

ارزیابی حساسیت آستانه‌ای لکه‌های زیستگاهی کل و بز (*Capra aegagrus*) در پارک ملی تندوره با رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین

صدیقه عبداللهی^۱، مریم مروتی^{۲*}، مهدی جمعه‌پور^۳

چکیده

تکه‌تکه‌شدن زیستگاه و انتخاب آستانه مناسب در مدل‌های پراکنش گونه از چالش‌های اساسی برنامه‌ریزی حفاظتی محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی ساختار فضایی زیستگاه کل و بز (*Capra aegagrus*) در پارک ملی تندوره و بررسی حساسیت سنج‌های سیمای سرزمین نسبت به آستانه‌های مختلف مطلوبیت انجام شد. بدین منظور، با استفاده از الگوریتم بی‌نظمی بیشینه و ۴۵ نقطه حضور ثبت شده در سال ۱۴۰۴، نقشه مطلوبیت زیستگاه تهیه گردید. سپس با بهره‌گیری از رویکرد تناسب ناحیه‌ای سرزمین و ترکیب سه آستانه مطلوبیت (۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰) و سه حداقل مساحت لکه (۱۰، ۳۰ و ۵۰ هکتار)، ۹ سناریوی تحلیلی تولید شد. نتایج نشان داد متغیرهای فاصله از رودخانه (۳۸/۳ درصد مشارکت؛ ۱۶/۸۴ درصد اهمیت)، نوع پوشش گیاهی (۱۹/۸ درصد مشارکت؛ ۹/۰۶ درصد اهمیت) و ارتفاع (۱۱/۳ درصد مشارکت؛ ۲۴/۱۹ درصد اهمیت) بیشترین نقش را در تبیین پراکنش گونه داشته‌اند. با افزایش آستانه مطلوبیت از ۱۸۰ به ۲۲۰، ساختار فضایی زیستگاه به‌طور محسوسی متراکم‌تر شد. تعداد لکه‌ها (NP) از ۳۹ لکه در آستانه ۱۸۰ و حداقل مساحت ۱۰ هکتار به ۵ لکه در آستانه ۲۲۰ کاهش یافت. تحلیل حساسیت نرمال شده نشان داد شاخص تعداد لکه‌ها بیشترین واکنش را به تغییر آستانه داشته و ضرایب آن در هر دو بازه ۱۸۰ تا ۲۰۰ و ۲۰۰ تا ۲۲۰ کمتر از ۲- بوده است، در حالی که ضرایب AI و COHESION نزدیک به صفر باقی ماند. افزایش آستانه مطلوبیت بیش از آنکه انسجام کلی سیمای سرزمین را تغییر دهد، موجب کاهش تعداد لکه‌ها و یکپارچگی فضایی زیستگاه در هسته‌های مرکزی-جنوبی پارک شده است. بدین ترتیب، تصمیم‌گیری مبتنی بر دامنه‌ای از آستانه‌ها می‌تواند به افزایش اعتبار برنامه‌ریزی حفاظتی کمک کند.

واژگان کلیدی:

تحلیل آستانه مطلوبیت، مدل‌سازی پراکنش گونه، سنج‌های سیمای سرزمین، برنامه‌ریزی حفاظتی.



مقاله پژوهشی

۱. پژوهشگر پسا دکتري، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
baharabdollahi94@gmail.com
۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
mymorovati@ardakan.ac.ir
* نویسنده مسئول
۳. اداره حفاظت محیط زیست، خلیل آباد، خراسان رضوی، ایران.
mahdijomepoor7@gmail.com

۲۶۰۴-۱۱۵۷

شناسه مقاله:

۱۳۲۷-۱۳۳۸

شماره صفحه پایایی:

۱۴۰۵/۰۱/۲۳

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۴/۲۹

انتشار آنلاین:

۹۱ روز

زمان پذیرش:

استناددهی:

عبداللهی، ص، مروتی، م، و جمعه‌پور، م. (۱۴۰۵). ارزیابی حساسیت آستانه‌ای لکه‌های زیستگاهی کل و بز (*Capra aegagrus*) در پارک ملی تندوره با رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین. مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، ۶(۲)، ۱-۱۲.

۱- مقدمه

تخریب، کاهش و تکه‌تکه‌شدن زیستگاه‌ها از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده تنوع زیستی در مقیاس جهانی محسوب می‌شوند (Fahrig, 2017؛ IPBES, 2019؛ Haddad et al., 2015). در دهه‌های اخیر روشن شده است که نه تنها مساحت کل زیستگاه، بلکه نحوه آرایش فضایی آن در سیمای سرزمین نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری جمعیت‌ها، تبادل ژنی و فرآیندهای اکولوژیکی دارد (Fletcher et al., 2018). از این رو، تحلیل ساختار فضایی زیستگاه‌ها به یکی از ارکان اصلی مطالعات حفاظت زیستی و برنامه‌ریزی سرزمین تبدیل شده است. مدل‌های پراکنش گونه‌ها، ابزار قدرتمندی برای شناسایی زیستگاه‌های مناسب و پیش‌بینی توزیع بالقوه گونه‌ها در شرایط محیطی مختلف هستند (Araújo, Elith and Leathwick, 2009؛ et al., 2019). در میان این مدل‌ها، رویکرد بی‌نظمی بیشینه به دلیل کارایی بالا، توانایی استفاده از داده‌های حضور و عملکرد مناسب در حجم نمونه‌های محدود، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (مرادی و همکاران، ۱۴۰۳؛ Tatian et al., 2025؛ Campos et al., 2023). خروجی این مدل‌ها معمولاً به‌صورت نقشه‌های پیوسته مطلوبیت زیستگاه ارائه می‌شود که برای کاربردهای مدیریتی نیازمند تبدیل به طبقات گسسته از طریق انتخاب آستانه هستند (Sofaer et al., 2019؛ Liu et al., 2013).

با این حال، انتخاب آستانه مناسب برای تفکیک زیستگاه مناسب از نامناسب یکی از چالش‌برانگیزترین مراحل در کاربرد عملی مدل‌های پراکنش گونه‌ها است (Hellegers et al., 2025؛ Jiménez-Valverde, 2014). مطالعات نشان داده‌اند که انتخاب آستانه‌های متفاوت می‌تواند به تفاوت‌های چشمگیر در مساحت، تعداد لکه‌ها و الگوی فضایی زیستگاه‌های پیش‌بینی‌شده منجر شود (Cunningham and Johnson, 2012). در نتیجه، تصمیم‌گیری حفاظتی مبتنی بر یک آستانه منفرد ممکن است از استحکام کافی برخوردار نباشد.

علاوه بر آستانه مطلوبیت، حداقل مساحت لکه‌ای که به‌عنوان زیستگاه معنادار در نظر گرفته می‌شود، نیز بر تحلیل ساختار فضایی اثرگذار است. لکه‌های کوچک ممکن است نقش پناهگاه موقت یا کریدورهای سنگ‌گذار را ایفا کنند، در حالی که لکه‌های بزرگ‌تر غالباً هسته‌های اصلی جمعیتی را تشکیل می‌دهند (Cristiani et al., 2021؛ Cristiani, 2022؛ Mata et al., 2024). حذف یا در نظر گرفتن لکه‌های کوچک می‌تواند شاخص‌های تکه‌تکه‌شدگی و پیوستگی را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد. با وجود این، در بسیاری از مطالعات، حساسیت سنج‌های سیمای سرزمین نسبت به انتخاب هم‌زمان آستانه مطلوبیت و حداقل مساحت لکه به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است.

سنج‌های سیمای سرزمین چارچوبی کمی برای توصیف الگوهای فضایی فراهم می‌کنند (Cushman et al., 2008؛ McGarigal et al., 2012). این سنج‌ها ابعاد مختلفی از ساختار فضایی شامل درجه تکه‌تکه‌شدگی، تجمع، اتصال ساختاری و فشردگی هندسی لکه‌ها را نشان می‌دهند. تفسیر هم‌زمان این شاخص‌ها می‌تواند تصویر جامعی از وضعیت ساختاری زیستگاه ارائه دهد و در شناسایی هسته‌های پایدار و مناطق بحرانی مؤثر باشد (Walz, 2015).

کل و بز (*Capra aegagrus*) یکی از گونه‌های شاخص پستانداران بزرگ ایران است که عمدتاً در زیستگاه‌های ناهموار با شیب‌های تند، رخنمون‌های سنگی و پناهگاه‌های صخره‌ای حضور دارد و این ویژگی‌ها نقش مهمی در کاهش خطر شکار و افزایش بقاء آن ایفا می‌کنند (بهادری امجز و همکاران، ۱۴۰۰). پارک ملی تندوره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق حفاظت‌شده شمال‌شرق ایران، دارای ساختاری ناهمگن شامل ارتفاعات صخره‌ای، دره‌های عمیق، دامنه‌های استپی و بخش‌هایی با اقلیم نیمه‌خشک است (عبداللهی و همکاران، ۱۴۰۴ ب). این تنوع ژئومورفولوژیک و اقلیمی سبب شده است که زیستگاه‌های بالقوه کل و بز در این منطقه به‌صورت موزاییکی از لکه‌های با کیفیت متفاوت شکل گیرد. در چنین شرایطی، صرف شناسایی زیستگاه‌های مطلوب کافی نیست، بلکه بررسی نحوه آرایش فضایی این لکه‌ها، میزان تکه‌تکه‌شدگی، پیوستگی و انسجام ساختاری آن‌ها اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی حفاظتی دارد.

مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف ایران نشان داده‌اند که متغیرهایی نظیر شیب، ارتفاع، فاصله از منابع آب و پوشش گیاهی در مدل‌سازی زیستگاه کل و بز نقش تعیین‌کننده دارند و ساختار فضایی زیستگاه می‌تواند بر الگوهای استفاده از فضا و پویایی جمعیت این گونه تأثیرگذار باشد (بهادری امجزی و همکاران، ۱۳۹۹؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۹۵؛ عبداللهی و همکاران، ۱۴۰۴ الف). با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در تحلیل‌های مبتنی بر مدل‌های مطلوبیت زیستگاه، انتخاب آستانه مناسب برای تفکیک زیستگاه‌های باکیفیت از سایر مناطق است؛ چراکه تغییر آستانه می‌تواند به‌طور معنی‌داری بر تعداد لکه‌ها، اندازه بزرگ‌ترین لکه و شاخص‌های پیوستگی تأثیر بگذارد. از این رو، ارزیابی ساختار فضایی زیستگاه‌های باکیفیت کل و بز در پارک ملی تندوره و سنجش حساسیت سنج‌های سیمای سرزمین نسبت به آستانه‌های مختلف، گامی ضروری در جهت افزایش دقت تصمیم‌گیری‌های حفاظتی محسوب می‌شود.

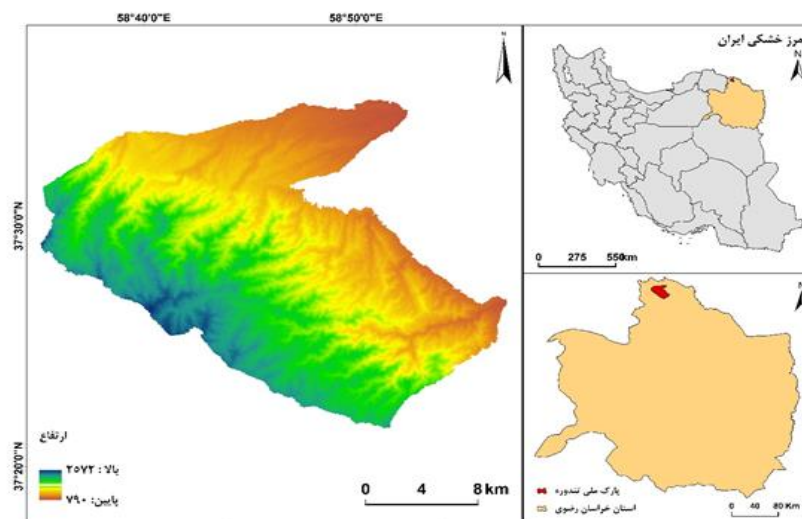
بر این اساس، پژوهش حاضر با تلفیق مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه و تحلیل سنج‌های سیمای سرزمین، با هدف (۱) بررسی تغییرات ساختار فضایی زیستگاه کل و بز در آستانه‌های مختلف مطلوبیت؛ (۲) ارزیابی حساسیت شاخص‌های تکه‌تکه‌شدگی و پیوستگی نسبت به حداقل مساحت لکه و (۳) شناسایی هسته‌های پایدار زیستگاهی که در سناریوهای مختلف تداوم می‌یابند، انجام شده است.

نتایج این پژوهش می‌تواند چارچوبی برای تصمیم‌گیری حفاظتی فراهم آورد و نشان دهد تا چه حد توصیه‌های مدیریتی وابسته به انتخاب آستانه هستند. چنین رویکردی، گامی به‌منظور ارتقای برنامه‌ریزی حفاظتی کشور محسوب می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

پارک ملی تندوره یکی از مهم‌ترین مناطق حفاظت‌شده ایران است که در شمال شرق کشور و در استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱). این پارک با وسعتی در حدود ۳۵۶۵۸ هکتار و قرارگیری در مجاورت مرز ایران و ترکمنستان، از جایگاه اکولوژیکی ویژه‌ای برخوردار است و زیستگاه گونه‌های شاخصی نظیر پلنگ ایرانی (*Panthera pardus saxicolor*)، کل و بز (*Capra aegagrus aegagrus*) و قوچ و میش (*Ovis orientalis*) به‌شمار می‌رود.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی پارک ملی تندوره در استان خراسان رضوی

تنوع شرایط اقلیمی در این پارک قابل توجه است؛ به‌طوری‌که طیفی از اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک تا نواحی کوهستانی را شامل می‌شود. این ناهمگنی اقلیمی زمینه‌ساز شکل‌گیری اجتماعات متنوع گیاهی و جانوری در مقیاس‌های مختلف فضایی شده است. میانگین دمای سالانه منطقه حدود ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه نزدیک به ۳۶۴/۸۸ میلی‌متر گزارش شده است. همچنین میانگین رطوبت نسبی سالانه در این محدوده در حدود ۵۵ درصد برآورد شده است (Farashi and Shariati, 2018).

از نظر ژئومورفولوژیک، پارک ملی تندوره دارای ساختار توپوگرافی پیچیده‌ای است که شامل ارتفاعات صخره‌ای، دره‌های عمیق فرسایشی و پهنه‌های نسبتاً هموار می‌شود. دامنه ارتفاعی منطقه از حدود ۷۹۰ تا ۲۵۷۲ متر از سطح دریا متغیر است و این اختلاف ارتفاع قابل توجه، نقش مهمی در تنوع زیستگاه‌ها و پراکنش گونه‌ها ایفا می‌کند. وجود دو رودخانه دائمی به همراه حدود ۲۰ منبع آب طبیعی و انسان ساخت، اهمیت منطقه را از نظر تأمین آب برای حیات‌وحش افزایش داده و آن را به یکی از کانون‌های مهم بررسی تعامل گونه‌های جانوری با منابع آبی در شمال شرق ایران تبدیل کرده است (عبداللهی و همکاران، ۱۴۰۴ ب).

۲-۲- ارزیابی مطلوبیت زیستگاه

داده‌های مربوط به حضور کل و بز در پارک ملی تندوره طی مطالعات میدانی منظم در چهار فصل سال ۱۴۰۴ جمع‌آوری شد. ثبت داده‌ها بر اساس مشاهده مستقیم افراد، شناسایی نشانه‌های زیستی شامل سرگین، ردپا و محل‌های استراحت و بررسی میدانی زیستگاه‌های بالقوه انجام گرفت. در مجموع، ۴۵ نقطه حضور قطعی ثبت شد که مختصات جغرافیایی آن‌ها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) برداشت و ذخیره گردید. به‌منظور شناسایی عوامل محیطی مؤثر بر پراکنش گونه، با استناد به مطالعات پیشین (بهادری امجز و همکاران، ۱۳۹۹؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۹۵؛ عبداللهی و همکاران، ۱۴۰۴ الف)، در ابتدا ۱۲ متغیر محیطی که به‌طور بالقوه بر انتخاب زیستگاه کل و بز تأثیرگذار بودند، انتخاب شد. برای جلوگیری از بروز هم‌خطی میان متغیرها، میزان همبستگی بین آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ENMTTools بررسی گردید. در مواردی که ضریب همبستگی پیرسون میان دو متغیر بیش از ۰/۸ بود، یکی از متغیرها با در نظر گرفتن اهمیت اکولوژیک آن برای گونه مورد مطالعه، قابلیت تفسیر در مقیاس زیستگاهی و میزان کاربرد آن در پژوهش‌های مشابه حذف شد. بنابراین، انتخاب متغیرهای نهایی تنها بر مبنای همبستگی آماری صورت نگرفت، بلکه ملاحظات اکولوژیکی نیز در فرآیند غربالگری متغیرها لحاظ شد.

همچنین در ارزیابی متغیرها، تلاش شد از ورود متغیرهایی که اطلاعات کاملاً تکراری ارائه می‌کنند جلوگیری شود؛ با این حال، برخی متغیرها با وجود نزدیکی مفهومی، به دلیل نمایش ابعاد متفاوتی از شرایط زیستگاه در مدل باقی ماندند. برای مثال، «فاصله از رودخانه» و «فاصله از آبشخورها» به ترتیب نمایانگر دسترسی به آبراهه‌های طبیعی و منابع آب قابل استفاده برای حیات وحش در سطح منطقه بودند. به همین ترتیب، «تراکم پوشش گیاهی» و «تیپ پوشش گیاهی» نیز دو جنبه متفاوت از ویژگی‌های پوشش گیاهی، شامل میزان تراکم و نوع ساختار پوشش را بازنمایی می‌کنند. در نهایت، هشت متغیر شامل شیب، ارتفاع، جهت جغرافیایی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از آبشخورها، تراکم پوشش گیاهی و تیپ پوشش گیاهی برای ورود به مدل نهایی انتخاب شدند. آماده‌سازی، پردازش و یکسان‌سازی لایه‌های مکانی مربوط به این متغیرها در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 انجام شد. به منظور برآورد تراکم پوشش گیاهی منطقه، تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 مربوط به ژوئن ۲۰۲۵ مورد استفاده قرار گرفت و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی^۱ به عنوان نماینده‌ای از وضعیت و تراکم پوشش گیاهی محاسبه شد.

در مرحله مدل‌سازی، نقاط حضور به صورت تصادفی به دو مجموعه آموزشی و آزمون تقسیم شدند؛ به گونه‌ای که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی عملکرد آن تخصیص یافت. استفاده از این نسبت با هدف اختصاص بخشی از داده‌ها به آزمون مستقل و سنجش توان پیش‌بینی مدل صورت گرفت. با وجود این، با توجه به تعداد نسبتاً محدود نقاط حضور (۴۵ نقطه)، باید توجه داشت که این نوع تقسیم‌بندی ممکن است تا حدی بر نتایج ارزیابی مدل اثرگذار باشد، زیرا اندازه مجموعه آزمون محدود بوده و برآورد شاخص‌های ارزیابی ممکن است به نحوه تخصیص داده‌ها حساس باشد. با این حال، این رویکرد در مطالعات مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها (بهادری امجز و همکاران، ۱۳۹۹؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۹۵؛ عبداللهی و همکاران، ۱۴۰۴ الف) به عنوان یکی از روش‌های متداول ارزیابی اولیه مدل کاربرد دارد. الگوریتم بی‌نظمی بیشینه با ۱۵ تکرار اجرا شد و در هر اجرا حداکثر ۱۰،۰۰۰ تکرار برای دستیابی به همگرایی مناسب تنظیم گردید. در پایان، عملکرد مدل با استفاده از شاخص سطح زیر منحنی (AUC) ارزیابی شد. مقدار این شاخص برابر با ۰/۵ بیانگر عملکردی معادل پیش‌بینی تصادفی بوده و افزایش این مقدار به سمت عدد یک نشان‌دهنده توانایی بیشتر مدل در تمایز میان زیستگاه‌های مناسب و نامناسب است (عبداللهی و همکاران، ۱۴۰۰؛ ایلدرمی و عبداللهی، ۱۴۰۰؛ جمشیدی ساعدی، ۱۴۰۴).

۲-۳- پهنه‌بندی منطقه بر اساس رویکرد تناسب ناحیه‌ای سرزمین

به منظور شناسایی و تفکیک پهنه‌های دارای ارزش حفاظتی در منطقه مورد مطالعه، از رویکرد تناسب ناحیه‌ای سرزمین استفاده شد. این روش برخلاف رویکردهای پیکسلی، مبتنی بر واحدهای فضایی ناحیه‌ای (پلیگونی) بوده و قابلیت شناسایی لکه‌های پیوسته با ویژگی‌های مشخص را فراهم می‌کند. اجرای این روش از طریق قابلیت Site Select در محیط نرم‌افزار TerrSet انجام گرفت که در قالب اجرای یک ماکرو تعریف شده قابل استفاده است (عبداللهی، ۱۴۰۲؛ Abdollahi et al., 2019).

برای اجرای این فرآیند، ابتدا فایل دستور با پسوند IML تهیه شد و از طریق منوی File در نرم‌افزار TerrSet فراخوانی گردید. در بخش تنظیم پارامترهای ماکرو، چهار ورودی اصلی شامل نام فایل نقشه مطلوبیت، مقدار حداقل آستانه مطلوبیت، حداقل مساحت قابل قبول برای هر لکه (بر حسب هکتار) و نام فایل خروجی تعریف شد. پس از اجرای دستور، نقشه‌ای بر اساس مقادیر پیوسته مطلوبیت اولیه تولید شد. در این پژوهش، این نقشه به عنوان مبنای استخراج لکه‌ها مورد استفاده قرار گرفت و برای محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین به کار رفت. سایر خروجی‌های آماری ماکرو صرفاً جهت کنترل و بررسی ویژگی‌های اولیه لکه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

نقشه مطلوبیت زیستگاه حاصل از مرحله مدل‌سازی ابتدا در محیط TerrSet با استفاده از تابع Fuzzy در بازه ۰ تا ۲۵۵ استانداردسازی شدند تا امکان مقایسه و اجرای یکنواخت آستانه‌ها فراهم شود. سپس به منظور بررسی حساسیت نتایج به انتخاب آستانه مطلوبیت و حداقل مساحت لکه، ترکیبی از سه سطح آستانه مطلوبیت (۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰) و سه مقدار حداقل مساحت (۱۰، ۳۰ و ۵۰ هکتار) مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، در مجموع ۹ سناریوی تحلیلی تعریف و اجرا شد که هر یک بیانگر ترکیب متفاوتی از معیار شدت مطلوبیت و اندازه حداقل لکه قابل پذیرش بودند. این رویکرد امکان ارزیابی تغییرات ساختار فضایی پهنه‌های منتخب در پاسخ به تغییر آستانه‌های تصمیم‌گیری را فراهم ساخت.

۲-۴- تحلیل پهنه‌های زیستگاهی بر اساس سنجه‌های سیمای سرزمین

سنجه‌های سیمای سرزمین ابزارهایی کمی برای توصیف الگوهای فضایی و ارزیابی ساختار اکولوژیک مناظر محسوب می‌شوند و امکان تحلیل ویژگی‌هایی نظیر تکه‌تکه‌شدگی، انسجام و پیوستگی زیستگاه را فراهم می‌کنند. بهره‌گیری از این سنجه‌ها در مطالعات برنامه‌ریزی حفاظتی، چارچوبی کمی برای بررسی پایداری فضایی زیستگاه‌ها فراهم می‌سازد (دانه‌کار و جعفری، ۱۳۹۶).

در این پژوهش، به منظور ارزیابی ساختار فضایی لکه‌های زیستگاهی استخراج شده در مرحله پهنه‌بندی و مقایسه سناریوهای مختلف آستانه مطلوبیت و حداقل مساحت، پنج سنجه کلیدی در سطح کلاس محاسبه شد. این سنجه‌ها شامل تعداد لکه‌ها (NP) و شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI) به عنوان شاخص تکه‌تکه‌شدگی، شاخص انسجام (COHESION) و شاخص تجمع (AI) به منظور سنجش پیوستگی ساختاری و میانگین پیوستگی لکه‌ها

(CONTIG_MN) برای بررسی میزان اتصال درونی لکه‌ها بودند. این سنج‌ها بر اساس مطالعات پیشین که بر اهمیت تحلیل تکه‌تکه‌شدگی و پیوستگی در ارزیابی پایداری زیستگاه تأکید داشته‌اند، انتخاب شدند (عبداللهی، ۱۴۰۲؛ Abdollahi et al., 2024a؛ Abdollahi et al., 2024b). نقشه‌های باینری حاصل از مرحله پهنه‌بندی (شامل زیستگاه‌های مطلوب و سایر اراضی) به‌عنوان لایه ورودی به نرم‌افزار Fragstats 4.2 وارد شدند (McGarigal et al., 2012). پیش از انجام تحلیل، نقشه‌های رستری به‌گونه‌ای آماده‌سازی شدند که سلول‌های متعلق به زیستگاه‌های منتخب با مقدار ۱ و سایر سلول‌ها به‌عنوان پس‌زمینه تعریف شوند. سپس، برای تعریف پیوستگی فضایی سلول‌ها و تشکیل لکه‌های زیستگاهی، از قاعده ۸ همسایگی استفاده شد؛ به این معنا که سلول‌هایی که دارای مرز مشترک یا تماس گوشه‌ای بودند، به‌عنوان یک لکه واحد در نظر گرفته شدند. بر این اساس، هر لکه زیستگاهی از مجموعه‌ای از سلول‌های پیوسته تشکیل شد و در صورتی که بین سلول‌های متعلق به زیستگاه مطلوب، اتصال فضایی بر مبنای قاعده ۸ همسایگی برقرار بود، آن‌ها به‌عنوان یک لکه واحد محسوب شدند. پس از تعریف لکه‌ها، سنج‌های مورد نظر در سطح کلاس برای هر یک از ۹ سناریوی مورد بررسی محاسبه شد. این فرآیند امکان مقایسه کمی میزان تکه‌تکه‌شدگی و پیوستگی زیستگاه‌های باکیفیت کل و بز را در پاسخ به تغییر آستانه‌های تصمیم‌گیری فراهم ساخت.

۲-۵- تحلیل حساسیت سنج‌های سیمای سرزمین نسبت به آستانه مطلوبیت

تحلیل حساسیت یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی پایداری نتایج مدل‌ها و سنجش میزان وابستگی خروجی‌ها به تغییر پارامترهای ورودی است (Saltelli et al., 2004؛ Pianosi et al., 2016) در مطالعات مدل‌سازی زیستگاه و اکولوژی منظر، انتخاب آستانه تبدیل خروجی پیوسته مدل به نقشه‌های باینری می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ساختار فضایی لکه‌ها و مقادیر سنج‌های سیمای سرزمین داشته باشد (Jiménez-Liu et al., 2005؛ Valverde and Lobo, 2007). از این‌رو، بررسی میزان حساسیت نتایج به تغییر آستانه مطلوبیت، گامی ضروری در جهت افزایش اعتبار و قابلیت اتکای تحلیل‌های فضایی به‌شمار می‌رود.

در این پژوهش، برای کمی‌سازی میزان واکنش هر سنج نسبت به تغییر آستانه، از ضریب حساسیت نرمال‌شده استفاده شد. این شاخص که در چارچوب تحلیل حساسیت موضعی^۱ تعریف می‌شود، بیانگر نسبت تغییر نسبی خروجی به تغییر نسبی ورودی است و به طور گسترده در ارزیابی مدل‌های محیط‌زیستی کاربرد دارد (Saltelli et al., 2004؛ Pianosi et al., 2016). ضریب حساسیت نرمال‌شده بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد:

$$S = \frac{\left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right)}{\left(\frac{T_2 - T_1}{T_1} \right)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن M_1 و M_2 به ترتیب مقادیر هر سنج در دو آستانه مورد بررسی و T_1 و T_2 مقادیر آستانه مطلوبیت هستند. مقدار S نشان‌دهنده کشسانی سنج نسبت به تغییر آستانه است؛ به‌طوری که مقادیر نزدیک به صفر بیانگر پایداری شاخص و مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده وابستگی بیشتر نتایج به انتخاب آستانه است.

در این مطالعه، تحلیل حساسیت در سه سطح انجام شد: نخست بین آستانه‌های ۱۸۰ و ۲۰۰، دوم بین ۲۰۰ و ۲۲۰، و سوم در کل دامنه تغییر از ۱۸۰ تا ۲۲۰. این رویکرد امکان ارزیابی روند تغییرات ساختار فضایی زیستگاه را در سطوح مختلف سخت‌گیری مدیریتی فراهم ساخت. در صورتی که تغییرات سنج‌ها در دامنه آستانه‌ها محدود باشد، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی فضایی زیستگاه از پایداری نسبی برخوردار است. در مقابل، تغییرات شدید ضرایب حساسیت نشان‌دهنده وابستگی نتایج به انتخاب آستانه و لزوم دقت بیشتر در تفسیر مدیریتی خواهد بود.

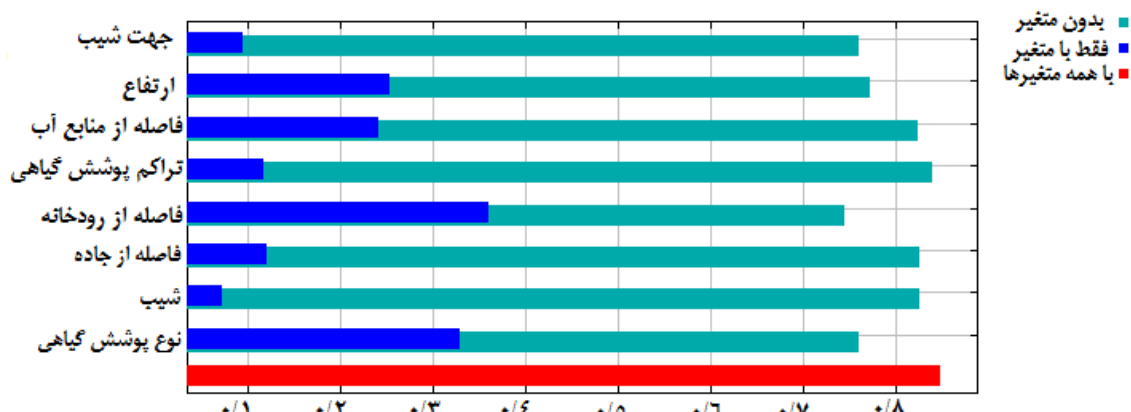
۳- نتایج

۳-۱- ارزیابی مطلوبیت زیستگاه

نتایج آزمون جک‌نایف نشان داد که در میان متغیرهای واردشده به مدل، فاصله از رودخانه، نوع پوشش گیاهی، ارتفاع و فاصله از منابع آب رودخانه‌ها بیشترین سهم را در تبیین پراکنش مکانی گونه مورد مطالعه داشته‌اند (شکل ۲). این متغیرها در مقایسه با سایر عوامل محیطی، نقش برجسته‌تری در افزایش توان پیش‌بینی مدل ایفا کردند و حذف هر یک از آن‌ها موجب کاهش معنی‌دار کارایی مدل گردید.

میزان مشارکت و اهمیت نسبی متغیرهای محیطی مؤثر بر کیفیت زیستگاه گونه هدف در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس خروجی مدل، متغیرهای فاصله از رودخانه، نوع پوشش گیاهی و ارتفاع به ترتیب با سهم مشارکت ۳۸/۳، ۱۹/۸ و ۱۱/۳ درصد و میزان اهمیت ۱۶/۳۸۴، ۹/۰۶ و ۲۴/۱۹ درصد نقش را در پیش‌بینی پراکنش گونه ایفا کرده است. این یافته‌ها با الگوی رفتار انتخاب زیستگاه گونه نیز همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش ارتفاع، مقدار مطلوبیت زیستگاه برای گونه مورد مطالعه به طور محسوسی افزایش نشان می‌دهد.

1. Local Sensitivity Analysis

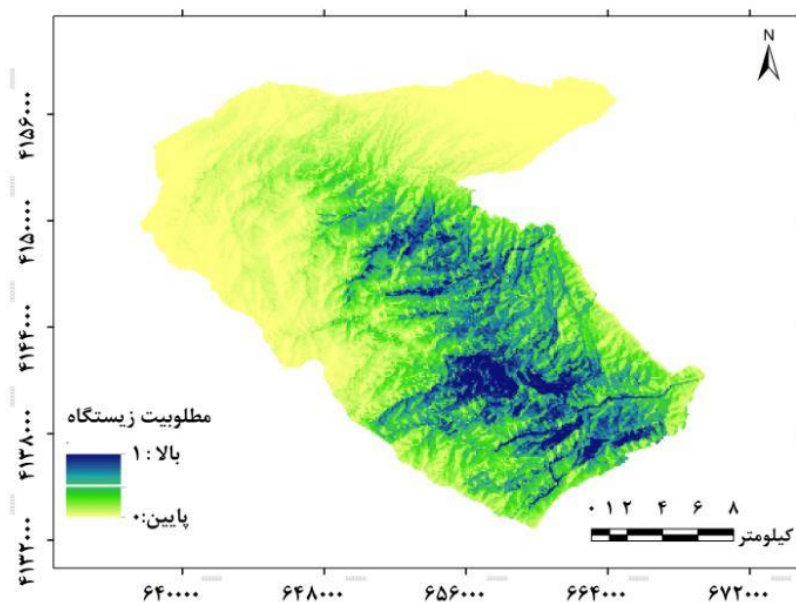


شکل (۲): تاثیرگذارترین پارامترها بر پراکنش مکانی کل و بز در محدوده مطالعاتی بر اساس آزمون جک‌نایف

جدول (۱): میزان اهمیت و مشارکت پارامترهای محیطی پیش‌بینی‌کننده شرایط زیستگاه کل و بز

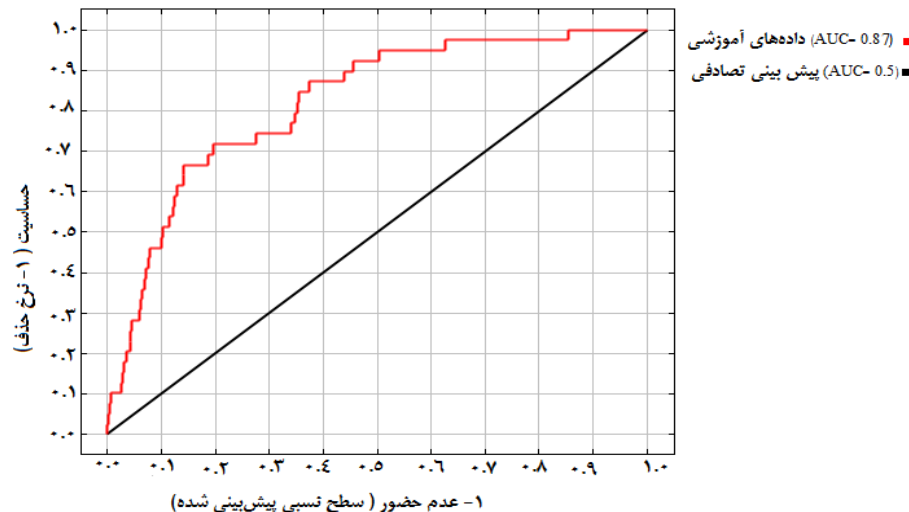
متغیر محیطی	درصد مشارکت	میزان اهمیت
فاصله از رودخانه	۳۸/۳	۱۶/۸۴
نوع پوشش گیاهی	۱۹/۸	۹/۰۶
ارتفاع	۱۱/۳	۲۴/۱۹
جهت شیب	۱۱/۰۶	۱۰/۷۳
فاصله از مسیر دسترسی اصلی	۱۰/۶۲	۲۵/۹۶
فاصله از منابع آبی	۵/۲۶	۵/۵۶
شیب	۲/۹	۴/۸
تراکم پوشش گیاهی	۰/۷	۲/۸۳

نقشه پیش‌بینی مطلوبیت زیستگاه نشان داد که بخش‌های جنوبی و مرکزی منطقه مورد مطالعه از بالاترین میزان تناسب برای حضور گونه کل و بز برخوردارند (شکل ۳). پهنه‌های با مطلوبیت زیاد بیانگر نواحی با احتمال بالای حضور گونه بوده، در حالی که مناطق با مقادیر پایین یا فاقد مطلوبیت نشان‌دهنده احتمال بسیار اندک استقرار گونه هستند.



شکل (۳): نقشه مطلوبیت زیستگاه کل و بز در منطقه مطالعاتی

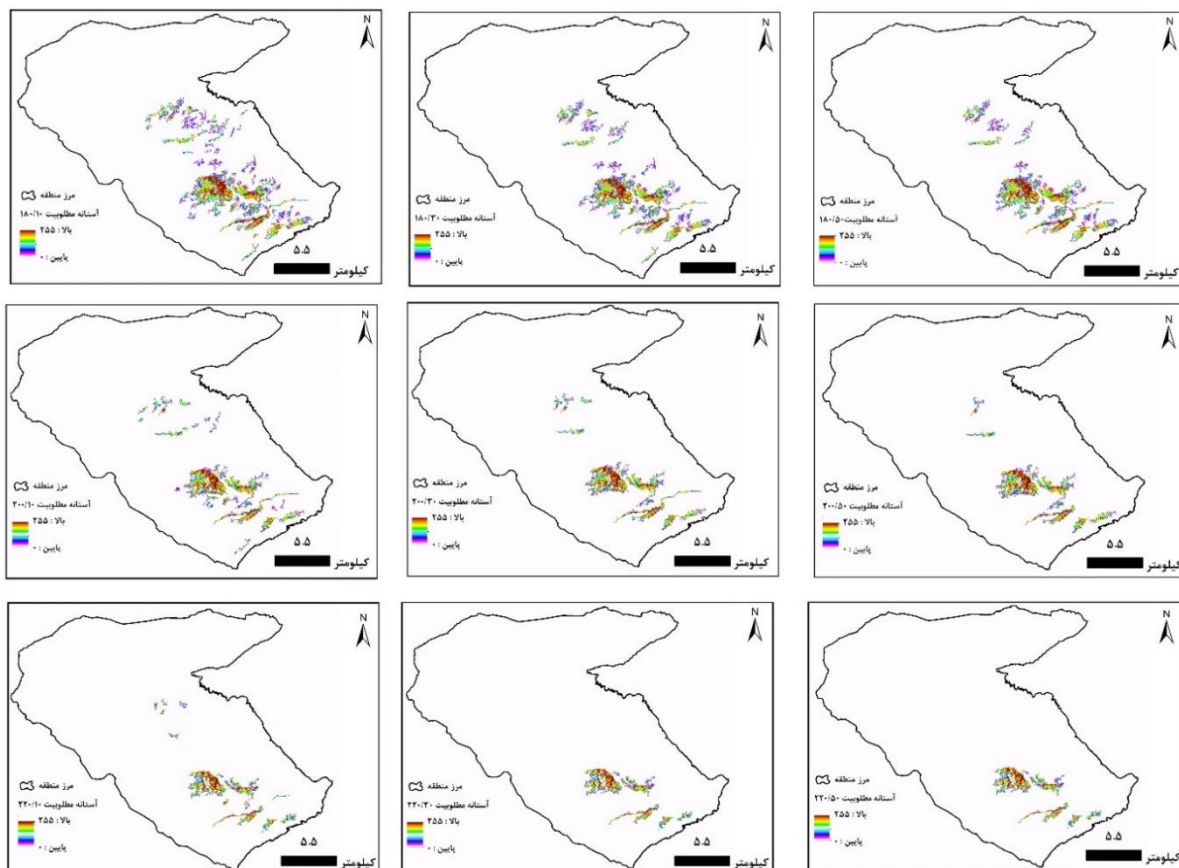
ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص سطح زیر منحنی نشان داد که مدل به‌کاررفته از توان پیش‌بینی مطلوبی برخوردار است. مقدار AUC برای داده‌های آموزشی برابر با ۰/۸۷ به‌دست آمد که بیانگر دقت بسیار خوب مدل در تفکیک زیستگاه‌های مناسب و نامناسب و پیش‌بینی پراکنش مکانی کل و بز در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۴).



شکل (۴): نمودار مشخصه عملکرد و سطح زیر منحنی برای گونه کل و بز در پارک ملی تندوره

۳-۲- نتایج پهنه‌بندی زیستگاه بر اساس رویکرد تناسب ناحیه‌ای سرزمین

نتایج حاصل از اجرای رویکرد تناسب ناحیه‌ای سرزمین نشان داد که ساختار فضایی زیستگاه‌های باکیفیت کل و بز در پارک ملی تندوره به‌طور محسوسی تحت تأثیر انتخاب آستانه مطلوبیت و حداقل مساحت لکه قرار دارد (شکل ۵). در آستانه مطلوبیت ۱۸۰، گستره زیستگاه‌های منتخب بیشترین وسعت و پراکنش فضایی را نشان داد. در این سطح، لکه‌های زیستگاهی علاوه بر تمرکز اصلی در بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه، در نواحی شمالی نیز به‌صورت پراکنده مشاهده شدند. با افزایش حداقل مساحت از ۱۰ به ۳۰ و ۵۰ هکتار، تعداد لکه‌های کوچک حذف شده و الگوی فضایی به سمت تمرکز بیشتر در لکه‌های بزرگ‌تر تغییر یافت، به‌گونه‌ای که پیوستگی نسبی هسته‌های اصلی حفظ شد اما پراکنش لکه‌های کوچک کاهش یافت.



شکل (۵): پهنه‌های مطلوبیت زیستگاهی گونه کل و بز در آستانه‌های مطلوبیت و مساحت‌های مختلف در پارک ملی تندوره

در آستانه ۲۰۰، کاهش قابل توجهی در وسعت و تعداد لکه‌ها نسبت به آستانه ۱۸۰ مشاهده شد. در این سطح، زیستگاه‌های باکیفیت عمدتاً در یک هسته مرکزی متراکم و چند لکه کشیده در بخش جنوبی و جنوب‌شرقی متمرکز شدند. افزایش حداقل مساحت در این آستانه موجب حذف لکه‌های حاشیه‌ای و کوچک‌تر گردید و ساختار فضایی به سمت تمرکز بیشتر در لکه‌های اصلی سوق پیدا کرد.

در آستانه ۲۲۰، که بیانگر سخت‌گیرانه‌ترین سطح انتخاب زیستگاه‌های باکیفیت است، بیشترین کاهش در وسعت و پراکنش لکه‌ها مشاهده شد. در این شرایط، تنها هسته‌های اصلی با مطلوبیت بالا باقی ماندند و بسیاری از لکه‌های پراکنده در آستانه‌های پایین‌تر حذف شدند. در ترکیب این آستانه با حداقل مساحت‌های ۳۰ و ۵۰ هکتار، الگوی فضایی تقریباً به یک یا چند هسته محدود و فشرده در بخش مرکزی- جنوبی منطقه تقلیل یافت که نشان‌دهنده تمرکز شدید زیستگاه‌های بسیار باکیفیت در محدوده‌ای خاص از پارک است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش آستانه مطلوبیت، وسعت زیستگاه‌های منتخب کاهش یافته و پراکنش فضایی آن‌ها محدودتر می‌شود. همچنین افزایش حداقل مساحت لکه، موجب حذف لکه‌های کوچک و کاهش تکه‌تکه‌شدگی ظاهری شده و ساختار فضایی را به سمت تمرکز در هسته‌های اصلی هدایت می‌کند. این روند بیانگر آن است که زیستگاه‌های بسیار باکیفیت کل و بز در پارک ملی تندوره عمدتاً در یک پهنه مرکزی- جنوبی متمرکز بوده و سایر بخش‌های منطقه نقش مکمل یا حاشیه‌ای در تأمین زیستگاه این گونه دارند.

۳-۳- نتایج تحلیل سنجه‌های سیمای سرزمین در سناریوهای مختلف

نتایج کمی‌سازی سنجه‌های سیمای سرزمین نشان داد که ساختار فضایی زیستگاه‌های منتخب کل و بز در پارک ملی تندوره به‌طور منظم تحت تأثیر افزایش آستانه مطلوبیت و حداقل مساحت لکه قرار گرفته است (جدول ۲). با افزایش آستانه از ۱۸۰ به ۲۲۰ و نیز افزایش حداقل مساحت از ۱۰ به ۵۰ هکتار، تعداد لکه‌ها (NP) روند کاهشی مشخصی را نشان داد، به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار آن (۳۹ لکه) در آستانه ۱۸۰ و مساحت ۱۰ هکتار و کمترین مقدار (۵ لکه) در آستانه ۲۲۰ ثبت شد. هم‌زمان، سهم بزرگ‌ترین لکه (LPI) در اغلب سناریوهای با مساحت بالاتر افزایش یافت و بیانگر تمرکز بیشتر زیستگاه در لکه‌های اصلی بود. شاخص تجمع (AI) و انسجام (COHESION) نیز مقادیر بالایی را در تمامی سناریوها نشان دادند و با افزایش سخت‌گیری آستانه و حذف لکه‌های کوچک‌تر، روند افزایشی ملایمی داشتند. همچنین مقدار CONTIG_MN با افزایش آستانه و حداقل مساحت افزایش یافت که بیانگر پیوستگی بیشتر لکه‌های باقی‌مانده است. در سناریوی آستانه ۲۲۰، مقادیر سنجه‌ها در مساحت‌های ۳۰ و ۵۰ هکتار یکسان بود. این وضعیت به توزیع اندازه لکه‌های زیستگاه در آستانه ۲۲۰ مربوط است و نشان می‌دهد در این سطح، ساختار فضایی زیستگاه به هسته‌های اصلی محدود شده و حذف بیشتر لکه‌های کوچک تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شاخص‌ها نداشته است. بنابراین اعمال حداقل مساحت ۳۰ و ۵۰ هکتار منجر به انتخاب مجموعه یکسانی از لکه‌ها و در نتیجه تولید مقادیر مشابه در هر دو سناریو شد.

جدول (۲): نتایج تحلیل سنجه‌های سیمای سرزمین برای سناریوهای مختلف

AI	COHESION	CONTIG_MN	LPI	NP	سنجه‌های سیمای سرزمین
					سناریوها
۷۳/۷۸	۹۶/۷۸	۰/۵۵۴	۴۶/۷۱	۳۹	سناریو مطلوبیت ۱۸۰ مساحت ۱۰ هکتار
۷۵/۸۸	۹۷/۴۹	۰/۶۳۳	۵۱/۶۴	۱۸	سناریو مطلوبیت ۱۸۰ مساحت ۳۰ هکتار
۷۷/۱۸	۹۷/۹۸	۰/۶۷۴	۵۶/۹۱	۱۱	سناریو مطلوبیت ۱۸۰ مساحت ۵۰ هکتار
۷۴/۶۸	۹۵/۵۸	۰/۵۶۱	۳۶/۲۱	۲۸	سناریو مطلوبیت ۲۰۰ مساحت ۱۰ هکتار
۷۷/۹۱	۹۶/۹۰	۰/۶۵۷	۴۲/۱۶	۱۰	سناریو مطلوبیت ۲۰۰ مساحت ۳۰ هکتار
۷۹/۴۵	۹۷/۴۲	۰/۷۱۴	۴۵/۲۵	۷	سناریو مطلوبیت ۲۰۰ مساحت ۵۰ هکتار
۷۴/۸۳	۹۶/۲۲	۰/۵۷۱	۴۳/۲۲	۱۳	سناریو مطلوبیت ۲۲۰ مساحت ۱۰ هکتار
۷۷/۹۶	۹۷/۴۳	۰/۷۱۶	۴۹/۱۶	۵	سناریو مطلوبیت ۲۲۰ مساحت ۳۰ هکتار
۷۷/۹۶	۹۷/۴۳	۰/۷۱۶	۴۹/۱۶	۵	سناریو مطلوبیت ۲۲۰ مساحت ۵۰ هکتار

۳-۴- نتایج تحلیل حساسیت آستانه‌ای سنجه‌های سیمای سرزمین

نتایج تحلیل حساسیت نرمال‌شده سنجه‌های سیمای سرزمین نسبت به تغییر آستانه مطلوبیت (۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰) نشان داد که میزان و جهت واکنش شاخص‌ها یکسان نبوده است (جدول ۳). در میان شاخص‌ها، تعداد لکه‌ها (NP) بیشترین حساسیت را نشان داد، به‌طوری‌که ضرایب آن در بازه ۱۸۰ تا ۲۰۰ و نیز ۲۰۰ تا ۲۲۰ در تمامی سطوح حداقل مساحت منفی و با قدر مطلق بالا (بیش از ۲-) بود که بیانگر کاهش چشمگیر تعداد لکه‌ها با افزایش آستانه مطلوبیت است. سهم بزرگ‌ترین لکه (LPI) در بازه نخست ضرایب منفی و در برخی سناریوهای بازه دوم ضرایب مثبت نشان داد که حاکی از تمرکز تدریجی زیستگاه در لکه‌های هسته‌ای در آستانه‌های بالاتر است. شاخص میانگین پیوستگی (CONTIG_MN) عمدتاً ضرایب مثبت و در برخی سناریوها بیش از ۱ را ثبت کرد که بیانگر افزایش انسجام درونی لکه‌های باقی‌مانده با سخت‌گیرانه‌تر شدن آستانه است. در مقابل، شاخص‌های تجمع (AI) و انسجام کلی (COHESION) کمترین دامنه تغییرات را داشته و ضرایب آن‌ها نزدیک به صفر باقی ماند که نشان‌دهنده پایداری نسبی ساختار کلی چشم‌انداز در برابر تغییر آستانه است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که افزایش آستانه مطلوبیت بیش از آنکه انسجام کلی سیمای سرزمین را دگرگون کند، عمدتاً موجب کاهش تعداد لکه‌ها و تمرکز فضایی زیستگاه در لکه‌های اصلی شده است.

جدول (۳): نتایج تحلیل حساسیت سنج‌های سیمای سرزمین در آستانه‌های مطلوبیت مختلف

سنج‌های سیمای سرزمین					سطوح حساسیت‌سنجی
AI	COHESION	CONTIGNM	LPI	NP	
۰/۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۴	-۲/۰۲	-۲/۵۴	۱۰-ha
۰/۲۴۱	-۰/۰۵۴	۰/۳۴۱	-۱/۶۵	-۴	۳۰-ha
۰/۲۶۵	-۰/۰۵۱	۰/۵۳۴	-۱/۸۴	-۳/۲۷	۵۰-ha
۰/۰۲۰	۰/۰۶۷	۰/۱۷۸	۱/۹۳	-۵/۳۶	۱۰-ha
۰/۰۰۶۴	۰/۰۵۵	۰/۸۹۸	۱/۶۶	-۵	۳۰-ha
-۰/۱۸۷	۰/۰۰۱	۰/۰۲۸	۰/۸۶۴	-۲/۸۶	۵۰-ha
۰/۰۶۴	۰/۱۳۸	۰/۱۳۸	-۰/۳۳۶	-۳	۱۰-ha
۰/۱۲۳	-۰/۰۰۳	۰/۵۹۰	-۰/۳۱۶	-۳/۲۵	۳۰-ha
۰/۰۴۵	-۰/۰۲۵	۰/۲۸۰	-۰/۶۱۳	-۲/۴۵	۵۰-ha

۴- بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی تناسب زیستگاه و تعیین پهنه‌های دارای اولویت برای حفاظت از تنوع زیستی، از ابزارهای اساسی در سنجش کارایی سیاست‌ها و برنامه‌های حفاظتی به‌شمار می‌آید (Vu et al., 2022). انتخاب پهنه مناطق تحت حفاظت نیز یکی از چالش‌های اصلی مدیریت محیط‌زیست، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه است. با وجود تفاوت در رویکردها و روش‌های بررسی، گزینش و اولویت‌بندی مناطق حفاظتی، هدف مشترک همه آن‌ها دستیابی به بیشترین سطح حفاظت از تنوع زیستی است (کرمی و همکاران، ۱۳۹۹).

نتایج مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه نشان داد که الگوی پراکنش کل و بز در پارک ملی تندوره به‌شدت تحت تأثیر متغیرهای توپوگرافیک و منابع آبی قرار دارد. نقش برجسته ارتفاع، فاصله از رودخانه و نوع پوشش گیاهی با ویژگی‌های بوم‌شناختی این گونه همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که کل و بز معمولاً زیستگاه‌های کوهستانی ناهموار با دسترسی مناسب به آب و پوشش گیاهی مناسب را ترجیح می‌دهد. مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق ایران نیز اهمیت متغیرهای ارتفاع، شیب و فاصله از منابع آب را در پیش‌بینی پراکنش این گونه تأیید کرده‌اند (بهادری امجری و همکاران، ۱۳۹۹؛ عبداللهی و همکاران، ۱۴۰۴ الف). همچنین پژوهش‌های بین‌المللی بر روی سایر گونه‌های صخره‌زی نشان داده‌اند که ناهمواری زمین و دسترسی به پناهگاه‌های صخره‌ای از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده کیفیت زیستگاه هستند (Wolf et al., 2022).

نتایج این پژوهش نشان داد که ساختار فضایی زیستگاه‌های باکیفیت کل و بز در پارک ملی تندوره به‌طور معناداری تحت تأثیر انتخاب آستانه مطلوبیت و حداقل مساحت لکه قرار دارد. اگرچه مدل مطلوبیت زیستگاه از توان پیش‌بینی بالایی برخوردار بود ($AUC=0.87$)، اما تبدیل خروجی پیوسته مدل به نقشه‌های باینری در آستانه‌های مختلف، به تغییرات محسوس در الگوی لکه‌ای زیستگاه منجر شد. این یافته مؤید آن است که انتخاب آستانه، مرحله‌ای تعیین‌کننده در تحلیل‌های فضایی بوده و می‌تواند برداشت مدیریتی از وسعت و آرایش زیستگاه را دگرگون سازد (Liu et al., 2013؛ Jiménez-Valverde, 2014). کاهش چشمگیر تعداد لکه‌ها (NP) با افزایش آستانه از ۱۸۰ به ۲۲۰ بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از لکه‌های زیستگاهی در محدوده کیفیت متوسط یا مرزی قرار داشته‌اند و با سخت‌گیرانه‌تر شدن معیار انتخاب حذف شده‌اند. این الگو را می‌توان در چارچوب مفهوم «آستانه تکه‌تکه‌شدگی» تفسیر کرد؛ به‌گونه‌ای که عبور از یک سطح بحرانی در تصمیم‌گیری می‌تواند به بازآرایی ناگهانی ساختار فضایی منجر شود (Haddad et al., 2015؛ Fahrig, 2017). در مطالعه حاضر، افزایش هم‌زمان سهم بزرگ‌ترین لکه (LPI) نشان می‌دهد که حذف لکه‌های کوچک موجب تمرکز زیستگاه در هسته‌های اصلی شده و ساختار منظر به سمت فشرده‌گی بیشتر حرکت کرده است.

در مقابل، پایداری نسبی شاخص‌های تجمع و انسجام نشان داد که انسجام کلی شبکه زیستگاهی، حتی با حذف لکه‌های کوچک، دچار فروپاشی نشده است. این وضعیت حاکی از وجود هسته‌های مرکزی پایدار در بخش‌های مرکزی- جنوبی پارک است که نقش ستون فقرات ساختاری زیستگاه را ایفا می‌کنند. این یافته با نظریه «هسته زیستگاهی» همخوانی دارد که بر اهمیت لکه‌های بزرگ مرکزی در حفظ پایداری جمعیت‌ها تأکید می‌کند (Verma et al., 2025؛ Szangolies et al., 2022؛ Greenspan et al., 2021). افزون بر این، ثبات نسبی شاخص‌های پیوستگی می‌تواند بیانگر نوعی تاب‌آوری فضایی در مقیاس کلاس باشد؛ به این معنا که شبکه زیستگاهی در محدوده هسته‌های اصلی توان حفظ اتصال ساختاری خود را داشته است (Fletcher et al., 2018؛ Turner, 2010).

تحلیل حساسیت نرمال‌شده نیز نشان داد که شاخص تعداد لکه‌ها بیشترین کشسانی را نسبت به تغییر آستانه داشته، در حالی که شاخص‌های تجمع و انسجام کمترین حساسیت را نشان داده‌اند. این تفاوت بیانگر آن است که برخی شاخص‌ها نسبت به تصمیمات آستانه‌ای بسیار وابسته‌اند و تفسیر مدیریتی مبتنی بر آن‌ها باید با احتیاط بیشتری انجام شود. در واقع، تکیه بر یک شاخص منفرد یا یک آستانه خاص می‌تواند تصویری ناقص از وضعیت واقعی زیستگاه ارائه دهد.

از منظر مدیریتی، تمرکز زیستگاه‌های بسیار باکیفیت در پهنه مرکزی- جنوبی پارک نشان می‌دهد که این مناطق باید به‌عنوان اولویت‌های اصلی حفاظت در نظر گرفته شوند. در عین حال، لکه‌های مکمل که در آستانه‌های پایین‌تر ظاهر می‌شوند، ممکن است نقش تقویتی یا کریدوری داشته باشند

و حذف کامل آن‌ها از برنامه‌ریزی حفاظتی می‌تواند کارکرد شبکه زیستگاهی را تضعیف کند. بنابراین، رویکرد مبتنی بر دامنه آستانه‌ها و تحلیل حساسیت می‌تواند چارچوبی دقیق‌تر و منعطف‌تر برای تصمیم‌گیری حفاظتی فراهم آورد.

با وجود اهمیت یافته‌ها، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی نیز است. تحلیل حاضر بر اتصال ساختاری متمرکز بوده و اتصال کارکردی مبتنی بر رفتار حرکتی گونه بررسی نشده است. همچنین تحلیل‌ها در یک مقطع زمانی انجام شده و پویایی‌های زمانی کاربری اراضی یا تغییرات اقلیمی لحاظ نشده‌اند. استفاده از مدل‌های اتصال کارکردی، داده‌های تله‌متری و سناریوهای تغییر اقلیم می‌تواند در مطالعات آینده به درک دقیق‌تر پایداری بلندمدت زیستگاه کمک کند. دیگر محدودیت این پژوهش، تعداد نسبتاً محدود نقاط حضور گونه و استفاده از تقسیم‌بندی ۳۰ و ۷۰ به تر تیب برای آموزش و آزمون مدل است که ممکن است بر پایداری شاخص‌های ارزیابی اثرگذار باشد. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، به‌ویژه در شرایط نمونه‌های حضور محدود، از روش‌های اعتبارسنجی تکراری یا اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی پایاتر عملکرد مدل استفاده شود.

با وجود تلاش برای کاهش هم‌خطی میان متغیرهای محیطی از طریق بررسی همبستگی جفتی و غربالگری بر مبنای اهمیت اکولوژیک، نمی‌توان احتمال وجود همپوشانی مفهومی یا همبستگی مکانی میان برخی متغیرها را به‌طور کامل منتفی دانست؛ از این‌رو، نتایج مربوط به سهم نسبی برخی متغیرهای نزدیک از نظر کارکرد زیستگاهی باید با احتیاط تفسیر شود.

این پژوهش نشان داد که ساختار فضایی زیستگاه‌های باکیفیت کل و بز در پارک ملی تندوره به انتخاب آستانه مطلوبیت و حداقل مساحت لکه وابسته است. افزایش آستانه مطلوبیت موجب کاهش تعداد لکه‌ها و تمرکز زیستگاه در هسته‌های اصلی شده، در حالی که شاخص‌های پیوستگی کلی از پایداری نسبی برخوردار بوده‌اند. نتایج تحلیل حساسیت بیانگر آن است که برخی سنجه‌ها، به‌ویژه تعداد لکه‌ها، نسبت به تغییر آستانه بسیار حساس هستند و بنابراین تصمیم‌گیری حفاظتی نباید مبتنی بر یک آستانه منفرد باشد.

هسته‌های مرکزی- جنوبی پارک که در تمامی سناریوها پایدار باقی مانده‌اند، از اهمیت حفاظتی ویژه‌ای برخوردارند و می‌توانند به عنوان کانون‌های اصلی مدیریت و حفاظت سخت‌گیرانه تعریف شوند. بهره‌گیری از رویکرد تحلیل حساسیت در کنار مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در برنامه‌ریزی و افزایش اعتبار تصمیمات مدیریتی کمک کند. به طور کلی، تلفیق مدل‌های پراکنش گونه با سنجه‌های سیمای سرزمین و تحلیل حساسیت، چارچوبی کارآمد برای ارتقای برنامه‌ریزی حفاظتی در مناطق کوهستانی ایران فراهم می‌آورد.

منابع

- ایلدرومی، ع. و عبداللهی، ص. (۱۴۰۰). کاربرد آمار فضایی در ارزیابی الگوهای همبستگی مکانی آلودگی صوتی در قسمت مرکزی حوزه آبخیز زاینده‌رود. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۱۲(۲)، ۳۵-۴۶.
- بهادری امجز، ف.، مروتی، م. و بهنود، م. (۱۳۹۹). بررسی نقش و اهمیت کریدورهای حیات وحش بین پناهگاه حیات وحش دره انجیر و منطقه حفاظت شده کوه بافق (مطالعه موردی: گونه کل و بز)، زیست‌شناسی جانوری تجربی، ۹(۳)، ۶۷-۷۶.
- جمشیدی ساعدی، ف.، مروتی، م. عبداللهی، ص. و الهی، م. (۱۴۰۴). اولویت‌بندی حفاظتی لکه‌های داغ تنوع زیستی استان یزد. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۵(۱)، ۸۱-۶۳.
- دانه‌کار، ا. و جعفری، ش. (۱۳۹۶). ارزیابی تخریب منطقه حفاظت شده جاجرو در استفاده از مدل تخریب سیمای سرزمین. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۲)، ۱۷-۳۲.
- رنجبر، ن.، همای، م.، ترکش، م. و شاهقلیان، ج. (۱۳۹۵). ارزیابی فصلی مطلوبیت زیستگاه بز وحشی (*Capra aegagrus*) در مناطق کوهستانی پارک ملی کلاه‌قازی به‌روش حداکثر آنتروپی. بوم‌شناسی کاربردی، ۵(۱۶)، ۸۳-۶۹.
- عبداللهی، ص. (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت زیستگاه حیات‌وحش به‌منظور شناسایی لکه‌های زیستگاهی با رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین. محیط‌زیست طبیعی، ۷۶، ۱۶۲-۱۴۷.
- عبداللهی، ص.، ایلدرومی، ع.، سلمان‌ماهینی، ع. و فاخران، س. (۱۴۰۰). ارزیابی الگوهای مکانی خدمات اکوسیستمی بر مبنای رویکرد تطبیقی مبتنی بر آمار فضایی در قسمت مرکزی استان اصفهان، جغرافیا و پایداری محیط، ۱۱(۱)، ۵۴-۴۱.
- عبداللهی، ص.، مروتی، م.، جمعه‌پور، م. و دلقندی مقدم، م. (۱۴۰۴ الف). ارزیابی زیستگاه کل و بز (*Capra aegagrus*) و داده‌کاوی مکانی لکه‌های داغ زیستگاهی در منطقه حفاظت شده درونه، خراسان رضوی. علوم محیطی نوین، ۲۳(۱)، ۱۷۶-۱۶۳.
- عبداللهی، ص.، مروتی، م. و جمعه‌پور، م. (۱۴۰۴ ب). ارزیابی اثر هزینه دسترسی به منابع آبی بر شرایط زیستی قوچ و میش (*Ovis orientalis arkali*) پارک ملی تندوره، مدیریت بیابان، ۱۳(۱)، ۶۲-۴۳.
- کریمی، پ.، شایسته، ک. و رستگار پویانی، ن. (۱۳۹۹). ارزیابی توزیع عوامل موثر بر تنوع زیستگاهی در مناطق حفاظت‌شده استان کرمانشاه. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۰(۲)، ۱۰۵-۱۲۳.
- مرادی، م.، اشرف‌زاده، م. و نقی‌پور، ع. (۱۴۰۳). مقایسه الگوریتم‌های BioClim، MaxNet و MaxEnt در پیش‌بینی پراکنش کبک دری خزری (*Tetraogallus caspius*) در ایران. محیط‌زیست طبیعی، ۷۷، ۱۷۴-۱۶۳.
- Abdollahi, S., Ildoromi, A., and Salmanmahini, A. (2019). A GIS Based Multi Criteria Evaluation to Ecotourism Suitability Site Selection in Arasbaran Protected Area, Iran. International Journal of Engineering and Natural Sciences, 2(3), 1-7.
- Abdollahi, S., Khalilzadeh, P., Zeilabi, E., and Lesbarrères, D. (2024a). Spatial assessment of biodiversity and conservation priorities in Hamedan Province, Iran, using a landscape ecology approach. Journal of Environmental Studies and Sciences, 14(2), 358-371.
- Abdollahi, S., Zeilabi, E., and Xu, C. C. (2024b). Habitat quality assessment based on local expert knowledge and landscape patterns for bird of prey species in Hamadan, Iran. Modeling Earth Systems and Environment, 10(2), 2051-2061.

- Araújo, M.B., Anderson, R.P., Márcia Barbosa, A., Beale, C.M., Dormann, C.F., Early, R., ... and Rahbek, C. (2019). Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science Advances*, 5(1), eaat4858.
- Campos, J.C., Garcia, N., Alirio, J., Arenas-Castro, S., Teodoro, A. C., and Sillero, N. (2023). Ecological niche models using MaxEnt in Google Earth Engine: Evaluation, guidelines and recommendations. *Ecological Informatics*, 76(8), 102147.
- Cristiani, J. (2022). The connectivity of coastal marine populations: uncovering patterns of dispersal and the implications for management. Ph.D Thesis, The Faculty of Graduate and Postdoctoral studies, The University of British Columbia, 139p..
- Cristiani, J., Rubidge, E., Forbes, C., Moore-Maley, B., and O'Connor, M.I. (2021). A biophysical model and network analysis of invertebrate community dispersal reveals regional patterns of seagrass habitat connectivity. *Frontiers in Marine Science*, 8, 717469.
- Cunningham, M.A., and Johnson, D.H. (2012). Habitat selection and ranges of tolerance: how do species differ beyond critical thresholds?. *Ecology and Evolution*, 2(11), 2815-2828.
- Cushman, S.A., McGarigal, K., and Neel, M.C. (2008). Parsimony in landscape metrics: strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators*, 8(5), 691-703.
- Elith, J., and Leathwick, J.R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40(1), 677-697.
- Fahrig, L. (2017). Ecological responses to habitat fragmentation per se. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48(1), 1-23.
- Farashi, A., and Shariati, M. (2018). Evaluation of the role of the national parks for Persian leopard (*Panther pardus saxicolor*, Pocock 1927) habitat conservation (case study: Tandooreh National Park, Iran). *Mammal Research*, 63(4), 425-432.
- Fletcher Jr, R.J., Didham, R.K., Banks-Leite, C., Barlow, J., Ewers, R.M., Rosindell, J., ... and Haddad, N.M. (2018). Is habitat fragmentation good for biodiversity?. *Biological Conservation*, 226, 9-15.
- Greenspan, E., Montgomery, C., Stokes, D., Wantai, S., and Moo, S.S.B. (2021). Large felid habitat connectivity in the transboundary Dawna-Tanintharyi landscape of Myanmar and Thailand. *Landscape Ecology*, 36(11), 3187-3205.
- Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D., ... and Townshend, J.R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052.
- Hellegers, M., van Hinsberg, A., Lenoir, J., Dengler, J., Huijbregts, M.A., and Schipper, A.M. (2025). Multiple Threshold-Selection Methods Are Needed to Binarise Species Distribution Model Predictions. *Diversity and Distributions*, 31(4), e70019.
- IPBES, W. (2019). Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. Summary for policy makers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.
- Jiménez-Valverde, A. (2014). Threshold-dependence as a desirable attribute for discrimination assessment: implications for the evaluation of species distribution models. *Biodiversity and Conservation*, 23(2), 369-385.
- Jiménez-Valverde, A., and Lobo, J.M. (2007). Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica*, 31(3), 361-369.
- Liu, C., Berry, P.M., Dawson, T.P., and Pearson, R.G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28(3), 385-393.
- Liu, C., White, M., and Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40(4), 778-789.
- Mata, C., González, B.A., Donoso, D.S., Fuentes-Allende, N., Estades, C.F., and Malo, J.E. (2024). Ecological connectivity of vicuña (*Vicugna vicugna*) in a remote area of Chile and conservation implications. *Land*, 13(4), 472.
- McGarigal, K., Cushman, S.A., Neel, M.C., and Ene, E. (2002). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, 3.
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J.W., Rougier, J., Stephenson, D.B., and Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., and Ratto, M. (2004). Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 232p.
- Sofaer, H.R., Hoeting, J.A., and Jarnevich, C.S. (2019). The area under the precision-recall curve as a performance metric for rare binary events. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(4), 565-577.
- Szangolies, L., Rohwäder, M.S., and Jeltsch, F. (2022). Single large AND several small habitat patches: A community perspective on their importance for biodiversity. *Basic and Applied Ecology*, 65(43), 16-27.
- Tatian, M., Borna, F., Gholami, V., and Faraji, A. (2025). Predicting habitat destruction of Rangeland plant species using the maximum entropy algorithm (MaxEnt) and geographic information system (GIS). *Plant Ecology*, 226(7), 721-733.
- Turner, M.G. (2010). Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology*, 91(10), 2833-2849.
- Verma, S., Khurana, S., Ghosh, D., Jenifer, D.R., Mohapatra, T.K., and Jyothi, S.R. (2025). Modelling habitat connectivity using circuit theory for mammal conservation corridors. *Natural and Engineering Sciences*, 10(2), 93-107.
- Vu, X.D., Csaplovics, E., Marrs, C., and Nguyen, T.T. (2022). Criteria and indicators to define priority areas for biodiversity conservation in Vietnam. *Forests*, 13(9), 1341.
- Walz, U. (2015). Indicators to monitor the structural diversity of landscapes. *Ecological modelling*, 295(1), 88-106.
- Wolf, J.F., MacAulay, K.M., and Kriss, K.D. (2022). Evaluating habitat selection models to predict critical habitat for mountain goats in northwest British Columbia. *The Journal of Wildlife Management*, 86(5), e22229.

Threshold Sensitivity Assessment of Habitat Patches for Wild Goat (*Capra aegagrus*) in Tandoureh National Park Using a Landscape Ecology Approach

Sedighe Abdollahi¹, Maryam Morovati^{2*}, Mahdi Jomepoor³



Research Article

1. Postdoctoral fellow, department of Environment, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

baharabdollahi94@gmail.com

2. Associate Professor, Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran.

Water, Energy and Environment Research Institute, Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran.

mymorovati@ardakan.ac.ir

* Corresponding author

3. Environmental Protection Department, Khalil Abad, Razavi Khorasan, Iran.

mahdijomepoor7@gmail.com

Article Code: 2604-1157

Continous Pagination: 1327-1338

Received: 12 April 2026

Accepted: 11 July 2026

Online: 20 July 2026

Review speed: 91 days

Citation:

Abdollahi, S., Morovati, M., and Jomepoor, M. (2026). Threshold Sensitivity Assessment of Habitat Patches for Wild Goat (*Capra aegagrus*) in Tandoureh National Park Using a Landscape Ecology Approach. Management of Natural Ecosystems, 6(2), 1-12.

Abstract

Habitat fragmentation and selecting appropriate thresholds in species distribution models are critical challenges in conservation planning. This study aimed to evaluate the spatial structure of the wild goat (*Capra aegagrus*) habitat in Tandoureh National Park and to assess the sensitivity of landscape metrics to various suitability thresholds. To this end, a habitat suitability map was generated using the Maximum Entropy (MaxEnt) algorithm and 45 presence points recorded in 2025. Subsequently, by employing the landscape suitability approach and combining three suitability thresholds (180, 200, and 220) with three minimum patch sizes (10, 30, and 50 ha), nine analytical scenarios were generated. Results indicated that distance to rivers (38.3% contribution; 16.4% importance), vegetation type (19.8% contribution; 9.6% importance), and elevation (11.3% contribution; 24.1% importance) played the most significant roles in explaining species distribution. Increasing the suitability threshold from 180 to 220 led to a significantly more aggregated spatial structure. The Number of Patches (NP) decreased from 39 patches at a threshold of 180 and minimum patch size of 10 ha to 5 patches at a threshold of 220. Normalized sensitivity analysis revealed that NP was the most responsive metric to threshold changes, with coefficients below -2 in both the 180–200 and 200–220 ranges, whereas AI and COHESION remained close to zero. Increasing the suitability threshold primarily reduced the number of patches and concentrated habitat in central–southern core areas of the park rather than altering overall landscape cohesion. Thus, decision-making based on a range of thresholds can enhance the reliability of conservation planning.

Key Words:

Suitability Threshold Analysis, Species Distribution Modeling, Landscape Metrics, Conservation Planning.