



Habitat modeling of the Moroccan locust using indices extracted from Landsat-8 satellite imagery (Case study: Gonbad-e Kavus)

Daryoush Mansouri Razi¹ , Masoud Hakimitabar²  and Roozbeh Moazenzadeh³  

- 1- Department of Horticulture and Plant Protection, College of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: dshmansoorey@gmail.com
2. Department of Horticulture and Plant Protection, College of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: hakimitabar@yahoo.com
3. Corresponding author, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: moazenzadeh.r@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	<p>The Moroccan locust (<i>Doclostaurus maroccanus</i>), as one of the native pests of Iran, is recognized for its migratory capability, population outbreaks, and severe damage to crops and rangelands. In this study, meteorological data (temperature, precipitation, and relative humidity), field-measured data (soil moisture and locust abundance), and indices derived from Landsat 8 satellite imagery (LST, TCI, OSAVI, and BSI) were used as input variables for a multilayer perceptron (MLP) neural network model to estimate locust abundance at the pixel scale. To this end, the dataset was randomly divided into training (70%) and testing (30%) subsets. Model performance was evaluated using the correlation coefficient (R) and the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE). The results indicated that the input variables of the simulation model were appropriately selected and that the model structure was capable of simulating locust abundance with very high accuracy, such that NSE values of approximately 0.98 and 0.99 were obtained for the training and testing phases, respectively. Furthermore, the results showed that soil moisture exhibited the lowest correlation with measured locust abundance (R=0.9), while the TCI index showed the highest correlation (R=0.98). Overall, the findings of this study demonstrate that the combined use of field data and satellite-derived indices within machine learning frameworks can be highly effective for simulating the habitat of the Moroccan locust. The proposed approach enables large-scale and multi-temporal monitoring of Moroccan locust populations, given the availability of satellite imagery, thereby providing valuable support for experts and decision-makers in pest management and control planning.</p>
Article history: Received: 11 December 2025 Revised: 29 December 2025 Accepted: 30 December 2025 Published online: Autumn and Winter 2025	
Keywords: <i>Biophysical indices, Golestan province, Machine learning models, Short-horned grasshoppers, Spatiotemporal analysis.</i>	

Cite this article: Mansouri Razi, D., Hakimitabar, M & Moazenzadeh, R. (2025). Habitat modeling of the Moroccan locust using indices extracted from Landsat-8 satellite imagery (Case study: Gonbad-e Kavus). *Iranian Journal of Plant Protection Science*, 56 (2), 283-299. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.405728.1007098>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.405728.1007098>

Extended Abstract

Introduction

The Moroccan locust (*Dociopterus maroccanus*) is a native, migratory, and polyphagous pest in Iran, mainly distributed in dry and low-productivity habitats surrounding the Mediterranean region. In years with favorable climatic conditions, this species transitions from a solitary to a gregarious phase, becoming a serious threat to rangelands and crops. Climatic factors such as temperature, precipitation, and soil moisture are the key drivers of its population dynamics. Meanwhile, vegetation cover and soil type determine the suitability of oviposition sites and nymphal development. Considering the increasing climatic fluctuations and recent droughts in Golestan Province, accurate modeling of potential habitats using remote sensing and artificial intelligence is essential for targeted management and early prediction of locust outbreaks.

Materials and Methods

This study was conducted in Gonbad-e Kavus County, located in the northern and central parts of Golestan Province, which has a warm and dry Mediterranean climate (150–200 dry days per year). Field data included locust density and volumetric soil moisture (0–10 cm depth), collected between 10:00 and 11:00 a.m. Climatic data (temperature, precipitation, relative humidity) were obtained from the Incheh Borun meteorological station, while satellite-based indices, including Land Surface Temperature (LST), Temperature Condition Index (TCI), Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI), and Bare Soil Index (BSI)-were derived from atmospherically and geometrically corrected Landsat-8 images. A total of 151 data points were used for modeling (70% for training and 30% for testing). Locust density was predicted using a Multilayer Perceptron (MLP) neural network employing sigmoid and ReLU activation functions. Model training was performed using the Levenberg–Marquardt backpropagation algorithm, and performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2) and the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) indices.

Results and Discussion

Analysis of the satellite-derived indices revealed that the Bare Soil Index (BSI) was the most influential factor in identifying suitable habitats for the Moroccan locust. High BSI values, representing dry and sparsely vegetated soils, were directly associated with increased locust density and oviposition activity, whereas negative BSI values corresponded to densely vegetated and cooler areas. Land Surface Temperature (LST) was also identified as a key predictor, with the 38.26–47.97°C range providing optimal conditions for locust activity and reproduction. Strong correlations between LST, BSI, and OSAVI confirmed the synergistic role of these indices in habitat modeling. High TCI values (>0.8) effectively identified thermally favorable regions with dense populations. The OSAVI index showed an inverse relationship with locust abundance and reproduction, indicating that higher vegetation density corresponded to lower locust populations. activity-higher vegetation density reduced locust abundance and reproduction. These findings are consistent with previous studies from North Africa and Central Asia. The MLP model demonstrated very high accuracy in predicting locust density (training $R^2 = 0.99$, testing $R^2 = 0.98$; NSE = 0.99 and 0.98), explaining over 98% of observed variation, confirming the model's robustness and predictive reliability.

Conclusion

The MLP-based modeling approach demonstrated high capability in accurately predicting the potential habitats of the Moroccan locust under variable climatic conditions. Satellite-derived indices (LST, OSAVI, TCI, and BSI) proved to be effective tools for understanding environmental heterogeneity and identifying high-risk areas. The results highlight the importance of integrating remote sensing and artificial intelligence within national locust management systems, providing a foundation for early warning, targeted monitoring, and optimized pesticide application. With the increasing frequency of droughts and vegetation degradation in northern Iran, combining climate monitoring, satellite-based habitat modeling, and sustainable resource management is essential to mitigate future outbreaks and safeguard food security. The findings of this study can serve as a model for developing early warning systems for pest management in other arid regions of the country.

Author Contributions

“**Conceptualization:** Roozbeh Moazenzadeh and Masoud Hakimitabar; **methodology:** Daryoush Mansouri Razi; **software:** Roozbeh Moazenzadeh; **validation:** Roozbeh Moazenzadeh and Masoud Hakimitabar, **formal analysis:** Roozbeh Moazenzadeh and Masoud Hakimitabar; **investigation:** Daryoush Mansouri Razi, Roozbeh Moazenzadeh and Masoud Hakimitabar; **writing-original draft preparation:**

Masoud Hakimitabar and Roozbeh Moazenzadeh; **writing-review and editing:** Daryoush Mansouri Razi, Roozbeh Moazenzadeh and Masoud Hakimitabar; **project administration:** Masoud Hakimitabar; **funding acquisition:** Shahrood University of Technology. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Not applicable.

Acknowledgements

The authors would like to thank Shahrood University of Technology for preparing the fund of research and also all participants of the present study.

Ethical considerations

This study only included arthropod material, and all required ethical guidelines for the treatment and use of animals were strictly adhered to in accordance with international, national, and institutional regulations. No human participants were involved in any studies conducted by the authors for this article. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



مدل سازی زیستگاه ملخ مراکشی با استفاده از شاخص های مستخرج از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ (مطالعه موردی: شهرستان گنبد کاووس)

داریوش منصوری رضی^۱ | مسعود حکیمی تبار^۲ | روزبه موذن زاده^۳ ✉

۱. گروه باغبانی و گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: dshmansoorey@gmail.com

۲. گروه باغبانی و گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: hakimitabar@yahoo.com

۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: moazenzadeh.r@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>ملخ مراکشی (<i>Doclostaurus maroccanus</i>) به عنوان یکی از آفات بومی ایران با توانایی مهاجرت، طغیان های جمعیتی و خسارت های گسترده به محصولات زراعی و مراتع شناخته می شود. در این پژوهش از داده های هواشناسی (دما، بارندگی و رطوبت نسبی)، داده های زمینی اندازه گیری شده (رطوبت خاک و تعداد ملخ) و شاخص های مستخرج از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ (LST, TCI, OSAVI, BSI) بعنوان ورودی های مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) بمنظور برآورد تعداد ملخ در مقیاس پیکسل سایز استفاده شد. به همین منظور داده ها بصورت تصادفی به دو مجموعه آموزش (۷۰ درصد) و تست (۳۰ درصد) اختصاص یافتند. بمنظور ارزیابی نتایج از دو ضریب همبستگی (R) و ضریب نش ساتکلیف (NSE) استفاده شد. نتایج نشان داد که ورودی های مدل شبیه ساز بدرستی انتخاب شده ($R=0.08$) و ساختار مدل شبیه ساز نیز بگونه ای بوده که با دقت بسیار بالا توانسته تعداد ملخ را شبیه سازی نماید بنحوی که مقادیر NSE در دو مرحله آموزش و تست بترتیب در حدود 0.98 و 0.99 بدست آمده است. نتایج نشان داد که مقادیر رطوبت خاک با $R=0.9$ و مقادیر شاخص TCI با $R=0.98$ بترتیب کمترین و بیشترین ضریب همبستگی با تعداد ملخ اندازه گیری شده را داشته اند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که استفاده همزمان از داده های زمینی و شاخص های مستخرج از تصاویر ماهواره ای در قالب مدل های ماشین لرنینگ می تواند در شبیه سازی زیستگاه ملخ مراکشی بسیار مفید واقع شود. روش پیشنهادی در تحقیق حاضر امکان پایش جمعیت ملخ مراکشی در سطوح وسیع و بازه های زمانی مختلف - با توجه به دسترس بودن تصاویر ماهواره ای - را برای متخصصین و تصمیم گیران مدیریتی فراهم می آورد.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹ تاریخ انتشار: پاییز و زمستان ۱۴۰۴</p> <p>کلیدواژه ها: استان گلستان، تحلیل زمانی-مکانی، شاخص های بیوفیزیکی، ملخ های شاخک کوتاه، مدل های یادگیری ماشین.</p>

استناد: منصوری رضی، داریوش؛ حکیمی تبار، مسعود و موذن زاده، روزبه (۱۴۰۴). مدل سازی زیستگاه ملخ مراکشی با استفاده از شاخص های مستخرج از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ (مطالعه موردی: شهرستان گنبد کاووس). نشریه دانش گیاه پزشکی ایران، ۵۶ (۲)، ۲۸۳-۲۹۹. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.405728.1007098>



© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.405728.1007098>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

ملخ‌ها به جز قطب جنوب، در سراسر جهان پراکنش وسیع دارند و سازمان فائو آن‌ها را از مخرب‌ترین آفات مهاجر جهانی معرفی کرده است (Gómez et al., 2020). در میان آن‌ها، ملخ‌های شاخک کوتاه اهمیت ویژه‌ای دارند و گونه‌هایی مانند ملخ ایتالیایی و مراکشی تهدید جدی برای زراعت و مراتع محسوب می‌شوند. ملخ مراکشی با نام علمی *Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815) از خانواده Acrididae، زیر راسته Caelifera و راسته Orthoptera، بومی ایران و بخش‌هایی از آسیای غربی است و به‌عنوان یکی از آفات کلیدی غلات شناخته می‌شود (Kasalo et al., 2024). مشخصه‌های ظاهری آن شامل رنگ زرد مایل به خاکستری، لکه‌های تیره روی سطح بالایی ران پای عقبی و علامت X مشخص روی پیش‌گرده است (شکل ۱).



شکل ۱. سطح پشتی ملخ مراکشی (*Dociostaurus maroccanus*) در مرحله بالغ

با این حال در فاز انفرادی و گروهی (مهاجر) دارای خصوصیات ظاهری و رفتاری متفاوتی می‌باشد (Latchininsky, 1998). ملخ مراکشی یک گونه تک نسلی با دگرذیسی ناقص و جثه متوسط است که عمدتاً در زیستگاه‌های خشک و فقیر پیرامون منطقه مدیترانه پراکنش دارد؛ زیستگاه‌هایی که اغلب در اثر چرای مفرط دام، دچار تخریب می‌شوند (Agris, 2023). زیستگاه‌های ملخ مراکشی معمولاً به طور جدا از هم قرار داشته و در مناطقی با خصوصیات توپوگرافیک، جغرافیایی و خاکشناسی متنوع واقع شده است (Mansouri Razi et al., 2024; González-Serna et al., 2020). خصوصیات اکولوژیک مشترک این مناطق شامل آب و هوای خشک یا نیمه خشک مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل، پوشش گیاهی استپ مانند و کوتاه، و لکه‌های فاقد پوشش گیاهی است که به‌عنوان بسترهای ترجیحی تخم‌ریزی عمل می‌کنند. این ملخ در فازهای انفرادی و مهاجر دارای ویژگی‌های ظاهری و رفتاری متفاوتی است. این گونه در بیشتر دوره زندگی به صورت انفرادی زیست می‌کند، اما تغییرات محیطی می‌تواند موجب افزایش تراکم و آغاز رفتارهای اجتماعی شود. این تغییر فاز معمولاً در پی ناپیوستگی‌های محیطی و رخدادهای هواشناسی رخ می‌دهد و با افزایش تحرک و گرایش به تجمع همراه بوده و می‌تواند به تشکیل باندهای متراکم پوره‌ها و توده‌های پروازی بزرگسالان منجر شود (Safarova, 2023; Khairov et al., 2024). در برخی سال‌ها، شرایط اقلیمی مطلوب، زمینه تکثیر انبوه و تغییر فاز رفتاری این گونه از حالت انفرادی به مهاجر را فراهم می‌کند. در نتیجه این تغییر، جمعیت‌های متراکم ملخ مراکشی به تهدیدی جدی برای مراتع و محصولات کشاورزی تبدیل می‌شوند (Safarova, 2023). ملخ مراکشی یک آفت پلی‌فاژ است که باعث خسارت قابل توجهی در مناطق مدیترانه می‌شود (Khairov et al., 2024). دشت‌های سنگلاخی و مناطق تپه‌ای با پوشش گیاهی نیمه‌استپی و زیر کوهستانی از ویژگی‌های مهم زیستگاه این ملخ

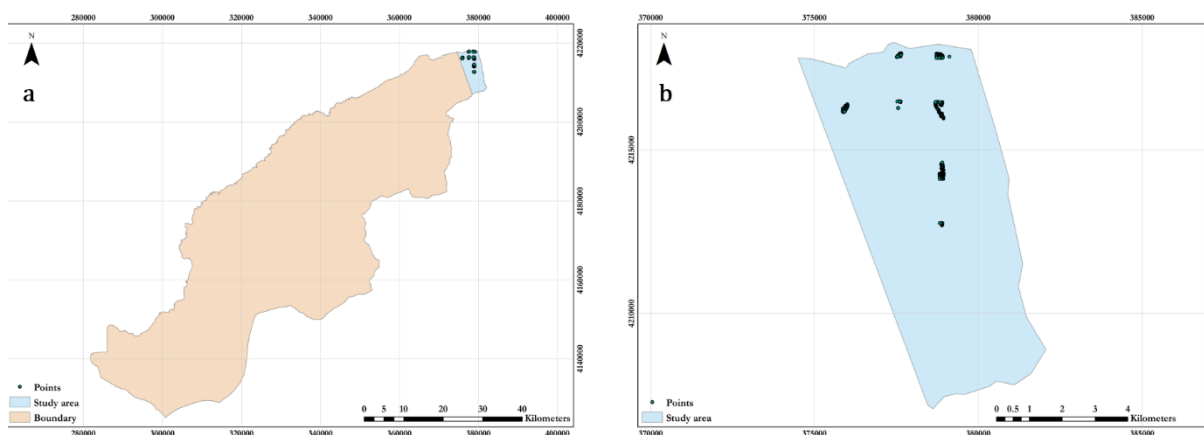
محسوب می‌شود (Klein *et al.*, 2022a). از آنجا که این ملخ برای تولید پوره، به خاک شنی مرطوب متکی است، الگوهای منطقه‌ای بارش یکی از عوامل مؤثر بر نوسانات جمعیت آن به‌شمار می‌روند. افزایش دما ممکن است مدت زمان چرخه زیستی پوره‌ها را کوتاه‌تر کند، اما نرخ زادآوری جمعیت تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد، زیرا ملخ مراکشی گونه‌ای تک نسلی (univoltine) است. به این ترتیب، عوامل اقلیمی مانند بارش و دما بیشتر بر توزیع مکانی و زمان ظهور پوره‌ها و جمعیت بالغ مؤثرند تا بر تعداد نسل‌ها یا نرخ زادآوری (Khairov *et al.*, 2024). در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در مقیاس جهانی در زمینه مدل‌سازی زیستگاه و پیش‌بینی طغیان ملخ‌ها برای گونه‌هایی مانند ملخ صحرائی و ایتالیایی انجام شده است؛ در عین حال، مدل‌سازی زیستگاه ملخ مراکشی نیز در برخی پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Klein *et al.*, 2022b; Klein *et al.*, 2021). در مطالعات انجام شده به منظور مدل‌سازی زیستگاه ملخ‌ها از روش‌های رگرسیون و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است. پارامترهای تغییرناپذیر (مانند ارتفاع، نوع خاک و...) و پارامترهای متغیر (مانند رطوبت خاک، درجه حرارت، بارندگی، پوشش گیاهی و...) از مهمترین ورودی مدل‌های شبیه‌ساز محسوب می‌شوند (Yao *et al.*, 2021). شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به‌عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارهای یادگیری ماشینی، با الهام از ساختار و عملکرد سیستم عصبی زیستی طراحی شده‌اند. این شبکه‌ها قادر به شناسایی الگوهای پیچیده و غیرخطی در داده‌ها هستند و به‌طور گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف علمی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه سنجش از دور به‌عنوان ابزاری موثر برای تشخیص، پیش‌بینی و مدیریت حشرات آفت و بیماری‌های گیاهی در محصولات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و با پیشرفت روش‌های تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، دقت و کارایی مدل‌های پیش‌بینی آفات افزایش یافته است (Fuentes & Chang, 2022). سنجش از دور به‌طور فزاینده‌ای در مناطق در معرض خطر طغیان ملخ‌ها، برای برآورد زمان و محل مطلوب وقایع اقلیمی (مانند بارش و رواناب) که به‌طور معمول قبل از ایجاد جمعیت انفرادی و متعاقباً تشکیل اجتماعات ملخ به وقوع می‌پیوندد، استفاده شده است. سنجش از دور امکان پایش پیوسته سامانه‌های بارشی و شاخص‌های محیطی نظیر تغییرات پوشش گیاهی را فراهم می‌کند؛ متغیرهایی که در پایش، پیش‌بینی طغیان و ارزیابی پویایی زیستگاه ملخ‌ها نقش تعیین‌کننده دارند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تیم مدیریت جمعیت ملخ می‌تواند مکان‌های خاص با ریسک بالای اجتماعات ملخ را هدف قرار دهد (Rhodes & Sagan, 2022; Klein *et al.*, 2022b; Latchinsky, 2013; Peng *et al.*, 2020). با توجه به وسعت منطقه، دسترسی محدود، خاک‌های باتلاقی و ناپایدار و دمای بالا، استفاده از تکنیک سنجش از دور برای مطالعه و مدل‌سازی زیستگاه ملخ مراکشی در شهرستان گنبدکاووس ضروری است. شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی منطقه، همراه با تغییرات اخیر زیست محیطی، باعث افزایش اهمیت این شهرستان به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی گونه مذکور در کشور شده است. خشک شدن تالاب‌های بین‌المللی آماگل، آجی‌گل و آلاگل تا اسفند ۱۴۰۲ نیز به تشدید خشک‌سالی و ریزگردها منجر شده و می‌تواند خسارات آفت بر محصولات کشاورزی را افزایش دهد (Mansouri Razi, 2024). هدف این مطالعه ارائه داده‌های کاربردی درباره زیستگاه ملخ مراکشی است تا مدیران و سیاست‌گذاران زیست محیطی بتوانند تصمیم‌گیری به موقع و هدفمند داشته باشند؛ مصرف گسترده آفت‌کش‌های شیمیایی در کنترل این آفت می‌تواند باعث آلودگی خاک و آب و اختلال در تنوع زیستی منطقه شود، در حالی که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و سنجش از دور امکان شناسایی دقیق مناطق با ریسک بالا و اجرای کنترل هدفمندتر را فراهم می‌کند و بدین ترتیب ضمن کاهش تهدید آفت، اثرات منفی محیط زیستی نیز به حداقل می‌رسد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه، شهرستان گنبدکاووس با مختصات $37^{\circ}17'$ عرض جغرافیایی و $55^{\circ}18'$ طول جغرافیایی در قسمت شمالی و مرکزی استان گلستان واقع شده است (شکل ۱). کانون اصلی ملخ مراکشی شهرستان، در سال مورد استفاده در

تحقیق حاضر (۱۴۰۲) در محدوده $38^{\circ}03'$ تا $38^{\circ}06'$ عرض جغرافیایی و $55^{\circ}34'$ تا $55^{\circ}37'$ طول جغرافیایی واقع شده است. این شهرستان از شمال با کشور ترکمنستان، از جنوب با شهرستان‌های آزادشهر و رامیان، از شرق با شهرستان‌های مراوه تپه، کلاله و مینودشت و از غرب با شهرستان آق قلا محدود می‌شود. وسعت شهرستان ۳۲/۵۱ کیلومتر مربع و ۲۴/۸۱ درصد از مساحت استان می‌باشد. از نظر آب و هوایی جز اقلیم مدیترانه‌ای به حساب آمده که دارای فصل تابستان نسبتاً گرم و خشک بوده طوریکه ۱۵۰ تا ۲۰۰ روز از سال خشک می‌باشد. به دلیل کاهش ارتفاعات رشته کوه‌های البرز شرقی در این منطقه و دور شدن از دریا میزان بارندگی آن بین ۲۰۰-۴۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. پلی‌گون مورد مطالعه، واقع در نوار مرزی شمال شهرستان و شامل مناطقی با کاهش بارندگی، با استفاده از تصاویر سنجنش از دور جانمایی شده و جزئیات آن در تصویر ارائه شده است (شکل ۱). در این مطالعه، از مجموع ۱۵۱ داده، که شامل ۱۰۶ داده (معادل ۷۰٪ داده‌ها) برای آموزش و ۴۵ داده (معادل ۳۰٪ داده‌ها) برای تست مدل شبیه‌ساز توسعه‌یافته، استفاده شد.



شکل ۲. حوضه آبریز مورد مطالعه در شهرستان گنبد (شکل a) و پلی‌گون منتخب جهت نمونه برداری و نقاط کاندید برای اندازه‌گیری تعداد ملخ (شکل b).

تشخیص نمونه‌های جمع‌آوری شده

از آنجایی که، تشخیص نادرست هنگام کادراندازی و شمارش بالغین یا پوره‌های سن آخر ملخ‌هایی که مشکوک به ملخ مراکشی هستند، در برخی از کانون‌ها موجب گزارش‌های اشتباه از سوی کارشناسان و دیده بانان، اتلاف نیرو و اعتبارات در عملیات کانون کوبی و دخالت وسیع و خطرناک شیمیایی در تنوع زیستی مزارع و مراتع می‌شود. چرا که چندین گونه از ملخ‌های شاخک‌کوتاه دارای الگوی مشابهی روی پیش‌گرده هستند و اتکا به یک ویژگی منفرد می‌تواند منجر به خطا شود. بنابراین در این مطالعه، تعیین گونه با دقت و بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های مورفولوژیک معتبر انجام شده است و تنها به وجود علامت X روی پیش‌گرده اکتفا نشده است. به همین دلیل، در این پژوهش برای اطمینان از تشخیص صحیح *D. amarocanus* مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی و افتراقی بررسی شده است. این ویژگی‌ها شامل موارد زیر بوده‌اند: ساختار و نسبت‌های پیش‌گرده (pronotum) شامل شکل دقیق شیارهای طولی و عرضی و زاویه لبه‌های جانبی، ویژگی‌های ران و ساق به‌ویژه الگوی خارها و رنگ‌بندی بخش‌های انتهایی، ساختار و طول شاخک‌ها نسبت به طول سر و پیش‌گرده و الگوی رنگی عمومی بدن در مرحله بالغ و پوره سن آخر. همچنین برای افزایش اطمینان، تشخیص گونه توسط کارشناسان با تجربه در شناسایی ملخ‌های Acrididae مورد تایید قرار گرفت و نمونه‌های مشکوک با کلیدهای معتبر شناسایی (منابع کلاسیک و به‌روز) تطبیق داده شدند. همچنین، در مواردی که احتمال اشتباه وجود داشت، نمونه‌ها مجدداً بررسی شدند تا از هرگونه خطای ناشی از شباهت ظاهری جلوگیری شود.

داده‌های مورد استفاده

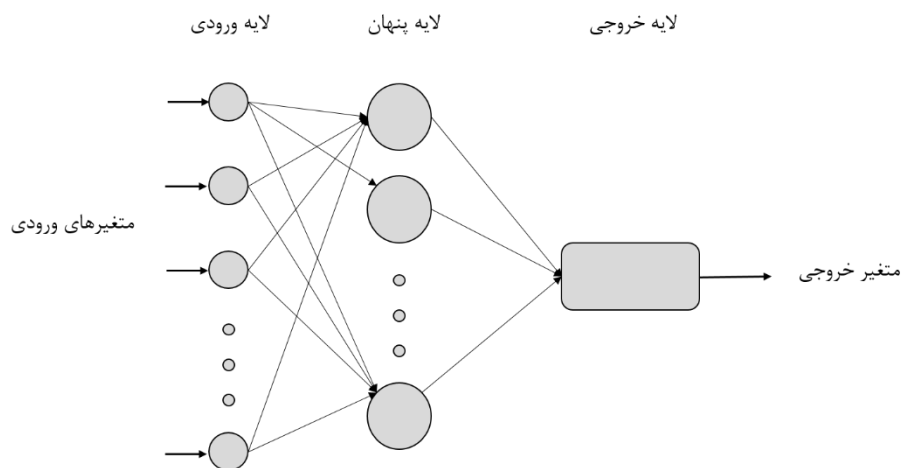
در تحقیق حاضر داده‌های هواشناسی شامل دمای روزانه هوا (T)، میزان بارندگی (P) و رطوبت نسبی (RH) از ایستگاه هواشناسی اینچه برون اخذ شد (جدول ۱). داده‌های میدانی به منظور برآورد رطوبت حجمی خاک و تعیین تراکم ملخ‌ها از طریق نمونه برداری زمینی انجام گرفت. بدین منظور، در هر نوبت نمونه برداری، نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتری سطح خاک برداشت و همزمان شمارش ملخ‌ها در واحدهای نمونه برداری با سطح ثابت انجام شد. این فرآیند در هر مرحله در سه تکرار مستقل صورت گرفت تا ناهمگنی مکانی پوشش داده شود. در نهایت، تراکم ملخ‌ها به صورت میانگین تعداد در واحد سطح محاسبه و گزارش گردید. به منظور افزایش همخوانی داده‌های زمینی با تصاویر ماهواره‌ای، عملیات نمونه برداری میدانی در حدود بازه زمانی ساعت ۱۰ تا ۱۱ صبح انجام شد (شکل ۲). نمونه برداری حشرات با استفاده از تور حشره‌گیری در ۱۵۱ نقطه کانونی توزیع جمعیت آفت (ملخ مراکشی) در تاریخ‌های ۱۴۰۲/۳/۴ و ۱۴۰۲/۴/۵ و مطابق با استانداردهای بین‌المللی نمونه-برداری انجام شد (Symmons & Cressman, 2001). در تحقیق حاضر از شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 در تاریخ‌های مذکور به منظور بهبود فرآیند مدل‌سازی و امکان پایش زمانی مناسب و مکانی در سطح وسیع استفاده شد. شاخص‌های مذکور شامل دمای سطح زمین (land surface temperature, LST)، شاخص پوشش گیاهی (optimized) و (soil adjusted vegetation index, OSAVI)، شاخص وضعیت دمایی (temperature condition index, TCI) و شاخص خاک لخت (bare soil index, BSI) بودند که از روی تصاویر ماهواره‌ای استخراج شدند. بدین منظور پس از اخذ تصاویر و اعمال پیش پردازش‌های اولیه (شامل زمین‌بنا نمودن تصاویر، تصحیحات اتمسفری و رادیومتریک، بهم چسباندن لایه‌های مورد نیاز و برش منطقه مورد مطالعاتی از کل تصویر)، شاخص‌های مذکور در محیط نرم افزار ENVI 5.3 محاسبه شدند.

جدول ۱. دامنه تغییرات پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در تحقیق حاضر در ایستگاه هواشناسی اینچه برون در بازه زمانی مورد مطالعه

پارامترهای هواشناسی	دامنه تغییرات پارامتر		
	بارندگی (میلیمتر)	درجه حرارت (سانتیگراد)	رطوبت نسبی (درصد)
	۰۰/۸ - ۳۳/۶	۲۹/۵ - ۳۰/۱	۵۱ - ۵۳

ساختار مدل شبیه ساز

در پژوهش حاضر و به منظور برآورد جمعیت ملخ مراکشی در مقیاس پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای از مدل شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون چند لایه (multi-layer perceptron, MLP) استفاده شد. این ساختار متشکل از ۳ بخش شامل لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی است (شکل ۳). هر لایه شامل تعدادی نورون (واحد پردازشی) است که از طریق اتصالات وزن‌دار (سیناپس‌ها) به یکدیگر متصل می‌شوند. داده‌ها از لایه ورودی دریافت و پس از پردازش در لایه‌های پنهان، نتایج در لایه خروجی ارائه می‌شوند (Singh & Banerjee, 2019; Kruse et al., 2022). لایه ورودی شامل اطلاعات حاصل از برداشت‌های زمینی (رطوبت خاک)، داده‌های اقلیمی (اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی) و داده‌های حاصل از شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای بود. به منظور آموزش شبکه عصبی نیز از الگوریتم پس‌انتشار لونبرگ-مارکوآرت (Levenberg-Marquardt Backpropagation) استفاده شد.



شکل ۳. ساختار شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون چند لایه مورد استفاده در تحقیق حاضر

معیارهای ارزیابی

در این پژوهش، برای ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌ساز توسعه‌یافته، از دو شاخص آماری ضریب تعیین (R^2) و شاخص نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE) استفاده شد که به ترتیب از روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه‌اند. این شاخص‌ها به عنوان معیارهای دقیق و استاندارد در ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی کننده، توانایی مدل در تطابق با داده‌های واقعی را نشان می‌دهند.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)(Y_p - \bar{Y}_p))^2}{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Y_p - \bar{Y}_p)^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)^2} \quad (2)$$

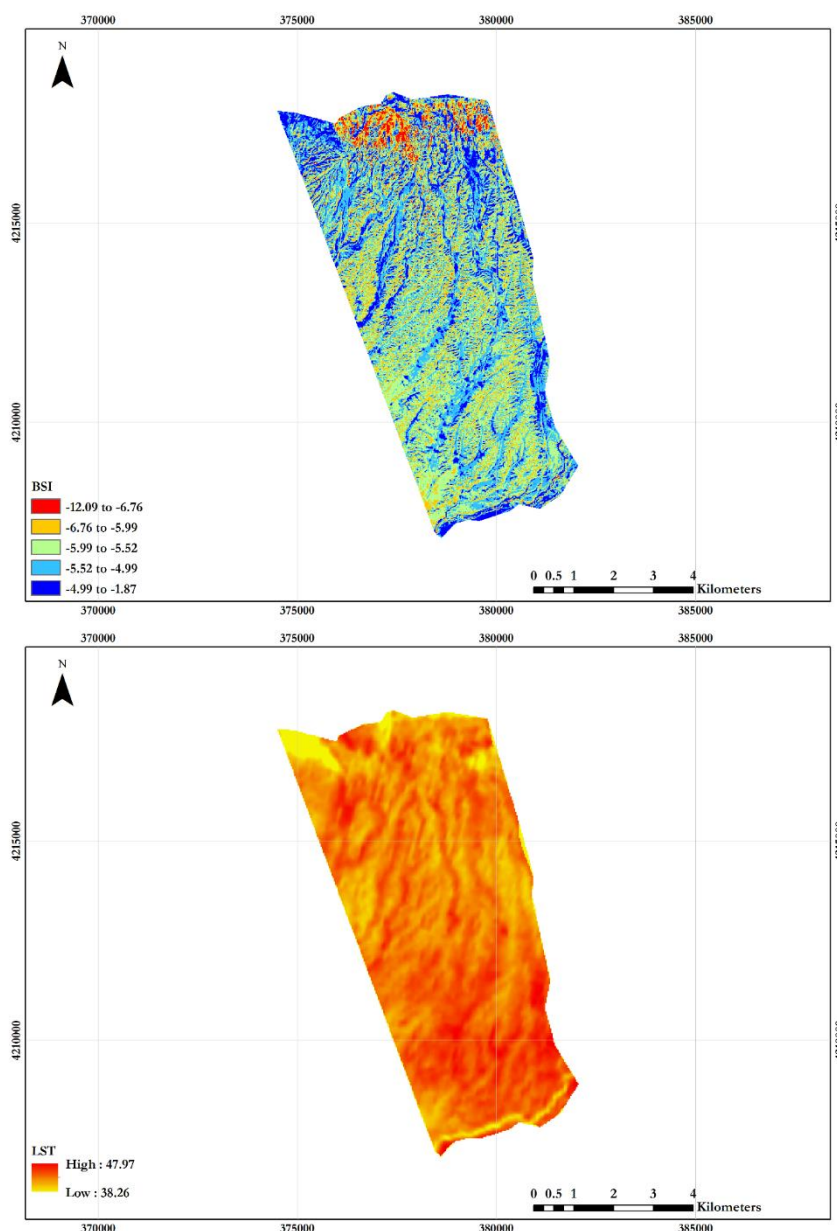
در این روابط Y_m و Y_p به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده و \bar{Y}_m و \bar{Y}_p به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده و n تعداد نمونه‌ها می‌باشند. ضریب تعیین (R^2) میزان تطابق بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد در حالیکه شاخص نش-ساتکلیف (NSE) به عنوان معیاری برای سنجش دقت پیش‌بینی‌ها، کارایی مدل را در بازتولید روند داده‌های مشاهده‌ای ارزیابی می‌کند. هر دو معیار در بازه صفر (کمترین همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده یا ضعیف‌ترین پیش‌بینی) تا یک (بیشترین همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده یا بهترین پیش‌بینی) متغیر هستند.

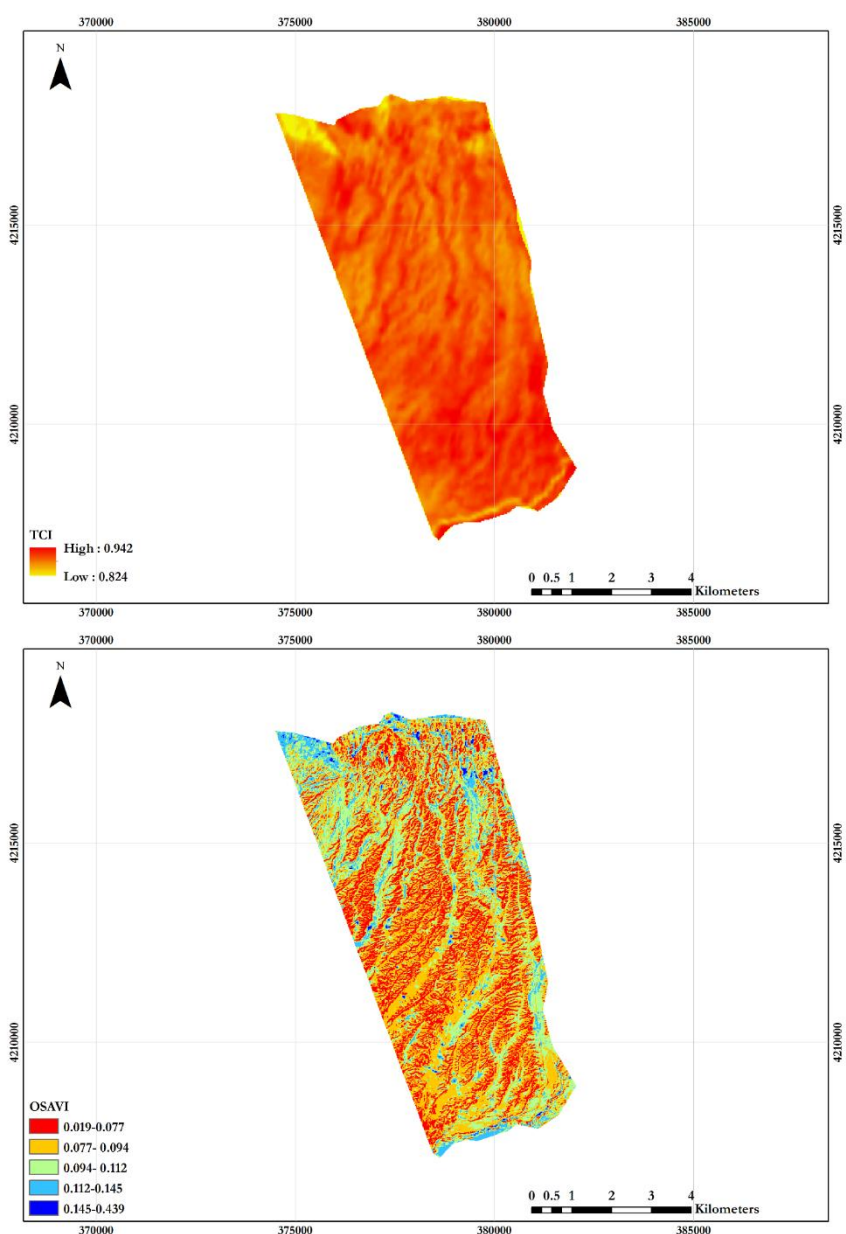
نتایج

در تحقیق حاضر تلاش شد تا علاوه بر پارامترهای هواشناسی، از شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای که انتظار می‌رود بر روی توزیع مکانی ملخ مراکشی موثر باشند استفاده گردد. با توجه به سطح تحت پوشش تصاویر ماهواره‌ای، این ویژگی، قابلیت بررسی روند تغییرات جمعیت ملخ مراکشی در سطوح وسیع را برای متخصصین علم حشره‌شناسی فراهم می‌آورد. همچنین با توجه به دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق حاضر برای هر بازه زمانی، متخصصین قادر خواهند بود تا فرآیند پایش جمعیت ملخ مراکشی برای دوره‌های آتی را نیز بخوبی انجام دهند. ذکر این نکته ضروری است که آگاهی از روند تغییرات جمعیت ملخ مراکشی که از مهمترین آفت‌های محصولات کشاورزی در منطقه مورد مطالعه بشمار می‌رود، می‌تواند نقش بسیار مهم و بسزایی در مدیریت جمعیت آفت و اتخاذ تصمیمات مهم و به موقع مدیریتی در راستای جلوگیری از شیوع آن داشته باشد. همچنین آگاهی از برآورد دقیق مقادیر آفت‌کش‌های مورد استفاده بنحوی که هم کنترل کننده جمعیت مذکور بوده و هم از نظر اقتصادی بهینه باشد، از دیگر مزایای غیرمستقیم استفاده از شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای بمنظور شبیه‌سازی جمعیت ملخ مراکشی می‌باشد.

شاخص های مستخرج از تصاویر ماهواره ای

بمنظور بهبود شرایط پایش جمعیت ملخ مراکشی، چه از بعد مکان (پراکنش مکانی مناسب تصاویر ماهواره ای در سطوح وسیع) و چه بعد زمان (در اختیار بودن تصاویر در بازه های زمانی مختلف)، از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ استفاده شد. به این منظور و با بررسی مطالعات، شاخص هایی که احتمال می رفت بر روی جمعیت این آفت اثر گذار باشند شناسایی شدند. شاخص های مذکور شامل ۴ شاخص BSI، LST، TCI و OSAVI بودند که در محیط نرم افزار ENVI 5.3 از روی تصاویر مورد استفاده استخراج شدند (شکل ۴). سپس مقادیر شاخص های مذکور در همان پیکسل هایی که جمعیت ملخ مراکشی در آنها قرائت شده بود، بعنوان ورودی مدل شبیه ساز انتخاب شدند.





شکل ۴. تصویر توزیع مکانی شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (BSI, LST, TCI, OSAVI) در محدوده مطالعاتی مورد استفاده در تحقیق حاضر

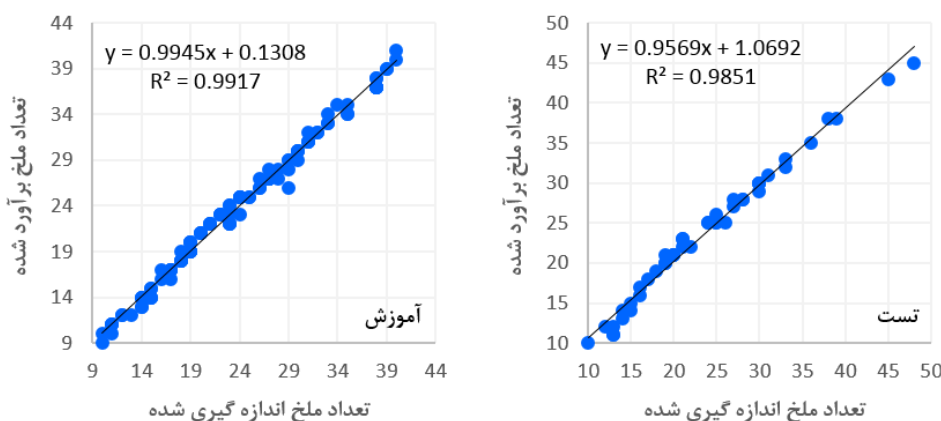
شاخص BSI به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در شناسایی مناطق خشک و فاقد پوشش گیاهی عمل کرد. محدوده مقادیر BSI از ۱.۸۷- تا ۱۲.۰۹- متغیر بود، به‌گونه‌ای که مقادیر بالاتر بیانگر خاک لخت‌تر و سطوح خشک‌تر بودند (شکل ۴). ارتباط مثبت بین BSI و تراکم مراکشی نشان داد که این آفت تمایل بیشتری به زیستگاه‌های خشک و فاقد پوشش دارد. این الگو با نتایج حاصل از تحقیقات مشابه (Cressman, 2013; Klein et al. 2022a) مبنی بر ارجحیت ملخ مراکشی برای تخم‌گذاری در زمین‌های فاقد پوشش گیاهی (پوشش اندک) و خاک‌های سخت و کوبیده شده، مطابقت دارد.

شاخص LST در محدوده مورد مطالعه در بازه ۳۸/۲۶ تا ۴۷/۹۷ درجه سانتیگراد متغیر بود (شکل ۴) بنحوی که بیشترین تراکم جمعیتی ملخ‌ها در بازه ۴۰ تا ۴۵ درجه سانتیگراد مشاهده شد که نشانگر شرایط بهینه برای فعالیت‌های متابولیک و تخم‌گذاری است. این نتایج با مطالعات (Lu et al., 2022) و Wei et al. (2023) که دمای بالا را عامل تحریک رفتار

مهاجرتی و تجمعی ملخ‌ها دانسته‌اند، سازگاری دارد. شاخص حرارتی دیگری که در تحقیق حاضر از آن استفاده شد، شاخص TCI با دامنه تغییراتی ۰/۹۴۲-۰/۸۲۴ بود (شکل ۴). نواحی با TCI بالاتر از ۰/۹ کانون‌های فعال و پرخطر شناخته شدند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که وضعیت حرارتی پایدار، در ترکیب با رطوبت سطحی پایین، شرایط بهینه‌ای برای تکثیر فراهم می‌کند که با نتایج تحقیقات (Tang et al. (2023) درباره تاثیر دمای تجمعی بر رشد و بقاء ملخ‌ها مطابقت دارد. نکته مهم دیگری که در مزیت این شاخص نسبت به شاخص مشابه آن (LST) می‌توان بیان نمود، بی بعد بودن آن است که امکان استفاده از آن و بررسی تاثیرات مختلف مقادیر آن بر روی پراکنش جمعیت ملخ را راحت‌تر می‌کند. آخرین شاخص مورد استفاده شاخص OSAVI بود که بنحوی بیانگر تاثیر شرایط رطوبتی سطح خاک بر روی وضعیت پوشش گیاهی و به تبع آن جمعیت ملخ مراکشی بود که مقادیر آن در بازه ۰/۳۳۹-۰/۱۹ متغیر بود. نتایج تحلیل آماری نشان داد که کاهش مقادیر شاخص OSAVI با افزایش معنی‌دار تراکم ملخ‌ها همراه بود ($P < 0.01$). این یافته بیانگر تمایل آفت به نواحی با پوشش گیاهی پراکنده است، جایی که شدت نور و دمای سطح خاک بالاتر است. این الگو با مطالعات تحقیقات دیگران (Rhodes and Sagan, 2022; Zhang et al. 2023) در خصوص ترجیح زیستگاهی ملخ‌های صحرایی مطابقت دارد.

ارزیابی عملکرد مدل‌های شبیه ساز

مقادیر اندازه گیری شده (مطالعات میدانی) و مقادیر برآورد شده تعداد ملخ مراکشی در نقاط منتخب در تحقیق حاضر در مراحل آموزش و تست مدل شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس، مدل شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافته، عملکرد بسیار مناسبی در پیش بینی پراکنش ملخ‌ها نشان داده است بنحوی که مقدار ضریب NSE در مراحل آموزش و تست بترتیب معادل ۰/۹۹ و ۰/۹۸ بدست آمده است. این یافته نشان دهنده آن است که راهکار ارائه شده در تحقیق حاضر شامل انتخاب ورودی‌ها و ساختار استفاده شده در مدل شبیه ساز بخوبی توانسته است جهت شبیه سازی زیستگاه ملخ مراکشی در ابعاد پیکسل‌های تصاویر ماهواره ای مورد استفاده، بکار گرفته شود.



شکل ۵. مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده تعداد ملخ در نقاط اندازه گیری شده به کمک مدل شبکه عصبی MLP در مراحل آموزش و تست

بحث

نتایج دقیق مدل شبیه‌ساز در تحقیق حاضر را می‌توان از دو جنبه تحلیل نمود. جنبه اول به انتخاب متغیرهای مناسب ورودی مدل شبیه‌ساز بر می‌گردد. در تحقیق حاضر ترکیبی از داده‌های هواشناسی، مقادیر رطوبت خاک و شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای بعنوان ورودی‌های مدل شبیه‌ساز انتخاب شدند. این شاخص‌ها از آنجا که از پیکسل‌های مختلف تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده‌اند، بخوبی توانسته‌اند تغییرات مکانی جمعیت ملخ مراکشی را در مدل‌سازی لحاظ نمایند. به بیان دیگر بخشی از کارایی چهارچوب ارائه شده در تحقیق حاضر به تاثیرگذاری شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای باز می‌گردد که هم در شناسایی جمعیت ملخ مراکشی موثر اقدام کرده‌اند و هم در مقایسه با روش‌های سنتی پیمایش میدانی، امکان پیش

سریع، گسترده و مبتنی بر داده‌های مکانی-زمانی را فراهم آورده است. در همین راستا و بیان اهمیت انتخاب دقیق شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در مدل‌سازی جمعیت آفات، می‌توان نتایج سایر تحقیقات را نیز در تحلیل مد نظر قرار داد. بعنوان مثال (Cease *et al.* 2012) بر نقش متغیرهای اقلیمی و کیفیت تغذیه‌ای پوشش گیاهی در طغیان ملخ‌ها تأکید کرده‌اند؛ درحالی‌که افزودن شاخص‌های پوشش گیاهی، و خاک (OSAVI و BSI) در مدل حاضر، توان پیش‌بینی زیستگاه‌های پرخطر را بهبود بخشید. همچنین در تحقیقات دیگر، (Gao *et al.*, 2020; Fern *et al.*, 2018) گزارش کرده‌اند که شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در مناطق نیمه خشک به دلیل حساسیت به روشنایی و پس زمینه خاک، عملکرد ضعیف‌تری دارد، درحالی‌که جایگزینی OSAVI به جای NDVI در تحقیق حاضر، اثر پس زمینه خاک را کاهش داده و دقت مدل را در زیستگاه‌های خشک و نیمه خشک ارتقاء داده است. علاوه بر موارد فوق، کاهش هزینه‌های ناشی از داده برداری‌های میدانی را نیز بعنوان مزیت دیگری برای راهکار ارائه شده در تحقیق حاضر باید در نظر گرفت که در سایر تحقیقات نیز به آن اشاره شده است (Piou *et al.* 2019; Marescot *et al.* 2024). بر اساس نتایج بدست آمده، ترکیب شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای (BSI, LST, TCI, OSAVI) در اولویت‌بندی مناطق بحرانی دقت و کارایی بالاتری نسبت به استفاده از هر شاخص منفرد داشته است. به‌ویژه شاخص TCI که تغییرات حرارتی فصل‌های مختلف را نشان می‌دهد، در تفکیک مناطق با شرایط دمایی متمایز و ارزیابی تنش‌های دمایی مؤثر بوده است (Bento *et al.*, 2018). به‌ویژه در خصوص شاخص TCI که با تبیین تغییرات حرارتی فصلی، نقش مهمی در شناسایی مناطق دارای شرایط دمایی پایدار و مناسب برای تخم‌گذاری ایفا کرده است. این یافته‌ها نشان داد که ادغام شاخص‌های پوشش گیاهی، خاک و دما می‌تواند مبنایی برای توسعه سامانه‌های هشدار زودهنگام و پیش‌بینی فصلی جمعیت ملخ‌ها فراهم آورد. بنابراین بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های ترکیبی، گامی مؤثر در مدیریت هوشمند زیستگاه‌های آفت در مناطق خشک و نیمه خشک ایران است که بایستی توسط متخصصین علم حشره‌شناسی به مدیران تصمیم‌ساز در این زمینه یادآوری گردد.

جنبه دوم به انتخاب نوع مدل ماشین‌لرنینگ مورد استفاده در تحقیق حاضر (MLP) باز می‌گردد که ساختار انتخاب شده در آن و نوع بهینه‌سازی وزن‌ها در لایه مخفی بنحوی بوده که توانسته ارتباط مناسبی میان متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نماید. به بیان دیگر، مدل توسعه یافته توانسته روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی و بیوفیزیکی را بازسازی کرده و مناطق مستعد طغیان را با دقت بالا شناسایی کند. ماهیت داده محور مدل پیشنهادی، امکان پیش‌بینی تغییرات زیستگاه تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در آینده را نیز فراهم می‌آورد (Piou & Marescot, 2023).

نوآوری تحقیق حاضر را می‌توان در استفاده از شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در قالب یک مدل ماشین‌لرنینگ (شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، MLP) دانست. این ویژگی امکان این را به متخصصین علم حشره‌شناسی می‌دهد تا بتوانند جمعیت آفت مورد نظر را در سطوح وسیع و در بازه‌های زمانی مختلف کنترل نموده و در اجرای سیاست‌های کنترل آفت تصمیمات صحیح مدیریتی را اتخاذ نمایند. از مهمترین نمونه این تصمیمات می‌توان به برآورد مناسب مقدار آفت کش و زمان اجرای این عملیات مدیریتی اشاره نمود.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که شاخص‌های بیوفیزیکی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند ابزاری ساده، کم‌هزینه و در عین حال کارآمد برای پایش زیستگاه ملخ مراکشی باشند و برنامه‌های کنترل را از شیوه‌های واکنشی به سمت مدیریت پیشگیرانه هدایت کنند. در رویکرد پیشگیرانه، تیم‌های کنترل به‌جای انتظار برای شکل‌گیری جمعیت‌ها، به شناسایی و مهار تجمعات اولیه در مقیاس کوچک می‌پردازند. با این حال، شناسایی این مناطق از طریق پایش میدانی دشوار و زمان‌بر است؛ زیرا اغلب در نواحی وسیع، کم‌جمعیت، فاقد جاده و با منابع آبی محدود قرار دارند. در چنین شرایطی، ترکیب داده‌های زمینی و سنجش‌ازدور تحول اساسی در پایش و پیش‌بینی زیستگاه‌های مناسب برای رشد و تکثیر ملخ ایجاد می‌کند. تصاویر

ماهواره‌ای علاوه بر نمایش تغییرات پوشش گیاهی، امکان برآورد رطوبت خاک را نیز فراهم می‌کند؛ عاملی که یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای پیش‌بینی محل‌های تخم‌ریزی و رشد ملخ مراکشی به شمار می‌رود. نتایج این پژوهش نشان داد که عوامل محیطی، به‌ویژه وضعیت پوشش گیاهی و رطوبت خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در چرخه زندگی و پایداری جمعیت ملخ مراکشی دارند. شاخص‌های سنجش از دور و داده‌های اقلیمی توانستند با دقت بالا مناطق مستعد زیست و تکثیر آفت را شناسایی کنند. شرایط محیطی مناسب می‌تواند رشد جمعیت را تسریع کند، درحالی‌که مهاجرت‌های کوتاه برد، بین مناطق مجاور، بقای آفت در مقیاس منطقه‌ای را تسهیل می‌کند. این یافته‌ها بر ضرورت ادغام شاخص‌های زیست محیطی در مدل‌سازی زیستگاه تأکید داشته و می‌توانند به‌عنوان ابزار عملی در پایش، پیش‌بینی طغیان‌ها و برنامه‌ریزی مدیریت پایدار مورد استفاده قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، نقش متغیرهای خرد اقلیمی و الگوهای تغییر اقلیم نیز لحاظ گردد تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد. علاوه بر این، مدل‌های یادگیری ماشین نظیر شبکه عصبی مصنوعی می‌توانند جایگزین روش‌های پرهزینه شده و به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری مؤثر برای سازمان حفظ نباتات و مدیریت منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به ترسیم مسیر تازه‌ای برای مدیریت هوشمند و پیش‌نگر ملخ‌مراکشی در استان گلستان و مناطق با شرایط علمی مشابه کمک کند. این چارچوب، با تکیه بر سنجش از دور و مدل‌های ماشین لرنینگ، می‌تواند مبنایی علمی برای طراحی سامانه‌های هشدار زود هنگام و بهینه‌سازی برنامه‌های پایش و کنترل فراهم آورد و بدین ترتیب خسارت‌های اقتصادی و زیست محیطی ناشی از طغیان آفت را به‌طور مؤثری کاهش دهد.

REFERENCES

- Agris, F. (2023). Biological and phenological characteristics of the Moroccan locust (*Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815)) in the southern zones of Azerbaijan. *Bulletin of Science and Practice*, 35. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/95/04>
- Bento, V. A., Trigo, I. F., Gouveia, C. M., & DaCamara, C. C. (2018). Contribution of Land Surface Temperature (TCL) to Vegetation Health Index: A Comparative Study Using Clear Sky and All-Weather Climate Data Records. *Remote Sensing*, 10(9), 1324. <https://doi.org/10.3390/rs10091324>
- Cease, A. J., Elser, J. J., Ford, C. F., Hao, S., Kang, L., & Harrison, J. F. (2012). Heavy livestock grazing promotes locust outbreaks by lowering plant nitrogen content. *Science*, 335(6067), 467-469.
DOI:[10.1126/science.1214433](https://doi.org/10.1126/science.1214433)
- Cressman, K. (2013). Role of remote sensing in desert locust early warning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 075098. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.7.075098>
- Fern, R. R., Foxley, E. A., Bruno, A., & Morrison, M. L. (2018). Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland. *Ecological Indicators*, 94, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.029>
- Fuentes, S., & Chang, J. (2022). Methodologies used in remote sensing data analysis and remote sensors for precision agriculture. *Sensors*, 22(20), 7898. <https://doi.org/10.3390/s22207898>
- Gao, L., Wang, X., Johnson, B. A., Tian, Q., Wang, Y., Verrelst, J., Mu, X., & Gu, X. (2020). Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing : official publication of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 159, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018>
- Gómez, D., Salvador, P., Sanz, J., & Casanova, J. L. (2020). Modelling desert locust presences using 32-year soil moisture data on a large-scale. *Ecological Indicators*, 117, 106655. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106655>
- González-Serna, M. J., Cordero, P. J., & Ortego, J. (2020). Insights into the neutral and adaptive processes shaping the spatial distribution of genomic variation in the economically important Moroccan locust (*Dociostaurus maroccanus*). *Ecology and Evolution*, 10(9), 3991–4008. <https://doi.org/10.1002/ece3.6167>
- Singh, J., & Banerjee, R. (2019). A Study on Single and Multi-layer Perceptron Neural Network,” in 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India: IEEE, Mar. pp. 35–40. <https://doi.org/10.1109/ICCMC.2019.8819775>.
- Symmons, P. M., & Cressman, K. (2001). Desert locust guidelines : biology and behavior (2nd ed.). *FAO, Rome*, 42.
- Kasalo, N., Tvrtković, N., Bogić, D., Kokan, B., Vuković, M., Kučinić, M., & Skejo, J. (2024). An Overview of Orthoptera Mass Occurrences in Croatia from 1900 to 2023. *Insects*, 15(2), 82. <https://doi.org/10.3390/insects15020082>
- Kruse, R., Mostaghim, S., Borgelt, C., Braune, C., & Steinbrecher, M. (2022). Multi-layer Perceptrons. In: *Computational Intelligence. Texts in Computer Science*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42227-1_5.
- Klein, I., Oppelt, N., & Kuenzer, C. (2021). Application of remote sensing data for locust research and management—A review. *Insects*, 12(3), 233. <https://doi.org/10.3390/insects12030233>
- Klein, I., Cocco, A., Uereyen, S., Mannu, R., Floris, I., Oppelt, N., & Kuenzer, C. (2022a). Outbreak of Moroccan locust in Sardinia (Italy): A remote sensing perspective. *Remote Sensing*, 14(23), 6050. <https://doi.org/10.3390/rs14236050>
- Klein, I., van der Woude, S., Schwarzenbacher, F., Muratova, N., Slagter, B., Malakhov, D. & Kuenzer, C. (2022b). Predicting suitable breeding areas for different locust species—A multi-scale approach accounting for environmental conditions and current land cover situation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107,

102672. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102672>
- Klein, I., Ureyen, S., Eisfelder, C., Pankov, V., Oppelt, N., & Kuenzer, C. (2023). Application of geospatial and remote sensing data to support locust management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103–212. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103212>
- Khairov, K. S., Lazutkaite, E., & Latchininsky, A. V. (2024). Distribution, population dynamics, and management of Moroccan locust *Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815) (Orthoptera, Acrididae) in Tajikistan. *Insects*, 15 (9), 684. <https://doi.org/10.3390/insects15090684>
- Latchininsky, A. V. (1998). Moroccan locust *Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815): A faunistic rarity or an important economic pest? *Journal of Insect Conservation*, 2, 167–178. <https://doi.org/10.1023/A:1009639628627>
- Latchininsky, A. V. (2013). Locusts and remote sensing: A review. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 075099. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.7.075099>
- Lu, L., Kong, W., Qimuge, E., Ye, H., Sun, Z., Wang, N., Du, B., Zhou, Y., Huan, W., & Weijun. (2022). Detecting key factors of grasshopper occurrence in typical steppe and meadow steppe by integrating machine learning model and remote sensing data. *Insects*, 13(10), 894. <https://doi.org/10.3390/insects13100894>
- Mansouri Razi, D. (2024). Moroccan Locust habitat modeling using biophysical indices derived from satellite imagines (Case study: Gonbad Kavos). Master's thesis. Shahrood University of Technology. Shahrood, Iran.
- Marescot, L., Fernandez, E., Dridi, H., Benahi, A. S., Hamouny, M. L., Ould Maeno, K. O., Escorihuela, M. J., Paolini, G., & Piou, C. (2024). A forecasting model for desert locust presence using real-time satellite imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37, 1–13. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4944726>
- Pener, M. P., & Simpson, S. J. (2009). Locust phase polyphenism: an update. *Advances in insect physiology*, 36, 1-272. [https://doi.org/10.1016/S0065-2806\(08\)36001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2806(08)36001-9)
- Piou, C., Gay, P. E., Benahi, A. S., Babah Ebbe, M. A. O., Chihrane, J., Ghaout, S., Cisse, S., Diakite, F., Lazar, M., Cressman, K., Merlin, O., & Escorihuela, M. J. (2019). Soil moisture from remote sensing to forecast desert locust presence. *Journal of Applied Ecology*, 56(4), 966–975. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13323>
- Piou, C., & Marescot, L. (2023). Spatiotemporal risk forecasting to improve locust management. *Current Opinion in Insect Science*, 56, 101024. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2023.101024>
- Peng, W., Ma, N. L., Zhang, D., Zhou, Q., Yue, X., Khoo, S. C., Yang, H., Guan, R., Chen, H., Zhang, X., Wang, Y., Wei, Z., Suo, C., Peng, Y., Yang, Y., Lam, S. S., & Sonne, C. (2020). A review of historical and recent locust outbreaks: Links to global warming, food security and mitigation strategies. *Environmental Research*, 191, 110046. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110046>
- Rhodes, K., & Sagan, V. (2022). Integrating remote sensing and machine learning for regional-scale habitat mapping: Advances and future challenges for desert locust monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10(2), 289319. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2022.3159834>
- Royan M, Sepehry A, Barani H, Afshari A. Relationship between Moroccan Locust (*Dociostaurus maroccanus*) Population Densities and Rangeland Plant Properties in Qaraqar-Bozorg Rangelands of Golestan Province: A Case Study. *PEC* 2022; 10 (21) : 8 URL: <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-868-fa.html>
- Safarova, I. (2023). Biological and phenological characteristics of the Moroccan locust (*Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815)) in the southern zones of Azerbaijan. *Bulletin of Science and Practice*, 9(10), 35–40. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/95/04>
- Tang, Q., Feng, J., Zong, D., Zhou, J., Hu, X., Wang, B., & Wang, T. (2023). Potential spread of desert locust *Schistocerca gregaria* (Orthoptera: Acrididae) under climate change scenarios. *Diversity*, 15(10), 1038. <https://doi.org/10.3390/d15101038>

- Wei, S., Liu, X., McNeill, M. R., Wang, Y., Sun, W., Tu, X., ... & Zhang, R. (2023). Identification of spatial distribution and drivers for grasshopper populations based on geographic detectors. *Ecological Indicators*, 154, 110500. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110500>
- Yao, X., Lu, S., Gu, J., Zhang, L., Yang, J., Fan, C., & Li, L. (2021). A locust remote sensing monitoring system based on dynamic model library. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 106218. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106218>
- Zhang, X., Huang, W., Ye, H., & Lu, L. (2023). Study on the identification of habitat suitability areas for the dominant locust species *Dasyhippus barbipes* in Inner Mongolia. *Remote Sensing*, 15(21), 1718. <https://doi.org/10.3390/rs15211718>