



Sensitivity analysis of weighting in multi-criteria habitat suitability assessment for the Goitered Gazelle:

A case study of Shirahmad wildlife refuge

Amirmohammad Habibi¹ | Bonyad Ahmadi² | Mehdi Gholamalifard³ | Seyed Mahmoud Ghasempouri⁴ | Ali Ghoraei⁵

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran. E-mail: amirmohammad.habibi@modares.ac.ir

2. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran. E-mail: bonyad.ahmadi@modares.ac.ir

3. Corresponding Author, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran. E-mail: m.gholamalifard@modares.ac.ir

4. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran. E-mail: ghasempm@modares.ac.ir

5. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: aligharaee@birjand.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 15 April 2025 Received in revised form 20 September 2025 Accepted 23 September 2025 Published online 21 September 2025 Keywords: <i>Goitered gazelle,</i> <i>Habitat suitability,</i> <i>Shirahmad Wildlife Refuge,</i> <i>Sensitivity analysis.</i>	The Shirahmad Wildlife Refuge, located in Razavi Khorasan Province, northeastern Iran, represents one of the key habitats of the goitered gazelle (<i>Gazella subgutturosa</i>). This study aimed to evaluate habitat suitability and identify the main drivers of the species' distribution using a multi-criteria evaluation (MCE) approach. The applied criteria included ranger stations, water points, streams, rivers, core zones, forests, grasslands, roads, farmlands, dirt roads, salt marshes, and slope. The findings indicated that areas near water resources (water points: weight= 0.1753; rivers: weight= 0.1432) and ranger stations (weight= 0.1975) exhibited higher suitability. The model's performance, assessed using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, achieved an accuracy of 0.82, confirming the robustness of the final habitat suitability map. Furthermore, results showed that habitat suitability increased with higher suitability classes. Sensitivity analysis revealed that distance from rivers and slope were the most influential criteria. Based on the Mann-Kendall and Theil-Sen tests, suitability trends showed an increasing pattern, with northern and western parts of the area being more suitable than southern and eastern regions. Overall, water resources, vegetation cover, and security were identified as the key determinants of gazelle distribution. Accordingly, establishing artificial water points in central and western zones and positioning ranger stations near Yahyaabad and Jalin villages are recommended. Additionally, changes in the weighting of criteria influenced habitat suitability maps, highlighting the importance of accurate parameterization. These findings can contribute to improving habitat assessments and designing effective strategies for the conservation of goitered gazelle populations in Shirahmad.
Cite this article: Habibi, A., Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Ghasempouri, S.M., & Ghoraei, A. (2025). Sensitivity analysis of weighting in multi-criteria habitat suitability assessment for the Goitered Gazelle: A case study of Shirahmad wildlife refuge. <i>Journal of Natural Environment</i>, 78 (2), 201-219. DOI: http://doi.org/10.22059/jne.2025.393479.2797	



تحلیل حساسیت وزن دهی در ارزیابی چندمعیاره مطلوبیت زیستگاه آهوی گواتردار پناهگاه شیراحمد

امیرمحمد حبیبی^۱ | بنیاد احمدی^۲ | مهدی غلامعلی فرد^۳ | سید محمود قاسمپوری^۴ | علی قرائی^۵

۱. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: amirmohammad.habibi@modares.ac.ir
۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: bonyad.ahmadi@modares.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: m.gholamalifard@modares.ac.ir
۴. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: ghasemmp@modares.ac.ir
۵. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: aligharaee@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ کلیدواژه‌ها: آهوی گواتردار، پناهگاه حیات وحش شیراحمد، تحلیل حساسیت، مطلوبیت زیستگاه.	پناهگاه حیات وحش شیراحمد یکی از زیستگاه‌های کلیدی آهوی گواتردار (<i>Gazella subgutturosa</i>) در شمال شرقی ایران و واقع در استان خراسان رضوی است. این پژوهش با هدف ارزیابی مطلوبیت زیستگاه و شناسایی عوامل تعیین کننده پراکنش این گونه، از رویکرد ارزیابی چندمعیاره استفاده نمود. معیارهای مورد استفاده شامل پاسگاه محیط بانی، آبشخور، آبراهه، رودخانه، زون امن، جنگل، علفزار، جاده، مزارع، جاده خاکی، شوره زار و شیب بودند. بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که مناطق نزدیک به منابع آبی (آبشخور: وزن ۰/۱۷۵۳ و رودخانه: وزن ۰/۱۴۳۲) و پاسگاه‌های محیط بانی (وزن: ۰/۱۹۷۵)، از مطلوبیت بالاتری برخوردارند. نتایج ارزیابی صحت مدل با شاخص Receiver Operating Characteristic (ROC)، با مقدار ۰/۸۲ بیانگر صحت بالای نقشه نهایی است، به علاوه نتایج حاصل نشان داد که با افزایش درصد، مطلوبیت زیستگاه نیز افزایش می‌یابد. در ادامه معیارهای فاصله از رودخانه و شیب به عنوان حساس ترین معیارها در تحلیل حساسیت شناسایی شدند. همچنین براساس آزمون من-کندال و تایل-سن روند تغییرات در گام افزایشی نشان دهنده مطلوبیت بیشتر مناطق شمالی و غربی نسبت به مناطق جنوبی و شرقی است. براساس نتایج حاصل، منابع آبی، پوشش گیاهی و امنیت، عوامل مؤثر بر پراکنش آهوی گواتردار در منطقه بوده، بنابراین احداث آبشخورهای مصنوعی در بخش‌های مرکزی و غربی و استقرار پاسگاه محیط بانی در نزدیکی روستاهای یحیی آباد و جلین پیشنهاد می‌شود. همچنین، تحلیل تغییر وزن معیارها بیانگر تأثیرپذیری نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه از این تغییرات بود. این یافته‌ها می‌توانند به بهبود دقت ارزیابی زیستگاه و تدوین راهکارهای مؤثرتر در حفاظت از جمعیت آهوی گواتردار کمک کنند.

استاد: حبیبی، امیرمحمد؛ احمدی، بنیاد؛ غلامعلی فرد، مهدی؛ قاسمپوری، سید محمود؛ و قرائی، علی (۱۴۰۴). تحلیل حساسیت وزن دهی در ارزیابی چندمعیاره مطلوبیت زیستگاه آهوی گواتردار پناهگاه شیراحمد. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۲)، ۲۱۹-۲۰۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.393479.2797>



مقدمه

مدیریت و حفاظت مؤثر جمعیت‌های حیات وحش مستلزم درک پویایی‌های پیچیده تعامل گونه‌ها با زیستگاه‌هایشان است (Abdolahi and Salman Mahini, 2016). زیستگاه به‌عنوان مجموعه‌ای از شرایط اکولوژیک و منابع ضروری برای بقا و تولیدمثل گونه‌ها، نقش محوری در پایداری جمعیت‌های جانوری ایفا می‌کند. با این حال، تخریب زیستگاه‌های طبیعی به‌ویژه در اکوسیستم‌های شکننده، به یکی از اصلی‌ترین چالش‌های حفاظتی در قرن حاضر تبدیل شده‌است (Madadi et al., 2017; Godarzi et al., 2019). در این راستا، شناسایی عوامل مؤثر بر انتخاب زیستگاه و ارزیابی کمی مطلوبیت آن، به‌عنوان پایه‌ای علمی برای طراحی راهبردهای کاهش تخریب و احیای اکوسیستم‌ها شناخته می‌شود.

مطالعات اکولوژیک مبتنی بر ارزیابی مطلوبیت زیستگاه، ابزاری کلیدی برای تحلیل الگوهای پراکنش گونه‌ها و پیش‌بینی واکنش آنها به تغییرات محیطی محسوب می‌شوند (Farashi, 2014; Suleman et al., 2020). یکی از رویکردهای رایج در این زمینه، مدل‌های توزیع گونه (SDMs) است که با تلفیق داده‌های حضور گونه و متغیرهای محیطی، چارچوبی تحلیلی برای ارزیابی مدیریت گونه‌های در معرض خطر و اولویت‌بندی مناطق حفاظتی ارائه می‌دهند (Hirzel et al., 2006; Luo et al., 2020). این مدل‌ها، رابطه میان حضور گونه‌ها و متغیرهای محیطی را در مقیاس‌های مختلف تحلیل کرده و اطلاعات ارزشمندی برای اقدامات حفاظتی ارائه می‌دهند (Franklin, 2010; Elith et al., 2011; Wunderlich et al., 2019).

آهوی گواتردار، در فهرست گونه‌های آسیب‌پذیر اتحادیه بین‌المللی حفاظت از طبیعت (IUCN^۲) قرار دارد (IUCN, 2024)، طی دهه‌های اخیر به‌دلیل عواملی همچون تخریب زیستگاه، شکار غیرقانونی، رقابت با دام‌های اهلی و تغییرات اقلیمی، کاهش قابل توجهی در جمعیت را تجربه کرده است (Mallon and Kingswood, 2001; IUCN, 2017). پراکنش این گونه در مناطق نیمه‌بیابانی و بیابانی آسیای مرکزی، ایران، پاکستان و برخی نواحی چین مشاهده می‌شود، اما جمعیت آن در بسیاری از این مناطق به‌طور چشمگیری کاهش یافته و در برخی نواحی کاملاً منقرض شده است. در ایران، بیشتر جمعیت آهوی گواتردار در مناطق حفاظت‌شده، به‌ویژه در پناهگاه‌های حیات وحش، باقی‌مانده است (IUCN SSC Antelope Specialist Group, 2017). مطالعه بر روی زیستگاه‌های این گونه و ارزیابی مطلوبیت زیستگاه آن می‌تواند به‌طور مؤثری به مدیریت حفاظتی، برنامه‌های احیای جمعیت و حفظ تنوع زیستی در این مناطق کمک کند. انتخاب آهوی گواتردار برای پژوهش‌های مرتبط با تحلیل مطلوبیت زیستگاه، به‌دلیل وضعیت آسیب‌پذیر آن و اهمیت ویژه‌اش در برنامه‌های حفاظتی، از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به‌منظور شبیه‌سازی و ارزیابی زیستگاه آهوی گواتردار در مناطق مختلف ایران انجام شده است. مطالعاتی نظیر، Radnezhad و همکاران (۲۰۱۵) در پارک ملی بمو، Afshari و همکاران (۲۰۲۱) در پناهگاه حیات وحش موته، Hosseini و همکاران (۲۰۱۷) در منطقه حفاظت‌شده هفتاد قله و Naqibzadeh و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه حفاظت‌شده بی‌دودی، با به‌کارگیری مدل‌های توزیع گونه مانند تحلیل عامل اکولوژیک (ENFA^۳) و مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)، به شناسایی و ارزیابی عوامل محیطی مؤثر بر پراکنش این گونه پرداخته‌اند. این مطالعات به‌وضوح نشان داده‌اند که متغیرهایی از جمله پوشش گیاهی، فاصله از منابع آبی، فاصله از شکارچیان، فاصله از اراضی مرتعی، ارتفاع، شیب، نزدیکی به منابع آبی و دوری از جاده‌ها و مزارع نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار فضایی زیستگاه مناسب دارند. با این حال، مدل‌های ENFA و MaxEnt عمدتاً مبتنی بر داده‌های حضور گونه هستند و در مناطقی که داده‌های حضور-عدم‌حضور ناقص یا پراکنده‌اند، محدودیت‌هایی را به‌همراه دارند. همچنین، این مدل‌ها اغلب قابلیت یکپارچه‌سازی سلسله‌مراتبی و همزمان معیارهای متنوع اکولوژیک و محیطی را به‌صورت جامع ارائه نمی‌دهند. در این راستا، رویکرد ارزیابی چندمعیاره (MCE^۴) با قابلیت تلفیق وزنی و سلسله‌مراتبی انواع معیارهای محیطی و اکولوژیک، امکان تحلیل یکپارچه‌تر و پویاتری از مطلوبیت زیستگاه فراهم می‌آورد که می‌تواند جایگزینی کارآمد و مکمل برای مدل‌های توزیع گونه در شرایط داده‌های محدود باشد (Paudel et al., 2015; Rahdari, 2017).

^۱Species Distribution Modeling^۲International Union for Conservation of Nature^۳Ecological Niche Factor Analysis^۴Multi-Criteria Evaluation

در این راستا، از روش MCE به عنوان رویکردی کارآمد در شبیه سازی مطلوبیت زیستگاه به کار رفته و در مطالعات متعددی برای گونه های همچون خرس سیاه، آهو در منطقه بهادران، پازن و کبک دری مورد استفاده قرار گرفته است (Rahdari, 2017; Morovati et al. 2023; Yousefi et al. 2023). با این حال، بررسی این مطالعات نشان می دهد که در بسیاری از آنها به تحلیل حساسیت به عنوان یکی از ارکان مکمل در چارچوب MCE توجه کافی نشده است. غفلت از انجام این تحلیل در برخی موارد منجر به تولید نتایجی غیرواقع بینانه و ناپایدار شده است، چرا که تأثیر وزن دهی معیارها در تعیین نتایج نهایی نادیده گرفته شده است. این در حالی است که تحلیل حساسیت، به عنوان بخشی بنیادین از فرآیند MCE، نقش کلیدی در شناسایی معیارهای حساس و اثرگذار ایفا می کند و با بازنگری در وزن های آن، می توان به نتایجی دست یافت که از تطابق بیشتری با واقعیت های محیط زیستی برخوردارند (Crosetto et al., 2009; Tarantola, 2001). از این رو، تلفیق تحلیل حساسیت در فرآیند ارزیابی چندمعیاره، گامی ضروری در جهت ارتقای دقت تحلیلی و افزایش قابلیت اعتماد به نتایج نهایی به شمار می رود؛ اقدامی که می تواند پشتیبانی مؤثرتری از تصمیم گیری های مدیریتی مبتنی بر این ارزیابی ها فراهم سازد.

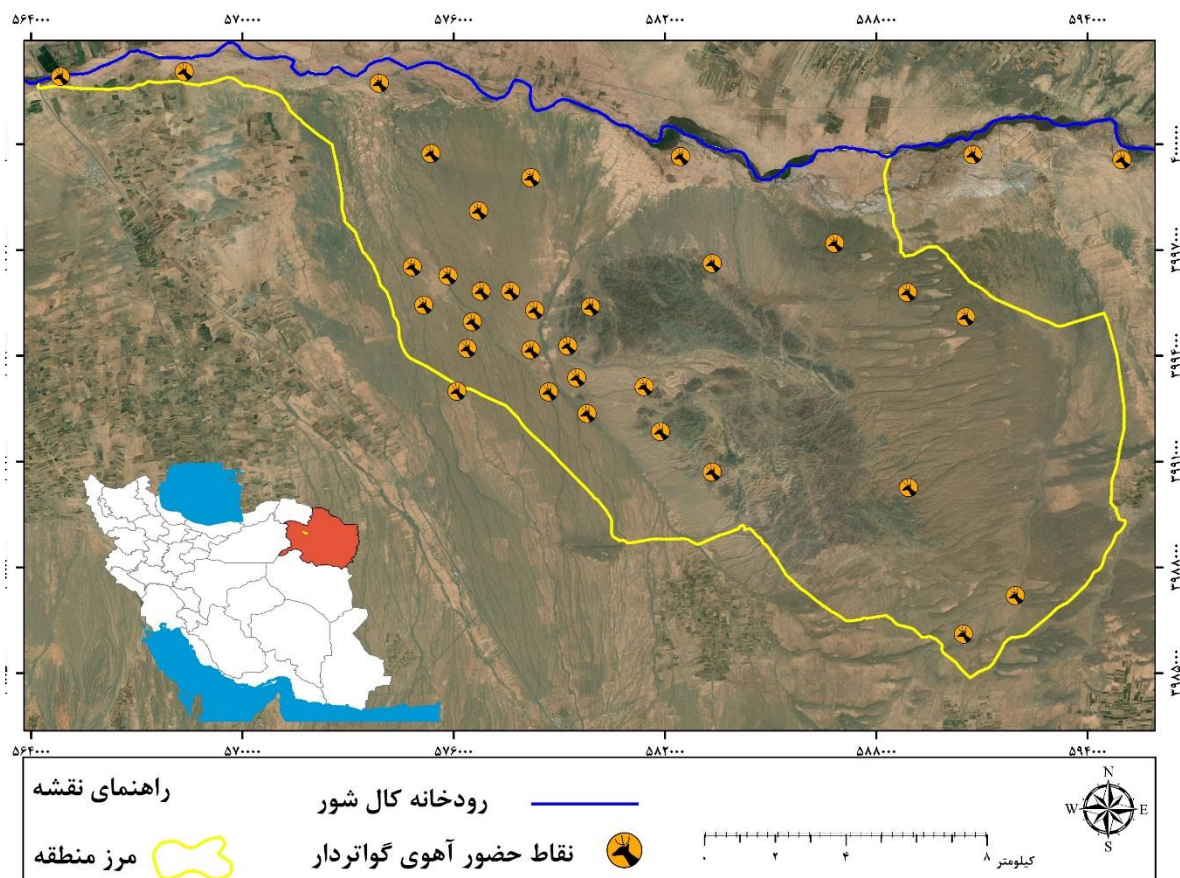
برای ارزیابی حساسیت در مدل های تصمیم گیری چندمعیاره، تدوین یک چارچوب جامع که اثر تغییرات وزنی معیارها بر خروجی مدل را تحلیل کند، ضروری است (Crosetto et al., 2000; Crosetto and Tarantola, 2001; Delgado and Sendra, 2004; Chen et al., 2009). در این چارچوب، اعمال تغییرات سیستماتیک در وزن دهی معیارها و بررسی پیامدهای آن بر رتبه بندی گزینه ها، نه تنها به سنجش پایداری مدل کمک می کند، بلکه می تواند در کاهش سوگیری های ذهنی نیز مؤثر باشد (Chen et al., 2009). شناسایی معیارهایی که بیشترین حساسیت را نسبت به نوسانات وزنی از خود نشان می دهند، نقش مهمی در درک پویایی مدل و بهینه سازی ساختار تصمیم گیری ایفا می کند (Crosetto et al., 2000). علاوه بر این، تحلیل مکانی تغییرات حاصل از نوسانات وزنی، امکان شناسایی نواحی ناپایدار و ارزیابی دقت مکانی مدل را فراهم می سازد (Delgado and Sendra, 2004). در این راستا، روش تحلیل حساسیت یک به یک (OAT^5) که در آن وزن هر معیار به صورت مستقل و تدریجی تغییر داده می شود و تأثیر این تغییرات بر خروجی مدل ارزیابی می گردد، به عنوان یکی از رویکردهای پایه برای کمی سازی حساسیت مدل های مکانی مورد استفاده قرار می گیرد (Chen et al., 2009).

با توجه به مباحث مطرح شده و مرور مطالعات پیشین، این پژوهش دو هدف اصلی را دنبال می کند: نخست، ارزیابی مطلوبیت زیستگاه آهوی گواتردار در پناهگاه حیات وحش شیراحمد با بهره گیری از رویکرد MCE که بدون نیاز به داده های حضور گونه، نواحی دارای شرایط زیستی مناسب را شناسایی می کند؛ دوم، این مطالعه با بهره گیری از تحلیل حساسیت به عنوان یک فرآیند کمی، اثرات تغییرات وزن دهی معیارهای محیطی را بر الگوی مکانی زیستگاه های پیش بینی شده مورد ارزیابی دقیق قرار می دهد و اهمیت نسبی هر معیار را در شکل دهی به نتایج ارزیابی می سنجد. تحلیل حساسیت موجب افزایش اعتبار و پایداری نتایج ارزیابی می شود و تصمیم گیری های مدیریتی و حفاظتی در زیستگاه گونه هدف را بهینه می سازد.

پناهگاه حیات وحش شیراحمد، واقع در جنوب شرقی شهرستان سبزوار (استان خراسان رضوی)، به عنوان یکی از زیستگاه های اکولوژیک با اهمیت در منطقه شناخته می شود (شکل ۱). این منطقه که ابتدا در سال ۱۳۹۱ با عنوان منطقه شکار ممنوع تحت حفاظت قرار گرفت، پس از اجرای اقدامات حفاظتی مؤثر در سال های بعد به سطح پناهگاه حیات وحش ارتقا یافت (Darvishsefat, 2006). از نظر توپوگرافی، این پناهگاه ترکیبی از عرصه های دشتی، تپه ماهورهای گسترده و عوارض کوهستانی را شامل می شود. پوشش گیاهی غالب آن متشکل از گونه های خشکی پسند نظیر قیچ (*Zygophyllum spp.*) و تاغ (*Haloxylon spp.*) است که در هم زیستی با جریان رودخانه فصلی کال شور و توپوگرافی متنوع، نقش اساسی در حفظ پویایی اکوسیستم ایفا می کنند (Razavi et al., 2008). این منطقه میزبان جوامع متنوعی از پستانداران شاخص است که از جمله آنها می توان به آهوی گواتردار (*Gazella subgutturosa*)، کاراکال (*Caracal caracal*)، کفتار راهراه (*Hyaena hyaena*) و گرگ خاکستری (*Canis lupus*) اشاره نمود (Khani and Zamani, 2012). همچنین، حضور گونه های در معرض تهدید جهانی نظیر هوبره (*Chlamydotis macqueenii*)، در رده آسیب پذیر (VU^6)، بالابان (*Falco cherrug*) در

⁵One-At-a-Time⁶Vulnerable

رده در خطر انقراض (EN^V) و آهوی گواتردار در رده VU ، همراه با گونه‌هایی مانند کاراکال با وضعیت کمترین نگرانی (LC^A) براساس فهرست سرخ IUCN (۲۰۲۴)، اهمیت حفاظتی این زیستگاه را در سطوح ملی و بین‌المللی تقویت می‌کند. با توجه به نقش حیاتی این منطقه در حفظ ذخایر ژنتیکی و تنوع زیستی، مدیریت اثرات ناشی از تهدیدات انسانی (شامل تخریب زیستگاه، چرای غیرمجاز و توسعه زیرساخت‌ها) و همچنین اجرای برنامه‌های پایش بلندمدت، ضرورتی غیرقابل انکار است. مطالعات اکولوژیک در این منطقه نه تنها امکان ارزیابی روندهای جمعیتی گونه‌های کلیدی را فراهم می‌آورد، بلکه به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی راهبردهای حفاظتی تطبیقی و افزایش آگاهی جامعه محلی در زمینه پایداری اکوسیستم‌های خشک‌زی عمل می‌کند.



روش‌شناسی پژوهش

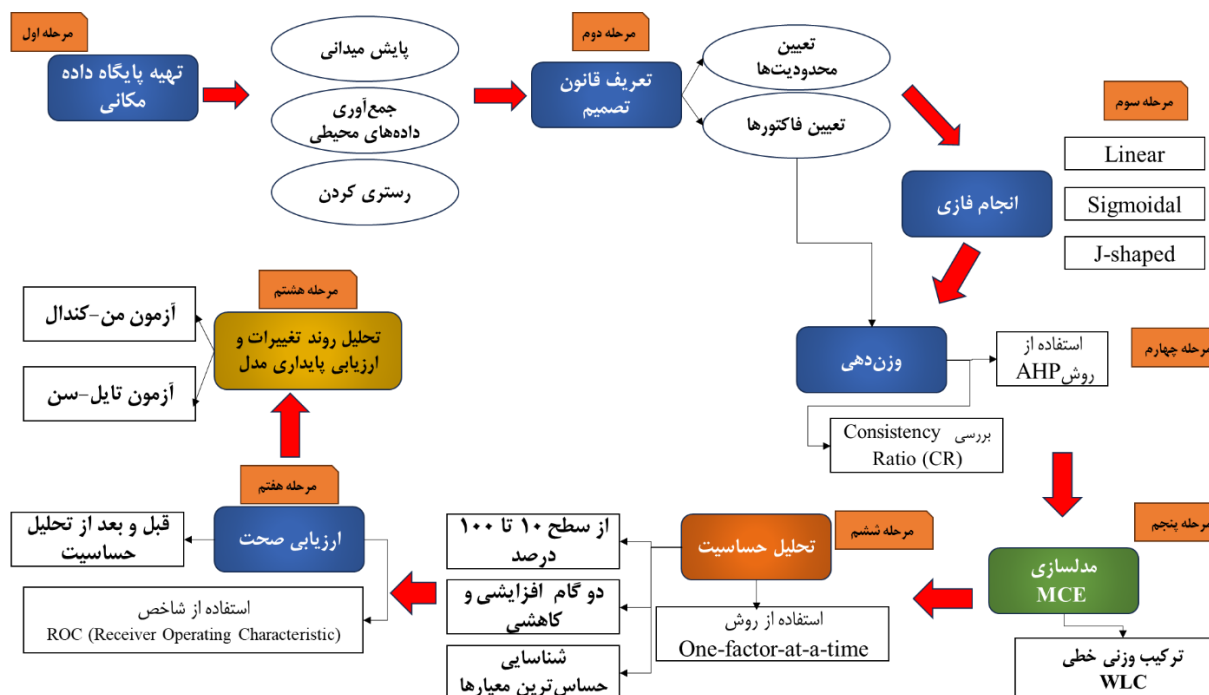
مراحل انجام این تحقیق شامل چندین گام اساسی است که به‌طور نظام‌مند پیاده‌سازی شده‌اند (شکل ۲). در ابتدا، پایگاه داده مکانی تهیه و سیستم مختصات جغرافیایی یکسان‌سازی شد تا هماهنگی داده‌ها تضمین گردد. سپس، فاکتورهای مؤثر بر زیستگاه‌شناسی و استانداردسازی شدند. وزن‌دهی فاکتورها با روش AHP^9 انجام گرفت و مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه با استفاده از روش MCE و ترکیب خطی وزنی صورت گرفت. صحت مدل با شاخص ROC^{10} ارزیابی شد. در ادامه، تحلیل حساسیت در دو گام و در تحلیل حساسیت ۱۰ تا ۱۰۰ درصد اجرا گردید و معیارهای حساس نیز از نظر صحت بررسی شدند. در نهایت، آزمون‌های من-کندال و تایل-سن برای بررسی روند تغییرات داده‌ها به کار گرفته شد.

⁷Endangered

⁸Least Concern

⁹Analytic Hierarchy Process

¹⁰Receiver Operating Characteristic



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش

تهیه پایگاه داده مکانی: به‌منظور ارزیابی صحت مدل، با همکاری محیط‌بانان منطقه، ۳۴ نقطه حضور شناسایی و مختصات جغرافیایی آنها با استفاده از دستگاه GPS^{۱۱} و تحلیل در نرم‌افزار Google Earth مستندسازی شد. در این مطالعه، معیارهای محیطی مؤثر بر توزیع زیستگاه شامل فاصله از عوامل انسانی (پاسگاه محیط‌بانی، جاده‌ها، روستاها، مزارع)، فاصله از عناصر طبیعی (آبراهه، رودخانه، آبشخور، شوره‌زار، زون امن) و ویژگی‌های توپوگرافی و الگوهای پوشش گیاهی منطقه، شامل شیب، علفزار و پوشش بوته‌ای-درختچه‌ای بر پایه مرور منابع علمی (Hosseini et al., 2015; Naqibzadeh et al., 2021) و مشاهدات میدانی استخراج شدند (جدول ۱). داده‌های مکانی مرتبط با جاده‌ها، روستاها، آبراهه و رودخانه از پایگاه OpenStreetMap و نقشه‌های کارشناسی اداره محیط‌زیست به‌دست آمد، درحالی‌که متغیرهای پوشش گیاهی مانند گونه‌های قیچ (*Nitraria schoberi*) و تاغ (*Haloxylon sp.*)، علفزار با محوریت درمنه (*Artemisia sp.*) و شوره‌زار با تمرکز بر گز (*Tamarix sp.*) از طریق نقشه‌برداری میدانی و ثبت GPS تعیین شدند. نقشه شیب نیز با پردازش مدل رقومی ارتفاعی (DEM^{۱۲}) در نرم‌افزار ArcMap تولید گردید. این داده‌ها پس از استانداردسازی مکانی (رزولوشن ۳۰ متر) در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS^{۱۳}) یکپارچه شدند و به‌عنوان ورودی در رویکرد مطلوبیت زیستگاه به‌کار گرفته شدند تا ارتباط بین پراکنش گونه‌ها و متغیرهای محیطی به‌صورت کمی تحلیل شود. این رویکرد ترکیبی (کتابخانه‌ای-میدانی) ضمن افزایش دقت مکانی، امکان شناسایی حساسیت زیستگاه به تهدیداتی مانند توسعه زیرساخت‌ها یا تغییرات پوشش گیاهی را فراهم کرده و به‌عنوان الگویی برای طراحی راهبردهای حفاظتی تطبیقی در اکوسیستم‌های خشکزی ایران قابل تعمیم است.

^{۱۱}Global Positioning System^{۱۲}Digital Elevation Model^{۱۳}Geographic Information System

جدول ۱- معیارهای قانون تصمیم

ردیف	معیار	منبع تهیه	توضیحات
۱	پاسگاه محیطبانی	مشاهدات میدانی	Madadi و همکاران (۲۰۱۷)
۲	آبشخور	مشاهدات میدانی	Hosseini و همکاران (۲۰۱۷)
۳	آبراهه	OpenStreetMap	Pourmanafi و همکاران (۲۰۲۲)
۴	رودخانه	OpenStreetMap	Morovati و همکاران (۲۰۲۳)
۵	زون امن	اداره محیط‌زیست سبزوار	مشاهدات میدانی و نظر کارشناسان محیط‌زیست شهر سبزوار
۶	جنگل	اداره محیط‌زیست سبزوار	مشاهدات میدانی و نظر کارشناسان محیط‌زیست شهر سبزوار
۷	علفزار	اداره محیط‌زیست سبزوار	Pourmanafi و همکاران (۲۰۲۲)
۸	جاده	Open Street Map	Hosseini و همکاران (۲۰۱۷)
۹	مزارع	Open Street Map	Naqibzadeh و همکاران (۲۰۲۱)
۱۰	روستاها	OpenStreetMap	Hosseini و همکاران (۲۰۱۷)
۱۱	جاده خاکی	OpenStreetMap	Madadi و همکاران (۲۰۱۷)
۱۲	شوره‌زار	اداره محیط‌زیست سبزوار	براساس مشاهدات میدانی
۱۳	شیب	استخراج از DEM	Afshari و همکاران (۲۰۲۱)

استانداردسازی معیارها و تعیین فاکتورها: در این پژوهش، پس از بررسی و مقایسه روش‌های مختلف فازی و با استناد به نتایج آزمون خطا، روش فازی مبتنی بر تابع سیگموئید (S-shaped) به عنوان گزینه مناسب انتخاب شد (شکل ۳). این تابع به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، رفتار پیوسته و توانایی در بازنمایی واقع‌گرایانه‌تر روابط میان متغیرهای محیطی و مطلوبیت زیستگاه، از برتری قابل توجهی در منطقه مطالعه نسبت به سایر توابع فازی برخوردار است. این تابع امکان تبدیل مقادیر پیوسته متغیرهای محیطی به درجات مطلوبیت زیستگاه (در بازه ۰ تا ۱) را به صورت غیرخطی فراهم می‌سازد. در این راستا، با بهره‌گیری از دو نوع تابع سیگموئید افزایشی و کاهشی، رابطه بین مقادیر کمی متغیرها و سطح مطلوبیت زیستگاه مدل‌سازی می‌شود؛ به گونه‌ای که تغییرات تدریجی در داده‌های ورودی، به صورت پیوسته و متناسب در خروجی منعکس می‌گردد. به طور خاص، تابع سیگموئید افزایشی برای متغیرهایی به کار گرفته شد که افزایش فاصله از آنها با بهبود کیفیت زیستگاه همراه است؛ نظیر فاصله از جاده‌ها، روستاها و اراضی کشاورزی که با کاهش میزان اختلالات انسانی، موجب ارتقای امنیت اکولوژیک زیستگاه می‌گردند. در مقابل، تابع سیگموئید کاهشی برای متغیرهایی مورد استفاده قرار گرفت که کاهش فاصله از آنها با افزایش مطلوبیت زیستگاه ارتباط مستقیم دارد؛ از جمله فاصله از منابع آبی نظیر آبشخورها و رودخانه‌ها که تأمین دسترسی گونه‌ها به آب را، به عنوان یکی از مؤلفه‌های حیاتی زیستگاهی، تسهیل می‌کند. این رویکرد، با الهام از پاسخ‌های اکولوژیک واقعی گونه‌ها به گرادیان‌های محیطی، از تعیین مرزهای قطعی میان نواحی مطلوب و نامطلوب پرهیز نموده و به جای آن، سطوح انتقالی و پیوسته زیستگاهی را در فرآیند مدل‌سازی بازتاب می‌دهد؛ امری که موجب افزایش واقع‌گرایی و دقت در بازنمایی الگوهای پراکنش زیستی می‌گردد. براساس شواهد حاصل از مطالعات پیشین (Karami et al., 2016; Hosseini et al., 2017)، این روش به ویژه در اکوسیستم‌های پیچیده و ناهمگن مانند منطقه شیراحمد که در آن اثرات متقابل عوامل طبیعی و انسانی به طور همزمان زیستگاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، از طریق برخورداری از انعطاف‌پذیری در تعیین آستانه‌های مطلوبیت، به ارتقاء قابلیت اطمینان تحلیل‌ها کمک می‌نماید. در این پژوهش، روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به منظور تعیین وزن نسبی معیارهای محیطی به کار گرفته شد تا انعطاف‌پذیری مدل در پاسخ به شرایط اکولوژیک و مدیریتی منطقه افزایش یابد. مقدار شاخص CR^{14} در این سناریو برابر با ۰/۰۹ بود که نشان‌دهنده سطح مطلوبی از سازگاری در وزن‌دهی معیارها است. در همین راستا وزن‌دهی معیارها براساس اولویت‌های حفاظتی و شواهد علمی مستخرج از مطالعات پیشین انجام پذیرفت (Radnezhad et al., 2015; Karami et al., 2016; Hosseini et al., 2017; Pourmanafi et al., 2021; Naqibzadeh et al., 2021; Morovati et al., 2023).

مدل‌سازی ارزیابی چند معیاره: در این روش، ترکیب خطی وزن‌دار براساس رابطه ۱ انجام می‌شود که در آن، وزن فاکتورهای مختلف بر معیارها اعمال شده و هر معیار در وزن اختصاص یافته به آن ضرب می‌شود (Malchevski, 2012; Eastman, 2015).

¹⁴ Consistency Ratio

انعطاف در وزن‌دهی معیارها و سازگاری با داده‌های مکانی، یکی از متداول‌ترین و معتبرترین روش‌ها در مدل‌سازی تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تحلیل مطلوبیت زیستگاه است (Malczewski, 1999; Eastman, 2015). در این روش، وزن عوامل و محدودیت‌های مربوط به هر معیار اعمال شده‌اند. ابتدا، تمامی معیارها در وزن مربوط به عامل (وزن جبرانی) ضرب شدند، که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$s = \sum i(w_i \times x_i) \quad \text{رابطه ۱:}$$

در این رابطه، S : نشان‌دهنده میزان مطلوبیت، W_i : بیانگر وزن فاکتور i و X_i : امتیاز معیار در فاکتور i است. سپس با ضرب نتیجه در مقادیر محدودیت‌ها، مناطقی که مقدار آنها صفر بود (یعنی غیرقابل استفاده)، حذف شدند و تنها نواحی با قابلیت مطلوب باقی ماندند. این مرحله به صورت زیر انجام شد:

$$s = \sum i(w_i \times x_i) \times \prod C_j \quad \text{رابطه ۲:}$$

که در آن، C_j : امتیاز محدودیت j و $\prod$ نماد حاصل ضرب محدودیت‌ها است.

تحلیل حساسیت: تحلیل حساسیت به عنوان یکی از ارکان بنیادین در ارزیابی پایداری مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ($MCDM^{16}$)، نقش تعیین‌کننده‌ای در سنجش میزان اطمینان‌پذیری نتایج مدل‌ها ایفا می‌کند. شواهد علمی متعددی بر اهمیت به کارگیری این تحلیل در چارچوب MCDM تأکید دارند. به عنوان مثال، Chen و همکاران (۲۰۰۹) با بهره‌گیری از رویکرد تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در محیط ArcGIS، اثرپذیری خروجی‌های مدل از تغییرات وزن‌دهی معیارها را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که برخی از معیارها نسبت به تغییر وزن حساسیت بالاتری دارند؛ مسئله‌ای که می‌تواند به طور مستقیم بر نتایج ارزیابی تناسب سرزمین تأثیرگذار باشد. در مطالعه‌ای مروری، Sendra و Delgado (۲۰۰۴) با بررسی جایگاه تحلیل حساسیت در فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، بر این نکته تأکید نمودند که علی‌رغم اهمیت این روش، در بسیاری از مدل‌های مکانی به کار گرفته نمی‌شود یا به صورت ناقص اجرا می‌گردد. همچنین، یافته‌های پژوهش Crosetto و Tarantola (۲۰۰۱) نشان داد که تغییرات اعمال‌شده در ورودی‌ها و پارامترهای مدل، می‌تواند موجب نوسانات قابل توجهی در دقت پیش‌بینی‌های حاصل از مدل گردد؛ موضوعی که لزوم تلفیق تحلیل حساسیت با فرآیندهای مدل‌سازی تصمیم‌گیری را بیش‌ازپیش برجسته می‌سازد.

در این مطالعه، تحلیل حساسیت در بازه‌ای از سطوح ۱۰ تا ۱۰۰ درصد انجام گرفت؛ به گونه‌ای که میزان حساسیت در هر مرحله با افزایش ۱۰ درصدی تنظیم شده و در نهایت به حداکثر مقدار ممکن (۱۰۰ درصد) رسید. در چارچوب تحلیل حساسیت رویکرد MCE، ابتدا مدل با استفاده از وزن‌های اولیه عوامل اجرا شده و نقشه پایه مطلوبیت زیستگاه تولید شد. در مرحله بعد، وزن هر عامل به صورت مستقل و تدریجی در بازه‌ای مشخص، شامل مقادیر کمتر و بیشتر از وزن اولیه، تغییر داده شد، در حالی که وزن سایر عوامل بدون تغییر باقی ماند. این روش که مبتنی بر تکنیک تغییر یک متغیر در هر بار (One-factor-at-a-time) است، امکان ارزیابی تأثیر انفرادی هر عامل بر خروجی مدل را فراهم می‌سازد (Chen et al., 2009).

تعداد گام‌های افزایشی (increments) تعیین‌کننده سطح دقت تحلیل حساسیت است؛ به طوری که هر گام، نمایانگر تغییری جزئی در وزن عامل مورد نظر بوده و منجر به تولید دو خروجی مجزای مدل می‌گردد. به منظور حفظ تقارن در تحلیل، نیمی از این گام‌ها در محدوده کاهشی (کمتر از وزن اولیه) و نیمی دیگر در محدوده افزایشی (بیشتر از وزن اولیه) تعریف شدند. این ساختار، امکان مقایسه نظام‌مند تأثیر تغییرات مثبت و منفی در وزن‌دهی را فراهم نموده و شناسایی عوامل کلیدی با بیشترین درجه حساسیت را تسهیل می‌نماید.

نتایج حاصل از این تحلیل، درکی عمیق از میزان عدم قطعیت موجود در مدل و درجه اطمینان به وزن‌های تخصیص‌یافته در فرآیند تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد. برای هر گام تغییر وزن، مدل MCE به طور کامل بازاجرا شده و به ازای هر معیار، دو تصویر

¹⁵Weighted Linear Combination

¹⁶Multi-Criteria Decision Making

خروجی جدید (برای افزایش و کاهش وزن) تولید می‌شود. در نهایت، شاخص حساسیت هر عامل (Si) از طریق نسبت واریانس اختصاص یافته به آن عامل (Vi) به کل واریانس خروجی مدل (Vt) محاسبه می‌گردد:

$$Si = \frac{Vi}{Vt}$$

این شاخص، میزان تأثیرپذیری نتایج ارزیابی از نوسانات وزن‌دهی هر عامل را به صورت کمی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، علاوه بر شناسایی عوامل کلیدی با بیشترین حساسیت، امکان ارزیابی نظام‌مند عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند ارزیابی را فراهم می‌سازد. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان مبنایی برای بازنگری در وزن‌دهی معیارها، ارتقاء دقت تحلیل و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی در چارچوب برنامه‌ریزی حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند.

ارزیابی صحت: برای ارزیابی صحت پیش‌بینی‌های مطلوبیت زیستگاه، از شاخص (Receiver Operating Characteristic) ROC استفاده شد تا میزان تطابق بین نتایج حاصل از تحلیل مطلوبیت زیستگاه و داده‌های حضور گونه سنجیده شود. مقدار سطح زیر منحنی ROC (AUC^{17}) به عنوان معیار اصلی عملکرد در نظر گرفته شد، به گونه‌ای که نزدیکی این مقدار به عدد یک نشان‌دهنده دقت بالای تحلیل در تمایز مناطق با مطلوبیت زیستگاهی بالا از سایر مناطق است (Ashtab et al., 2017). پس از انجام تحلیل حساسیت و شناسایی معیارهای حساس در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ درصد آنالیز حساسیت، ارزیابی صحت مدل در دو گام اول و دوم انجام گردید. صحت مدل بر اساس شاخص ROC مورد بررسی قرار گرفت. این شاخص که از جدول توافقی استخراج می‌شود، با مقایسه تصاویر شبیه‌سازی شده مطلوبیت زیستگاه و داده‌های مرجع حضور گونه، میزان دقت و اعتبار مدل را تعیین می‌کند. فرآیند محاسبه شاخص ROC در نرم‌افزار TerrSet انجام شد؛ به گونه‌ای که خروجی مطلوبیت زیستگاه به عنوان نقشه پیش‌بینی مدل و داده‌های حضور گونه به عنوان داده‌های مرجع واقعی به نرم‌افزار وارد شدند. این روش ترکیبی امکان ارزیابی دقیق عملکرد مدل در بازشناسی زیستگاه‌های واقعی گونه را فراهم ساخت.

تحلیل روند تغییرات و ارزیابی پایداری مدل: جهت تحلیل روند تغییرات وزن معیارها و مطلوبیت زیستگاه و نیز ارزیابی پایداری و دقت مدل، از آزمون‌های ناپارامتری شیب تایل سن (TS^{18}) و آزمون روند من کندال (MK^{19}) بهره گرفته شد. این آزمون‌ها به دلیل توانایی بالا در شناسایی روندهای معنی‌دار و تخمین نرخ تغییرات در داده‌های محیط‌زیستی، ابزارهای مناسبی برای تحلیل داده‌ها محیطی محسوب می‌شوند و در مطالعات پیشین به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Ahmadi and Gholamalifard, 2020; Ahmadi et al., 2020; Gholamalifard, 2017). تحلیل حساسیت به صورت گام به گام در بازه‌های ۱۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر وزن معیارهای کلیدی انجام شد و به منظور بررسی وجود روند سیستماتیک در تغییرات حاصل از این سناریوها (مانند تغییر مقدار میانگین مطلوبیت زیستگاه یا دقت مدل)، از آزمون‌های ناپارامتری من-کندال و تایل-سن استفاده شد. بنابراین، «ترتیب تغییرات وزن» در این سناریوها نقش مشابه زمان را در داده‌های سری زمانی ایفا کرده است. **آزمون تایل-سن:** برآوردگر تایل-سن شیب تغییرات را با محاسبه مقدار میانه تمامی شیب‌های ممکن بین جفت نقاط داده‌ای در سری زمانی به دست می‌آورد. به دلیل مقاومت بالای این روش در برابر داده‌های پرت و نویزهای احتمالی، نتایج حاصل از آن دارای دقت و قابلیت اطمینان بالایی هستند. در هر مرحله، تمامی شیب‌های ممکن محاسبه شده و مقدار میانه به عنوان نرخ نهایی تغییرات در نظر گرفته شد (Ahmadi and Gholamalifard, 2020). از آنجا که برآوردگر تایل-سن نسبت به تغییرات ناگهانی و نوسانات کوتاه مدت حساسیت کمتری دارد، این روش قادر است روندهای پایدار و معنی‌دار را در داده‌ها تشخیص دهد. همچنین، حد آستانه شکست این روش حدود ۲۹٪ است، به این معنی که روندهای شناسایی شده باید حداقل در ۲۹٪ از طول سری زمانی پایدار بوده باشند تا معتبر محسوب شوند.

آزمون روند من-کندال: روند یکنواخت من-کندال به عنوان یک شاخص غیرخطی، میزان ثبات و جهت‌گیری افزایشی یا کاهش‌ی روند را در طول زمان اندازه‌گیری می‌کند (Ahmadi et al., 2020). این شاخص دارای دامنه بین -۱ تا +۱ است؛ به طوری که مقدار +۱ نمایانگر روندی کاملاً افزایشی و بدون هیچ کاهش است، مقدار -۱ نشان‌دهنده روندی کاملاً کاهش‌ی بدون هیچ افزایشی

¹⁷Area Under the Curve

¹⁸Theil-Sen

¹⁹Mann-Kendall

می‌باشد و مقدار صفر بیانگر فقدان روند یکنواخت و معنی‌دار در داده‌ها است. روش محاسبه این آزمون مشابه روند میانه تایل-سن بوده و شامل بررسی تمامی ترکیب‌های جفتی مقادیر در طول بازه زمانی برای هر واحد مکانی (پیکسل) است؛ به گونه‌ای که تعداد جفت‌هایی که افزایش یا کاهش را نشان می‌دهند شمارش می‌شود و نهایتاً شاخص من-کندال براساس تفاضل فراوانی نسبی افزایش‌ها و کاهش‌ها محاسبه می‌گردد. این شاخص امکان شناسایی روندهای پایدار و جهت‌دار در داده‌های سری زمانی محیط‌زیستی را فراهم می‌آورد.

یافته‌های پژوهش

مطلوبیت منطقه از نظر معیارهای مکانی و تصویر تجمیع نهایی (FAST^{۲۰}): نتایج حاصل از تحلیل وزن‌دهی AHP نشان داد که در این رویکرد، بخش‌های مرکزی و شمالی منطقه مورد مطالعه از مطلوبیت بالاتری برخوردار بودند (شکل ۴). با توجه به وزن‌دهی معیارها مطابق جدول ۲، معیار فاصله از پاسگاه محیط‌بانی با وزن ۰/۱۹۷۵، فاصله از آبشخور با وزن ۰/۱۷۵۳ و فاصله از رودخانه با وزن ۰/۱۴۳۲ دارای بیشترین اهمیت بودند. این اولویت‌بندی نشان‌دهنده نقش کلیدی منابع آبی و فاکتورهای مرتبط با امنیت در انتخاب زیستگاه توسط آهوی گواتردار است. طبق این وزن‌دهی مناطق شمال غربی و مرکزی دارای مطلوبیت مکانی بالاتری هستند (شکل ۴). رودخانه کال شور سبزوار به عنوان منبع آب دائمی در حاشیه شمالی منطقه قرار دارد، از سویی آبشخور و پاسگاه محیط‌بانی در جنوب غربی منطقه قرار دارد که این موضوع باعث فاصله زیاد مناطق مطلوب شده است. آبراهه‌ها، پوشش گیاهی منطقه و علفزار در مرکز منطقه قرار دارند که جزء عوامل محدودکننده برای آهو محسوب می‌شوند، این قرارگیری مکانی باعث کاهش مطلوبیت در این مناطق شده است. در مجموع مناطق غربی و مرکزی دارای حداکثر مطلوبیت زیستگاهی برای آهوی گواتردار هستند.

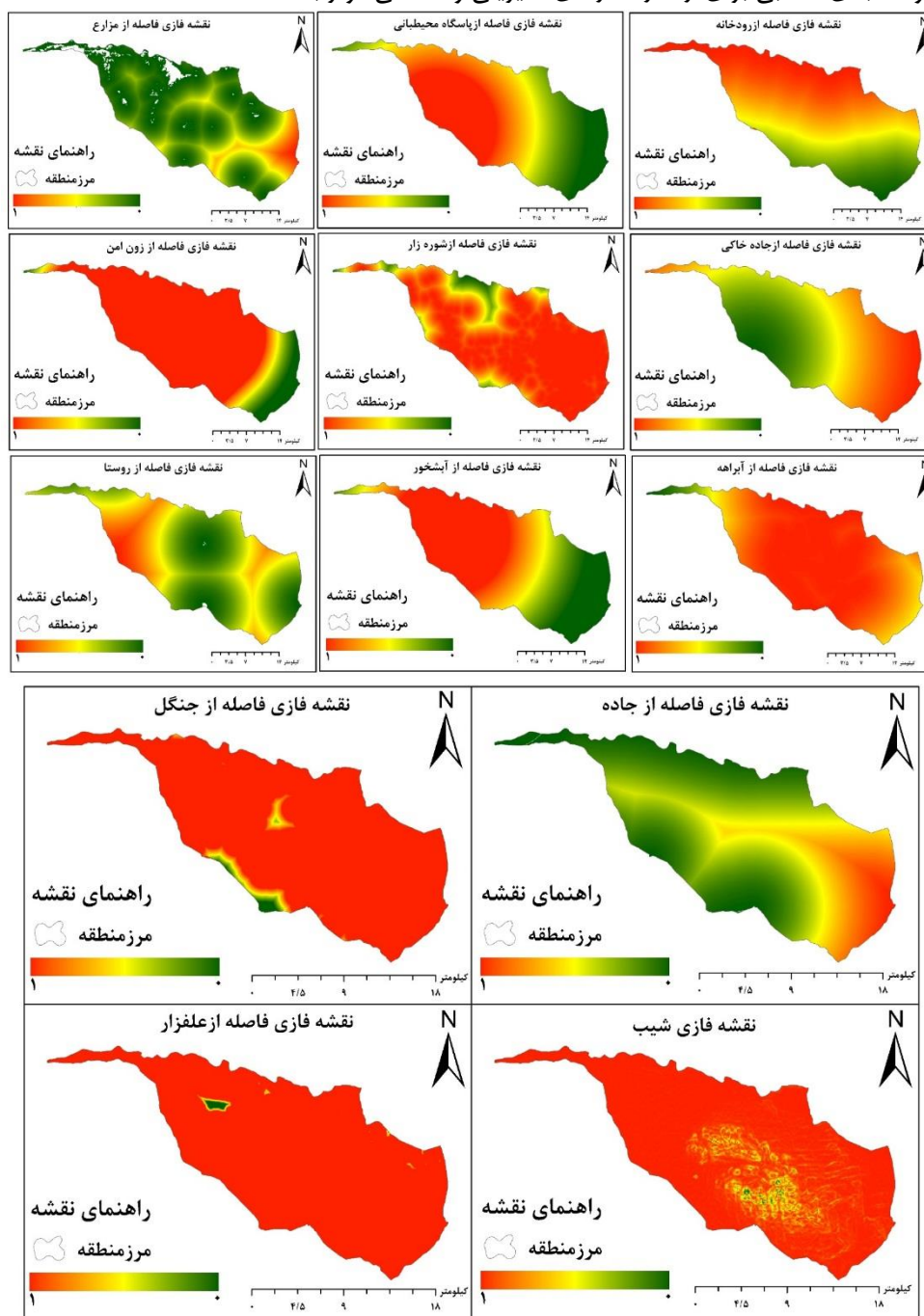
جدول ۲- توابع عضویت فازی، مقادیر نقاط کنترلی برای استانداردسازی معیارهای مورد استفاده و همچنین وزن معیارها

معیار	نقاط کنترلی	وزن	شکل تابع عضویت فازی
بانی فاصله از پاسگاه محیط	۰/۱۹۳۳۳	۰/۱۹۷۵	کاهنده
فاصله از آبشخور	۰/۱۹۵۶۶	۰/۱۷۵۳	کاهنده
فاصله از رودخانه	۰/۱۴۹۳۹	۰/۱۴۳۲	کاهنده
فاصله از آبراهه	۰/۱۴۸۵۷	۰/۰۹۷۴	کاهنده
فاصله از زون امن	۰/۱۱۸۵۷	۰/۰۷۷۴	کاهنده
فاصله از جنگل	۰/۲۸۵۲	۰/۰۸۰۹	کاهنده
فاصله از علفزار	۰/۷۸۷	۰/۰۵۷۴	کاهنده
فاصله از جاده	۰/۱۰۹۵۲	۰/۰۵۳۱	افزاینده
فاصله از مزارع	۰/۵۸۳۲	۰/۰۳۶۱	افزاینده
فاصله از روستاها	۰/۹۸۸۳	۰/۰۳۱۷	افزاینده
فاصله از جاده خاکی	۰/۱۹۱۹۲	۰/۰۲۳۳	افزاینده
فاصله از شوره‌زار	۰/۳۹۳۱	۰/۰۱۴۷	کاهنده
شیب	۰/۴۶	۰/۰۱۲۱	کاهنده

نقشه مطلوبیت زیستگاه در وزن‌دهی AHP نشان می‌دهد که بخش مرکزی و غربی منطقه دارای مطلوبیت بالایی برای آهوی گواتردار است. شکل ۴ به‌طور شفاف مناطق مرکزی و شمال غربی را به‌عنوان نواحی با مطلوبیت بالاتر نسبت به سایر مناطق شناسایی می‌کند که این امر با مشاهدات میدانی و ارزیابی‌های کارشناسان منطقه کاملاً همخوانی دارد. همچنین، نتایج پژوهش نشان داد که مناطق جنوبی و جنوب شرقی از مطلوبیت زیستگاهی پایین‌تری برخوردارند. در این نواحی، عواملی مانند حضور

²⁰Final Aggregated Suitability Index

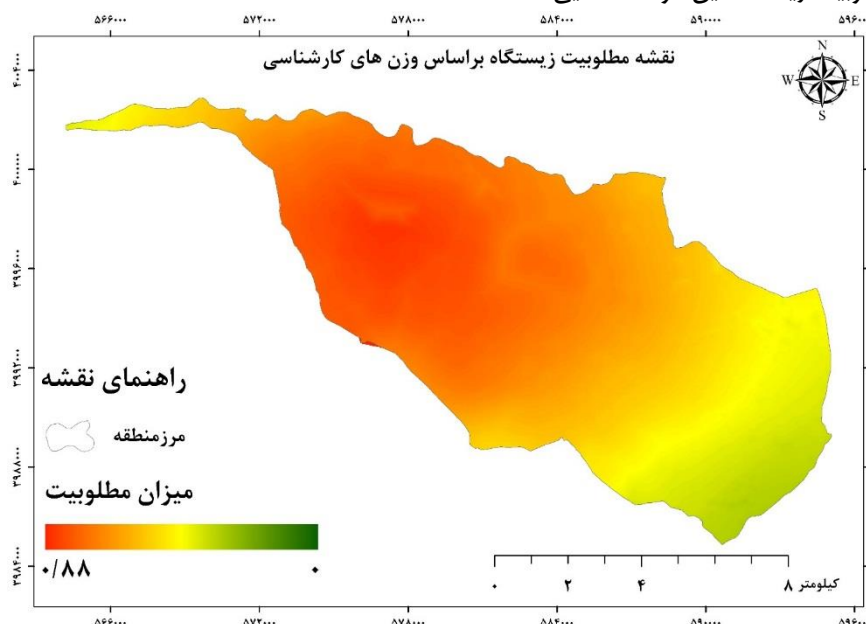
شکارچیان، ارتفاع زیاد، شیب تند و محدودیت پوشش گیاهی و منابع آب، شرایط را برای حضور آهو نامناسب‌تر کرده‌اند. چنین یافته‌هایی می‌تواند مبنای مناسبی برای ارائه راهکارهای مدیریتی و حفاظتی مؤثر باشد.



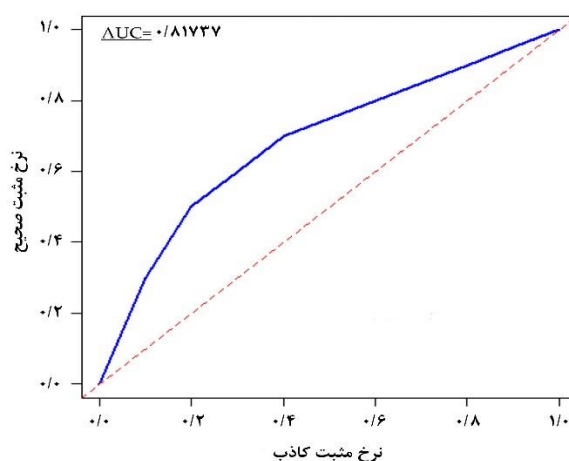
شکل ۳- نقشه فازی سازی شده معیارهای مورد استفاده در مطلوبیت زیستگاه آهوی گواتردار

ارزیابی صحت: برای دستیابی به دقیق‌ترین نقشه با بالاترین میزان دقت، خروجی‌های حاصل از روش WLC، براساس داده‌های حضور آهوی گواتردار ارزیابی شد. در این مرحله، شاخص ROC محاسبه گردید. نتایج حاصل از ارزیابی صحت نشان داد که مقدار ROC برابر با ۰/۸۲ بود (شکل ۵). در این وزن‌دهی، بیشترین وزن به معیارهای پاسگاه محیط‌بانی، آبشخور، رودخانه و آبراه اختصاص یافت که نشان‌دهنده نقش اساسی این عوامل در تعیین مطلوبیت زیستگاه آهوی ایرانی است. این نتایج بیانگر آن است که وزن‌دهی از دقت قابل قبولی در مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه آهوی ایرانی برخوردار بوده است. اختصاص وزن بیشتر به معیارهای

پاسگاه محیط‌بانی، آبشخور، رودخانه و آبراهه منجر به افزایش دقت مدل شده است. بنابراین، این عوامل به‌عنوان شاخص‌های کلیدی در تعیین مطلوبیت زیستگاه این گونه شناسایی شدند.



شکل ۴- مطلوبیت زیستگاه براساس وزن AHP



شکل ۵- نمودار ROC براساس وزن دهی AHP

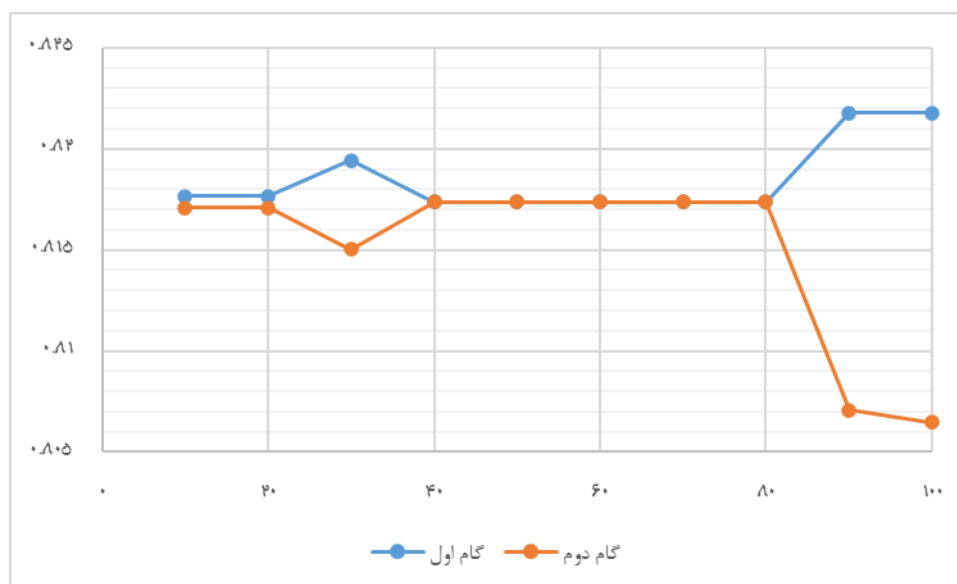
تحلیل حساسیت: نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که معیارهای فاصله از علفزار (سطح ۱۰ درصد)، فاصله از جاده خاکی (۲۰ درصد)، فاصله از رودخانه (۳۰ درصد)، شیب (۴۰ تا ۸۰ درصد) و فاصله از رودخانه (۹۰ تا ۱۰۰ درصد) از حساسیت بالاتری برخوردار هستند (جدول ۳). جدول ۳، نتایج تحلیل حساسیت معیارهای مطلوبیت زیستگاه آهو را در تحلیل حساسیت ۱۰ تا ۱۰۰ درصد نشان می‌دهد. معیار شیب با مقدار ۰/۰۸۸ در سطح ۶۰ درصد و ۰/۰۸۶ در سطح ۷۰ درصد بیشترین میزان حساسیت را در میان سایر عوامل داشته و با کاهش سطح اطمینان، مقدار آن نیز کاهش یافته است. همچنین، فاصله از رودخانه در سطح ۹۰ درصد مقدار ۰/۰۸۲ و در سطح ۱۰۰ درصد مقدار ۰/۰۸۱ را نشان می‌دهد که بیانگر تأثیر بالای این معیار در مدل مطلوبیت زیستگاه است. معیار فاصله از علفزار نیز با مقدار ۰/۰۹۱ در سطح ۱۰ درصد بیشترین میزان حساسیت را داشته و سپس با افزایش درصد تحلیل حساسیت، مقدار آن اندکی کاهش یافته است. فاصله از پاسگاه محیط‌بانی، فاصله از آبشخور و فاصله از آبراهه نیز تغییرات نسبتاً پایداری در سطح‌های مختلف نشان داده‌اند. در مقابل، فاصله از شورزار و فاصله از مزارع کمترین میزان حساسیت را در سطوح اطمینان پایین‌تر داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که معیارهایی مانند شیب، فاصله از رودخانه، فاصله از علفزار و فاصله از جاده

بیشترین تأثیر را در خروجی مدل دارند، در حالی که برخی معیارهای دیگر حساسیت کمتری نسبت به تغییرات سطح اطمینان نشان داده‌اند.

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت معیارهای مطلوبیت زیستگاه آهوی گواتردار براساس واریانس (اعداد برجسته بیانگر بالاترین میزان حساسیت در درصد‌های متفاوت است)

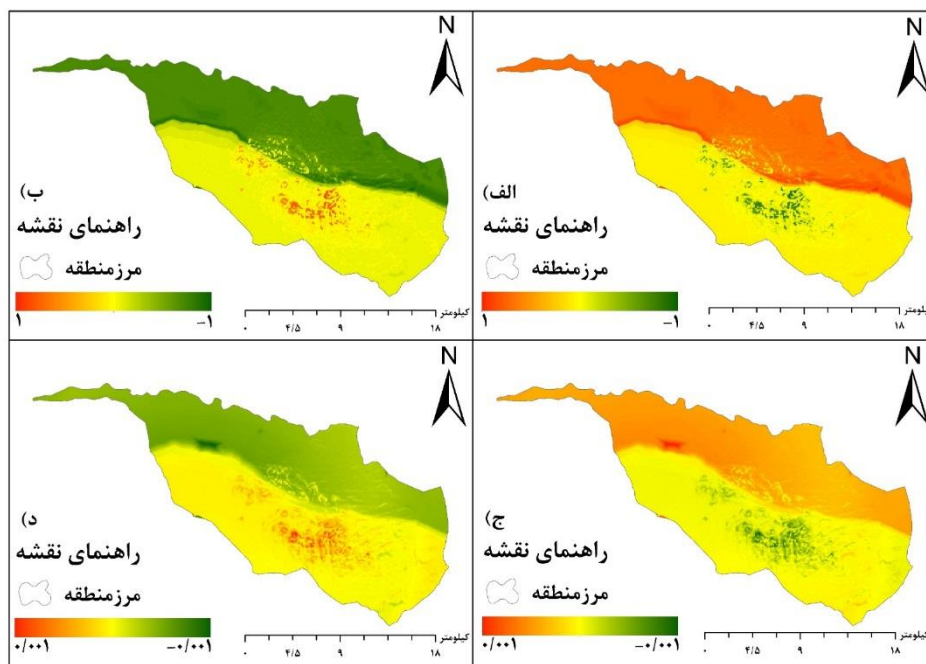
معیار	۱۰٪	۲۰٪	۳۰٪	۴۰٪	۵۰٪	۶۰٪	۷۰٪	۸۰٪	۹۰٪	۱۰۰٪
فاصله از پاسگاه محیط‌بانی	۰/۰۸۳	۰/۰۷۸	۰/۰۷۹	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹
فاصله از آبشخور	۰/۰۸۸	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۷۴	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶
فاصله از آبراهه	۰/۰۸۰	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸
فاصله از رودخانه	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۸۲	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۹	۰/۰۸۰	۰/۰۸۰	۰/۰۸۲	۰/۰۸۱
فاصله از زون امن	۰/۰۶۹	۰/۰۷۹	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶
فاصله از جنگل	۰/۰۸۷	۰/۰۷۴	۰/۰۷۹	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸
فاصله از علفزار	۰/۰۹۱	۰/۰۷۹	۰/۰۷۴	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸
فاصله از جاده	۰/۰۶۹	۰/۰۸۰	۰/۰۸۱	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷
فاصله از مزارع	۰/۰۹۱	۰/۰۸۱	۰/۰۶۷	۰/۰۷۷	۰/۰۸۲	۰/۰۷۰	۰/۰۷۴	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶
فاصله از روستاها	۰/۰۷۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۷۵	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵
فاصله از جاده خاکی	۰/۰۷۶	۰/۰۸۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴	۰/۰۷۶	۰/۰۷۴	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴
فاصله از شوره‌زار	۰/۰۵۹	۰/۰۶۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶
شیب	۰/۰۵۸	۰/۰۷۰	۰/۰۸۰	۰/۰۸۶	۰/۰۸۸	۰/۰۸۸	۰/۰۸۶	۰/۰۸۲	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶

ارزیابی صحت تحلیل حساسیت: نتایج ارزیابی صحت خروجی تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که در سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد معیارهای حساس (فاصله از علفزار، فاصله از جاده خاکی)، مقدار صحت مدل در هر دو گام تقریباً یکسان است (گام اول: ۰/۸۱۷۶۶۴، گام دوم: ۰/۸۱۷۰۷۶). در سطح ۳۰ درصد که معیار فاصله از رودخانه حساسیت بیشتری دارد، صحت مدل در گام اول افزایش داشته (۰/۸۱۹۴۲۹)، اما در گام دوم کاهش یافته است (۰/۸۱۵۰۱۷). از سطح ۴۰ تا ۸۰ درصد که مربوط به معیار شیب است، مقدار صحت ثابت باقی می‌ماند و تغییری مشاهده نمی‌شود (گام اول و دوم: ۰/۸۱۷۳۷۰). در سطوح ۹۰ و ۱۰۰ درصد که مربوط به فاصله از رودخانه است، صحت در گام اول افزایش یافته (۰/۸۲۱۷۸۲)، اما در گام دوم کاهش محسوسی داشته است (۰/۸۰۷۰۷۶) و ۰/۸۰۶۴۸۷). این روند بیانگر آن است که با افزایش سطح اطمینان، مطلوبیت زیستگاه افزایش یافته و ارزیابی صحت نیز بالاتر می‌رود. این روند نشان می‌دهد که افزایش وزن معیارهای حساس تأثیر مثبتی بر صحت مدل دارد، در حالی که کاهش وزن آنها منجر به افت دقت مدل می‌شود. بنابراین، این معیارها در تعیین مطلوبیت زیستگاه و بهبود دقت مدل‌های پیش‌بینی اهمیت زیادی دارند.



شکل ۶- روند تغییرات میزان ROC خروجی تحلیل حساسیت معیارهای حساس در دو گام افزایشی (اول) و کاهش‌ی (دوم) (درصد تحلیل حساسیت ۱۰-۱۰۰ درصد)

آزمون من-کندال و تایل-سن: آزمون من-کندال و تایل-سن در گام اول و دوم نتایج تحلیل حساسیت برای معیارهای حساس انجام شد. در گام اول، نتایج نشان داد که مناطق شمالی بیشترین تغییرات را تجربه کرده‌اند، به‌طوری‌که با افزایش حساسیت به میزان ۱۰ درصد، مطلوبیت زیستگاه نیز افزایش یافته است. در مقابل، در گام دوم، نتایج معکوس بوده و بیشترین تغییرات در مناطق جنوبی مشاهده شده است، به‌گونه‌ای که با کاهش میزان حساسیت، مطلوبیت زیستگاه در این مناطق افزایش یافته است. با توجه به این نتایج، انتظار می‌رود که هر دو منطقه شمالی و جنوبی مطلوبیت بالاتری داشته باشند؛ اما مطابق شکل ۴، مناطق جنوبی مطلوبیت پایین‌تری نشان می‌دهند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش میزان حساسیت منجر به افزایش مطلوبیت زیستگاه می‌شود، درحالی‌که کاهش آن باعث کاهش مطلوبیت زیستگاه می‌شود. شکل ۷ شامل چهار نقشه از تحلیل حساسیت معیارهای حساس در دو گام افزایشی و کاهش، براساس آزمون من-کندال و تایل-سن است. در آزمون من-کندال، نقشه الف (گام افزایشی) نشان می‌دهد که مناطق شمالی و شمال شرقی بیشترین افزایش تأثیر معیارهای حساس را داشته‌اند، درحالی‌که مناطق جنوبی و غربی تأثیر کمتری نشان داده‌اند. در نقشه ب (گام کاهش)، نواحی مرکزی و جنوب شرقی بیشترین تأثیرپذیری را نشان داده و مناطق شمالی و شمال شرقی تأثیر معیارها را تجربه کرده‌اند. در آزمون تایل-سن، نقشه ج (گام افزایشی) نتایج مشابهی را تأیید کرده و نشان می‌دهد که افزایش معیارها در شمال و شمال شرقی اثرگذاری بیشتری داشته، درحالی‌که جنوب و جنوب غربی کاهش تأثیر را تجربه کرده‌اند. نقشه د (گام کاهش) نیز تغییرات مشابهی را با جزئیات بیشتری ارائه می‌دهد، به‌طوری‌که نواحی مرکزی و جنوب شرقی بیشترین حساسیت را داشته‌اند. معیارهای فاصله از علفزار، جاده خاکی، رودخانه و شیب بیشترین تأثیر را بر حساسیت زیستگاه داشته‌اند، به‌ویژه در مناطق مرتفع‌تر شمالی و شمال شرقی که تأثیر شیب (۴۰ تا ۸۰ درصد) کاملاً محسوس بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر این معیارها می‌تواند نقش کلیدی در توزیع و پایداری زیستگاه داشته باشد و نواحی مرکزی و جنوب شرقی حساس‌ترین بخش‌ها به این تغییرات هستند.



شکل ۷- نقشه آزمون من-کندال برای معیارهای حساس: الف) گام اول و ب) گام دوم
نقشه آزمون تایل-سن برای معیارهای حساس: ج) گام اول و د) گام دوم

بحث و نتیجه‌گیری

شناسایی مناطق مستعد زیستی و عوامل محدودکننده برای گونه آهوی گواتردار، نقش مهمی در برنامه‌های حفاظتی این گونه ارزشمند دارد. پناهگاه حیات وحش شیراحمد به‌عنوان یکی از زیستگاه‌های کلیدی این گونه در ایران شناخته می‌شود. در این پژوهش، از روش ارزیابی چندمعیاره برای مدل‌سازی زیستگاه آهوی گواتردار استفاده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مناطق

شمال غربی و مرکزی دارای بالاترین مطلوبیت زیستگاهی بوده و به عنوان مناسب‌ترین زیستگاه برای آهوی گواتردار شناسایی شدند. این مناطق در زون امن پناهگاه حیات وحش شیراحمد قرار داشته، به منابع آبی و پوشش گیاهی مناسب دسترسی دارند و براساس مشاهدات میدانی، از زیستگاه‌های اصلی و همیشگی این گونه محسوب می‌شوند.

طبق نتایج به دست آمده، مناطق مرکزی و غربی پناهگاه حیات وحش شیراحمد دارای حداکثر مطلوبیت زیستگاهی هستند. این پناهگاه به دلیل نزدیکی به روستاها و شهر سبزوار با عوامل محدودکننده‌ای مانند مزارع کشاورزی، روستاها و جاده‌ها مواجه است. این عوامل عمدتاً در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه متمرکز شده‌اند (شکل ۲) و موجب کاهش مطلوبیت زیستگاه در این نواحی شده‌اند. در مقابل، مناطق مرکزی و غربی به دلیل حضور کمتر این تهدیدات از مطلوبیت بالاتری برخوردارند. علاوه بر این، مطابق نقشه فازی منابع آبی در شکل ۲، بخش‌های شرقی و جنوب شرقی، منابع آبی به صورت محدود در دسترس است که این موضوع نیز موجب کاهش حضور آهوی گواتردار در این مناطق شده است. در مقابل، مناطق مرکزی و شمالی دارای منابع آبی دائمی بوده و این امر موجب افزایش مطلوبیت زیستگاهی در این بخش‌ها شده است (شکل ۲). همچنین، مناطق شرقی به دلیل شیب و ارتفاع بیشتر در مقایسه با مناطق مرکزی و غربی، مطلوبیت کمتری دارند (شکل ۲).

براساس مطالعات پیشین، منابع آبی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر مطلوبیت زیستگاه گونه‌هایی مانند آهو شناسایی شده‌اند (Radnezhad et al., 2015; Karami et al., 2016; Hosseini et al., 2017; Pourmanafi et al., 2021; Naqibzadeh et al., 2021; Morovati et al., 2023). با این حال، یافته‌های این مطالعه نشان داد که امنیت، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر مطلوبیت زیستگاه آهوی گواتردار است؛ یافته‌ای که با نتایج پژوهش Radnezhad و همکاران (۲۰۱۵) نیز هم راستا است، جایی که پوشش گیاهی و امنیت به عنوان دو معیار کلیدی در تعیین زیستگاه مناسب معرفی شده‌اند. افزون بر آن، طبق مطالعه Hosseini و همکاران (۲۰۱۷)، منابع آبی، فاصله از مزارع کشاورزی و فاصله از جاده‌ها از جمله معیارهای کلیدی در مطلوبیت زیستگاه آهو شناخته شده‌اند که یافته‌های حاضر نیز این نتایج را تأیید می‌کند؛ به گونه‌ای که در تحلیل حساسیت انجام شده، فاصله از منابع آبی با بالاترین وزن نسبی، همچنان یکی از اثرگذارترین معیارها در ارزیابی مطلوبیت زیستگاه به شمار می‌رود. همچنین نتایج این مطالعه هم‌راستا با یافته‌های Naqibzadeh و همکاران (۲۰۲۱) است که در آن شیب به عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های زیستگاهی آهو معرفی شده است. در کنار این موارد، تأثیر قابل توجه پوشش گیاهی، به ویژه مراتع و جنگل‌ها، نیز از دیگر یافته‌های برجسته این پژوهش است؛ عاملی که می‌تواند در مدیریت زیستگاه‌ها و طراحی برنامه‌های حفاظتی نقش مؤثری ایفا کند. بنابراین، نتایج این مطالعه با تأیید و تقویت یافته‌های پیشین، بر اهمیت ترکیبی عوامل امنیتی، منابع اکولوژیک و ویژگی‌های فیزیوگرافی در ارزیابی زیستگاه تأکید دارد.

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که معیارهای فاصله از علفزار، جاده خاکی، رودخانه و شیب بیشترین تأثیر را بر مطلوبیت زیستگاه آهو دارند. در گام اول، با افزایش وزن به این معیارها، مطلوبیت زیستگاه در مناطق شمالی و شمال شرقی افزایش یافته است. در گام دوم، با کاهش وزن این معیارها مطلوبیت زیستگاه در مناطق جنوبی و غربی افزایش پیدا کرده است. این تغییرات در نقشه‌های آزمون من-کندال و تایل-سن به وضوح قابل مشاهده است؛ به طوری که در گام افزایشی، نواحی شمالی و شمال شرقی بیشترین تأثیر را از تغییرات معیارها نشان داده‌اند و در گام کاهشی، مناطق مرکزی و جنوب شرقی بیشتر تحت تأثیر قرار گرفتند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تغییر در این معیارها می‌تواند تأثیر زیادی بر توزیع زیستگاه آهو داشته باشد و بنابراین توجه به آنها در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریت محیط‌زیستی ضروری است.

ارزیابی صحت خروجی‌های تحلیل حساسیت معیارهای حساس در گام اول و دوم نشان داد که با افزایش سطح اطمینان، مطلوبیت زیستگاه در گام اول افزایش می‌یابد. این روند نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و مثبت معیارهای حساس بر مطلوبیت زیستگاه است. با این حال، زمانی که این معیارها در گام دوم کاهش یابند، مطلوبیت زیستگاه نیز کاهش می‌کند. این تغییرات نشان می‌دهند که وزن‌دهی به این معیارها در فرآیند مدل‌سازی تأثیر چشمگیری بر دقت و کیفیت پیش‌بینی‌ها دارد. به طور کلی، افزایش وزن معیارهای حساس موجب بهبود مطلوبیت زیستگاه می‌شود، که نشان‌دهنده اهمیت بالای این معیارها در تحلیل‌های محیط‌زیستی است. بنابراین، توجه دقیق به این معیارها و اعمال وزن‌های مناسب در مدل‌های پیش‌بینی، می‌تواند نتایج بهتری را در ارزیابی و تعیین زیستگاه‌ها به همراه داشته باشد.

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که معیارهای شیب و فاصله از رودخانه تأثیر بیشتری بر تغییرات نقشه مطلوبیت زیستگاه دارند و تغییر وزن آنها می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در خروجی مدل شود. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن حساسیت مدل نسبت به معیارهای مختلف را در فرآیند تصمیم‌گیری محیط‌زیستی برجسته می‌سازد، زیرا نشان می‌دهد که تغییرات در وزن معیارهای حساس می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج مدل‌های پیش‌بینی و ارزیابی زیستگاه‌ها داشته باشد. اگر معیارهای حساس به درستی شناسایی و مورد ارزیابی قرار نگیرد، ممکن است نتایج نادرست یا دارای خطای پیش‌بینی باشند و تصمیم‌گیری‌ها منجر به انتخاب‌های نادرست در زمینه حفاظت و مدیریت منابع طبیعی شود. به‌ویژه در مدل‌های پیچیده مانند ارزیابی چندمعیاره، تغییرات جزئی در معیارهای حساس می‌تواند به تغییرات بزرگ در پیش‌بینی‌ها و استراتژی‌های مدیریتی منجر شود. بنابراین، شناسایی و ارزیابی دقیق معیارهای حساس باعث می‌شود که تصمیم‌گیرندگان بتوانند سیاست‌ها و اقدامات حفاظت از محیط‌زیست را به گونه‌ای تنظیم کنند که بیشترین تأثیر مثبت را بر حفظ تنوع زیستی و پایداری اکوسیستم‌ها داشته باشد. این یافته‌ها اهمیت انجام تحلیل حساسیت را در ارزیابی تأثیرگذاری معیارها بر خروجی مدل را نشان می‌دهد. در صورت عدم انجام تحلیل حساسیت، میزان تأثیرگذاری هر معیار بر خروجی مدل نامشخص باقی می‌ماند و این موضوع می‌توانست به نتایج نادرست منجر شود. برای مثال، منابع آبی از عوامل حیاتی برای زیستگاه آهوی گواتردار محسوب می‌شوند، اما در صورتی که وزن بیش از حدی به این معیار داده شود، مدل ممکن است مناطقی را به‌عنوان زیستگاه مطلوب معرفی کند که در واقع به دلیل وجود موانعی مانند جاده‌های خاکی، شرایط مناسبی برای حضور آهو ندارند. این جاده‌ها که محل تردد گردشگران و گشت‌های محیط‌بانی هستند، می‌توانند باعث افزایش ترس و استرس در آهوی گواتردار می‌شوند. بنابراین، تحلیل حساسیت نقش مهمی در بهینه‌سازی وزن معیارها و دستیابی به نتایج دقیق‌تر در مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه ایفا می‌کند.

مطالعات پیشین بر تأثیر تغییر وزن برخی معیارهای کلیدی بر خروجی مدل‌ها تأکید کرده‌اند (Chen و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که تغییر وزن معیارهای حساس می‌تواند به‌طور مستقیم بر نتایج مدل‌های ارزیابی چندمتغیره تأثیر بگذارد، یافته‌ای که در این پژوهش نیز تأیید شد. این نتیجه با یافته‌های تحقیق حاضر همخوانی دارد، زیرا در این پژوهش نیز مشخص شد که فاصله از رودخانه، به‌عنوان منبع آبی، از معیارهای کلیدی در تعیین زیستگاه مطلوب آهوی گواتردار محسوب می‌شود، در تحقیق حاضر نیز مشخص گردید که افزایش وزن معیارهای کلیدی، دقت نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه را افزایش می‌دهد. درحالی‌که مطالعات گذشته عمدتاً بر تأثیر تغییر وزن معیارها بر کلیت نتایج مدل تأکید داشتند، این پژوهش نشان داد که تغییر وزن معیارهای کلیدی چگونه بر موقعیت و گستره مکانی زیستگاه‌های مطلوب اثر می‌گذارد. نتایج این تحقیق نشان داد که با تحلیل روند تغییرات تحلیل حساسیت می‌توان حساس‌ترین معیارها را شناسایی کرد و دقت مدل را افزایش داد.

طبق نتایج به‌دست‌آمده، منطقه مطلوب برای آهوی گواتردار ایرانی دارای پوشش گیاهی مناسب، از جمله گونه‌هایی مانند تاغ و قیچ، است که به‌عنوان منابع غذایی اصلی این گونه محسوب می‌شوند. علاوه بر این، این منطقه به دلیل وجود پاسگاه محیط‌بانی، از امنیت بیشتری برخوردار بوده و تعداد شکارچیان در آن کمتر است. با این حال، نزدیکی به جاده‌ها تهدیدی جدی برای بقای آهوها محسوب می‌شود، زیرا احتمال تصادفات جاده‌ای را افزایش می‌دهد. یکی دیگر از ویژگی‌های این منطقه، قرارگیری در ارتفاع و شیب پایین‌تر است که منجر به کاهش حضور گوشتخواران بزرگ شده و در نتیجه خطر شکار آهوها را کاهش می‌دهد (Karami et al., 2020). همچنین، تأمین منابع آبی پایدار برای این گونه از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، وجود یک منبع آبی مصنوعی دائمی در این منطقه، نیاز حیاتی آهوی گواتردار به آب را برآورده می‌کند. علاوه بر این، این منطقه در نزدیکی رودخانه کال شور سبزو قرار دارد که به‌عنوان یک منبع آبی طبیعی در منطقه شناخته می‌شود. کاهش دسترسی به منابع طبیعی موجب وابستگی بیشتر آهوها به محصولات کشاورزی شده و در نتیجه، تعارض میان حیات وحش و جوامع محلی را افزایش داده است. در واکنش به این تعارض، برخی از کشاورزان اقدام به استفاده از سگ‌های گله برای محافظت از مزارع خود کرده‌اند که این امر منجر به تلفات قابل توجهی در جمعیت آهوی گواتردار شده است. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که آهوی گواتردار از تهدیدات محیطی کمتری برخوردار است. با این حال، ملاحظات مدیریتی برای کاهش تعارضات انسانی-حیات وحش و افزایش حفاظت از این زیستگاه ضروری به نظر می‌رسد.

این پژوهش با هدف ارزیابی مطلوبیت زیستگاه و شناسایی عوامل تعیین‌کننده پراکنش آهوی گواتردار در پناهگاه حیات وحش شیراحمد، از روش مدل‌سازی ارزیابی چندمعیاره استفاده نمود. نتایج نشان داد که مناطقی که در نزدیکی منابع آبی (آبخور: وزن ۰/۱۷۵۳ و رودخانه با وزن ۰/۱۴۳۲) و پاسگاه‌های محیط‌بانی (وزن: ۰/۱۹۷۵) قرار دارند، از مطلوبیت بالاتری برخوردار هستند. ارزیابی صحت مدل با شاخص ROC، مقدار ۰/۸۲ نشان داد که بیانگر صحت بالای این مدل است. نتایج تحلیل حساسیت معیارهای فاصله از رودخانه و شیب را به‌عنوان حساس‌ترین معیارها شناسایی کرد. ارزیابی صحت خروجی معیارهای حساس نشان داد که با افزایش سطوح اطمینان مطلوبیت زیستگاه نیز افزایش پیدا می‌کند. آزمون من-کندال و تایل-سن نشان دادند که روند تغییرات در گام افزایشی نشان‌دهنده مطلوبیت بیشتر مناطق شمالی و غربی نسبت به مناطق جنوبی و شرقی است. با توجه به این نتایج منابع آبی، پوشش گیاهی و امنیت به‌عنوان عوامل کلیدی در پراکنش آهوی گواتردار شناسایی شدند. در همین راستا، پیشنهاد می‌شود که در مناطق مرکزی و غربی، آبخورهای مصنوعی ایجاد شده و در نزدیکی روستاهای یحیی‌آباد و جلین استقرار پاسگاه‌های محیط‌بانی در دستور کار قرار گیرد. همچنین برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود که تغییرات مکانی-زمانی، تأثیر تغییرات اقلیمی بر پراکنش، مطالعه الگوهای مهاجرتی برای آهوی گواتردار انجام شود. این اقدامات می‌تواند افزایش جمعیت آهو، پایداری زیستگاه و تأمین منابع غذایی را تسهیل کرده و احتمال بازگشت این گونه در خطر انقراض را به زیستگاه‌های مستعد افزایش دهد.

سپاسگزاری

تحقیق حاضر بخشی از تحقیق مشترک گروهی در زمینه‌های مدل‌سازی مکانی و ارزیابی زیستگاهی می‌باشد که در گروه محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس انجام پذیرفته است و بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی از دانشگاه بابت فراهم نمودن اجرای زمینه تحقیق، ابراز می‌گردد.

References

- Abdolahe, S., Salman Mahine, A., 2016. Survey the Effect of Scale on Leopard (*Panthera Pardus Saxicolor*) Habitat Modeling in Golestan National Park. Environmental Researches 6(11), 179-108.
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., 2017. Spatio-temporal variability of satellite-derived chlorophyll-a and algal blooms and relationship with the distribution of ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in the southern Caspian Sea 8(32), 35-53. (in Persian)
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., 2020. Applied introduction of main procedures of spatio-temporal analysis of the bio-optical component of chlorophyll-a in the southern Caspian Sea. Researches in Earth Sciences 11(1), 189-207.
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Hosseini, V., Aghajeri, N., 2019. Application of spatial analysis and multi-criteria evaluation in landfill site selection of Marivan city based on fuzzy logic. Zanko Journal of Medical Sciences 20(64), 32-51. (In Persian)
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Kutser, T., Vignudelli, S., Kostianoy, A., 2020. Spatio-temporal variability in bio-optical properties of the southern caspian sea: A historic analysis of ocean color data. Remote Sensing 12(23), 3975.
- Ashtab, D., Gholamalifard, M., Mahmoudi, N., 2017. Species suitability modeling of Caspian kutum (*Rutilus frisii kutum*) based on a multi-criteria evaluation in the southern Caspian Sea. Journal of Animal Environment 9(4), 235-246. (in Persian)
- Chen, Y., Yu, J., Xevi, E., Shahbaz, K., 2009. A GIS-based sensitivity analysis of multi-criteria weights. In 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences Proceedings (pp. 3137-3143).
- Crosetto, M., Tarantola, S., 2001. Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation. International Journal of Geographical Information Science 15(5), 415-437.
- Darvishsefat, A.A., 2006. Iranian protected area satin. Tehran: University of Tehran Press. (in Persian)

- Delgado, M.G., Sendra, J.B., 2004. Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: a review. *Human and ecological risk assessment* 10(6), 1173-1187.
- Eastman, R. J., 2015. *TerrSet manual* (392 p.). Worcester, MA: Clark University.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17(1), 43-57.
- Farashi, A., 2015. Habitat modelling as a suitable tool for management of wildlife habitats. *Experimental Animal Biology* 3(3), 43-53. (In Persian)
- Gholamalifard, M., Ahmadi, B., Saber, A., Mazloomi, S., Kutser, T., 2022. Deploying a GIS-based multi-criteria evaluation (mce) decision rule for site selection of desalination plants. *Water* 14(10), 1669.
- Goudarzi, F., Hemami, M.-R., Malekian, M., Fakheran, S., 2019. Ecological characterization of the breeding habitat of Luristan newt (*Neurergus kaiseri*) at local scale. *Journal of Natural Environment* 72(1), 113-127. (In Persian)
- Hirzel, A.H., Le Lay, G., Helfer, V., Randin, C., Guisan, A., 2006. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecological modelling* 199(2), 142-152.
- Hosseini, G., Shams Sfantabab, B., Alizadeh Shabani, A., 2017. Habitat suitability evaluation for Persian gazelle (*Gazella subgutturosa*) in Haftad Qolleh Protected Area, Markazi Province in central Iran. *Journal of Natural Environment* 69(4), 965-979. (In Persian)
- IUCN, 2024. IUCN Red List version 2024-2: Table 1a [Internet]. <https://www.iucnredlist.org/> (Retrieved October 28, 2024).
- IUCN SSC Antelope Specialist Group., 2017. *Gazella subgutturosa*, goitered gazelle. The IUCN Red List of Threatened Species, 2017, e.T8976A50187422. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T8976A50187422.en>
- Karami, P., Kamangar, M., Hosseini, S.M., 2016. Habitat suitability modeling for Persian gazelle (*Gazella subgutturosa subgutturosa*) in Gharaviz no-hunting zone and Kermanshah Province using artificial neural networks. *Iranian Journal of Biology (Animal Research)* 29(3), 340-352.
- Karami, P., Shayesteh, K., Rastegar-Pouyani, N., 2020. Highlighting altitude role in the movement of wildlife species of mountain areas with emphasis on protected areas: Case Study of Kermanshah Province. *Journal of Animal Environment* 12(2), 21-30.
- Khani, A., Zamani, S., 2012. Introduction to the notable vertebrate fauna of Shirahmad Wildlife Refuge, Sabzevar, Razavi Khorasan Province. In *Second Conference on Environmental Planning and Management Tehran*. Retrieved February 12, 2025, from <https://civilica.com/doc/147527>. (In Persian)
- Khorasan-e Razavi Environment Protection Organization., 2008. *Shirahmad wildlife refuge tourism project*. Tehran, 626 p. (In Persian)
- Luo, X., Liang, L., Liu, Z., Wang, J., Huang, T., Geng, D., Chen, B., 2020. Habitat Suitability Evaluation of the Chinese Horseshoe Bat (*R. sinicus*) in the Wuling Mountain Area Based on MAXENT Modelling. *Polish Journal of Environmental Studies* 29(2), 1263-1273.
- MacMillan, H., Moore, A.B., Augé, A.A., Chilvers, B.L., 2016. GIS-based multi-criteria analysis of breeding habitats for recolonising species: New Zealand sea lions. *Ocean & Coastal Management* 130, 162-171.
- Madadi, M., Akbarnejad, F., Gorbanzadeh, S., 2017. Desirability model of *Gazella subgutturosa* in Golestan National Park. *Journal of Animal Environment* 10(1), 9-18. (In Persian)
- Malchevski, Y., 2012. *Geographic information system and multi-criteria decision analysis* (3rd ed.; A. Parhizkar A. Ghafari Gyalandeh, Trans.). Tehran: Organization for Studying and Compiling Humanities Books of Universities (SAMT), 608 p.

- Mallon, D.P., Kingswood, S.C., 2001. Regional action plan for antelope conservation. Antelopes Part 4: North Africa, The Middle East and Asia. Global Survey and Regional Action Plans 231-244.
- Mehri, A., Salmanmahiny, A., Mirkarimi, S.H., Rezaei, H.R., 2014. Use of optimization algorithms to prioritize protected areas in Mazandaran Province of Iran. Journal for Nature Conservation 22(5), 462-470.
- Morovati, M., Kamalian, N., Mohammadi, S., 2023. Habitat Assessment of The Goitered Gazelle (*Gazella Subgutturosa*) By Maximum Entropy in Kalmand Bahadran Protected Area, Yazd, Iran. Environment and Interdisciplinary Development 8(80), 79-89.
- Naqibzadeh, A., Sarhangzadeh, J., Sayedi, N., 2021. Habitat desirability modeling of Goitered Gazelle (*Gazella subgutturosa*) by Ecological Niche Factor Analysis in the Bidouyeh Protected Area, Iran. Journal of Wildlife and Biodiversity 5(4), 15-27.
- Paudel, P. K., Hais, M., Kindlmann, P., 2015. Habitat suitability models of mountain ungulates: identifying potential areas for conservation. Zoological Studies 54(1), 37.
- Pourmanafi, S., Afshari, S., Lotfi, A., Soffianhan, A., 2022. Evaluation of *Gazella subgutturosa* habitat and presentation of its utility model at Mouteh Wildlife Refuge. Desert Ecosystem Engineering 9(29), 115-127.
- Radnezhad, H., Abari, M. F., Moshtaghi, M., Sadeghi, M., 2015. Maximum entropy habitat suitability and distribution modelling of Persian gazelle (*Gazella subgutturosa*). Indian Journal of Natural Sciences (5), 976.
- Rahdari, V., Soffianian, A., Pormanafi, S., Ghaiumi, H., 2017. Surviving of risk and tradeoff levels effects on land capability evaluation results in fuzzy area (case study: Plasjan sub-basin). Journal of Natural Environment 70(4), 843-855. (In Persian)
- Sánchez-Mercado, A. Y., Ferrer-Paris, J. R., Franklin, J., 2010. Mapping species distributions: Spatial inference and prediction. Oryx 44(4), 615.
- Suleman, S., Khan, W. A., Anjum, K.M., Shehzad, W., Hashmi, S.G.M., 2020. HABITAT suitability index (HSI) model of Punjab urial (*Ovis vegnei punjabiensis*) in Pakistan. The Journal of Animal and Plant Sciences 30, 229-238.
- Wunderlich, R.F., Lin, Y.P., Anthony, J., Petway, J.R., 2019. Two alternative evaluation metrics to replace the true skill statistic in the assessment of species distribution models. Nature Conservation 35, 97-116.
- Yousefi Qaleh Salimi, S., Gholamalifard, M., Ghasempouri, S.M., Rahbarizadeh, A., 2024. Habitat suitability modeling of wild goat (*Capra aegagrus*) and Caspian snowcock (*Tetraogallus caspius*) in the Central Northern Alborz Protected Area based on the multi-criteria evaluation procedure (MCE). Environment and Interdisciplinary Development 8(82), 1-16. (In Persian)