Original Article

Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)

Winter 2025, Vol. 3, Special Issue, pp 1-16

10.22077/jdcr.2025.9043.1126

Investigating The Effects of Climate Change and Dust Storms on The Health and Sustainability of The Zagros Forest Ecosystem

Majid Pato[1,*], Sohrab Moradi[2], Jalal Henareh[1]

1. Assistant Professor, Department of Forestry and Rangeland Research, Center for Research and Education of Agriculture and Natural Resources of West Azarbaijan Province, Organization of Research, Education and Extension of Agriculture, Urmia, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Agricultural Development and Natural Resources, Faculty of Technology and Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: m.pato@areeo.ac.ir

Keywords:
Dust storm, Drought, Biodiversity, Photosynthesis, Soil erosion.

Received:
06 March 2025

Revised:
25 March 2025

Accepted:
09 April 2025

Introduction

The Zagros forests, with an area of about 6 million hectares in the western and southwestern regions of Iran, are one of the most important natural filters or lungs of Iran against the phenomenon of dust storms. These forests, as the largest and most important forest ecosystem in Iran, have recently been affected by two major threats: climate change and dust storms. Research conducted so far has mainly focused on identifying the overall impacts of climate change on Zagros forest ecosystems, but there is no comprehensive analysis of how these threats persist and their chain consequences on ecosystem structure, vital services, and new vulnerabilities in this regard on the vegetation cover of this region. Thus, this study aims to examine the simultaneous impacts of climate change and dust storm phenomena on the stability and health of these forests.

Through this comparative evaluation, the study seeks to highlight the strengths and limitations of each algorithm and deliver actionable insights for water-resource managers tasked with mitigating long-term aquifer depletion

How to cite this article:
Pato, M., Moradi, S., & Henareh, J. (2025). Investigating the effects of climate change and dust storms on the health and sustainability of the Zagros forest ecosystem. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, *3* (Special Issue), 1-16. 10.22077/jdcr.2025.9043.1126.

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Materials and Methods

A 15-year monthly dataset (2000–2014) was assembled using observations from six precipitation stations, three temperature stations, groundwater abstraction records from 591 operational wells and qanats, and water-table measurements from 33 piezometric wells across the plain. Spatial averages of climatic variables were computed using the Thiessen polygon method, ensuring representation of spatial heterogeneity. The input matrix combines climatic, hydrological, and anthropogenic variables known to influence groundwater fluctuations in the semiarid Shahrood aquifer. The five machine learning models were calibrated under a systematic grid-search procedure to determine optimal hyperparameters. Model performance was evaluated using MAE, RMSE, and r to capture both magnitude-based and pattern-based predictive capability. This design enables fair assessment of contrasting modeling philosophies: tree-based boosting (XGBoost, CatBoost), instance-based learning (KNN), margin-based regression (SVR), and recursive partitioning (DT) under identical data and validation conditions.

Results and Discussion

Groundwater levels showed a continuous declining trend over the study period, dropping from 1326.48 m in 2000 to 1315.68 m in 2014, an overall decline of 10.8 m, averaging 0.77 m per year. This pattern reflects the combined influence of insufficient recharge, reduced precipitation, rising temperatures, and intensifying extraction for agriculture, domestic use, and industry.

The model comparison demonstrated the clear superiority of gradient boosting methods. CatBoost achieved the lowest prediction error (MAE = 1.4029 m; RMSE = 1.9484 m), while XGBoost produced the strongest linear agreement with observed water-table fluctuations (r = 0.8185). Both algorithms outperformed classical models by a substantial margin, reducing RMSE by approximately 25–35% relative to DT, SVR, and KNN. The Decision Tree model exhibited limited accuracy (RMSE = 2.779 m; r = 0.6701), reflecting its inability to generalize under nonlinear, multivariate interactions. SVR provided slightly better pattern reproduction (r = 0.6903) but higher errors (RMSE = 2.6995), suggesting difficulty in capturing nonlinearities and noise-driven variability. KNN performed the weakest (RMSE = 2.8617 m; r = 0.5799), likely due to high sensitivity to noisy, heterogeneous hydro-climatic data. Overall, boosting algorithms' ensemble structure and capacity to model complex nonlinearities allowed them to reproduce both long-term declining trends and short-term fluctuations more accurately than traditional learners. The performance gap confirms that aquifer systems characterized by strong climatic–anthropogenic coupling benefit from high-capacity, ensemble-based predictors.

Conclusion

The extended comparative analysis demonstrates that machine learning, particularly gradient boosting algorithms, provides a reliable, scalable framework for modeling groundwater level changes in arid and semi-arid regions. XGBoost and CatBoost consistently outperformed classical models, achieving lower errors and higher correlation with observed groundwater levels. Their predictive strength arises from their ability to capture nonlinear interactions among climatic variables, extraction rates, and return flows interactions that simpler methods fail to fully represent.

The findings emphasize that boosting models can be integrated into groundwater monitoring systems to inform extraction control, evaluate climate-change impacts, and support sustainable aquifer management. These models offer practical value for policymakers by enabling early detection of critical declines and providing operational decision support for regulating pumping and designing recharge interventions. Limitations include the absence of land-use, soil, and hydraulic-property data, and the inability to incorporate deep multi-temporal dependencies that recurrent networks (e.g., LSTM) could capture. Future research should explore hybrid and deep-learning architectures, incorporate uncertainty quantification, and expand datasets using remote-sensing inputs. Nevertheless, the main implication is clear: ensemble-based machine learning is a powerful, cost-effective tool for predicting groundwater dynamics and guiding sustainable water-resource planning in data-limited, climatically stressed aquifers.

مقاله پژوهشی

مجله
پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم

دوره سوم، ویژه‌نامه، زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۱۶-۱

10.22077/jaaq.2025.10441.1132

بررسی اثرات تغییرات اقلیمی و ریزگردها بر سلامت و پایداری بوم‌سازگان جنگلی زاگرس

مجید پاتو[۱*]، سهراب مرادی[۲]، جلال هناره[۱]

۱- استادیار، بخش تحقیقات جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.

۲- استادیار گروه توسعه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: m.pato@areeo.ac.ir

واژه‌های کلیدی:
طوفان ریزگرد، خشکسالی، تنوع زیستی، فتوسنتز، فرسایش خاک.

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۱۲/۱۵

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۱/۱۹

چکیده

جنگل‌های زاگرس، به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین بوم‌سازگان جنگلی ایران، در سال‌های اخیر تحت‌تأثیر دو پدیده خطرناک، یعنی تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد، قرار گرفته‌اند. این پژوهش باهدف بررسی تأثیرات هم‌زمان این دو پدیده بر پایداری و سلامت این جنگل‌ها انجام‌شده است. برای این منظور منابع علمی معتبر از پایگاه‌هایی مانند Scopus، Web of Science و Google Scholar به‌صورت سامان‌مند بررسی و تحلیل شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش ۱/۵ درجه‌ای دمای هوا و کاهش ۲۰ درصدی بارش‌ها، خشکسالی‌ها را تشدید کرده و رطوبت خاک را تا ۲۵ درصد کاهش داده است. این تغییرات، سلامت گونه‌های اصلی جنگل‌های زاگرس، به‌ویژه بلوط‌ها و دیگر درختان و درختچه‌ها را به‌شدت تهدید می‌کند. از سوی دیگر، طوفان‌های ریزگرد با کاهش ۳۰ درصدی نور خورشید، فرایند فتوسنتز را مختل کرده و فرسایش خاک را تا ۱۸ درصد افزایش داده‌اند. این عوامل، در کنار هم تأثیرات مخربی بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس داشته‌اند، به‌طوری که تنوع زیستی تا ۲۵ درصد و ظرفیت ذخیره‌سازی کربن تا ۱۸ درصد کاهش‌یافته است. همچنین، عملکردهای حیاتی بوم‌سازگان، مانند تنظیم چرخه آب و تثبیت خاک، به‌شدت تضعیف شده‌اند. ادامه این روند می‌تواند ساختار بوم‌سازگان جنگلی زاگرس را تغییر داده و آن را در برابر آفات و بیماری‌ها آسیب‌پذیرتر کند. برای مقابله با این چالش‌ها، راهکارهایی مانند مدیریت بهینه منابع آب، کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی و احیای پوشش گیاهی بومی پیشنهاد شده است. این پژوهش بر ضرورت اقدامات فوری و مؤثر برای حفاظت و احیای جنگل‌های زاگرس تأکید می‌کند.

مقدمه

جنگل‌ها و فضای سبز به‌عنوان یک صافی[1] در مقابل ریزگردها عمل می‌کنند و بخش زیادی از آن را از هوا جذب می‌کنند؛ بنابراین بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌نوعی سبب تصفیه هوا می‌شوند. جنگل‌های زاگرس با مساحتی حدود ۶ میلیون هکتار در مناطق غرب و جنوب غرب ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین صافی‌های طبیعی یا همان ریه‌های ایران در مقابل این پدیده هستند. اما متأسفانه بخش‌های قابل‌توجهی از آن‌ها طی سال‌های گذشته تخریب شده‌اند. علی‌رغم هجوم ریزگردها به جنگل‌های زاگرس و نقش بسیار مهم این بوم‌سازگان‌های ارزشمند در تصفیه هوا و جذب ریزگرد تاکنون پژوهش‌های اندکی در زمینه ارزیابی مقدار جذب ریزگردها توسط گونه‌های مختلف جنگلی و اثرات مضر آنها در این مناطق انجام شده‌اند. بااین‌حال بررسی ترکیبات شیمیایی و فیزیکی ریزگردها به‌منظور منشأیابی و تعیین عناصر مضر، مقدار جذب ریزگردها توسط گونه‌های مختلف جنگلی، نحوه و مقدار تأثیر آنها بر درختان و نیز اثر وجود جنگل بر ریزگردها بسیار ضروری است (Moradi et al., 2021). این جنگل‌ها که عمدتاً از بلوط ایرانی (*Quercus persica*) و گونه‌های مقاوم به خشکی تشکیل شده‌اند، در مناطق کوهستانی غرب کشور نقشی کلیدی در حفظ منابع آبی، تثبیت خاک و تعادل اقلیمی دارند. این زیست‌بوم‌ها سالانه حدود ۴۰ درصد از آب کشور را تأمین می‌کند و به‌عنوان سپری طبیعی در برابر فرسایش و بیابان‌زایی عمل می‌نمایند (Qorbani Salkhord et al., 2012). بااین‌حال، در دهه‌های اخیر، این جنگل‌ها با تهدیدات جدی مواجه شده‌اند. تغییرات اقلیمی، با افزایش میانگین دمای سالانه به میزان ۱/۵ درجه سلسیوس و کاهش ۲۰ درصدی بارش‌ها طی ۳۰ سال گذشته، خشکسالی‌ها را تشدید کرده و رطوبت خاک را کاهش داده است (Soltani et al., 2020). در کنار آن، طوفان‌های ریزگرد که اغلب از بیابان‌های عراق و سوریه منشأ می‌گیرند و در برخی سال‌ها بیش از ۱۵ رویداد شدید دارند، با کاهش نور و افزایش فرسایش خاک، کارکردهای بوم‌سازگان را تضعیف کرده‌اند (Azizi et al., 2015).

سراب و همکاران (Sarab et al., 2022) کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و اختلال در ریشه‌زایی درختان را به خشکسالی‌ها نسبت داده‌اند. خشکسالی یکی از مضرترین و از لحاظ اقتصادی، اجتماعی، کالبدی و محیط زیستی زیان‌بارترین بلای طبیعی به شمار می‌رود که در هر نوع آب‌وهوایی امکان وقوع آن وجود دارد و آثار زیان‌بار آن به‌مراتب گسترده‌تر و عمیق‌تر از دیگر بلای طبیعی است (Hajarian, 2025). فخار و نظری (۲۰۲۳) نیز در بررسی خود با عنوان پایش و ارزیابی ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی در ایران در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از سنجش از دور دریافتند که خشکسالی در کشور در سال‌های اخیر در حال افزایش است و مناطقی در جنوب شرقی و مرکزی کشور بیشتر در معرض خطر قرار دارند و اقدامات فوری در زمینه مدیریت منابع آبی، کشاورزی پایدار و اقتصاد سبز را ضروری دانستند (Fakhar & Nazari, 2024). عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2015) منشأ بیشتر ریزگردهای غرب کشور را خارج از مرزهای ایران دانسته، و افزایش شوری خاک و افت کیفیت آن را به ذرات موجود در ریزگردها بیان نموده‌اند. باوقار (Bavaghar., 2012) نشان داد که افزایش تبخیر، تعادل آبی جنگل‌ها را بر هم زده است. نوروزی و می‌ری (Noroozi & Miri., 2015) دمای سطح زمین را از مؤلفه‌های مهم اقلیم در هر منطقه و کنترل‌کننده فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و محیط‌زیستی بر روی زمین دانسته و اندکی تحت‌تأثیر عواملی همچون بازتاب سطحی و انواع مختلف کاربری، پوشش اراضی، وضعیت توپوگرافی، موقعیت جغرافیایی بیان نموده‌اند که همین عوامل در بروز و ایجاد طوفان‌های ریزگرد نقش به سزایی دارند. ادب و همکاران (Adab et al., 2014) افت ۲۰ درصدی زیست‌توده را به اختلال فتوسنتز ناشی از ریزگردها نسبت داده‌اند. کوه سلطانی و همکاران (Kooh Soltani et al., 2018) نیز کاهش خدمات بوم‌سازگانی مانند تولید اکسیژن را تأیید کرده‌اند. شاهسونی و همکاران (Shahsavani et al., 2012) کاهش ۲۵ درصدی تنوع زیستی را به اثر هم‌زمان این عوامل (تغییر اقلیم و ریزگردها) مرتبط دانسته‌اند که پیچیدگی این تعامل را

[1] Filter

نشان می‌دهد و همچنین کاهش ۳۰ درصدی سلامت درختان جنگلی را مربوط به افزایش درجه‌حرارت گزارش کرده‌اند. تأثیرات گوناگون تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف تولیدی، محیط‌زیستی و جوامع انسانی سبب شده از آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست و یکم یاد شود (Arvandi, 2024). پژوهش‌های انجام شده تاکنون عمدتاً بر شناسایی کلی تأثیرات تغییر اقلیم بر بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس متمرکز شده‌اند، اما تحلیل جامعی از چگونگی تداوم این تهدیدات و پیامدهای زنجیره‌ای آن‌ها بر ساختار بوم‌سازگان، خدمات حیاتی و آسیب‌پذیری‌های جدید در این زمینه بر روی پوشش گیاهی این منطقه وجود ندارد. مطالعات چند سال اخیر تأثیر تغییر اقلیم بر جنگل‌ها را به‌صورت کلی بررسی کرده‌اند، اما سازوکار دقیق تغییرات ساختاری (مانند تغییر در ترکیب گونه‌ها، تراکم پوشش گیاهی یا تعادل اکولوژیک) به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های حساسی مانند زاگرس کمتر تحلیل شده است.

هدف این مطالعه، بررسی علمی اثرات مشترک تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر پایداری بوم‌سازگان جنگلی زاگرس، تحلیل پیامدهای آن‌ها بر سلامت گونه‌ها، تنوع زیستی و کارکردهای اکولوژیکی و ارائه راهکارهای عملی برای کاهش این تهدیدات و حفاظت از این میراث طبیعی است.

مواد و روش‌ها

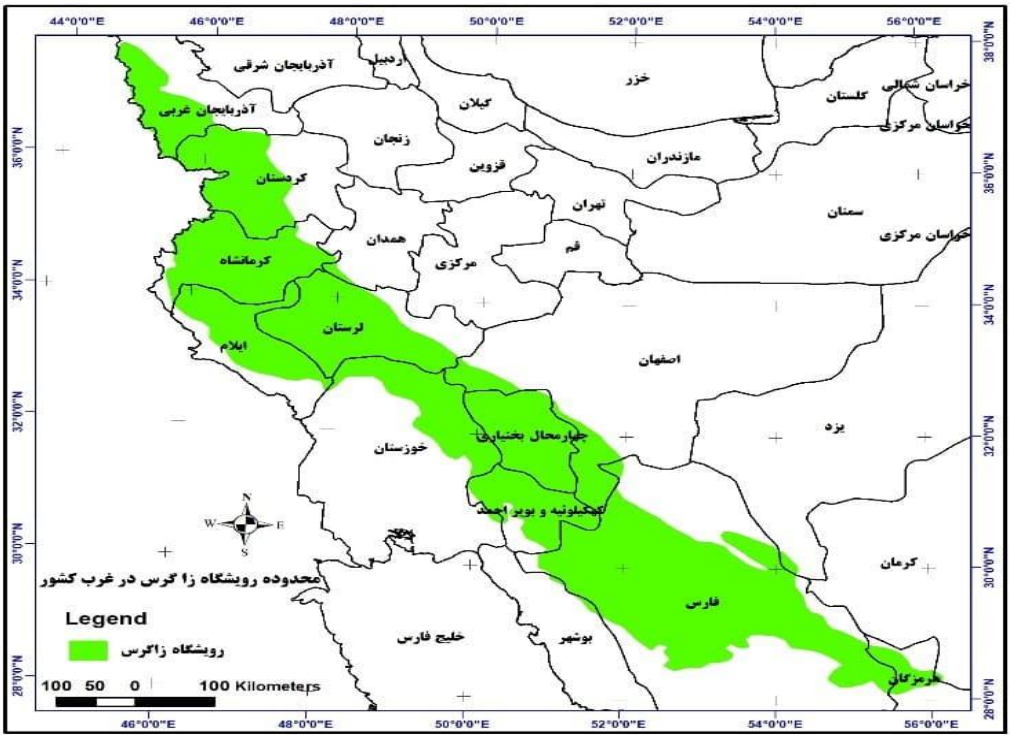
این پژوهش به‌صورت مروری و باهدف بررسی هم‌زمان تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس انجام شد. منطقه مورد مطالعه، جنگل‌های زاگرس، با مساحتی حدود ۶ میلیون هکتار در غرب ایران واقع شده و یکی از بزرگ‌ترین بوم‌سازگان‌های کوهستانی نیمه‌خشک به شمار می‌رود (شکل ۱). این جنگل‌ها که عمدتاً از گونه‌های بلوط ایرانی (Quercus persica) تشکیل شده‌اند، به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خود، در معرض تنش‌های محیطی متعدد قرار دارند (Qorbani Salkhord et al., 2012). داده‌ها از طریق مرور نظام‌مند منابع علمی گردآوری شدند. جستجوی جامع در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر شامل Scopus، Web of Science، Science Direct، Springer Link و Google Scholar انجام شد. واژه‌های کلیدی جست‌وجو شامل «تغییرات اقلیمی»، «طوفان‌های ریزگرد»، «جنگل‌های زاگرس»، «خشکسالی»، «فرسایش خاک»، «تنوع زیستی» و «پایداری بوم‌سازگان» بودند که به‌صورت ترکیبی و با عملگرهای منطقی AND و OR استفاده شد. با استفاده از عملگر AND، می‌توانید چندین کلیدواژه را به هم متصل کرد. عملگر OR نیز این امکان را می‌دهد تا بین چندین گزینه جستجو نمود. این عملگرها کمک می‌کنند تا جستجوها دقیق‌تر و مؤثرتر انجام شود و کاربران نتیجه بهتری از جستجوی اطلاعات داشته باشند.

منابع بر اساس معیارهای انتشار در مجلات علمی معتبر یا اجلاس‌های بین‌المللی طی بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ برای تضمین به‌روز بودن، ارائه داده‌های تجربی، تحلیلی یا مدل‌سازی مرتبط با موضوع و استفاده از روش‌های علمی مانند تحلیل‌های آماری، مدل‌های اقلیمی یا مطالعات میدانی انتخاب شدند. پس از جستجوی اولیه، ۱۱۲ منبع شناسایی شد که با غربالگری بر اساس معیارهای فوق، ۴۵ مقاله و گزارش نهایی انتخاب شدند. فرایند تحلیل‌ها در چهار مرحله شامل: الف) اطلاعات کمی (مانند تغییرات دما، تغییرات و شاخص‌های تنوع زیستی) و کیفی (مانند زیست‌محیطی و راهکارها) از منابع؛ ب) دسته‌بندی تغییرات اقلیمی (افزایش دما، کاهش باش) و ریزگردها (فرسایش خاک، کاهش فتوسنتز) به‌صورت مجزا؛ ج) بررسی هم‌افزای این عوامل بر کارکردهای بوم‌سازگان و د) ارزیابی راهبردهای مدیریتی پیشنهادی در مطالعات انجام شد.

برای انجام تحلیل تطبیقی، از روش‌های آماری توصیفی و بررسی مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی، شامل سناریوهای مسیرهای غلظت نماینده[1] (RCP)، استفاده شد (Petritan et al., 2021). همچنین، مقیاس ریزگردها با استفاده از مدل‌های کاهش تابش نور و تحلیل‌های محیط زیستی ارزیابی گردید (Liang et al., 2014). جزئیات این روش‌ها در منابع اصلی به طور کامل ارائه شده‌اند و از تکرار آن‌ها در اینجا خودداری شده است. برای

[1] Representative Concentration Pathway

اطمینان از اعتبار علمی پژوهش، تنها منابع دارای داوری همتا مورد استناد قرار گرفتند. پژوهش حاضر مبتنی بر داده‌های میدانی بلندمدت در مناطق مختلف زاگرس با تنوع اقلیمی قابل‌توجه انجام شده است که به‌عنوان بخشی از تحلیل‌های پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مطالعه چارچوبی علمی برای ارزیابی وضعیت محیط‌زیست و ارائه راهکارهای عملی و کاربردی در این زمینه فراهم می‌کند.

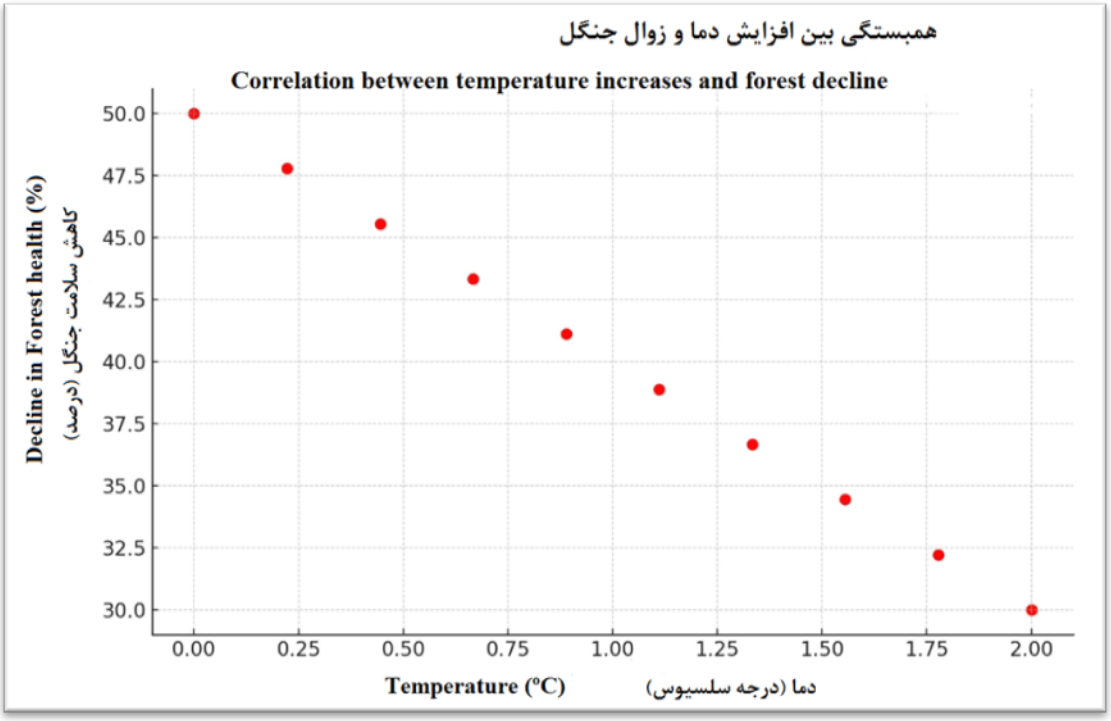


شکل ۱. موقعیت رویشگاه زاگرس در ایران و استان‌های زاگرسی (Mirakhorlou, 2021).

Fig 1. Location of Zagros Habitat in Iran and Zagros Provinces (Mirakhorlou, 2021).

نتایج و بحث

این مطالعه مروری نشان داد که جنگل‌های زاگرس تحت‌تأثیر تغییرات ترکیبی و شدید اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد قرار دارند. تغییرات اقلیمی با افزایش متوسط دمای سالانه به میزان ۱/۵ درجه سلسیوس و کاهش ۲۰ درصدی بارش‌ها در سه دهه گذشته، خشکسالی‌ها را تشدید کرده است (Andersson, et al., 2011). افزایش دما در طول زمان، الگوهای آب و هوا را تغییر داده و تعادل معمول طبیعت را به‌هم می‌زند. این امر، خطرات بسیاری را برای انسان‌ها و سایر اشکال حیات روی زمین به‌همراه دارد (Fakhri, 2024). این شرایط، رطوبت خاک را تا ۲۵ درصد کاهش داده و سطح تبخیر را تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهد که به ضعف سیستم ریشه‌ای گونه غالب (بلوط ایرانی) تبدیل شده است (Ahmadi et al., 2014). یافته‌ها نشان می‌دهند که نرخ رشد سالانه درختان در مناطق متأثر از ۴۰ درصد کاهش و سلامت کلی جنگل‌ها تا ۳۰ درصد کاهش‌یافته است (Sarab et al., 2022). شکل ۲ روند کاهشی سلامت جنگل‌ها را در برابر افزایش دما طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد؛ این شکل، با نمایش درصد سلامت (محور عمودی) در مقابل دمای سالانه (محور افقی)، کاهش سلامت را از ۸۵ درصد به ۵۵ درصد ارزیابی می‌کند و شکنندگی بوم‌سازگان را در برابر گرمایش برجسته می‌کند.



شکل ۲. هم‌بستگی بین افزایش دما و کاهش سلامت جنگل‌ها (Sarab et al., 2022).

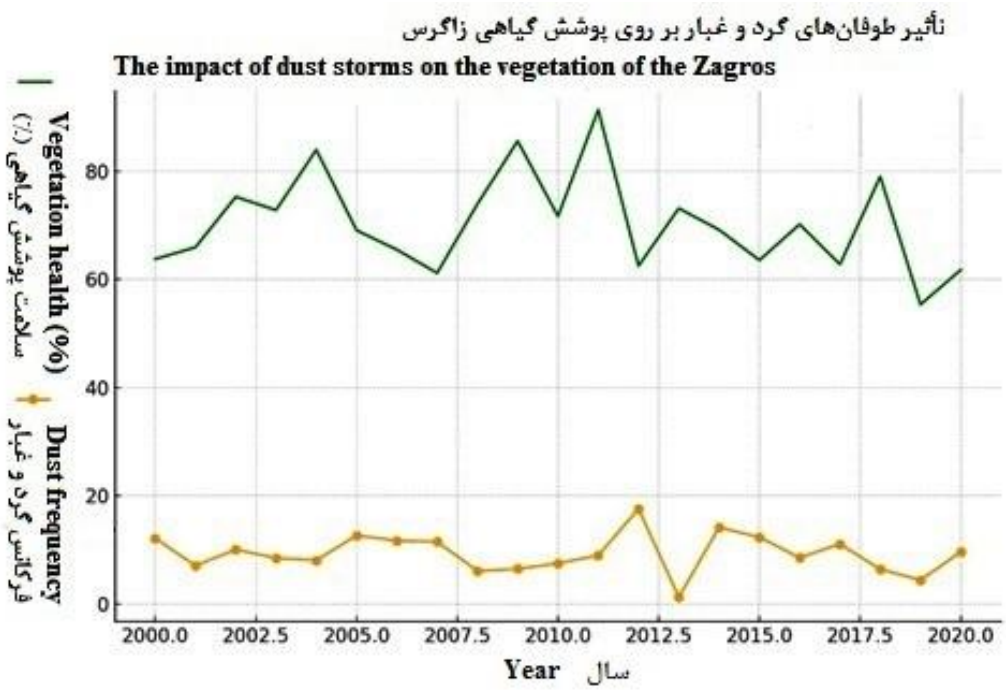
Fig 2. Correlation Between Temperature Increase and Forest Health Decline (Sarab et al., 2022).

در شکل ۲، میزان سلامت جنگل‌ها (درصد) در برابر افزایش دمای سالانه (درجه سلسیوس) طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ ترسیم شده و کاهش از ۳۰٪ به ۵۰٪ را نشان می‌دهد (Sarab et al., 2022).

روند نزولی سلامت جنگل‌ها با افزایش دما بیانگر حساسیت بالای گونه‌های درختی زاگرس به گرمایش جهانی و افت منابع رطوبتی است. بر پایه این رابطه، اتخاذ سیاست‌های کاهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهره‌گیری از گونه‌های مقاوم به تغییرات اقلیمی، بخشی از راهکارهای ضروری برای مهار آثار منفی گرمایش بر بوم‌سازگان زاگرس خواهد بود.

طوفان‌های ریزگرد نیز تأثیر مخرب خود را بر این بوم‌سازگان جنگلی داشته‌اند. این پدیده، با منشأ بیابان‌های عراق و سوریه (Azizi et al., 2015)، نفوذ نور خورشید را تا ۳۰ درصد کاهش داده و فرایند فتوسنتز را مختل کرده است که به کاهش ۲۰ درصدی تولید زیست‌توده منجر می‌شود (Kabrick et al., 2008). افزون بر این، رسوب ذرات ریز، فرسایش خاک را تا ۱۸ درصد افزایش داده و سطح شوری را تا ۱۵ درصد بالا برده است (Adams et al., 2017). شکل ۳ رابطه میان فراوانی سالانه طوفان‌های ریزگرد (از ۵ تا ۱۵ رویداد در سال) و شاخص سلامت پوشش گیاهی (NDVI) را نشان می‌دهد (Rashki et al., 2017).

مطالعات نشان داده‌اند که ریزگردها می‌توانند به طور مستقیم بر سیستم ریشه‌ای درختان تأثیر بگذارند و باعث کاهش توان جذب آب و مواد مغذی توسط گیاهان شوند. همچنین، پدیده ریزگردها می‌تواند موجب بروز اختلالات در فرایندهای زیستی؛ مانند تولید اکسیژن، جذب کربن و تنظیم آب‌وهوا در سطح منطقه شود. ازاین‌رو، تهدید ریزگردها به‌عنوان یک عامل مهم در آسیب به بوم‌سازگان جنگلی است (Matinfar, 2014).



شکل ۳. رابطه طوفان‌های ریزگرد و سلامت پوشش گیاهی زاگرس (Rashki et al., 2017).

Fig 3. The relationship between dust storms and the health of Zagros vegetation (Rashki et al., 2017).

شکل (۳) به رابطه ریزگرد روی پوشش گیاهی منطقه زاگرس طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ پرداخته است. روند تغییر پوشش گیاهی نشان می‌دهد که در اوایل دوره، میزان پوشش گیاهی در سطح نسبتاً بالاتر قرار گرفته است و در سال‌های ابتدایی دهه ۲۰۰۰ سلامت نسبی را تجربه کرده است. بااین‌حال، از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵، نوسانات محسوسی در پوشش گیاهی مشاهده می‌شود که دوره‌های افزایش و کاهش متوالی را نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۱۵، پوشش گیاهی روند کاهشی را تجربه کرد. در بررسی فراوانی ریزگرد، مشاهده می‌شود که میزان این پدیده در اوایل دوره نسبتاً پایین بوده است، اما در برخی از سال‌ها افزایش چشمگیری داشته است. بیشترین میزان ریزگرد در حدود سال ۲۰۱۲ ثبت شده است که یک دوره با فراوانی بالای طوفان‌های ریزگردی را نشان می‌دهد.

پس از این سال، نوساناتی در مقدار ریزگرد وجود داشته است، اما روند مشخصی از افزایش یا کاهش در طول مدت مشاهده نمی‌شود.

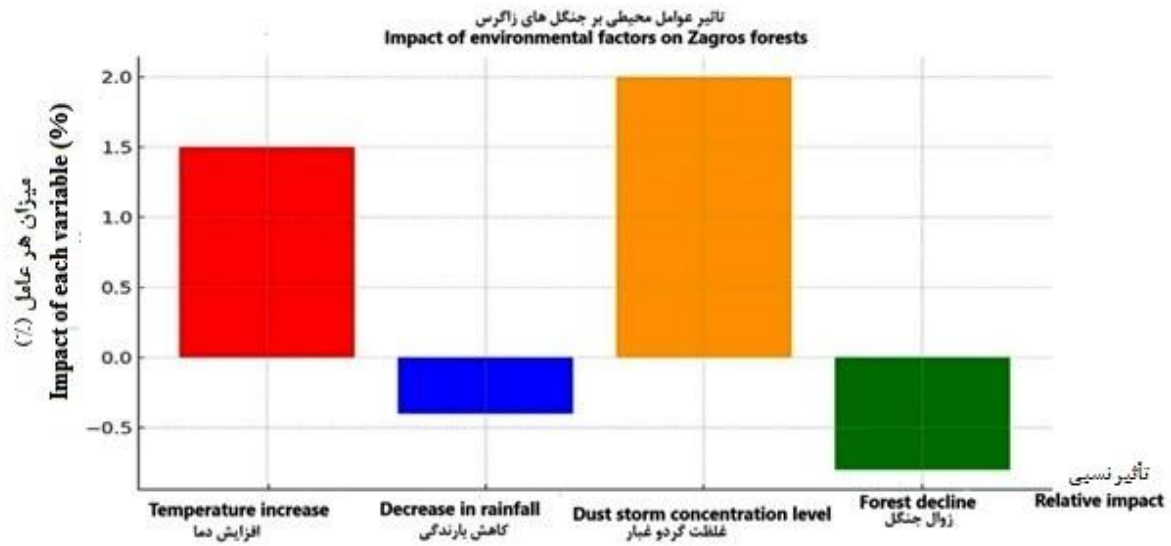
اثرات هم‌زمان تغییرات اقلیمی و ریزگردها

اثر هم زمان دو عامل تغییرات اقلیمی و ریزگردها، هم‌افزایی شدید را به دنبال دارد.

تنوع زیستی در مناطق متأثر تا ۲۵ درصد کاهش‌یافته و تعداد گونه‌های گیاهی حساس از ۴۵ به ۳۴ گونه افت کرده است (Soleymani et al., 2021). ظرفیت ذخیره کربن نیز تا ۱۸ درصد کاهش‌یافته و میزان جذب سالانه CO_2 از ۱۲ تن به ۹ تن در رشد رسیده است (Ashena et al., 2019).

شکل ۴ سهم عوامل اصلی ناشی از تغییرات اقلیمی اصلی را مقایسه می‌کند؛ این شکل، با نمایش میزان شدت تأثیر هر عامل نشان می‌دهد.

شکل ۴، تأثیر نسبی هر عامل را مقایسه می‌کند و نشان می‌دهد که کدام تغییرات محیطی بیشترین آسیب را به جنگل‌های زاگرس وارد می‌کنند که نیاز به توجه و مدیریت فوری دارد.



شکل ۴. تأثیرات عوامل محیطی بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس (Soleimani et al., 2020).

Fig 4. The Effects of Environmental Factors on Zagros Forest Ecosystems (Soleimani et al., 2020).

افزایش دما: نمودار یک هم‌بستگی مثبت بین افزایش دما و زوال جنگل را نشان می‌دهد که نشان می‌دهد دماهای بالاتر باعث تشدید استرس بر بوم‌سازگان جنگل می‌شوند.

کاهش بارندگی: کاهش بارش به‌عنوان عاملی که سلامت جنگل را تحت‌تأثیر منفی قرار می‌دهد، نشان داده شده است. این کاهش می‌تواند باعث کاهش تراکم پوشش گیاهی و افزایش آسیب‌پذیری جنگل در برابر سایر عوامل استرس‌زای محیطی شود.

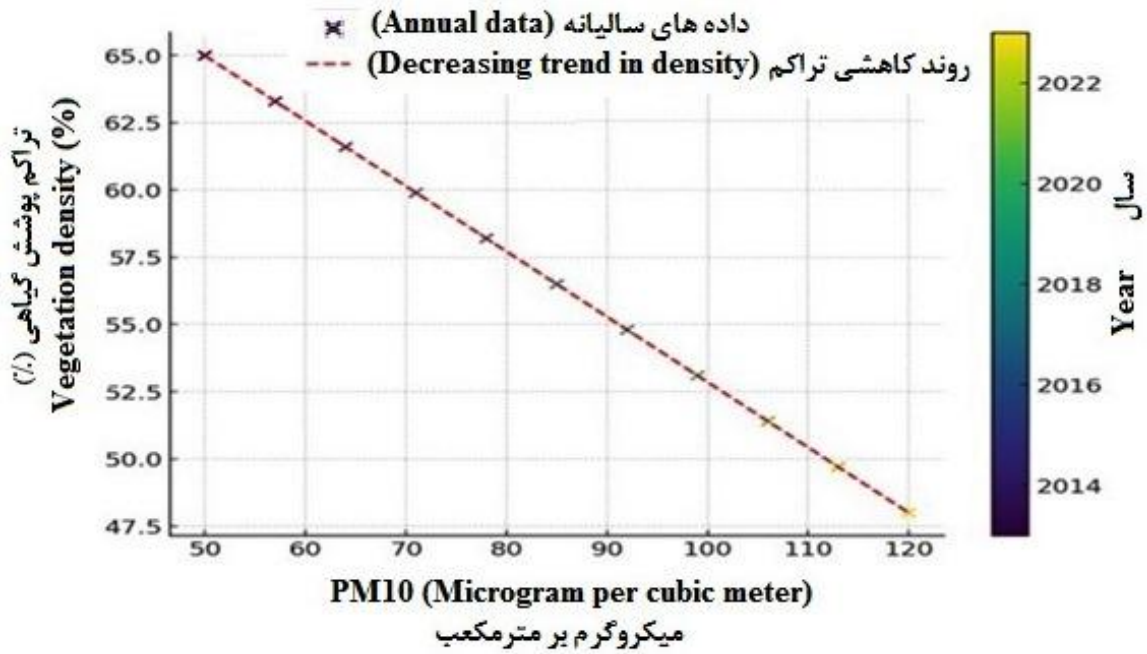
غلظت طوفان‌های ریزگرد: سطوح بالای غلظت ریزگرد به‌عنوان عاملی که به تخریب جنگل کمک می‌کند، نشان‌داده‌شده است، این پدید با تأثیر منفی بر فرایندهای حیاتی گیاهان مانند فتوسنتز و تنفس، سلامت جنگل را تهدید می‌کند.

زوال جنگل: تأثیر تجمعی این عوامل منجر به کاهش قابل‌توجه سلامت جنگل می‌شود که با یک‌روند نزولی در داده‌ها نشان داده شده است.

شکل ۵، کاهش تراکم پوشش (۶۵٪ به ۴۷٪) در برابر افزایش PM_{10} (۵۰ به ۱۲۰ $\mu g/m^3$) طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد (Koch et al., 2019). در شکل ۵ محور افقی نشان‌دهنده غلظت PM_{10} (میکروگرم بر مترمکعب) و محور عمودی تراکم پوشش گیاهی (درصد)، کاهش تراکم از ۶۵ درصد در سال ۲۰۱۴ به حدود ۴۷ درصد در سال ۲۰۲۲ را در برابر افزایش غلظت PM_{10} از ۵۰ به ۱۲۰ میکروگرم بر مترمکعب نشان می‌دهد. این رابطه منفی، با ضریب هم‌بستگی ۰/۷۸-، بیانگر تأثیر مستقیم ذرات معلق بر کاهش پوشش گیاهی است (Koch et al., 2019).

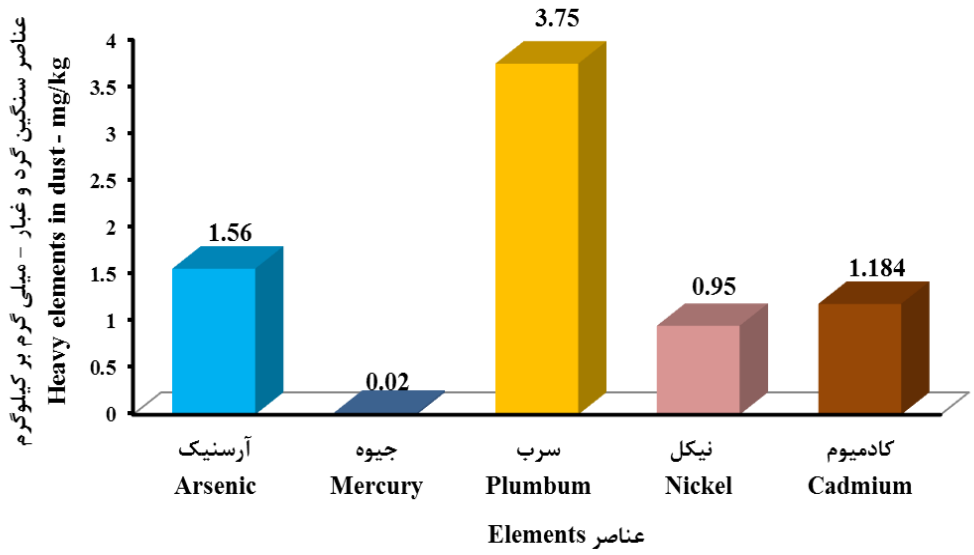
داده‌ها حاکی از آن است که در سال‌هایی با فراوانی طوفان‌های ریزگرد بالاتر (بیش از ۱۲ رویداد در سال)، تراکم پوشش، گیاهی تا ۱۰ درصد اضافی کاهش‌یافته و ضخامت لایه ریزگرد روی برگ‌ها افزایش‌یافته که فتوسنتز را مختل کرده است. این یافته‌ها، همراه با افت ۱۵ درصدی کیفیت خاک در این دوره، شکنندگی بوم‌سازگان زاگرس را در برابر ریزگردها تأیید می‌کند و بر ضرورت اقدامات حفاظتی تأکید دارد (Ashena et al., 2019).

این نمودار به‌وضوح نشان می‌دهد که افزایش میزان PM_{10} در هوا با کاهش تراکم پوشش گیاهی همراه است. این یافته اهمیت کاهش آلودگی هوا و واپایش منابع انتشار ریزگرد و آلاینده‌ها را برای حفظ اکوسیستم‌های گیاهی، به‌ویژه در مناطقی مانند زاگرس که دارای پوشش گیاهی حساس است، نشان می‌دهد. این روند کاهشی که با خط‌چین قرمز نشان‌داده‌شده، بیانگر یک رابطه منفی‌بین افزایش PM_{10} و کاهش پوشش گیاهی است.



شکل ۵. تغییرات تراکم پوشش گیاهی در غلظت PM10 (Koch et al., 2019).

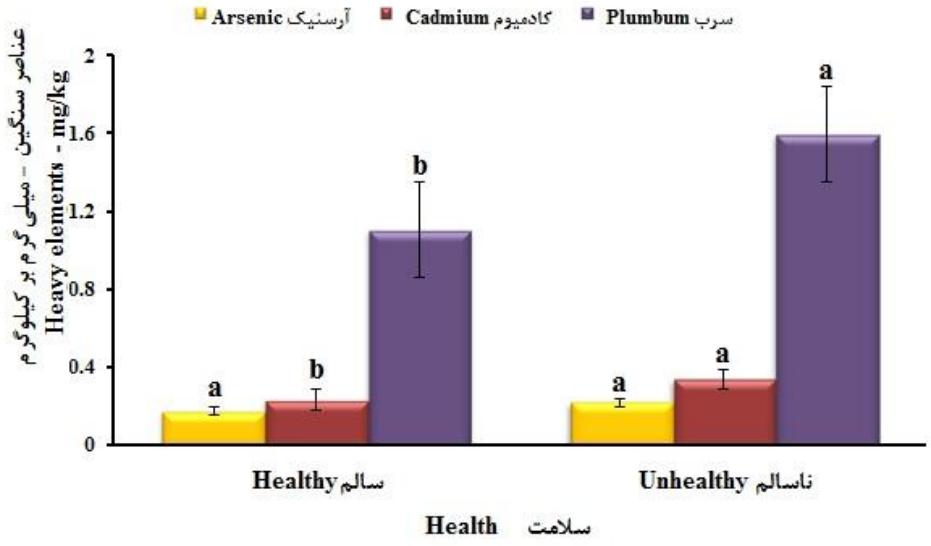
Fig 5. Vegetation Density Changes and Concentration PM10 (Koch et al., 2019).



شکل ۶. میزان ریزگرد رسوب شده روی برگ درختان بلوط (Jahanbazy Goujani et al., 2020).

Fig. 6. Amount of Dust Deposited on Oak Tree Leaves (Jahanbazy Goujani et al., 2020).

نتایج حاصل از تجزیه ریزگرد رسوب شده در تله‌های رسوب‌گیر در جنگل‌های زاگرس نشان می‌دهد که مقدار سرب موجود در ریزگرد بیشتر از سایر عناصر است و مقدار آن تقریباً چهار برابر آرسنیک، جیوه و نیکل برآورد شد. در مقابل جیوه با ۰/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمترین مقدار را به خود اختصاص داد.



شکل ۷. مقایسه تجمع عناصر سنگین در بافت درختان سالم و در حال خشکیدگی بلوط (Jahanbazy Goujani et al., 2020)

Fig. 7. Comparison of Heavy Element Accumulation in The Tissue of Healthy and Drying Oak Trees (Jahanbazy Goujani et al., 2020)

تجمع عناصر سنگین در بافت گیاهی منجر به سمیت و ایجاد اختلال در رویش و در نهایت مرگ گیاهان می‌شود. سمیت عناصر سنگین وقتی نمایان می‌گردد که این عناصر در مقادیر بالا در سلول‌های گیاهی تجمع یابند. زمانی که درختان و درختچه‌های زاگرس در معرض عناصر سنگین موجود در ذرات ریزگرد قرار می‌گیرند سطوح مختلف سمیت ناشی از عناصر سنگین موجب تحریک دامنه وسیع از تغییرات متابولیک و فیزیولوژیک می‌شود (Dubey, 2011). عناصر سنگین دارای فعالیت‌های مختلف بر روی گیاهان هستند، مهم‌ترین و وسیع‌ترین اثر سمیت این عناصر، کاهش رویش گیاهان (Sharma & Dubey, 2007) همچنین نکروز شدن برگ‌ها، کاهش جوانه‌زنی بذرها و مختل‌شدن دستگاه فتوسنتز از سایر علائمی است که اغلب این موارد با مرگ گیاه همراه است. (Dalcorso et al., 2010).

تأثیرات تغییرات اقلیمی بر بوم‌سازگان زاگرس

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد تأثیرات عمیقی بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس داشته‌اند. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه در منطقه زاگرس از سال ۱۹۹۰ تاکنون ۱/۵ درجه سلسیوس افزایش‌یافته و میزان بارش‌ها ۲۰٪ کاهش‌یافته است (Moradi et al., 2021). این تغییرات منجر به کاهش ۲۵٪ رطوبت خاک (Sarab et al., 2022) و افزایش ۳۵٪ تبخیر (Bavaghar, 2012) شده است. در نتیجه، بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس با تنش‌های حرارتی و آبی شدیدی مواجه شده‌اند. درختان بلوط ایرانی (Quercus persica) که گونه غالب در این منطقه محسوب می‌شوند، به طور مستقیم تحت‌تأثیر این تغییرات قرار گرفته‌اند. تحقیقات نشان می‌دهند که نرخ رشد سالانه این درختان ۴۰٪ و سلامت کلی آن‌ها ۳۰٪ کاهش‌یافته است (Karmian & Mirzaei, 2020). کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، خشک‌شدن چشمه‌ها و رودخانه‌های فصلی در ارتفاعات زاگرس (Sarab et al., 2022) نیز فرآیند بازسازی طبیعی جنگل‌ها را مختل کرده و دوره‌های خشکسالی را طولانی‌تر کرده است. افزایش دما و کاهش بارندگی همچنین منجر به افزایش احتمال آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس شده است. ترکیب دماهای بالاتر، کاهش رطوبت خاک، و افزایش سرعت باد، شرایط را برای گسترش آتش‌سوزی‌های وسیع فراهم کرده است. این آتش‌سوزی‌ها نه‌تنها موجب از بین رفتن پوشش گیاهی و

کاهش تنوع زیستی شده، بلکه چرخه بازتولید طبیعی بوم‌سازگان را نیز دچار اختلال کرده است.

تأثیرات طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان زاگرس

یکی دیگر از چالش‌های زیست‌محیطی عمده در زاگرس، افزایش طوفان‌های ریزگرد با منشأ فرامرزی از بیابان‌های عراق و سوریه است (Azizi et al., 2015). داده‌ها نشان می‌دهند که نفوذ نور خورشید به دلیل وجود این ذرات معلق تا ٪۳۰ کاهش‌یافته (Rashki et al., 2017) که این امر فرآیند فتوسنتز را مختل کرده و تولید زیست‌توده را تا ٪۲۰ کاهش داده است (Adab et al., 2014). علاوه بر کاهش فتوسنتز، طوفان‌های ریزگرد موجب افزایش ٪۱۸ در میزان فرسایش خاک و ٪۱۵ در شوری سطحی شده‌اند (Jahanbazy Goujani et al., 2020). افزایش شوری خاک مانع از جذب مناسب مواد مغذی توسط گیاهان شده و در نتیجه رشد و بقای پوشش گیاهی را تهدید می‌کند. مطالعات همچنین نشان داده‌اند که ذرات ریزگرد حاوی عناصر سنگین مانند سرب هستند که در بافت گیاهی تجمع‌یافته و موجب سمیت و اختلال در متابولیسم گیاهی می‌شوند (Jahanbazy Goujani et al., 2020). شاخص سلامت پوشش گیاهی NDVI که یکی از معیارهای اصلی سلامت پوشش گیاهی است (Rashki et al., 2017)، که نشان‌دهنده افت تراکم و کیفیت جنگل‌های زاگرس است. علاوه بر این، فراوانی طوفان‌های ریزگرد از ۵ رویداد در سال به ۱۵ رویداد در سال افزایش‌یافته است (Rashki et al., 2017) که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ریزگرد یکی از عوامل مؤثر بر کاهش پوشش گیاهی زاگرس است. برای حفاظت از پوشش گیاهی این منطقه، لازم است این پدیده به‌دقت بررسی شود و راهکارهای مدیریتی برای کاهش اثرات منفی آن بر بوم‌سازگان منطقه اجرا شود و مطابق نتایج شکل (۳) که افزایش غلظت ذرات معلق موجود در ریزگرد تأثیر مستقیمی بر زوال بوم‌سازگان جنگلی زاگرس دارد (Kooch et al., 2019). رابطه‌ای بین دو متغیر پوشش گیاهی و میزان ریزگرد در طول سال نشان می‌دهد که در سال‌هایی که ریزگرد افزایش‌یافته، پوشش گیاهی کاهش‌یافته است. این هم‌بستگی بیانگر تأثیر منفی ریزگرد بر روی پوشش گیاهی منطقه است که می‌تواند منجر به کاهش نور خورشید، انسداد روزنه‌های گیاهان، کاهش میزان فتوسنتز و افزایش فشار آبی شود. بااین‌حال، نوسانات در میزان پوشش گیاهی نشان می‌دهد که می‌تواند بر عوامل مختلف محیطی، از جمله افزایش ریزگرد، کاهش بارندگی و تغییرات اقلیمی تأثیر بگذارد که علاوه بر ریزگرد، عوامل دیگری مانند میزان بارندگی، دما، چرای دام و فعالیت‌های انسانی نیز در این تغییرات نقش دارند. روند کلی داده‌ها در شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش میزان PM_{10}، تراکم پوشش گیاهی کاهش می‌یابد. مقدار تراکم پوشش گیاهی در سال‌هایی که PM_{10} کمتر است (در محدوده‌ی ۵۰ تا ۶۰ میکروگرم بر مترمکعب) بالاتر است و در حدود ٪۶۵ قرار دارد. در مقابل، در سال‌هایی که میزان PM_{10} افزایش‌یافته و به حدود ۱۲۰ میکروگرم بر مترمکعب رسیده، تراکم پوشش گیاهی به کمتر از ٪۵۰ کاهش پیدا کرده است.

اثرات هم‌افزایی تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان زاگرس

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ترکیب اثرات تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد به‌عنوان دو عامل کلیدی در تخریب زیست‌بوم‌های طبیعی، منجر به کاهش ٪۲۵ در تنوع زیستی شده است (Soleimani et al., 2020). این کاهش عمدتاً به دلیل تغییر در الگوهای بارندگی، افزایش دما، و افزایش شدت و فراوانی پدیده‌های حدی مانند خشکسالی و طوفان‌های ریزگرد رخ داده است. این شرایط زیست‌محیطی نه‌تنها منجر به از بین رفتن گونه‌های حساس و کاهش غنای گونه‌ای شده، بلکه موجب تغییرات اکولوژیکی در ترکیب و ساختار جوامع زیستی نیز گردیده است.

همچنین، تخریب بوم‌سازگان جنگلی و کاهش تراکم پوشش گیاهی به کاهش ٪۱۸ در ظرفیت ذخیره کربن منجر شده است (Ashena et al., 2019). جنگل‌های زاگرس که از مهم‌ترین مخازن کربن کشور محسوب می‌شوند، تحت تأثیر این تغییرات، توانایی خود را در جذب دی‌اکسیدکربن از ۱۲ تن به ۹ تن در هکتار کاهش داده‌اند. این افت عملکرد در جذب کربن، پیامدهای

گسترده‌ای برای تعادل کربنی منطقه دارد و می‌تواند به افزایش بازخوردهای منفی در تغییرات اقلیمی از طریق افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود. در نتیجه، چرخه کربن و فرآیندهای تنظیم اقلیم که به واسطه بوم سازگان جنگلی انجام می‌شوند، دچار اختلال شده‌اند. از سوی دیگر، تخریب پوشش گیاهی و تشدید فرآیندهای فرسایش خاک منجر به افزایش ٪۳۵ در آسیب‌پذیری جنگل‌های زاگرس در برابر آفات مخرب، از جمله سوسک چوب‌خوار شده است (Sarab et al., 2022). این آفات که در شرایط ضعف فیزیولوژیکی درختان به‌سرعت گسترش می‌یابند، باعث زوال بیشتر اکوسیستم شده و یک چرخه تخریب خود تقویت‌شونده را ایجاد می‌کنند. چنین وضعیتی می‌تواند پایداری جنگل‌های زاگرس را در بلندمدت به خطر انداخته و ظرفیت آن‌ها در ارائه خدمات بوم‌سازگان، نظیر حفظ تعادل هیدرولوژیکی و تأمین منابع آبی، را کاهش دهد.

با توجه به اینکه جنگل‌های زاگرس تأمین‌کننده ٪۴۰ آب کشور هستند (Qorbani Salkhord et al., 2012)، این تغییرات پیامدهای گسترده‌ای برای امنیت آبی منطقه به همراه خواهد داشت. کاهش پوشش گیاهی موجب کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب سطحی شده که در نهایت منجر به کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و افزایش خطر وقوع سیلاب‌های مخرب می‌شود. در مجموع، تداوم این روندها می‌تواند تهدیدی جدی برای پایداری منابع طبیعی و معیشت جوامع وابسته به این زیست‌بوم‌های ارزشمند باشد؛ بنابراین، اجرای راهکارهای مدیریتی و سیاست‌های حفاظتی مبتنی بر اصول اکولوژیکی جهت کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و افزایش تاب‌آوری جنگل‌های زاگرس امری ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

تحلیل جامع این پژوهش نشان داد که جنگل‌های زاگرس به‌شدت تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد قرار گرفته‌اند. افزایش دما، کاهش بارش، و افزایش ریزگرد موجب افت رشد گونه‌های کلیدی، کاهش تنوع زیستی و تضعیف کارکردهای بوم‌سازگان شده‌اند. این روند در صورت ادامه، منجر به کاهش کارکردهای حیاتی بوم‌سازگان زاگرس، از جمله تنظیم چرخه کربن و ذخیره‌سازی آب، خواهد شد.

بنابراین، اتخاذ سیاست‌های مدیریت منابع طبیعی، احیای جنگل‌ها، و همکاری‌های بین‌المللی برای واپایش کانون‌های ریزگرد ضروری است. حفاظت از این بوم‌سازگان مستلزم یک رویکرد جامع و هماهنگ است که دانش بومی، فناوری‌های نوین، و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی را در بر گیرد. بدون اقدامات فوری، تداوم این روند می‌تواند جنگل‌های زاگرس را به نقطه‌ای غیرقابل‌بازگشت برساند و پیامدهای جدی برای امنیت زیست‌محیطی منطقه ایجاد کند. پژوهش‌های آینده باید بر تحلیل روندهای بلندمدت، ارزیابی راهکارهای مدیریتی، و بررسی تأثیرات اقتصادی - اجتماعی تغییرات اقلیمی بر جوامع محلی تمرکز کنند تا راه‌حل‌های پایدار و عملی برای حفظ این میراث طبیعی ارائه شود.

راهکارهای پیشنهادی برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و ریزگرد

با توجه به پیامدهای گسترده تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان زاگرس، اجرای راهکارهای مدیریت پایدار ضروری است. برخی از این راهکارها شامل:

- **مدیریت منابع آب:** استفاده از روش‌های نوین آبیاری، احداث سدهای کوچک برای حفظ منابع آبی، و تقویت سفره‌های آب زیرزمینی.
- **احیای پوشش گیاهی:** اجرای برنامه‌های کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی، جنگل‌کاری و ایجاد کمربندهای سبز برای مقابله با بیابان‌زایی.
- **مدیریت خاک:** بهبود روش‌های کشاورزی حفاظتی، استفاده از مالچ پاشی و افزایش مواد آلی در خاک برای کاهش فرسایش.
- **کاهش ریزگرد:** همکاری‌های منطقه‌ای با کشورهای همسایه برای مدیریت منابع ریزگرد، تثبیت شن‌های روان و کاهش رهاسازی ذرات معلق در هوا

- **پایشگری و پژوهش:** توسعه سامانه‌های پایش تغییرات اقلیمی، مطالعه الگوهای باد و ریزگرد و اجرای پژوهش‌های کاربردی در زمینه تأثیرات اقلیمی بر بوم‌سازگان‌های حساس.

در نهایت، با اجرای سیاست‌های پایدار و هماهنگی بین‌المللی، می‌توان اثرات منفی تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد را کاهش داد و بقای بوم‌سازگان زاگرس را برای نسل‌های آینده تضمین کرد.

منابع

Adab, H., Amirahmadi, A. & Atabati, A. (2014). Relating vegetation cover with land surface temperature and surface Albedo in the warm period of the year using MODIS imagery in northern Iran. *Physical Geography Research*, *46*(4), 419-434. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/jphgr.2014.52994.

Adams, H.D., Zeppel, M.J., Anderegg, W.R., Hartmann, H., Landhäusser, S.M., Tissue, D.T.,... & McDowell, N.G. (2017). A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution,* *1*(9), 1285–1291. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0248-x.

Ahmadi, R., Kiadaliri, H., Mataji, A. & Kafaky, S. (2014). Oak forest decline zonation using the AHP model and GIS technique in the Zagros forests of Ilam province. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences,* *4*(3), 141–150. https://innspub.net/oak-forest-decline-zonation-using-ahp-model-and-gis-technique-in-zagros-forests-of-ilam-province/

Andersson, M., Milberg, P. & Bergman, K. O. (2011). Low pre-death growth rates of oak (*Quercus robur* L.): Is oak death a long-term process induced by dry years? *Annals of Forest Science,* *68*(8), 159–168. https://doi.org/10.1007/s13595-011-0015-0.

Arvandi, S. (2024). The effect of climate change on the way of investing in modern irrigation systems. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(3), 97 – 110. https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7834.1071.

Ashena, M. & Hossein, A.S. (2019). Evaluation of factors affecting changes in carbon dioxide emissions in Iran with emphasis on the role of urbanization: Decomposition analysis method. *Geography and Environmental Hazards, 9*(2), 145-163. https://doi.org/10.22067/geo.v9i1.84249.

Azizi, G., Miri, M., Mohammadi, H. & Pourhashemi, M. (2015). Analysis of the relationship between forest decline and precipitation changes in Ilam Province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *23*(3), 502-515. https://doi.org/10.22092/ijfpr.2015.105655.Bavaghar, M.P. (2012). Evaluation of the capability of IRS-P6 satellite data for predicting quantitative attributes of forests (case study: Northern Zagros forests). *Iranian Journal of Forest*, *3*(4), 277-289. [In Persian]. https://www.ijf-isaforestry.ir/article_4663.html.

Dalcorso, G., Farinati, S. & Furini, A. (2010). Regulatory networks of cadmium stress in plants. *Plant Signaling & Behavior,* *5*(6), 663-667. https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11425.

Dubey, R.S. (2011). *Metal toxicity, oxidative stress, and antioxidative defense system in plants*. In Gupta S.D. (Ed.), Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. CRC Press, Boca Raton, pp. 177–203. https://doi.org/10.1201/9781439854082.

Fakhar, M.S. & Nazari, B. (2024). Multitemporal analysis of drought in Iran: Monitoring and evaluation of spatial and temporal characteristics using MODIS indices. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(1), 39 – 58. https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7011.1050.

Fakhri, M. (2024). Investigating the condition of Iran's temperature changes compared to the past long-term climatic standard period. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(3), 17 – 32. https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062.

Hajarian, A. (2025). Meteorological drought risk monitoring and zoning using a random forest model. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, Articles in press, Accepted manuscript, available online from 20 January 2025. https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8551.1093.

Jahanbazy Goujani, H., Iranmanesh, Y. & Talebi, M. (2020). *Factors affecting the decline of Zagros forests and management strategies*. Research Institute of Forests and Rangelands Press, Tehran. ISBN: 978-9644734236. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_8578.html.

Kabrick, J.M., Dey, D.C., Jensen, R.G., & Wallendorf, M. (2008). The role of environmental factors in oak decline and mortality in the Ozark Highlands. *Forest Ecology and Management,* *255*(5–6), 1409–1417. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.054.

Karmian, M. & Mirzaei. J. (2020). The most important factors affecting the dieback of Iranian oak (*Quercus brantii*) in Ilam Province. *Iranian Forest Ecology,* *8*(15), 93-103. https://doi.org/10.52547/ifej.8.15.93.

Koch, K., Samson, R., & Denys, S. (2019). Aerodynamic characterisation of green wall vegetation based on plant morphology: An experimental and computational fluid dynamics

approach. *Biosystems Engineering,* 178, 34 – 51. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.019.
Kooh Soltani, S., Alesheikh, A. A., Ghermezcheshmeh, B. & Mehri, S. (2018). An evaluation of potential Oak decline in the Forest of the Zagros using GIS, RS, and FAHP methods. *Journal of Ecohydrology*, *5*(2), 713-725. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/ije.2018.225917.448.
Liang, L., Zhao, S. H., Qin, Z. H., He, K. X., Chen, C., Luo, Y. X., & Zhou, X. D. (2014). Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010. *Journal of Integrative Agriculture, 13*(7), 1501–1508. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60813-3.
Matinfar, H. (2014). Spatio-temporal distribution of atmospheric aerosols in the western part of Iran based on MODIS spectral data. *Journal of Water and Soil Conservation*, *21*(4), 119-137. [In Persian]. DOR: 20.1001.1.23222069.1393.21.4.6.7
Mirakhorlou, Kh (2021). *The importance of digital and thematic land cover information in the Zagros* habitat, Research Institute of Forest and Rangeland, Forest news and updates, 20 December 2021. [In Persian].
Moradi, A., Taheri Abkenar, K., Shabanian, N. & Afshar Mohammadian, M. (2021). The potential of oak (*Quercus spp.*) and wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) forest species to deposit microdust particles. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *29*(3), 273-284. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijfpr.2021.356258.2023.
Noroozi, A., Miri, M., Nikkami, D., Razi, T., Sarreshtehdari, A., and Shoaei, Z. (2022). Assessment of climatic hazards' impact on oak dieback in the west of Iran. *Watershed Engineering and Management*, *14*(4), 424-437. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.353749.1885 [In Persian].
Petritan, A. M., Petritan, I. C., Hevia, A., Walentowski, H., Bouriaud, O. & Sánchez-Salguero, R. (2021). Climate warming predisposes sessile oak forests to drought-induced tree mortality regardless of management legacies. *Forest Ecology and Management*, *491*, 119097. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119097.
Qorbani Salkhord, R., Mobasheri, M.R. & Rahimzadehgan, M. (2012). A fast method for assessment of PM10 concentration using MODIS images, A case study in Tehran. *Hakim, 15*(2), 166-177. [In Persian]. http://hakim.tums.ac.ir/article-1-1019-en.html.
Rashki, A., et al. (2017). Effects of dust storms on soil characteristics and vegetation in the Zagros region, Iran. *Catena, 158*, 305-312. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.011.
Sarab, S.A., Rashki, A., Moayeri, M.H. & Shataee Jouibari, Sh. (2022). Investigating the impact of drought and dust on oak trees in the west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1583. https://doi.org/10.1007/s12517-022-10759-2.
Shahsavani, A., Yarahmadi, M., Mesdaghinia, A., Younesian, M., Jaafarzadeh, N., Naimabadi, M. (2012). Analysis of dust storms entering Iran with emphasis on Khuzestan Province. *Hakim Res J 15*(3),192–202. [In Persian]. http://hakim.tums.ac.ir/article-1-1040-en.html.
Sharma, P. & Dubey, R.S. (2007). Involvement of oxidative stress and role of antioxidative defense system in growing rice seedlings exposed to toxic concentrations of aluminum. *Plant Cell Reports*, *26*(11), 2027–2038. https://doi.org/10.1007 / s00299-007-0416-6.
Soleimani, Z., Teymouri, P., Boloorani, A.D., Mesdaghinia, A., Middleton, N. & Griffin, D. W. (2020). An overview of bioaerosol load and health impacts associated with dust storms: A focus on the Middle East. *Atmospheric Environment. 223*, 117187. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117187.
Soltani, S., et al. (2020). Climate change and vegetation dynamics in the Zagros region. *Global Change Biology*, 26(4), 1574-1590. https://doi.org/10.1111/gcb.14863.