

A Bayesian Network Approach for Modeling Wind Erosion Intensity in Golestan Province

Hanieh Babouei¹, Ali Mohammadian Behbahani^{2✉}, Mohsen Hosseinalizadeh³
Amir Sadoddin⁴, Abdolhossein Boali⁵

1. M.Sc of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
E-mail: hani.babouei@gmail.com
2. Associate Professor of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
✉ E-mail ali.mohammadian@gau.ac.ir
3. Associate Professor of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
E-mail: alizadeh_m2001@yahoo.com
4. Professor of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
E-mail: amir.sadoddin@gau.ac.ir
5. Postdoc of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
E-mail: Hossien.boali@yahoo.co



How to Cite: Babouei, H; Mohammadian Behbahani, A; Hosseinalizadeh, M; Sadoddin, A; & Boali, A.H. (2026). A Bayesian Network Approach for Modeling Wind Erosion Intensity in Golestan Province. *Geography and Development*, 24 (82), 233-254.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2025.50807.3711>

Received:

15 January 2025

Received in revised form:

10 March 2025

Accepted:

17 March 2025

Published online:

8 March 2026

ABSTRACT

This research aims to model and map the intensity of wind erosion in Golestan Province. The influential variables affecting the intensity of wind erosion in the study area were identified and selected based on a review of literature and expert opinions. Subsequently, causal relationships between these variables were established using an influence diagram. After forming conditional probability tables for the model variables, the influence diagram was converted into a preliminary Bayesian model using Netica software. The results indicated that the most vulnerable areas regarding wind erosion risk are located in the northern regions (north of Gonbad County), northeastern areas (Maraveh Tappeh County), and northwestern areas (Aq Qala and Gomishan Counties). Consequently, the probability of wind erosion risk is classified as follows: 607,176 hectares in the 0 to 25 percent risk class, 499,910 hectares in the 25 to 50 percent risk class, 437,195 hectares in the 50 to 75 percent risk class, and 486,367 hectares in the 75 to 100 percent risk class. Furthermore, the results indicated a suitable coefficient of determination ($R^2 = 0.7$) between the "high" probability class output from the Bayesian belief network model and the IRIFR model score, demonstrating a satisfactory accuracy level for predicting areas affected by wind erosion. Based on the findings from the Bayesian model and the probabilistic map presented in this research, it is possible to examine and prioritize critical wind erosion hotspots in Golestan Province, which is crucial for effective planning and management.

Keywords:

Bayesian belief network,
Wind erosion,
IRIFR model,
Golestan.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

1. Introduction

In recent years, the desertification crisis in northern Golestan province and the phenomenon of dust storms from both internal and external sources have approached critical thresholds. The dried wetlands and their surrounding areas, along with some of the weak pastures located in the north of the province, as well as rain-fed agricultural and barren lands, are considered three critical internal sources of dust in Golestan. Additionally, the Karakum Desert, the Balkan region of Turkmenistan, and the Aral Sea basin are regarded as the primary external sources of dust affecting northeastern Iran and Golestan province. This research aims to model and

map the intensity of wind erosion and provide suitable management programs to control wind erosion in Golestan province.

2. Materials and Methods

To conduct this study, the influential variables affecting wind erosion intensity in the study area were identified and selected based on a literature review, existing wind erosion models, and expert opinions. In the next phase, causal relationships among these variables were established using an influence diagram. The design of the influence diagram was developed and refined through several stages, incorporating expert insights and resource reviews. After determining marginal probabilities and forming conditional probability tables for the model variables, the influence diagram was converted into an initial Bayesian Belief Network (BBN) using Netica software. Based on the designed model, the intensity of wind erosion was simulated randomly at 100 points within the study area. Additionally, the empirical model of IRIFR was utilized to validate the results of the Bayesian model. In this approach, nine significant factors influencing wind erosion were presented along with a scoring table for analysis. Following this, sensitivity analysis was conducted, and the results were reviewed by experts. The Bayesian model's output was compared with the province's erosion hotspot map to validate the Bayesian Belief Network model. The information obtained from the sensitivity analysis was used to identify input variables that had the most significant impact on the model's output and uncertainty. In this study, sensitivity analysis of the Bayesian Belief Network model was conducted component-wise (intermediate nodes of the model) using entropy reduction methods. Finally, based on the wind erosion maps generated from both models, proposed management programs were presented in three groups, and seven implementation strategies for the study area.

3. Results and Discussion

The results indicated that the amount of wind erosion in the province, based on the IRIFR model, was categorized as 23% with no erosion (including forest areas), 41% in the low class (8,435 square kilometers), 30% in the medium class (5,968 square kilometers), and 6% in the high class (1,194 square kilometers). According to the Bayesian model, wind erosion in the region is primarily influenced by erosion-prone factors, erosive agents, and land cover. The results from the Bayesian model showed that the most vulnerable points regarding wind erosion risk are located in the northern areas (north of Gonbad County), northeastern areas (Maraveh Tappeh County), and northwestern areas (Aq Qala and Gomishan counties). Consequently, the risk of wind erosion was classified as follows: 607,176 hectares of the area fell into the 0 to 25% risk class, 499,910 hectares into the 25 to 50% class, 437,195 hectares into the 50 to 75% class, and 486,367 hectares into the 75 to 100% class. Additionally, the results demonstrated a suitable coefficient of determination ($R^2 = 0.7$) between the probabilities of the "high" class output from the Bayesian belief network model and the scores from the IRIFR model, indicating a reasonable accuracy of the model in predicting areas affected by wind erosion. The management scenario results showed that by increasing vegetation cover by 5 to 10%, the probability of wind erosion risk could be reduced from 42% to 28%.

4. Conclusion

Based on the results obtained from the Bayesian model and the probabilistic maps presented in this study, it is possible to examine and prioritize critical wind erosion hotspots in Golestan Province. In these critical areas, corrective and biological measures are recommended, including the cultivation and development of salt-tolerant plant communities, strategies to increase the presence of salt- and drought-resistant plants in degraded pastures, implementing conservation agriculture practices especially maintaining crop residues after harvest and

establishing windbreak networks along agricultural land borders. The significance of implementing wind erosion control projects is highlighted as essential for supporting sustainable land development to prevent migration, preserve agricultural lands, promote industry, and ensure the safety of transportation routes, economic sites, and biological resources in desert ecosystems by combating desertification. Therefore, it is suggested that through research projects and increasing public awareness particularly among farmers and natural resource users suitable strategies for controlling wind erosion should be implemented with the assistance of a strong expert team in Golestan Province.

Keywords: Bayesian belief network, Wind erosion, IRIFR Model, Golestan.

5. References

- Arami, S. A., Ownegh, M., Mohammadian Behbahani, A., Akbari, M., & Zarasvandi, A. (2018). Statistical analysis of spatio-temporal pattern of dust storms in west and southwest of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 61-83.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14107.2883>
- Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016). Soil erosion risk assessment using the CORINE model (Case study: Semi-arid region in Golestan province). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5(12), 63-78.
https://deej.kashanu.ac.ir/article_112583.html
- Arab Ameri, F., Mohammadian Behbahani, A., Ownegh, M., & Arami, S. H. (2024). Statistical analysis of spatio-temporal variations of dust occurrences in Golestan province. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 12(40), 59-72.
<https://doi.org/10.22052/deej.2024.254036.1037>
- Aalders, I., Hough, R.L., Tower, W.(2011). Risk of erosion in peat soils – an investigation using Bayesian belief networks. *Soil Use and Management*, 27,538–549.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00359.x>
- Boali, A., Asgari, H., Mohammadian Behbahani, A., Salmanmahiny, A., & Naimi, B. (2024). Monitoring and investigation of wind erosion warning areas in the northwest of Golestan Province (Case study: Aq Qala and Gomishan Cities). *Journal of Modeling and Management of Watersheds and Soil*, 4(2), 343-356.
<https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13540.1348>
- Boali, A., & Mohamadian Behbahani, A. (2020). Evaluating wind erosion intensity through performance assessment of Bayesian belief networks: A case study of Isfahan province. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 9(26), 73-78. .
<https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.26.35>
- Boali, A., Bashari, H., Jafari, R., & Soleimani, M. (2018). Potentiating bayesian belief networks for evaluating the effect of soil quality criteria on desertification of Segzi plain, Isfahan. *Journal of Soil and Water Resources (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 21(2), 15-28.
<https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.2.15>
- Boali, A., Jafari, R., & Bashari, H. (2017). Wind erosion estimation and assessment using Bayesian belief networks in eastern Isfahan township. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 6(14), 48-54.
<https://doi.org/10.22052/6.14.45>
- Bashari, H., Boali, A., & Soltani, S. (2023). Accommodating uncertainty in soil erosion risk assessment: Integration of Bayesian belief networks and MPSIAC model. *Natural Hazards Research*. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.009.4-5>.
- Boali, A., Bashari, H., Jafari, Reza,(2019). Evaluating the potential of Bayesian networks for desertification assessment in arid areas of Iran. *Land Degradation & Development*. 30 (4), 371-390.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3224>.
- Douglas, S. J. (2009). Habitat suitability modelling in the New Forest National Park. PhD Thesis (PhD), Bournemouth University, UK.
- Du, H., Xue, X., Wang, T., Deng, X. (2015). Assessment of wind-erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, northern China. *Aeolian Res.* 17, 193-204.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.04.003>.
- Ekhtesasi, M. R., Ahmadi, H., Feyznia, S., & Busche, D. (1997). Wind erosion, facies and damages in Yazd-Ardakan plain. *Iranian Journal of Natural Resources*, 50(2).

- Honardoost, F., Vahedborji Sheikh, M., Beiroodian, N., & Mohammadi Adhamimajered, M. H. (2010). Evaluation and planning of soil erosion control operations using the Scolegram model [Paper presented at the 5th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering]. Karaj, Iran.
<https://civilica.com/doc/87164>
- Imani, S., Soltani-Jigheh, H., Kafil, H.S., Zinatloo-Ajabshir, S. and Fahmi, A. (2025). Environmental sustainability in combating wind erosion: Chemical stabilization of sand dunes using acidic mulching. *Results in Engineering*, 25, 103758.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103758>
- Jafari, R., & Bakhshandehmehr, L. (2016). Quantitative mapping and assessment of environmentally sensitive areas to desertification in central Iran. *Land Degradation & Development*, 27(2), 108-119.
[10.1002/ldr.2227](https://doi.org/10.1002/ldr.2227)
- Kamali, N., Siroosi, H., Sadeghipour, A. (2020). Impacts of wind erosion and seasonal changes on soil carbon dioxide emission in southwestern Iran. *J. Arid. Land* 12 (4), 690-700.
<https://doi.org/10.1007/s40333-020-0018-5>.
- Khansalari, S., Majidi Dashli Brun, O., Nikzadfar, M., & Mollaraazi, A. (2022). Temporal and spatial changes of dust in Golestan province using AOD (aerosol optical depth) and the affectability of this province from the deserts of Turkmenistan. *Journal of Earth and Space Physics*, 49(2), 517-540.
<https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462>
- Kouchami Sardo, I., Besalatpour, A. A., Bashari, H., Shirani, H., & Esfandiarpour Broujeni, I. (2017). Assessment of IRIFR model capability in simulation of soil loss in different wind geomorphology landforms using wind erosion meter. *Journal of Arid Zone*, 7(1).
<https://www.magiran.com/p1764242>
- Kapp, P., Pullen, A., Abell, J.T. and Zhang, L., 2025. Wind erosion in northern China: Insights from the western Qaidam fold belt, Loess Plateau, and Hami Basin. *Earth-Science Reviews*, 105037.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.105037>
- Landuyt, D., Broekx, S., D'hondt, R., Engelen, G., Aertsens, J., & Goethals, P. L. (2013). A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling., *Environmental Modelling & Software* , Vol 46, 1-11.
[10.1016/j.envsoft.2013.03.011](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.011)
- Mohammadian Behbahani, A., & Boali, A. (2019). The potential of Bayesian belief networks in estimating and evaluating wind erosion rates (Case study: Ilam Dehloran plain). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(4), 67-86.
<https://doi.org/10.22067/geo.v8i4.79097>
- Newton, A. C. (2007). *Forest ecology and conservation: a handbook of techniques*. Oxford University Press, Oxford .
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198567448.001.0001>
- Rigi, M. R., Farahi, M., & Kalkali, S. (2019). Estimation of the severity of wind erosion and its sinking potential using the Arifar model (IRIFR1) in the Rotak and Mak sookhteh Saravan area. *Quarterly Journal of Geography (Regional Planning)*, 9(37), 449-464.
<https://ensani.ir/fa/article/481510>
- Razavizadeh, S., Abbasi, H., & Dargahian, F. (2021). Investigation of dust phenomenon in Golestan province, with emphasis on aerosol optical depth index and wind direction and speed. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 15(53), 58-67.
<http://jwmsei.ir/article-1-993-fa.html>
- Smith, C. S. Howes, A. L. Price, B. & McAlpine, C. A. (2007). Using a Bayesian belief network to predict suitable habitat of an endangered mammal–The Julia Creek dunnart *Sminthopsis douglasi*. *Biological Conservation*, 139(3- 4):333-347.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.06.025>
- Sabeti, S. (2008). Investigation of the wind erosion mechanism and its effect on desertification risk in the northern plains of Aq Qala, Golestan Province [Master's thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
- Zarezade, A., Pahlavanravi, A., Dehghani, M., & Khaksefidi, A. (2022). Investigation of wind erosion potential in Chahdashi region of Nehbandan city, South Khorasan province using IRIFR.2 model. *Integrated Watershed Management*, 2(1), 15-31.
<https://doi.org/10.22034/iwm.2022.549516.1021>



کاربرد رویکرد شبکه‌های بی‌بی در مدل‌سازی شدت فرسایش بادی در استان گلستان

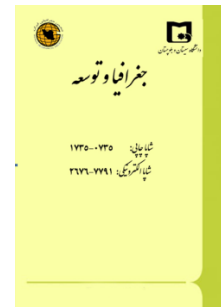
هانیه بابویی^۱، دکتر علی محمدیان بهبهانی^{۲*}، دکتر محسن حسینعلی‌زاده^۳
دکتر امیر سعدالدین^۴، دکتر عبدالحسین بوعلی^۵

مقاله پژوهشی

چکیده

این پژوهش با هدف مدل‌سازی و پهنه‌بندی شدت فرسایش بادی در استان گلستان انجام شده است. بدین منظور، نخست متغیرهای تأثیرگذار بر شدت فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه بر اساس مرور منابع و نظر کارشناسان، شناسایی و انتخاب شد. در مرحله بعد با استفاده از نمودار تأثیر، روابط علی و معلولی بین این متغیرها مشخص شد. پس از تشکیل جدول‌های احتمالات شرطی برای متغیرهای مدل، نمودار تأثیر با استفاده از نرم‌افزار «Netica» به یک مدل بی‌بی اولیه تبدیل شد. شدت فرسایش بادی بر اساس مدل طراحی شده به صورت تصادفی در ۱۰۰ نقطه در سطح استان گلستان شبیه‌سازی شد. همچنین جهت صحت‌سنجی نتایج مدل بی‌بی از مدل تجربی «اریفر» و شواهد میدانی استفاده شد. براساس حساسیت‌سنجی مدل بی‌بی، فرسایش بادی در منطقه بیشتر تحت تأثیر، فرسایش‌پذیری، فرسایش‌دگی و پوشش سطح زمین است. نتایج مدل بی‌بی نشان‌دهنده آسیب‌پذیرترین نقاط از نظر خطر فرسایش بادی نواحی شمالی (شمال شهرستان گنبد)، شمال شرقی (شهرستان مراوه‌تپه) و شمال غرب (شهرستان‌های آق‌قلا و گمیشان) محسوب می‌شوند. براین اساس، احتمال خطر فرسایش بادی در ۶۰۷۱۷۶ هکتار از منطقه در کلاس ۰ تا ۲۵ درصد، ۴۹۹۹۱۰ هکتار در کلاس ۲۵ تا ۵۰ درصد، ۴۳۷۱۹۵ هکتار در کلاس ۵۰ تا ۷۵ درصد و ۴۸۶۳۶۷ هکتار در کلاس ۷۵ تا ۱۰۰ درصد قرار گرفت. همچنین نتایج نشان‌دهنده ضریب تبیین مناسب ($R^2 = 0.7$) بین احتمالات طبقه "زیاد" خروجی مدل شبکه باور بی‌بی و امتیاز مدل «IRIFR» بود که نشان از دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی سطوح تحت تأثیر فرسایش بادی است. براساس نتایج به دست آمده از مدل بی‌بی و نقشه احتمالاتی ارائه شده در این پژوهش می‌توان به بررسی و اولویت‌بندی کانون‌های بحرانی فرسایش بادی در استان گلستان پرداخت که برای برنامه‌ریزی و مدیریت از اهمیت زیادی برخوردار است.

جغرافیا و توسعه، شماره ۸۲، بهار ۱۴۰۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷
صفحات: ۲۳۳-۲۵۴



واژه‌های کلیدی:

شبکه باور بی‌بی، فرسایش بادی، مدل اریفر، گلستان.

مقدمه

فرسایش بادی پدیده‌ای است که به جابه‌جایی ذرات خاک و شن توسط باد اطلاق می‌شود و در مناطق خشک و نیمه‌خشک یک چالش جدی برای تولید پایدار و مدیریت منابع طبیعی به‌شمار می‌آید (Amani et al, 2025:20). این پدیده در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی، مدیریت نادرست منابع آب‌و‌خاک، و فعالیت‌های انسانی، شدت بیشتری یافته است (بوعلی و محمدیان بهبهانی، ۱۳۹۹:۷۹). این پدیده در سطح وسیع کشور را تحت تأثیر قرار داده و خسارات زیادی به اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی شهری و روستایی و همچنین تأسیسات زیربنایی و اقتصادی مانند: فرودگاه‌ها، راه‌آهن‌ها و مراکز نظامی وارد کرده است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۵:۷۲؛ آرامی و همکاران ۱۳۹۷:۶۶). علاوه بر این، از نظر بهداشت عمومی، انتشار ذرات معلق به شکل گردوغبار بر سلامت جسمانی ساکنان این مناطق تأثیر منفی گذاشته است (Jafari & Bakhshandehmehr, 2016:113).

ارزیابی و مدل‌سازی فرسایش بادی به‌عنوان یک ابزار کلیدی در مدیریت منابع طبیعی و حفاظت از محیط زیست، اهمیت زیادی دارد (محمدیان بهبهانی و بوعلی، ۱۳۹۸:۷۵). این فرآیندها به ما این امکان را می‌دهند که

hani.babouei@gmail.com
ali.mohammadian@gau.ac.ir
mhalizadeh@gau.ac.ir
amir.sadoddin@gau.ac.ir
Hossein.boali@yahoo.com

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۲. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران (نویسنده مسئول)
۳. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴. استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۵. پژوهشگر پسادکتری گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

عوامل مؤثر بر فرسایش بادی را شناسایی کرده و روابط پیچیده بین آن‌ها را تحلیل کنیم (Kapp et al, 2025: 21). مدل‌های تجربی، ابزارهای مهمی برای تحلیل و پیش‌بینی فرسایش بادی هستند اما با چالش‌هایی نیز مواجه‌اند. از جمله مدل‌های تجربی فرسایش بادی می‌توان به مدل‌های «RWEQ¹»، «WEPS²» و «IRIFR³» اشاره کرد. این مدل‌ها معمولاً بر اساس داده‌های میدانی و پارامترهای محیطی طراحی می‌شوند که ممکن است به دلیل عدم قطعیت در داده‌ها و تنوع شرایط جوی و خاکی، دقت کافی نداشته باشند (بوعلی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین، بسیاری از این مدل‌ها به سادگی نمی‌توانند روابط پیچیده بین متغیرها را به خوبی شبیه‌سازی کنند (بشری و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۲). زارع‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل اریفر به بررسی پتانسیل فرسایش بادی در شهرستان نهبندان استان خراسان جنوبی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان‌داد؛ به ترتیب بیشترین و کمترین میزان فرسایش بادی در رخصاره‌های ریپل مارک ($8635 \text{ t/km}^2/\text{year}$) و اراضی کشاورزی ($319 \text{ t/km}^2/\text{year}$) می‌باشد. ریگی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی شدت فرسایش بادی و پتانسیل رسوب‌دهی آن با استفاده از مدل اریفر (IRIFR1) در شهرستان سراوان پرداختند. نتایج این تحقیق نشان‌داد که ۶۱/۹ درصد منطقه در کلاس فرسایشی بادی زیاد و ۳۸/۱ از منطقه نیز در کلاس فرسایش بادی خیلی زیاد قرار دارد. همچنین میزان تولید رسوب سالیانه در این منطقه ۵۳۱۵ تن در کیلومتر مربع در سال برآورد شده است.

در این راستا، با توجه به عدم قطعیت موجود در نتایج مدل‌های تجربی، مدل‌های بیزی به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای غلبه بر این چالش‌ها معرفی می‌شوند (Boali et al, 2019: 381). این مدل‌ها با استفاده از رویکردهای آماری و احتمالاتی، قادرند عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها را مدیریت کنند و روابط پیچیده بین متغیرها را به صورت دینامیک تحلیل نمایند (Aalders et al, 2011: 540). به علاوه، مدل‌های بیزی می‌توانند به‌طور مؤثری اطلاعات جدید را در فرآیند مدل‌سازی ادغام کنند و دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند که این امر به‌ویژه در شرایط متغیر و نامشخص بسیار حائز اهمیت است (Landuyt et al, 2013: 7). بوعلی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی کارایی شبکه‌های باور بیزی در ارزیابی شدت فرسایش بادی در استان اصفهان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که مقدار فرسایش بادی در استان اصفهان بیشتر تحت تأثیر سرعت و وضعیت باد، فراوانی بادهای فرساینده و پوشش حفاظتی سطح زمین قرار دارد. همچنین قسمت‌های مرکزی استان (شامل دشت سگزی) و نواحی شمال شرقی به‌عنوان نقاطی که بیشترین خطر فرسایش بادی را دارند، مشخص شدند. در این مطالعه عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد. نتایج نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل (۰/۷۹) در پیش‌بینی سطوح تحت تأثیر فرسایش بادی بود. در مطالعه‌ای دیگر از مدل شبکه باور بیزی و داده‌های آزمایش‌های تونل باد برای ارزیابی خطر فرسایش بادی استفاده شد. عملکرد مدل ساخته‌شده با استفاده از تست سناریو، تحلیل حساسیت و اندازه‌گیری‌های تونل باد، ارزیابی شد. این مدل پیش‌بینی‌های قابل قبولی از فرسایش‌پذیری خاک، پیامدها و خطر فرسایش بادی ارائه‌داد. نتایج این تحقیق نشان‌داد که عوامل جوی و مدیریتی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر ریسک فرسایش بادی هستند (کوچمی ساردو و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۰).

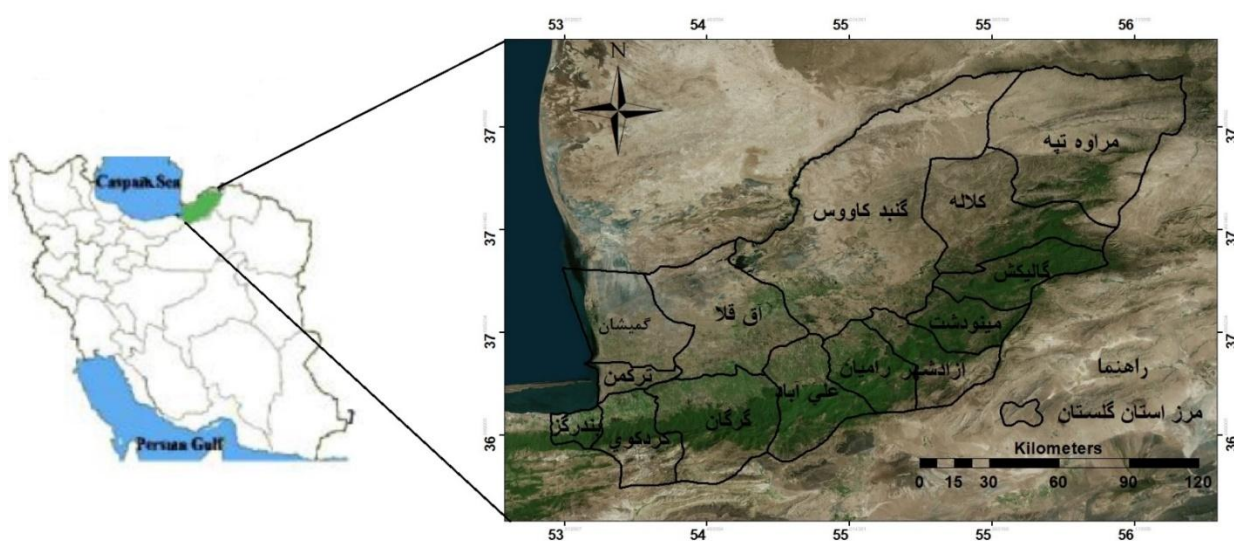
1. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ)
2. Wind Erosion Prediction System (WEPS)
3. Iran research institute of forest and rangelands (IRIFR)

در سال‌های اخیر بحران بیابانی‌شدن اراضی شمال استان گلستان و پدیده گردوغبار با منشأهای داخلی و خارجی به آستانه‌های پرخطر خود نزدیک شده است. تالاب‌های خشک‌شده و اراضی حاشیه آن، بخشی از مراتع ضعیف واقع در شمال استان و اراضی زراعی دیم و بایر به‌عنوان سه کانون بحرانی داخلی گردوغبار استان گلستان به‌شمار می‌روند (خان‌سالاری و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۲۷؛ بوعلی و همکاران، ۱۴۰۳: ۳۴۲؛ عرب‌عامری و همکاران، ۱۴۰۳: ۶۴). متأسفانه با وجود اهمیت، مطالعات و منابع علمی اندکی در زمینه فرسایش بادی در استان‌های شمال شرقی ایران وجود دارد. این پژوهش، پتانسیل استفاده از شبکه‌های باور بیزی برای ایجاد یک مدل ارزیابی فرسایش بادی با قابلیت نشان‌دادن عدم قطعیت در پهنه‌بندی فرسایش بادی را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ بنابراین، توجه به مدل‌سازی فرسایش بادی در استان گلستان ضروری است تا بتوان راهکارهای مؤثری برای مقابله با این چالش محیط‌زیستی ارائه داد.

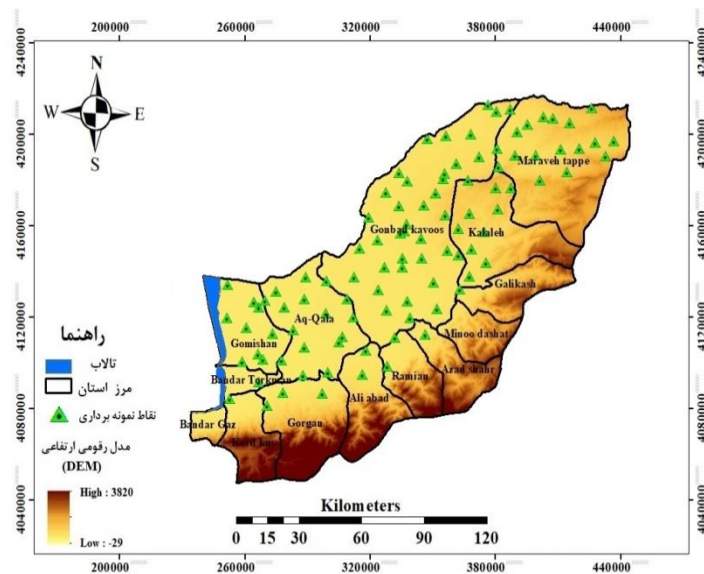
داده‌ها و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۲۰۳۶۷ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی بین ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این منطقه از شمال به اراضی کویری کشور ترکمنستان، از غرب به جلگه ساحلی دریایی خزر، از جنوب به ارتفاعات رشته‌کوه البرز و از شرق به استان خراسان شمالی در ایران محدود می‌شود (شکل ۱). بالاترین و کمترین ارتفاعات منطقه به ترتیب در حدود ۳۳۲۰ متر از سطح دریا (کوه شاهوار) و حدود ۳۲- متر از سطح دریا (تالاب گمیشان) واقع شده است. متوسط بارش سالانه، متوسط تبخیر و متوسط دمای منطقه در طی دوره ۳۰ ساله (۱۴۰۲-۱۳۷۳) به ترتیب ۵۳۰ میلی‌متر، ۱۳۳۸ میلی‌متر و ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد برآورد گردید.



(الف)



(ب)

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (الف) ایران و استان گلستان

(ب) موقعیت نقاط نمونه برداری تصادفی در استان گلستان

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

روش تجربی برآورد فرسایش بادی اریفر

مدل «اریفر» به منظور ارزیابی شدت فرسایش بادی و شناسایی عوامل مؤثر بر این پدیده طراحی شده است. این مدل با توجه به شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی ایران در سال ۱۳۷۶ تدوین گردید و به بررسی ۹ عامل کلیدی مؤثر در فرسایش بادی می‌پردازد (اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۶: ۵). این عوامل شامل؛ نوع سنگ‌شناسی، شکل اراضی، سرعت باد، وضعیت خاک و پوشش سطح آن، انبوهی پوشش گیاهی، آثار فرسایش، رطوبت خاک، نوع و پراکنش نهشته‌های بادی و کاربری اراضی هستند. در این تحقیق، مدل اریفر در طی بازدیدهای میدانی در ۱۰۰ نقطه از استان گلستان اجرا شد. پس از امتیازدهی به هر یک از عوامل نه‌گانه در سطح استان، امتیازات جمع شده و هر چه امتیازات داده شده به یک عامل بیشتر باشد، نشان‌دهنده نقش بیشتر آن در ایجاد فرسایش بادی می‌باشد. این عوامل پس از امتیازدهی، بر طبق جدول ۱ و ۲ طبقه‌بندی شده و پتانسیل رسوبدهی منطقه نیز تعیین می‌شود. پس از اجرای مدل اریفر، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به منظور نشان‌دادن عدم قطعیت موجود در نتایج مدل بیزین طراحی خواهد شد.

جدول ۱: عوامل مؤثر در فرسایش بادی در روش «IRIFR»

شماره	عوامل مورد بررسی در ارزیابی فرسایش بادی	حدود امتیازات
۱	سنگ‌شناسی	۰ - ۱۰
۲	شکل اراضی و پستی‌وبلندی	۰ - ۱۰
۳	سرعت و وضعیت باد	۰ - ۲۰
۴	عامل خاک و پوشش سطح آن	۵ - ۱۵
۵	انبوهی پوشش گیاهی	۱۵ - (۵)
۶	آثار فرسایش سطح خاک	۲۰ - (۵)
۷	رطوبت خاک	۰ - ۱۰
۸	نوع و پراکنش نهشته‌های بادی	۰ - ۱۰
۹	مدیریت و استفاده از زمین	۱۵ - (۵)

مأخذ: اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۶

جدول ۲: تعیین کلاس فرسایش و برآورد رسوب دهی اراضی نسبت به فرسایش بادی

کلاس فرسایشی	کیفیت فرسایش	کل امتیاز محاسبه شده	رسوب‌دهی (تن در کیلومتر در سال)
I	خیلی کم	< ۲۵	کمتر از ۲۵۰
II	کم	۲۵ - ۵۰	۲۵۰ - ۵۰۰
III	متوسط	۵۰ - ۷۵	۵۰۰ - ۱۵۰۰
IV	زیاد	۷۵ - ۱۰۰	۱۵۰۰ - ۶۰۰۰
V	خیلی زیاد	> ۱۰۰	بیشتر از ۶۰۰۰

مأخذ: اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۶

مدل شبکه باور بیزی

شبکه‌های بیزی که به‌عنوان شبکه‌های باور نیز شناخته می‌شوند، یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی و تحلیل روابط احتمالی بین متغیرهای تصادفی هستند. این شبکه‌ها به‌صورت گراف‌های جهت‌دار طراحی شده‌اند که در آن هر گره نمایانگر یک متغیر تصادفی و لینک‌ها نشان‌دهنده روابط احتمالی بین این متغیرها هستند. نحوه تعامل این متغیرها در سیستم به‌وسیله لینک‌ها و جداول احتمالات شرطی تعیین می‌شود (محمدیان‌بهبهانی و بوعلی، ۱۳۹۸: ۷۵). به‌منظور مدل‌سازی فرسایش بادی با استفاده از شبکه‌های باور بیزی، نخست مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار در مدل شناسایی شدند. با توجه به بررسی منابع جامع و شاخص‌های در نظر گرفته شده برای ارزیابی فرسایش بادی در مدل‌های مختلف، متغیرهای مؤثر در مدل بیزی انتخاب شدند. در ادامه تعریف هر متغیر و حالات مختلف مربوط به هر متغیر با استفاده از منابع علمی منتشر شده تبیین و تعریف شد. در مرحله بعد با استفاده از نمودار اثر، روابط علی و معلولی بین این متغیرها مشخص شد. جهت طراحی نمودار اثر، طی چندین مرحله طراحی و اصلاح، با استفاده از نظریات متخصصان و بررسی منابع صورت گرفت. در نهایت برای ایجاد مدل و تشکیل جداول احتمالات شرطی برای متغیرهای مدل، نمودار تأثیر با استفاده از نرم‌افزار «Netica» به یک مدل بیزی اولیه تبدیل شد. با أخذ نظرات از کارشناسان اجرایی و متخصصان و استفاده از نرم‌افزار محاسبه‌گر احتمالات شرطی (CPT Calculator) جداول احتمالات شرطی مدل تکمیل شد (Boali et al, 2019:381). در نهایت احتمال خطر فرسایش بادی در سه کلاس؛ کم، متوسط و زیاد به‌دست خواهد آمد.

تهیه لایه‌های اطلاعاتی (ورودی‌های مدل)

پس از طراحی مدل و تعیین ارتباط بین متغیرها، متغیرهایی که تحت تأثیر سایر متغیرها قرار ندارند و هیچ لینکی به آن‌ها متصل نیست، در بالاترین سطح مدل قرار می‌گیرند و به‌عنوان ورودی‌های مدل شناخته می‌شوند. اطلاعات مربوط به این متغیرها باید از منطقه مورد مطالعه استخراج شده و به مدل وارد شوند. کاربری اراضی، سرعت باد، پوشش گیاهی، رطوبت خاک، بافت خاک، شوری خاک، کربنات کلسیم و مواد آلی به‌عنوان ورودی مدل شناسایی شدند. اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی، شوری خاک، کاربری اراضی، بافت خاک و رطوبت خاک استان گلستان با استفاده از پلتفرم «Google Earth Engine»، اطلاعات مربوط کربنات کلسیم و مواد آلی از نتایج پژوهشی انجام‌شده در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان استفاده شد و اطلاعات مربوط به سرعت باد از ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان گرفته شده است. علاوه بر متغیرهای ورودی، در مدل شبکه‌های باور بیزی متغیرهای اصلی نیز وجود دارند که در سطح پایین مدل قرار می‌گیرند و نتایج عملکرد آن‌ها از طریق تکمیل جداول احتمال شرطی بررسی می‌شود.

تجزیه و تحلیل حساسیت

در این مطالعه اعتبارسنجی مدل بیزی، از طریق آنالیز حساسیت و بررسی نتایج توسط متخصصان و همچنین مقایسه نقشه به‌دست‌آمده با نتایج مدل اریفر، انجام شد. تحلیل حساسیت با تغییر تدریجی مقادیر ورودی‌ها و بررسی تأثیر این تغییرات بر نتایج خروجی مدل انجام می‌شود. این کار معمولاً با استفاده از روش کاهش آنتروپی^۱ صورت می‌گیرد تا مشخص شود کدام متغیرها بیشترین تأثیر را بر نتایج نهایی دارند. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف مدل کمک کند و در نهایت به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها منجر شود. به‌منظور صحت‌سنجی مدل بیزین نتایج به‌دست‌آمده از این مدل با نتایج مدل اریفر به‌عنوان مدلی مبتنی بر داده‌های میدانی مقایسه شد.

نتایج و بحث

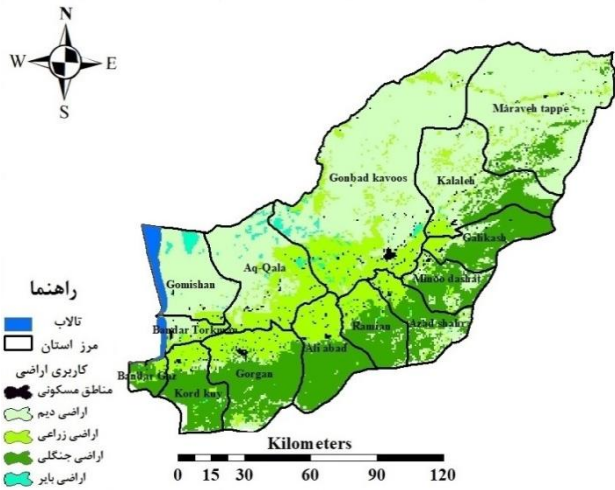
ارزیابی فرسایش بادی با استفاده از شبکه‌های باور بیزی

با توجه به بررسی منابع و سایر مدل‌های فرسایش بادی، مهم‌ترین متغیرهایی که در مدل‌سازی فرسایش بادی منطقه تأثیر داشت، به‌شرح جدول زیر انتخاب شد (جدول ۳). شکل ۲ نقشه‌های ورودی مدل بیزین در استان گلستان را نشان می‌دهد. براساس نقشه کاربری اراضی، مساحت کاربری‌های اراضی بایر، اراضی مسکونی، جنگل، زراعی و مرتع به‌ترتیب ۵۶۰۸، ۲۰۶۵۶، ۵۰۲۳۸۵، ۸۰۹۳۰۰، ۶۳۷۱۸۸ هکتار است. براین اساس کاربری مرتع بیشترین و کاربری اراضی بایر کمترین مساحت را دارا می‌باشند. نقشه سرعت باد نشان‌دهنده وجود بادهای فرساینده در مناطق شمال غربی و شمال شرقی می‌باشد در حالی که در مناطق جنوبی، باد به‌طور کلی پتانسیل فرسایشی چندانی ندارد. نقشه‌های NDSI، NDMI، NDVI و مواد آلی به‌ترتیب نشان‌دهنده کمترین شوری خاک و بیشترین رطوبت سطحی، تراکم پوشش گیاهی و مواد آلی در نوار جنوبی استان گلستان می‌باشد. همچنین نتایج نشان‌داد به‌ترتیب افزایش روند شوری خاک و کاهش پوشش گیاهی، رطوبت سطحی خاک و مواد آلی در نواحی شمالی و شمال شرقی استان است. نقشه بافت خاک نشان‌دهنده غالب بودن بافت لومی و رسی در استان گلستان می‌باشد. در نهایت بیشترین درصد کربنات کلسیم در نواحی شمال غربی استان گلستان مشاهده شد.

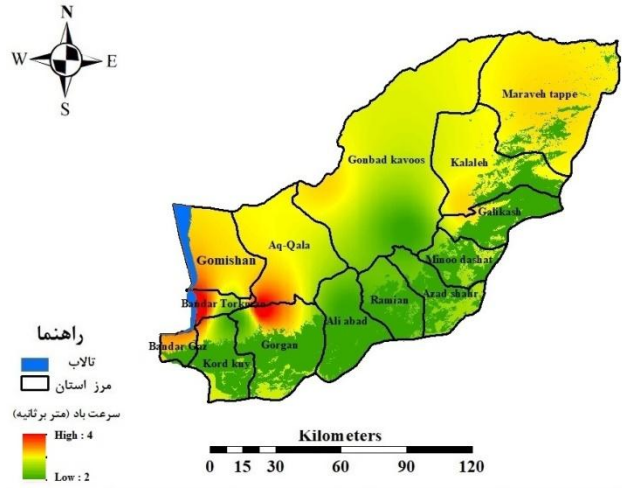
جدول ۳: مشخصات متغیرهای ورودی در مدل «BBN»

متغیرها	نوع متغیر	کلاس کیفی	کلاس کمی
کاربری اراضی	گسسته	خیلی کم	مناطق شهری
		کم	جنگلی، باغی
		متوسط	اراضی زراعی، مراتع پرتراکم
		زیاد	مراتع فقیر، اراضی دیم
		خیلی زیاد	اراضی بایر، تالاب‌های فصلی و ساحلی خشک شده، کفه‌های رسی نمکی
سرعت باد (m/s)	پیوسته	کم	۰ - ۳
		متوسط	۳ - ۶
		زیاد	۶ - ۸
		خیلی زیاد	۸ - ۱۰
پوشش گیاهی	پیوسته	کم	۰ - (-۱)
		متوسط	۰ - ۰,۳
		زیاد	۰,۳ - ۱
رطوبت خاک	پیوسته	کم	۰ - (-۱)
		متوسط	۰ - ۰/۵
		زیاد	۰/۵ - ۱
بافت خاک	گسسته	کم	Silty clay
		متوسط	Clay loam
		زیاد	loam
		خیلی زیاد	Silty clay loam
شوری خاک	پیوسته	کم	۰ - (-۱)
		متوسط	۰ - ۰/۵
		زیاد	۰/۵ - ۱
کربنات کلسیم (درصد)	پیوسته	کم	۰ - ۱۰
		متوسط	۱۰ - ۲۰
		زیاد	۲۰ - ۳۰
مواد آلی (درصد)	پیوسته	کم	۰ - ۱
		متوسط	۱ - ۲
		زیاد	۲ - ۳

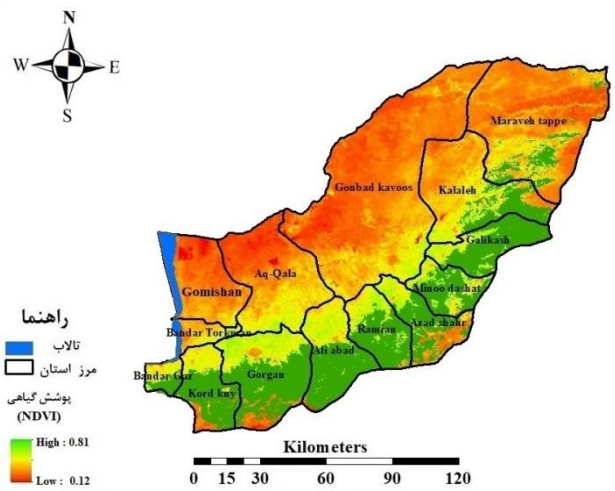
مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۳



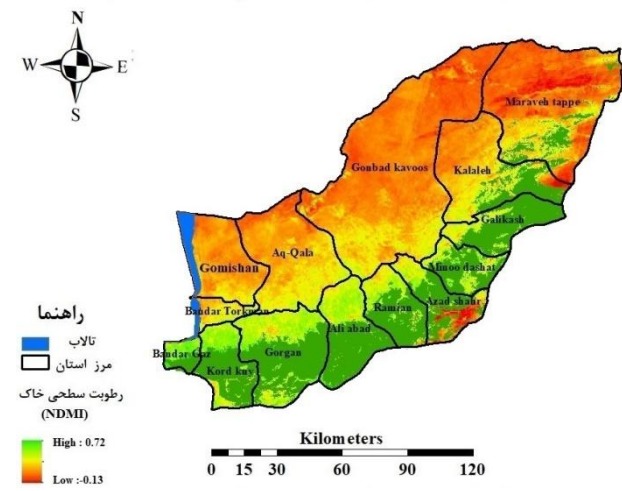
(ب)



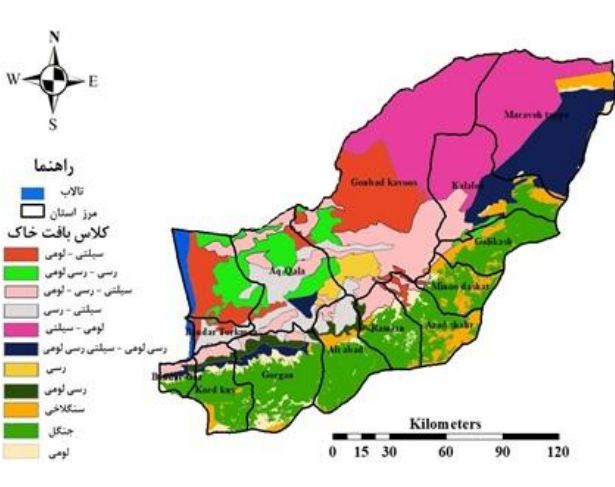
(الف)



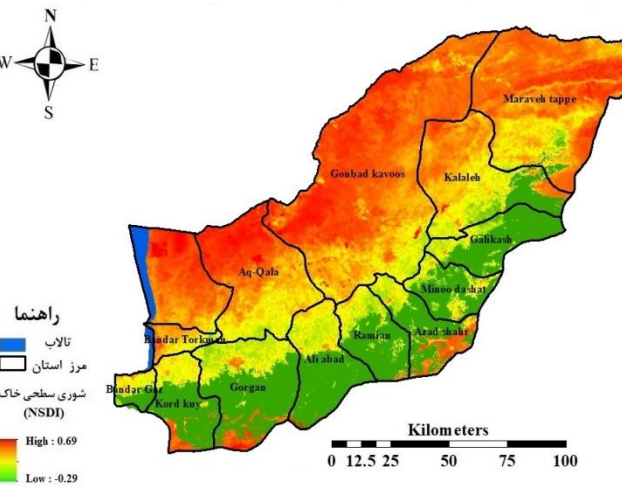
(ت)



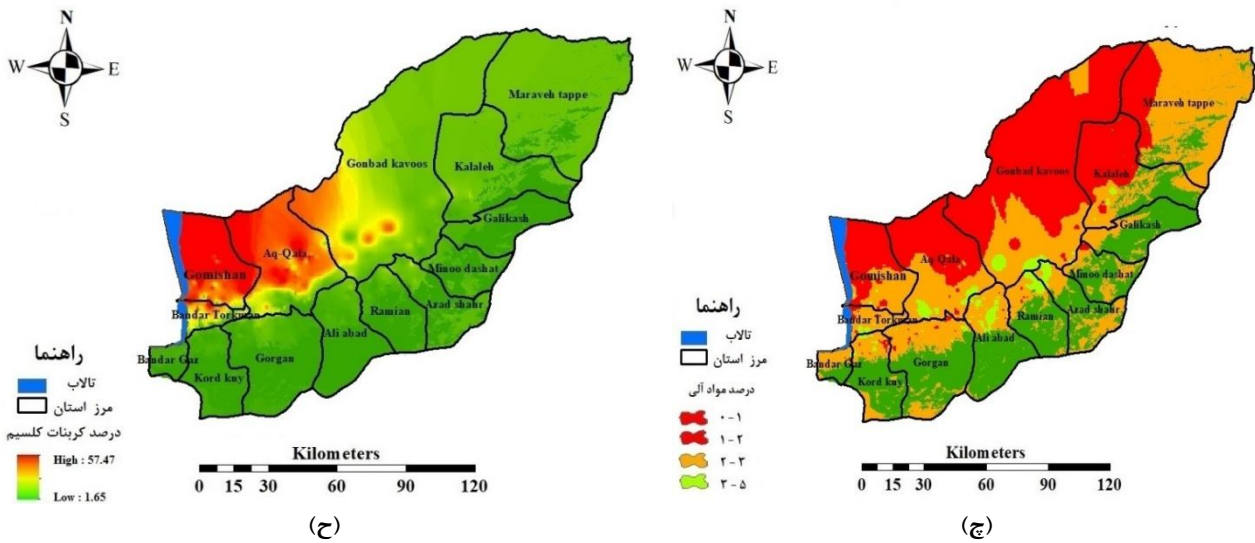
(پ)



(ج)



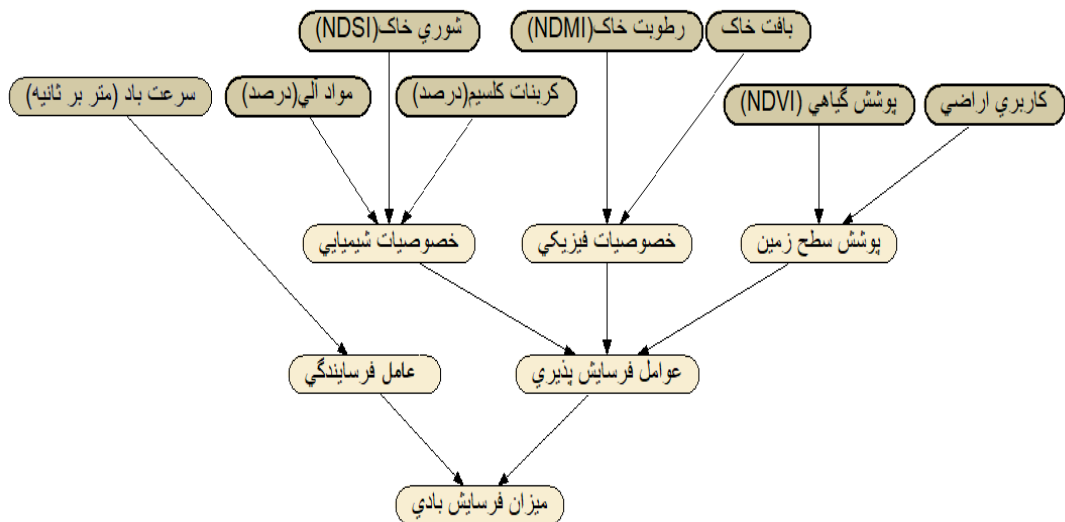
(ث)



شکل ۲: نقشه ورودی‌های مدل شبکه‌های بیزین به ترتیب الف: نقشه سرعت باد، ب: نقشه کاربری اراضی، پ: نقشه رطوبت سطحی خاک، ت: نقشه پوشش گیاهی، ث: نقشه درصد مواد آلی، ج: نقشه درصد کربنات کلسیم، چ: نقشه شوری سطحی خاک، ح: نقشه بافت خاک.

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

شکل ۳ نمودار تأثیر مدل بیزی ارائه شده است. براساس این مدل، بافت و رطوبت مهم‌ترین عواملی بوده که بر خصوصیات فیزیکی خاک منطقه تأثیرگذار بوده‌اند که به وسیله پیکان‌هایی این رابطه نشان داده شد. خصوصیات فیزیکی به همراه خصوصیات شیمیایی و پوشش سطح زمین تشکیل دهنده عوامل فرسایش پذیری خاک در منطقه هستند. بر اساس مدل مفهومی ارائه شده می‌توان با در نظر گرفتن عوامل فرسایش پذیری در کنار عامل فرسایش پذیری که توسط سرعت باد مشخص می‌شود، درصد احتمال شدت فرسایش بادی در محدوده مورد مطالعه را به دست آورد.



شکل ۳: روابط بین متغیرهای فرسایش بادی. عوامل تأثیرگذار با پیکان‌هایی به هم مرتبط شده‌اند و جهت پیکان نشان دهنده جهت تأثیر است.

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

برای افزایش کارایی و به‌روزرسانی شبکه‌های بیزی، روابط میان متغیرها، در قالب یک سیستم، کمی‌سازی شدند. در جدول ۴ احتمالات شرطی مربوط به متغیر خصوصیات فیزیکی خاک در مدل فرسایش بادی آورده شده است. بر اساس نظر کارشناسی احتمال وقوع هر سناریو به درصد در این جدول بیان شده است. به‌عنوان مثال براساس نظر کارشناسان اگر میزان رطوبت خاک در کلاس متوسط و بافت خاک در کلاس «loam Clay» جای گیرد، به‌احتمال ۵۵ درصد خصوصیات فیزیکی خاک از نظر فرسایش بادی مناسب و به احتمال ۴۵ درصد خصوصیات فیزیکی خاک در کلاس نامناسب قرار می‌گیرد.

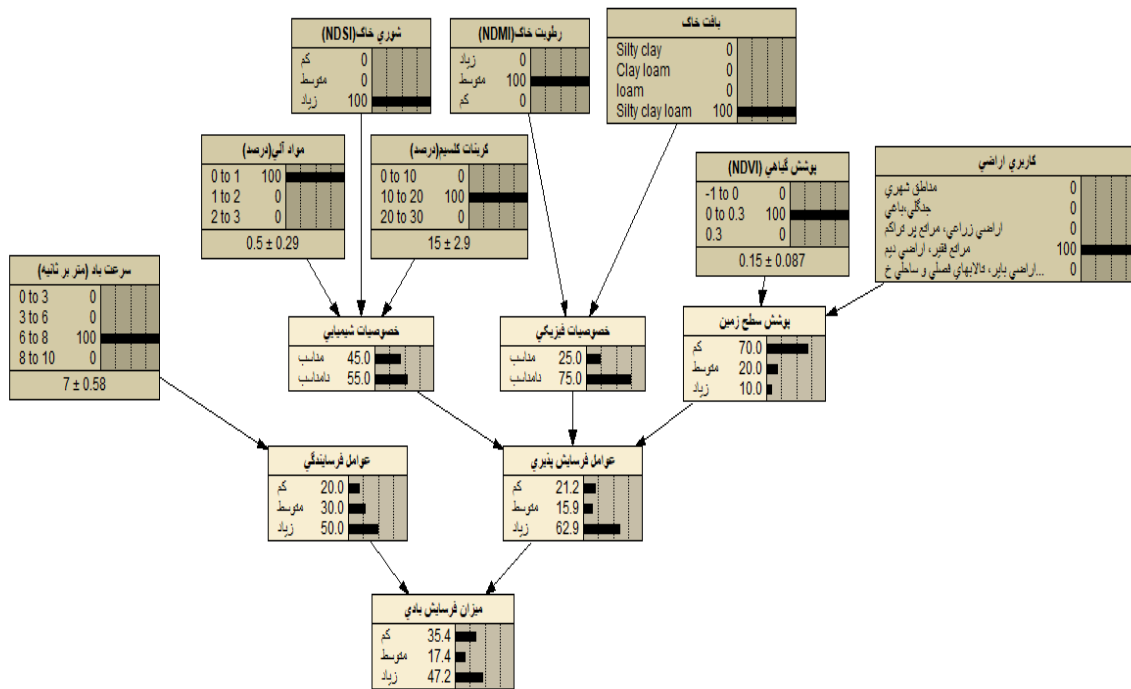
جدول ۴: احتمالات شرطی مربوط به متغیر خصوصیات فیزیکی خاک در مدل فرسایش بادی

کلاس		متغیرهای تأثیرگذار	
مناسب	نامناسب	رطوبت خاک	بافت خاک
۹۰	۱۰	زیاد	clay Silty
۳۰	۷۰	متوسط	clay Silty
۱۵	۸۵	کم	clay Silty
۸۰	۲۰	زیاد	loam Clay
۵۵	۴۵	متوسط	loam Clay
۴۰	۶۰	کم	loam Clay
۷۵	۲۵	زیاد	loam
۴۵	۵۵	متوسط	loam
۲۰	۸۰	کم	loam
۳۵	۶۵	زیاد	loam clay Silty
۲۵	۷۵	متوسط	loam clay Silty
۱۰	۹۰	کم	loam clay Silty

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۳

شکل ۴ مدل شبکه‌های باور بیزی مربوط به مدل فرسایش بادی را نمایش می‌دهد. با تغییر احتمالات در هر یک از کلاس‌های متغیرهای ورودی، احتمالات سایر متغیرهای متأثر از آن نیز تغییر می‌کند. مدل ایجادشده در ۱۰۰ نقطه از استان گلستان اجرا شد. در شکل ۴ اطلاعات مورد نیاز از نقطه شماره یک گرفته شده و مدل برای این نقطه در غرب استان (مراتع شهرستان آق‌قلا) اجرا شده است. طبق مدل بیزی، در صورتی که میزان شوری خاک در نقطه شماره یک در کلاس زیاد، میزان کربنات کلسیم بین ۱۰ الی ۲۰ درصد و همچنین میزان مواد آلی کمتر از یک درصد باشد، از نظر شدت فرسایش بادی، خصوصیات شیمیایی خاک به احتمال ۴۵ درصد در کلاس مناسب و به احتمال ۵۵ درصد در کلاس نامناسب قرار می‌گیرد. براساس مدل ارائه‌شده، متغیرهای خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و پوشش سطح زمین بر روی عوامل فرسایش‌پذیری تأثیرگذار هستند که در این نقطه عوامل فرسایش‌پذیری به احتمال ۶۲ درصد در کلاس زیاد قرار گرفته است. در نهایت خروجی مدل بر اساس دو متغیر عوامل فرسایش‌پذیری و

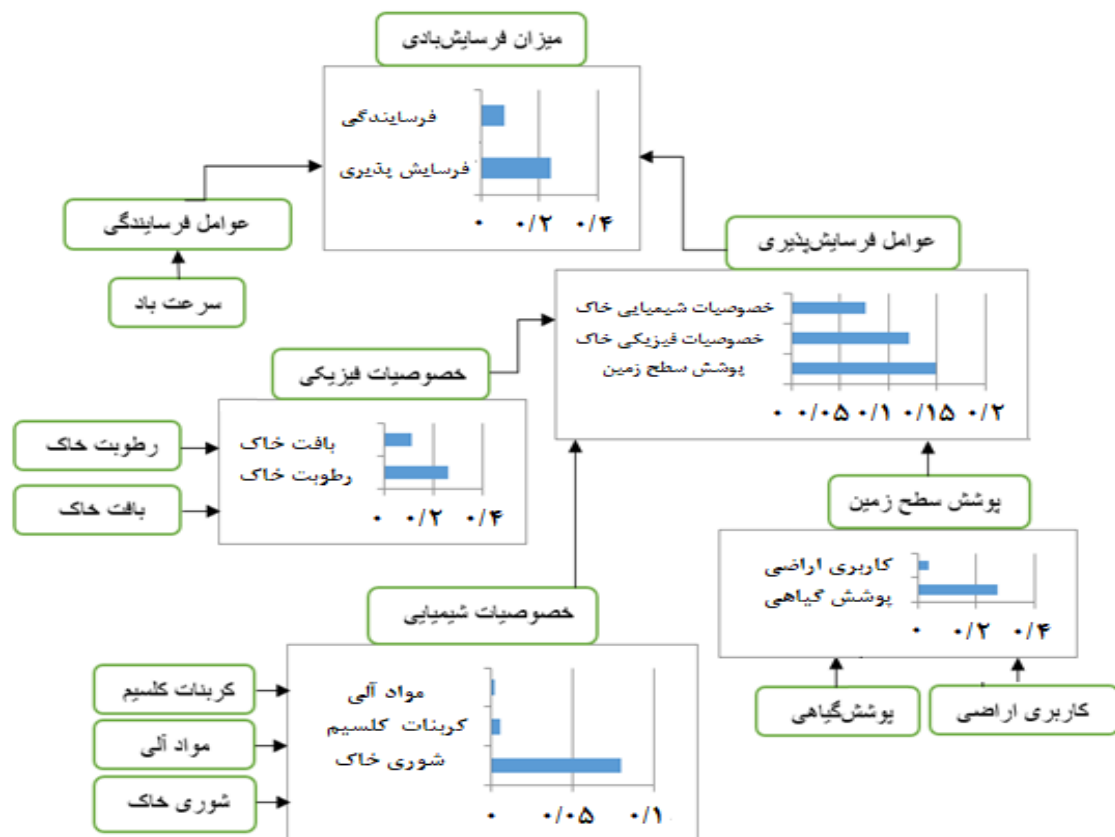
فرسایش پذیری تعیین می‌شود که بر این اساس مقدار فرسایش بادی این منطقه به احتمال ۴۷/۲ درصد زیاد، ۱۷/۴ درصد در کلاس متوسط و ۳۵/۴ درصد در کلاس کم قرار دارد. نتایج نشان‌دهنده شدت بالای فرسایش بادی در این منطقه می‌باشد.



شکل ۴: نمونه مدل شبکه‌های باور بی‌زی ارائه شده جهت ارزیابی شدت فرسایش بادی در نقطه شماره یک (مراتع شهرستان اق قلا) تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

ارزیابی مدل

نتایج حساسیت‌سنجی مربوط به مدل فرسایش بادی به دو صورت جزئی و کلی در شکل ۵ و جدول ۴ آورده شده است. نتایج حساسیت‌سنجی مدل فرسایش بادی به صورت جزء به جزء در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد، عوامل فرسایش‌پذیری (۰,۲۳) تأثیر بیشتری نسبت به عوامل فرسایش‌پذیری (۰,۱۲) بر فرسایش بادی منطقه دارند. نتایج آنالیز حساسیت، متغیر پوشش سطح زمین (۰,۱۵) را به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر عوامل فرسایش‌پذیری پیش‌بینی کرده است. پس از متغیر پوشش سطح زمین به ترتیب خصوصیات فیزیکی خاک (۰,۱۳) و خصوصیات شیمیایی خاک (۰,۰۷) پارامترهای مؤثر بر عوامل فرسایش‌پذیری هستند. متغیر پوشش سطح زمین بیشترین حساسیت را به پوشش گیاهی (۰,۲۴) و سپس به کاربری اراضی (۰,۰۳) نشان داد. به ترتیب شوری خاک (۰,۰۷)، کربنات کلسیم (۰,۰۲) و مواد آلی (۰,۰۱) بیشترین تأثیر را بر خصوصیات شیمیایی می‌گذارند. نتایج آنالیز حساسیت نشان‌داد از متغیرهای تأثیرگذار بر خصوصیات فیزیکی خاک، متغیر رطوبت خاک (۰,۱۲) تأثیر بیشتری نسبت به متغیر بافت خاک (۰,۰۷) دارد. در نهایت باد به‌عنوان تنها عامل فرسایش‌پذیری در مدل ارائه شده ایفای نقش می‌کند.



شکل ۵: نتایج حساسیت‌سنجی مدل فرسایش بادی به صورت جزء‌به‌جزء

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

جدول ۵ نتایج حساسیت‌سنجی کلی مدل فرسایش بادی را نشان می‌دهد. در این مدل حساسیت گره خروجی مدل به صورت کلی نسبت به پارامترهای دیگر نشان داده شده که بر این اساس فرسایش بادی منطقه بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات عوامل فرسایش پذیری، پوشش سطح زمین و خصوصیات فیزیکی خاک داشته و کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات مواد آلی، کربنات کلسیم موجود در خاک و بافت خاک دارد. وجود مراتع فقیر با پوشش حداقلی در نیمه شمالی استان گلستان، همچنین وجود رسوبات حساس رسی در شمال و شرق استان گلستان می‌تواند دلیلی بر اهمیت بیشتر عوامل فرسایش پذیر در شدت فرسایش بادی باشد. همچنین با توجه به شرایط حاکم در مناطق مختلف، عوامل تأثیرگذار بر فرسایش بادی می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال؛ بوعلی و همکاران (۱۳۹۹) سرعت و وضعیت باد را در استان اصفهان مهم‌ترین عامل در شدت فرسایش بادی دانستند. دو و همکاران (۲۰۱۵) و کمالی و همکاران (۲۰۲۰)، نیز در تحقیقات خود اشاره داشته‌اند که فرسایش بادی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی مانند: دما، بارش و سرعت باد قرار می‌گیرد.

جدول ۵: نتایج حساسیت‌سنجی مدل فرسایش بادی

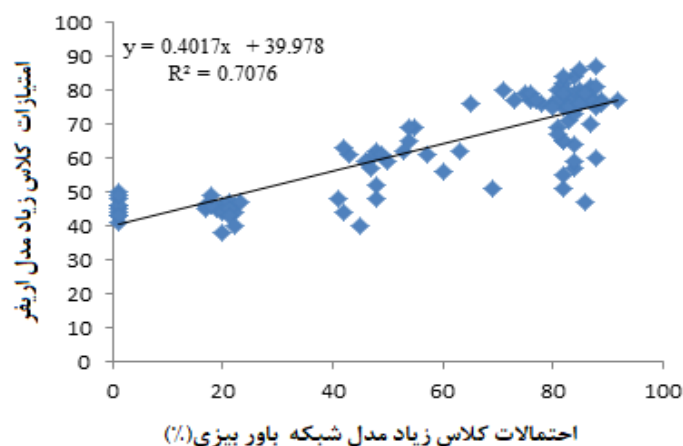
متغیر	کاهش بی‌نظمی
فرسایش‌پذیری	۰/۲۳۷۷۹
فرساینده‌گی	۰/۰۸۰۷۰
پوشش سطح زمین	۰/۰۴۲۷۷
خصوصیات فیزیکی خاک	۰/۰۲۸۴۷
خصوصیات شیمیایی خاک	۰/۰۲۰۸۹
پوشش گیاهی (NDVI)	۰/۰۱۴۱۸
رطوبت سطح خاک (NDSI)	۰/۰۰۴۸۷
شوری سطح خاک	۰/۰۰۲۲۳
کاربری اراضی	۰/۰۰۲۰۰
بافت خاک	۰/۰۰۲۰۰
کربنات کلسیم خاک	۰/۰۰۰۱۵
مواد آلی خاک	۰/۰۰۰۱۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۳

جدول ۶: وضعیت فرسایش بادی برآوردشده با استفاده از مدل بیزی و اریفر برای نقاط منتخب

نقاط اجرای مدل	امتیاز فرسایش بادی مدل اریفر	احتمال وقوع فرسایش بادی پیش‌بینی شده با استفاده از شبکه‌های باور بیزی (%)		
		زیاد	متوسط	کم
۱	۴۴	۴۲	۲۲	۳۶
۲	۶۹	۵۵	۱۵	۳۰
۳	۷۶	۸۰	۱۷	۳
۴	۵۶	۶۰	۱۶	۲۴
۵	۵۱	۶۹	۱۵	۱۶
۶	۷۵	۸۲	۱۳	۵
۷	۶۲	۶۳	۱۵	۲۲
۸	۸۰	۸۱	۱۱	۸
۹	۷۶	۷۸	۱۰	۱۲
۱۰	۷۰	۸۷	۶	۷

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۳



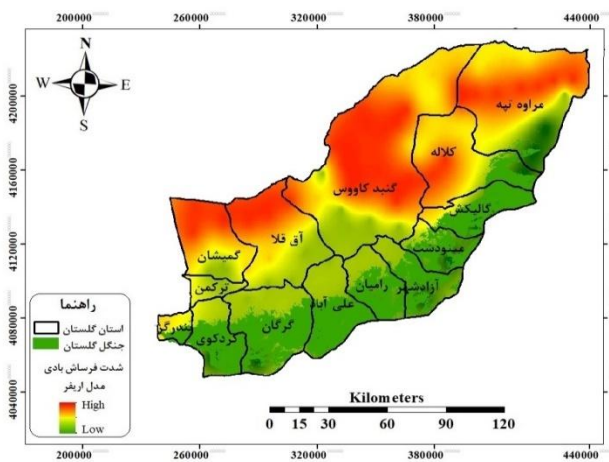
شکل ۶: همبستگی بین امتیازات کلاس زیاد مدل اریفر و احتمالات کلاس زیاد پیش‌بینی‌شده مدل شبکه باور بیزی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

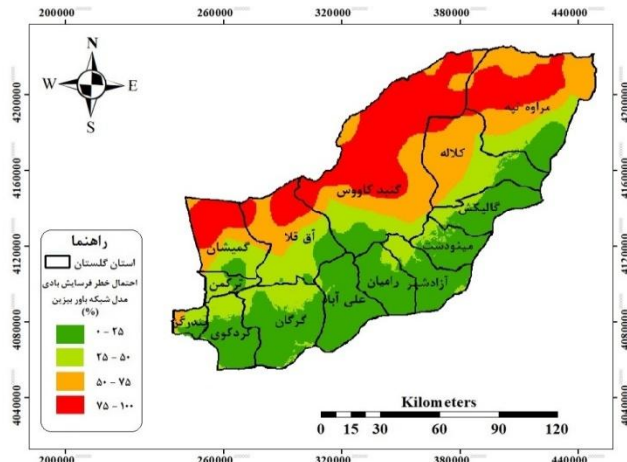
نقشه خطر فرسایش بادی

شکل ۷ نقشه احتمال خطر فرسایش بادی بر اساس مدل بیزی در استان گلستان را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نواحی شمالی، شمال غربی و شمال شرقی استان آسیب‌پذیرترین نقاط از نظر شدت فرسایش بادی هستند. همچنین احتمال خطر فرسایش بادی از صفر درصد در نواحی جنوب استان به ۸۹ درصد در نواحی شمالی ادامه دارد. نتایج حاصل از کلاس‌بندی نقشه احتمال خطر فرسایش بادی در استان گلستان نشان‌داد که ۳۰ درصد (۶۰۷۲ کیلومترمربع) از مساحت استان در کلاس احتمال خطر صفر تا ۲۵ درصد قرار دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده ۲۵ درصد از مساحت استان (۴۹۹۹ کیلومترمربع) در کلاس احتمال خطر ۲۵ تا ۵۰ درصد فرسایش بادی قرار گرفته‌اند. نواحی مرکزی استان با مساحت ۴۳۷۱ کیلومترمربعی که معادل ۲۱ درصد از مساحت استان است در کلاس احتمال خطر فرسایش بادی ۵۰ تا ۷۵ درصد قرار دارد. در نهایت نواحی شمالی استان با مساحت ۴۸۶۳ کیلومترمربع در کلاس احتمال خطر ۷۵ تا ۱۰۰ درصد فرسایش بادی قرار گرفت (شکل ۷). براساس نتایج مدل اریفر نیز از کل منطقه مورد مطالعه که حدود ۲۰۴۸۶ کیلومترمربع است ۶۴ درصد معادل ۸۴۳۵ کیلومترمربع در کلاس فرسایش بادی کم (از ۶۴ درصد، ۲۳ درصد آن شامل مناطق جنگلی است که در این تحقیق در نظر گرفته نشد) ۳۰ درصد معادل ۵۹۶۸ کیلومترمربع در کلاس فرسایش بادی متوسط و ۶ درصد معادل ۱۱۹۴ کیلومترمربع در کلاس شدید فرسایش بادی قرار دارد (شکل ۷).

پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی با استفاده از مدل اریفر و مدل بیزی نشان‌دهنده کلاس خطر فرسایش بادی شدید در نیمه شمالی استان گلستان است. اقلیم بیابانی و نیمه‌خشک منطقه همراه با خاک‌هایی با بافت ریزدانه و پوشش گیاهی پراکنده، منطقه‌ای شکننده و حساس در برابر فرسایش است که تپه‌های ماسه‌ای طولی و همچنین نیکاهای فعال شاهی بر این ادعا است. سایر محققین نیز در مطالعات خود به بررسی فرسایش بادی در شهرستان‌های استان گلستان (آق‌قلا، گنبد کاووس) پرداختند. نتایج تحقیقات این محققین نیز نشان‌دهنده غلبه فرسایش بادی به‌خصوص در فصول خشک همراه با حمل ماسه‌های ریزدانه و ذرات سیلت و تجمع آن در اطراف بوته‌های گیاهی در این مناطق است (ثابتی، ۱۳۸۷: ۵۹؛ هنردوست و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۲؛ رضوی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰: ۶۲).



(ب)



(الف)

شکل ۷: نقشه شدت فرسایش بادی الف: مدل شبکه باور بیزی ب: مدل اریفر

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

مدل «اریفر»، کلاس خطر فرسایش بادی را تنها در یک کلاس و به صورتی کیفی ارائه می‌دهد در حالی که مدل بیزی ارائه شده در این تحقیق به خوبی احتمال خطر فرسایش بادی در نقاط مختلف استان گلستان را نشان داد. براساس نتایج مدل بیزی، نیمه شمالی استان گلستان در دو کلاس احتمال خطر فرسایش بادی ۵۰ تا ۷۵ درصد و ۷۵ تا ۱۰۰ درصد قرار گرفت در حالی که مدل اریفر کلاس خطر فرسایش بادی را تنها در کلاس زیاد قرارداد. مدل سازی بیزی با نشان دادن عدم قطعیت موجود، می‌تواند در بخش مدیریت و کمک به تصمیم‌گیری مدیران در بخش‌های مختلف بسیار مفید باشد (بوعلی و محمدیان بهبهانی، ۱۳۹۹: ۷۹).

در تحقیقات اسمیت و همکاران (۲۰۰۷) نیز اشاره شده است، دیدگاه مدل سازی شبکه‌های باور بیزی نباید به عنوان یک جایگزین برای پژوهش‌های میدانی در نظر گرفته شود؛ بلکه تنها یک ابزار برای ساختاردهی به دانش است؛ بنابراین، قابلیت استناد و اعتماد به این دیدگاه، به عواملی مانند واقعیت، دقت و صحت داده‌ها و دانشی که در ساخت مدل استفاده شده است، بستگی دارد (Newton, 2007:34).

در این مطالعه با استفاده از مدل شبکه‌های باور بیزی یک مدل علی و معلولی ساخته شد و همبستگی نتایج آن‌ها با مدل تجربی اریفر بررسی گردید. مدل اریفر خود نیز یک مدل تجربی است که کارایی آن منطقه به منطقه و بنا به برآورد معیارهای مربوطه، عاری از خطا نیست اما براساس نتایج قابل قبول به دست آمده، از این مدل در منطقه مورد مطالعه برای صحت‌سنجی مدل شبکه‌های باور بیزی استفاده شد. بدیهی است که برای ارزیابی صحت نتایج مدل لازم است که شدت فرسایش بادی به روشی نظیر استفاده از تونل بادی بررسی شود و سپس با استفاده از شاخص‌های همبستگی کارایی مدل بررسی گردد. توانایی‌های مدل‌های شبکه‌های باور بیزی شامل قابلیت اجرا در مقیاس‌های مختلف از سطح محلی تا سطح سرزمین و مقیاس‌های بزرگ‌تر است. این شبکه‌ها به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت سرزمین و منابع عمل می‌کنند و قادرند متغیرهای زیست‌محیطی مهم را تعیین کرده، روابط را کمی‌سازی نموده و در نهایت شرایط را پیش‌بینی کنند. این ابزار قادر است بخش عمده‌ای از نیازهای مدیریتی را فراهم کند (Douglas, 2009: 76). مدل طراحی شده در این مطالعه قابلیت اجرا در تمامی مناطق را داراست، با این حال باید با توجه به شرایط هر منطقه، تعداد متغیرهای مدل مجدداً بررسی شده و ممکن است تعداد آن‌ها افزایش یا کاهش یابد. این رویکرد به‌ویژه در زمینه بهره‌برداری از دانش متخصصان، کارایی بالایی را به اثبات رسانده است. تهیه شبکه‌های باور بیزی

نسبتاً آسان است و از همه مهم‌تر، قابلیت درک آن‌ها توسط متخصصان بسیار بالاست. نمایش گرافیکی مدل، درک آنرا آسان می‌کند. هر چند تعریف جداول احتمال شرطی و اختصاص احتمال به سناریوها کار دشوار و زمان‌بری است (Newton, 2007:34). اما این زبان احتمالاتی کارایی شبکه را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این پژوهش نشان داد که مدل‌سازی به‌روش شبکه‌های باور بیزی، یک رویکرد مناسب برای مطالعه و ارزیابی فرسایش بادی است که نتایج مشابهی در مطالعات قبلی نیز به‌دست آمده بودند (بوعلی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۱؛ Alders et al, 2011: 540).

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به‌منظور ارزیابی وضعیت فرسایش بادی، از شبکه‌های باور بیزی به‌عنوان ابزاری احتمالاتی و مبتنی بر روابط علت و معلولی بهره برده است. مدل ارائه‌شده، با قابلیت انطباق با شرایط گوناگون مناطق مختلف طراحی شده است؛ به این معنا که امکان افزودن یا کاستن متغیرها بر اساس ویژگی‌های خاص هر منطقه وجود دارد. مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان مدلی کاربردی در زمینه مدیریت و تصمیم‌گیری، راهنمای مدیران در بخش‌های مرتبط باشد. براساس نتایج به‌دست آمده از مدل بیزی و نقشه احتمالاتی ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان به بررسی و اولویت‌بندی کانون‌های بحرانی فرسایش بادی در استان گلستان پرداخت. در مناطق بحرانی استان اقدامات اصلاحی و زیستی شامل؛ کشت و توسعه پوشش جامعه گیاهی مقاوم به شوری خاک و آب، استراتژی افزایش گیاهان مقاوم به شوری و خشکی در مراتع ضعیف، انجام عملیات کشاورزی حفاظتی به‌ویژه حفظ باقیمانده‌های زراعی پس از برداشت و احداث شبکه بادشکن در حاشیه اراضی زراعی پیشنهاد می‌شود. اهمیت اجرایی پروژه‌های کنترل فرسایش بادی به‌منظور کمک به توسعه پایدار سرزمین برای جلوگیری از مهاجرت، حفظ اراضی کشاورزی، توسعه صنعت، ایمنی خطوط مواصلاتی، اماکن اقتصادی و منابع زیستی در بوم‌های بیابانی با مهار بیابان‌زایی نشان داده می‌شود. بر این اساس پیشنهاد می‌شود؛ با انجام طرح‌های تحقیقاتی و پژوهشی و افزایش آگاهی عمومی مردم، به‌خصوص زارعین اراضی کشاورزی و بهره‌برداران منابع طبیعی، راهکارهای مناسب برای کنترل فرسایش بادی با استفاده از تیم کارشناسی قوی در استان گلستان به‌کار گرفته شود.

منابع

آرامی، سیدعبدالحسین؛ مجید اونق؛ علی محمدیان‌بهبهانی؛ مهری اکبری؛ علیرضا زراسوندی (۱۳۹۷). تحلیل آماری الگوی فضایی-زمانی طوفان گردوغبار در غرب و جنوب غرب ایران، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. دوره ۲۵. شماره ۱. صفحات ۸۳-۶۱.

[10.22069/jwsc.2018.14107.2883](https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14107.2883)

اکبری، مرتضی؛ مجید اونق؛ حمیدرضا عسگری؛ امیر سعدالدین؛ حسن خسروی (۱۳۹۵). ارزیابی ریسک فرسایش خاک براساس مدل کورین (مطالعه موردی: منطقه نیمه‌بیابانی غرب استان گلستان)، مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان. سال پنجم. شماره ۱۲. صفحات ۷۸-۶۳.

https://deej.kashanu.ac.ir/article_112583.html

اختصاصی، محمدرضا؛ حسن احمدی (۱۳۷۶). بررسی کمی و کیفی فرسایش بادی و برآورد میزان رسوب، مطالعه موردی: دشت یزد-اردکان، مجله منابع طبیعی ایران. جلد ۵۰. شماره ۲.

بوعلی، عبدالحسین؛ حمیدرضا عسگری؛ علی محمدیان‌بهبهانی؛ عبدالرسول سلمان ماهینی؛ بابک نعیمی (۱۴۰۳). پایش و بررسی محدوده‌های هشدار فرسایش بادی در شمال غرب استان گلستان (مطالعه موردی: شهرستان‌های آق‌قلا و گمیشان)، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک. دوره ۴. شماره ۲. صفحات ۳۵۶-۳۴۳.

DOI: [10.22098/mmws.2023.13540.1348](https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13540.1348)

- بوعلی، عبدالحسین؛ علی محمدیان بهبهانی (۱۳۹۹). بررسی کارایی شبکه‌های باور بیزی در ارزیابی شدت فرسایش بادی (مطالعه موردی: استان اصفهان)، مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان. سال نهم. شماره ۲۶. صفحات ۷۳-۸۶. [10.22052/deej.2020.9.26.35](https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.26.35)
- بوعلی، عبدالحسین؛ حسین بشری؛ رضا جعفری؛ محسن سلیمانی (۱۳۹۶). پتانسیل‌یابی شبکه‌های باور بیزین در جهت ارزیابی تأثیر معیار کیفیت خاک در بیابان‌زایی منطقه دشت سگزی اصفهان، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). سال بیست و یک. شماره ۲. صفحات ۲۸-۱۵. [10.18869/acadpub.jstnar.21.2.15](https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.2.15)
- بوعلی، عبدالحسین؛ رضا جعفری؛ حسین بشری (۱۳۹۶). برآورد و ارزیابی فرسایش بادی با بکارگیری شبکه باور بیزی در دشت سگزی اصفهان، مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان. سال ششم. شماره چهاردهم. صفحات ۵۴-۴۸. [DOI: 10.22052/deej.2020.9.26.35](https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.26.35)
- ثابتی، شقایق (۱۳۸۷). بررسی مکانیسم فرسایش بادی و اثر آن بر خطر بیابانزایی در دشت‌های شمال آق‌قلا (استان گلستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مدیریت مناطق بیابانی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان - دانشکده مرتع و آبخیزداری و شیلات و محیط زیست.
- خان‌سالاری، سکینه؛ عثمان مجیدی داشلی‌برون؛ مریم نیکزادفر؛ عبدالجبار ملاعرازی (۱۴۰۱). تغییرات زمانی و مکانی گردوخاک در استان گلستان با استفاده از عمق نوری هواویزها و تأثیرپذیری این استان از بیابان‌های ترکمنستان، فیزیک زمین و فضا. دوره ۴۹. شماره ۲. صفحات ۵۴۰-۵۱۷. [doi: 10.22059/jesphys.2023.349946.1007462](https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462)
- رضوی‌زاده، سمانه؛ حمیدرضا عباسی؛ فاطمه درگاهیان (۱۴۰۰). بررسی پدیده گرد و غبار در استان گلستان، با تأکید بر شاخص عمق اپتیکی و سمت و سرعت باد، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. جلد ۱۵. شماره ۵۳. صفحات ۶۷-۵۸. <http://jwmsei.ir/article-1-993-fa.html>
- ریگی، محمدرضا؛ محسن فراهی؛ صابر کلکلی (۱۳۹۸). ارزیابی شدت فرسایش بادی و پتانسیل رسوب‌دهی آن با استفاده از مدل اریفر (IRIFR1) در منطقه روتک و مک سوخته سراوان، فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای). دوره ۹. شماره ۳۷. صفحات ۴۶۴-۴۴۹.
- <https://ensani.ir/fa/article/481510>
- زارع‌زاده، علی‌رضا؛ احمد پهلوان‌نوری؛ مرتضی دهقانی؛ عباس خاک‌سفیدی (۱۴۰۱). بررسی پتانسیل فرسایش بادی منطقه چاهدashi شهرستان نهبندان استان خراسان جنوبی با استفاده از مدل IRIFR. 2. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز. سال ۲. شماره ۱. صفحات ۳۱-۱۵.
- [10.22034/iwm.2022.549516.1021](https://iwm.2022.549516.1021)
- عرب‌عامری، فائزه؛ علی محمدیان بهبهانی؛ مجید اونق؛ سیدحسین آرامی (۱۴۰۳). تحلیل آماری تغییرات زمانی- مکانی رخدادهای گردوغبار در استان گلستان، مهندسی اکوسیستم بیابان. دوره ۱۲. شماره ۴۰. صفحات ۷۲-۵۹. [10.22052/deej.2024.254036.1037](https://doi.org/10.22052/deej.2024.254036.1037)
- کوچمی‌ساردو، ایرج؛ علی‌اصغر بسالت‌پور؛ حسین بشری؛ حسین شیرانی؛ عیسی اسفندیار پور بروجنی (۱۳۹۶). ارزیابی مدل IRIFR برای شبیه‌سازی هدررفت خاک در رخصاره‌های گوناگون فرسایش بادی به کمک داده‌های دستگاه سنجش فرسایش بادی، دوفصلنامه علمی پژوهشی خشک بوم. دوره ۷. شماره ۱. صفحات ۲۵-۱۳. <https://www.magiran.com/p1764242>
- محمدیان بهبهانی، علی؛ عبدالحسین بوعلی (۱۳۹۸). پتانسیل‌سنجی شبکه باور بیزی در برآورد و ارزیابی میزان فرسایش بادی در دشت دهلران ایلام، جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۳۲. صفحات ۸۶-۶۷. [10.22067/geo.v8i4.79097](https://doi.org/10.22067/geo.v8i4.79097)
- هنردوست، فرهاد؛ محمد واحدبردی‌شیخ؛ نادر بیرویدیان؛ محمدحسین ادهمی‌مجرد (۱۳۸۹). ارزیابی و برنامه‌ریزی عملیات کنترل فرسایش خاک با مدل اسکولوگرام، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری. کرج. <https://civilica.com/doc/87164>

References

- Aalders, I., Hough, R.L., Tower, W. (2011). Risk of erosion in peat soils- an investigation using Bayesian belief networks. *Soil Use and Management*, 27, 538-549.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00359.x>
- Bashari, H., Boali, A., & Soltani, S. (2023). Accommodating uncertainty in soil erosion risk assessment: Integration of Bayesian belief networks and MPSIAC model. *Natural Hazards Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.009.4-5>.
- Boali, A., Bashari, H., Jafari, Reza. (2019). Evaluating the potential of Bayesian networks for desertification assessment in arid areas of Iran. *Land Degradation & Development*. 30 (4), 371-390.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3224>.
- Douglas, S. J. (2009). Habitat suitability modelling in the New Forest National Park. PhD Thesis (PhD), Bournemouth University, UK.
- Du, H., Xue, X., Wang, T., Deng, X. (2015). Assessment of wind-erosion risk in the watershed of the Ningxia- Inner Mongolia Reach of the Yellow River, northern China. *Aeolian Res.* 17, 193-204.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.04.003>.
- Imani, S., Soltani-Jigheh, H., Kafil, H.S., Zinatloo-Ajabshir, S. and Fahmi, A. (2025). Environmental sustainability in combating wind erosion: Chemical stabilization of sand dunes using acidic mulching. *Results in Engineering*, 25, 103758.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103758>
- Jafari, R., & Bakhshandehmeh, L. (2016). Quantitative mapping and assessment of environmentally sensitive areas to desertification in central Iran. *Land Degradation & Development*, 27(2), 108-119.
[10.1002/ldr.2227](https://doi.org/10.1002/ldr.2227)
- Kamali, N., Siroosi, H., Sadeghipour, A. (2020). Impacts of wind erosion and seasonal changes on soil carbon dioxide emission in southwestern Iran. *J. Arid. Land* 12 (4), 690-700.
<https://doi.org/10.1007/s40333-020-0018-5>.
- Kapp, P., Pullen, A., Abell, J.T. and Zhang, L. (2025). Wind erosion in northern China: Insights from the western Qaidam fold belt, Loess Plateau, and Hami Basin. *Earth-Science Reviews*, 105037.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.105037>
- Landuyt, D., Broekx, S., D'hondt, R., Engelen, G., Aertsens, J., & Goethals, P. L. (2013). A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling., *Environmental Modelling & Software* , Vol 46, 1-11.
[10.1016/j.envsoft.2013.03.011](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.011)
- Newton, A. C. (2007). *Forest ecology and conservation: a handbook of techniques*. Oxford University Press, Oxford .
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198567448.001.0001>
- Smith, C. S. Howes, A. L. Price, B. & McAlpine, C. A. (2007). Using a Bayesian belief network to predict suitable habitat of an endangered mammal-The Julia Creek dunnart *Sminthopsis douglasi*. *Biological Conservation*, 139(3- 4): 333-347.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.06.025>