



ارزیابی و ارزشگذاری خدمت اکوسیستمی تثبیت مواد مغذی در تالاب بین‌المللی حرای خورخوران با استفاده از مدل InVEST NDR و روش هزینه اجتناب شده

اردوان زرندیان^{۱*}، رویا موسی زاده^۲، مجید رضانی مهران^۳، فاطمه محمدیاری^۴، محمد صادق صبا^۵،
سیده مهتاب شجاعی لنگری^۶

- ۱- گروه پژوهشی ارزیابی و مخاطرات محیط‌زیستی، پژوهشکده محیط‌زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران
- ۲- گروه پژوهشی اقتصاد محیط‌زیست، پژوهشکده محیط‌زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران
- ۳- گروه مطالعات محیطی، پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی (سمت)، تهران، ایران
- ۴- گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
- ۵- دفتر حفاظت از زیست بوم‌ها و سواحل دریایی، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران
- ۶- گروه بیولوژی دریا، دفتر حفاظت از زیست بوم‌ها و سواحل دریایی، سازمان حفاظت محیط‌زیست، تهران، ایران

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	مقدمه: تالاب بین‌المللی حرای خورخوران در سواحل جنوبی ایران، نقش مهمی در جذب و تثبیت مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر دارد که باعث کاهش آلودگی منابع آبی و بهبود کیفیت آب می‌شود. افزایش مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی، ورود فاضلاب‌های شهری و صنعتی و تغییرات کاربری اراضی، فشار زیادی بر این اکوسیستم وارد کرده و موجب افزایش بار مواد مغذی در آب‌های ورودی به تالاب شده است. از این‌رو، کمی‌سازی و ارزش‌گذاری اقتصادی این خدمت اکوسیستمی، برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار تالاب‌ها ضروری است. هدف از این مطالعه ارزیابی کمی میزان تثبیت نیتروژن و فسفر توسط تالاب بین‌المللی خورخوران، نقشه‌سازی توزیع مکانی صدور و تثبیت مواد مغذی و در گام آخر برآورد ارزش اقتصادی این خدمت اکوسیستمی با استفاده از دو روش هزینه اجتناب شده و انتقال ارزش/منفعت می‌باشد.
تاریخچه مقاله:	
دریافت:	۱۴۰۴/۰۱/۲۹
پذیرش:	۱۴۰۴/۰۳/۱۲
کلمات کلیدی:	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، مدل NDR از بسته نرم‌افزاری InVEST برای شبیه‌سازی فرایند انتقال و تثبیت نیتروژن و فسفر در محدوده مطالعاتی به کار گرفته شد. داده‌های ورودی شامل نقشه کاربری، نقشه بارش و رواناب سطحی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و بار مواد مغذی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و شهری بودند. داده‌های ورودی در محیط نرم‌افزار ArcGIS پردازش شده و مدل اجرا شد. در ادامه خروجی‌های مدل شامل نقشه‌های صدور و تثبیت مواد مغذی استخراج شده و مناطق کلیدی تثبیت این عناصر مشخص گردید. سپس با روش هزینه اجتناب‌شده، ارزش اقتصادی خدمت تثبیت مواد مغذی بر اساس هزینه جایگزینی تصفیه این مواد در سیستم‌های مهندسی تصفیه فاضلاب محاسبه شد.
ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستم، تثبیت مواد مغذی، مدل InVEST، NDR، حرای خورخوران	نتایج: نتایج مدل‌سازی نشان داد که تالاب حرای خورخوران سالانه ۸۳۴/۱۸ تن نیتروژن و ۲۴۳/۷۵ تن فسفر را تثبیت می‌کند که از ورود این مواد به منابع آبی و ایجاد مشکلاتی مانند شکوفایی جلبکی جلوگیری می‌کند. همچنین مناطق با پوشش جنگل‌های حرا و باتلاق‌های ساحلی بیشترین نقش را در تثبیت این عناصر داشتند.

در حالی که مناطق کشاورزی و شهری بیشترین صدور مواد مغذی را نشان دادند. مقدار صدور سالانه نیتروژن از محدوده مطالعاتی ۹۰/۵۲ تن و مقدار صدور فسفر ۲۱/۴۸ تن برآورد شد که نشان‌دهنده اثرات منفی کاربری‌های انسانی بر بار مواد مغذی ورودی به تالاب است. نتایج ارزش اقتصادی این خدمت نیز نشان داد که هزینه حذف هر کیلوگرم نیتروژن و فسفر در سیستم‌های تصفیه فاضلاب معادل ۱۲۴۲۰۰۰ و ۶۵۷۸۰۰۰ ریال در سال ۱۴۰۲ برآورد شد. با توجه به میزان تثبیت مواد مغذی، ارزش کل این خدمت در محدوده مطالعاتی معادل ۲۶۳۹۵۰۳ میلیون ریال (معادل ۵۷۳۸۰۵۰ دلار در سال ۲۰۲۳) برآورد شد.

بحث: نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که تالاب حرای خورخوران یک فیلتر طبیعی مؤثر برای کاهش آلودگی منابع آبی است. حفظ و مدیریت این تالاب می‌تواند جایگزین اقتصادی مناسبی برای روش‌های پرهزینه تصفیه فاضلاب باشد. در نتیجه در سیاست‌گذاری‌های مدیریت محیط‌زیستی، توجه به خدمات اکوسیستمی مانند تثبیت مواد مغذی، می‌تواند به بهبود کیفیت آب و کاهش آلودگی کمک شایانی کند. تحلیل‌های دقیق مبتنی بر داده‌های میدانی و مدل‌سازی‌های علمی، نقش تعیین‌کننده‌ای در آشکارسازی ارزش واقعی این خدمات دارند. درک صحیح از پایداری عملکرد اکوسیستم در شرایط اقلیمی گوناگون، بر ضرورت حفاظت هدفمند از تالاب‌های حساس و حیاتی همچون خورخوران تأکید می‌گذارد. این یافته‌ها مبنای مهمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و اقدامات عملی در حوزه حفاظت محیط زیست فراهم می‌کنند.

مقدمه

تالاب‌ها به عنوان اکوسیستم‌های حساس و حیاتی، خدمات ارزشمندی به طبیعت و انسان‌ها ارائه می‌دهند. این خدمات شامل بهبود کیفیت آب، تنظیم منابع آبی، جذب مواد مغذی اضافی، افزایش تنوع‌زیستی و کاهش آسیب‌های ناشی از حوادث طبیعی است. تالاب‌های حرا به‌ویژه در نواحی ساحلی، با ویژگی‌های خاص خود در جذب مواد مغذی و حفاظت از سواحل در برابر فرسایش، اهمیت زیادی دارند. همچنین این اکوسیستم‌ها به‌عنوان پناهگاهی برای گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری عمل کرده و تاب‌آوری محیط‌زیست را در برابر تهدیدات تقویت می‌کنند (An & Verhoeven, 2019). تالاب خورخوران یکی از تالاب‌های مهم و خاص در سواحل جنوبی ایران در استان هرمزگان است که دارای جنگل‌های حرا و زیستگاه‌های حیاتی برای گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری است. این تالاب نقش مؤثری در تنظیم کیفیت آب، تثبیت مواد مغذی و محافظت از سواحل دارد و منبع درآمد و معیشت برای جوامع محلی است. با این حال، تالاب خورخوران با تهدیداتی چون آلودگی، تغییرات اقلیمی و تخریب زیستگاه‌ها روبه‌رو است و حفاظت از آن ضروری است. مواد مغذی با منشاء انسانی شامل منابع نقطه‌ای به عنوان مثال پساب‌های صنعتی یا تخلیه‌های تصفیه خانه آب و منابع غیر نقطه‌ای مانند کودهای

شیمیایی مورد استفاده در کشاورزی هستند. هنگامی که باران یا برف می‌بارد، رواناب حاصله، آلاینده‌ها را از سطوح زمینی به نهرها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها منتقل می‌کند. این آلودگی عواقبی برای مردم دارد که مستقیماً بر سلامت یا رفاه آن‌ها تأثیر می‌گذارد (Keeler et al., 2012) و موجب بروز پیامدهایی برای اکوسیستم‌های آبی است که ظرفیت محدودی برای انطباق با این بارهای مواد مغذی دارند.

تثبیت مواد مغذی یکی از خدمات مهم تالاب‌هاست که می‌تواند به کاهش مشکلات محیط‌زیستی ناشی از مصرف زیاد کودهای شیمیایی در کشاورزی کمک کند. با استفاده بیش از حد از کودها، مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر به آب‌ها وارد شده و باعث آلودگی و رشد بی‌رویه جلبک‌ها می‌شوند (Hopkins et al., 2018). تالاب‌ها، به‌ویژه تالاب‌های حرا، با جذب و تثبیت این مواد اضافی، نقش مهمی در کاهش اثرات آلودگی دارند و از ورود آن‌ها به منابع آب شیرین یا دریا جلوگیری می‌کنند (Mitra, 2020). مدل InVEST NDR ابزاری مؤثر برای مدل‌سازی نحوه انتقال مواد مغذی و ارزیابی خدمت اکوسیستمی تثبیت این مواد توسط پوشش گیاهی طبیعی در سطح حوضه آبخیز است. این مدل به تحلیل تأثیرات تغییرات کاربری اراضی و شبیه‌سازی مناطقی می‌پردازد که بیشترین ظرفیت جذب و تثبیت مواد مغذی را دارند

تحقیق نشان داد که در مناطق کشاورزی، صدور فسفر حدود ۰/۴ کیلوگرم در هکتار در سال و صدور نیتروژن ۱/۲ کیلوگرم در هکتار در سال بود. تغییرات اقلیمی و بارش بالا، صدور این مواد مغذی را افزایش داد و به‌ویژه در مناطقی که پوشش گیاهی ضعیفی داشتند، مقدار آن بیشتر بود (Valladares-Castellanos *et al.*, 2024).

در مطالعه دیگری (Rioux & Strong, 2023)، راهبردهای مدیریت مواد مغذی برای دریاچه اسکینیاتلس با استفاده از این مدل تحت سناریوهای مختلف استفاده از زمین و پوشش گیاهی و تأثیر آن‌ها بر بارگذاری نیتروژن (N) و فسفر (P) در دریاچه ارزیابی شده است. بر اساس نتایج این مطالعه، در صورت اجرای سناریوی توسعه کامل در محدوده‌های ساحلی، بار نیتروژن از ۰/۲ به ۲/۲ کیلوگرم در هکتار در سال و بار فسفر نیز از ۰/۷ به ۰/۴ کیلوگرم در هکتار در سال افزایش می‌باید که نشان دهنده اثر ناشی از انواع کاربری‌های انسانی مانند کشاورزی در افزایش آلودگی ناشی از مواد مغذی است. در یک تحقیق نیز در کشور اتیوپی (Abebe *et al.*, 2025)، تحلیل تغییرات در خدمت اکوسیستمی حفظ مواد مغذی با استفاده از مدل InVEST در حوضه رودخانه گومارا انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که از سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۹، بارگذاری نیتروژن و فسفر در این حوضه نسبتاً ثابت بوده است. اما از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، صدور نیتروژن ۸۰ درصد و فسفر ۶۹ درصد افزایش یافت. بر این اساس بار نیتروژن از ۳۸/۴۵ کیلوگرم در سال به ۶۴ کیلوگرم در سال و فسفر از ۶/۴۵ کیلوگرم به ۹/۹۶ کیلوگرم در سال افزایش یافته است. افزایش این بار مواد مغذی به دلیل تغییرات کاربری زمین، گسترش آبیاری و افزایش بارندگی بوده است.

بر اساس مطالعات فوق‌الذکر و برخی مطالعات معتبر دیگر که در سطح بین‌المللی انجام شده‌اند، مدل InVEST NDR به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای درک دینامیک مواد مغذی در مناطق جغرافیایی مختلف شناخته شده است. کاربردهای آن از ارزیابی‌های مقیاس محلی تا ارزیابی‌های مقیاس ملی را در بر می‌گیرد و به تدوین استراتژی‌های مؤثر مدیریت مواد مغذی و حفظ کیفیت آب کمک می‌کند. برنامه‌ریزان کاربری زمین از سازمان‌های دولتی گرفته تا گروه‌های زیست محیطی به اطلاعاتی در مورد سهم اکوسیستم‌ها در کاهش آلودگی آب نیاز دارند. به

(Abebe *et al.*, 2025). به‌ویژه در مدیریت منابع آبی و ارزیابی اثرات کشاورزی، این مدل می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای حفظ خدمات اکوسیستم استفاده شود. هدف این مقاله تعیین مقدار تثبیت دو ماده مغذی فسفر و نیتروژن توسط اکوسیستم تالابی حرای خورخوران و تهیه نقشه برای این خدمت اکوسیستمی است. با استفاده از مدل InVEST NDR، قصد داریم نشان دهیم که اکوسیستم تالاب خورخوران چگونه می‌تواند این مواد اضافی را جذب و تثبیت کند و کدام نواحی محدوده مطالعاتی این تالاب ظرفیت بیشتری برای این فرآیند دارند. همچنین پس از تعیین کمیت‌های خدمت اکوسیستمی مورد نظر، در گام بعدی، ارزش اقتصادی آن با استفاده از دو روش هزینه اجتناب شده و انتقال ارزش برای محدوده مطالعاتی این تحقیق برآورد می‌گردد. این تحلیل می‌تواند ابزاری برای مدیریت منابع آبی و حفاظت از تالاب در برابر تهدیدات محیط‌زیستی، به‌ویژه آلودگی ناشی از مواد مغذی، باشد.

مدل NDR برای شبیه‌سازی صدور نیتروژن و فسفر در شمال غربی چین در اطراف دریاچه بوستون بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ به کار گرفته شد. در مطالعه Yang و همکاران (۲۰۱۹)، افزایش صدور مواد مغذی در این دوره، به‌ویژه مشاهده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در مناطق کشاورزی و شهری، صدور فسفر حدود ۰/۱۳ کیلوگرم در هکتار در سال و صدور نیتروژن ۰/۳۵ کیلوگرم در هکتار در سال بود. این تحقیق نشان داد که زمین‌های کشاورزی و مناطق شهری سهم زیادی در صدور بالای مواد مغذی دارند، در حالی که مناطق با بارش بیشتر و فعالیت انسانی کمتر صدور کمتری داشتند (Yang *et al.*, 2019).

ارزیابی جامع مدل NDR در حوضه‌های مختلف رودخانه‌ای انگلستان نشان داد که این مدل در پیش‌بینی اندازه نسبی صدور نیتروژن و فسفر کارایی بالایی دارد. طبق تحقیق Redhead و همکاران (۲۰۱۸)، برآورد صدور نیتروژن در مقیاس ملی ۲/۸ کیلوگرم در هکتار در سال و برآورد صدور فسفر ۰/۲۵ کیلوگرم در هکتار در سال بود (Redhead *et al.*, 2018).

Valladares و همکاران (۲۰۲۴) از مدل NDR برای ارزیابی اثرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی بر آلودگی نیتروژن و فسفر در طول دو دهه استفاده کردند. نتایج این

می‌شود. همچنین با افزایش بار مواد مغذی و بروز مشکل پرغذایی مصنوعی، پیامدهایی چون کاهش اکسیژن آب، مرگ و میر آبزیان، آسیب به منابع شیلاتی و گردشگری طبیعی قابل تصور است که این موارد می‌توانند به عنوان هزینه‌های پنهان زیست محیطی دارای هر دو نوع پیامدهای اکولوژیک و اقتصادی باشند (La Notte *et al.*, 2015). بنابراین ارزشگذاری اقتصادی این خدمت، نه تنها به درک بهتر مزیت‌های محیط زیستی تالاب‌ها و اکوسیستم‌های طبیعی کمک می‌کند، بلکه باعث می‌شود این خدمات در تصمیمات اقتصادی و تحلیل هزینه-فایده‌های سیاست‌گذاری‌های محیط زیستی مورد توجه قرار گیرند. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی برای تعیین ارزش اقتصادی خدمت اکوسیستمی تثبیت مواد مغذی انجام شده است. Costanza و همکاران (۱۹۹۷) با در نظر گرفتن ظرفیت فیلتراسیون تالاب‌ها برای مواد مغذی، ارزش این خدمت را تقریباً ۱۰۰۰ دلار به ازای هر هکتار در سال تعیین نموده‌اند (Costanza *et al.*, 1997). این برآورد در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۴ به ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دلار به ازای هر هکتار از تالاب‌ها بر اساس ویژگی‌های اکولوژیک و جغرافیایی آن‌ها افزایش یافته است (Zhang و همکاران, 2014). Zhang و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از روش هزینه جایگزینی ارزش این خدمت را برای هر هکتار از تالاب‌های چین حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ دلار در هر سال تعیین نموده‌اند (Zhang *et al.*, 2007). Barbier و همکاران (۲۰۱۱)، با همین روش، ارزش حدود ۵۰۰ تا ۷۰۰ دلار به ازای هر هکتار در سال برای خدمت تثبیت مواد مغذی توسط جنگل‌های حرا و علف‌های دریایی در اکوسیستم‌های ساحلی منطقه کاراییب تعیین کرده‌اند (Barbier *et al.*, 2011).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تالاب بین‌المللی حرای خورخوران با مختصات جغرافیایی تقریبی ۴۰°۲۶' تا ۱۰°۲۷' عرض شمالی و ۲۰°۵۵' تا ۵۵°۵۰' طول شرقی یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های حرای ایران است. در این تحقیق، محدوده مطالعاتی بر اساس حریم اکولوژیک تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست در یک پروژه مطالعاتی برای این تالاب

طور خاص، آن‌ها به اطلاعات مکانی در مورد انتقال مواد مغذی و مناطق با بالاترین فیلتراسیون نیاز دارند. مدل تحویل و تثبیت مواد مغذی این اطلاعات را برای آلاینده‌های غیر نقطه‌ای فراهم می‌کند.

این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های مشابه، مزایای قابل توجهی از نظر سادگی، کاربردپذیری و یکپارچگی با مدیریت محیط‌زیست دارد. به‌عنوان نمونه، مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) یک مدل هیدرولوژیکی-کشاورزی پیچیده است که برای شبیه‌سازی جریان آب، رسوب، و چرخه مواد مغذی در حوضه‌های وسیع طراحی شده اما نیازمند حجم بالایی از داده‌های اقلیمی، خاک، و عملیات مدیریتی است و به کالیبراسیون دقیق نیاز دارد (Cong *et al.*, 2020). در حالی که InVEST NDR با استفاده از داده‌های پایه مانند مدل ارتفاع رقومی (DEM) و کاربری زمین، بدون نیاز به کالیبراسیون دقیق، نتایج قابل اتکا برای مدیریت منابع فراهم می‌سازد (Redhead *et al.*, 2018).

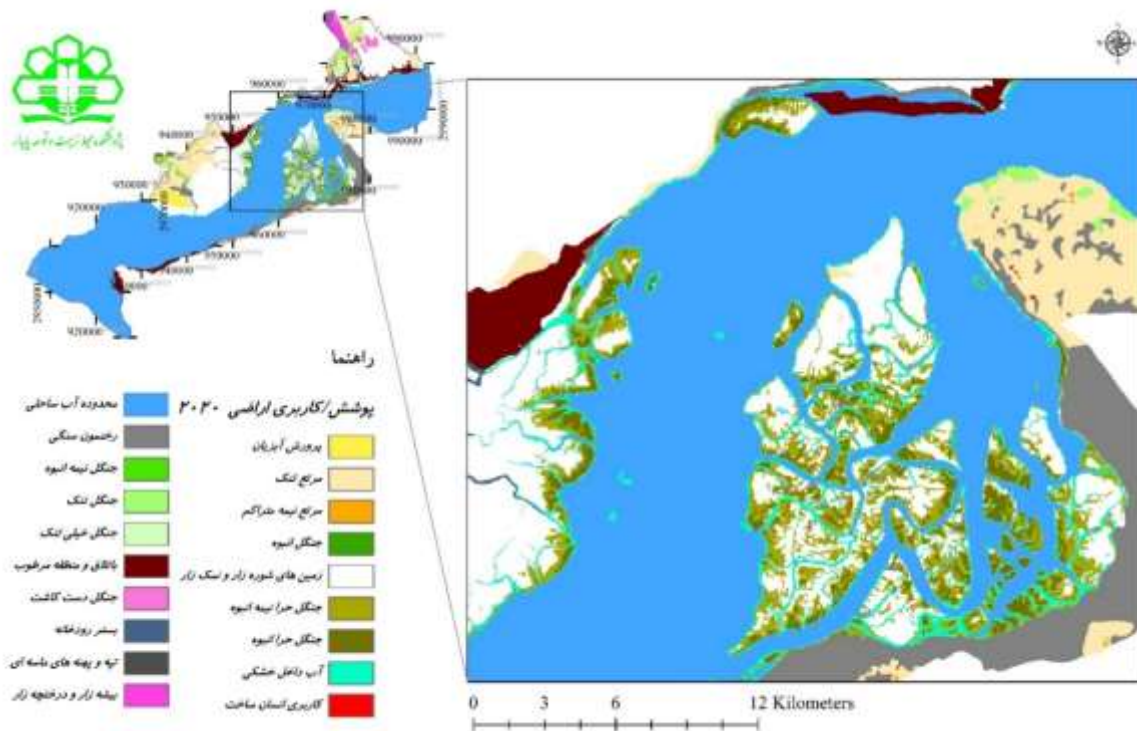
مدل منبع آلودگی نقطه‌ای غیرمستقیم کشاورزی سالانه (AnnAGNPS) نیز بیشتر بر تحلیل منابع آلودگی در اراضی کشاورزی تمرکز دارد و برای برنامه‌ریزی در مزارع مناسب است، اما استفاده از آن در حوزه‌های طبیعی و زیست‌محیطی با محدودیت‌هایی مواجه است. همچنین، مدل رگرسیون مکانی مرجع بر ویژگی‌های حوضه آبریز (SPARROW) با استفاده از داده‌های تجربی و آماری، آلودگی مواد مغذی را در مقیاس‌های بزرگ تحلیل می‌کند، اما فاقد تحلیل عملکرد اکوسیستمی مستقیم است. در مقابل، InVEST NDR به‌طور خاص برای نمایش خدمات تثبیت مواد مغذی در چشم‌اندازهای طبیعی طراحی شده است (Paná *et al.*, 2024, Redhead *et al.*, 2018).

در مجموع، InVEST NDR با فراهم‌سازی تعادلی مناسب میان دقت، سادگی و ارتباط با خدمات اکوسیستمی، گزینه‌ای مناسب برای تحلیل نقش طبیعت در کنترل آلودگی و تصمیم‌گیری‌های مدیریت منابع طبیعی محسوب می‌شود (Cong *et al.*, 2020).

از دیدگاه اقتصادی، خدمت اکوسیستمی تثبیت مواد مغذی به دلیل اثر آن در بهبود کیفیت آب، دارای پیامدهای مالی مثبتی است. ورود نیترژن و فسفر اضافی به منابع آبی منجر به افزایش هزینه‌های تصفیه آب شرب

آلاينده‌ها و تغييرات کاربری اراضي قرار دارد که می‌تواند بر توان آن در تثبيت مواد مغذی اثر بگذارد. شکل ۱ محدوده مطالعاتی این تحقيق و طبقات پوشش/ کاربری زمين آن را نشان می‌دهد.

انتخاب شده است. این حريم شامل مناطقی است که بیشترین ارتباط هیدرولوژیک، زیستگاهی و عملکردی را با تالاب دارند و برای حفظ پایداری آن اهمیت ویژه‌ای دارند. تالاب حرای خورخوران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود تحت تأثیر عواملی مانند نوسانات سطح آب، ورود



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقيق)

بیشترین میزان ورود و تثبيت مواد مغذی را شناسایی می‌کند. شاخص کلیدی این مدل، نسبت تحویل مواد مغذی (Nutrient Delivery Ratio) است که نشان می‌دهد چه مقدار از این مواد به منابع آبی منتقل و چه مقدار در مسیر تثبيت می‌شود. جدول ۱ پارامترهای اصلی مورد محاسبه در این مدل را نشان می‌دهد (Salata et al., 2017).

روش پژوهش

مدل InVEST NDR با در نظر گرفتن نوع کاربری اراضي، شیب زمين و فاصله از منابع آبی، مقدار مواد مغذی‌ای که به آب‌های سطحی منتقل یا در اکوسیستم تثبيت می‌شوند را برآورد می‌کند. مدل NDR ابتدا بار مواد مغذی ورودی از منابع مختلف مانند زمین‌های کشاورزی و مناطق شهری را محاسبه کرده و سپس بر اساس توان پوشش گیاهی و خاک در جذب و تثبيت آنها، مناطق با

جدول ۱- پارامترهای مهم محاسباتی در مدل InVEST NDR (منبع: یافته‌های تحقيق)

نام پارامتر	تعريف
بار مواد مغذی	مقدار نیتروژن و فسفر ورودی از منابع مختلف
صدور مواد مغذی	انتقال مواد مغذی تحت‌تأثیر رواناب و شیب و کاربری اراضي
نسبت تحویل مواد مغذی	درصدی از مواد مغذی که به آب‌های سطحی منتقل می‌شود
ظرفیت تثبيت مواد مغذی	توان اکوسیستم در جذب و نگهداشت مواد مغذی تحت‌تأثیر پوشش گیاهی

به آبراهه و مقدار تثبیت شده در هر سلول به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$D_j = L_j \times NDR_j \quad R_j = L_j - D_j \quad (4)$$

که در آن R_j مقدار مواد مغذی تثبیت شده در سلول j (کیلوگرم در سال)، L_j بار مواد مغذی ورودی (کیلوگرم در هکتار در سال) و D_j مقدار مواد مغذی تحویلی از سلول j به آبراهه (کیلوگرم در سال) است.

این محاسبات به مدل امکان می‌دهند تا توزیع مکانی تثبیت و انتقال مواد مغذی را در حوضه‌های آبخیز شبیه‌سازی کرده و به مدیریت بهتر منابع آب و کاهش آلودگی کمک کنند.

داده‌های مورد استفاده

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 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) (Enderle & Weih Jr, 2005) از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در سال ۲۰۲۳ استخراج شد. با توجه به اثر بارش بر تولید رواناب و تأثیر آن بر توزیع مواد مغذی در سطح زمین، نقشه بارش به عنوان پراکسی رواناب مواد مغذی مورد استفاده قرار گرفت. بارندگی و رواناب نقش مهمی در شست‌وشو و جابجایی نیتروژن و فسفر دارند، به طوری که در مناطق با بارش زیاد و شیب تند، احتمال انتقال بیشتر این مواد به منابع آبی وجود دارد، در حالی که در مناطق کم‌شیب با پوشش گیاهی متراکم، بخش بیشتری از آن‌ها تثبیت می‌شود. به منظور تسهیل در تجزیه و تحلیل نتایج و بهبود خوانایی نقشه‌های 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 ویژگی‌های انتقال مواد مغذی را برای هر نوع کاربری زمین مشخص می‌کند. داده‌های کلیدی

نحوه انجام محاسبات کلیدی مدل به منظور شفاف‌سازی درک چگونگی کارکرد مدل در ذیل به طور خلاصه تشریح می‌گردد:

محاسبه بار مواد مغذی (Nutrient Load): بار مواد مغذی برای هر سلول بر اساس نوع کاربری زمین و ضریب بارگذاری آن محاسبه می‌شود (Endreny & Wood, 2003, Heathwaite et al., 2005):

$$L_i = E_i \times A_i \quad (1)$$

که در آن L_i بار مواد مغذی برای کاربری زمین (کیلوگرم در سال)، E_i ضریب بارگذاری مواد مغذی برای کاربری زمین (کیلوگرم در هکتار در سال) و A_i مساحت سلول در نقشه رستری (متر مربع) است.

محاسبه شاخص اتصال (Connectivity Index): شاخص اتصال نشان‌دهنده میزان اتصال هر سلول به شبکه آبراهه و تأثیر آن بر انتقال مواد مغذی است:

$$IC_j = I_n \left(\frac{\sum_{i \in \text{upslope}(j)} (L_i \times e^{-\beta \times d_{ij}})}{L_{j+1}} \right) \quad (2)$$

که در آن IC_j شاخص اتصال برای سلول j ، $\text{upslope}(j)$ مجموعه سلول‌های بالادست مرتبط با سلول j ، L_i بار مواد مغذی در سلول i ، β پارامتر کاهشی که تأثیر فاصله را بر انتقال مواد مغذی نشان می‌دهد و d_{ij} فاصله بین سلول‌های i و j است.

محاسبه نسبت تحویل مواد مغذی (Nutrient Delivery Ratio - NDR): نسبت تحویل مواد مغذی برای هر سلول که بر اساس شاخص اتصال محاسبه می‌شود (Vigiak et al., 2012):

$$NDR_j = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \times (IC_j - IC_0)}} \quad (3)$$

که در آن NDR_j نسبت تحویل مواد مغذی برای سلول j ، α پارامتر تنظیمی مدل که شیب تابع لجستیک را تعیین می‌کند و IC_0 مقدار آستانه شاخص اتصال که در آن نسبت تحویل برابر با ۰/۵ است.

محاسبه تحویل و تثبیت مواد مغذی (Nutrient Delivery and Retention): مقدار مواد مغذی تحویلی

زيرسطحي در انتقال مواد مغذي (به عنوان يك عدد طيفي بين صفر تا يك) است. جدول ۳ داده‌هاي جدول بيوفيزيكي مورد استفاده در اين تحقيق را نشان مي‌دهد كه بر اساس مرور منابع ملي و بين‌المللي درباره مواد مغذي در کاربري‌هاي مختلف اراضي تهيه شده است.

اين جدول شامل بار مواد مغذي (فسفر و نيتروژن) در هر نوع کاربري زمين (بر حسب كيلوگرم در هكتار در سال)، كارايي جذب مواد مغذي توسط انواع پوشش گياهي (به عنوان يك عدد طيفي بين صفر تا يك)، طول بحراني انتقال مواد مغذي (بر حسب متر) و نسبت جريان

جدول ۲- داده‌هاي مورد نياز براي اجراي مدل InVEST NDR در محدوده مورد مطالعه (منبع: يافته‌هاي تحقيق)

داده	فرمت	واحد متریک	توضیح
نقشه مدل رقومي ارتفاع (DEM)	رستري	متر (m)	نقشه ارتفاع از سطح دريا كه براي اطمینان از مسيربایي مناسب جريان آب، مدل رقومي ارتفاع فراتر از مرز زيرحوضه‌هاي آبخيز و بزرگ‌تر از لبه حوضه آبي بریده شد.
نقشه کاربري / پوشش زمين (LULC)	رستري	-	نقشه LULC در اين تحقيق با استفاده از تصاویر ماهواره‌اي مختلف از جمله سنتینل ۲ با قدرت تفكيك ۱۰ متر تهيه شد.
نقشه پراكسي رواناب مواد مغذي	رستري	میلی‌متر (mm)	اين نقشه در واقع همان نقشه پتانسیل رواناب است كه ظرفیت انتقال مواد مغذي به شیب پایین‌دست را نشان مي‌دهد.
نقشه زيرحوضه‌هاي آبخيز	وكتوري	-	نقشه مرز زيرحوضه(ها) كه نتایج مدل بر روی آن تجميع مي‌شود.
جدول بيوفيزيكي	CSV	-	جدولي كه هر كلاس پوشش کاربري زمين را به خواص بيوفيزيكي مربوط به بار و تثبيت مواد مغذي ربط مي‌دهد.
ضرايب عددي	عدد	-	برخي ضرايب عددي از جمله بارگذاري مواد مغذي و ضرايب جذب و انتقال كه به‌صورت عدد صحيح يا نسبت در طيف بين صفر تا ۱ كه در ادامه اين بخش تشریح شده است.

طول بحراني زيرسطحي (Subsurface Critical Length)

طول بحراني كه در آن جذب و فیلتراسيون مواد مغذي در مسيرهاي زير سطحي اتفاق مي‌افتد. مقدار عددي اين پارامتر با توجه به وضعیت شیب محدوده مطالعاتي در اين تحقيق ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. شكل ۲ داده‌هاي ورودی مدل را كه به‌صورت نقشه‌هاي رستري جهت اجرا تهيه شده‌اند نشان مي‌دهد.

اجراي مدل: در گام نهايي، با استفاده از داده‌هاي ورودی تهيه شده، مدل InVEST NDR اجرا شد. سپس خروجي‌هاي حاصل از اجراي مدل در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس مورد تحليل قرار گرفت. خروجی حاصل از اجراي مدل شامل نقشه‌هاي مربوط به مناطقی با بالاترين ظرفیت تثبیت و مناطقی كه بيشتريين مواد مغذي را به منابع آبي منتقل مي‌کنند هستند. اين خروجي‌ها در قسمت بعدي به عنوان نتایج تحقيق مورد تحليل قرار گرفته‌اند.

علاوه بر داده‌هاي جدول بيوفيزيكي، براي اجراي مدل نياز به تنظيم يك‌سري ضرايب عددي است كه شامل موارد ذيل هستند:

آستانه انباشت رواناب (Threshold Flow Accumulation)

اين مقدار، تعيين‌کننده تعداد پيكسلي است كه بايد در نقشه رقومي ارتفاع به هم متصل شوند تا به‌عنوان يك مسير جريان اصلي در نظر گرفته شوند. محدوده عددي اين پارامتر بين ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ است كه اعداد بزرگتر فقط مسيرهاي اصلي را در نقشه مشخص مي‌کنند. در اين تحقيق با توجه به وضعیت توپوگرافي و وضعیت آبراهه‌هاي محدوده مورد مطالعه به صورت آزمون و خطا عدد ۵۰۰ در نظر گرفته شد.

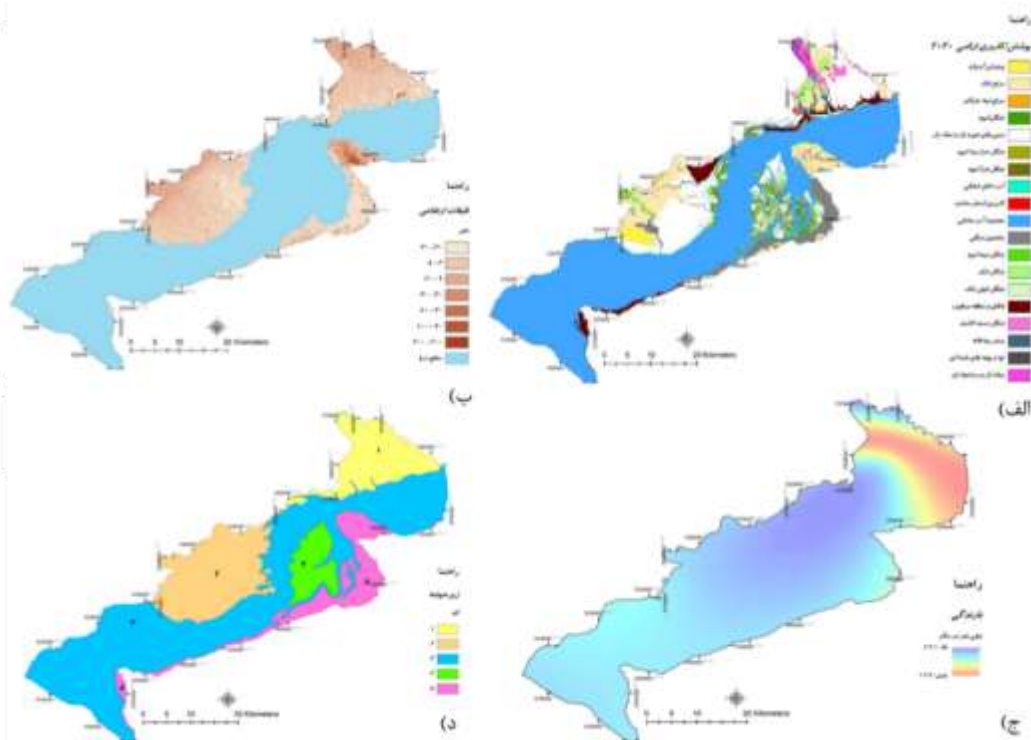
پارامتر K (Borselli K Parameter): اين پارامتر ميزان تأثير شیب و مسافت در کاهش انتقال مواد مغذي را تعيين مي‌کند. در اين تحقيق از مقدار پيش‌فرض مدل (عدد ۲) استفاده شد كه براي مناطق زهكشي طبيعي استفاده مي‌شود.

جدول ۳- داده‌های مورد استفاده در خصوص ویژگی‌های مواد مغذی (نیترژن و فسفر) بر اساس انواع پوشش/کاربری زمین برگرفته از مرور ادبیات موجود (Han et al., 2021, Smith et al., 2017).

طول بحرانی انتقال فسفر (متر)	کارایی جذب فسفر	بار فسفر (کیلوگرم/ هکتار/سال)	طول بحرانی انتقال نیترژن (متر)	کارایی جذب نیترژن	بار نیترژن (کیلوگرم/ هکتار/سال)	نوع پوشش کاربری زمین
۳۰	۰/۵	۱/۵	۱۵۰	۰/۵	۱۱/۵	مرتع و بوته‌زار
۲۰	۰/۷۵	۰/۱۶۲	۳۰۰	۰/۷۵	۱۷/۴	جنگل
۱۵	۰/۵۵	۴/۴۶	۲۵	۰/۵۵	۶۷/۲	کشاورزی
۱۵	۰/۸	۱۵/۶۲	۲۵	۰/۸	۴۰/۷۵	تالاب حرا و باتلاق
۱۵	۰/۰۵	۱	۱۰	۰/۰۵	۱۰	انسان‌ساخت

اضافی مواد مغذی مانند نیترژن و فسفر را فیلتر کند، دولت مجبور خواهد بود با استفاده از روش‌های مهندسی تصفیه فاضلاب یا استفاده از سیستم‌های فیلتراسیون مصنوعی، آلودگی ایجاد شده را رفع کند. در این حالت هزینه‌ای که برای تصفیه آلودگی باید پرداخت شود، برابر با هزینه اجتناب شده‌ای است که تالاب از طریق خدمات اکوسیستمی خود فراهم می‌کند. همچنین روش انتقال ارزش، روش دیگری است که در آن اطلاعات و برآوردهای اقتصادی از مطالعات قبلی برای تعیین ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی در مکان‌ها و زمان‌های مختلف استفاده می‌شود. به عنوان مثال می‌توان از ارزش برآوردی یک خدمت اکوسیستمی تالابی با انجام تعدیلات لازم برای شرایط و ویژگی‌های منطقه جدید استفاده کرد.

روش ارزشگذاری اقتصادی: در این تحقیق برای برآورد ارزش اقتصادی خدمت تثبیت مواد مغذی (فسفر و نیترژن)، از روش هزینه اجتناب‌شده و انتقال ارزش استفاده شد (Rankinen et al., 2014). روش هزینه اجتناب شده یکی از روش‌های ارزشگذاری خدمات اکوسیستمی و آثار محیط زیستی است که بر مبنای میزان هزینه‌هایی که افراد، دولت‌ها یا سازمان‌ها برای اجتناب از پیامدهای منفی زیست محیطی متحمل می‌شوند، ارزش خدمات اکوسیستمی را تخمین می‌زند (Koetse et al., 2015). این روش معمولاً برای ارزشگذاری خدماتی به کار می‌رود که در صورت تخریب اکوسیستم، هزینه‌هایی برای جایگزینی خدمات آن لازم خواهد بود. به عنوان مثال در صورتی که یک تالاب نتواند به دلیل اثرات تخریبی ناشی از دست‌اندازی‌ها و تغییرات انسانی، بار

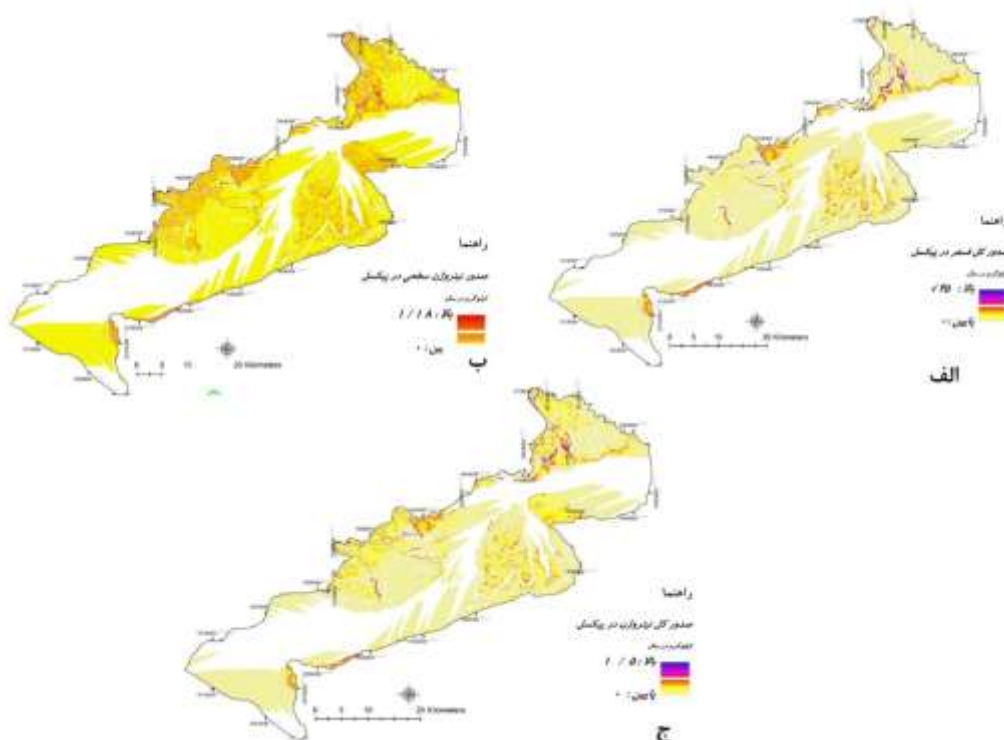


شکل ۲- داده‌های نقشه‌های ورودی مدل InVEST NDR در محدوده مورد مطالعه: الف) نقشه پوشش / کاربری زمین، ب) مدل رقومی ارتفاع، ج) بارش، د) زیرحوضه‌های آبخیز (منبع: یافته‌های تحقیق)

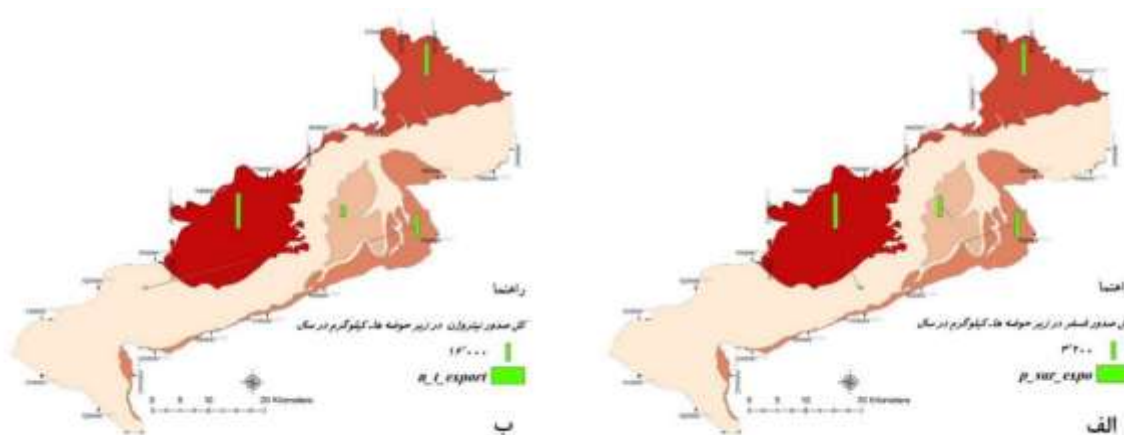
مغذی فسفر و نیتروژن هستند. بر اساس خروجی‌های حاصله از فرایند مدل‌سازی، مقدار کل صدور فسفر و نیتروژن در زیرحوضه‌های مختلف نشان می‌دهد که در زیرحوضه‌های واجد پوشش گیاهی (زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ در شکل ۲-۵) کمیت صدور مواد مغذی مورد نظر کمتر است. به‌ویژه زیرحوضه ۴ که دارای پوشش گیاهی غنی‌تر حرا در مقایسه با سایر زیرحوضه‌هاست، دارای کمترین مقدار صدور مواد مغذی است. سطح زیرحوضه شماره ۳ نیز تقریباً به طور کامل در محدوده آبی دریایی قرار دارد و فاقد محدوده خشکی است و لذا پارامتر صدور مواد مغذی در آن تحت‌تأثیر زیرحوضه‌های هم‌جوار است و از این نظر به‌صورت مستقل قابل تحلیل نیست.

نتایج

مقایسه کارایی مناطق مختلف در کنترل صدور (انتقال) مواد مغذی بر اساس تقسیم‌بندی محدوده مورد مطالعه به زیرحوضه‌ها و متأثر از پوشش گیاهی: مدل InVEST NDR برای تحلیل جریان مواد مغذی از سطح زمین به داخل جریان‌های آبی، از حوضه‌های آبخیز به‌عنوان واحد تحلیل استفاده می‌کند. خروجی‌های وکتوری مدل شامل نقشه‌های کل صدور فسفر و کل صدور نیتروژن هستند که از هریک از زیرحوضه‌های آبخیز بر اساس جریان سطحی چه مقدار از ماده مغذی مورد نظر (بر حسب واحد کیلوگرم در سال) صادر می‌گردد. (شکل ۳ الف، ب و ج). شکل‌های (۴ الف و ب) به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مورد نظر برای دو ماده



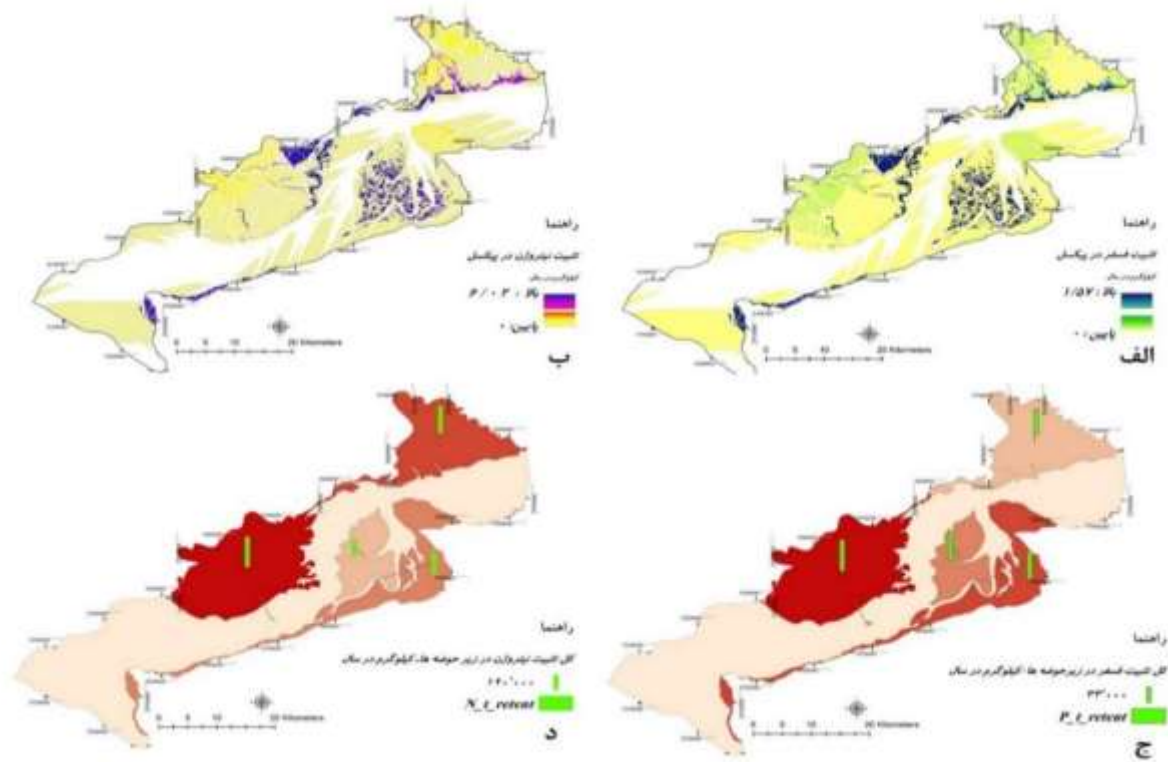
شکل ۳- الف) صدور کل فسفر، ب) صدور سطحی نیتروژن و ج) صدور کل نیتروژن در مقیاس پیکسل (بر حسب کیلوگرم در سال).
(منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۴- الف) کل صدور فسفر در زیرحوضه‌ها، ب) کل صدور نیتروژن در زیرحوضه‌ها (بر حسب کیلوگرم در سال)
(منبع: یافته‌های تحقیق)

می‌گیرد کم کرد که نقشه حاصله نمایش‌دهنده کمیت خدمت تثبیت آن ماده مغذی خواهد بود. این کار در محدوده مورد مطالعاتی این تحقیق برای هر دو ماده نیتروژن و فسفر انجام شد که نتایج آن در دو فرمت رستری و وکتوری در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین کمیت‌های صدور و تثبیت دو عنصر مغذی نیتروژن و فسفر، محاسبه شده توسط مدل مربوط به هر یک از زیرحوضه‌های آبخیز، همگی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

ارزیابی و تحلیل توزیع فضایی خدمت اکوسیستمی تثبیت مواد مغذی: مدل NDR به طور مستقیم مقدار مواد مغذی تثبیت شده در لندسکیپ یا حوضه آبخیز را تعیین نمی‌کند. برای محاسبه کمیت خدمت اکوسیستمی تثبیت مواد مغذی مورد نظر بر اساس توصیه الگوی راهنمای مدل InVEST، می‌توان خروجی پیکسلی صدور کل یک ماده مغذی را از خروجی بار اصلاح شده آن ماده بر اساس پراکسی رواناب مواد مغذی که به‌عنوان یک خروجی جانبی در پوشه خروجی‌های میانی مدل قرار



شکل ۵- خروجی پیکسلی تثبیت فسفر (الف)، پیکسلی تثبیت نیتروژن (ب) تثبیت فسفر در زیرحوضه‌ها (ج) و تثبیت نیتروژن در زیرحوضه‌ها (د) (کیلوگرم در سال) (منبع: یافته‌های تحقیق)

جدول ۴- کمیت متغیرهای مختلف مربوط به محاسبه تثبیت مواد مغذی (صدور^۱ و تثبیت^۲) در هر یک از زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی حرای خورخوران (بر حسب کیلوگرم در سال) (منبع: یافته‌های تحقیق)

کد زیرحوضه	تثبیت نیتروژن	تثبیت فسفر	صدور نیتروژن سطحی	کل صدور نیتروژن	صدور فسفر سطحی
۱	۲۲۴۱۱۷/۱۳۴	۵۴۵۷۴/۲۸۷	۲۸۲۵۰/۰۸۹	۲۸۲۵۲/۷۵۶	۶۰۵۲/۷۱۶
۲	۲۴۹۹۴۸/۸۵۰	۶۶۵۴۳/۱۶۹	۳۱۱۴۸/۸۴۴	۳۱۱۴۸/۸۴۴	۶۳۷۷/۳۸۰
۳	۱۶۶۱۹/۵۷۳	۶۰۴۹/۳۴۶	۱۴۰۵/۹۱۲	۱۴۰۵/۹۱۲	۴۵۷/۶۶۶
۴	۱۵۱۵۲۱/۸۲۴	۵۷۸۱۳/۶۷۸	۹۸۰۸/۱۰۲	۹۸۰۸/۱۰۲	۳۷۱۳/۲۶۸
۵	۱۹۱۹۷۸/۴۳۳	۵۸۷۷۸/۳۳۰	۱۹۹۱۰/۵۰۳	۱۹۹۱۰/۵۰۳	۴۸۸۷/۹۲۳
جمع کل	۸۳۴۱۸۵/۸۱۴	۲۴۳۷۵۸/۸۱	۹۰۵۲۳/۴۵	۹۰۵۲۶/۱۱۷	۲۱۴۸۸/۹۵۳

¹ Nutrient export

² Nutrient retention

فسفر به ۸ دلار در هر پوند و نیتروژن به ۱/۵ دلار در هر پوند افزایش می یابد. برای تبدیل این مقادیر به واحد کیلوگرم، از ضریب ۰/۴۵۳۵۹۲۳۷ استفاده شد که بر اساس آن هزینه حذف هر کیلوگرم فسفر و نیتروژن به ترتیب ۱۷/۶۴ دلار و ۳/۳۰ دلار تعیین شد. جهت انتقال ارزش به ایران، تعدیل بر اساس برابری قدرت خرید و نرخ ارز رسمی سال ۲۰۲۳ انجام شد. پس از این تعدیل، هزینه حذف هر کیلوگرم فسفر برابر با ۱۴/۳ دلار (۶۵۷۸۰۰۰ ریال) و هزینه حذف هر کیلوگرم نیتروژن برابر با ۲/۷ دلار (۱۲۴۲۰۰۰ ریال) محاسبه شد.

با استفاده از مقادیر محاسبه شده و داده های مربوط به تثبیت مواد مغذی در محدوده مورد مطالعه، ارزش اقتصادی خدمت تثبیت مواد مغذی برآورد شد. براین اساس، ارزش اجتناب از خسارت ناشی از حذف فسفر برابر با ۳۴۸۵۷۵۰ دلار (۱۶۰۳۴۴۵ میلیون ریال) و ارزش تثبیت نیتروژن برابر با ۲۲۵۲۳۰۰ دلار (۱۰۳۶۰۵۸ میلیون ریال) تخمین زده شد. در مجموع، ارزش کل این خدمت اکوسیستمی در محدوده مورد مطالعه ۵۷۳۸۰۵۰ دلار (۲۶۳۹۵۰۳ میلیون ریال) برآورد گردید.

جدول ۵ ارزش برآوردی تثبیت فسفر و نیتروژن را به تفکیک زیرحوضه های آبخیز در محدوده مورد مطالعه نشان می دهد.

بر اساس نتایج نهایی حاصل از مدل سازی مواد مغذی (فسفر و نیتروژن) توسط مدل InVEST NDR در محدوده مطالعاتی تالاب حرای خورخوران، مقدار صدور سالانه فسفر و نیتروژن از این محدوده به مجاری آبی به ترتیب ۲۱/۴۸ و ۹۰/۵۲ تن برآورد شد. حریم اکولوژیک تعیین شده برای این تالاب قادر است سالانه به دلیل استقرار انواع پوشش های طبیعی زمین از جمله جنگل های انبوه و نیمه انبوه حرا، لکه های جنگلی و مرتعی محدوده های خشکی اطراف تالاب با طبقات تراکمی متفاوت و وجود مناطق باتلاقی و مرطوب قادر است سالانه موجب تثبیت دو ماده مغذی فسفر و نیتروژن به ترتیب به مقدار ۲۴۳/۷۵ و ۸۳۴/۱۸ تن گردد و از ورود این مواد به مجاری آبی جلوگیری نماید.

برآورد ارزش اقتصادی خدمت تثبیت مواد مغذی با استفاده از روش هزینه جایگزینی و انتقال ارزش: داده های پایه از مطالعه آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (EPA) در سال ۲۰۰۷ استخراج گردید و سپس با استفاده از شاخص تورم ایالات متحده تا سال ۲۰۲۳ تعدیل و به ارزش حقیقی تبدیل شدند. این مطالعه هزینه حذف هر پوند فسفر و هر پوند نیتروژن را به ترتیب ۵/۲۴ دلار و ۰/۹۸ دلار گزارش کرده است که با لحاظ نرخ تورم ایالات متحده برای تعدیل آن تا سال ۲۰۲۳ هزینه حذف

جدول ۵- ارزش برآوردی اقتصادی خدمت تثبیت مواد مغذی (فسفر و نیتروژن) در محدوده مطالعاتی تالاب حرای خورخوران (ارزش ریالی کل و ریال / هکتار) (منبع: یافته های تحقیق)

کد زیرحوضه	مساحت (هکتار)	ارزش تثبیت فسفر (میلیون ریال)	ارزش تثبیت فسفر (ریال/هکتار)	ارزش تثبیت نیتروژن (میلیون ریال)	ارزش تثبیت نیتروژن (ریال/هکتار)
۱	۲۳۸۹۳/۸۴	۳۵۸۹۹۰	۱۵۰۲۴۳۷۴/۵	۲۷۸۳۵۳	۱۱۶۴۹۵۷۱/۶
۲	۳۵۷۸۵/۷۹	۴۳۷۷۲۱	۱۲۲۳۱۶۹۸/۶	۳۱۰۴۳۶	۸۶۷۴۸۳۹/۹
۳	۱۰۶۵۲۹/۸۰	۳۹۷۹۲	۳۷۳۵۲۹/۲	۲۰۶۴۲	۱۹۳۷۶۷/۳
۴	۱۱۳۹۳/۸۵	۳۸۰۲۹۸	۳۳۳۷۷۴۷۹/۹	۱۸۸۱۹۰	۱۶۵۱۶۸۰۵/۱
۵	۲۰۳۹۳/۰۳	۳۸۶۶۴۴	۱۸۹۵۹۶۴۳	۲۳۸۴۳۷	۱۱۶۹۲۰۸۳
مجموع	۱۹۷۹۹۶/۳۱	۱۶۰۳۴۴۵	۸۰۹۸۳۵۸/۴	۱۰۳۶۰۵۸	۵۲۳۲۷۱۳/۶۸

سایر تالاب ها و اکوسیستم های مشابه در سطح جهان قابل مقایسه است. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، میزان صدور فسفر و نیتروژن در تالاب بین المللی حرای خورخوران به ترتیب ۰/۱۰۸ و ۰/۴۵ کیلوگرم در هکتار در

بحث

نتایج این تحقیق نشان داد که تالاب بین المللی حرای خورخوران نقش مهمی در تثبیت مواد مغذی، به ویژه نیتروژن و فسفر، دارد. این یافته ها با مطالعات پیشین در

این اکوسیستم ارزشمند را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۴، این تالاب قادر است سالانه ۲۴۳/۷۵ تن نیتروژن و ۸۳۴/۱۸ تن فسفر را تثبیت کند. این میزان تثبیت، نشان‌دهنده نقش مهم پوشش گیاهی و شرایط اکولوژیکی تالاب در کاهش آلودگی‌های ناشی از ورود نیتروژن و فسفر از منابع مختلف به منابع آبی مجاور است.

بررسی نتایج مدل‌سازی همچنین نشان می‌دهد که مناطق دارای پوشش متراکم از جنگل‌های حرا و نواحی تالابی، بیشترین ظرفیت تثبیت مواد مغذی را دارند. در مقابل، نواحی شهری و کشاورزی، به دلیل تغییرات کاربری اراضی و ورود مستقیم آلاینده‌ها، سهم بالاتری در صدور مواد مغذی داشته و توانایی تثبیت پایین‌تری دارند. این الگو نشان می‌دهد که حفاظت از پوشش گیاهی تالاب، به‌ویژه جنگل‌های حرا، یک راهبرد کلیدی در بهبود کیفیت آب و کاهش آلودگی نیتروژن و فسفر است. همچنین، برآوردهای انجام‌شده نشان می‌دهد که تالاب خورخوران از طریق تثبیت مواد مغذی، می‌تواند از ورود سالانه ۹۰/۵۲ تن فسفر و ۲۱/۴۸ تن نیتروژن به منابع آبی جلوگیری کند. این ارقام حاکی از آن است که تالاب به‌عنوان یک فیلتر طبیعی، نقش مؤثری در کاهش اثرات آلودگی‌های کشاورزی و فاضلابی دارد و می‌تواند جایگزین مقرون‌به‌صرفه‌ای برای روش‌های تصفیه مصنوعی در کاهش مواد مغذی در آب باشد. از این رو هرگونه کاهش در وسعت پوشش گیاهی تالاب یا افزایش ورود آلاینده‌ها، می‌تواند منجر به کاهش توان تثبیت مواد مغذی و در نهایت، افزایش آلودگی منابع آبی مجاور شود.

از دیدگاه اقتصادی، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که تالاب بین‌المللی حرای خورخوران، از طریق تثبیت مواد مغذی، ارزش اقتصادی قابل‌توجهی دارد. بر اساس برآوردهای انجام‌شده در سال ۱۴۰۲، ارزش اقتصادی تثبیت نیتروژن و فسفر به ترتیب ۱۰۳۶۰۵۸ و ۱۶۰۳۴۴۵ میلیون ریال برآورد شده است که مجموع ارزش این خدمت اکوسیستمی را به ۲۶۳۹۵۰۳ میلیون ریال می‌رساند. این میزان بیانگر نقش مهم تالاب در کاهش هزینه‌های مرتبط با تصفیه آب و کنترل آلودگی‌های ناشی از ورود نیتروژن و فسفر به منابع آبی است. مقایسه این ارزش اقتصادی با مطالعات مشابه در سطح بین‌المللی مانند مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۰۷)

سال است. این مقادیر در مقایسه با مطالعات مشابه در دیگر اکوسیستم‌های تالابی و حوضه‌های آبخیز تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند شرایط اقلیمی، پوشش/کاربری زمین، پوشش گیاهی و ویژگی‌های هیدرولوژیک منطقه باشد. برای مثال در مقایسه با تحقیق یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2019)، بر روی حوضه‌های آبخیز شمال غربی چین که میزان صدور فسفر و نیتروژن را به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۳۵ کیلوگرم در هکتار در سال برآورد کردند، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که صدور نیتروژن در تالاب خورخوران بالاتر از این مقدار است، در حالی که میزان صدور فسفر اندکی کمتر برآورد شده است. این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت در میزان بارش، کاربری اراضی، و پوشش گیاهی دو منطقه باشد. همچنین در مطالعه ردهد و همکاران (Redhead *et al.*, 2018) که در انگلستان انجام شد، میزان صدور نیتروژن و فسفر را به ترتیب ۲/۸ و ۰/۲۵ کیلوگرم در هکتار در سال برآورد کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که در اکوسیستم‌های با بارندگی بیشتر و فعالیت‌های انسانی گسترده‌تر، میزان صدور مواد مغذی بیشتر است. در مقایسه با این تحقیق، تالاب خورخوران میزان صدور نیتروژن و فسفر کمتری دارد، که می‌تواند نشان‌دهنده نقش مؤثر پوشش گیاهی تالاب، شرایط اقلیمی خشک‌تر و احتمالاً محدودیت‌های ورود آلاینده‌های انسانی در محدوده مطالعه باشد. همچنین، مطالعه Valladares-Castellanos و همکاران (Valladares-Castellanos *et al.*, 2024) در مناطق کشاورزی نشان داد که میزان صدور نیتروژن و فسفر به ترتیب ۱/۲ و ۰/۴ کیلوگرم در هکتار در سال است، که بسیار بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده در این تحقیق است. این تفاوت قابل توجه می‌تواند ناشی از نوع کاربری زمین باشد، زیرا در مطالعه حاضر، تالاب خورخوران دارای پوشش گیاهی متراکمی از جنگل‌های مانگرو است که توانایی بالایی در جذب و تثبیت مواد مغذی دارد.

به‌طور کلی مقایسه این نتایج با مطالعات مذکور نشان می‌دهد که تالاب خورخوران نسبت به برخی مناطق دیگر دارای کارایی بهتری در کاهش صدور مواد مغذی به منابع آبی است. این موضوع اهمیت و نقش تالاب‌های ساحلی و جنگل‌های حرا را در کنترل آلودگی‌های ناشی از نیتروژن و فسفر تأیید می‌کند و ضرورت حفاظت و مدیریت پایدار

NDR امکان بسیار خوبی برای تعیین کمیت خدمت اکوسیستمی تثبیت مواد مغذی فراهم کرده است. این خدمت در بسیاری از ارزیابی‌های محیط‌زیستی نادیده گرفته می‌شود، اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تالاب‌ها نقش مهمی در کاهش آلودگی منابع آبی و تنظیم چرخه مواد مغذی دارند؛ بنابراین، با وجود محدودیت‌ها، این مدل ابزار ارزشمندی برای سیاست‌گذاران و مدیران محیط‌زیست در راستای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و حفاظتی است.

این تحقیق نشان داد که تالاب بین‌المللی حرای خورخوران نقش کلیدی در تثبیت مواد مغذی دارد و از ورود مقادیر قابل توجهی نیتروژن و فسفر به منابع آبی جلوگیری می‌کند. ارزش اقتصادی این خدمت اکوسیستمی که معمولاً در ارزیابی‌های محیط‌زیستی نادیده گرفته می‌شود، نشان داد که حفاظت از تالاب می‌تواند جایگزینی مقرون‌به‌صرفه برای روش‌های پرهزینه تصفیه مصنوعی باشد. با وجود محدودیت‌هایی مانند عدم امکان اندازه‌گیری میدانی بار مواد مغذی و محدودیت‌های مدل در شبیه‌سازی فرایندهای بیوژئوشیمیایی، این تحقیق تأیید کرد که مدل InVEST NDR ابزاری مؤثر برای کمی‌سازی این خدمت اکوسیستمی است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای سیاست‌گذاران و مدیران محیط‌زیست باشد تا با اجرای راهکارهای مدیریتی مناسب، از ظرفیت طبیعی تالاب‌ها برای کاهش آلودگی و بهبود کیفیت آب بهره ببرند. برای بهبود دقت و کارایی مدل InVEST NDR در ارزیابی خدمات اکوسیستم در تالاب‌ها، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده به جمع‌آوری داده‌های میدانی دقیق و نمونه‌برداری از غلظت مواد مغذی به‌ویژه نیتروژن و فسفر توجه بیشتری شود. این داده‌ها می‌توانند دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند. همچنین استفاده از مدل‌های ترکیبی که بتوانند تأثیرات مختلف مانند تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی را به طور مؤثرتر شبیه‌سازی کنند، می‌تواند کارایی مدل را ارتقا دهد. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود که تأثیرات بلندمدت تغییرات کاربری اراضی و نقش سیاست‌های مدیریتی در حفاظت از تالاب‌ها به طور دقیق‌تر در مدل‌سازی‌ها گنجانده شوند. برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و ارزیابی‌های کارکرد اکوسیستمی، همچنین نیاز به

در تالاب‌های چین با برآورد ارزش تثبیت مواد مغذی ۳۰۰-۱۵۰ دلار در هر هکتار در سال یا مطالعه Barbier و همکاران (۲۰۱۱) با تعیین ارزش تثبیت نیتروژن و فسفر توسط جنگل‌های حرا در کارائیب در طیف عددی ۵۰۰-۷۰۰ دلار، با در نظر گرفتن وسعت تالاب خورخوران حاکی از آن است که برآوردهای این تحقیق از نظر مقیاس کلی با این مطالعات همخوانی دارد، اما تفاوت‌های منطقه‌ای و تفاوت در هزینه‌های محلی تصفیه آب ممکن است موجب تفاوت در مقدار ارزش‌گذاری شود.

در مجموع این برآوردهای اقتصادی نشان می‌دهند که حفاظت از تالاب خورخوران نه تنها از نظر اکولوژیک، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز یک سرمایه‌گذاری مهم محسوب می‌شود. اگر این اکوسیستم تخریب شود، هزینه‌های جایگزینی آن از طریق سیستم‌های تصفیه مصنوعی بسیار بیشتر خواهد بود. از این‌رو، یافته‌های این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی، تدوین سیاست‌های حفاظت از تالاب‌ها و اجرای راهکارهای مبتنی بر طبیعت برای کاهش آلودگی‌های مواد مغذی مورد استفاده قرار گیرند.

یکی از محدودیت‌های اصلی این تحقیق، عدم امکان انجام اندازه‌گیری‌های میدانی برای تعیین دقیق بار فسفر و نیتروژن در انواع پوشش‌ها و کاربری‌های زمین در محدوده تالاب خورخوران بود. این محدودیت عمدتاً به دلیل محدودیت‌های مالی و زمانی در جمع‌آوری داده‌های میدانی ایجاد شد. در نتیجه، داده‌های ورودی مدل InVEST NDR بر اساس منابع ثانویه و مقادیر پیش‌فرض تنظیم شد که ممکن است موجب کاهش دقت برخی از برآوردهای مدل‌سازی شده باشد. برای به‌دست‌آوردن نتایج دقیق، نیاز به داده‌های میدانی و نمونه‌برداری مستقیم از سطح تالاب‌ها و حوضه آبخیز است تا غلظت واقعی این مواد مغذی در آب‌ها و خاک‌ها اندازه‌گیری شود. علاوه بر این، مدل InVEST NDR دارای محدودیت‌هایی در شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده بیوژئوشیمیایی مربوط به چرخه نیتروژن و فسفر است. این مدل به‌صورت شبه‌توزیعی عمل کرده و برخی از فرایندهای تبدیل زیستی، رسوب‌گذاری و تجزیه مواد مغذی در محیط‌های تالابی را به طور کامل در نظر نمی‌گیرد. این موضوع می‌تواند باعث شود که نقش فرایندهای میکروبی و شیمیایی در تثبیت مواد مغذی به طور کامل شبیه‌سازی نشود. با این وجود، مدل InVEST

8. **Endreny, T.A. and Wood, E.F., 2003.** Watershed weighting of export coefficients to map critical phosphorous loading areas 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39, 165–181.
9. **Han, B., Reidy, A. and Li, A., 2021.** Modeling nutrient release with compiled data in a typical Midwest watershed. *Ecological Indicators*, 121, 107213.
10. **Heathwaite, A., Quinn, P. and Hewett, C., 2005.** Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *Journal of Hydrology*, 304, 446–461.
11. **Hopkins, K.G., Noe, G.B., Franco, F., Pindilli, E.J., Gordon, S., Metes, M.J., Claggett, P.R., Gellis, A.C., Hupp, C.R. and Hogan, D.M., 2018.** A method to quantify and value floodplain sediment and nutrient retention ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 220, 65–76.
12. **Keeler, B.L., Polasky, S., Brauman, K.A., Johnson, K.A., Finlay, J.C., O'Neill, A., Kovacs, K. and Dalzell, B., 2012.** Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 18619–18624.
13. **Koetse, M.J., Brouwer, R. and van Beukering, P.J., 2015.** Economic valuation methods for ecosystem services. *Ecosystem Services: From Concept to Practice*, 108–131.
14. **La Notte, A., Liqueste, C., Grizzetti, B., Maes, J., Egoh, B.N. and Paracchini, M.L., 2015.** An ecological-economic approach to the valuation of ecosystem services to support biodiversity policy. A case study for nitrogen retention by Mediterranean rivers and lakes. *Ecological Indicators*, 48, 292–302.
15. **Mitra, A., 2020.** Ecosystem services of mangroves: An overview. *Mangrove Forests in India: Exploring Ecosystem Services*, 1–32.
16. **Paná, S., Bonansea, M., Valdez, V.C., del Valle Asís, I., Gauto, V.H. and Ferral, A., 2024.** Modelling of phosphorus and nitrogen delivery in a strategic river basin. 2024 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), IEEE, 1–6.
17. **Rankinen, K., Granlund, K., Etheridge, R. and Seuri, P., 2014.** Valuation of nitrogen retention as an ecosystem service

شبيه‌سازی شرایط مختلف اقليمي و بررسی نتایج در سناریوهای مختلف است.

تشکر و قدردانی

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

منابع

1. **Abebe, W.B., Dersseh, M.G., Goshu, G., Abera, W., Abraham, E., Mekonnen, M.A., Fohrer, N., Tilahun, S.A., McClain, M.E. and Payne, W.A., 2025.** Modeling changes in nutrient retention ecosystem service using the InVEST-NDR model: A case study in the Gumara River of Lake Tana Basin, Ethiopia. *Ecohydrology & Hydrobiology*.
2. **An, S. and Verhoeven, J.T., 2019.** Wetland functions and ecosystem services: Implications for wetland restoration and wise use. Springer.
3. **Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W., Stier, A.C. and Silliman, B.R., 2011.** The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81, 169–193.
4. **Cong, W., Sun, X., Guo, H. and Shan, R., 2020.** Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin. *Ecological Indicators*, 112, 106089.
5. **Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V. and Paruelo, J., 1997.** The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253–260.
6. **Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S. and Turner, R.K., 2014.** Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158.
7. **Enderle, D.I. and Weih Jr, R.C., 2005.** Integrating supervised and unsupervised classification methods to develop a more accurate land cover classification. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 59, 65–73.

- on a catchment scale. *Hydrology Research*, 45, 411–424.
18. **Redhead, J.W., May, L., Oliver, T.H., Hamel, P., Sharp, R. and Bullock, J.M., 2018.** National scale evaluation of the InVEST nutrient retention model in the United Kingdom. *Science of the Total Environment*, 610, 666–677.
 19. **Rioux, R.A. and Strong, A.L., 2023.** Scenario-based land use modeling for nutrient management in the Skaneateles Lake Watershed. *Environmental Challenges*, 12, 100739.
 20. **Salata, S., Garnero, G., Barbieri, C.A. and Giaino, C., 2017.** The integration of ecosystem services in planning: An evaluation of the nutrient retention model using InVEST software. *Land*, 6, 48.
 21. **Smith, A., Yee, S.H., Russell, M., Awkerman, J. and Fisher, W.S., 2017.** Linking ecosystem service supply to stakeholder concerns on both land and sea: An example from Guánica Bay watershed, Puerto Rico. *Ecological Indicators*, 74, 371–383.
 22. **Valladares-Castellanos, M., de Jesús Crespo, R., Xu, Y.J. and Douthat, T.H., 2024.** A framework for validating watershed ecosystem service models in the United States using long-term water quality data: Applications with the InVEST Nutrient Delivery (NDR) model in Puerto Rico. *Science of the Total Environment*, 949, 175111.
 23. **Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L., McInnes, J. and Roberts, A., 2012.** Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138, 74–88.
 24. **Yang, X., Ji, G., Wang, C., Zuo, J., Yang, H., Xu, J. and Chen, R., 2019.** Modeling nitrogen and phosphorus export with InVEST model in Bosten Lake Basin of Northwest China. *PLoS One*, 14, e0220299.
 25. **Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K. and Swinton, S.M., 2007.** Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64, 253–260.





Assessment and Valuation of Nutrient Retention Ecosystem Service in the International Mangrove Wetland of Khorkhoran Using the invest NDR Model and Avoided Cost Method

**Ardavan Zarandian^{*1}, Roya Mousazadeh², Majid Ramezani Mehrian³,
Fatemeh Mohammadyari⁴, Mohammad Sadegh Saba⁵, Seyedeh Mahtab Shojaei Langari⁶**

1* - Research Group of Environmental Assessment and Risk, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran

2- Research Group of Environmental Economics, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran

3- Department of Environmental Studies, The Institute for Research and Development in the Humanities (SAMT), Tehran, Iran

4- Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

5- Office for the Protection of Ecosystems and Marine Coasts, Department of Environment, Tehran, Iran

6- Group of Marin Biology, Office for the Protection of Ecosystems and Marine Coasts, Department of Environment, Tehran

Original Article

Received:
2025.04.18

Accepted:
2025.06.02

Keywords:
Economic Valuation, Ecosystem Services, Nutrients Retention, Invest Ndr Model, Mangrove Wetland

Abstract

Introduction: The international mangrove wetland of Khurkhoran on the southern coast of Iran, plays an important role in absorbing and stabilizing the retention of nutrients such as nitrogen and phosphorus, which reduces pollution of water resources and improves water quality. The increase in the use of chemical fertilizers in agriculture, the entry of urban and industrial wastewater, and changes in land use have put great pressure on this ecosystem and have increased the nutrient load in the waters entering the wetland. Therefore, the quantification and economic valuation of this ecosystem service is essential for the planning and sustainable management of wetlands. This study aims to: (1) Quantitatively assess the retention of nitrogen and phosphorus by the Khorkhoran International Wetland; (2) Map the spatial distribution of nutrient export and retention; and, (3) Estimate the economic value of this ecosystem service using both the avoided cost and benefit transfer approaches.

Materials and Methods: In this study, the NDR model from the InVEST software package was used to simulate the export and retention of nitrogen and phosphorus in the study area. The key input data included a land use map, a precipitation and surface runoff map, DEM, and nutrient loads from agricultural and urban activities. The input data were processed in the ArcGIS software environment and the model was run. Subsequently, the model outputs included maps of extracted nutrient export and retention and key areas of this service were identified. Then, using the avoided cost and the

benefit transfer methods, the economic value of the nutrient retention service was calculated based on the replacement cost of treating these materials in wastewater treatment engineering systems.

Results: The modeling results showed that the Khorkehoran mangrove wetland annually retains 243.75 and 834.18 tons of phosphorus and nitrogen respectively, which prevents these substances from entering water resources and causing problems such as algal blooms. Also, areas covered by mangrove forests and coastal marshes played the greatest role in retention these elements, while agricultural and urban areas showed the highest nutrient export. The annual phosphorus and nitrogen export from the study area was estimated to be 21.48 and 90.52 tons respectively, indicating the negative effects of human uses on the nutrient load entering the wetland. The economic value of the nutrient retention service was calculated. Accordingly, the cost of removing each kilogram of nitrogen and phosphorus in wastewater treatment systems was estimated to be 2.7 and 14.3 US\$ in 2023. Considering the amount of nutrient retention in the wetland, the total value of this service in the study area was estimated to be 2639503 million Iran's rials (Equal to US\$ 5738050).

Discussion: The results of this study emphasize that the Khor Khoran mangrove wetland is an effective natural filter for reducing water resource pollution. Preservation and management of this wetland can be a suitable economic alternative to costly wastewater treatment methods. As a result, in environmental management policies, paying attention to ecosystem services such as nutrient retention can significantly contribute to improving water quality and reducing pollution. In addition, it is suggested that future research should use field data and more accurate modeling methods to better assess these services. To improve the accuracy of predictions and assessments of ecosystem function, it is also necessary to simulate various climate conditions and examine the results under different scenarios.