 240 billion IRR annually. These results emphasize the importance of preserving vegetation cover in natural resource management and suggest the SDR model as an effective tool for quantitative assessment and mapping distribution of the ecosystem services in question.

Keywords: Modeling, RUSLE equation, Service mapping, Soil conservation, InVEST SDR model, Cost replacement method

1. Research Group of Environmental Assessment and Risk, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran.
2. Department of Environmental Studies, The Institute for Research and Development in the Humanities (SAMT), Tehran, Iran.
3. Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
4. Research Group of Environmental Economics, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran.
5. Group of Aquatic Habitats, Office for the Protection of Ecosystems and Marine Coasts, Department of Environment, Tehran, Iran.
6. * Corresponding Author, Email: zarandian@gmail.com

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-06-02]

[DOI: 10.47176/ijae.13.4.15401]