



Sustainable Design of Urban Green Spaces for Noise Mitigation under a Climate Adaptation Framework

Ahmad Hossayni^{1*}, Zeynab Karimzadeh Motlagh²

^{1*} Assistant Professor, Department in Climatology, Payame Noor University, Iran

² Faculty Member, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 May 2025

Revised: 25 August 2025

Accepted: 26 August 2025

Available Online: 7 September 2025

Keywords:

Urban Green Spaces

Noise Pollution

Urban Sustainability

Climate Change

Drought-Resistant Species

Long Short-Term Memory (LSTM)

ABSTRACT

Global warming and its intensifying effects on arid urban regions highlight the necessity of integrated urban planning strategies. This study aims to forecast climate trends, evaluate the role of vegetation in mitigating noise pollution, identify drought-resistant plant species, and propose sustainable strategies for green space management in Birjand city. Annual temperature changes were predicted up to 2035 using the Long Short-Term Memory (LSTM) deep learning model, which indicated a gradual increase in mean annual temperature, posing potential challenges to urban livability. Based on these projections, the influence of vegetation cover on noise pollution was analyzed using remote sensing data. A vegetation index map was generated and reclassified into five categories, revealing that 47% of the study area lacked vegetation, 28% had sparse cover, 17% moderate, 6% good, and only 2% dense cover. Comparative analysis demonstrated that areas with denser vegetation experienced significantly lower noise levels, while sparsely vegetated or barren zones were exposed to higher acoustic pollution. Furthermore, tree species with high drought tolerance and effective sound absorption, such as *Cupressus sempervirens* var. *pyramidalis*, *Robinia pseudoacacia*, and *Myrtus communis*, were identified as suitable candidates for planting in traffic corridors and noise-prone urban areas. These findings emphasize the crucial role of urban green spaces in simultaneously mitigating thermal and acoustic stresses. Overall, the study underscores the importance of sustainable urban design through optimal distribution and species selection of vegetation, offering a practical pathway to counteract the adverse effects of climate change while enhancing environmental quality and residents' quality of life.

* Corresponding author: Ahmad Hossayni

E-mail address: ahmad_hossayni@pnu.ac.ir

How to cite this article: Hossayni, A., & Karimzadeh Motlagh, Z. (2025). Sustainable Design of Urban Green Spaces for Noise Mitigation under a Climate Adaptation Framework. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 201-229. <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.93302.1570>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rapid urbanization has led to increased noise pollution, primarily from transportation, which negatively affects quality of life, mental health, and physical well-being. Urban vegetation, particularly trees, offers a natural solution to mitigate noise pollution and improve mental health by enhancing green spaces. However, in arid regions, it is crucial to select drought-resistant species to balance the benefits of noise reduction with potential challenges such as allergenic pollen. This study first predicts annual temperature trends using a deep-learning LSTM model, then examines the role of vegetation in reducing noise pollution in Birjand. By integrating environmental data and modeling approaches, the research aims to provide sustainable urban design strategies that address both urban heat and noise pollution. The findings offer recommendations for urban planners on where to expand vegetation and which plant species are most effective in mitigating noise in arid environments.

Study Area

The city of Birjand is located at approximately 32°52' north latitude and 59°13' east longitude, covering an area of about 31,700 square kilometers in South Khorasan Province, eastern Iran. With a population of around 266,700, Birjand lies in a region characterized by a dry to semi-arid climate. The city has an average annual temperature of approximately 17.5 °C and receives about 134 mm of precipitation per year.

Material and Methods

In this study, the Long Short-Term Memory (LSTM) deep learning model was employed to predict temperature trends in the study area. Annual temperature data from 2000 to 2024 were collected, normalized using the Min-Max method, and divided into training (70%), validation (15%), and testing (15%) sets. The LSTM model, a type of advanced recurrent neural network (RNN), effectively captured complex temporal patterns and long-term dependencies within the data. Its architecture, comprising memory cells and three key gates (forget, input, and output), enabled robust modeling of long-term climate trends and seasonal fluctuations. Following training, the model was used to forecast annual temperatures through 2035. The results demonstrated high predictive accuracy, as confirmed by low RMSE values, and showed a clear warming trend aligned with observed climate patterns. Additionally, spatial analysis of noise pollution was conducted using GIS and the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method. Field data on sound levels recorded at various times of day (morning, noon, and night) were used to generate detailed noise distribution maps for Birjand, providing insights into spatial variations in environmental noise exposure.

Results and Discussion

To predict temperature variations in the study area, a deep learning approach was adopted. Specifically, the Long Short-Term Memory (LSTM) neural network was employed to analyze the trend of mean temperature changes over the period 2021–2035. The results revealed a clear upward trend in average temperature, with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.84$), indicating an estimated annual increase of approximately 0.08°C. The LSTM model was chosen for its proven capability to capture complex temporal dependencies in time-series climate data. Model outputs confirmed the efficiency of LSTM in accurately forecasting temperature trends, closely reflecting inter-annual fluctuations and highlighting a consistent warming trajectory for the region. These findings suggest that the study area is likely to experience noticeable impacts of climate change in the coming years. Throughout the model training process, the Mean Squared Error (MSE) consistently decreased across both training and validation datasets. As the number of training epochs increased, the model's prediction accuracy improved steadily. The sustained reduction in training error, along with a relatively stable error trend in the validation set, indicates effective learning without significant overfitting. Although a slight divergence between training and validation errors was observed in the final stages of training, the difference remained minor, suggesting that the LSTM network successfully captured the underlying temporal patterns in the data. Overall, the results

highlight the robustness and high performance of the LSTM architecture in modeling climate-related time series and in providing reliable predictions of future temperature dynamics.

Spatial analyses indicated that commercial and industrial areas adjacent to busy roads exhibit the highest levels of noise pollution. In contrast, dense tree cover, particularly broad-leaved and coniferous species, significantly reduced unwanted noise levels. Due to their drought resistance and high efficiency in sound absorption, these species were identified as suitable options for planting along urban roads. Ultimately, the study emphasizes that selecting appropriate plant species and implementing smart green space design can simultaneously enhance urban livability, reduce noise pollution, and mitigate the impacts of global warming.

Conclusion

Urban green spaces, especially trees, play a vital role in mitigating noise pollution. This study highlights that proper green space design and the selection of suitable plant species around noisy areas such as streets and industrial sites can significantly reduce noise levels. Integrating green, low-noise land uses into urban development plans is essential for sustainable noise management. It is recommended that future studies leverage remote sensing and deep learning approaches to advance climate change monitoring and enhance urban planning strategies.



طراحی پایدار فضای سبز شهری برای کاهش آلودگی صوتی با رویکرد سازگاری اقلیمی

احمد حسینی^{۱*}، زینب کریمزاده مطلق^۲

^{۱*}استادیار گروه آب و هواشناسی، دانشگاه پیام نور ایران، ایران
^۲عضو هیئت علمی پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴	گرمایش جهانی و پیامدهای فزاینده آن در مناطق شهری خشک، ضرورت اتخاذ راهبردهای جامع در برنامه‌ریزی شهری را آشکار می‌سازد. هدف این پژوهش؛ پیش‌بینی روندهای اقلیمی، ارزیابی نقش پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی، شناسایی گونه‌های مقاوم به خشکی و ارائه راهکارهای پایدار برای بهره‌برداری از فضای سبز در شهر بیرجند است. تغییرات دمای سالانه تا سال ۲۰۳۵ با استفاده از مدل یادگیری عمیق حافظه طولانی-کوتاه‌مدت (LSTM) پیش‌بینی گردید که نتایج آن نشان‌دهنده افزایش تدریجی میانگین دمای سالانه و بروز چالش‌هایی در زیست‌پذیری شهری است. بر این اساس، تأثیر پوشش گیاهی بر آلودگی صوتی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور بررسی شد. نقشه شاخص پوشش گیاهی تهیه و در پنج طبقه باز طبقه‌بندی گردید که نتایج نشان داد ۴۷٪ از محدوده بدون پوشش گیاهی، ۲۸٪ دارای پوشش ضعیف، ۱۷٪ متوسط، ۶٪ خوب و تنها ۲٪ دارای پوشش متراکم است. مقایسه نقشه‌ها بیانگر آن بود که مناطق دارای پوشش متراکم به‌طور معناداری سطوح پایین‌تری از آلودگی صوتی را تجربه می‌کنند، در حالی که نواحی بدون یا با پوشش ضعیف بیشترین میزان نویز را دارند. همچنین گونه‌های مقاوم به خشکی و دارای توانایی جذب صدا نظیر سرو شیرازی (Cupressus sempervirens var. pyramidalis)، اقاقیا (Robinia pseudoacacia) و مورد (Myrtus communis) برای کاشت در معابر و مناطق پر تردد پیشنهاد شدند. یافته‌ها بر اهمیت فضای سبز در کاهش هم‌زمان تنش‌های حرارتی و صوتی تأکید دارد و لزوم طراحی پایدار شهری با توزیع بهینه پوشش گیاهی و انتخاب گونه‌های مناسب را برجسته می‌سازد. این رویکرد می‌تواند در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان نقش مؤثری ایفا کند.
کلمات کلیدی: فضای سبز شهری آلودگی صوتی پایداری شهری تغییر اقلیم گونه‌های مقاوم به خشکی مدل حافظه طولانی-کوتاه‌مدت (LSTM)	

مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های حمل‌ونقل، آلودگی صوتی را به یکی از چالش‌های مهم پایداری و سلامت شهری تبدیل کرده است. مواجهه مداوم با صداهای بلند، پیامدهایی چون استرس، اختلال خواب و بیماری‌های قلبی-عروقی به همراه دارد (Fallah-Shorshani, Yin, McConnell, Fruin & Franklin, 2022; Chen, He, Yu, Wei & Chen, 2024). در مناطق شهری، عواملی مانند تراکم جمعیت، نابرابری در دسترسی به خدمات و افت کیفیت محیط‌زیست، اهمیت شاخص‌هایی نظیر پوشش گیاهی و وجود فضاهای سبز را دوچندان می‌کند (Mahmoudzadeh, Abedini, Aram & Mosavi, 2024). پوشش گیاهی شهری، به‌عنوان یک راهکار طبیعی و پایدار، توانایی جذب، شکست و پراکندگی امواج صوتی را دارد و می‌تواند محیطی آرام‌تر در مناطق پر تردد ایجاد کند (Reyes-Avila & Baxter, 2024). افزون بر این، حضور فضاهای سبز تأثیر مثبتی بر سلامت روان شهروندان داشته و با کاهش استرس، افزایش حس امنیت و ارتقای فعالیت‌های بدنی، کیفیت زندگی را بهبود می‌بخشد (Yang, Kwan, Liu & Huang, 2025). فضاهای سبز از طریق ارتقاء زیبایی بصری، ایجاد حس امنیت و آرامش، نقش مؤثری در کاهش تأثیرات منفی آلودگی صوتی بر سلامت روان دارند. با این حال، کارایی فضای سبز در کاهش آلودگی صوتی به شدت وابسته به سازگاری گیاهان با شرایط اقلیمی آینده است (Helbich, Hagenauer, Burov & Dzhambov, 2025). پیش‌بینی الگوهای اقلیمی به‌دلیل پیچیدگی تعاملات داده‌های زمانی، مکانی و محیط‌زیستی چالش‌برانگیز است. تحلیل سری‌های زمانی در شناسایی روندهای بلندمدت و نوسانات کوتاه‌مدت متغیرهایی مانند دما، بارش و ترکیب جوی اهمیت زیادی دارد.

در این پژوهش، سه محور به‌صورت یکپارچه و وابسته به هم بررسی می‌شوند:

- ۱) پیش‌بینی تغییرات دمای سالانه شهر بیرجند به‌منظور ارزیابی پایداری اقلیمی گونه‌ها؛
- ۲) تحلیل نقش پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی در کاربری‌های پرتردد شهری؛
- ۳) انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و گرما که ضمن حفظ سلامت و زیبایی شهری، بیشترین کارایی را در کاهش صدا داشته باشند و کمترین اثرات منفی جانبی را ایجاد کنند.

این رویکرد، با ترکیب مدل‌سازی اقلیمی، ارزیابی زیست‌محیطی و تحلیل مکانی، چارچوبی علمی برای طراحی فضای سبز پایدار در اقلیم‌های خشک فراهم می‌آورد که می‌تواند هم‌زمان به کاهش دما، بهبود کیفیت صوتی و ارتقای زیست‌پذیری شهری کمک کند.

در این پژوهش ابتدا با به‌کارگیری مدل یادگیری عمیق LSTM، روند تغییرات دمای سالانه پیش‌بینی می‌شود و سپس تأثیر پوشش گیاهی به‌ویژه گونه‌های چندمنظوره گرمسیری مقاوم به خشکی بر کاهش آلودگی صوتی در مناطق خشک بررسی می‌گردد. فضاهای سبز شهری و درختان حاشیه‌راه‌ها با جذب و پراکندگی امواج صوتی به‌عنوان عایق طبیعی عمل می‌کنند، اما انتخاب گونه‌ها باید با توجه به سازگاری اقلیمی، توانایی کاهش صدا و کمترین اثرات جانبی (مانند گرده‌های آلرژی‌زا یا آسیب به زیرساخت‌ها) صورت پذیرد. ارائه رویکردی جامع و متعادل برای طراحی شهری پایدار ضروری است تا به طور هم‌زمان خدمات اکوسیستم (خنک‌سازی، تنوع زیستی، سلامت روان) بیشینه و مخاطرات بالقوه به حداقل برسند (Sharafatmandrad & Khosravi Mashizi, 2025). در حال حاضر آلودگی صوتی در مناطق شهری استان خراسان جنوبی عمدتاً ناشی از تردد وسایل نقلیه، فعالیت‌های صنفی و صنعتی پر صدا است. اگر چه برخی منابع مانند نیروگاه‌های دیزلی از مدار خارج شده‌اند، ولی این پدیده همچنان یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های زیست‌محیطی شهروندان به شمار می‌آید. پژوهش حاضر با رویکردی تحلیلی و چندرشته‌ای به دنبال ارائه راه‌کارهای علمی برای کاهش آلودگی صوتی، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی

و ارتقای زیست‌پذیری شهری است. این مطالعه، با تمرکز بر تحلیل مکانی داده‌های محیطی، نقش نوع و تراکم پوشش‌های گیاهی در کاهش شدت آلودگی صوتی در کاربری‌های مختلف شهر بیرجند را ارزیابی می‌کند. هدف نهایی تحقیق، طراحی شهری پایدار و توسعه فضای سبز هوشمند است که با تلفیق داده‌های اقلیمی، مدل‌سازی یادگیری ماشین و تحلیل زیست‌محیطی، ابزار تصمیم‌گیری مؤثری را برای برنامه‌ریزان و طراحان شهری فراهم آورد.

باتوجه به نقش مهم پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی شهری و تأثیر تغییرات اقلیمی بر کارایی آن، پژوهش حاضر تلاش می‌کند تا رابطه میان روند گرمایش، ویژگی‌های گونه‌های گیاهی و طراحی پایدار فضای سبز شهری را بررسی کند. در این چارچوب، اهمیت بررسی گونه‌های مقاوم به اقلیم خشک و نحوهٔ جانمایی، ارتفاع و تراکم پوشش گیاهی برای حفظ کارایی صوتی محیط شهری در بلندمدت مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، چارچوب مفهومی پژوهش بر سه فرضیه اصلی استوار است. نخست آن‌که روند افزایشی دمای سالانه در شهر بیرجند می‌تواند کارایی گونه‌های گیاهی را در کاهش آلودگی صوتی تحت تأثیر منفی قرار دهد. دوم آن‌که گونه‌های گیاهی مقاوم به اقلیم خشک در شرایط گرمایش آتی از پایداری بیشتری در عملکرد صوتی برخوردار خواهند بود. سوم آن‌که تراکم، ارتفاع و نوع جانمایی پوشش گیاهی قادر است اثر تغییرات اقلیمی بر کیفیت صوتی محیط شهری را تعدیل کند. در راستای این فرضیات، سؤالات کلیدی پژوهش نیز به شرح زیر مطرح می‌شوند: روند تغییرات دمای سالانه در شهر بیرجند طی سال‌های آینده چگونه پیش‌بینی می‌شود؟ کدام گونه‌های گیاهی در اقلیم خشک بیرجند از نظر سازگاری اقلیمی و عملکرد صوتی مناسب‌تر هستند؟ و در نهایت، چگونه می‌توان با اتکا به داده‌های پیش‌بینی اقلیم، الگویی برای طراحی پایدار فضای سبز شهری ارائه کرد که کارایی صوتی خود را در بلندمدت حفظ کند؟ اهداف اصلی این پژوهش عبارت‌اند از: بررسی نقش پوشش گیاهی، به‌ویژه درختان، در کاهش و جذب آلودگی صوتی شهری؛ شناسایی و انتخاب گونه‌های گیاهی مقاوم به شرایط اقلیم خشک متناسب با شهر بیرجند؛ ارائه راه‌کارهای بهینه برای بهره‌برداری مؤثر از فضای سبز در کنترل آلودگی صوتی؛ و در نهایت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی سالانه با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری عمیق (LSTM). در این پژوهش ابتدا با به‌کارگیری مدل یادگیری عمیق LSTM، روند تغییرات دمای سالانه پیش‌بینی می‌شود و سپس تأثیر پوشش گیاهی به‌ویژه گونه‌های چندمنظوره گرمسیری مقاوم به خشکی بر کاهش آلودگی صوتی در مناطق خشک بررسی می‌گردد.

مروری بر ادبیات

مدل‌های یادگیری عمیق^۱ به‌ویژه شبکه‌های حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM^۲) به دلیل توانایی در درک وابستگی‌های زمانی پیچیده، به‌طور گسترده در پیش‌بینی داده‌های اقلیمی به کار گرفته شده‌اند (Munandar & Surbakti, 2025). افزایش دمای زمین به‌ویژه در مناطق خشک، علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، کیفیت زندگی شهروندان را نیز به‌طور معناداری کاهش می‌دهد. شکل ۱ بر اهمیت حیاتی پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تأکید دارد (Madhavi et al., 2024). در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و آلودگی صوتی به دو چالش جدی زیست‌محیطی با تأثیرات گسترده بر سلامت روانی و جسمی انسان‌ها تبدیل شده‌اند. در این میان، بهره‌گیری هوشمندانه از پوشش گیاهی در طراحی شهری می‌تواند راه‌کاری مؤثر برای کاهش دمای شهری و کاهش آلودگی صوتی باشد.

1-Deep Learning

2- Long/Short Term Memory (LSTM)



شکل ۱- اهمیت و نقش کلیدی پیش‌بینی تغییرات اقلیم

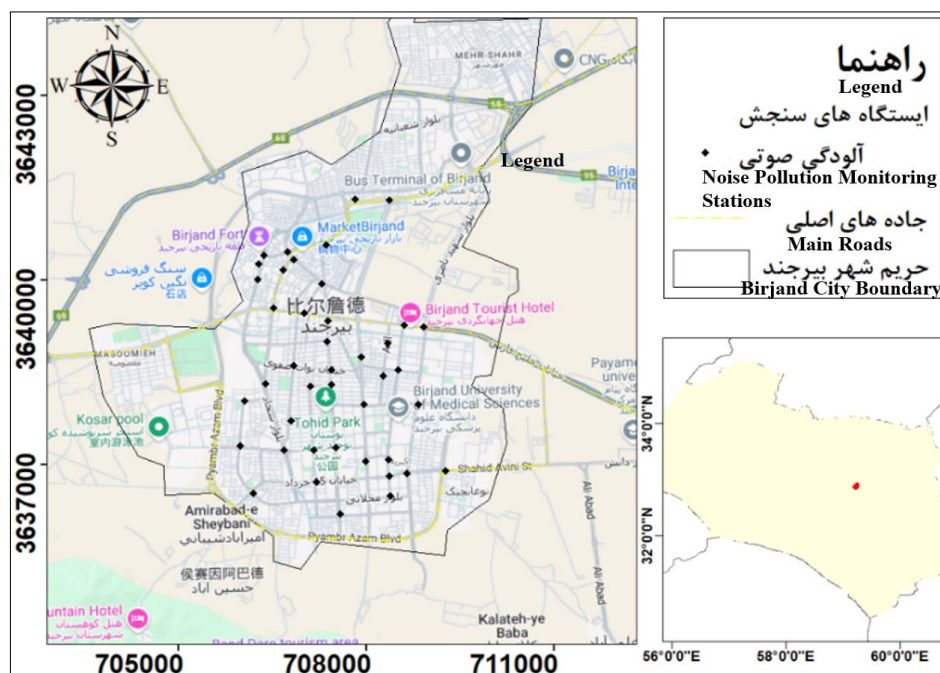
Fig.1. The Importance and Key Role of Climate Change Prediction (Madhavi et al., 2024)

فضای سبز می‌تواند به‌عنوان یک بافر مؤثر در برابر فشارهای محیطی عمل کند. با توجه به پیچیدگی عوامل مؤثر، بهره‌گیری از رویکردهای نوین مدل‌سازی شامل الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML) ضرورت یافته است. در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر الگوریتم‌های ML نظیر شبکه‌های عصبی (NN) به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها با اتکا بر داده‌های مکانی و محیطی، امکان تحلیل‌های پیچیده‌تر و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر را فراهم کرده‌اند (Helbich et al., 2025; Razavi-Termeh, Sadeghi-Niaraki, Yao, Naqvi & Choi, 2024).

پوشش گیاهی نقش مؤثری در کاهش دمای شهری و کاهش آلودگی صوتی ایفا می‌کند. مدل‌های یادگیری عمیق مانند LSTM برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی کاربرد دارند. با این حال، تحقیقات هم‌زمان در زمینه نوسانات دما و تأثیر گیاهان بر آلودگی صوتی در مناطق خشک محدود است. نیاس (Nias, 2021) با استفاده از GIS و داده‌های صوتی ایستگاه‌ها، ارتباط کاربری اراضی در شیراز و آلودگی صوتی را مدل‌سازی و الگوهای فضایی آن را شناسایی کرد. نتایج این پژوهش برای مدیریت شهری و طراحی فضاهای سبز مفید است. پژوهش ارسلان و همکاران (Arsalan, Chamani & Zamani-Ahmadm Mahmoodi, 2024) نشان می‌دهد که طراحی بهینه و مکان‌یابی هدفمند این فضاها در مجاورت منابع صوتی تأثیر چشمگیری بر بهبود کیفیت صوتی محیط دارد. چن و همکاران (Chen et al., 2024) با تأکید بر تحلیل همبستگی بین قرارگیری در معرض آلودگی صوتی و ویژگی‌های شهری، چارچوبی برای تدوین سیاست‌های مبتنی بر طبیعت به منظور کاهش آلودگی و ارتقاء تاب‌آوری و زیست‌پذیری شهرها ارائه کرده‌اند. پژوهش یانگ و همکاران (Yang et al., 2025) نشان می‌دهد که آلودگی صوتی سلامت روان را تضعیف و استفاده از فضاهای سبز و فعالیت بدنی را کاهش می‌دهد. گنجی‌راد و همکاران (Ganjirad, Delavar, 2025) بر توسعه چارچوب‌های نوین مکان‌یابی و طراحی فضاهای سبز با توجه به شاخص‌های اجتماعی و زیست‌محیطی تأکید دارند. پارک‌ها، درختان خیابانی و بام‌های سبز با جذب و پراکندگی امواج صوتی، به‌عنوان موانع طبیعی عمل کرده و شدت آلودگی صوتی را بر اساس نوع پوشش، تراکم، ارتفاع و محل قرارگیری کاهش می‌دهند.

منطقه مورد مطالعه

شهر بیرجند با جمعیتی بالغ بر ۲۶۶,۷۰۰ نفر و وسعتی در حدود ۳۱۷۰۰ کیلومترمربع در منطقه‌ای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی واقع شده است (Statistical Center of Iran, 2020). میانگین دمای سالانه این شهر حدود ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه آن نزدیک به ۱۳۴ میلی‌متر گزارش شده است (Iran Meteorological Organization, 2020). در چنین شرایطی، طراحی و توسعه فضای سبز شهری نقش مهمی در ارتقاء کیفیت زیست‌محیطی دارد. با توجه به محدودیت منابع آبی و شدت تبخیر، استفاده از گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی در اولویت برنامه‌های مدیریت شهری قرار دارد. محدوده مطالعاتی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نقشه موقعیت منطقه مطالعاتی

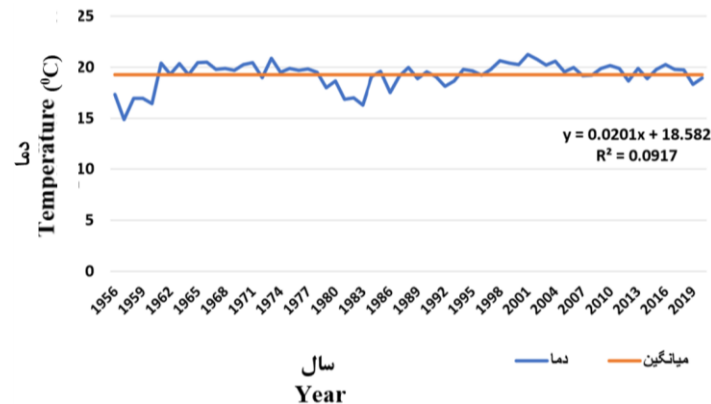
Fig.2. Map of the Study Area

مواد و روش‌ها

تهیه داده‌ها

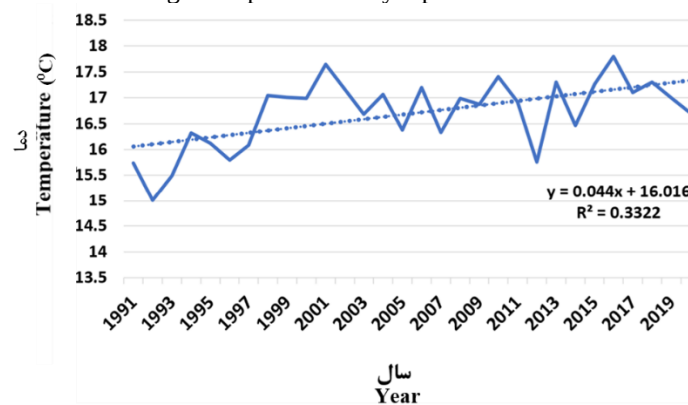
در گام نخست، داده‌های دمایی ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان جنوبی و شهر بیرجند در بازه زمانی ۱۹۵۶ تا ۲۰۲۰ گردآوری شد (Iran Meteorological Organization, 2020). این داده‌ها شامل میانگین سالانه دما بوده و از منابع معتبر هواشناسی ملی استخراج گردید. داده‌ها پس از بررسی کیفیت و حذف مقادیر پرت، برای تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی آماده شدند. این مجموعه داده، پایه‌ای برای بررسی روندهای بلندمدت تغییرات دمایی و شبیه‌سازی‌های اقلیمی فراهم نمود. اشکال ۳ و ۴ روند تغییرات میانگین سالیانه دما را در دوره‌های زمانی مختلف ارائه می‌دهند. شکل ۳ نوسانات دما از سال ۱۹۵۶ تا ۲۰۱۹ را در کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک استان نشان می‌دهد. شکل ۴ به‌طور ویژه به تغییرات میانگین دمای سالیانه

ایستگاه سینوپتیک بیرجند طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۹ می‌پردازد. این نمودارها امکان بررسی روندهای اقلیمی منطقه و شناسایی اثرات بلندمدت گرمایش را فراهم می‌سازند.



شکل ۳- میانگین سالیانه دما در ایستگاه‌های سینوپتیک خراسان جنوبی

Fig. 3. Annual Average Temperature at Synoptic Stations in South Khorasan



شکل ۴- میانگین سالیانه دما در ایستگاه سینوپتیک بیرجند

Fig. 4. Annual Average Temperature at Birjand Synoptic Station

پیش‌پردازش داده‌ها

این مطالعه با هدف پیش‌بینی روند دما در منطقه مطالعاتی از مدل LSTM استفاده کرده است. داده‌های دمای سالانه از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ با استفاده از روش نرمال‌سازی Min-Max استانداردسازی شدند. سپس داده‌ها به سه مجموعه آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) تقسیم شدند. با استفاده از پنجره‌های متحرک، توالی‌های زمانی برای پیش‌بینی تغییرات دما ایجاد شدند. شکل ۵ فرایند پردازش داده‌های زمانی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- فرایند پردازش داده‌های دمای سطح زمین، از جمله پیش‌پردازش، مدل‌سازی، و پیش‌بینی

Fig. 5. Processing workflow of land surface temperature (LST) data, including preprocessing, modeling, and prediction

مدل سازی با شبکه عصبی LSTM

مدل LSTM به عنوان یک شبکه عصبی بازگشتی پیشرفته، با استفاده از «سلول حافظه» و دروازه های ورودی، فراموشی و خروجی، توانایی مدل سازی روابط پیچیده و وابستگی های بلندمدت را دارد و برای پیش بینی دقیق روندها و تغییرات اقلیمی مناسب است (GR & Adarsh, 2025). برای مدل سازی و پیش بینی تغییرات دمای سالانه، شبکه عصبی بازگشتی LSTM به کار گرفته شد. این شبکه قادر است روابط پیچیده و وابستگی های بلندمدت سری های زمانی را شناسایی کند و از مشکلاتی مانند ناپایداری گرادیان یا فراموشی اطلاعات جلوگیری نماید.

طراحی معماری مدل LSTM برای پیش بینی روند تغییرات دمای سالانه

معماری و پارامترهای مدل به گونه ای طراحی شد که توانایی مدل در شناسایی وابستگی های زمانی بلندمدت و پیش بینی دقیق دما به حداکثر برسد. معماری مدل شامل دو لایه متوالی LSTM با ۵۰ نورون در هر لایه است که به طور ویژه برای استخراج الگوهای پیچیده و غیرخطی در داده های سری زمانی انتخاب شده اند. در انتهای شبکه، یک لایه خروجی تک نورونی با تابع فعال سازی خطی قرار دارد که مقدار دمای پیش بینی شده را به صورت عددی تولید می کند. نرخ یادگیری مدل برابر با ۰/۰۰۱ تنظیم شد تا فرآیند یادگیری با سرعت بهینه و پایداری گرادیان انجام گیرد. آموزش مدل طی ۱۵۰ اپک صورت گرفت و بهینه سازی وزن ها با استفاده از الگوریتم Adam انجام شد که برای داده های سری زمانی کارایی بالایی دارد. جزئیات کامل معماری و پارامترهای مدل در جدول ۱ ارائه شده است. برای پیاده سازی و اجرای مدل از نرم افزار Python استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد، از دو معیار کلیدی میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده گردید تا دقت و قابلیت تبیین مدل به طور کمی سنجیده شود. به منظور جلوگیری از بیش برآزش، تکنیک Dropout بین لایه ها و منظم سازی L2 به کار گرفته شد که به مدل کمک می کند تعمیم پذیری بالاتری در مواجهه با داده های جدید داشته باشد.

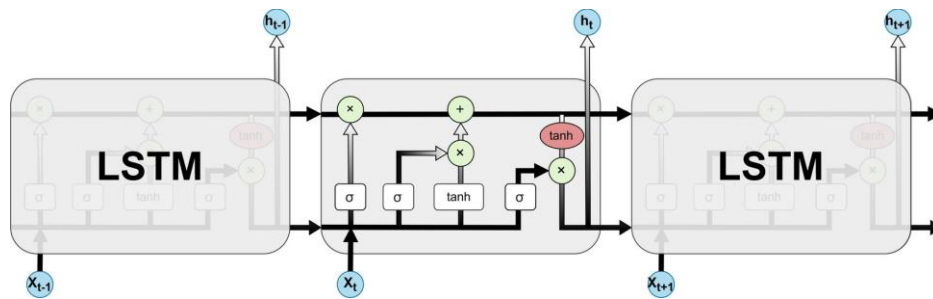
این مدل به دلیل قابلیت ذخیره و به روزرسانی انتخابی اطلاعات در طول بازه های زمانی طولانی، گزینه ای مناسب برای پیش بینی متغیرهای اقلیمی محسوب می شود. معماری مدل به گونه ای طراحی شد که ابتدا چندین لایه LSTM متوالی، ویژگی ها و الگوهای نهان در داده ها را استخراج نموده و سپس خروجی این لایه ها به لایه های کاملاً متصل منتقل شود. در نهایت، یک لایه خروجی با یک نورون و تابع فعال سازی خطی، مقدار پیش بینی شده دمای سالانه را تولید کرد. مدل آموزش یافته برای پیش بینی میانگین دمای سالانه تا سال ۲۰۳۵ به کار گرفته شد. هدف از این پیش بینی، ارزیابی روندهای احتمالی تغییرات اقلیمی در منطقه و تحلیل سناریوهای گرمایش بلندمدت می باشد. ساختار عملکرد این مدل در شکل ۶ به صورت شماتیک نمایش داده شده است (Guo & Feng, 2024).

جدول ۱- تنظیمات، مشخصات و پارامترهای مدل LSTM

Table 1- Settings, Specifications and Parameters of the LSTM Model

مقدار Value	پارامتر Parameter
۲ لایه متوالی 2 stacked layers	تعداد لایه های LSTM Number of LSTM layers
50	نورون هر لایه Neurons per layer
۱ نورون (تابع فعال سازی خطی) 1 neuron (linear activation)	لایه خروجی Output layer
0.001	نرخ یادگیری

Learning rate	150
تعداد دوره‌ها	
Epochs	
الگوریتم بهینه‌سازی	Adam
Optimization algorithm	
معیار ارزیابی	MSE, MAE, R ²
Evaluation metrics	
تکنیک جلوگیری از بیش‌برازش	L2 و Dropout
Overfitting prevention	



شکل ۶- لایه شبکه عصبی LSTM و ساختار داخلی آن

Fig.6. LSTM Neural Network Layer and Its Internal Structure (Guo & Feng, 2024)

مدل حافظه طولانی - کوتاه مدت (LSTM)، یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های شبکه عصبی است که به‌طور خاص برای مدل‌سازی سری‌های زمانی با وابستگی‌های بلندمدت طراحی شده است. این ویژگی‌ها، LSTM را به ابزاری بسیار مؤثر برای پیش‌بینی دما و تحلیل تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند، زیرا تغییرات اقلیمی به‌طور طبیعی با وابستگی‌های زمانی پیچیده‌ای همراه است و معمولاً روندهای غیرخطی و بلندمدت را در برمی‌گیرد. LSTM از یک ساختار به نام «بلوک حافظه» استفاده می‌کند که مسئول ذخیره و به‌روزرسانی اطلاعات در طول زمان است. این بلوک حافظه شامل سه دروازه اصلی است که هر یک نقش خاصی در پردازش اطلاعات دارند: دروازه فراموشی^۱، دروازه ورودی^۲ و دروازه خروجی^۳.

دروازه فراموشی: این دروازه تصمیم می‌گیرد که کدام اطلاعات از گذشته باید از وضعیت سلولی حذف شود. این فرآیند با استفاده از رابطه (۱) ارائه شده در جدول ۲ انجام می‌شود که در این رابطه W_f بیانگر وزن، $h_{(t-1)}$ بیانگر حالت مخفی قبلی، x_t بیانگر ورودی کنونی و b_f بیانگر بایاس است.

دروازه ورودی: این دروازه مشخص می‌کند که کدام اطلاعات جدید به وضعیت سلولی اضافه می‌شود. این فرآیند از دو مرحله تشکیل می‌شود. اولین مرحله، دروازه ورودی است که تصمیم می‌گیرد کدام مقدار باید به‌روزرسانی شود. در مرحله بعد، مقدار پیشنهادی برای اضافه شدن به وضعیت سلولی محاسبه می‌شود. وضعیت سلولی C_t با ترکیب اطلاعات قبلی و جدید به‌روزرسانی می‌شود. این به‌روزرسانی کمک می‌کند که مدل اطلاعات مربوط به گذشته و حال را به‌طور مؤثر ذخیره و پردازش کند. رابطه (۲) بیانگر دروازه ورودی و رابطه‌های (۳) و (۴) بیانگر بردار کاندیدهای جدید می‌باشد.

1- Forget Gate
2- Input Gate
3- Output Gate

دروازه خروجی: در نهایت، دروازه خروجی تصمیم می‌گیرد که چه بخشی از وضعیت سلولی به‌عنوان خروجی مدل به بیرون ارسال شود. سپس، خروجی نهایی مدل محاسبه می‌شود که در آن، h_t خروجی نهایی مدل است که به‌طور معمول به‌عنوان پیش‌بینی دما یا سایر شاخص‌های اقلیمی استفاده می‌شود. برای تعیین حالت مخفی ابتدا دروازه خروجی متناسب با ورودی کنونی و حالت مخفی به دست می‌آید که رابطه (۵) بیانگر این خروجی است. حالت مخفی تابعی از خروجی حاصل شده و حالت سلول است (رابطه ۶) (Vo, Kim, Nguyen & Bae, 2023).

در این پژوهش معماری پایه مدل در شکل ۷ نمایش داده شده است و نمایی کلی از اجزای داخلی و فرآیند جریان اطلاعات در ساختار شبکه را ارائه می‌دهد. این معماری شامل لایه‌هایی از سلول‌های حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) است که به‌عنوان هسته اصلی مدل در تحلیل سری‌های زمانی، نظیر پیش‌بینی دما، به کار گرفته می‌شوند. ساختار داخلی هر سلول LSTM از سه دروازه اصلی، شامل دروازه فراموشی، دروازه ورودی و دروازه خروجی تشکیل شده است. این دروازه‌ها با استفاده از توابع فعال‌سازی سیگموئید و تانژانت هیپربولیک ($\tanh$)، جریان اطلاعات را تنظیم کرده و به شبکه امکان می‌دهند تا وابستگی‌های زمانی بلندمدت را به‌طور مؤثر شناسایی و ذخیره کند. در ابتدای هر گام زمانی، ورودی فعلی (x_t) و وضعیت پنهان قبلی (h_{t-1}) به سلول وارد می‌شوند. دروازه فراموشی تصمیم می‌گیرد چه بخش‌هایی از حافظه قبلی (C_{t-1}) حذف شوند. سپس، دروازه ورودی مشخص می‌کند که چه اطلاعات جدیدی وارد حافظه شود و مقادیر جدید با استفاده از تابع $\tanh$ تولید می‌گردند. این مقادیر با هم ترکیب شده و حافظه سلولی جدید (C_t) را تشکیل می‌دهند. در ادامه، دروازه خروجی با بهره‌گیری از خروجی $\tanh$ و سیگموئید، وضعیت پنهان جدید (h_t) را تولید می‌کند که به گام زمانی یا لایه بعدی منتقل می‌شود.

در این پژوهش برای افزایش کارایی مدل، چندین لایه LSTM به‌صورت متوالی طراحی شده‌اند تا الگوهای پیچیده و وابستگی‌های زمانی در سری‌های دما را استخراج کنند. خروجی هر لایه به‌عنوان ورودی لایه بعدی عمل می‌کند. در پایان، این ویژگی‌های استخراج‌شده به لایه‌های کاملاً متصل انتقال می‌یابند تا در نهایت مقدار دمای پیش‌بینی‌شده تولید گردد. درون هر سلول، از تابع فعال‌سازی تانژانت هیپربولیک برای تسریع همگرایی و شبیه‌سازی روابط غیرخطی استفاده شده است. برای مقابله با پدیده بیش‌برازش^۱، از تکنیک dropout بین لایه‌ها و منظم‌سازی L2 روی وزن‌ها استفاده شد تا توانایی تعمیم مدل نسبت به داده‌های جدید افزایش یابد. الگوریتم آدام^۲ به‌عنوان روش بهینه‌سازی به کار رفته و معیار میانگین مربعات خطا^۳ برای ارزیابی دقت پیش‌بینی به کار گرفته شد. ورودی‌های مدل نیز شامل مقادیر تأخیری^۴ متغیرهای اقلیمی مانند (دمای گذشته و...) هستند. این طراحی جامع، چارچوبی قدرتمند برای تحلیل دقیق روابط زمانی و مکانی مؤثر بر دمای لحظه‌ای و پیش‌بینی آینده آن فراهم می‌کند.

1- Overfitting

2- Adam

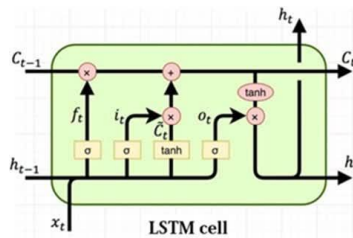
3- MSE

4- Lagged

جدول ۲ - معادلات اصلی مدل LSTM و شاخص ارزیابی

Table 2- Key Equations of the LSTM Model and Evaluation Index

معادله Equation	شماره معادله number
$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{(t-1)}, x_t] + b_i)$	(1)
$\hat{C}_t = \tanh\left(\frac{W_c \cdot [h_{(t-1)}, x_t] + b_c}{2}\right)$	(2)
$C_t = f_t \cdot C_{(t-1)} + i_t \cdot \hat{C}_t$	(3)
$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{(t-1)}, x_t] + b_o)$	(4)
$h_t = o_t \cdot \tanh\left(\frac{C_t}{2}\right)$	(5)
RMSE	
$= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2}$	(7)



شکل ۷- ساختار داخلی سلول LSTM و نحوه‌ی جریان اطلاعات بین اجزای آن

Fig.7. Internal Structure of the LSTM Cell and information flow Between Its Components

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل

پس از آموزش کامل مدل، داده‌های پیش‌بینی برای سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۵ تولید شدند. سپس نمودارهای مقایسه‌ای بین خروجی مدل و روند واقعی، به همراه تحلیل خطا، ارائه شدند. نتایج نشان‌دهنده توانایی قابل توجه هر دو ساختار در بازتولید روندهای اقلیمی و آشکارسازی ناهنجاری‌های احتمالی می‌باشد. برای ارزیابی دقت مدل مطابق رابطه (۷) ارائه شده در جدول ۲، از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد که در آن N تعداد مشاهدات در مجموعه آزمون است. این معیارها دقت پیش‌بینی مدل را در مقایسه با مقادیر واقعی نشان می‌دهند (Gupta et al., 2024).

برای ارزیابی دقت مدل، علاوه بر نمودار میانگین مربعات خطا (MSE)، معیارهای عددی RMSE و MAE نیز محاسبه شدند تا دقت پیش‌بینی‌ها به صورت کمی مشخص گردد. با توجه به واحد داده‌ها (درجه سانتی‌گراد) و دامنه تغییرات سالانه دما، خطاهای RMSE کمتر از ۱ درجه نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های دقیق و قابل قبول هستند. به منظور کالیبراسیون مدل و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها، از روش اعتبارسنجی متقابل حذف یکی - یکی (LOOCV) استفاده شد؛ در این روش هر بار یک نمونه از داده‌ها به عنوان مجموعه تست جدا می‌شود و باقی داده‌ها برای آموزش مدل به کار می‌روند. این فرآیند برای تمامی نمونه‌ها تکرار شد، سپس RMSE و MAE بر اساس پیش‌بینی‌های تمام نمونه‌ها محاسبه گردید.

تحلیل فضایی آلودگی صوتی

با بهره‌گیری از GIS و مدل‌های آماری، امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آلودگی صوتی در سطوح مختلف منطقه مطالعاتی فراهم آمده است. برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی تراز آلودگی صوتی در شهر بیرجند، از داده‌های میدانی گردآوری شده پژوهش صیادی و موفق (Sayadi & Movafagh, 2014) استفاده شد. این داده‌ها شامل میانگین تراز صوتی (dB) ثبت‌شده در ۴۳ ایستگاه اندازه‌گیری طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۲ و در سه بازه زمانی مجزا (صبح، ظهر و شب) بوده و به همراه مختصات دقیق مکانی هر ایستگاه، مبنای تحلیل مکانی قرار گرفتند. در مرحله بعد، داده‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد شده و با استفاده از ابزار Spatial Analyst، تکنیک درون‌یابی وزنی معکوس فاصله (IDW) به منظور تولید لایه‌های پیوسته تراز صوت به کار گرفته شد. در این روش، مقادیر صوتی نقاط نامشخص با توجه به فاصله آن‌ها از ایستگاه‌های اندازه‌گیری و بر اساس تابع وزن‌دهی معکوس فاصله تخمین زده می‌شود، به‌طوری‌که نقاط نزدیک‌تر تأثیر بیشتری بر مقدار نهایی دارند (Li & Heap, 2008). در نتیجه این فرآیند، سه نقشه درون‌یابی‌شده مجزا برای بازه‌های زمانی مختلف به دست آمد که امکان تحلیل فضایی دقیق از وضعیت و تغییرات آلودگی صوتی در سطح منطقه مورد بررسی را فراهم ساخت. بر اساس داده‌های موجود، محدوده‌های مجاز صدا به شرح جدول ۳ است.

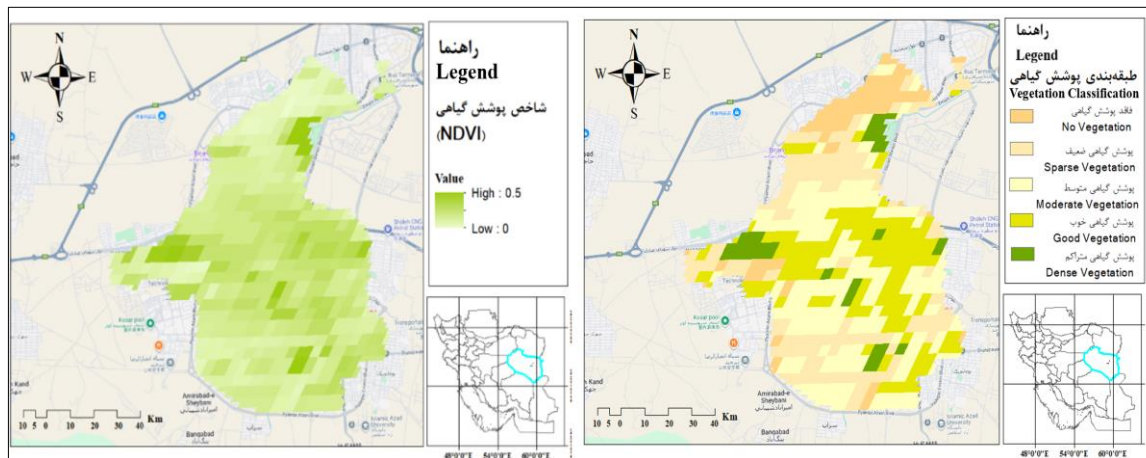
جدول ۳- حدود مجاز صدا در هوای آزاد ایران

Table 3- Permissible Noise Limits in Open Air of Iran (Sayadi & Movafagh, 2014)

نوع منطقه Zone Type	روز (۷ صبح تا ۱۰ شب) Day (7:00 AM – 10:00 PM)	شب (۱۰ شب تا ۷ صبح) Night (10:00 PM – 7:00 AM)
مسکونی Residential	55 dB	45 dB
تجاری - مسکونی Commercial-Residential	60 dB	50 dB
تجاری Commercial	65 dB	55 dB
مسکونی - صنعتی Residential-Industrial	70 dB	60 dB
صنعتی Industrial	75 dB	65 dB
بیمارستان‌ها Hospitals	45 dB	30 dB

تحلیل پوشش گیاهی و ارتباط آن با آلودگی صوتی

در این پژوهش، نقش پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و سنجش‌ازدور مورد تحلیل قرار گرفت. بدین منظور داده‌های شاخص پوشش گیاهی MODIS (محصول MOD13Q1) از سامانه Earthdata دریافت و برای منطقه مطالعاتی پردازش شد. این داده‌ها به دلیل دسترسی معتبر، کیفیت پردازش‌شده و قابلیت ارائه شاخص NDVI در مقیاس منطقه‌ای، امکان تهیه نقشه‌های شدت و توزیع مکانی پوشش گیاهی را فراهم می‌سازند. مقادیر NDVI در پنج طبقه باز طبقه‌بندی گردید و بر این اساس نقشه‌های شدت و پراکنش پوشش گیاهی (شکل ۸) تولید شد. در ادامه، داده‌های مرتبط با شدت و توزیع آلودگی صوتی گردآوری و نقشه‌های مربوطه تهیه گردید و سپس با استفاده از روش هم‌پوشانی (Overlay Analysis) در محیط GIS، ارتباط میان تراکم و توزیع پوشش گیاهی با آلودگی صوتی مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۸ - نقشه‌های شدت و پراکنش پوشش گیاهی

Fig. 8. Maps of Vegetation Density and Distribution

نتایج و بحث

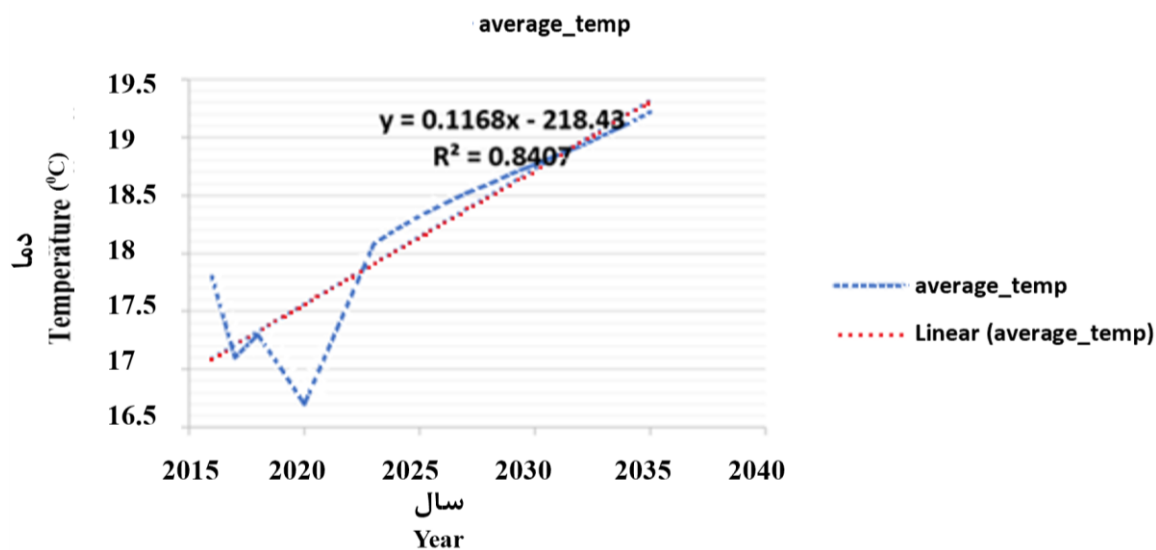
نتایج پیش‌بینی، ارزیابی و اعتبارسنجی مدل LSTM

به‌منظور پیش‌بینی تغییرات دمایی در منطقه مورد مطالعه، از مدل‌سازی آماری و یادگیری عمیق استفاده شد. در بخش نخست، یک مدل رگرسیون خطی ساده برای بررسی روند تغییرات میانگین دما طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۵ پیاده‌سازی شد. نتایج این مدل نشان داد که میانگین دما با ضریب تعیین بسیار بالا ($R^2 = 0.84$) دارای روندی افزایشی است، به‌طوری‌که شیب خط رگرسیون بیانگر افزایش سالانه دما به میزان تقریباً 0.08°C درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برای تحلیل دقیق‌تر و به‌کارگیری قابلیت‌های مدل‌های یادگیری عمیق در شناسایی الگوهای زمانی پیچیده، از شبکه عصبی LSTM استفاده شد. نتایج مدل نشان‌دهنده دقت بالا در پیش‌بینی مقادیر دمایی بود و روندی مشابه مدل خطی را با تطابق بهتر در نوسانات بین‌سالی نشان داد. این نتایج بر اهمیت بهره‌گیری از روش‌های نوین یادگیری ماشین در تحلیل تغییرات اقلیمی و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها تأکید دارد. نتایج حاصل از مدل (شکل ۹)، نشان‌دهنده تداوم روند افزایشی دما بوده و حاکی از گرم‌تر شدن منطقه در سال‌های آتی است.

در شکل ۱۰، روند تغییرات میانگین مربعات خطا (MSE) در مراحل مختلف آموزش مدل LSTM برای هر دو مجموعه داده آموزشی^۱ و اعتبارسنجی^۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار خطا در هر دو مجموعه با افزایش تعداد مراحل آموزش^۳ روندی نزولی را طی کرده و مدل به‌تدریج به دقت بهتری دست می‌یابد. با پیشرفت فرآیند یادگیری، کاهش پیوسته‌ای در مقدار MSE مشاهده می‌شود؛ به‌ویژه در مجموعه آموزشی که در انتهای فرآیند آموزش به مقداری کمتر از ۱ می‌رسد. نکته قابل توجه، پایداری نسبی روند کاهش خطا در مجموعه اعتبارسنجی است که نشان‌دهنده عدم بیش‌برازش قابل توجه در مدل است.

- 1- Training
- 2- Validation
- 3- Training Steps

هرچند در مراحل انتهایی آموزش، خطای مجموعه اعتبارسنجی به طور جزئی از خطای مجموعه آموزشی فاصله گرفته، اما این اختلاف چندان زیاد نبوده و حاکی از این است که مدل LSTM قادر به یادگیری مؤثر الگوهای زمانی موجود در داده‌ها بوده است. این روند، کارایی بالای معماری این شبکه در مدل‌سازی روابط پیچیده و وابسته به زمان را به خوبی تأیید می‌کند. نتایج ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل نشان داد که مدل LSTM کالیبره شده با LOOCV دارای RMSE برابر با ۰/۶۳ و MAE برابر با ۰/۵۲ است. بنابراین پیش‌بینی‌های مدل کالیبره شده از دقت بالایی برخوردارند و با مقادیر مشاهداتی مطابقت مناسبی دارند.



شکل ۹- پیش‌بینی دما تا سال ۲۰۳۵ با استفاده از مدل LSTM

Fig. 9. Temperature Prediction Until 2035 Using the LSTM Model



شکل ۱۰- منحنی یادگیری مدل LSTM بر اساس خطای میانگین مربعات (MSE)

Fig. 10. LSTM Model Learning Curve Based on Mean Squared Error (MSE)

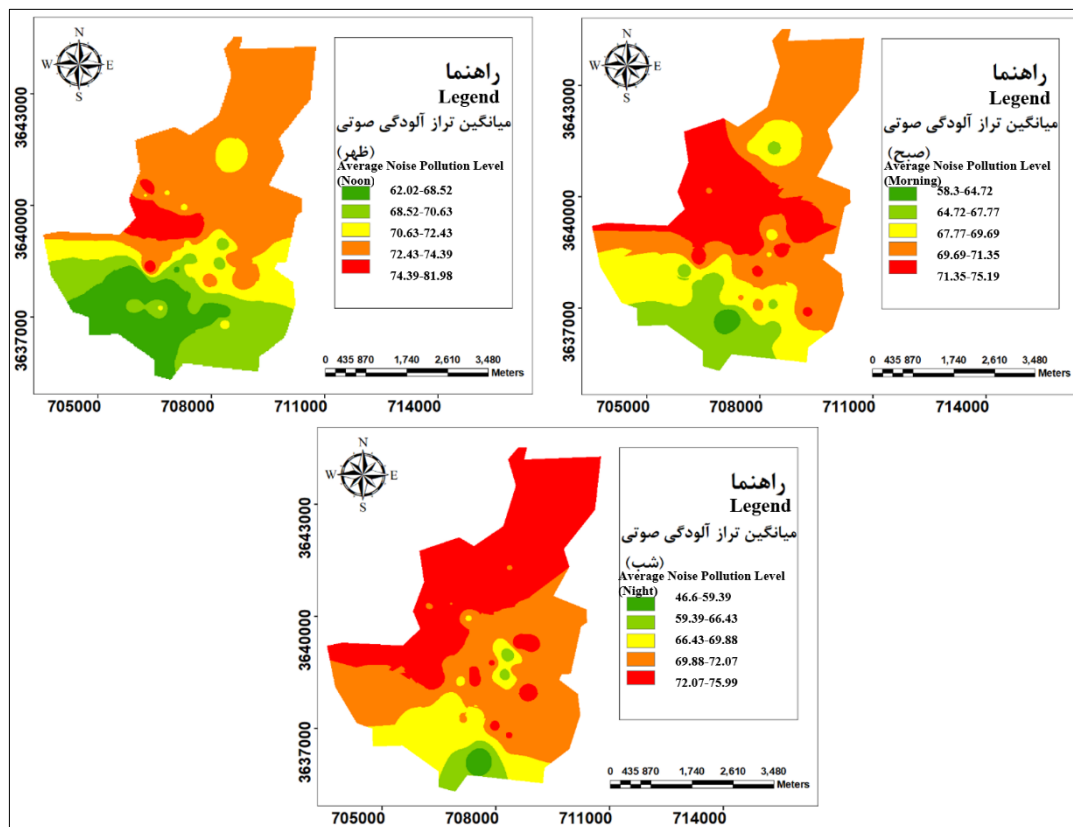
نتایج تحلیل فضایی آلودگی صوتی

نتایج نقشه‌های درون‌یابی (شکل ۱۱)، نشان داد که شدت آلودگی صوتی در ساعات مختلف روز دارای الگوهای مکانی متفاوت است. در ساعات صبح، مناطق جنوبی و جنوب‌غربی (مانند خیابان معلم) آلودگی صوتی کمتری دارند (۵۸ تا ۶۵ دسی‌بل)، در حالی که مناطق مرکزی و شمالی (مانند خیابان شهدا و خیابان امام رضا) با سطوح بالاتری از آلودگی صوتی مواجه هستند. در ساعات ظهر، شدت آلودگی در نواحی مرکزی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و برخی مناطق به بیش از ۷۴ دسی‌بل می‌رسند، که به ترافیک و فعالیت‌های روزانه مربوط می‌شود. در شب، برخی مناطق جنوبی همچنان آرام باقی می‌مانند، اما بخش‌های شمالی و مرکزی به دلیل تداوم تردد وسایل نقلیه و فعالیت‌های شبانه با افزایش قابل توجه آلودگی صوتی روبه‌رو هستند. خیابان‌هایی مانند عدالت، خیابان طالقانی و کوچه انقلاب از نقاط با بیشترین تراز صوتی (محدوده ۷۲ تا بیش از ۷۶ دسی‌بل) هستند. نتایج این مطالعه به توزیع کاربری اراضی، تراکم جمعیت و مراکز تجاری - خدماتی مرتبط است و می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی برای کاهش آلودگی صوتی از طریق اقدامات زیرساختی مانند ایجاد فضاهای سبز و موانع صوتی قرار گیرد.

مطالعه حاضر نشان داد که در ساعات شبانه، بخش قابل توجهی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری دارای تراز صوتی فراتر از ۷۰ دسی‌بل بوده‌اند؛ وضعیتی که می‌تواند ناشی از تداوم فعالیت منابع آلاینده صوتی، تردد وسایل نقلیه، و تشدید بازتاب صدا در ساعات شب باشد. همچنین، در برخی ایستگاه‌ها، بالاترین سطح آلودگی صوتی در ساعات ظهر به ثبت رسیده است که احتمالاً به دلیل هم‌زمانی با اوج فعالیت‌های روزانه، افزایش ترافیک و تراکم انسانی در این بازه زمانی است. تحلیل الگوی مکانی آلودگی صوتی نشان می‌دهد که مناطق مرکزی و شمالی بیشترین تأثیرپذیری را از این آلودگی دارند. در بیشتر ایستگاه‌ها، تراز آلودگی صوتی فراتر از حد مجاز گزارش شده است و این وضعیت می‌تواند سلامت عمومی شهروندان را در معرض تهدید جدی قرار دهد.

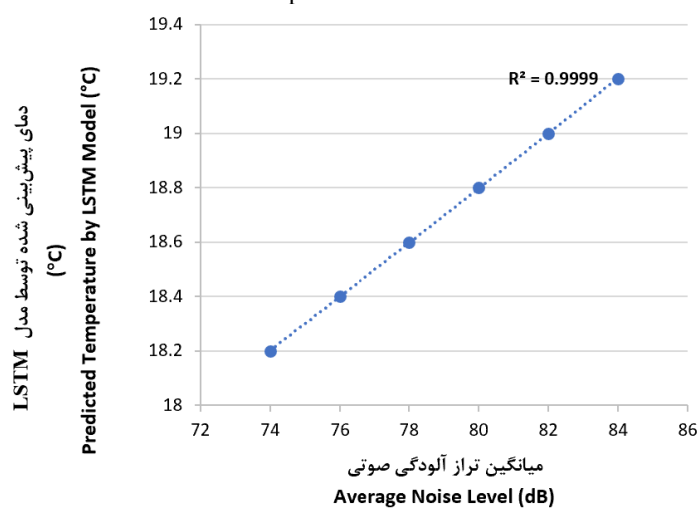
نتایج تحلیل فضایی پوشش گیاهی و ارتباط آن با آلودگی صوتی

به منظور بررسی ارتباط میان تغییرات اقلیمی و آلودگی صوتی، همبستگی بین دمای پیش‌بینی شده توسط مدل LSTM و میانگین تراز آلودگی صوتی محاسبه شد (شکل ۱۲). نتایج نشان داد که بین افزایش تدریجی دما و تغییرات تراز صوتی رابطه‌ای مثبت و قابل توجه برقرار است. این یافته بیانگر آن است که با افزایش دما، به‌ویژه در سال‌های آتی، احتمال افزایش حجم ترافیک و در نتیجه تشدید آلودگی صوتی در مناطق شهری نیز بیشتر می‌شود. از این رو، ترکیب نتایج پیش‌بینی دما با داده‌های میدانی آلودگی صوتی امکان تحلیل هم‌زمان دو بعد مهم از پایداری محیط‌زیست شهری را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنای مناسبی برای سیاست‌گذاری‌های مدیریت اقلیم و آلودگی صوتی باشد.



شکل ۱۱- نقشه های توزیع مکانی میانگین تراز آلودگی صوتی منطقه مطالعاتی به روش درونیابی IDW

Fig. 11. Spatial Distribution Maps of the Average Noise Pollution Level in the Study Area Using the IDW Interpolation Method



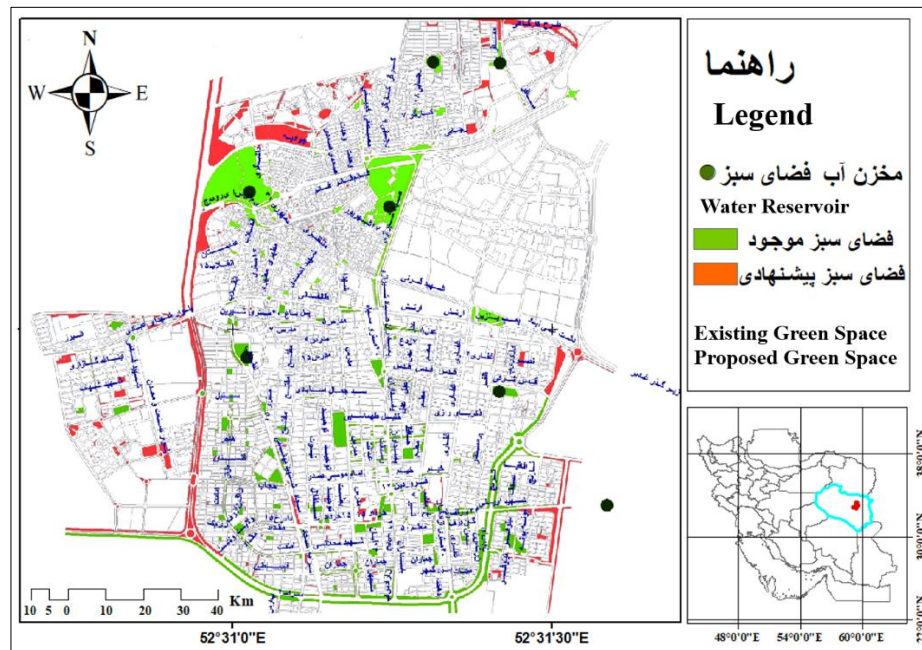
شکل ۱۲- رابطه میان دمای پیش‌بینی شده و میانگین آلودگی صوتی

Fig. 12. Relationship between Predicted Temperature and Average Noise Pollution

مقایسه نقشه پراکنش فضاهای سبز با نقشه‌های آلودگی صوتی نشان داد که مناطقی با تراکم بالاتر فضای سبز (به‌ویژه در جنوب و جنوب‌غربی شهر) هم‌زمان دارای شدت آلودگی صوتی کمتری هستند. این موضوع کارکرد دوگانه فضای سبز را برجسته می‌سازد: از یک سو ارتقای کیفیت زیست‌محیطی و منظر شهری، و از سوی دیگر کاهش آلاینده‌های محیطی نظیر آلودگی صوتی. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کمبود پارک‌ها در بخش‌های شمالی و مرکزی شهر، نه تنها به کاهش دسترسی شهروندان به فضاهای تفریحی منجر شده، بلکه در افزایش نسبی آلودگی صوتی این مناطق نیز نقش داشته است. این یافته‌ها زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند که در چارچوب تغییر اقلیم تحلیل شوند. در شرایطی که افزایش دما و کاهش منابع آبی می‌تواند تداوم و کیفیت پوشش گیاهی شهری را تهدید کند، توسعه هدفمند فضاهای سبز با گونه‌های مقاوم به خشکی و گرما، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. انتخاب چنین گونه‌هایی می‌تواند هم در ارتقای پایداری اکولوژیک فضاهای سبز مؤثر باشد و هم کارایی بیشتری در کاهش آلودگی صوتی داشته باشد.

نقشه‌های توزیع مکانی تراز آلودگی صوتی در سه بازه زمانی (صبح، ظهر و شب) نشان داد که شدت آلودگی صوتی در محدوده‌های مختلف دارای تغییرات قابل توجهی است. بیشترین مقادیر آلودگی در ساعات ظهر (۷۴-۸۲ دسی‌بل) و در مناطق مرکزی و شمالی ثبت شده که عموماً فاقد پوشش گیاهی یا دارای پوشش بسیار ضعیف هستند. در مقابل، مناطق جنوبی و جنوب‌غربی با تراکم گیاهی بالا (شکل ۱۳) میانگین آلودگی صوتی کمتری را در هر سه بازه زمانی تجربه کرده‌اند (به‌ویژه در شب با میانگین کمتر از ۵۹ دسی‌بل). این نتایج حاصل هم‌پوشانی نقشه‌های آلودگی صوتی و پوشش گیاهی در محیط GIS است و بیانگر یک رابطه معکوس میان تراکم پوشش گیاهی و شدت آلودگی صوتی است؛ به این معنا که افزایش تراکم پوشش گیاهی، منجر به کاهش محسوس در سطوح آلودگی صوتی می‌شود.

بررسی نقشه پراکنش پارک‌ها و فضاهای سبز در شهر بیرجند (شکل ۱۳) نشان داد که توزیع آن‌ها در سطح شهر یکنواخت نیست و تراکم بیشتری از پارک‌ها در مناطق مرکزی و جنوبی شهر مشاهده می‌شود. شهر بیرجند از نظر فضای سبز و پارک‌ها دارای توزیع نامتوازن است؛ بیشتر پارک‌ها در مناطق مرکزی و جنوبی متمرکز شده‌اند و مناطق دیگر کمتر دسترسی دارند. با وجود اینکه سرانه فضای سبز شهر از نظر کمی نسبت به استانداردهای ملی قابل قبول است (سرانه فضای سبز به ازای هر نفر: ۱۵/۹ متر مربع)، اما از نظر دسترسی مکانی و پراکندگی، هنوز کمبودهایی وجود دارد که بر توازن استفاده شهروندان از این فضاها تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، مسئله اصلی، کمبود فضای سبز نیست، بلکه عدم توزیع متوازن و دسترسی عادلانه به آن است.



شکل ۱۳- نقشه پراکنش فضاهای سبز در شهر بیرجند

Fig. 13. Distribution map of green spaces in Birjand city

تحلیل وضعیت آلودگی صوتی و پیشنهاد گونه‌های گیاهی برای کنترل آن در شهر بیرجند

بررسی نقشه‌های میانگین تراز آلودگی صوتی شهر بیرجند در سه بازه زمانی صبح، ظهر و شب نشان داد که مقادیر شدت صوت در بسیاری از مناطق از حدود مجاز تعیین شده برای کاربری‌های شهری فراتر رفته است (Sayadi & Movafagh, 2014). در ساعات ظهر، حداکثر شدت صوت ثبت شده (۸۱/۹۸ دسی‌بل) از آستانه مجاز مناطق صنعتی (۷۵ دسی‌بل) بیشتر می‌باشد. همچنین در ساعات شب، مقادیر اندازه‌گیری شده در بخش‌های زیادی از شهر، بیش از حد مجاز شبانه برای مناطق صنعتی (۶۵ دسی‌بل) است. این یافته‌ها نشان داد که آلودگی صوتی در بیرجند، به ویژه در مناطق پرتراکم، نیازمند مداخلات هدفمند از جمله توسعه فضای سبز شهری است. مطالعه الگوهای مکانی شدت صوت طی شبانه‌روز نشان داد که در ساعات صبح، خیابان‌هایی نظیر شهدا، امام رضا، سهرام امید و کوچه انقلاب به دلیل شروع فعالیت‌های تجاری و اداری، شدت صوت بالایی در بازه ۶۵ تا ۷۵ دسی‌بل دارند.

در حال حاضر در فضای سبز شهری بیرجند، گونه‌هایی نظیر کاج تهران^۱، اقاچیا^۲، زیتون تلخ^۳، داغداغان^۴، انواع توت^۵، بادام^۶ و عناب^۷ به‌طور گسترده کشت شده‌اند. این گونه‌ها نقش مهمی در ایجاد سایه و بهبود منظر شهری دارند. با این حال، به دلیل نیاز اکولوژیکی منطقه و شدت بالای صدا، توصیه می‌شود کاشت گونه‌های مقاوم و متراکم مانند کاج تهران به عنوان

- 1- Pinus eldarica
- 2- Robinia pseudoacacia
- 3- Melia azedarach
- 4- Celtis caucasica
- 5- Morus spp.
- 6- Prunus dulcis
- 7- Ziziphus jujuba

گونه اصلی و افاقیا و سنجد تلخ^۱ به عنوان گونه‌های مکمل در حاشیه خیابان‌ها ادامه یابد. این گونه‌ها به دلیل تراکم بالای برگ و گستردگی تاج، قابلیت جذب امواج صوتی بالایی دارند و طراحی کاشت باید به صورت نوارهای سه‌لایه‌ای با عرض ۳۰ تا ۵۰ متر انجام شود. در ساعات ظهر، با افزایش تردد و اوج فعالیت‌های شهری، شدت آلودگی صوتی در خیابان‌هایی مانند امام رضا، شهدا، ابوتراب و محدوده تقاطع‌های پرتردد به بالای ۷۴ دسی‌بل رسیده است. در این مناطق، به‌منظور کاهش آلودگی صوتی، علاوه بر گونه‌های ذکر شده، استفاده از درختچه‌های مقاومی مانند گز^۲ در لایه‌های میانی و پایین‌تر پیشنهاد می‌شود. در ساعات شب، در خیابان‌هایی با شدت صوت بالا مانند عدالت و طالقانی، کاشت کمربندهای سبز متراکم با گونه‌هایی چون افاقیا و سنجد تلخ ضروری است. همچنین، استفاده از بوته‌های بومی مانند رز بیابانی^۳ برای پر کردن فضاهای خالی توصیه می‌شود. در مناطق با شدت صوت پایین‌تر، کاشت پراکنده بوته‌های مقاوم به خشکی و چمن‌کاری‌های محلی بهبود کیفیت صوتی و منظر شهری را به همراه دارد (جدول ۴). همچنین، گونه‌های مقاوم دیگری مانند کنار^۴، بادام کوهی^۵، زیتون^۶ و پسته وحشی^۷ می‌توانند برای کنترل بهتر آلودگی صوتی و ارتقای منظر شهری استفاده شوند. این گونه‌ها علاوه بر مقاومت بالا در برابر کم‌آبی و کاهش نیاز به آبیاری، موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های نگهداری می‌شوند و عملکرد اکولوژیک مفیدی مانند بهبود کیفیت خاک و کاهش فرسایش ارائه می‌دهند. با این حال، برخی محدودیت‌ها نیز وجود دارد؛ از جمله کاهش تنوع زیستی در صورت تراکم پایین گونه‌ها و نیاز به مدیریت دقیق رشد گونه‌های سریع‌الرشد یا مهاجم. این ویژگی‌ها در تحلیل تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش آلودگی صوتی شهری و ارزیابی کارایی گونه‌ها در شرایط تغییرات دمایی استفاده شده‌اند. در پژوهش مالکی و حسینی (Maleki & Hosseini, 2011)، تأکید بر اهمیت ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاهان در کاهش تراز صوتی شده است. براساس نتایج آن‌ها، عواملی مانند تراکم برگ، گسترش تاج و تعداد شاخه‌ها نقش کلیدی در جذب صوت ایفا می‌کنند. با توجه به اقلیم خشک و گرم بیرجند، استفاده از گونه‌های مقاوم به کم‌آبی و دماهای بالا که در عین حال توانایی جذب امواج صوتی را داشته باشند، ضروری است. در مناطق با شدت آلودگی بسیار بالا (بیش از ۷۵ دسی‌بل)، ترکیب کاشت گونه‌هایی نظیر کاج تهران، افاقیا و گز به صورت سهردیفه با تراکم بالا پیشنهاد می‌شود. این الگو می‌تواند با ایجاد لایه‌های متراکم، میزان آلودگی صوتی را تا حدود ۱۵ تا ۲۰ دسی‌بل کاهش دهد. در مناطق با شدت صوت متوسط (۶۵ تا ۷۵ دسی‌بل)، گونه‌های سریع‌الرشد و مقاومی مانند سنجد تلخ یا ملخ شیرین در قالب نوارهای سبز باریک‌تر (با عرض ۱۵ تا ۳۰ متر) کارایی مناسبی خواهند داشت. با توجه به شرایط اقلیمی شهر بیرجند، ملخ شیرین می‌تواند در این منطقه رشد کند. البته قبل از کاشت این درخت، لازم است که تأثیرات زیست‌محیطی و مدیریتی آن به‌دقت ارزیابی شود تا از تبدیل آن به گونه‌ای مهاجم در اکوسیستم‌های بومی جلوگیری شود. در بخش‌هایی که شدت صوت در حد مجاز باقی مانده است (کمتر از ۶۵ دسی‌بل)، تمرکز بر تثبیت وضعیت موجود با استفاده از چمن‌های مقاوم به خشکی^۸ و بوته‌های بومی^۹ بهترین رویکرد خواهد بود.

1- *Elaeagnus angustifolia*2- *Tamarix spp*3- *Rosa persica*4- *Prosopis cineraria*5- *Amygdalus scoparia*6- *Olea europaea var. sylvestris*7- *Pistacia vera var. khinjuk*

8- Drought-Resistant Turfgrasses

9- Native Shrubs

جدول ۴- پیشنهاد گونه‌های گیاهی مناسب برای خیابان‌های منتخب بیرجند بر اساس شدت آلودگی صوتی

Table 4- Suggested Plant Species for Selected Streets of Birjand Based on Noise Pollution Intensity

گونه‌های پیشنهادی Suggested Plant Species	وضعیت نسبت به حد مجاز Status Compared to Permissible Limit	شدت صوت (دسی‌بل) Noise Intensity (dB)	بازه زمانی بازدها Noisy Time Period	خیابان/منطقه Street/Region
کاج تهران (Pinus eldarica)، افاقیا (Robinia pseudoacacia)، سنجد تلخ (Elaeagnus angustifolia) – چیدمان سه‌لایه با عرض ۵۰-۳۰ متر Three-Layer Arrangement with a Width of 30-50 Meters	بالتر از حد کاربری مسکونی و تجاری Above Permissible Levels for Residential and Commercial Use	65-75 dB	صبح Morning	خیابان شهدا، امام رضا، سه‌راه امید، کوچه انقلاب Shohada Street, Emam Reza Street, Omid Three-Way Intersection, Enghelab Alley
ترکیب کاج تهران (Pinus eldarica)، افاقیا (Robinia pseudoacacia)، گز (Tamarix aphylla) با تراکم بالا – فاصله کاشت < ۳ متر Combination of Pine, Acacia, Tamarisk with High Density-Planting Distance > 3 Meters	فراتر از حد مجاز کاربری صنعتی Exceeds Industrial Use Limits	Above 74 dB	ظهر Noon	خیابان امام رضا، شهدا، ابوتراب، تقاطع‌ها Emam Reza Street, Shohada Street, AbouTorab Street, Intersections
افاقیا (Robinia pseudoacacia) و سنجد تلخ (Elaeagnus angustifolia)، رز بیابانی (Rosa persica) – مناسب مناطق با شب‌نم شبانه Suitable for Areas with Nighttime Dew	بالتر از حد مجاز شبانه برای کاربری صنعتی Above Permissible Night-Time Levels for Industrial Use	Above 72-76 dB	شب Night	خیابان‌های عدالت، طالقانی، انقلاب Edalat Street, Taleghani Street, Enghelab Street
چمن‌های مقاوم به خشکی (drought-resistant turfgrasses)، بوته‌های بومی پراکنده (native shrubs)	در محدوده مجاز کاربری مسکونی Within Permissible Range for Residential Use	58-65	تمام روز All day	خیابان معلم (جنوب شهر بیرجند) Moalem Street (South of the Birjand City)
الگوی ترکیبی کاج تهران (Pinus eldarica)، افاقیا (Robinia pseudoacacia)، گز (Tamarix aphylla) – کاهش تا ۲۰ دسی‌بل Mixed Pattern Reduces up to 20 dB	بسیار پر صدا Very Noisy	Above 75 dB	همه بازه‌ها All Time Periods	مناطق با شدت صوت بالا (عمومی) High Noise Intensity Areas (Public)
سنجد تلخ (Elaeagnus angustifolia)، ملخ شیرین (Gleditsia triacanthos) – نوارهای سبز با عرض ۱۵-۳۰ متر Green Belts 15-30 Meters Wide	نیاز به مداخله متوسط Requires Moderate Intervention	65-75	همه بازه‌ها All Time Periods	مناطق با شدت صوت متوسط Moderate Noise Intensity Areas
چمن‌های مقاوم (Resilient Grasses)، بوته‌های بومی (Native Xerophytic) – تمرکز بر منظر و نگهداری کم هزینه Shrubs – Focus on Low-Maintenance Landscaping	نیاز به تثبیت شرایط موجود Requires Maintaining Current Conditions	Below 65 dB	همه بازه‌ها All Time Periods	مناطق با شدت صوت پایین Low Noise Intensity Areas

کاهش آلودگی صوتی در مناطق شهری امری چندبعدی است و نیاز به راهکارهای ترکیبی دارد. استفاده از گیاهان به عنوان یک راهکار طبیعی، نه تنها در کاهش مؤثر صدا کارایی دارد، بلکه از نظر اقتصادی و زیست محیطی نیز پایدارتر از سایر روش های فنی و مکانیکی می باشد. بافت گیاهان، تراکم برگ ها و نحوه کاشت آن ها از جمله عوامل تعیین کننده در میزان تأثیرگذاری بر کاهش آلودگی صوتی هستند. تحقیقات نشان داده اند که حتی کمربندهای باریک از درختان نیز می توانند به طور مؤثری شدت صدا را کاهش دهند. در شهرهایی مانند بیرجند که دارای اقلیم خشک و نیمه خشک هستند، انتخاب گونه های مقاوم و مناسب اقلیمی برای طراحی فضای سبز، اهمیت بیشتری دارد. هم چنین با توجه به محدودیت منابع آبی، استفاده از گیاهان بومی و مقاوم به خشکی توصیه می شود. با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک بیرجند و ویژگی های خاص آن از جمله کم بارشی (حدود ۱۷۰ میلی متر در سال)، دمای بالا، تبخیر زیاد و وزش باد شدید که می تواند به انتقال صوت منجر شود، انتخاب گیاهانی که هم از نظر کاهش آلودگی صوتی مؤثر باشند و هم با شرایط محیطی منطقه سازگار باشند، ضروری است. در این راستا، گیاهانی با ویژگی هایی مانند تراکم برگ زیاد، شاخه های گسترده، ساختار چندلایه و مقاوم به کم آبی باید مدنظر قرار گیرند. درختان سوزنی برگ مانند سرو شیرازی^۱ و کاج تهران به دلیل رشد سریع، تراکم بالا و مقاومت در برابر خشکی و باد می توانند به عنوان انتخاب های اصلی برای کاهش آلودگی صوتی در این شهر باشند. هم چنین، درختان پهن برگ مقاوم مانند اقاچیا و نارون چتری^۲ به خوبی می توانند به جذب و کاهش صدا در مناطق مسکونی و تجاری کمک کنند. استفاده از درختچه های همیشه سبز مانند مورد^۳ و شمشاد نقره ای^۴ می تواند به عنوان پوشش جانبی در کاهش نویز و محافظت از فضای پایین در برابر انعکاس صدا مؤثر باشد (جدول ۵). علاوه بر این، طراحی ترکیبی از درختان سوزنی برگ، درختان پهن برگ و درختچه های مقاوم به خشکی در لایه های مختلف گیاهی (از لایه های بالایی تا پایین تری که به زمین نزدیک ترند) می تواند به افزایش کارایی جذب صدا و هم چنین ایجاد محیطی پایدار و سازگار با اقلیم خشک شهر بیرجند کمک کند (Nias, 2021).

یافته های این پژوهش نشان داد که پوشش گیاهی علاوه بر ارزش های زیست محیطی شناخته شده، نقشی کلیدی در تعدیل آلودگی صوتی ایفا می کند. پوشش متراکم گیاهی با ایجاد موانع فیزیکی و جذب امواج صوتی، مانع از گسترش آلودگی صوتی در محیط شهری می شود. این موضوع از منظر مدیریت شهری پایدار اهمیت ویژه ای دارد، زیرا توسعه فضای سبز می تواند به طور هم زمان کیفیت زندگی ساکنان را ارتقا داده و فشار ناشی از آلاینده های صوتی بر سلامت عمومی را کاهش دهد. مقایسه نقشه پراکنش پوشش گیاهی (نقشه شاخص NDVI) و طبقات شدت پوشش گیاهی با نقشه های آلودگی صوتی نشان داد که مناطقی با تراکم بالاتر فضای سبز - به ویژه در جنوب و جنوب غربی شهر - دارای شدت آلودگی صوتی کمتری هستند. این یافته کارکرد دوگانه فضای سبز را برجسته می سازد: از یک سو ارتقای کیفیت زیست محیطی و منظر شهری، و از سوی دیگر کاهش آلاینده های محیطی نظیر آلودگی صوتی. در مقابل، کمبود پارک ها و فضای سبز در بخش های شمالی و مرکزی شهر نه تنها دسترسی شهروندان به فضاهای تفریحی را کاهش داده، بلکه با افزایش نسبی آلودگی صوتی در این مناطق نیز همراه بوده است.

1- Cupressus sempervirens

2- Ulmus pumila

3- Myrtus communis

4- Euonymus japonicus

جدول ۵- ویژگی‌های گیاهان مناسب برای کاهش آلودگی صوتی بر اساس نقش کاهش نویز و سازگاری با اقلیم

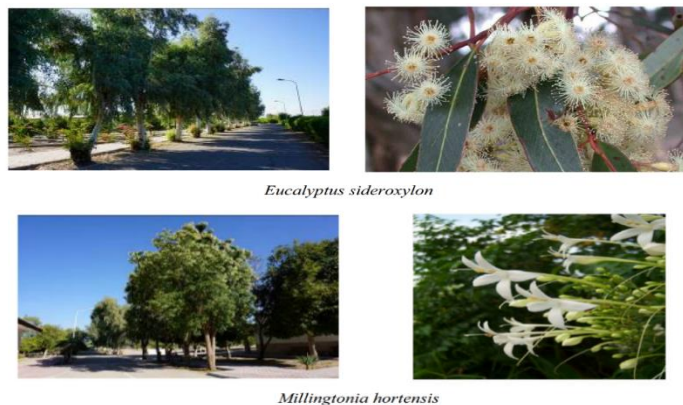
Table 5- Characteristics of Plant Species Suitable for Noise Pollution Reduction Based on Noise Attenuation Role and Climate Adaptability

گونه گیاهی Plant Species	نوع Type	نقش اصلی در کاهش صدا Main Role in Noise Reduction	مقاومت به خشکی Drought Resistance	محل کاشت مناسب Suitable Planting Location
سرو شیرازی (Cupressus sempervirens) (var. pyramidalis)	درخت سوزنی Coniferous Tree	جذب و شکستن صداهای بلند Absorbs and Breaks Loud Noises	خیلی زیاد Very High	حاشیه خیابان‌های شلوغ Busy Street Edges
کاج تهران (Pinus eldarica)	درخت سوزنی Coniferous Tree	دیوار صوتی دائم Permanent Sound Barrier	زیاد High	کنار اتوبان Along Highways
اقاقیا (Robinia pseudoacacia)	درخت پهن برگ Broadleaf Tree	جذب صداهای متوسط Absorbs Medium-Level Sounds	زیاد High	پارک‌ها و فضاهای باز Parks and Open Spaces
نارون چتری (Pendula Ulmus glabra')	درخت پهن برگ Broadleaf Tree	سایه و کنترل بازتاب صدا Provides Shade and Controls Sound Reflection	زیاد High	کنار معابر فرعی Along Secondary Roads
مورد (Myrtus communis)	درختچه Shrub	پر کردن فضای زیرین Fills Understory Space	زیاد High	فضای بین درختان Between Trees
شمشاد نقره‌ای (Buxus sempervirens) (Argentea')	درختچه Shrub	جذب نویز سطحی Absorbs Surface Noise	متوسط به زیاد Medium to High	حاشیه پیاده‌رو Sidewalk Edges
زرشک زینتی (Berberis thunbergii) (Atropurpurea')	درختچه Shrub	تزئینی، خنثی‌سازی صوت Ornamental, Neutralizes Sound	زیاد High	اطراف میدان‌ها Around Squares

ارتباط این موضوع با تغییر اقلیم نیز قابل توجه است. تغییرات دما و کاهش منابع آبی می‌تواند سبب افت کیفیت و تراکم پوشش گیاهی شود و در نتیجه توانایی اکوسیستم‌های شهری در کنترل آلودگی صوتی نیز کاهش یابد. در چنین شرایطی، حفظ و توسعه پوشش گیاهی شهری نه تنها یک راهکار برای مقابله با آلودگی صوتی است، بلکه به عنوان استراتژی سازگاری با تغییر اقلیم نیز اهمیت دارد. ایجاد کمربندهای سبز، توسعه فضاهای سبز شهری و افزایش تراکم گیاهی به‌ویژه در نواحی پرسروصدا، می‌تواند اثرات منفی تغییر اقلیم (از جمله افزایش دما و تشدید جزیره حرارتی شهری) را کاهش داده و تاب‌آوری زیست‌محیطی شهر را ارتقا دهد. همچنین، انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و گرما در طراحی فضاهای سبز، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از این گونه‌ها ضمن تضمین پایداری اکولوژیک فضاهای سبز در شرایط اقلیمی جدید، می‌تواند کارایی بیشتری در کاهش آلودگی صوتی نیز داشته باشد.

انتخاب گونه‌های گیاهی برای فضاهای سبز در مناطق خشک به دلیل محدودیت‌های محیطی بسیار پیچیده است. این فضاها باید بیشترین خدمات را برای ساکنان شهری فراهم کنند.

پژوهش شرافتمند و خسروی (Sharafatmandrad & Khosravi Mashizi, 2025) رویکردی برای انتخاب گونه‌های گیاهی در فضای سبز شهری ارائه کرده است که در آن مجموعه‌ای از خدمات اکوسیستمی (مانند تأمین زیستگاه، ارزش زیبایی‌شناختی و تفریحی) و همچنین آسیب‌های بالقوه (نظیر آسیب به زیرساخت‌ها) به‌طور هم‌زمان وزن‌دهی و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد خدمات حدود ۱/۴ برابر بیشتر از آسیب‌ها بر انتخاب گونه‌ها اثر دارند و ویژگی‌های گیاهی می‌توانند این اثرات را تقویت کنند. ارتفاع درخت بیشترین تأثیر مثبت را بر خدمات داشت، در حالی که پوشش تاج و طول عمر برگ به‌طور مشابه بر خدمات و آسیب‌ها اثر گذاشتند. در نهایت، *Millingtonia hortensis* به‌عنوان مناسب‌ترین و *Eucalyptus sideroxylon* به‌عنوان نامناسب‌ترین گونه شناسایی شد (شکل ۱۴). این رویکرد می‌تواند ابزاری کاربردی برای مدیران شهری در مناطق خشک باشد.



Eucalyptus sideroxylon

Millingtonia hortensis

شکل ۱۴- گونه‌های گیاهی مورد استفاده در فضاهای سبز مناطق شهری با اقلیم خشک

Fig. 14. Plant Species Used in Green Spaces of Urban Areas with Arid Climate (Sharafatmandrad & Khosravi Mashizi, 2025)

مقایسه میانگین شدت نویز بین مناطق مختلف با استفاده از ANOVA یک‌طرفه از طریق افزونه Analysis ToolPak در Excel انجام شد. نتایج ANOVA یک‌طرفه نشان داد که تفاوت میانگین شدت نویز بین مناطق مختلف به‌صورت آماری معنادار است ($p < 0.001$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که شدت نویز در هر منطقه متفاوت است و بنابراین انتخاب گونه‌های گیاهی متناسب با هر سطح شدت صوتی اهمیت بالایی دارد. با توجه به واریانس نسبتاً کم درون گروه‌ها، دقت نتایج نسبتاً بالا است و تفاوت‌های مشاهده‌شده قابل اعتماد می‌باشد. این تحلیل آماری مکمل پیشنهاد گونه‌های گیاهی ارائه‌شده است و مبنای علمی مناسبی برای طراحی و مدیریت فضای سبز شهری در کاهش آلودگی صوتی فراهم می‌کند. این پژوهش نقش مؤثری در طراحی و برنامه‌ریزی شهری، به‌ویژه در توسعه فضاهای سبز شهر بیرجند ایفا می‌کند و اهمیت فضای سبز شهری در بهبود کیفیت محیط و کاهش اثرات منفی شهری را مورد تأکید قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پوشش گیاهی متراکم، به‌ویژه درختان با برگ‌های پهن و شاخه‌های منشعب، می‌توانند در کاهش آلودگی صوتی مناطق مسکونی مؤثر باشند. ایجاد نوارهای سبز چندلایه با ارتفاع‌های متفاوت، همراه با مدیریت ترافیک و زمان‌بندی عبور و مرور، به کاهش نویز شهری کمک شایانی می‌کند و گیاهان با جذب، انعکاس و انسداد صوت، علاوه بر ایجاد آرامش روانی، درک افراد از شدت صدا را کاهش می‌دهند.

نتایج مطالعه صیادی و موفق (Sayadi & Movafagh, 2014)، نشان داد که آلودگی صوتی در مناطق مسکونی از آستانه مجاز فراتر رفته و رابطه مستقیمی با حجم ترافیک دارد. همچنین، پیشنهاد می‌شود که برای کاهش آلودگی صوتی، در طراحی شهری تجدید نظر شده و اقدامات کنترلی مانند محدودسازی تردد در خیابان‌های کم‌عرض و توسعه مسیرهای جایگزین انجام شود. همچنین در پژوهش‌های اخیر در شهرهای اردبیل، سلماس و کرج، استفاده از شاخص‌های سنجش از دور و مدل‌های تحلیلی برای ارزیابی وضعیت و کیفیت فضای سبز شهری مورد توجه قرار گرفته است. در اردبیل، با استفاده از شاخص‌های گراف پایه، اتصال‌پذیری و تغییرات فضایی فضای سبز در مناطق مختلف شهری بررسی شده است (Mostafazadeh, Alaei, Mirchooli & Hussain, 2024). در سلماس، تحلیل تغییرات زمانی و مکانی فضای سبز شهری با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های اکولوژی منظر انجام شده و روند کاهش سرانه فضای سبز در این شهر مشخص شده است (Alaei, Mohammadzadeh, Mostafazadeh & Talebi Khiavi, 2024). همچنین در کرج، ارزیابی کیفیت محیط زیستی با استفاده از شاخص RSEI و تحلیل الگوهای فضایی منظر برای بررسی وضعیت فضای سبز شهری صورت گرفته است (Naseri & Mostafazadeh, 2023). این مطالعات بر اهمیت توزیع فضایی، کیفیت و طراحی استراتژیک فضای سبز شهری در بهبود کیفیت محیط و برنامه‌ریزی پایدار شهری تأکید دارند. در حالی که مطالعات پیشین عمدتاً به تحلیل تراکم و اتصال‌پذیری فضای سبز در شهرهای با اقلیم معتدل یا مرطوب متمرکز بوده‌اند، پژوهش حاضر به بررسی شهر بیرجند با اقلیم خشک و نیمه‌بیابانی اختصاص یافته است؛ شرایطی که انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و استراتژی‌های کاشت بهینه را ضروری می‌سازد. علاوه بر این، استفاده از مدل یادگیری عمیق LSTM، امکان پیش‌بینی تغییرات دمای سالانه تا سال ۲۰۳۵ و ارزیابی اثرات آن بر شدت آلودگی صوتی و کارایی پوشش گیاهی را فراهم کرده است. از این رو، وجه تمایز اصلی این مطالعه در ترکیب تحلیل فضایی، پیش‌بینی اقلیمی و ارزیابی تأثیر پوشش گیاهی بر آلودگی صوتی در شرایط اقلیمی خشک است، که علاوه بر تأیید یافته‌های منابع مرجع، راهکارهای کاربردی و آینده‌نگر برای طراحی شهری پایدار ارائه می‌دهد و به بهبود کیفیت زندگی در مناطق پرتردد شهری کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

شبکه‌های عصبی مصنوعی مانند LSTM با قابلیت پیش‌بینی سناریوهای اقلیمی آینده و شبیه‌سازی روابط غیرخطی، ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی به شمار می‌روند (Shobanke, Bhatt & Shittu, 2025). این فناوری‌ها نه تنها دقت مدل‌سازی اقلیم را ارتقا داده‌اند، بلکه به سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا استراتژی‌های مؤثرتری برای سازگاری با تغییرات اقلیمی طراحی کنند. مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه LSTM، در تقویت تاب‌آوری سیستم‌های زیرساختی و پیش‌بینی دقیق تغییرات دما و رطوبت نقشی کلیدی دارند. این مدل‌ها قادرند روندهای آتی تغییرات اقلیمی را با دقت پیش‌بینی کرده و امکان شناسایی نقاط بحرانی و طراحی شهری سازگارتر با اقلیم را فراهم آورند. پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از مدل LSTM، ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی دقیق تغییرات دما به منظور تحلیل اثرات پوشش گیاهی بر کاهش آلودگی صوتی در مناطق شهری است. نتایج عددی به‌دست‌آمده بیانگر آن بود که توسعه پوشش گیاهی در مناطق با شدت آلودگی صوتی (مانند خیابان‌های پرتردد و نواحی صنعتی) می‌تواند به کاهش قابل توجه سطح آلودگی صوتی در حدود ۱۰ تا ۱۵ دسی‌بل منجر شود. همچنین نتایج نشان داد که افزایش پوشش گیاهی در محیط‌های شهری قادر است میانگین دمای سطحی را تا حدود ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. این یافته‌ها بر نقش حیاتی پوشش گیاهی در ارتقای کیفیت اقلیم شهری و کاهش اثرات نامطلوب تغییرات آب‌وهوایی تأکید دارد. از نقاط قوت این تحقیق می‌توان به به‌کارگیری مدل‌های

یادگیری عمیق برای شبیه‌سازی روابط غیرخطی اقلیمی، ترکیب تحلیل‌های صوتی و اقلیمی، و تمرکز بر شرایط اقلیمی مناطق خشک اشاره کرد که رویکردی نوین در طراحی شهری پایدار ارائه می‌دهد. با این حال، مطالعه حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد؛ از جمله؛ وابستگی مدل به داده‌های محلی و کوتاه‌مدت، عدم لحاظ تمامی متغیرهای محیطی مانند رطوبت خاک و باد، و چالش در تعمیم‌پذیری نتایج به سایر مناطق با اقلیم متفاوت. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج پژوهش اهمیت بالایی استفاده از فضای سبز شهری، به‌ویژه درختان بلند، گونه‌های مقاوم به خشکی و دیوارهای سبز را در کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت اقلیم شهری تأیید می‌کند. برای بهره‌برداری عملی از این نتایج، پیشنهاد می‌شود:

۱. در سیاست‌گذاری‌های شهری، توسعه گونه‌های مقاوم به خشکی در اولویت قرار گیرد تا هزینه‌های نگهداری کاهش یافته و کارایی اکولوژیک فضای سبز افزایش یابد.

۲. طراحی فضاهای سبز با بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی صورت گیرد تا انتخاب گونه‌ها متناسب با تغییرات دمای آینده انجام شود.

۳. مطالعات آینده با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌های کمی یکپارچه توسعه یابند تا دقت تحلیل‌های صوتی و اقلیمی افزایش یابد.

به‌طور کلی، این پژوهش تأکید می‌کند که طراحی فضای سبز شهری نباید صرفاً به جنبه زیبایی‌شناسی محدود شود، بلکه باید به عنوان ابزاری چندمنظوره برای کاهش گرمایش موضعی، تعدیل آلودگی صوتی شهری و ارتقای سلامت روانی ساکنان در نظر گرفته شود. این رویکرد نوین می‌تواند گامی مؤثر در جهت ارتقای تاب‌آوری شهرها در برابر تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در مناطق خشک باشد.

References

- Alaei, N., Mohammadzadeh, F., Mostafazadeh, R., & Talebi Khiavi, H. (2024). Assessing spatiotemporal urban green space per capita and its connectivity in a small size city in Northwest Iran. *GeoJournal*, 89(4), 148. <https://doi.org/10.1007/s10708-024-11159-7>
- Arsalan, M., Chamani, A., & Zamani-Ahmadmoodi, R. (2024). Sustaining tranquility in small urban green parks: A modeling approach to identify noise pollution contributors. *Sustainable Cities and Society*, 113, 105655. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105655>
- Chen, S., He, P., Yu, B., Wei, D., & Chen, Y. (2024). The challenge of noise pollution in high-density urban areas: Relationship between 2D/3D urban morphology and noise perception. *Building and Environment*, 253, 111313. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111313>
- Fallah-Shorshani, M., Yin, X., McConnell, R., Fruin, S., & Franklin, M. (2022). Estimating traffic noise over a large urban area: An evaluation of methods. *Environment International*, 170, 107583. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107583>
- Ganjirad, M., Delavar, M. R., Bagheri, H., & Azizi, M. M. (2025). Optimizing urban critical green space development using machine learning. *Sustainable Cities and Society*, 120, 106158. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106158>
- GR, A. N., & Adarsh, S. (2025). Innovative knowledge-based system for streamflow hindcasting: A comparative assessment of Gaussian Process-Integrated Neural Network with LSTM and GRU models. *Environmental Modelling & Software*, 188, 106433. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106433>

- Guo, Z., & Feng, L. (2024). Multi-step prediction of greenhouse temperature and humidity based on temporal position attention LSTM. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(12), 4907-4934. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02840-x>
- Gupta, B. B., Gaurav, A., Attar, R. W., Arya, V., Bansal, S., Alhomoud, A., & Chui, K. T. (2024). Advance drought prediction through rainfall forecasting with hybrid deep learning model. *Scientific Reports*, 14(1), 30459. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80099-6>
- Helbich, M., Hagenauer, J., Burov, A., & Dzhambov, A. M. (2025). Traffic noise assessment in urban Bulgaria using explainable machine learning. *Sustainable Cities and Society*, 120, 106169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106169>
- Iran Meteorological Organization (IRIMO). (2020). *Climatological Yearbook of Synoptic Stations of Iran (1988–2018)*. Tehran: Research and Technology Deputy, IRIMO.
- Li, J., & Heap, A. D. (2008). *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Geoscience Australia, 137.
- Madhavi, M., Kolikipogu, R., Prabakar, S., Banerjee, S., Maguluri, L. P., Raj, G. B., & Balaram, A. (2024). Experimental evaluation of remote sensing-based climate change prediction using enhanced deep learning strategy. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 7(4), 642-656. <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00152-w>
- Mahmoudzadeh, H., Abedini, A., Aram, F., & Mosavi, A. (2024). Evaluating urban environmental quality using multi criteria decision making. *Heliyon*, 10(3), e24921. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24921>
- Maleki, K., & Hosseini, S. M. (2011). Investigation of the effect of leaves, branches and canopies of trees on noise pollution reduction. *Annals of Environmental Science*, 5(1), 3. <https://openjournals.library.northeastern.edu/aes/journal/article/view/v5art3>
- Mostafazadeh, R., Alaei, N., Mirchooli, F., & Hussain, S. (2024). Changes in urban green space configuration and connectivity using spatial graph-based metrics in Ardabil developing city, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9), 778. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12922-6>
- Munandar, T. A., & Surbakti, H. (2025). Hybrid deep learning for climate prediction with Temporal, Spatial, and environmental data. *International Journal of Information Technology*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s41870-025-02509-w>
- Naseri, N., & Mostafazadeh, R. (2023). Spatial relationship of Remote Sensing Ecological Indicator (RSEI) and landscape metrics under urban development intensification. *Earth Science Informatics*, 16(4), 3797-3810. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01119-z>
- Nias, M. (2021). *Assessment and modeling of the relationship between land use and noise pollution in Shiraz city*. (Master's thesis). Environmental Science and Engineering (Land use Planning), Isfahan University of Technology, Faculty of Natural Resources. [In Persian]
- Razavi-Termeh, S. V., Sadeghi-Niaraki, A., Yao, X. A., Naqvi, R. A., & Choi, S. (2024). Assessment of noise pollution-prone areas using an explainable geospatial artificial intelligence approach. *Journal of Environmental Management*, 370, 122361. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122361>
- Reyes-Avila, A. D., & Baxter, R. A. (2024). Assessment of urbanization impacts in Tegucigalpa urban greenness via normalized difference vegetation index. *Trees, Forests and People*, 18, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100680>
- Sayadi, M. H., & Movafagh, A. (2014). Assessment of noise pollution in Birjand using statistical techniques and GIS. *Environmental Studies Quarterly*, 40(3), 693–710. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jes.2014.52214>

- Sharafatmandrad, M., & Khosravi Mashizi, A. (2025). Plant species selection for urban green spaces in arid lands: a new approach using ecosystem services and disservices. *Landscape and Ecological Engineering*, 21(1), 47-64. <https://doi.org/10.1007/s11355-024-00624-7>
- Shobanke, M., Bhatt, M., & Shittu, E. (2025). Advancements and future outlook of Artificial Intelligence in energy and climate change modeling. *Advances in Applied Energy*, 17, 100211. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2025.100211>
- Statistical Center of Iran. (2020). *Statistical Yearbook of South Khorasan Province*. Birjand: Management and Planning Organization of South Khorasan.
- Vo, T. Q., Kim, S. H., Nguyen, D. H., & Bae, D. H. (2023). LSTM-CM: a hybrid approach for natural drought prediction based on deep learning and climate models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(6), 2035-2051. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02378-w>
- Yang, Z., Kwan, M., Liu, D., & Huang, J. (2025). How objective and subjective greenspace, combined with air and noise pollution, impacts mental health through the mediation of physical activity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 105, 128683. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128683>