



## ارزیابی تغییرات و ازهم‌گسیختگی زیستگاه در جنگل‌های مانگرو با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست (مطالعه موردی: منطقه حفاظت‌شده حرا)

پروانه سبحانی<sup>۱\*</sup> و افشین دانه‌کار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه محیط زیست، دانشگاه لرستان، دانشکده منابع طبیعی، خرم‌آباد، ایران

<sup>۲</sup> استاد گروه محیط زیست، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳)

### چکیده

**مقدمه:** تغییرات کاربری اراضی/ پوشش ناشی از توسعه فعالیت‌های انسانی، از مهم‌ترین تهدیدهای شناخته‌شده در جنگل‌های مانگرو است. این تغییرات سبب کاهش یکپارچگی زیستگاه و تنوع زیستی جانوری در این رویشگاه‌های طبیعی و منحصربه‌فرد شده است. ازهم‌گسیختگی زیستگاه، عامل اصلی تخریب اکوسیستم است و ظرفیت زیستگاه را برای ارائه بسیاری از خدمات اکوسیستمی ارزشمند کاهش می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی روند تغییرات و ازهم‌گسیختگی زیستگاه در یک دوره زمانی بلندمدت (۲۰۲۳-۱۹۸۹) در جنگل‌های مانگروی منطقه حفاظت‌شده حرا صورت گرفت.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش به بررسی تغییرات مکانی- زمانی طبقات کاربری اراضی/ پوشش جنگل‌های مانگرو با استفاده از تصاویر چندطیفی مجموعه لندست در دوره زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۳ پرداخته شد. افزون بر این، به منظور ارزیابی روند تغییرات ساختار زیستگاه، سنجه‌های سیمای سرزمین و تأثیرات آن بر سطح پهنه‌های حفاظتی (زون‌های ۱ و ۲) در این منطقه بررسی شد.

**یافته‌ها:** مطابق نتایج، منطقه حفاظت‌شده حرا در سال ۲۰۲۳ روند کاهشی در مقایسه با سال ۱۹۸۹ نشان می‌دهد. به‌طور کلی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روند افزایش تغییرات کاربری اراضی و کاهش جنگل‌های مانگرو عبارت است از توسعه زیرساخت‌ها از جمله اسکله‌ها و بندرهای تفریحی و تجاری، رشد جمعیت و توسعه سکونتگاه‌ها، افزایش بی‌رویه فعالیت‌های گردشگری، بهره‌وری فراتر از حد توان منطقه، توسعه آبی‌پروری و جنگل‌زدایی. ارزیابی سنجه‌های سیمای سرزمین نشان داد که سنجه‌های جدادگی (SPLIT) و تراکم لکه (PD) در سطح کلاس جنگل‌های مانگرو و پهنه‌های آبی افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش ازهم‌گسیختگی و پراکندگی لکه‌ها است، در حالی که در سطح کلاس‌های پهنه جزر و مدی و اراضی لخت، این سنجه‌ها دارای روند کاهشی‌اند. سنجه‌های جدادگی و تراکم لکه در پهنه‌های حفاظتی (زون ۱ و ۲) نیز افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش ازهم‌گسیختگی (جدادگی) و پراکندگی لکه‌ها و کاهش یکپارچگی در ساختار زیستگاه، اندازه لکه‌ها و از طرف دیگر افزایش تعداد و پراکندگی آنهاست.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان در کنترل عوامل تأثیرگذار بر روند تغییرات کاربری اراضی/ پوشش در این رویشگاه‌های طبیعی کمک کند. در این زمینه، اجرای پروژه‌های پیشنهادی و احداث هر گونه زیرساخت و توسعه در این منطقه باید با توجه به طرح‌های مدیریتی (زون‌بندی) و ارزیابی‌های محیط زیستی انجام گیرد. از سویی، تغییرات کاربری‌ها باید در خارج از مرز مدیریتی منطقه محدود شود تا کاهش یکپارچگی و ازهم‌گسیختگی زیستگاه، در جنگل‌ها به حداقل برسد.

**واژه‌های کلیدی:** ازهم‌گسیختگی زیستگاه، جنگل‌های مانگرو منطقه حفاظت‌شده حرا، رویکرد بوم‌شناسی سیمای منظر، سنجه‌های سیمای سرزمین.

## مقدمه

ازهم‌گسیختگی زیستگاه، عامل اصلی تخریب اکوسیستم است و ظرفیت زیستگاه را برای ارائه بسیاری از خدمات اکوسیستمی ارزشمند کاهش می‌دهد. خدمات اکوسیستم جنگل‌های مانگرو مانند جلوگیری از فرسایش، حفاظت از خط ساحلی و کاهش تغییرات اقلیمی (از طریق ترسیب کربن)، به اندازه و الگوی قرارگیری لکه‌های جنگلی وابسته است (Bryan-Brown et al., 2020). از طرف دیگر تغییر در الگوی سیمای سرزمین و عملکردهای بوم‌شناختی سبب اثرهای منفی بر زیستگاه گونه‌های جانوری در این رویشگاه‌ها می‌شود.

مسئله اصلی در اکوسیستم‌های طبیعی، یکپارچگی زیستگاه است که به حفظ منابع و تنوع زیستی کمک می‌کند، به‌ویژه زمانی که زیستگاه‌ها مکمل و در پیوند با یکدیگر باشند (Wang et al., 2024). ازهم‌گسیختگی زیستگاه، سبب کاهش توانایی گونه‌ها برای حرکت در بین زیستگاه‌ها و انزوای آنها و در نتیجه افزایش آسیب‌پذیری آنها در برابر آشفتگی‌های محیطی می‌شود که افزایش احتمال انقراض آنها را در پی دارد (Banks-Leite et al., 2020). ارتباط بین لکه‌های زیستگاهی و جمعیت‌ها عامل مهمی است که بر گستره وسیعی از فرایندهای بوم‌شناختی مانند جریان ژن، پویایی ابرجمعیت‌ها، افزایش گستره پراکنش گونه‌ها، بقای جمعیت و حفظ تنوع زیستی تأثیرگذار است (Peacock, 2025). در جنگل‌های مانگرو نیز بهره‌برداری بی‌رویه از خدمات اکوسیستمی این رویشگاه‌ها و همچنین توسعه فعالیت‌های انسانی سبب کاهش پوشش جنگلی در این مناطق شده است (Talukdar et al., 2021, Roy et al., 2025).

در دهه‌های اخیر توسعه غیراصولی کاربری/پوشش اراضی و جنگل‌زدایی، از مهم‌ترین عوامل ازهم‌گسیختگی زیستگاه و نابودی تنوع زیستی در جنگل‌های مانگرو است (Jaramillo et al., 2023). جنگل‌های مانگرو در سراسر جهان با روند ازهم‌گسیختگی زیستگاه و لکه‌لکه

شدن مواجه شده‌اند؛ اما اقدامات محدودی برای کنترل و کاهش یکپارچگی زیستگاه و احیای این رویشگاه‌های ارزشمند صورت گرفته است (Hermansen et al., 2017). شواهد حاکی از آن است که زیستگاه‌های مانگرو به دلیل تأثیرات مستقیم انسانی و تغییرات جهانی با سرعت نگران‌کننده‌ای در حال کاهش هستند (Carugati et al., 2018).

جنگل‌های مانگرو در مناطق ساحلی گرمسیری رشد می‌کنند و از آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌های جهان هستند (Sudhana et al., 2020). این رویشگاه‌های طبیعی مانند سایر ذخایر ارزشمند زیستی، به دلیل عوامل محیطی (ازهم‌گسیختگی جبهه ساحل، توفان و سیلاب) و انسانی (رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، تغییرات کاربری اراضی) در معرض تهدید و نابودی می‌باشند (Khan et al., 2021). توسعه فعالیت‌های انسانی از جمله آبی‌پروری، جنگل‌زدایی، توسعه شهری، آلودگی محیط زیست و افزایش سطح دریا تهدیدهای دائمی برای رشد مانگروها هستند (Gouvêa et al., 2022; Adame et al., 2021; John et al., 2022). تغییرات کاربری/پوشش اراضی به‌طور کلی بر یکپارچگی این اکوسیستم‌های طبیعی تأثیر می‌گذارد و همچنین موجب تبدیل زیستگاه می‌شود و تهدیدی برای زندگی گیاهان و حیوانات به شمار می‌رود (Islam et al., 2018; Wolf et al., 2023). بنابراین پایش مکانی-زمانی تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی یکپارچگی زیستگاه، می‌تواند به مدیریت یکپارچه و برنامه‌ریزی صحیح در این اکوسیستم‌های طبیعی کمک کند.

با توجه به اهمیت این موضوع، برخی از محققان به بررسی روند تغییرات کاربری اراضی/پوشش و اثرهای آن بر زیستگاه پرداخته‌اند. (Wiartha et al., 2025) در پژوهشی به ارزیابی و شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات جنگل‌های مانگرو در اندونزی پرداختند. نتایج نشان داد که پوشش جنگلی مانگروها از ۱۰۱۱/۳۷ کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۳ به ۹۶۴/۳۷ کیلومتر مربع در سال

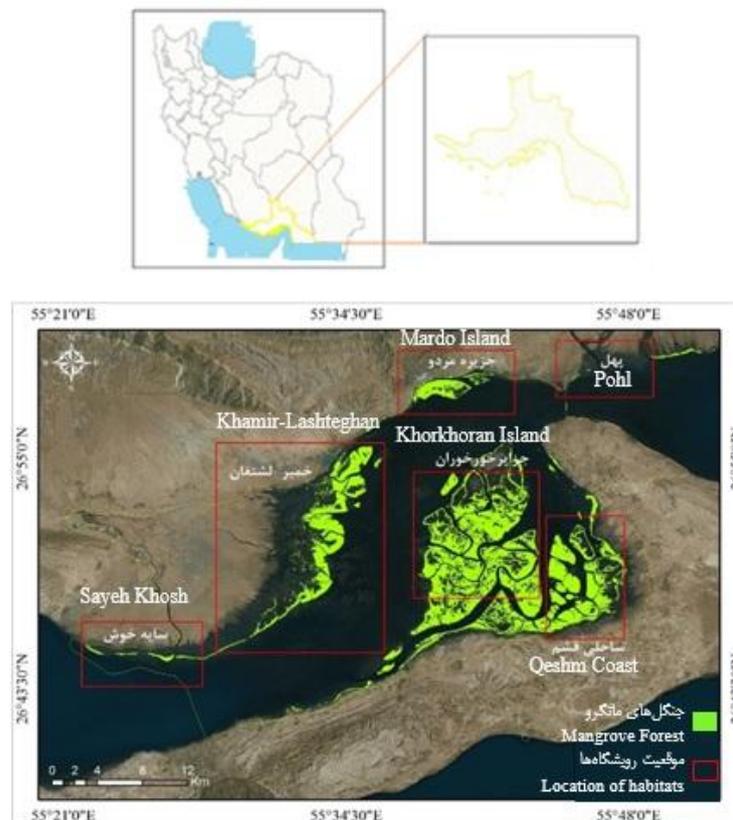
گرفته است. این پژوهش با هدف ارزیابی ازهم‌گسیختگی و تغییرات زیستگاه در جنگل‌های مانگرو خمیر و قشم انجام گرفت. مهم‌ترین سؤالات تحقیق عبارت‌اند از: ۱. روند تغییرات کاربری‌های اراضی/ پوشش در جنگل‌های مانگرو منطقه حفاظت‌شده حرا طی سال‌های ۲۰۲۳-۱۹۸۹ از چه وضعیتی برخوردار است؟ ۲. ازهم‌گسیختگی زیستگاه با توجه به روند تغییرات سنج‌های سیمای سرزمین چقدر است؟ ۳. تغییرات سنج‌های سیمای سرزمین تا چه اندازه بر سطح پهنه‌های حفاظتی (امن و حفاظت‌شده) اثر داشته است؟

## مواد و روش‌ها

### منطقه پژوهش

منطقه حفاظت‌شده حرا واقع در استان هرمزگان با مساحت ۸۶,۲۵۸ هکتار در موقعیت جغرافیایی عرض شمالی ۲۶° و ۴۳' و ۴۷" تا ۲۷° و ۰۱' و ۰۲" و طول شرقی ۵۵° و ۲۳' و ۴۶" تا ۵۵° و ۵۴' و ۰۱" قرار دارد (شکل ۱). جنگل‌های منطقه حفاظت‌شده حرا، بزرگ‌ترین رویشگاه طبیعی درخت حرا (*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.) در حوزه جنگل‌های مانگروی خلیج فارس هستند. این منطقه دربرگیرنده شش رویشگاه تفکیک‌پذیر (پهل، مردو، خمیر- لشتگان، سایه‌خوش، ساحل قشم و خورخوران) است. از فراوان‌ترین گونه‌های پستاندار دریایی در این منطقه، می‌توان به پورپویز بی‌باله اشاره کرد. ماهیان شناخته‌شده در این منطقه نیز شامل ۳۲ گونه هستند که به ۱۷ خانواده تعلق دارند. خزندگان شناسایی شده در این منطقه شامل لاک‌پشت عقابی (*Chelonia*) و لاک‌پشت سبز (*Eretmochelys imbricata*) و نیز مارجعفری در بخش خشکی (*Echis mydas*) و مارهای دریایی (*Hydrophis schistosus*) و (*Hydrophis cyanocincta*) در خورهای مانگرو هستند. افزون بر این، جنگل‌های مانگروی خمیر و قشم به دلیل وجود چشم‌اندازهای زیبا و جاذبه‌های طبیعی فراوان، از مکان‌های پرتقاضا برای طبیعت‌گردی ساحلی به شمار می‌روند (Sobhani & Danehkar, 2023/b).

۲۰۲۳ کاهش داشته است و میانگین از بین رفتن پوشش جنگلی مانگرو ۳/۲۵ کیلومتر مربع در سال است. در پژوهشی دیگر Sobhani & Danehkar (2023/a) به ارزیابی روند تغییرات کاربری اراضی و میزان ریسک اکولوژیک در جنگل‌های مانگرو پرداختند. مطابق نتایج افزایش روند تغییرات کاربری اراضی و توسعه فعالیت‌های انسانی سبب افزایش ریسک اکولوژیک در این جنگل‌ها شده است. Roy et al. (2025) به ارزیابی تکه‌تکه شدن جنگل‌های مانگرو در بنگلادش پرداختند. آنها بیان کردند که تکه‌تکه شدن جنگل، ناشی از فعالیت‌های انسانی، پیامدهای منفی برای سلامت جنگل و تنوع زیستی دارد. بنابراین بر برنامه‌ریزی حفاظتی و در عین حال حفظ یکپارچگی اکولوژیک در این جنگل‌ها تأکید می‌شود. Jaramillo et al. (2023) تأثیر تکه‌تکه شدن بر جنگل‌های مانگروی ساحلی اکوادور را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشتر اراضی جنگلی در این منطقه به مناطق ماهیگیری تبدیل شده است. بدین ترتیب تکه‌تکه شدن بسته به مدیریت عوامل مختلف جنگل‌زدایی ممکن است افزایش یا کاهش یابد و از این‌رو باید پایش جنگل‌های مانگرو در مقیاس بزرگ در نظر گرفته شود. مطابق پژوهش‌های سال‌های اخیر، تغییرات مکانی- زمانی کاربری اراضی و اثرهای آن بر اکوسیستم‌های بکر طبیعی، توجه بسیاری از محققان را جلب کرده است. در پژوهش حاضر به ارزیابی ازهم‌گسیختگی و تغییرات زیستگاه در جنگل‌های مانگروی منطقه حفاظت‌شده حرا پرداخته شد. در بیشتر پژوهش‌ها به روند تغییرات کاربری اراضی و کیفیت زیستگاه پرداخته شده است، در حالی که در پژوهش حاضر در کنار پایش مکانی- زمانی منطقه در بلندمدت (۲۰۲۳-۱۹۸۹)، ازهم‌گسیختگی زیستگاه با استفاده از رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین و سنج‌های آن نیز بررسی شد. این پژوهش با بررسی هم‌زمان تغییرات کاربری اراضی/پوشش و اثرهای آن بر ازهم‌گسیختگی و تهدید پهنه‌های حفاظتی (زون‌های ۱ و ۲)، تکمیل‌کننده دیگر تحقیقاتی است که تا کنون انجام



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده پژوهش

Figure 1. Geographical location of the studied area

جزر و مد در بازه‌های زمانی متفاوت (صبح و عصر) بررسی شد.

برای طبقه‌بندی تصاویر، روش الگوریتم جنگل تصادفی به کار گرفته شد. این الگوریتم که اغلب به منظور طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در توان تفکیک‌های مکانی کاربرد دارد، در مقایسه با الگوریتم‌های متداول طبقه‌بندی به روش ماشین بردار پشتیبانی و شبکه‌های عصبی، نتایج بهتری دارد و معرف روش‌های جدید طبقه‌بندی ترکیبی است (Zhang et al., 2019; Ao et al., 2018). روش جنگل تصادفی شیوه طبقه‌بندی نظارت‌شده‌ای است که در آن از مجموعه‌ای از درخت‌ها در تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا چند درخت تصمیم‌گیری دارای بیشترین تمایز تشکیل شده و روند تصمیم‌گیری درباره هر یک از آنها، جداگانه بررسی می‌شود. جنگل تصادفی یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که به دلیل سرعت

### شیوه اجرای پژوهش

در این پژوهش، از تصاویر چندطیفی مجموعه‌لندست در بازه‌های زمانی مختلف (۱۹۸۹، ۱۹۹۹، ۲۰۰۹ و ۲۰۲۳) برای نشان دادن سری مکانی-زمانی تغییرات جنگل‌های مانگرویی خمیر و قشم و همچنین از نقشه طبقات کاربری اراضی استفاده شد. تصاویر شامل L5-TM برای سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۹، L7-ETM+ برای سال ۲۰۰۹ و L8 و OLI-TIRS برای سال ۲۰۲۳ است. دلیل انتخاب بازه‌های زمانی مذکور، با توجه به توسعه پنج‌ساله بعد از انقلاب، رشد جمعیت، افزایش تقاضای گردشگری، گسترده شدن فعالیت‌های انسانی و شروع پژوهش‌های محیط زیستی در کشور است. همچنین ماه اردیبهشت به دلیل پوشش سبز غالب و گلدهی رویشگاه‌های مانگرو برای تهیه تصاویر انتخاب شد. افزون بر این، با توجه به تأثیرپذیری منطقه از جزر و مد، تصاویر در دو حالت

پوشش‌های گیاهی و خاک استفاده شد. دامنه تغییرات این شاخص بین ۱+ و ۱- قرار دارد که نزدیک بودن به ۱+ نشان‌دهنده وجود پهنه‌های آبی و نزدیک بودن به ۱- بیانگر وجود پهنه‌های غیرآبی است (Sagar et al., 2017). برای محاسبه این شاخص می‌توان از رابطه ۱ استفاده کرد. با توجه به اینکه تصاویر استفاده‌شده در پژوهش حاضر شامل مجموعه تصاویر ماهواره‌ای لندست است، در رابطه زیر باند سبز مرئی معادل باند ۳ و باند مادون قرمز نزدیک معادل باند ۵ در نظر گرفته شد. در نقشه‌های تهیه‌شده کلاس پهنه‌های آبی با کد صفر و کلاس‌های غیرآبی با کد ۱ نشان داده شد.

$$\text{NDWI} = \frac{(B3 - B5)}{(B3 + B5)} \quad \text{رابطه ۱}$$

همچنین از NDVI<sup>۳</sup>، برای تهیه پوشش‌های مانگرو از بقیه طبقات کاربری اراضی مطابق رابطه ۲ استفاده شد. این شاخص از پرکاربردترین شاخص‌ها روی داده‌های سنجش از راه دور است و در این رابطه، R و NIR به ترتیب طول موج‌های قرمز مرئی و مادون قرمز نزدیک هستند (Shimu et al., 2019). NDVI مقادیر نرمال شده بین ۱- و ۱+ را شامل می‌شود، به طوری که مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم به دلیل انعکاس به نسبت زیاد در محدوده مادون قرمز نزدیک و انعکاس کم در محدوده قرمز مرئی، مقادیر زیاد NDVI را دارند.

$$\text{NDVI} = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \text{رابطه ۲}$$

این منطقه ساحلی- دریایی و دارای پهنه‌های جزر و مدی و گل‌آلود است؛ از این رو به منظور جداسازی و تفکیک بهتر پهنه‌ها، از شاخص نرمال‌شده تفاوت کدورت (NTDI<sup>۴</sup>) استفاده شد. با توجه به اینکه آب‌های صاف و زلال در محدوده باندهای سبز و به ویژه باند قرمز، بازتاب بسیار ضعیفی (کمتر از ۱۰ درصد) دارند، می‌توان از این باندها برای برآورد و بررسی پهنه‌های گلی و جزر و مد فاقد شفافیت استفاده کرد (Lacaux et al., 2007). این شاخص با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

زیاد در زمینه داده‌های پرحجم و نیاز نداشتن به داده‌های آموزشی، مدنظر بسیاری از محققان قرار گرفته است (Fischer et al., 2023). در این شیوه ابتدا پارامترهای شبکه، شامل تعداد درخت‌ها و گره‌های مربوط به هر درخت مشخص می‌شود. سپس در هر درخت، تعدادی از داده‌های ورودی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. پس از تصمیم‌گیری در هر یک از این درخت‌ها، نتایج با هم تلفیق می‌شوند (خروجی طبقه‌بندی براساس یک رأی اکثریت از پیش‌بینی تک‌درخت‌های آموزش‌دیده ایجاد می‌شود). دقت این روش طبق توان درختان، به صورت جداگانه و میزان همبستگی در بین آنها مشخص می‌شود، بدین معنا که هرچه درختان انتخابی قابلیت تصمیم‌گیری بهتری داشته باشند و همبستگی آنها کمتر باشد، دقت نهایی بیشتر خواهد شد. در ادامه به پایش تغییرات و ارزیابی دقت تصاویر پرداخته شد. بارسازی و پایش تغییرات، در حقیقت کشف تغییرات به وجود آمده در یک مکان است که در فرایند سنجش از دور، با استفاده از تصاویر دو یا چندزمانه انجام می‌گیرد (Liu et al., 2007; Munthali et al., 2020). در پژوهش حاضر نیز دقت طبقه‌بندی براساس شاخص کاپا و صحت کلی بررسی شد.

برای پردازش داده‌ها و اطلاعات از محیط گوگل ارث انجین (GEE)<sup>۱</sup> استفاده شد. شایان ذکر است که در پژوهش حاضر با توجه به استفاده از سامانه تحت وب GEE، نیازی به تصحیحات تصاویر بررسی‌شده وجود ندارد و به طور مستقیم به طبقه‌بندی تصاویر پرداخته شد. بدین ترتیب نقشه‌های طبقات کاربری اراضی جنگل‌های مانگروی خمیر و قشم در طی سال‌های پژوهش براساس شاخص نرمال‌شده تفاوت پهنه‌های آبی (NDWI)<sup>۲</sup>، استخراج و به دو کلاس آبی و غیرآبی طبقه‌بندی شد. در این شاخص از باند سبز مرئی و باند مادون قرمز نزدیک برای بارسازی پهنه‌های آبی و حذف

3. Normalized Difference Vegetation Index  
4. Normalized Difference Turbidity Index

1. Google Earth Engine  
2. Normalized Difference Water Index

استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های مدنظر (۱۹۸۹-۲۰۲۳) و همچنین رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین، سنجه‌های مناسبی برای کمی‌سازی تغییرات ساختار زیستگاه تعریف شد. رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین یکی از روش‌های اصلی شناسایی سطح یکپارچگی اکوسیستم‌هاست. این رویکرد به بررسی رابطه بین الگوها و عملکردها در مقیاس‌های مکانی و زمانی و تأثیرات فرایندهای اکولوژیک و زیستگاه‌های طبیعی می‌پردازد (Hersperger et al., 2021). انتخاب سنجه‌ها براساس نظر کارشناسان، بررسی روند تغییرات در جنگل‌های مانگرویی خمیر و قشم و همچنین مبانی نظری و سوابق پژوهشی مشابه در این زمینه صورت گرفت (Castillo et al., 2015; Jaeger et al., 2008; Liu et al., 2014; Babí-Almenar et al., 2019; Li et al., 2021; Rahimi et al., 2016; Zebardast et al., 2012; Barati et al., 2017; Haqverdi et al., 2018; Sadeghoghli et al., 2019; Sobhani et al., 2022). سپس سنجه‌های سیمای سرزمین برای بررسی تغییرات ساختاری، در محیط نرم‌افزار FRAGSTATS برای سال‌های مدنظر در سطح کلاس‌های کاربری اراضی/ پوشش اندازه‌گیری شد. سنجه‌های استفاده شده در این پژوهش مطابق جدول ۱ شامل اندازه مؤثر شبکه (MESH)<sup>۲</sup>، درصد سیمای سرزمین (PLAND)<sup>۳</sup>، تجمع (AI)<sup>۴</sup>، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI)<sup>۵</sup>، جداشدگی (SPLIT)<sup>۶</sup>، شاخص شکل سیمای سرزمین (LSI)<sup>۷</sup> و تراکم لکه (PD)<sup>۸</sup> هستند. از این رو A: مساحت کل لکه‌ها،  $a_{ij}$  و  $a_i$ : مساحت لکه مدنظر،  $e_{ik}$ : طول لبه لکه‌های  $i$  و  $k$ : N: تعداد لکه‌ها،  $n_i$ : تعداد لکه  $i$ :  $g_{ij}$ : تعداد سلول‌های مشابه و مجاور و  $p_i$  و  $p_{ij}$ : محیط لکه مدنظر است.

$$\text{رابطه ۳} \quad \text{NDTI} = \frac{(R-G)}{(R+G)}$$

در ادامه برای تعدیل اثر خاک و تفکیک پوشش‌های جنگلی مانگرو از شاخص طیفی اصلاح شده پوشش گیاهی و خاک (SAVI)<sup>۱</sup> بهره گرفته شد. این شاخص از باندهای قرمز و مادون قرمز به منظور استخراج پوشش گیاهی استفاده می‌کند. SAVI از ضریبی به نام تعدیل کننده اثر خاک بهره می‌برد که موجب می‌شود این شاخص اثر خاک را کاهش دهد. مطابق رابطه ۴، ضریب L رابطه معکوسی با مقدار تراکم پوشش گیاهی دارد و بین صفر و ۱ است. در این رابطه هرچه پوشش گیاهی بیشتر باشد L به صفر نزدیک‌تر خواهد بود و برعکس (Xia et al., 2020).

$$\text{رابطه ۴} \quad \text{SAVI} = (1+L) * \left[ \frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)} \right]$$

### انتخاب نقاط آموزشی

نمونه برداری یکی از مهم‌ترین مراحل طبقه‌بندی تصاویر است که در کیفیت و دقت طبقه‌بندی تأثیر بسزایی دارد. در این پژوهش نقاط نمونه برداری در سامانه تحت وب GEE به صورت بصری، به تعداد مدنظر و تصادفی انتخاب شدند. حداکثر ۱۵۰۰ نمونه انتخاب شد که از این مجموع (۳۷۵) نقطه به صورت تصادفی در هر طبقه، ۸۰۰ نمونه برای آموزش الگوریتم و ۷۰۰ نمونه برای آزمایش طبقه‌بندی بود. سپس تصاویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی شد و نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، مطابق توضیحات یادشده تهیه شد. بر این اساس، طبقات کاربری اراضی/پوشش در محدوده پژوهش شامل جنگل‌های مانگرو، پهنه‌های جزر و مدی، اراضی لخت و پهنه‌های آبی هستند. در شکل ۲، پراکندگی نقاط نمونه برداری شده در نقشه نمایش داده شده است.

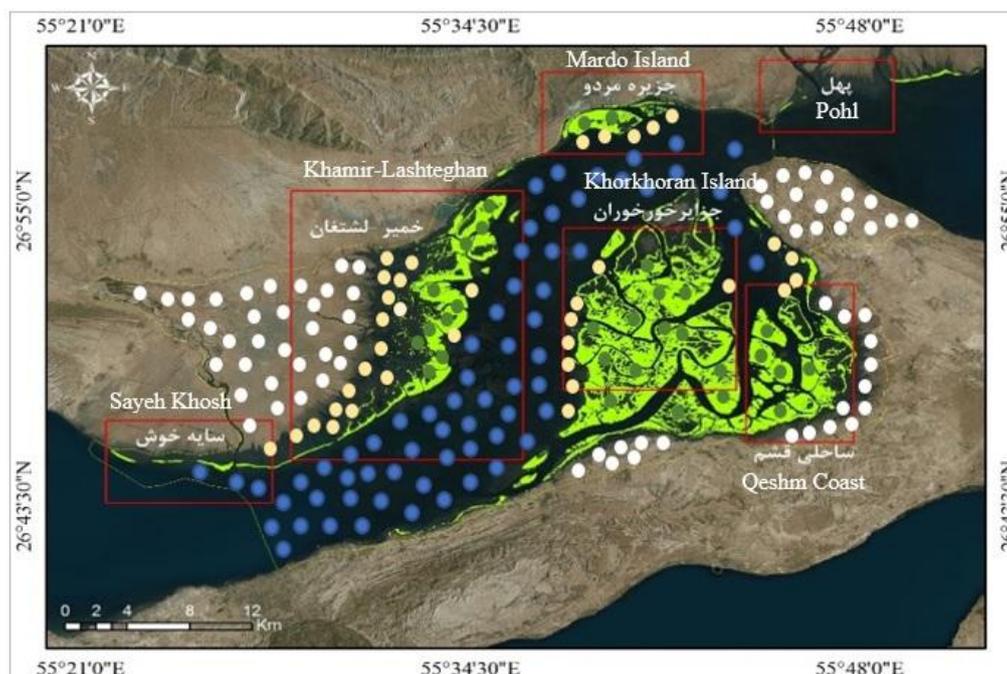
### تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح

#### کلاس‌های کاربری اراضی/ پوشش

با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی/ پوشش

2. Effective mesh size
3. Percentage of Landscape
4. Aggregation Index
5. Largest patch Index
6. Splitting Index
7. Landscape Shape Index
8. Patch Density

1. Soil Adjusted Vegetation Index



شکل ۲- نقشه پراکنده‌گی نقاط نمونه‌برداری شده  
Figure 2. Distribution map of sampled points

جدول ۱- سنجه‌های سیمای سرزمین بررسی شده در محدوده پژوهش

Table 1. Landscape metrics examined in the studied area

واحد Unit	روش محاسبه Calculation method	دامنه تغییر Range of change	سنجه‌ها Metrics
هکتار ha	$m_{\text{eff}} = A_{\text{total}} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i}{A_{\text{total}}} \right)^2 = \frac{1}{A_{\text{total}}} \sum_{i=1}^n A_i^2$	cell size / total area ≤ MESH ≤ total area	اندازه مؤثر شبکه Effective mesh size
درصد %	$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$	0 < PLAND ≤ 100	درصد سیمای سرزمین Percentage of landscape
درصد %	$AI = \left[ \sum_{i=1}^m \left( \frac{g_{ii}}{\max - g_{ii}} \right) P_i \right] (100)$	0 ≤ AI ≤ 100	تجمع Aggregation Index
درصد %	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$	0 < LPI ≤ 100	شاخص بزرگ‌ترین لکه Largest patch Index
-	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a^2_{ij}}$	1 ≤ SPLIT ≤ N	جداشدگی Splitting Index
-	$LSI = \frac{\sum_{k=1}^m e_{ik}}{2\sqrt{\pi_0}A}$	LSI ≥ 1	شاخص شکل سیمای سرزمین Landscape Shape Index
هکتار ha	$PD = \frac{n_i}{A} (10000)(100)$	PD > 0	تراکم لکه Patch Density

Source: Jaeger et al., 2008; McGarigal & Marks, 1995

درصد) زون ۲ است که ۲۷/۲۳ درصد از مساحت کل منطقه را به خود اختصاص داده است (Sharifi, 2021; Sharifi et al., 2021, 2024). در جدول ۲ و شکل ۳، مساحت و درصد زون‌های ۱ و ۲ در جنگل‌های مانگروی منطقه حفاظت‌شده حرا نشان داده شده است.

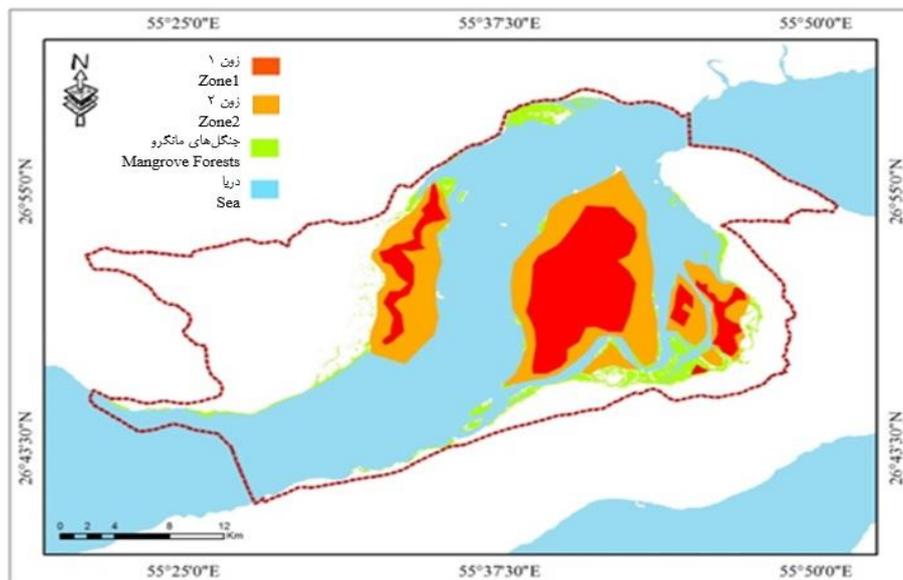
افزون بر این، تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح پهنه‌های حفاظتی زون‌های ۱ (امن) و ۲ (حفاظت‌شده) نیز بررسی شد. بر این اساس، جنگل‌های مانگروی منطقه حفاظت‌شده حرا دارای ۱۰۶۹۹/۷ هکتار (۱۲/۴۰ درصد) زون ۱ و ۱۲۷۹۳/۸ هکتار (۱۴/۸۳)

جدول ۲- مساحت و درصد زون‌های ۱ و ۲ در محدوده پژوهش

Table 2. Area and percentage of zones 1 and 2 in the studied area

درصد %	مساحت Area (ha)	زون Zone
12.40	10699.7	زون امن Safe Zone
14.83	12793.8	زون حفاظت‌شده Protected Zone

Source: Sharifi, 2021.



شکل ۳- نقشه زون‌های ۱ و ۲ در محدوده بررسی شده

Figure 3. Map of Zones 1 and 2 in the studied area  
(Source: Sharifi, 2021)

استفاده شد. از این‌رو، ابتدا نرمال یا غیرنرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف تحلیل شد و با توجه به اینکه سطح معنی‌داری کوچک‌تر از ۰/۰۵ است، در تحلیل داده‌ها از آزمون‌های ناپارامتریک استفاده شد و تغییرات کاربری اراضی/ پوشش و میزان ازهم‌گسیختگی زیستگاه در محدوده پژوهش با استفاده از آزمون ناپارامتریک کروسکال-والیس مقایسه شد. آزمون کروسکال-

تحلیل ارتباط بین میزان تغییرات کاربری

اراضی/ پوشش و میزان ازهم‌گسیختگی زیستگاه

در این پژوهش به‌منظور تحلیل ارتباط بین میزان تغییرات کاربری اراضی/ پوشش و میزان ازهم‌گسیختگی زیستگاه از آزمون‌های آماری توصیفی و استنباطی (آزمون کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۱</sup>، ضریب همبستگی اسپیرمن<sup>۲</sup> و آزمون کروسکال-والیس<sup>۳</sup>)

1. Kolmogorov-Smirnov
2. Spearman Correlation Coefficient
3. Kruskal-Wallis Test

والیس نوعی آزمون ناپارامتریک است که برای مقایسه چند گروه مستقل استفاده می‌شود.

## نتایج

### روند تغییرات کاربری اراضی / پوشش

نتایج ارزیابی دقت تصاویر، حاکی از آن است که مقادیر به‌دست‌آمده از مطلوبیت زیادی برخوردار بوده و در سطح قابل قبولی است (جدول ۳). همان‌طور که نتایج نشان داد، جنگل‌های مانگروی منطقه حفاظت‌شده حرا در سال ۲۰۲۳ با مساحت ۶۹۹۸ هکتار (۸/۱۱ درصد)، روند کاهشی در مقایسه با سال ۱۹۸۹ با مساحت ۷۷۰۹ هکتار (۸/۹۳ درصد) نشان

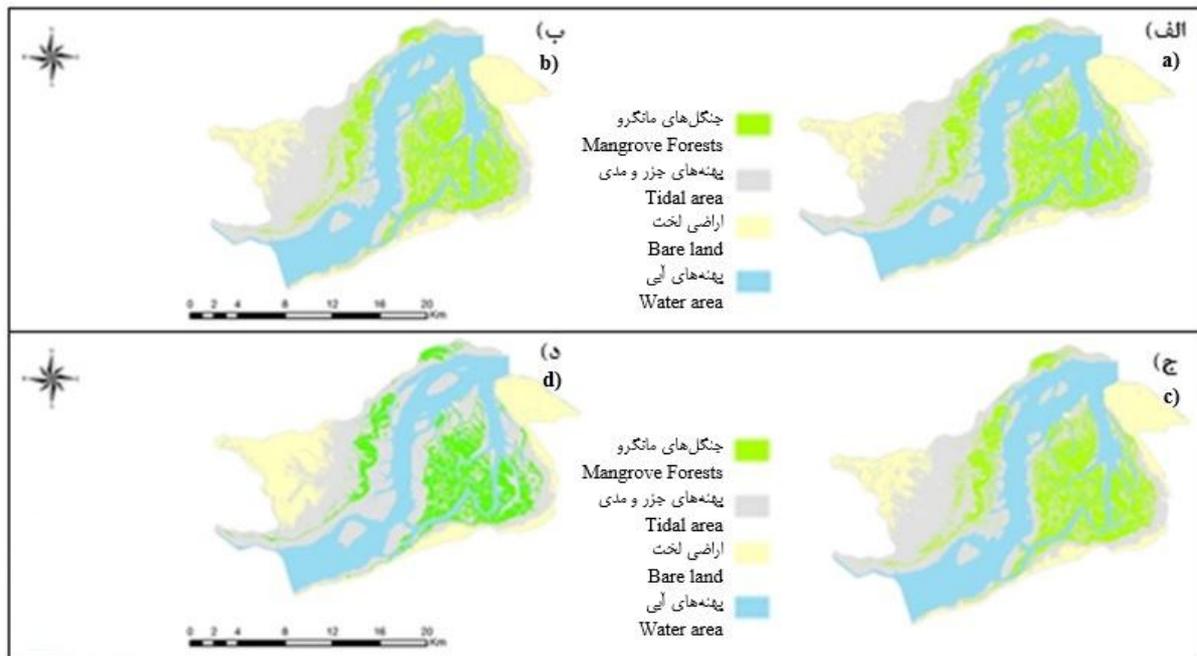
می‌دهند. در بین طبقات کاربری اراضی موجود در این منطقه، پهنه‌های جزر و مدی دارای بیشترین روند افزایشی با مساحت ۳۱۵۱ هکتار (۳/۶۵ درصد) در طی سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۲۳ هستند و در مقابل، پهنه‌های آبی بیشترین روند کاهشی با مساحت ۴۵۱۵- هکتار (۵/۲۳- درصد) را داشته‌اند. اراضی لخت نیز به‌عنوان یکی دیگر از طبقات کاربری اراضی، با مساحت ۱۷۳۰۱ هکتار (۲۰/۰۵ درصد) در سال ۲۰۲۳ به نسبت سال ۱۹۸۹ با مساحت ۱۵۲۲۴ هکتار (۱۷/۶۴ درصد) روند افزایشی نشان می‌دهند (جدول ۴ و شکل ۴).

جدول ۳- ارزیابی دقت تصاویر براساس صحت کلی و ضریب کاپا طی سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۲۳  
Table 3. Image accuracy assessment based on overall accuracy and kappa coefficient during the years 1989-2023

ضریب کاپا (%)	صحت کلی (%)	سال	تصاویر ماهواره‌ای
Kappa coefficient	Overall accuracy	Year	Satellite images
0.85	0.93	1989	L5-TM
0.88	0.95	1999	
0.86	0.90	2009	L7-ETM+
0.90	0.98	2023	L8, OLI-TIRS

جدول ۴- روند تغییرات کاربری اراضی/پوشش در جنگل‌های مانگرو خمیر و قشم طی سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۲۳  
Table 4. Trends in land use/cover changes in Khamir and Qeshm mangrove forests during 1989-2023

2023-1989		2023		2009		1999		1989		سال
مساحت		مساحت		مساحت		مساحت		مساحت		Year
Area		Area		Area		Area		Area		
درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	طبقات کاربری اراضی/پوشش
%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	Land use/coverage classes
-0.82	-711	8.11	6998	8.59	7418	8.69	7503	8.93	7709	جنگل‌های مانگرو Mangrove forests
3.65	3151	45.25	39038	44.34	38250	41.88	36128	41.60	35887	پهنه‌های جزر و مدی Tidal areas
2.41	2077	20.05	17301	18.94	16342	18.46	15931	17.64	15224	اراضی لخت Barren lands
-5.23	-4515	26.57	22921	28.10	24247	30.94	26694	31.80	27436	پهنه‌های آبی Water area



شکل ۴- نقشه روند تغییرات طبقات کاربری اراضی/پوشش طی سال‌های:

الف) ۱۹۸۹؛ ب) ۱۹۹۹؛ ج) ۲۰۰۹؛ د) ۲۰۲۳.

Figure 4. Land use/cover class map for the years:

a) 1989 and b) 1999, c) 2009 and d) 2023.

لکه و شاخص شکل سیمای سرزمین در سطح کلاس جنگل‌های مانگرو و پهنه‌های آبی کاهش یافته است که حاکی از کاهش سطح پوشش‌های جنگلی و لکه‌های آبی در طی این سال‌هاست. در مقابل این شاخص‌ها در سطح کلاس‌های پهنه جزر و مدی و اراضی لخت روند افزایشی دارند که با افزایش درصد لکه‌های جزر و مدی و لخت و در نتیجه کاهش پراکندگی این لکه‌ها همراه است.

افزون بر این، نتایج حاکی از آن است که از بین سنجه‌های بررسی شده، سنجه تجمع در سطح کلاس پهنه جزر و مدی با ۷۸۹۵ هکتار در سال ۲۰۲۳ در مقایسه با ۱۸۷۴ هکتار در سال ۱۹۸۹ از بیشترین روند افزایشی برخوردار بوده و سنجه جداسدگی در سطح کلاس اراضی لخت با مساحت ۲۸۲۱۹ هکتار در سال ۲۰۲۳ در مقایسه با ۵۴۳۷۴ هکتار در سال ۱۹۸۹ دارای بیشترین روند کاهشی است (شکل ۵).

## تحلیل از هم گسیختگی زیستگاه و تغییرات

### سنجه‌های سیمای سرزمین

به منظور ارزیابی روند تغییرات ساختار زیستگاه به بررسی طبقات کاربری اراضی/پوشش در چهار طبقه از جمله جنگل‌های مانگرو، پهنه جزر و مدی، اراضی لخت و پهنه‌های آبی پرداخته شد. سپس براساس سنجه‌های سیمای سرزمین، تغییرات زیستگاه در سطح کلاس کاربری‌های اراضی طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۳ تحلیل و کمی‌سازی شد (جدول ۵). سنجه‌های جداسدگی (SPLIT) و تراکم لکه (PD) در سطح کلاس جنگل‌های مانگرو و پهنه‌های آبی افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش از هم گسیختگی و پراکندگی لکه‌هاست، در حالی که در سطح کلاس‌های پهنه جزر و مدی و اراضی لخت، این شاخص‌ها روند کاهشی دارند. همچنین سنجه‌های اندازه مؤثر شبکه، درصد سیمای سرزمین، تجمع، شاخص بزرگ‌ترین

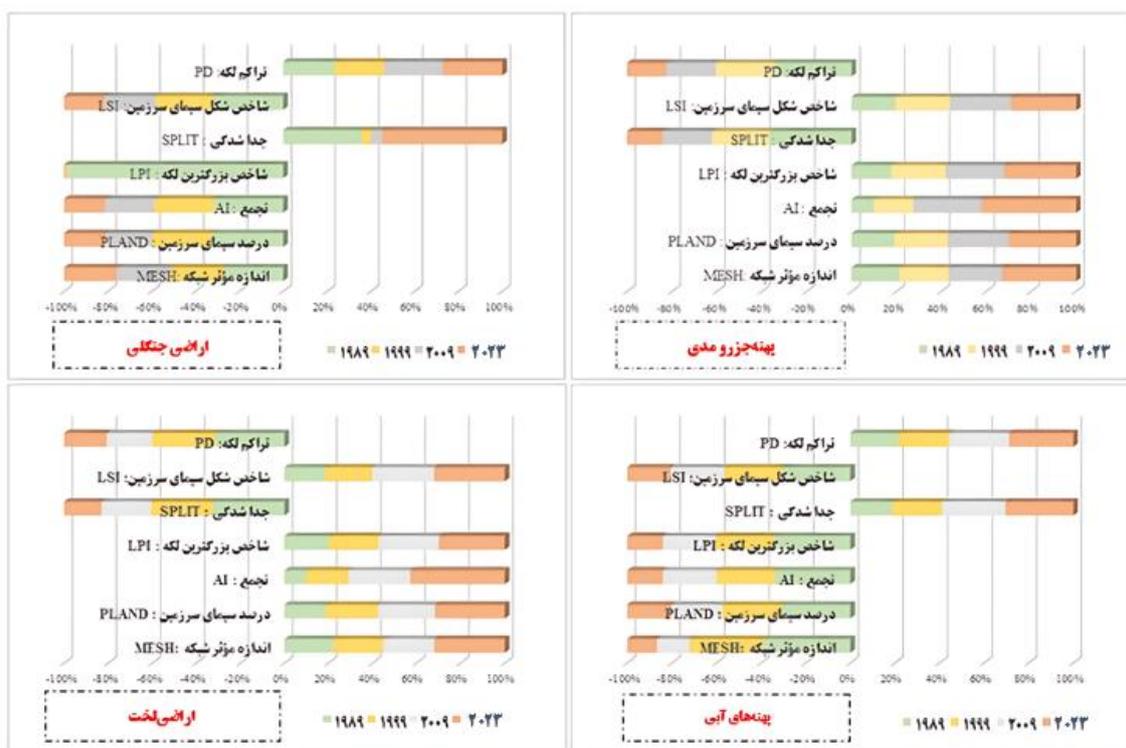
جدول ۵- تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس‌های کاربری اراضی/پوشش  
(سال‌های ۲۰۲۳-۱۹۸۹)

Table 5. Landscape metrics changes at the level of land use/cover classes (1989 to 2023)

رشد کاهشی/افزایشی Decreasing/increasing trend	اختلاف روند تغییرات Difference in the trend of changes 1989-2023	سال Year				سنجه‌ها Metrics	طبقات کاربری اراضی/پوشش Land use/land cover classes
		2023	2009	1999	1989		
-	-979	8503	8586	8690	9485	اندازه مؤثر شبکه (هکتار) Effective mesh size (ha)	جنگل‌های مانگرو Mangrove forests
-	-28.26	38.95	44.65	56.34	67.21	درصد سیمای سرزمین (%) Percentage of landscape (%)	
-	-26.73	38.75	46.87	56.37	65.48	تجمع (%) Aggregation Index (%)	
-	-31.06	34.25	45.69	52.33	65.31	شاخص بزرگ‌ترین لکه (%) Largest patch Index	
+	28042	81256	73654	62875	53214	جداشدگی Splitting Index	
-	-34.42	45.21	58.12	64.31	79.63	شاخص شکل Landscape Shape Index	
+	1.13	8.56	8.44	7.15	7.43	سیمای سرزمین تراکم لکه (هکتار) Patch Density (ha)	
+	362	1020	740	673	658	اندازه مؤثر شبکه (هکتار) Effective mesh size (ha)	
+	31.05	85.27	77.38	67.43	54.22	درصد سیمای سرزمین (%) Percentage of landscape (%)	
+	6021	7895	5671	3256	1874	تجمع (%) Aggregation Index (%)	
+	35.05	78.21	63.74	58.94	43.16	شاخص بزرگ‌ترین لکه (%) Largest patch Index	
-	-2680	1978	2864	3271	4658	جداشدگی Splitting Index	
+	26.11	78.45	73.24	65.78	52.34	شاخص شکل Landscape Shape Index	
-	-2.72	2.76	3.58	4.27	5.48	سیمای سرزمین تراکم لکه (هکتار) Patch Density (ha)	
+	349	1132	824	796	783	اندازه مؤثر شبکه (هکتار) Effective mesh size (ha)	اراضی لخت Barren lands
+	32.2	78.52	64.14	58.63	46.32	درصد سیمای سرزمین (%) Percentage of landscape (%)	
+	5037	6568	4321	2895	1531	تجمع (%) Aggregation Index (%)	
+	27.76	84.23	77.18	63.32	56.47	شاخص بزرگ‌ترین لکه (%) Largest patch Index	
-	-26155	28219	37564	46928	54374	جداشدگی Splitting Index	
+	28.82	67.34	58.96	44.81	38.52	شاخص شکل سیمای سرزمین Landscape Shape Index	
-	-2.49	3.94	4.25	5.83	6.43	تراکم لکه (هکتار)	

ادامه جدول ۵

						Patch Density (ha)
-	-1138	594	653	1483	1732	اندازه مؤثر شبکه (هکتار)
-	-30.21	55.11	63.41	74.22	85.32	Effective mesh size (ha)
-	-2841	2546	3856	4215	5387	درصد سیمای سرزمین (%)
-	-30.12	26.15	38.67	43.18	56.27	Percentage of landscape (%)
+	28417	73542	68752	53657	45125	تجمع (%)
-	-31.47	53.77	66.21	71.13	85.24	Aggregation Index (%)
+	2.13	8.35	7.85	6.58	6.22	شاخص بزرگ‌ترین لکه (%)
						Largest patch Index
						جداشدگی
						Splitting Index
						شاخص شکل سیمای سرزمین
						Landscape Shape Index
						تراکم لکه (هکتار)
						Patch Density (ha)



شکل ۵- نمودار تغییرات سنج‌های سیمای سرزمین در محدوده بررسی شده (سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۲۳)

Figure 5. Diagram of changes in landscape metrics in the studied area (1989 to 2023)  
 PD: Patch Density; LSI: Landscape Shape Index; SPLIT: Splitting Index; LPI: Largest patch Index; AI: Aggregation Index; PLAND: Percentage of landscape; MESH: Effective mesh size

تغییرات سنج‌های سیمای سرزمین در سطح پهنه‌های حفاظتی (زون‌های امن و حفاظت‌شده) در ادامه به‌منظور بررسی تغییرات ساختار لکه‌های حفاظتی، به همپوشانی و تحلیل پهنه‌های زون امن (زون ۱) و حفاظت‌شده (زون ۲) در سطح کلاس کاربری اراضی/ پوشش و کمی‌سازی این لکه‌ها با

سنج‌های سیمای سرزمین پرداخته شد (جدول ۶ و شکل ۵). مطابق نتایج به‌دست‌آمده، سنج‌های جداشدگی و تراکم لکه در پهنه‌های حفاظتی افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش ازهم‌گسیختگی (جداشدگی) و پراکندگی لکه‌هاست. در مقابل سنج‌های اندازه مؤثر شبکه، درصد سیمای سرزمین،

به‌دست‌آمده نشان داد که بیشترین روند جداشدگی و تراکم لکه‌ها به ترتیب با اختلاف روند تغییرات ۳۱۴۱۲ و ۱/۳۹ لکه در طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۳، مربوط به پهنه‌های حفاظت‌شده (زون ۲) است.

تجمع، شاخص بزرگ‌ترین لکه و شاخص شکل سیمای سرزمین در پهنه‌های زون امن و حفاظت‌شده، روند کاهشی دارند که حاکی از کاهش یکپارچگی در ساختار زیستگاه، اندازه لکه‌ها و از طرف دیگر افزایش تعداد و پراکندگی آنهاست. افزون‌بر این نتایج

جدول ۶- تغییرات سنج‌های سیمای سرزمین در سطح پهنه‌های حفاظتی (سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۳)

Table 6- Changes in landscape metrics at the level of protected zones (1989 to 2023)

روند کاهشی/افزایشی Decreasing/increasing trend	اختلاف روند تغییرات Difference in the trend of changes 1989-2023	سال Year				سنج‌ها Metrics	پهنه‌های حفاظتی Protective zones
		2023	2009	1999	1989		
-	-1730	7026	7455	8324	8756	اندازه مؤثر شبکه (هکتار) Effective mesh size (ha)	زون امن Safe zone
-	-21.68	32.64	40.28	48.11	54.32	درصد سیمای سرزمین (%) Percentage of landscape (%)	
-	-2080	3932	4637	5856	6012	تجمع (%) Aggregation Index (%)	
-	-33.84	38.47	53.26	66.54	72.31	شاخص بزرگ‌ترین لکه (%) Largest patch Index	
+	26391	75258	68921	55876	48867	جداشدگی Splitting Index	
-	-25.87	41.37	53.46	60.14	67.24	شاخص شکل سیمای سرزمین Landscape Shape Index	
+	1.03	7.45	7.26	6.88	6.42	تراکم لکه (هکتار) Patch Density (ha)	زون حفاظت‌شده Protected zone
-	-2099	6324	7127	8056	8423	اندازه مؤثر شبکه (هکتار) Effective mesh size (ha)	
-	-24.46	38.11	45.36	50.23	62.57	درصد سیمای سرزمین (%) Percentage of landscape (%)	
-	-2173	3751	4832	5743	5924	تجمع (%) Aggregation Index (%)	
-	-34.17	34.27	48.63	60.32	68.44	شاخص بزرگ‌ترین لکه (%) Largest patch Index	
+	31412	74268	65231	58475	42856	جداشدگی Splitting Index	
-	-23.68	37.62	54.22	58.46	61.30	شاخص شکل سیمای سرزمین Landscape Shape Index	
+	1.39	8.11	7.87	7.23	6.72	تراکم لکه (هکتار) Patch Density (ha)	

این‌رو به‌منظور سنجش ارتباط بین میزان تغییرات کاربری اراضی/پوشش و ازهم‌گسیختگی زیستگاه، از ضریب همبستگی اسپیرمن به‌عنوان یکی از آزمون‌های ناپارامتریک استفاده شد (جدول ۸). نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که ارتباط معنی‌دار (در سطح ۹۵ درصد) بین میزان تغییرات کاربری

تحلیل ارتباط بین میزان تغییرات کاربری اراضی/پوشش و ازهم‌گسیختگی زیستگاه نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (جدول ۷)، نشان داد که توزیع نمونه‌های ثبت‌شده و جمع‌آوری‌شده در دامنه زمانی پژوهش غیرنرمال است (سطح معنی‌داری از  $\alpha=0/05$  کوچک‌تر است). از

نتایج آزمون کروسکال - والیس نشان می‌دهد، مقدار ۰/۰۳۸ از احتمال خطا ۰/۰۵ کوچک‌تر است؛ از این رو می‌توان گفت که اختلاف معنی‌داری بین طبقات کاربری اراضی/ پوشش مشهود است و همچنین فرض برابری میانگین رد می‌شود.

اراضی/پوشش و ازهم‌گسیختگی زیستگاه طی سال‌های مدنظر وجود دارد؛ بدین معنا که با افزایش تغییرات کاربری اراضی/ پوشش، ازهم‌گسیختگی زیستگاه نیز افزایش یافته است. در ادامه به مقایسه میزان ازهم‌گسیختگی زیستگاه در طبقات کاربری اراضی/پوشش پرداخته شد (جدول ۹). همان‌طور که

جدول ۷- نتایج آزمون کولموگوروف- اسمیرنوف نمونه‌های طبقات کاربری اراضی/پوشش در محدوده پژوهش

Table 7. Results of Kolmogorov-Smirnov test of land use/land cover classes samples in the studied area

نقاط نمونه برداری شده Sampled points	آماره‌های آزمون Test statistics
64.40	میانگین Mean
95.50	انحراف معیار Standard deviation
1.58	آماره Z Z-statistic
0.002	سطح معنی‌داری Significance level

جدول ۸- بررسی ارتباط بین میزان تغییرات کاربری اراضی/ پوشش و ازهم‌گسیختگی زیستگاه

Table 8. Investigating the relationship between the rate of land use/land cover changes on habitat fragmentation

میزان ازهم‌گسیختگی زیستگاه Amount of habitat fragmentation	میزان تغییرات کاربری اراضی/پوشش Amount of land use/land cover changes	آماره‌های آزمون Test statistics	تحلیل ارتباط Relationship analysis
0.763	1	اسپیرمن Spearman	میزان تغییرات کاربری اراضی/پوشش
0.023		سطح معنی‌داری Significance level ( $\alpha=0.05$ )	Amount of land use/land cover changes
1500	1500	تعداد Number	
1	0.763	اسپیرمن Spearman	میزان ازهم‌گسیختگی زیستگاه
	0.000	سطح معنی‌داری Significance level ( $\alpha=0.05$ )	Amount of habitat fragmentation
1500	1500	تعداد Number	

-ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری از  $\alpha=0.05$ .

جدول ۹- مقایسه میزان ازهم‌گسیختگی زیستگاه در بین طبقات کاربری اراضی/پوشش با استفاده از آزمون کروسکال - والیس

Table 9. Comparison of habitat fragmentation among land use/land cover classes using the Kruskal-Wallis test

سطح معناداری Significance level	کای مربع Chi-square	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین رتبه Average rating	تعداد نمونه Number of samples	طبقات Classes
0.038	26.08	374	102.23	375	جنگل‌های مانگرو Mangrove forests
			17.52	375	پهنه جزر و مدی

سطح معناداری Significance level	کای مربع Chi-square	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین رتبه Average rating	تعداد نمونه Number of samples	طبقات Classes
			63.72	375	Tidal areas اراضی لخت
			163.11	375	Barren lands پهنه‌های آبی Water area

جدول ۱۰- نتایج پس‌آزمون (آزمون تعقیبی)

Table 10. Post-hoc pairwise comparisons results

95% CI	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Average rating	تعداد نمونه Number of samples	طبقات Classes
(34.37, 41.10)	3.36	102.23	375	جنگل‌های مانگرو Mangrove forests
(28.20, 34.93)	5.50	17.52	375	پهنه جزر و مدی Tidal areas
(32.62, 39.35)	3.73	63.72	375	اراضی لخت Barren lands
(37.70, 44.43)	2.64	163.11	375	پهنه‌های آبی Water area

## بحث

شد. آنها بیان کردند که جنگل‌های مانگرو در طی دهه‌های اخیر به دلیل توسعه فعالیت‌های انسانی روند کاهشی داشته است. نتایج پژوهش Yaghoubzadeh et al. (2021) نیز حاکی از آن است که توسعه فعالیت‌های انسانی در مجاورت رویشگاه‌های مانگرو و همچنین احداث اسکله و بندر سبب تبدیل و تغییر کاربری‌های اراضی و کاهش جنگل‌های مانگرو در جنوب کشور شده است. همچنین نتایج پژوهش Wibowo & Supriatna (2011) نشان داد که رشد جمعیت، توسعه فعالیت‌های انسانی و پیامدهای آن احتمالاً در ۲۰ سال آینده بین ۲۰ تا ۶۰ درصد از جنگل‌های مانگرو را نابود خواهد کرد. نتایج پژوهش Jafarnia et al. (2012) نیز حاکی از آن است که توسعه زیرساخت‌های انسانی همچون اسکله‌ها، بندرها و سکونتگاه‌ها سبب کاهش سطح جنگل‌های مانگرو و تبدیل آنها به اراضی لخت و کاربری‌های غیرطبیعی شده است.

همان‌طور که نتایج سنجش‌های سیمای سرزمین نشان داد، سنجش‌های جداسازی (SPLIT) و تراکم لکه (PD) در سطح کلاس جنگل‌های مانگرو و

با توجه به اینکه در طی دهه‌های اخیر، تغییرات کاربری اراضی/ پوشش، سبب کاهش وسعت جنگل‌های مانگرو شده است (Sobhani & Danehkar, 2024)، در پژوهش حاضر به ارزیابی روند تغییرات ساختار زیستگاه جنگل‌های مانگرو منطقه حفاظت‌شده حرا پرداخته شد. مطابق نتایج، وسعت جنگل‌های مانگروی خمیر و قشم در سال ۲۰۲۳ در مقایسه با سال ۱۹۸۹ روند کاهشی نشان می‌دهد. همچنین در این منطقه، پهنه‌های جزر و مدی بیشترین روند افزایشی و در مقابل، پهنه‌های آبی بیشترین روند کاهشی را داشته است. به‌طور کلی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روند افزایش تغییرات کاربری اراضی و کاهش جنگل‌های مانگرو عبارت است از توسعه زیرساخت‌هایی مانند اسکله‌ها و بندرهای تفریحی و تجاری، رشد جمعیت و توسعه سکونتگاه‌ها، افزایش بی‌رویه فعالیت‌های گردشگری، بهره‌وری بیش از حد توان منطقه، توسعه آبی‌پروری و جنگل‌زدایی. در این زمینه نتایج پژوهش‌های Erfanfard et al. (2022) و Mafi-Gholami et al. (2020) نیز تأیید

نشان‌دهنده افزایش ازهم‌گسیختگی (جداشدگی) و پراکندگی لکه‌هاست. در مقابل سنجه‌های اندازه مؤثر شبکه، درصد سیمای سرزمین، تجمع، شاخص بزرگ‌ترین لکه و شاخص شکل سیمای سرزمین در پهنه‌های زون امن و حفاظت‌شده، روند کاهشی دارند که حاکی از کاهش یکپارچگی در ساختار زیستگاه، اندازه لکه‌ها و از طرف دیگر افزایش تعداد و پراکندگی آنهاست. از این‌رو با توجه به اینکه بخش گسترده‌ای از جنگل‌های مانگرو در پهنه‌های حفاظتی (زون‌های ۱ و ۲) پراکنده شده‌اند، حفاظت از این رویشگاه‌های طبیعی و کنترل فعالیت‌های بی‌رویه انسانی ضروری است. ازهم‌گسیختگی و کاهش عملکرد بوم‌شناختی در زیستگاه‌های جنگلی، یکی از تهدیدهای مهم برای حفاظت از این ذخایر ارزشمند طبیعی است. تغییر در توزیع فضایی عناصر ساختاری سبب کاهش پیوستگی در سیمای سرزمین یا میزان سهولت گردش ماده و جریان‌های حیاتی اکوسیستم‌های طبیعی (کاهش تنوع زیستی، اختلال در زنجیره‌های غذایی، تأثیر بر گونه‌های مهم وابسته به جنگل‌های مانگرو) می‌شود. در این زمینه اکوسیستم‌های جنگلی در صورت مدیریت مطلوب، می‌توانند کارکردهایی از جمله حفظ فرایندهای اکولوژیکی و حیات‌بخش، تنوع ژنتیکی، فراهم کردن زیستگاه برای گونه‌های حساس و بسیاری خدمات دیگر را عرضه کنند.

تحلیل ارتباط بین میزان تغییرات کاربری اراضی/پوشش و ازهم‌گسیختگی زیستگاه حاکی از وجود ارتباط معنی‌دار بین میزان تغییرات کاربری اراضی/پوشش و ازهم‌گسیختگی زیستگاه طی سال‌های مدنظر است. بدین معنا که با افزایش تغییرات کاربری اراضی/پوشش، ازهم‌گسیختگی زیستگاه نیز افزایش یافته است. از این‌رو می‌توان گفت که اختلاف معنی‌داری بین طبقات کاربری اراضی/پوشش دیده می‌شود و همچنین فرض برابری میانگین رد می‌شود.

پهنه‌های آبی افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش ازهم‌گسیختگی و پراکندگی لکه‌هاست، در حالی که در سطح کلاس‌های پهنه جزر و مدی و اراضی لخت، این شاخص‌ها روند کاهشی دارند. همچنین سنجه‌های اندازه مؤثر شبکه، درصد سیمای سرزمین، تجمع، شاخص بزرگ‌ترین لکه و شاخص شکل سیمای سرزمین در سطح کلاس جنگل‌های مانگرو و پهنه‌های آبی کاهش یافته است که حاکی از کاهش سطح پوشش‌های جنگلی و لکه‌های آبی در طی این سال‌هاست. در مقابل این شاخص‌ها در سطح کلاس‌های پهنه جزر و مدی و اراضی لخت روند افزایشی نشان می‌دهند که با افزایش درصد لکه‌های جزر و مدی و لخت و در نتیجه کاهش پراکندگی این لکه‌ها همراه است.

افزون‌بر این، نتایج حاکی از آن است که از بین سنجه‌های بررسی‌شده، سنجه تجمع در سطح کلاس پهنه جزر و مدی با ۷۸۹۵ هکتار در سال ۲۰۲۳ در مقایسه با ۱۸۷۴ هکتار در سال ۱۹۸۹ از بیشترین روند افزایشی برخوردار بوده و سنجه جداشدگی در سطح کلاس اراضی لخت با مساحت ۲۸۲۱۹ هکتار در سال ۲۰۲۳ در مقایسه با ۵۴۳۷۴ هکتار در سال ۱۹۸۹ دارای بیشترین روند کاهشی است. در این زمینه در پژوهش Mafi-Gholami et al. (2018) به نرخ پیشروی و پسروی در جنگل‌های مانگروی خمیر-قشم به دلیل مخاطرات محیطی از جمله فرسایش و رسوب‌گذاری اشاره شده است که این نتایج حاکی از کاهش سطح جنگل‌های مانگرو و افزایش ازهم‌گسیختگی در این رویشگاه‌های طبیعی است. Bryan-Brown et al. (2020) بیان کردند که تکه‌تکه شدن زیستگاه در مقیاس سیمای سرزمین، مهم‌ترین فاکتور در پراکنش جنگل‌های مانگرو است. از این‌رو بر لزوم برنامه‌ریزی و اجرای برنامه‌های بازسازی اراضی و حمایت از این اکوسیستم‌های طبیعی تأکید می‌شود. مطابق نتایج به‌دست‌آمده سنجه‌های جداشدگی و تراکم لکه در پهنه‌های حفاظتی افزایش یافته است که

زیرساخت و توسعه در این منطقه باید با توجه به طرح‌های مدیریتی (زون‌بندی) و ارزیابی‌های محیط زیستی در خارج زون‌های حفاظتی منطقه انجام گیرد. از سویی، تغییرات کاربری‌ها باید در خارج از مرز مدیریتی منطقه محدود شود تا کاهش یکپارچگی و ازمهم‌گسیختگی زیستگاه در جنگل‌ها به کمترین حد برسد. همچنین باید برنامه پایشی مستمر و کوتاه‌مدتی (دست‌کم ۱ تا ۳ سال) با هدف نظارت بر فعالیت‌های انسانی و هر گونه توسعه (احداث بندرها و اسکله‌ها، توسعه آبی‌پروری، توسعه سکونتگاه‌ها، افزایش بی‌رویه فعالیت‌های گردشگری) در این منطقه صورت گیرد. به دلیل وجود رابطه مستقیم و معنادار بین این تغییرات و میزان همبستگی زیستگاه، اقدامات کنترلی می‌تواند به کاهش همبستگی و یکپارچگی زیستگاه (کاهش روند افزایشی تغییرات SPLIT و PD) کمک کند.

### سپاسگزاری

این مقاله با همکاری و مساعدت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF)، برگرفته از طرح شماره ۴۰۰۵۹۷۲ به انجام رسیده است که نویسندگان بدین وسیله سپاسگزاری خود را ابراز می‌دارند.

### References

- Adame, M.F., Connolly, R.M., Turschwell, M.P., Lovelock, C.E., Fatoyinbo, T., Lagomasino, D., Goldberg, L.A., Holdorf, J., Friess, D.A., & Sasmito, S.D. (2021). Future carbon emissions from global mangrove forest loss. *Global Change Biology*, 27, 2856–2866. <https://doi.org/10.1111/gcb.15571>
- Ao, Y., Li, H., Zhu, L., Ali, S., & Yang, Z. (2018). The linear random forest algorithm and its advantages in machine learning assisted logging regression modeling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 776-789. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.067>
- Babí Almenar, J., Rugani, B., Geneletti, D., & Brewer, T. (2019). Integration of ecosystem services into a conceptual spatial planning framework based on a landscape ecology perspective. *Landscape Ecology*, 33, 2047–2059. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0727-8>
- Banks-Leite, C., Ewers, R.M., Folkard-Tapp, H., & Fraser, A. (2020). Countering the effects of habitat loss, fragmentation, and degradation through habitat restoration. *One Earth*, 3(6), 672-676. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.11.016>
- Barati, B., Jahani, A., Zebardast, L., & Rayegani, B. (2017). Integration assessment of the protected areas using landscape ecological approach (Case Study: Kolah Ghazy National Park and Wildlife

این پژوهش علی‌رغم بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی و ارزیابی میزان ازمهم‌گسیختگی زیستگاه در منطقه حفاظت‌شده حرا، با محدودیت‌هایی همچون تشخیص دقیق تغییرات، وضوح مکانی و دسترسی به داده‌ها همراه بود. از این رو به منظور افزایش صحت نتایج، به اعتبارسنجی یافته‌ها از طریق مطالعات میدانی، دریافت نظر متخصصان و کارشناسان مرتبط و اسناد و پژوهش‌های مشابه پرداخته شد. به منظور تکمیل پژوهش حاضر و پیشنهاد برای تحقیقات آتی نیز می‌توان به تحلیل‌های رگرسیونی یا مدل‌سازی (مانند رگرسیون لجستیک یا مدل‌های فضایی) برای شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر تغییرات کاربری اراضی / پوشش در این منطقه پرداخت.

### نتیجه‌گیری

جنگل‌های مانگروی منطقه حفاظت‌شده حرا از ذخایر ارزشمند طبیعی با حساسیت‌های زیستی و محدودیت‌های شدید اکولوژیک است و به مدیریت یکپارچه و برنامه‌ریزی جامع نیاز دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان در کنترل عوامل تأثیرگذار بر روند تغییرات کاربری اراضی / پوشش در این رویشگاه‌های طبیعی کمک کند. در این زمینه، اجرای پروژه‌های پیشنهادی و احداث هر گونه

- Refuge). *Town and country planning*, 9(1), 153-168. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/JTCP.2017.61412>
- Bryan-Brown, D.N., Connolly, R.M., Richards, D.R., Adame, F., Friess, D.A., & Brown, C.J. (2020). Global trends in mangrove forest fragmentation. *Scientific reports*, 10(1), 7117. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63880-1>
- Carugati, L., Gatto, B., Rastelli, E., Lo Martire, M., Coral, C., Greco, S., & Danovaro, R. (2018). Impact of mangrove forests degradation on biodiversity and ecosystem functioning. *Scientific reports*, 8(1), 13298. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31683-0>
- Castillo, E.M.D., Garcia-Martin, A., Aladren, L.A.L., & Luis, M.D. (2015). Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain). *Applied Geography*, 62, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.002>
- Erfanifard, Y., Lotfi Nasirabad, M., & Stereńczak, K. (2022). Assessment of Iran's mangrove forest dynamics (1990–2020) using Landsat time series. *Remote Sensing*, 14(19), 4912. <https://doi.org/10.3390/rs14194912>
- Fischer, J., Wirtz, S., & Scherer, V. (2023). Random forest classifier and neural network for fraction identification of refuse-derived fuel images. *Fuel*, 341, 127712. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127712>
- Gouvêa, L.P., Serrão, E.A., Cavanaugh, K., Gurgel, C.F., Horta, P.A., & Assis, J. (2022). Global impacts of projected climate changes on the extent and aboveground biomass of mangrove forests. *Diversity and Distributions*, 28, 2349–2360. <https://doi.org/10.1111/ddi.13631>
- Haqverdi, F., Jahani, A., Zavarat, L., Makhdoom, M., & Goshtasb, H. (2018). Quantification of wildlife habitat fragmentation using landscape ecology approach (case study: Lar National Park and Verjin Protected Area). *Quarterly Journal of Animal Environment Research*, 10(4), 23-34. (In Persian)
- Hermansen, T.D., Minchinton, T.E., & Ayre, D.J. (2017). Habitat fragmentation leads to reduced pollinator visitation, fruit production and recruitment in urban mangrove forests. *Oecologia*, 185(2), 221-231. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-017-3941-1>
- Hersperger, A.M., Grădinaru, S.R., Pierri Daunt, A.B., Imhof, C.S., & Fan, P. (2021). Landscape ecological concepts in planning: review of recent developments. *Landscape ecology*, 36, 2329–2345.
- Islam, K., Rahman, M.F., & Jashimuddin, M. (2018). Modeling land use change using cellular automata and artificial neural network: The case of Chunati Wildlife Sanctuary, Bangladesh. *Ecological indicators*, 88, 439-453. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.047>
- Jaeger, J.A.G., Bertiller, R., Schwick, C., Muller, K., Steinmeier, C., Ewald, K.C., & Ghazoul, J. (2008). Implementing landscape fragmentation as an indicator in the swiss monitoring system of sustainable development. *Journal of Environmental Management*, 88, 737–751. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.043>
- Jafarnia, S., Hojjati, S.M., & Kooch, Y. (2012). The effect of soil and water characteristics on the vegetative parameters of Hara trees in the Qeshm mangrove habitat, Hormozgan province. *Environmental Sciences*, 9(4), 134-148. (In Persian).
- Jaramillo, J. J., Rivas, C. A., Oteros, J., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2023). Forest fragmentation and landscape connectivity changes in Ecuadorian mangroves: some hope for the future? *Applied Sciences*, 13(8), 5001. <https://doi.org/10.3390/app13085001>
- John, J., Nandhini, A., Velayudhaperumal Chellam, P., & Sillanpää, M. (2022). Microplastics in mangroves and coral reef ecosystems: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 397–416.
- Khan, A.R., Khan, A., Masud, S., & Rahman, R.M. (2021). Analyzing the Land Cover Change and Degradation in Sundarbans Mangrove Forest Using Machine Learning and Remote Sensing Technique. In *Advances in Computational Intelligence: 16th International Work-Conference on*

Artificial Neural Networks, IWANN 2021, Virtual Event, June 16–18, 2021, Proceedings, Part II 16 Springer International Publishing, 429-438.

Lacaux, J.P., Toure, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J.A., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>

Li, L., Fassnacht, F.E., & Burgi, M. (2021). Using a landscape ecological perspective to analyze regime shifts in social–ecological systems: a case study on grassland degradation of the Tibetan Plateau. *Landscape Ecology*, 36, 2277–2293.

Liu, J., Dietz, T., Stephen, R., Carpenter, S.R., & Taylor, W.W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317.

Mafi Gholami, D., Baharlouii, M., & Mahmoudi, B. (2018). Erosion and accretion monitoring in mangrove forests using remote sensing and Digital Shoreline Analysis System (DSAS)(Case study: Hara Biosphere reserve). *Journal of Environmental Studies*, 43(4), 633-646. (In Persian).

Mafi-Gholami, D., Zenner, E.K., Jaafari, A., & Bui, D.T. (2020). Spatially explicit predictions of changes in the extent of mangroves of Iran at the end of the 21st century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 237, 106644. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106644>

McGarigal, K., & Marks B.J. (1995). FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. Forest Science Department. Corvallis: Oregon State University.

Morshed, S.R., Fattah, Md.A., Haque, Md.N., & Morshed, S.Y. (2021). Future ecosystem service value modeling with land cover dynamics by using machine learning based Artificial Neural Network model for Jashore city, Bangladesh. *Physics and Chemistry of the Earth*, 126, 103021.

Munthali, M., Mustak, Sk., Abiodun, A., & Davis, N. (2020). Modelling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid Cellular Automata and Markov model. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 17(4), 100276.

Peacock, M.M. (2025). Negotiating a Fragmented World: What Do We Know, How Do We Know It, and Where Do We Go from Here?. *Diversity*, 17(3), 200.

Rahimi, E., SALMAN, M.A., & Soltanian, S. (2016). A comparison of continuous and discrete indices in measuring Gorgan forest landscape fragmentation. *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 7(3), 30-45. (In Persian).

Roy, S.K., Mojumder, P., Chowdhury, M.A.A., & Hasan, M.M. (2025). Evaluating mangrove forest dynamics and fragmentation in Sundarbans, Bangladesh using high-resolution Sentinel-2 satellite images. *Global Ecology and Conservation*, 58, e03493. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2025.e03493>

Sadeghovgli, R., Jahani, A., Shabani, A.A., & Ghoshtasb, H. (2019). Quantification of landscape fragmentation as an indicator for assessing wildlife habitat (Case study: Jajrood Protected Area). *Journal of Animal Environment*, 11(1). (In Persian)

Sagar, S., Roberts, D., Bala, B., & Lymburner, L. (2017). Extracting the intertidal extent and topography of the Australian coastline from a 28-year time series of Landsat observations. *Remote sensing of environment*, 195, 153-169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.009>.

Sharifi, N. (2021). Developing Comprehensive Model for Zoning Protected Areas Based on Multi Criteria Decision Methods (Case Study: HARA Protected Area). Thesis for Environmental Science, Science & Research Branch, Islamic Azad University, Faculty of Environmental Science and Natural Resources, 261. (In Persian).

Sharifi, N., Danehkar, A., Robati, M., Khorasani, N.A., & Rajae, T. (2021). Developing decision algorithm for determination of protection zones in protected areas (case study: Hara Protected Area). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(8), 2237-2250.

- Sharifi, N., Danehkar, A., Robati, M., Khorasani, N.A., & Rajaei, T. (2024). Developing a Model for Zoning Protected Areas Based on the Entropy Shannon Technique (Case Study: Mangrove Protected Area). *International journal of environmental science and technology*, 26(10), 93-109.
- Shimu, S.A., Aktar, M., Afjal, M.I., Nitu, A.M., Uddin, M.P., & Al Mamun, M. (2019). NDVI based change detection in Sundarban Mangrove Forest using remote sensing data. In 2019 4th *international conference on electrical information and communication technology (EICT)* (1-5). IEEE.
- Sobhani, P., & Danehkar, A. (2023b). Spatial-temporal changes in mangrove Forests for Analyzing habitat Integrity: A case of Hara Biosphere Reserve, Iran, *Environmental and Sustainability Indicators*, 20, 100293.
- Sobhani, P., Esmaeilzadeh, H., Barghjelveh, S., Sadeghi, S.M.M., & Marcu, M.V. (2022). Habitat integrity in protected areas threatened by LULC changes and fragmentation: A case study in Tehran province, *Iran. Land*, 11(1), 6.
- Sobhani, P., & Danehkar, A. (2023/a). Natural Features and Management Areas of Khamir and Gheshm Mangrove Forests. *Iran Nature*, 8(4), 97-112. (In Persian).
- Sobhani, P., & Danehkar, A. (2024). The trend of land use changes and the level of ecological risk in the Hara Protected Area. *Sustainable Development of Geographical Environment*, 5(9), 1-19. (In Persian).
- Sudhana, S.A., Sakti, A.D., Syahid, L.N., Prasetyo, L.B., Irawan, B., Kamal, M., & Wikantika, K. (2020). Detecting mangrove deforestation using multi land use land cover change datasets: a comparative analysis in Southeast Asia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 500(1), 012014. IOP Publishing.
- Talukdar, S., Eibek, K.U., Akhter, S., Ziaul, S.K., Islam, A.R.M. T., & Mallick, J. (2021). Modeling fragmentation probability of land-use and land-cover using the bagging, random forest and random subspace in the Teesta River Basin, Bangladesh. *Ecological indicators*, 126, 107612.
- Wang, Z., Wang, T., Zhang, X., Wang, J., Yang, Y., Sun, Y., & Kuca, K. (2024). Biodiversity conservation in the context of climate change: Facing challenges and management strategies. *Science of The Total Environment*, 937, 173377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173377>
- Wiartha, R., Firdaus Silamon, R., Ishag Arbab, M., Badshah, M.T., Hayat, U., & Meng, J. (2025). Assessing of driving factors and change detection of mangrove forest in Kubu Raya District, Indonesia. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8, 1511361. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1511361>
- Wibowo, A., & Supriatna, S. (2011). Coastal Environmental Vulnerability on Coastal Cities in Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 3(2), 1-20. <https://doi.org/10.28930/jitkt.v3i2.7818>.
- Wolf, I.D., Sobhani, P., & Esmaeilzadeh, H. (2023). Assessing changes in land use/land cover and ecological risk to conserve protected areas in urban–rural contexts. *Land*, 12(1), 231.
- Xia, Q., Qin, C.Z., Li, H., Huang, C., Su, F.Z., & Jia, M.M. (2020). Evaluation of submerged mangrove recognition index using multi-tidal remote sensing data. *Ecological Indicators*, 113, 106196.
- Yaghoubzadeh, M., Salmanmahiny, A., Moslehi, M., Danehkar, A., & Tabrizi, A.M. (2021). Investigation of port effects on vegetative and reproductive characteristics of grey mangrove (*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.) of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 28(3), 244-256. (In Persian).
- Zebardast, L., Yavare, A., Salehi, E., & Makhdoum, M. (2012). Using landscape ecological metrics to investigate impacts of road on structural changes in Golestan National Park during 1987 to 2010. *Environmental Researches*, 2(4), 11-20. (In Persian).

Zhang, L., Huettmann, F., Liu, S., Sun, P., Yu, Z., Zhang, X., & Mi, C. (2019). Classification and regression with random forests as a standard method for presence-only data SDMs: a future conservation example using China tree species. *Ecological Informatics*, 52, 46-49.



## Evaluating habitat changes and fragmentation in mangrove forests using Landsat satellite images (Case study: Hara Protected Area)

P. Sobhani<sup>1\*</sup> and A. Danehkar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Prof., Dept. of Environmental Science, Natural Resources Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Iran

<sup>2</sup> Prof., Dept. of Environmental Science, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: 8 April 2025; Accepted: 25 September 2025)

### Abstract

**Introduction:** Human-driven land-use/land-cover (LULC) changes represent one of the most recognized threats to mangrove forests. These changes reduce habitat integrity and animal biodiversity within these natural and distinctive ecosystems. Habitat fragmentation is the main cause of ecosystem destruction and reduces the habitat's capacity to provide many valuable ecosystem services. This study aimed to evaluate long-term trends (1989–2023) in habitat fragmentation and alteration within the mangrove forests of the Hara Protected Area.

**Materials and Methods:** We assessed the spatial–temporal changes in LULC/mangrove forest cover using multispectral Landsat imagery across the 1989–2023 period. In addition, to evaluate habitat structural change, we analyzed landscape metrics and their effects on the protection zones (Zones 1 and 2) within the study area.

**Results:** Results indicate that the Hara Protected Area exhibits a decreasing trend in 2023 relative to 1989. Overall, the primary drivers of LULC changes and mangrove forest decline include infrastructure development (e.g., piers and commercial/recreational ports), population growth and urban expansion, excessive tourism, overexploitation of the area's carrying capacity, aquaculture development, and deforestation. Landscape-structure metrics (specifically the SPLIT and Patch Density, PD) increased at the mangrove forest class and aquatic patches, indicating greater fragmentation and dispersion of patches. In contrast, these metrics showed a decreasing trend at tidal flat and barren land classes. Notably, SPLIT and PD also increased within the protected zones (Zone 1 and Zone 2), signaling rising fragmentation and patch dispersion, thus reflecting reduced habitat integrity, altered patch size, and increased patch numbers and spatial dispersion.

**Conclusion:** The findings can inform managers and planners aiming to regulate factors shaping LULC/cover changes in these natural mangrove systems. Accordingly, proposed projects and any infrastructure development in the area should be aligned with management plans (zoning) and environmental assessments. Moreover, LULC changes should be confined beyond the administrative boundaries of the area to minimize reductions in ecosystem integrity and fragmentation within the mangroves.

**Keywords:** Habitat fragmentation, Hara protected area, Landscape ecology approach, Landscape metrics, Mangrove forests.