ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Researches. 2025;40(3):267-277 10.58209/geores.40.3.267

Dynamic Role of Vegetation 3D Structure and the Cumulative Effects of Human Threats on the Habitat Suitability of the Caspian Roe Deer

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Gravand F.[1]* *PhD*
Hasani Shah Shahidani E.[1] *MSc*
Fallah Mojaver M.[1] *MSc*
Hejazi S.A.[2] *MSc*
Kafaei S.[3] *PhD*

How to cite this article
Gravand F, Hasani Shah Shahidani E, Fallah Mojaver M, Hejazi SA, Kafaei S. Dynamic Role of Vegetation 3D Structure and the Cumulative Effects of Human Threats on the Habitat Suitability of the Caspian Roe Deer. Geographical Researches. 2025;40(3):267-277.

[1]Department of Environment Guilan Province, Rasht, Iran
[2]Cohort Center, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran
[3]Department of Environment Kerman Province, Kerman, Iran

***Correspondence**
Address: Department of Environment Guilan Province, Resalat Street, Rasht, Iran. Postal Code: 4185713159
Phone: +98 (13) 33824626
gravand92@gmail.com

Article History
Received: July 31, 2025
Accepted: September 19, 2025
ePublished: October 2, 2025

ABSTRACT

Aims The Caspian roe deer, as an indicator species in the Hyrcanian forests, is highly sensitive to habitat structural changes and human pressures. This study aimed to comprehensively assess habitat suitability and identify key factors affecting the distribution of this species in the Deylaman-Dorfak protected area (Farraroud, Rudbar).

Methodology This was a descriptive study conducted in 2024 in Farraroud, Roudsar. An integrated approach combining the Habitat Evaluation Procedure (HEP), Ecological Niche Factor Analysis (ENFA), and Maximum Entropy Model (MaxEnt) was employed. Data were collected through expert questionnaires, field surveys, and Sentinel-2 satellite imagery, and validated using AUC and Boyce indices.

Findings The habitat assessment results indicated that the Gousalekah habitat, with a suitability index of 0.86, exhibited the most favorable conditions, whereas Rokouh-Sara, with a value of 0.36, was in a critical state. The maximum entropy model demonstrated a highly satisfactory performance in predicting species distribution. Ecological niche factor analysis also revealed a marginality of 0.72 and a biological specialization of 1.9, indicating the species' high sensitivity to habitat changes. The vegetation cover index was identified as the most influential variable, contributing 34%. Additionally, livestock density and distance from human settlements played the greatest roles in reducing habitat suitability.

Conclusion Conservation of the Caspian roe deer requires simultaneous attention to both forest ecological structure and anthropogenic pressures.

Keywords Caspian Roe Deer; Habitat Evaluation; Ecological Niche Factor Analysis; Maximum Entropy Model; Hyrcanian Forests

CITATION LINKS

[Araújo *et al.*, 2019] Standards for distribution models in ...; [Benítez-López *et al.*, 2010] The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations ...; [Bobrowski *et al.*, 2020] Nothing else matters? Food as a driving factor of habitat use by red and roe ...; [Brooks *et al.*, 2019] Measuring terrestrial area of habitat (AOH) and its utility for the ...; [Champagne *et al.*, 2021] A review of ungulate impacts on the success of climate-adapted forest ...; [Côté *et al.*, 2004] Ecological impacts of deer ... [Di Marco *et al.*, 2019] Wilderness areas halve the extinction risk ...; [Dirzo *et al.*, 2014] Defaunation in the ...; [Drusch *et al.*, 2012] Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES ...; [Elith & Leathwick, 2009] Species distribution models: Ecological explanation and prediction across ...; [Elith *et al.*, 2011] A statistical explanation of MaxEnt ...; [Evcin *et al.*, 2019] Habitat suitability model with maximum entropy approach for European roe deer (Capreolus capreolus) in the ...; [Forkuor *et al.*, 2017] High resolution mapping of soil properties using remote sensing variables in south-western Burkina Faso: A comparison of machine learning and multiple linear ...; [Hirzel *et al.*, 2002] Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps ...; [Iverson *et al.*, 2023] Land cover and NDVI are important predictors in habitat selection along migration for the Golden-crowned Sparrow, a temperate-zone ...; [Kass *et al.*, 2021] ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' ...; [Mahmoodi *et al.*, 2020] Identifying habitat patches and suitability for roe deer, Capreolus capreolus as a protected ...; [Margules & Pressey, 2000] Systematic conservation ...; [Melis *et al.*, 2009] Predation has a greater impact in less productive environments: Variation in roe deer, Capreolus capreolus, population ...; [Newbold *et al.*, 2015] Global effects of land use on local ...; [Nogueira *et al.*, 2021] Synergistic effects of habitat configuration and land-use intensity shape the structure of bird assemblages in human-modified landscapes across three ...; [Phillips *et al.*, 2017] Opening the black box: An open-source ...; [Phillips *et al.*, 2006] Maximum entropy modeling of species geographic ...; [Pourmosa *et al.*, 2024] Habitat suitability modeling of the Caspian Red Deer (Cervus elaphus Maral) in the central zone of the Hyrcanian region: Identification of priority ...; [Ripple *et al.*, 2015] Collapse of the world's largest ...; [Schwegmann *et al.*, 2023] Effects of understory characteristics on browsing patterns of roe deer in central European ...; [Stritih *et al.*, 2024] Same, but different: Similar states of forest structure in temperate mountain regions of Europe despite different social-ecological forest ...; [Talebi *et al.*, 2014] Forests of Iran: A treasure from the past, a hope ...; [USFWS, 1980] Habitat Evaluation Procedures ...; [Valavi *et al.*, 2022] Predictive performance of presence-only species distribution models: A benchmark study ...;

Copyright© 2025, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نقش پویای ساختار سه‌بعدی پوشش گیاهی و اثرات تجمعی تهدیدهای انسانی بر مطلوبیت زیستگاه شوکای خزری

فرود گراوند* PhD
اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان گیلان، رشت، ایران
اسماعیل حسنی شاه شهیدانی MSc
اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان گیلان، رشت، ایران
مصطفی فلاح مجاور MSc
اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان گیلان، رشت، ایران
سیده عقیله حجازی MSc
دانشگاه علوم پزشکی گیلان، مرکز کوهورت، رشت، ایران
ساسان کفایی PhD
اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان کرمان، کرمان، ایران

چکیده

اهداف: شوکای خزری به عنوان گونه‌ای شاخص در جنگل‌های هیرکانی، نسبت به تغییرات ساختاری جنگل و فشارهای انسانی بسیار حساس است. این پژوهش با هدف ارزیابی جامع مطلوبیت زیستگاه شوکا و شناسایی عوامل کلیدی موثر بر پراکنش آن در منطقه شکارممنوع دیلمان-درفک (فرارود رودبار) انجام شد.

روش‌شناسی: پژوهش حاضر از نوع توصیفی بوده و در سال ۱۴۰۳ در منطقه فرارود رودبار انجام شد. برای این منظور از رویکردی تلفیقی شامل روش ارزیابی زیستگاه، مدل بوم‌جایگاهی و مدل توزیع گونه استفاده گردید. داده‌ها از طریق پرسش‌نامه‌های کارشناسی، پیمایش میدانی و تصاویر Sentinel-2 گردآوری و اعتبارسنجی شدند.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی زیستگاه نشان داد زیستگاه گوساله‌گاه با شاخص مطلوبیت ۰/۸۶ مطلوب‌ترین شرایط را داشت در حالی که روکوه‌سرا با مقدار ۰/۳۶ در وضعیت بحرانی قرار گرفت. مدل حداکثر آنتروپی عملکرد بسیار مطلوبی در پیش‌بینی پراکنش گونه داشت. تحلیل عامل بوم‌جایگاهی نیز حاشیه‌مندی ۰/۷۲ و تخصص زیستی ۱/۹ را نشان داد که بیانگر حساسیت بالای گونه به تغییرات زیستگاهی بود. شاخص پوشش گیاهی با سهم ۳۴٪ موثرترین متغیر شناسایی شد. همچنین تراکم دام و فاصله از سکونتگاه‌های انسانی بیشترین نقش را در کاهش مطلوبیت زیستگاه ایفا کردند.

نتیجه‌گیری: حفاظت از شوکای خزری نیازمند توجه همزمان به دو بُعد ساختار اکولوژیکی جنگل و کنترل فشارهای انسانی است.

کلیدواژگان: شوکای خزری، ارزیابی زیستگاه، تحلیل عامل بوم‌جایگاهی، مدل حداکثر آنتروپی، جنگل‌های هیرکانی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸
*نویسنده مسئول: gravand92@gmail.com

مقدمه

تخریب و تکه‌تکه‌شدن زیستگاه‌ها، به‌ویژه در اکوسیستم‌های جنگلی، از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده تنوع زیستی جهانی به شمار می‌روند و پیامدهای آنها در سطوح ساختاری، کارکردی و ژنتیکی اکوسیستم‌ها به طور گسترده گزارش شده است [Newbold *et al.*, 2015]. گسترش فعالیت‌های انسانی از قبیل توسعه اراضی کشاورزی، قطع درختان، احداث جاده و بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی، به‌تدریج باعث کاهش یکپارچگی پوشش گیاهی و تجزیه زیستگاه‌ها در مقیاس‌های مختلف شده‌اند [Di Marco *et al.*, 2019]. در نتیجه، بسیاری از گونه‌های حساس جنگلی با کاهش کیفیت زیستگاه، محدودشدن منابع غذایی، افزایش مرزهای تماس با انسان و در نهایت اُفت جمعیت مواجه شده‌اند.

در میان این زیستگاه‌ها، جنگل‌های هیرکانی شمال ایران به عنوان یکی از مهم‌ترین ذخیره‌گاه‌های تنوع زیستی نیم‌کره شمالی شناخته می‌شوند. این جنگل‌ها که به‌تازگی در فهرست میراث جهانی یونسکو ثبت شده‌اند، زیستگاه گونه‌های ارزشمندی از پستانداران بزرگ از جمله شوکای خزری (*Capreolus capreolus*) هستند؛ گونه‌ای که به ساختار پوشش گیاهی چندلایه، منابع غذایی متنوع و زیستگاه‌های پیوسته وابسته است. با این حال، تغییر کاربری زمین، چرای بی‌رویه دام، شکار غیرقانونی و فشارهای اقلیمی طی دهه‌های اخیر، پایداری زیستگاه‌های این گونه را به‌شدت تهدید کرده است. برآوردها نشان می‌دهد که جمعیت شوکا در چهار دهه گذشته بیش از ۸۰٪ کاهش یافته است و این روند در صورت تداوم فشارهای انسانی می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای پویایی اکوسیستم‌های هیرکانی به همراه داشته باشد [Dirzo *et al.*, 2014]. شوکا به عنوان یک گونه کلیدی، از طریق چرای انتخابی و پراکنش دانه، در باززایی و حفظ ترکیب ساختاری جنگل‌ها نقش حیاتی دارد و کاهش جمعیت آن می‌تواند به تغییرات عمیق در عملکرد اکوسیستم منجر شود [Côté *et al.*, 2004].

در سال‌های اخیر، مدل‌های توزیع گونه (Species Distribution Models; SDMs) به ابزار قدرتمندی برای تحلیل رابطه بین حضور گونه‌ها و متغیرهای محیطی تبدیل شده‌اند. در این میان، مدل حداکثر آنتروپی (Maximum Entropy; MaxEnt) با استفاده از داده‌های حضور تنها (presence-only) توانسته است در پیش‌بینی پراکنش مکانی گونه‌ها و شناسایی عوامل محیطی موثر عملکرد قابل توجهی داشته باشد [Elith *et al.*, 2011; Phillips *et al.*, 2017]. دقت بالای این مدل در شرایط داده‌های محدود و پیچیدگی‌های محیطی، آن را به یکی از پرکاربردترین ابزارها در بوم‌شناسی حفاظتی تبدیل کرده است. از سوی دیگر، مدل تحلیل عامل بوم‌جایگاهی (Ecological Niche Factor Analysis; ENFA) امکان بررسی تمایل اکولوژیکی گونه به شرایط خاص محیطی (marginality) (حاشیه‌مندی-تمایز بین شرایط حضور گونه و شرایط میانگین محیط) و میزان تخصص‌گرایی آن (specialization) (محدودیت گونه به شرایط خاص) را بدون نیاز به داده‌های غیاب فراهم می‌سازد [Hirzel *et al.*, 2002]. هرچند این مدل‌ها قادر به ترسیم الگوی بوم‌جایگاه گونه‌ها هستند، اما در بیشتر موارد اطلاعات کافی درباره کیفیت درونی زیستگاه و ویژگی‌های ساختاری آن ارایه نمی‌دهند و از نظر کاربرد مدیریتی به‌تنهایی کافی نیستند.

در این زمینه، روش ارزیابی زیستگاه (Habitat Evaluation

(Procedure; HEP) به عنوان رویکردی ترکیبی و مبتنی بر شاخص‌های زیستی معرفی شده است که قابلیت تحلیل کیفی-کمّی زیستگاه را دارد. این روش با تعیین متغیرهای کلیدی مورد نیاز گونه و امتیازدهی به واحدهای زیستگاهی براساس کیفیت و دسترسی به منابع، شاخص مطلوبیت زیستگاه (Habitat Suitability Index; HSI) را محاسبه می‌کند [USFWS, 1980]. تلفیق مدل‌های توزیعی مانند MaxEnt و ENFA با HEP می‌تواند رویکردی جامع‌تر برای تحلیل ظرفیت زیستگاهی، شناسایی نقاط بحرانی و تدوین برنامه‌های حفاظتی موثر ارایه دهد. چنین ترکیبی به پژوهشگر امکان می‌دهد تا علاوه بر تحلیل فضایی حضور گونه، به ارزیابی درونی ساختار زیستگاه و اثرات متغیرهای انسانی نیز بپردازد.

با وجود انجام مطالعات مختلف در ایران و سایر مناطق مشابه، اغلب این پژوهش‌ها بر یک مدل واحد تمرکز داشته‌اند و روابط چندبُعدی بین ساختار زیستگاه و فشارهای انسانی را به صورت همزمان بررسی نکرده‌اند [Elith & Leathwick, 2009]. از سوی دیگر، در بسیاری از ارزیابی‌ها تنها شاخص‌های دوبُعدی مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال شده NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) یا پارامترهای فیزیوگرافی ساده استفاده شده است و ساختار سه‌بُعدی پوشش گیاهی و تاثیرات تجمعی تهدیدهای انسانی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارایه یک چارچوب تحلیلی جامع برای ارزیابی مطلوبیت زیستگاه شوکای خزری در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران انجام شد.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع توصیفی بوده و در سال ۱۴۰۳ در منطقه فرارود شهرستان رودبار انجام شد.

منطقه مطالعه

در این مطالعه، به منظور ارزیابی مطلوبیت زیستگاه شوکا در منطقه فرارود شهرستان رودبار، از روش ارزیابی زیستگاه استفاده شد. این روش، که نخستین بار توسط U.S. Fish and Wildlife Service توسعه یافت، یکی از ابزارهای استاندارد برای سنجش کیفیت زیستگاه گونه‌های حیات وحش است و در دهه‌های اخیر به طور گسترده در مطالعات زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی حفاظت به کار رفته است [USFWS, 1980].

منطقه مورد مطالعه در بخش فرارود از شهرستان رودبار، استان گیلان، واقع در دامنه‌های جنگل‌های هیرکانی قرار دارد. این جنگل‌ها به دلیل تنوع زیستی بالا و شرایط اقلیمی نیمه‌مرطوب، به عنوان یکی از کانون‌های حفاظتی شمال ایران شناخته می‌شوند [Talebi *et al.*, 2014]. سه زیستگاه اصلی شامل کردمیر (۱۲۸ هکتار)، روکوه‌سرا (۱۳۲ هکتار) و گوساله‌گاه (۸۰ هکتار) انتخاب شدند. این زیستگاه‌ها در منطقه شکارممنوع دیلمان-درفک واقع شده‌اند و به دلیل تراکم پوشش گیاهی، نزدیکی به سکونتگاه انسانی و فشارهای ناشی از چرای دام، از نظر مطلوبیت زیستگاهی متفاوت‌اند.

جمع‌آوری داده‌ها

اطلاعات از طریق سه منبع گردآوری شد:

۱- پرسش‌نامه‌های تخصصی بین کارشناسان محیط زیست و اهالی بومی منطقه برای شناسایی نیازهای زیستگاهی و عوامل تنش‌زا.

۲- بازدیدهای میدانی جهت اندازه‌گیری متغیرهای زیستگاهی شامل تراکم تاج‌پوشش، پوشش کف جنگل، حضور منابع غذایی و شواهد حضور گونه.

۳- داده‌های محیطی و سنجش از دور شامل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 برای استخراج شاخص‌هایی مانند NDVI و پارامترهای توپوگرافی (شیب، ارتفاع، جهت). داده‌ها از USGS Earth Explorer و ESA Copernicus دریافت شدند [Drusch *et al.*, 2012].

متغیرهای زیستگاهی

در این پژوهش متغیرهای زیستگاهی گونه شوکا به دو دسته اصلی تقسیم شدند:

الف) عوامل کلیدی یا نیازهای زیستگاهی (Habitat Requirements)

این عوامل نشان‌دهنده شرایط اکولوژیکی مطلوب برای بقا و زادآوری گونه بوده و براساس مطالعات میدانی و ادبیات علمی انتخاب شدند [Melis *et al.*, 2009; Benítez-López *et al.*, 2010]:

۱- تاج‌پوشش درختان - (Canopy Cover %)میزان پوشش تاج درختان که نقش حفاظتی و تعدیل‌کننده دما و رطوبت را دارد.

۲- پوشش گیاهان کف جنگل - (Forest Floor Vegetation Cover) شاخصی از منابع غذایی و پناهگاه.

۳- آمیختگی نیازهای زیستگاهی - (Habitat Interspersion) مجاورت و هم‌پوشانی منابع کلیدی شامل آب، غذا، پناه و محل تولید مثل.

۴- منابع غذایی - (Food Availability) تراکم و ترکیب گیاهان علفی و بوته‌ای قابل تغذیه.

۵- پوشش گیاهی اشکوب - (Understory Vegetation Strata) تنوع و تراکم پوشش گیاهی در اشکوب‌های مختلف.

۶- اشکوب‌بندی - (Vertical Stratification) تعداد و کیفیت طبقات ساختاری جنگل.

ب) عوامل تنش‌زا (Stressors)

این دسته از متغیرها فشارهای محیطی و انسانی هستند که مطلوبیت زیستگاه را کاهش داده و احتمال حضور گونه را محدود می‌کنند [Benítez-López *et al.*, 2010; Ripple *et al.*, 2015]:

۱- تراکم دام - (Livestock Density) شدت چرای دام که منجر به کاهش منابع غذایی و تخریب کف جنگل می‌شود.

۲- بهره‌برداری از جنگل - (Logging Intensity) برداشت چوب، سوخت و زغال که ساختار جنگل را تغییر می‌دهد.

۳- فاصله تا روستا - (Distance to Villages) نزدیکی به سکونتگاه انسانی که احتمال برخورد و تنش انسانی را افزایش می‌دهد.

۴- وجود شکارچیان - (Presence of Hunters/Predators) فعالیت شکارچیان انسانی یا حضور شکارچیان طبیعی.

۵- میزان رفت و آمد مردم - (Human Disturbance/Accessibility) شدت حضور و تردد مردم در زیستگاه.

۶- حجم زباله - (Waste Accumulation) وجود پسماند که شاخصی از فشار انسانی و تخریب اکوسیستم است.

برای هر یک از این متغیرها مقیاس کمّی یا کیفی براساس دستورالعمل روش ارزیابی زیستگاه تعریف شد و سپس به رتبه‌های استاندارد (۱=بسیار ضعیف تا ۵=عالی) طبقه‌بندی گردید [USFWS, 1980].

داده‌ها از طریق پیمایش میدانی، پرسش‌نامه‌های کارشناسی و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 استخراج شدند.

روش HEP

روش ارزیابی زیستگاه برای محاسبه شاخص HSI استفاده شد. امتیازدهی هر متغیر در مقیاس ۰ تا ۱ انجام شد و HSI به عنوان میانگین وزنی شاخص‌ها محاسبه گردید [USFWS, 1980].

برای هر زیستگاه، نمایه HSI با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$HSI=(SIV_1\times SIV_2\times SIV_3\times SIV_4\times SIV_5\times SIV_6)^{(1/6)}$$

SIV نمایه استاندارد هر متغیر است.

روش MaxEnt

مدل MaxEnt (نسخه ۳/۴/۴) برای پیش‌بینی توزیع مکانی زیستگاه‌های مناسب به کار گرفته شد. داده‌های حضور گونه از پیمایش میدانی و پرسش‌نامه‌ها جمع‌آوری شدند و متغیرهای محیطی وارد مدل شدند. عملکرد مدل با استفاده از شاخص AUC (Area Under Curve) در ROC curve اعتبارسنجی شد. برای جلوگیری از بیش‌برازش، از روش ۵تایی Cross-Validation استفاده شد [Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011].

داده‌ها و متغیرهای ورودی:

- تعداد نقاط حضور پس از پردازش: ۴۳ نقطه (پس از حذف تکراری‌ها و تبدیل مختصات)

- تعداد متغیرهای محیطی مورد استفاده: ۱۲ متغیر (شامل ارتفاع، شیب، جهت، تاج‌پوش، پوشش گیاهان زیر اشکوب، NDVI، فاصله تا روستا و منابع آبی، تراکم دام، فشار بهره‌برداری، حجم زباله، حضور شکارچیان)

- تفکیک مکانی داده‌ها: ۳۰ متر (رستر)

روش ENFA

برای تحلیل نیچ اکولوژیکی گونه از مدل ENFA در نرم‌افزار Biomapper 4.0 استفاده شد. این روش براساس مقایسه داده‌های حضور با توزیع محیطی، شاخص‌های Marginality و Specialization را محاسبه کرد [Hirzel *et al.*, 2002].

داده‌ها و متغیرهای ورودی:

- داده‌های حضور همان مجموعه مورد استفاده در MaxEnt و ۱۲ متغیر محیطی مشابه در مدل ENFA استفاده شدند.

- اعتبارسنجی: روش Leave-One-Out و شاخص Boyce گزارش شد.

تحلیل GIS و سنجش از دور

اطلاعات مکانی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و QGIS 3.26 پردازش شدند. نقشه‌های پهنه‌بندی HSI، MaxEnt و ENFA به سه کلاس "مطلوب"، "متوسط" و "ضعیف" طبقه‌بندی شدند. شاخص NDVI از تصاویر Sentinel-2 با دقت ۱۰متری استخراج شد تا غنای پوشش گیاهی و منابع غذایی مورد ارزیابی قرار گیرد [Forkuor *et al.*, 2017].

تحلیل آماری و حساسیت

شناسایی متغیرهای کلیدی اثرگذار، تحلیل حساسیت (Variable Importance) در MaxEnt انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت. به منظور بررسی همبستگی بین متغیرهای زیستگاهی و شاخص مطلوبیت، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون مقایسه میانگین Tukey استفاده شد [Ripple *et al.*, 2015].

یافته‌ها

برای تعیین شاخص HSI در مدل HEP، شش متغیر زیستگاهی و شش عامل تنش‌زا براساس ماتریس‌های رتبه‌بندی در سه زیستگاه گوساله‌گاه، کردمیر و روکوه‌سرا اندازه‌گیری شد که نشان داد می‌دهند که مقادیر شاخص‌ها در هر سه زیستگاه متفاوت است (جداول ۱ و ۲). نتایج نشان داد که گوساله‌گاه در اغلب شاخص‌ها رتبه‌های بالاتری دریافت کرد، در حالی که روکوه‌سرا در بیشتر متغیرها در رتبه‌های پایین قرار گرفت و کردمیر مقادیر میانی به‌دست آورد.

عوامل انسانی

طبق رتبه‌بندی، زیستگاه گوساله‌گاه کمترین میزان فشار انسانی را ثبت کرد (جدول ۱). در این زیستگاه، بهره‌برداری جنگلی متوقف شد، تراکم دام در رده «عالی» قرار گرفت، حجم زباله در پایین‌ترین مقدار ثبت شد و میزان حضور شکارچی و تردد انسانی در رده «خوب» قرار داشت. همچنین فاصله تا سکونتگاه‌ها نیز در بیشترین مقدار ثبت شد. در مقابل، زیستگاه‌های کردمیر و روکوه‌سرا در بیشتر شاخص‌های انسانی امتیازهای پایین‌تری کسب کردند؛ در هر دو زیستگاه، قطع درخت و برداشت چوب وجود داشت. کردمیر بیشترین حجم زباله و بالاترین میزان تردد انسانی را ثبت کرد. تراکم دام در کردمیر در رده «متوسط» قرار گرفت و روکوه‌سرا بالاترین مقدار تراکم دام را داشت. نزدیکی بیشتر دو زیستگاه اخیر به سکونتگاه‌های انسانی نیز امتیاز آنها را کاهش داد. همچنین حضور شکارچیان در این دو زیستگاه نیز در سطح «متوسط» قرار داشت.

جدول ۱) رتبه‌بندی عوامل تنش‌زا

وضعیت	متغیر	رتبه
الف	بهره‌برداری از جنگل (وضعیت بهره‌برداری)	
بسیار ضعیف	قطع درختان فعال	۱
ضعیف	برداشت چوب	۲
متوسط	حمل و نقل چوب	۳
خوب	بهره‌برداری برای ذغال/هیزم	۴
عالی	توقف بهره‌برداری	۵
ب	تراکم دام (واحد دامی)	
بسیار ضعیف	>۱۰۰۰	۱
ضعیف	۵۰۰-۱۰۰۰	۲
متوسط	۲۵۰-۵۰۰	۳
خوب	<۲۵۰	۴
عالی	بدون دام	۵
پ	حجم زباله	
بسیار ضعیف	>۵۰	۱
ضعیف	۵۱-۴۰	۲
متوسط	۳۰-۴۱	۳
خوب	۳۱-۲۰	۴
عالی	<۲۰	۵
ت	شدت حضور شکارچیان	
بسیار ضعیف	بسیار زیاد	۱
ضعیف	زیاد	۲
متوسط	متوسط	۳
خوب	کم	۴
عالی	بسیار کم	۵

جدول ۲) رتبه‌بندی نیازمندی‌های زیستگاهی

وضعیت	متغیر	رتبه
الف	پوشش گیاهی اشکوب زیرین (میزان تراکم)	
بسیار ضعیف	<۴۰٪	۱
ضعیف	۴۰٪	۲
متوسط	۵۰٪	۳
خوب	۶۰٪	۴
عالی	۷۰٪	۵
ب	وضعیت تاج‌پوشش درختان (درصد تاج‌پوشش)	
بسیار ضعیف	<۲۵٪	۱
ضعیف	۴۰-۲۵٪	۲
متوسط	۵۵-۴۰٪	۳
خوب	۷۰-۵۵٪	۴
عالی	>۷۰٪	۵
پ	وضعیت اشکوب (تعداد اشکوب)	
بسیار ضعیف	یک اشکوبه	۱
ضعیف	دو اشکوبه	۲
متوسط	سه اشکوبه	۳
خوب	چهار اشکوبه	۴
عالی	پنج اشکوبه	۵
ت	فراوانی گیاهان قابل تغذیه (تراکم گیاهان؛ گونه در هکتار)	
بسیار ضعیف	<۵	۱
ضعیف	۵-۱۰	۲
متوسط	۱۱-۲۰	۳
خوب	۲۱-۳۰	۴
عالی	>۳۰	۵

ویژگی‌های ساختاری پوشش گیاهی

براساس رتبه‌بندی، گوساله‌گاه از نظر ویژگی‌های ساختاری جنگل نیز در بهترین وضعیت قرار داشت (جدول ۲). این زیستگاه بالاترین رتبه را در تراکم پوشش زیرین، بیشترین میزان تاج‌پوشش (بیش از ۷۰٪)، ساختار چهار اشکوبه و بیشترین تعداد گیاهان قابل تغذیه (بیش از ۳۰ گونه) ثبت کرد. همچنین در این زیستگاه رتبه فاصله میان منابع تغذیه، پناهگاه، آب و محل زادآوری کمتر از ۵۰۰ متر ثبت شد. زیستگاه کردمیر مقادیر متوسطی از این شاخص‌ها را ارایه داد. روکوه‌سرا در اکثر متغیرها پایین‌ترین مقادیر را نشان داد؛ از جمله تراکم پوشش زیرین کمتر از ۴۰٪، تاج‌پوش کمتر از ۴۰٪، ساختار دو اشکوبه، تعداد محدود گیاهان علوفه‌ای و فاصله زیاد میان منابع مختلف زیستگاهی که باعث شد زیستگاه روکوه‌سرا کمترین رتبه در این شاخص‌ها را به خود اختصاص دهد. زیستگاه کردمیر میان این دو قرار گرفت و همزمان ویژگی‌های متوسطی از نظر ساختاری نشان داد.

- ماتریس نیازمندی‌های زیستگاهی

ارزیابی کمّی-کیفی شش شاخص کلیدی زیستگاهی تفاوت معنی‌داری میان سه زیستگاه مورد مطالعه نشان داد. مقادیر هر شاخص در ماتریس نیازمندی‌های مدل HEP، نشان داد که زیستگاه گوساله‌گاه با مجموع ۲۶ از ۳۰، بالاترین کیفیت ساختاری را به‌دست آورد، زیستگاه کردمیر در وضعیت میانگین قرار گرفت (۲۲ از ۳۰) و روکوه‌سرا پایین‌ترین کیفیت را نشان داد (۱۱ از ۳۰). این امتیازات ماتریس رتبه‌بندی نشان داد که ناهمگونی در ساختار سه‌بُعدی پوشش (به‌ویژه اشکوب‌بندی و پوشش زیرپوش) عامل اصلی تفکیک کیفیت زیستگاهی میان واحدها بوده است. نتایج نشان داد که زیستگاه گوساله‌گاه در شاخص‌های «آمیختگی نیازها»، «پوشش اشکوبی» و «فراوانی منابع غذایی» رتبه بالاتری داشت؛ در مقابل روکوه‌سرا ضعف مشخصی در پوشش کف جنگل و تنوع گیاهی داشت (جدول ۳).

جدول ۳) ماتریس نیازمندی‌های زیستگاهی

شاخص	کردمیر	روکوه‌سرا	گوساله‌گاه
تاج‌پوشش	۴	۲	۳
کف جنگل	۴	۱	۴
آمیختگی	۳	۲	۵
منابع غذایی	۴	۲/۵	۵
پوشش اشکوب	۴	۱/۵	۵
اشکوب‌بندی	۳	۲	۴
مجموع	۲۲	۱۱	۲۶

بررسی عوامل تنش‌زای موثر بر زیستگاه شوکا

رتبه‌بندی شش عامل تنش‌زا نیز توزیع نامتوازنی از فشارهای انسانی میان زیستگاه‌ها آشکار ساخت. براساس ماتریس عوامل تنش‌زا، زیستگاه گوساله‌گاه با مجموع ۲۸، کمترین فشار انسانی را ثبت کرد، در حالی که روکوه‌سرا و کردمیر به‌ترتیب در سطوح متوسط تا بالا قرار گرفتند (۲۳ و ۲۱). در زیستگاه گوساله‌گاه، بیشترین فاصله تا روستاها

و توقف بهره‌برداری ثبت شد. در کردمیر، تراکم دام، دسترسی و نزدیکی به سکونتگاه‌ها و تردد بالا بیشترین مقادیر فشار را ایجاد کردند.

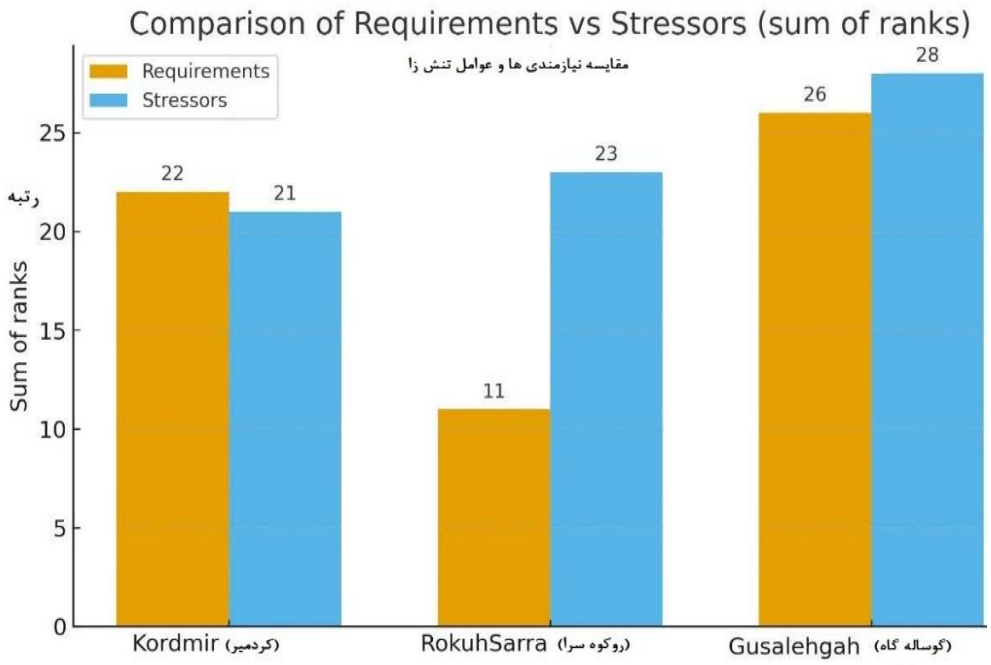
نگاشت محورهای فشار در جدول ماتریس عوامل تنش‌زا نشان داد که بهره‌برداری چوبی و تراکم دام بیشترین سهم را در کاهش مطلوبیت زیستگاه داشتند و نزدیکی به روستاها با افزایش تداخل‌های انسانی همبستگی قوی با شاخص‌های تنش‌زا داشت (جدول ۴).

ترکیب نیازمندی‌ها و عوامل تنش‌زا

تلفیق امتیازات نیازمندی‌های زیستگاهی و عوامل تنش‌زا در چارچوب HEP نمایه‌ای یکپارچه از کیفیت زیستگاهی ارایه داد. بر این اساس، زیستگاه گوساله‌گاه با مجموع نمره ۵۴ به عنوان زیستگاهی با مطلوبیت بالا شناخته شد، زیستگاه کردمیر با ۴۳ در طبقه میانگین و زیستگاه روکوه‌سرا با ۳۴ در طبقه پایین قرار گرفت. این مقایسه نشان داد که وجود ساختار سه‌بعدی مناسب در کنار سطوح پایین فشار انسانی شرط لازم برای حفظ HSI بالا است؛ این مقادیر طبقه‌بندی نهایی مطلوبیت زیستگاه را براساس داده‌های ساختاری و فشارهای انسانی نشان دادند (شکل ۱).

جدول ۴) ماتریس عوامل تنش‌زا

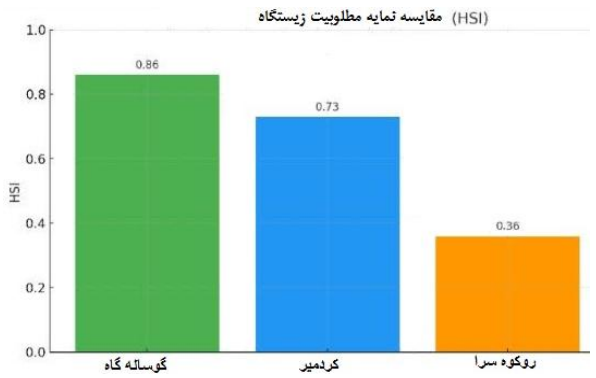
زیستگاه	دام	بهره‌برداری	فاصله روستا	شکارچی	تردد	زباله	مجموع
کردمیر	۳	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۴	۳/۵	۲۱
روکوه‌سرا	۳	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۴/۵	۵	۲۳
گوساله‌گاه	۵	۴/۵	۴	۴/۵	۵	۵	۲۸



شکل ۱) مجموع رتبه‌های نیازها و تنش‌زاها

تعیین نمایه مطلوبیت زیستگاه‌ها

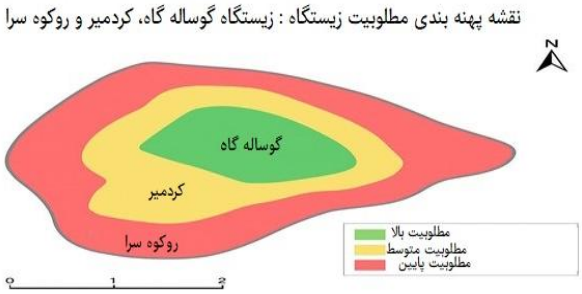
شاخص HSI به عنوان معیار کمّی تعیین کیفیت زیستگاه برای شوکا در سه زیستگاه مورد نظر محاسبه شد و میانگین‌های استانداردشده به‌ترتیب برابر ۰/۸۶ در زیستگاه گوساله‌گاه، ۰/۷۳ در زیستگاه کردمیر و ۰/۳۶ در زیستگاه روکوه‌سرا بود. این اختلاف نشان داد که پهنه مورد مطالعه دارای زیستگاه‌های مطلوب تا زیستگاه‌های به‌شدت تنزل‌یافته بود. بالاترین مقدار HSI در گوساله‌گاه به دلیل برخورداری همزمان از ساختار چندلایه پوشش گیاهی، تاج‌پوش متراکم و فاصله بیشتر از کانون‌های تنش انسانی ثبت شد؛ کردمیر با وجود برخورداری از ساختار نسبتاً مناسب پوشش، تحت تاثیر فشارهای انسانی متوسط قرار داشت و در نتیجه مقدار HSI آن در طبقه میانی قرار گرفت. در مقابل، روکوه‌سرا پایین‌ترین مقدار HSI را نشان داد که بیانگر فروپاشی بخشی از ساختار عمودی و افقی پوشش گیاهی و قرارگیری زیستگاه در معرض تنش‌های انسانی شدید بود. به طور کلی، نتایج نشان دادند که تغییرات همزمان در کیفیت ساختار پوشش گیاهی و شدت عوامل انسانی، تعیین‌کننده‌ترین نقش را در شکل‌دهی به تفاوت‌های HSI میان زیستگاه‌ها داشتند (شکل ۲).



شکل ۲) نمایه مطلوبیت HSI در سه زیستگاه

پهنه‌بندی فضایی مطلوبیت زیستگاه

پهنه‌بندی شاخص مطلوبیت زیستگاه نشان داد که مقادیر HSI در سطح منطقه دارای توزیع ناهمگون بوده و سه طبقه اصلی کیفیت زیستگاه در گستره مورد مطالعه قابل تفکیک بودند (شکل ۳). نواحی با مطلوبیت بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی و شرقی گوساله‌گاه قرار گرفتند و پیوستگی مکانی بیشتری نسبت به سایر بخش‌های منطقه داشتند. پهنه‌های با مطلوبیت متوسط بخش قابل توجهی از محدوده را تشکیل دادند و به صورت نوارهای گسترده‌ای در اطراف نواحی مطلوب ظاهر شدند. زیستگاه کردمیر بخش عمده‌ای از این طبقه را دربر گرفت. پهنه‌های با مطلوبیت پایین به طور غالب در محدوده روکوه‌سرا مشاهده شدند و به صورت واحدهای پراکنده و گسترده در بخش‌های جنوبی و غربی منطقه گسترش داشتند. پهنه‌بندی فضایی نشان داد که ۲۵٪ از کل مساحت منطقه در طبقه مطلوبیت بالا، ۵۵٪ در طبقه مطلوبیت متوسط و حدود ۲۰٪ در طبقه مطلوبیت پایین قرار دارد. این درصدهای مساحت پهنه‌بندی نسبت سطح اشغال هر کلاس را در مقیاس منطقه‌ای نشان دادند. نقشه نهایی پهنه‌بندی، تفاوت مکانی سه طبقه کیفیت را به طور روشن نمایش داد و مرزبندی هر یک از زون‌ها را مشخص کرد (شکل ۳).



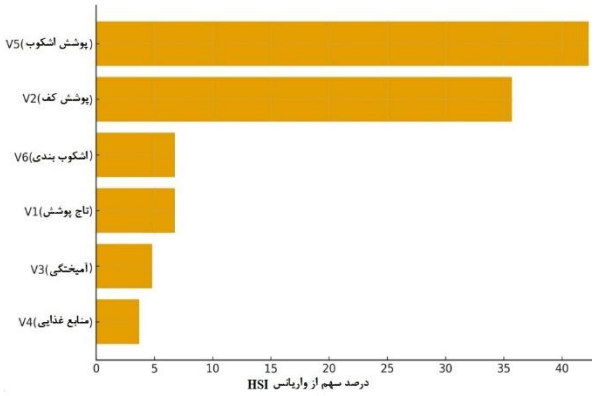
شکل ۳) نقشه پهنه‌بندی مطلوبیت زیستگاه

تحلیل حساسیت متغیرهای زیستگاهی

تحلیل حساسیت نشان داد که توزیع سهم واریانس ln(HSI) میان متغیرهای زیستگاهی به طور عمده نامتعادل بود. سهم‌های نسبی تخمین‌زده‌شده نشان دادند که پوشش اشکوبی (SIV_5) و پوشش کف جنگل (SIV_2) بیشترین مشارکت را در واریانس ln(HSI) داشتند؛ سهم SIV_5 تقریباً ۴۲-۴۰٪ و سهم SIV_2 حدود ۳۶-۳۳٪ گزارش شد، در حالی که سهم سایر متغیرها هر یک کمتر از ۱۰٪ بود (نمودار ۳). SIV_5 به عنوان عامل با بیشترین توانایی ایجاد تغییرات نسبی در اختلافات میان‌منطقه‌ای HSI شناخته شد؛ SIV_2 به عنوان محرک دوم در سهم واریانس قرار گرفت. SIV_6 و SIV_1 حساسیت متوسطی نشان دادند، به طوری که در زیستگاه‌هایی با مقادیر پایه بسیار پایین این متغیرها، تغییر آنها با نوسان قابل توجه HSI همراه بود. از سوی دیگر، SIV_3 و SIV_4 در دامنه تغییرات مورد بررسی حساسیت نسبی کمتری داشتند.

در زیستگاه‌های پایه پایین، تغییرات مطلق در متغیرهای پایه پایین، افزایش قابل توجهی در مقدار HSI تولید کردند؛ برای مثال، در روکوه‌سرا افزایش پوشش کف جنگل از ۰/۲۰ به ۰/۹۰ موجب تغییر HSI از ۰/۳۶≈ به ۰/۴۲≈ شد (افزایش مطلق ۰/۰۷≈؛ ۱۹٪≈). در مقابل، در گوساله‌گاه که HSI پایه بالا بود، افزایش تاج‌پوشش از ۰/۶۰ به ۰/۸۰ تنها سبب افزایش HSI از ۰/۸۶≈ به ۰/۹۰≈ شد (افزایش مطلق ۰/۰۴≈؛ ۵٪≈).

در جمع‌بندی عددی یافته‌ها، تحلیل حساسیت دوگانه (سهم در واریانس ln(HSI) و تغییر مطلق HSI) تصویر روشنی از اولویت نسبی متغیرها فراهم ساخت: از منظر سهم در واریانس، SIV_5 و SIV_2 محرک‌های اصلی اختلاف میان زیستگاه‌ها بودند؛ از منظر تغییرات مطلق، متغیرهایی با مقدار پایه بسیار پایین بیشترین پتانسیل برای افزایش مطلق HSI را نشان دادند (شکل ۴).



شکل ۴) تحلیل حساسیت متغیرها

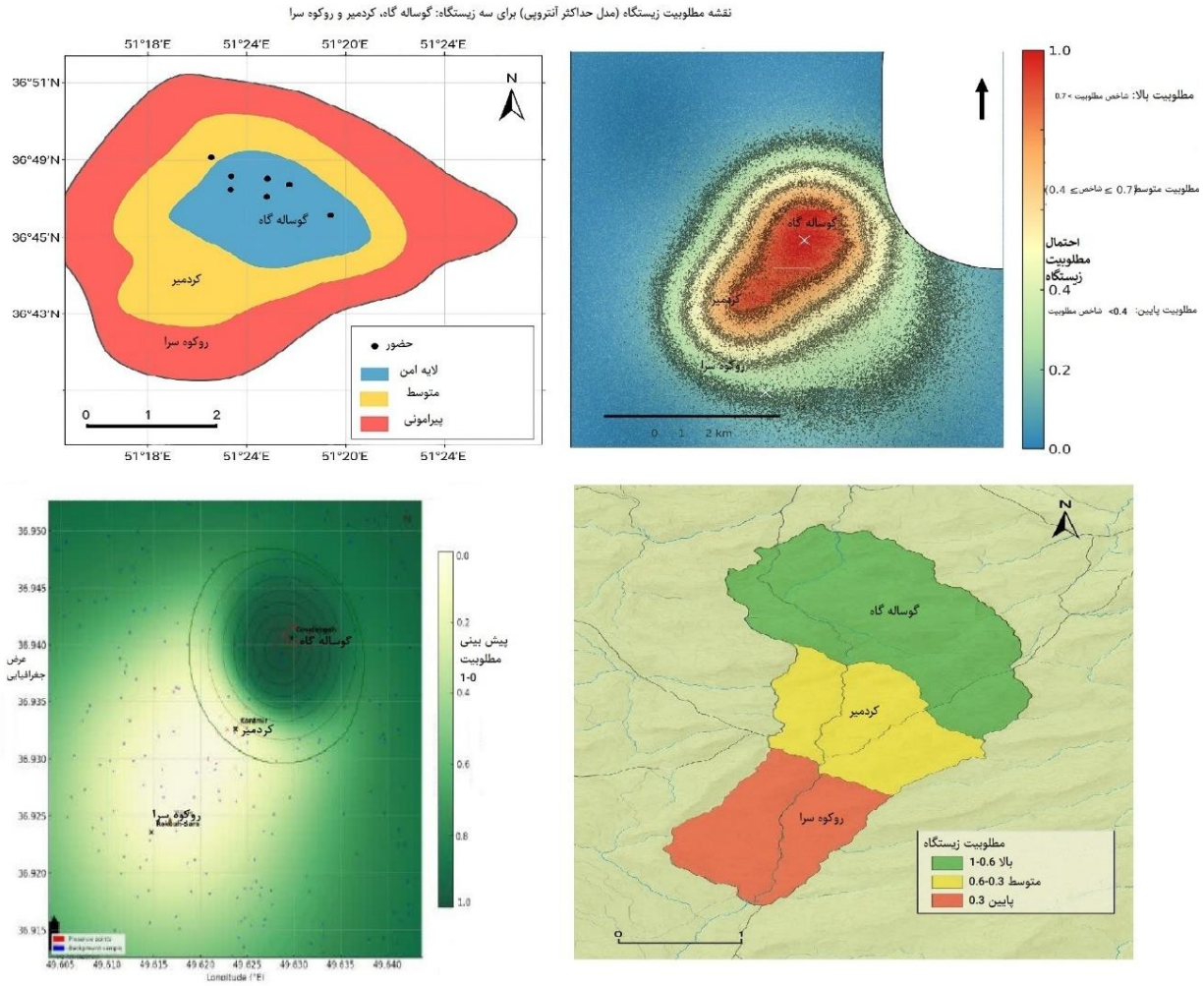
مدل‌سازی برای ارزیابی مطلوبیت زیستگاه شوکا: MaxEnt و ENFA

۱- مدل MaxEnt

مدل MaxEnt خروجی مشخصی از توزیع مکانی مطلوبیت زیستگاه شوکا ارایه داد و مقدار AUC مدل برابر ۰/۹۱ به‌دست آمد. این مقدار نشان داد که مدل توانایی بالایی در تفکیک طبقات مختلف مطلوبیت در منطقه داشته است. براساس محاسبات مدل، متغیر NDVI با سهم ۳۴٪ بیشترین مشارکت را در پیش‌بینی شاخص مطلوبیت داشت و پس از آن پوشش تاج‌پوش با سهم ۲۵٪ قرار گرفت. فاصله از روستا با ۱۸٪، شیب با ۹٪، تراکم دام با ۷٪ و سایر متغیرها در مجموع با ۷٪ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این مقادیر بیانگر سهم نسبی هر یک از متغیرهای به‌کاررفته در پیش‌بینی خروجی مدل بودند (جدول ۵).

جدول ۵) اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در مدل MaxEnt برای گونه شوکا

متغیر محیطی	درصد مشارکت	اهمیت جایگزینی
NDVI	۳۴٪	۳۶٪
پوشش تاج‌پوش درختان	۲۵٪	۲۳٪
فاصله از روستا	۱۸٪	۱۷٪
شیب	۹٪	۸٪
تراکم دام	۷٪	۹٪
سایر متغیرها	۷٪	۷٪
میانگین دقت مدل (AUC)	۰/۹۱	-



شکل ۵) نقشه MaxEnt-ارزیابی مطلوبیت زیستگاه شوکا

طبقه‌بندی مکانی خروجی (HSI از مدل MaxEnt):

خروجی مکانی مدل سه طبقه اصلی مطلوبیت را در منطقه مشخص کرد (شکل ۲). نواحی با طبقه مطلوبیت بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی و شرقی گوساله‌گاه و بخش‌هایی از ارتفاعات کردمیر مشاهده شدند و به صورت لکه‌های نسبتاً پیوسته در نقشه ظاهر شدند. نواحی با طبقه مطلوبیت متوسط در قالب پهنه‌های گسترده‌تری در محدوده‌های بینابینی میان کردمیر و روکوه‌سرا قرار گرفتند. نواحی با مطلوبیت پایین بیشتر در پیرامون سکونتگاه‌های انسانی، حاشیه‌های مسیرهای دسترسی و بخش‌هایی از زیستگاه‌های تحت فشار قرار داشتند. مقایسه بصری خروجی مدل با نتایج حاصل از شاخص HEP نشان داد که الگوی پهنه‌های مطلوب و نامطلوب در هر دو روش مشابه بوده و نواحی با مطلوبیت بالا در هر دو مدل در بخش‌های مشابهی از منطقه قرار داشتند (شکل ۵).

۲- مدل ENFA

در مدل ENFA مقدار شاخص Marginality برابر با ۰/۷۲ و مقدار Specialization برابر با ۱/۹۰ محاسبه شد. مقدار شاخص Boyce برابر با ۰/۷۴ ثبت شد (جدول ۶). در بررسی سهم نسبی متغیرها، NDVI با ۳۱٪ و پوشش تاج‌پوش با ۲۷٪ بیشترین سهم را در مقدار Marginality داشتند. فاصله از روستا با ۲۸٪ و فاصله از منابع آبی با ۲۲٪ نیز بیشترین سهم را در شاخص Specialization ثبت کردند. متغیرهای شیب، تراکم دام و سایر عوامل سهم‌های پایین‌تری داشتند و هر یک کمتر از ۱۰٪ از مجموع را شامل شدند (جدول ۷).

جدول ۶) شاخص‌های بوم‌شناختی حاصل از مدل ENFA برای گونه شوکا

شاخص	مقدار (Value)	واحد/توضیح
Marginality	۰/۷۲	میزان تمایز شرایط زیستگاه مورد استفاده نسبت به میانگین محیط
Specialization	۱/۹۰	بیانگر محدودیت و حساسیت بوم‌شناختی گونه
Boyce Index	۰/۷۴	شاخص اعتبار مدل در پیش‌بینی توزیع زیستگاه

جدول ۷) سهم نسبی متغیرها در حاشیه‌مندی و تخصصی‌بودن مدل ENFA

متغیر محیطی	سهم در Marginality (%)	سهم در Specialization (%)
شاخص NDVI	۳۱	۱۴
پوشش تاج‌پوش	۲۷	۱۲
فاصله از روستا	۱۴	۲۸
فاصله از منابع آبی	۱۰	۲۲
شیب	۹	۷
تراکم دام	۶	۹
سایر متغیرها	۳	۸

طبقه‌بندی مکانی خروجی (HSI از مدل ENFA):

خروجی مکانی مدل ENFA سه طبقه اصلی مطلوبیت زیستگاه را در منطقه مشخص کرد. نواحی با مقدار HSI برابر یا بیشتر از ۰/۶ در بخش‌هایی از مرکز گوساله‌گاه و ارتفاعات کردمیر قرار گرفتند. نواحی با مقدار HSI بین ۰/۳ تا ۰/۶ در مناطق میانی و محدوده‌های حاشیه‌ای گسترش یافتند. مقادیر کمتر از ۰/۳ نیز عمدتاً در بخش‌هایی از روکوه‌سرا و حاشیه‌های جنگل ثبت شدند. این طبقه‌بندی محدوده گسترش هر سطح مطلوبیت را در نقشه خروجی مدل نشان داد و تفکیک فضایی هر سه طبقه را ممکن ساخت.

مقایسه طبقه‌بندی مکانی حاصل از ENFA با خروجی مدل MaxEnt نشان داد که نواحی دارای مقدار HSI بالا در هر دو مدل در بخش‌های مشترکی از منطقه قرار گرفته‌اند. هر دو مدل، بخش‌های مرکزی گوساله‌گاه و بخش‌هایی از ارتفاعات کردمیر را در طبقه مطلوبیت بالا قرار دادند. نواحی با مطلوبیت متوسط و پایین نیز در هر دو مدل در موقعیت‌های مشابهی شناسایی شدند (جدول ۸). این هم‌پوشانی، مشابهت الگوی مکانی سه طبقه اصلی در هر دو مدل را نشان داد.

مبانی مقایسه‌ای مدل‌ها

سه مدل HEP، MaxEnt و ENFA الگوهای مشابهی از طبقه‌بندی مطلوبیت زیستگاه را ثبت کردند. مقادیر HSI در هر سه مدل، محدوده‌هایی با مطلوبیت بالا، متوسط و پایین را مشخص کردند و بخش‌های مرکزی گوساله‌گاه بیشترین مقدار مطلوبیت را در هر سه مدل ثبت کردند و نواحی میان‌منطقه‌ای در محدوده طیف متوسط شناسایی شدند. مناطق دارای مطلوبیت پایین نیز عمدتاً در گستره روکوه‌سرا و بخش‌های پیرامونی سکونتگاه‌ها مشاهده شدند.

جدول ۸) طبقه‌بندی مکانی زیستگاه‌ها براساس خروجی مدل‌های MaxEnt و ENFA

طبقه مطلوبیت زیستگاه	بازه شاخص HSI	موقعیت مکانی غالب	مدل MaxEnt	مدل ENFA
مطلوب	HSI>۰/۶	گوساله‌گاه (مرکز و شرق منطقه)، نواحی مرتفع کردمیر	✓	✓
متوسط	۰/۳≤HSI≤۰/۶	نواحی میانی و انتقالی بین کردمیر و روکوه‌سرا	✓	✓
ضعیف	HSI<۰/۳	اطراف روستاها و نواحی پیرامونی روکوه‌سرا	✓	✓

بحث

این پژوهش با هدف ارایه یک چارچوب تحلیلی ارزیابی جامع مطلوبیت زیستگاه شوکا و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر پراکنش آن در منطقه شکارممنوع دیلمان- درفک (فرارود رودبار) انجام شد. یافته‌های این پژوهش نشان دادند که مطلوبیت زیستگاه شوکا در چشم‌اندازهای جنگلی فرارود رودبار محصولی از تعامل پیچیده میان ساختار سه‌بُعدی پوشش گیاهی و فشارهای انسان‌محور بود. این پیوند فراتر از هم‌پوشانی صرف متغیرهای محیطی و انسانی بود؛ به عبارت دیگر، ساختار عمودی و افقی زیستگاه، که ترکیب اشکوب‌ها، پوشش تاج و زیرپوش را دربر می‌گرفت کارکردهای فراوانی را تسهیل کرد که در نهایت ظرفیت زیستگاهی گونه را شکل داد. با توجه به نقش‌های عملکردی این ساختارها در تنظیم میکروکلایمت، تامین منابع غذایی فصلی و ایجاد پناهگاه‌های موثر، به نظر می‌رسید که هرگونه اختلال در ترازهای عمودی پوشش (مثلاً حذف زیرپوش یا کندن اشکوب میانی) پیوندهای ساختاری-کارکردی را تضعیف می‌کرد و در نتیجه قابلیت زیستی زیستگاه‌ها را تقلیل می‌داد؛ این دیدگاه با نتایج مطالعات پیشین درباره اهمیت ناهمگونی ساختاری در پایداری علف‌خواران جنگلی همسو است [Bobrowski *et al.*, 2020; Stritih *et al.*, 2024; Schwegmann *et al.*, 2023].

فشارهای انسانی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش مطلوبیت زیستگاه‌ها داشتند. زیستگاه روکوه‌سرا، با پایین‌ترین میزان HSI، نمونه‌ای برجسته از تاثیر فشارهای انسانی مانند نزدیکی به سکونتگاه‌های روستایی، بهره‌برداری جنگلی و تراکم دام بود. این عوامل همزمان و به طور تجمعی فشار شدیدی بر کیفیت زیستگاه وارد می‌کردند. به‌ویژه، افزایش تراکم دام و نزدیکی به سکونتگاه‌های انسانی نه‌تنها موجب رقابت برای منابع غذایی با شوکا می‌شود، بلکه موجب تخریب پوشش گیاهی و کاهش تنوع زیستی نیز گشت. این نتایج به‌ویژه با مطالعاتی مانند *آراجو* و همکاران، *بروکس* و همکاران و *نوگیرا* و همکاران [Araújo *et al.*, 2019; Brooks *et al.*, 2019; Nogueira *et al.*, 2021] هم‌راستاست که نشان داده‌اند فشارهای انسانی می‌توانند به‌سرعت زیستگاه‌ها را به مناطق غیرمناسب تبدیل کنند.

تحلیل چندمدلی در مطالعه حاضر امکان متمایزکردن نقش نسبی متغیرها را فراهم ساخت. رویکردهای مبتنی بر حضور (MaxEnt)و تحلیل نیچ (ENFA) طیفی از حساسیت‌های بوم‌شناختی گونه را برجسته کردند که نشان داد شوکا به مجموعه‌ای از شرایط زیستی با مقادیر بهینه پاسخ می‌داد؛ این الگو به‌خصوص جایی بارز شد که متغیرهای نشان‌دهنده کیفیت پوشش (مانند شاخص‌های NDVI و تراکم تاج) با شاخص‌های اختلال انسانی هم‌نوا شده بودند. بدین معنی که حضور منابع غذایی و ساختار پناهگاهی اگر با اختلال ناچیز انسانی همراه نبود، احتمال استفاده از زیستگاه را افزایش می‌داد، اما همان منابع در صورت همراهی با فشارهای انسانی عملاً ارزش زیستگاهی خود را از دست می‌دادند. این سازوکار تضاد میان ظرفیت زیستگاهی و فشار انسانی را بازتاب داد و در تطابق با مطالعاتی قرار گرفت که نشان داده‌اند حتی زیستگاه‌های غنی از نظر غذایی در حضور فشارهای انسانی دوام نمی‌آورند [Pourmosa *et al.*, 2024; Champagne *et al.*, 2021; Nogueira *et al.*, 2021].

مدل ENFA که به طور خاص توانست تمایزات بوم‌شناختی را بین زیستگاه‌ها بررسی کند، نشان داد که شوکا به عنوان یک گونه متخصص، نیازمند شرایط خاصی است که به طور قابل توجهی از شرایط عمومی منطقه متفاوت است. شاخص‌های Marginality و Specialization که در این مدل به‌دست آمدند، بیانگر حساسیت بالای شوکا به تغییرات زیستگاهی بودند. این شاخص‌ها نشان دادند

که شوکا بیشتر در زیستگاه‌هایی با ویژگی‌های خاص نظیر ساختار پیچیده پوشش گیاهی و فاصله از انسان‌ها یافت می‌شود. این امر موجب می‌شد که گونه در برابر تغییرات ناشی از فشارهای انسانی آسیب‌پذیر باشد، به‌ویژه در مناطقی که تحت بهره‌برداری بیش از حد قرار داشتند. در این زمینه، نتایج مدل ENFA از مطالعات پیشین حمایت می‌کند که نشان داده‌اند گونه‌های متخصص مانند شوکا قادر به تحمل تغییرات در زیستگاه‌های تخریب‌شده نیستند و نیاز به شرایط خاص دارند [Valavi *et al.*, 2022; Iverson *et al.*, 2023; Kass *et al.*, 2021].

تحلیل حساسیت متغیرها نشان داد که متغیرهای ساختاری، به‌ویژه پوشش اشکوبی و زیرپوش، بیشترین «اهرم مدیریتی» را داشتند. به لحاظ مکانیکی، تقویت زیرپوش موجب افزایش تنوع منابع غذایی در فصل‌های کم‌منبع و فراهم‌آوری پناه امن برای نوزادان و افراد جوان می‌شدد؛ افزون بر این، زیرپوش نقش تعیین‌کننده‌ای در تثبیت بانک بذر و بازتوانی طبیعی جنگل ایفا می‌کرد که در بلندمدت به تداوم ساختار چنداشکوبه کمک می‌نمود. بنابراین، راهبردهای بازتوانی باید از سطح گونه‌ای فراتر روند و به ترمیم فرآیندهای سازنده ساختار زیستگاه معطوف شوند؛ اقداماتی مانند کاهش فشار چرای دام، حفاظت از توده‌های نهال‌زایی و تحقق مدیریت توان‌بخش زیرپوش نمونه‌هایی از این نوع مداخلات هستند. این رویکرد فراتر از ساده‌سازی پیشنهادات مدیریتی عمل می‌کرد و توجه را معطوف به بازگرداندن روندها و فرآیندهای اکولوژیک می‌نمود [Mahmoodi *et al.*, 2020; Evcin *et al.*, 2019].

نقش فشارهای انسانی، به صورتی چندوجهی بروز کرد. تراکم دام و بهره‌برداری ناپایدار موجب کاهش ظرفیت تولید علوفه و آسیب فیزیکی به ساختار خاک و بانک بذر می‌شود که پیامدهای زنجیره‌ای بر توان احیا و تعادل گونه‌های پایه‌ریز داشت. نزدیک‌شدن زیستگاه‌ها به سکونتگاه‌های انسانی و تردد پیوسته نیز رفتار گونه را تغییر داد؛ یعنی شوکاها به جابه‌جایی زمانی و مکانی گرایش نشان دادند که این موضوع می‌تواند به افزایش هزینه‌های انرژی و کاهش موفقیت تولید مثلی منجر شود. این تاثیرات غیرمستقیم، مانند افزایش استرس رفتاری و کاهش ارتباطات اجتماعی جمعیت‌ها، اغلب در مطالعات میدانی کمتر گزارش شده ولی در مدل‌سازی ترکیبی ما آشکار شدند. در نتیجه، سیاست‌های مدیریت باید از مداخلات فیزیکی ساده فراتر روند و چارچوب‌های کنترلی برای کاهش تداخل‌های کاربری زمین و دسترسی انسانی در زیستگاه‌های کلیدی تدوین کنند.

یکی از جنبه‌های مهم این مطالعه همگرایی بالای نتایج مدل‌های مختلف بود که می‌تواند به عنوان یک چارچوب معتبر برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی استفاده شود. همگرایی مدل‌های HEP، MaxEnt و ENFA در شناسایی زیستگاه‌های با کیفیت بالا و مناطق تحت فشار انسانی، ابزار مفیدی برای مدیریت زیستگاه‌ها فراهم آورد. در این راستا، پیشنهادات مدیریتی شامل اقدامات ویژه برای زیستگاه گوساله‌گاه به عنوان ناحیه هسته حفاظتی، مدیریت پایدار چرای دام در کردمیر و اجرای پروژه‌های احیای زیستگاه در روکوه‌سرا است. این مداخلات می‌توانند به کاهش آسیب‌های ناشی از فشارهای انسانی و بهبود کیفیت زیستگاه‌ها کمک کنند [Margules & Pressey, 2000].

در عین حال باید محدودیت‌های پژوهش را نیز به صورت شفاف مطرح کرد. داده‌های حضور و کمیت‌سنجی متغیرهای انسانی در برخی بخش‌ها فاقد تفکیک فصلی بودند که می‌توانست بر دقت برآوردهای زمانی و فصلی تاثیر بگذارد. علاوه بر این، برخی فرآیندهای رفتاری و جمعیتی مانند نرخ زادآوری و مرگ‌ومیر یا اثرات اپیدمیولوژیک بالقوه که ممکن است بر ساختار جمعیت تکانه وارد کنند، در این مطالعه مستقیماً اندازه‌گیری نشدند. از این رو، نتایج باید در چارچوب این محدودیت‌ها تفسیر شوند و برنامه‌های پایش بلندمدت برای تکمیل اطلاعات حیاتی پیشنهاد می‌گردد. در مطالعات آتی، ادغام داده‌های دوربینی، نمونه‌برداری ژنتیکی و نظارت جمعیتی می‌تواند توان تبیینی مدل‌ها را افزایش دهد و امکان بررسی ناهمگنی فصلی و بین سالی را فراهم آورد.

موفقیت حفظ شوکا منوط به هم‌افزایی بین اقدامات بازتوانی ساختاری و کاهش فشارهای انسانی است. این هم‌افزایی باید در قالب یک برنامه منطقه‌ای پیاده‌سازی شود که اولویت‌ها را براساس ارزش زیستگاهی و قابلیت بازتوانی تعیین کند و منابع حفاظتی را به صورت هدفمند تخصیص دهد. بدین ترتیب، ترکیب مداخلات حفاظتی در سطوح محلی (کنترل چرای دام، حفاظت از نهال‌زایی)، ناحیه‌ای (طراحی شبکه حفاظت و گذرگاه‌های اکولوژیک) و سیاستی (تنظیم سیاست‌های بهره‌برداری و مشارکت جوامع محلی) می‌تواند شانس موفقیت برنامه‌های حفاظتی را افزایش دهد.

در نهایت، این مطالعه با نشان‌دادن ارزش استفاده از مدل‌های چندگانه برای تحلیل و مدیریت زیستگاه‌های حساس، به‌ویژه در جنگل‌های هیرکانی، می‌تواند راهگشای پژوهش‌های آینده در زمینه حفظ تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌های جنگلی باشد. به‌ویژه این رویکرد ترکیبی می‌تواند به عنوان یک مدل برای سایر مناطق با زیستگاه‌های مشابه، همچون جنگل‌های قفقاز و دیگر اکوسیستم‌های جنگلی ایران، مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

شوکا نه براساس معیارهای ساده زیستگاهی، بلکه براساس "پیچیدگی ساختاری سه‌بُعدی جنگل" زیستگاه خود را انتخاب می‌کند.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه اخلاقی: این پژوهش از نوع مطالعات تحلیلی بوده و نیاز به دریافت مجوز اخلاقی از مراجع ذی‌صلاح نداشته است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافع مالی یا شخصی مرتبط با محتوای این مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان: فرود گراوند (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۸٪)؛ اسماعیل حسنی

شاه شهیدانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۱۵٪)؛ مصطفی فلاح مجاور (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۱۵٪)؛ سیده عقیله حجازی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۰٪)؛ ساسان کفایی (نویسنده پنجم)، نگارنده مقدمه/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۲٪)

منابع مالی: این پژوهش از هیچ منبع مالی یا حمایتی خاصی برخوردار نبوده و تمامی هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

- Araújo MB, Anderson RP, Márcia Barbosa A, Beale CM, Dormann CF, Early R, et al (2019). Standards for distribution models in biodiversity assessments. Science Advances. 5(1):eaat4858.
- Benítez-López A, Alkemade R, Verweij PA (2010). The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis. Biological Conservation. 143(6):1307-1316.
- Bobrowski M, Gillich B, Stolter C (2020). Nothing else matters? Food as a driving factor of habitat use by red and roe deer in winter?. Wildlife Biology. 2020(4):1-9.
- Brooks T, Pimm SL, Akçakaya HR, Buchanan G, Butchart SH, Foden W, et al (2019). Measuring terrestrial area of habitat (AOH) and its utility for the IUCN Red List. Trends in Ecology & Evolution. 34(11):977-986.
- Champagne E, Raymond P, Royo AA, Speed JD, Tremblay JP, Côté SD (2021). A review of ungulate impacts on the success of climate-adapted forest management strategies. Current Forestry Reports. 7(4):305-320.
- Côté SD, Rooney TP, Tremblay JP, Dussault C, Waller DM (2004). Ecological impacts of deer overabundance. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 35(1):113-147.
- Di Marco M, Ferrier S, Harwood TD, Hoskins AJ, Watson JE (2019). Wilderness areas halve the extinction risk of terrestrial biodiversity. Nature. 573:582-585.
- Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJ, Collen B (2014). Defaunation in the anthropocene. Science. 345(6195):401-406.
- Drusch M, Del Bello U, Carlier S, Colin O, Fernandez V, Gascon F, et al (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment. 120:25-36.
- Elith J, Leathwick JR (2009). Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 40(1):677-697.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distributions. 17(1):43-57.
- Evcin O, Kucuk O, Akturk E (2019). Habitat suitability model with maximum entropy approach for European roe deer (Capreolus capreolus) in the Black Sea Region. Environmental Monitoring and Assessment. 191(11):669.
- Forkuor G, Hounkpatin OK, Welp G, Thiel M (2017). High resolution mapping of soil properties using remote sensing variables in south-western Burkina Faso: A comparison of machine learning and multiple linear regression models. PLoS One. 12(1):e0170478.
- Hirzel AH, Hausser J, Chessel D, Perrin N (2002). Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data?. Ecology. 83(7):2027-2036.
- Iverson AR, Humple DL, Cormier RL, Hull J (2023). Land cover and NDVI are important predictors in habitat selection along migration for the Golden-crowned Sparrow, a temperate-zone migrating songbird. Movement Ecology. 11(1):2.
- Kass JM, Muscarella R, Galante PJ, Bohl CL, Pinilla-Buitrago GE, Boria RA, et al (2021). ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions. Methods in Ecology and Evolution. 12(9):1602-1608.
- Mahmoodi S, Alizadeh Shabani A, Zeinalabedini M, Khalilipour O, Ashrafi S (2020). Identifying habitat patches and suitability for roe deer, Capreolus capreolus as a protected species in Iran. Caspian Journal of Environmental Sciences. 18(4):357-366.
- Margules CR, Pressey RL (2000). Systematic conservation planning. Nature. 405:243-253.
- Melis C, Jędrzejewska B, Apollonio M, Bartoń KA, Jędrzejewski W, Linnell JD, et al (2009). Predation has a greater impact in less productive environments: Variation in roe deer, Capreolus capreolus, population density across Europe. Global Ecology and Biogeography. 18(6):724-734.
- Newbold T, Hudson LN, Hill SL, Contu S, Lysenko I, Senior RA, et al (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. Nature. 520:45-50.
- Nogueira OMA, Palmeirim AF, Peres CA, Dos Santos-Filho M (2021). Synergistic effects of habitat configuration and land-use intensity shape the structure of bird assemblages in human-modified landscapes across three major neotropical biomes. Biodiversity and Conservation. 30:3793-3811.
- Phillips SJ, Anderson RP, Dudík M, Schapire RE, Blair ME (2017). Opening the black box: An open-source release of Maxent. Ecography. 40(7):887-893.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling. 190(3-4):231-259.
- Pourmosa H, Ghasempouri M, Mahini AS, Rezaei H (2024). Habitat suitability modeling of the Caspian Red Deer (Cervus elaphus Maral) in the central zone of the Hyrcanian region: Identification of priority conservation areas. Journal of Wildlife and Biodiversity. 8(4):148-172.
- Ripple WJ, Newsome TM, Wolf C, Dirzo R, Everatt KT, Galetti M, et al (2015). Collapse of the world's largest herbivores. Science Advances. 1(4):e1400103.
- Schwegmann S, Mörsdorf M, Bhardwaj M, Storch I (2023). Effects of understory characteristics on browsing patterns of roe deer in central European mountain forests. Ecology and Evolution. 13(8):e10431.
- Stritih A, Senf C, Kuemmerle T, Munteanu C, Dzadzamia L, Stritih J, et al (2024). Same, but different: Similar states of forest structure in temperate mountain regions of Europe despite different social-ecological forest disturbance regimes. Landscape Ecology. 39(6):114.
- Talebi KS, Sajedi T, Pourhashemi M (2014). Forests of Iran: A treasure from the past, a hope for the future. Dordrecht: Springer.
- USFWS (1980). Habitat Evaluation Procedures (HEP) [Internet]. Washington, D.C.: U.S. Fish and Wildlife Service [cited 2024 May 12th]. Available from: https://www.fws.gov/policy-library/870fw1.
- Valavi R, Guillera-Arroita G, Lahoz-Monfort JJ, Elith J (2022). Predictive performance of presence-only species distribution models: A benchmark study with reproducible code. Ecological Monographs. 92(1):e01486.