Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences
rsgi.tabrizu.ac.ir

Risk Vulnerability Modeling of Gas Distribution Network Pipelines Using the Mamdani Fuzzy Inference Approach and GIS (Case Study: Ilam City)

Hossein Anvari[1], **Bakhtiar Feizizadeh**[2]✉, **Khalil Valizadeh Kamran**[3]

1. Ph.D. Candidate, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail Dr.hosseinanvari-gis@tabrizu.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: feizizade@tabrizu.ac.ir
3. Full Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: valizadeh@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 5 October 2025
Revised: 1 January 2026
Accepted: 19 July 2026
Published: 4 January 2026

Keywords:
Risk Analysis,
Gas Pipelines,
GIS,
Mamdani Fuzzy Logic,
Ilam.

ABSTRACT

Background and Objective: Given the growing importance of natural gas transmission networks in meeting the needs of populations and industries, risk analysis and vulnerability assessment of these infrastructures against natural and anthropogenic hazards have become an undeniable necessity. The aim of this study is to develop a spatial model for analyzing and identifying high-risk areas along gas transmission pipelines in Ilam City by integrating Geographic Information Systems (GIS) with Mamdani fuzzy logic.

Materials and Methods: In this study, spatial data including the distance from riverbeds, landslide-prone areas, urban gas regulator density, and pipeline diameter were collected. Relevant information layers were prepared in the ArcGIS environment and normalized using fuzzy membership functions. Subsequently, a set of fuzzy rules was defined based on Mamdani logic, and the inference process was carried out to produce the final risk map of the gas transmission pipelines.

Results and Discussion: The modeling results indicated that areas located near riverbeds, regions with steep slopes and landslides, as well as zones with high urban gas regulator density and small-diameter pipelines, exhibited the highest levels of risk. These risk maps, with acceptable accuracy, successfully identified critical areas to support improved management and optimized decision-making for the safety and maintenance of the gas distribution network.

Conclusion: The model developed in this study, by integrating the spatial analysis capabilities of GIS with the strengths of Mamdani fuzzy logic, provides an effective tool for identifying high-risk areas along urban gas transmission pipelines. The results demonstrate that this approach can be applied in planning for pipeline safety enhancement, preventive management, and prioritization of maintenance operations, thereby playing a significant role in mitigating risks and improving the safety of gas supply infrastructures.

Cite this article: Anvari, H., Feizizadeh, B., & Valizadeh Kamran, K. (2026). Risk Vulnerability Modeling of Gas Distribution Network Pipelines Using the Mamdani Fuzzy Inference Approach and GIS (Case Study: Ilam City). *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 6(20), 23-39. http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.69475.1148

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.69475.1148

Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences
rsgi.tabrizu.ac.ir

Introduction

With the growing consumption of natural gas and the increasing dependence of industrial, commercial, and residential sectors on this clean and accessible energy source, gas transmission pipelines serving as the vital arteries of national and urban infrastructure hold a crucial position in ensuring the sustainability and security of energy supply. These pipelines, which play a key role in the reliable transfer of gas from production sources to consumption centers, are constantly exposed to various threats. These threats include natural hazards such as landslides, floods, and subsidence, as well as anthropogenic risks like unauthorized construction, unplanned excavation, and even acts of sabotage. Each of these hazards has the potential to cause irreparable damage to transmission networks, disrupt energy supply, and inflict substantial financial and human losses in residential and industrial areas. Consequently, the assessment and management of gas transmission pipeline risks represent one of the primary priorities in energy infrastructure management.

Materials and Methods

Ilam city, due to its unique geographical and climatic characteristics including its mountainous terrain, steep slopes, heavy seasonal rainfall, and high population density in certain urban areas is recognized as one of the high-risk regions in Iran concerning the vulnerability of gas transmission pipelines. The passage of pipelines through sensitive and often unstable terrains further exacerbates this vulnerability. These conditions underscore the necessity of employing scientific and technological approaches for identifying, analyzing, and mitigating risks. The primary aim of this study is to present a comprehensive model for identifying, analyzing, and spatially zoning the risks associated with gas transmission pipelines in Ilam city by integrating Geographic Information Systems (GIS) with the Mamdani Fuzzy Inference System. This model can serve as an effective tool for improving safety management, preventive planning, and prioritizing protective measures.

Results

In this study, spatial data including the distance of pipelines from riverbeds and landslide-prone areas, the density of urban gas regulators, and pipeline diameters were collected through field surveys and data provided by the Gas Company. These datasets were then processed into information layers in the ArcGIS environment and standardized using fuzzy membership functions. Subsequently, 24 “if–then” rules were formulated within the Mamdani Fuzzy Inference System based on expert knowledge and previous analyses. The inference process comprised four key stages: input fuzzification, rule evaluation, aggregation, and defuzzification. To enhance model accuracy, triangular and trapezoidal membership functions appropriate to spatial and non-spatial data characteristics were employed, and defuzzification was performed using the LOM and SOM methods to enable comparison and evaluation of risk patterns. The modeling results indicated that areas located near riverbeds and regions with a history of landslides exhibited the highest levels of risk. This finding highlights the significant influence of geomorphological factors on the vulnerability of gas transmission pipelines. Additionally, high urban gas regulator density and the use of pipelines with smaller diameters were found to considerably increase overall vulnerability. A comparison of the two defuzzification methods showed that the LOM approach more effectively identified critical areas and high-risk routes with greater accuracy and continuity, whereas the SOM approach provided a broader representation of overall risk distribution across the study area. These methodological differences can play a decisive role in selecting management strategies aligned with decision-makers’ objectives.

Conclusion

Overall, the findings of this study demonstrate that integrating the analytical capabilities of GIS with the flexibility of Mamdani fuzzy logic can serve as an innovative and effective approach for assessing gas transmission pipeline risks. The model outputs not only enable the precise identification of critical points and prioritization of preventive measures but also facilitate optimized managerial decision-making for the safety enhancement, maintenance, and development of gas transmission networks. Furthermore, this model can be generalized to other similar regions and used as a scientific reference for strategic planning in crisis management and risk reduction of gas infrastructure at the national level. Finally, it is recommended that the model be further developed by incorporating updated datasets, including seismic activity, subsidence information, and smart pipeline monitoring systems, to establish a comprehensive national framework for risk management. Such a framework could significantly reduce the likelihood of incidents, enhance the resilience of gas transmission networks, and ensure the long term stability of these vital infrastructures.

References

Contreras, A., Quej-Aké, L. M., Lizárraga, C. R., & Pérez, T. (2015). The role of calcareous soils in SCC of X52 pipeline steel. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1766, 95–106. https://doi.org/10.1557/opl.2015.95

El Golli, R., Bézian, J. J., Delenne, B., & Menu, F. (2007). Modelling of a pressure regulator. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(4), 234–243. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.11.004

Esford, R., Smith, D., & Johnson, P. (2004). Vulnerability analysis for urban natural gas pipeline network system. *Information & Security: An International Journal*, 13(1), 11–28. https://doi.org/10.11610/isij.1301

Ghahroodi, M. (2009). Application of GIS in integrated management of natural hazards. *Geomatics and Natural Hazards Management Journal*, 16(7), 119–134. (In persion)

Guo, Y., Meng, X., Wang, D., Meng, T., Liu, S., & He, R. (2016). Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *33*, 18–29.

Han, Z., & Weng, W. (2010). An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(3), 428–436. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.01.-004

Li, H., & Lu, Y. (2019). The multiple effectiveness of state natural gas consumption constraint policies for achieving sustainable development targets in China. *Applied Energy*, 235, 685–698. https://doi.org/10.1016/-j.apenergy.2018.10.091

Lohani, A. K., Goel, N. K., & Bhatia, K. K. S. (2006). Takagi–Sugeno fuzzy inference system for modeling stage–discharge relationship. *Journal of Hydrology*, 331(1–2), 146–160. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.-2006.05.006

Lythgoe, W. F., Wardman, M., & Toner, J. P. (2004, October 4–6). Enhancing rail passenger demand models to examine station choice and access to the rail network. *European Transport Conference 2004*, Strasbourg, France. https://etcproceedings.org/paper/enhancing-rail-passenger-demand-models

Mahjoob, A. (2024). Spatial analysis for natural gas pipeline routing, monitoring, and high risk areas identification. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15(2). https://doi.org/10.1061/(ASCE)-PS.1949-1204.0000724

Malinowska, A., Cui, X., Salmi, E. F., & Hejmanowski, R. (2022). A novel fuzzy approach to gas pipeline risk assessment under influence of ground movement. *International Journal of Coal Science & Technology*, *9*(1), 1–11. https://doi.org/10.1007/s40789-022-00511-2

Muhlbauer, W. K. (2004). *Pipeline risk management manual: Ideas, techniques, and resources* (3rd ed.). Gulf Professional Publishing, Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-075067579-6/50003-0

Poljanšek, K., Bono, F., & Gutiérrez, E. (2010). GIS-based method to assess seismic vulnerability of interconnected infrastructure: A case of EU gas and electricity networks. *EUR 24275 EN, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen (JRC-IPSC), European Commission*. https://doi.org/10.2788/34713

Rezaei Nodeh, F., Karimi, M., Jabbari Gharabaghi, M., & Asgarian, A. H. (2016). Risk assessment of gas transmission pipelines using risk indexing in a GIS environment. *Proceedings of the First National Conference on Spatial Information Technology (GIS)*, Faculty of Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, October 20–21. (In persion)

Rybaczuk, M. (2010). GIS in environmental health risk analysis. *Environmental Health Perspectives*, 109(6), 551–556. https://doi.org/10.1289/ehp.01109551

Wang, X., Zhang, Y., & Li, J. (2021). Vulnerability analysis based on risk assessment for the transmission capabilities of natural gas pipeline networks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 70, 104–120. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104120

Yildirim, V., Yomralioglu, T., Nisanci, R., Colak, E. H., Bediroglu, S., & Memisoglu, T. (2016). An integrated spatial method for minimizing environmental damage of transmission pipelines. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(6), 2653–2663. https://doi.org/10.15244/pjoes/63053

You, Q., Zhu, W., Zheng, J., & Tang, S. (2018). Vulnerability analysis for urban natural gas pipeline network system. *Information & Security: An International Journal*, 40(1), 11–28. https://doi.org/10.11610/isij.4001

نشریه کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی
rsgi.tabrizu.ac.ir

مدلسازی ریسک آسیب‌پذیری خطوط شبکه گازرسانی با رویکرد استنتاج فازی ممدانی و GIS (مطالعه موردی: شهر ایلام)

حسین انوری[۱]، بختار فیضی‌زاده[۲]✉، خلیل ولیزاده کامران[۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Dr.hosseinanvari-gis@tabrizu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: feizizade@tabrizu.ac.ir

۳. استاد تمام، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: valizadeh@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

کلیدواژه‌ها:
تحلیل ریسک،
خطوط لوله گاز،
GIS ،
منطق فازی ممدانی،
ایلام.

چکیده

سابقه و هدف: با توجه به اهمیت روزافزون شبکه‌های انتقال گاز طبیعی در پاسخ‌گویی به نیازهای جمعیت و صنایع، تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری این زیرساخت‌ها در برابر مخاطرات طبیعی و انسانی، ضرورتی انکارناپذیر دارد. هدف این پژوهش، ارائه مدلی فضایی برای تحلیل و شناسایی نواحی پرخطر در خطوط انتقال گاز شهر ایلام با بهره‌گیری از تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و منطق فازی ممدانی است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ابتدا داده‌های مکانی شامل فاصله از مسیل‌ها، مناطق زمین‌لغزش، تراکم علمک گاز و قطر لوله گردآوری شد. سپس لایه‌های اطلاعاتی مرتبط، در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه و به کمک توابع عضویت فازی نرمال‌سازی شدند. پس از آن، با تعریف مجموعه قواعد فازی بر مبنای منطق ممدانی و انجام فرآیند استنتاج، نقشه نهایی ریسک خطوط گاز تولید گردید.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که نواحی واقع در مجاورت مسیل‌ها، مناطق دارای شیب و زمین‌لغزش، و همچنین مناطق با تراکم بالای علمک گاز و خطوط لوله با قطر کم، از بالاترین سطح ریسک برخوردارند. این نقشه‌ها با دقت قابل قبول، توانسته‌اند نواحی بحرانی را برای مدیریت بهتر و تصمیم‌گیری بهینه در حوزه ایمنی و نگهداری شبکه گازرسانی مشخص نمایند.

نتیجه‌گیری: مدل ارائه‌شده در این پژوهش با تلفیق قابلیت‌های تحلیل مکانی GIS و توانمندی منطق فازی ممدانی، ابزاری مؤثر برای شناسایی نواحی پرریسک در خطوط انتقال گاز شهری فراهم کرده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند در برنامه‌ریزی ایمن‌سازی، مدیریت پیشگیرانه و اولویت‌بندی عملیات نگهداری خطوط گاز مورد استفاده قرار گیرد و نقش مهمی در کاهش مخاطرات و ارتقای ایمنی زیرساخت‌های گازرسانی ایفا نماید.

استناد: انوری، حسین؛ فیضی‌زاده، بختار و ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۵). مدلسازی ریسک آسیب‌پذیری خطوط شبکه گازرسانی با رویکرد استنتاج فازی ممدانی و GIS (مطالعه موردی: شهر ایلام). *کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی*، ۶ (۲۰)، ۲۳-۳۹.
http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.69475.1148

ناشر: دانشگاه تبریز.

© نویسندگان.

مقدمه

با افزایش خطرپذیری زیرساخت‌های حیاتی مانند خطوط انتقال گاز در مناطق شهری، ضرورت تحلیل دقیق و تصمیم‌گیری مکان‌محور برای کاهش ریسک، به دغدغه‌ای مهم در مدیریت شهری و انرژی تبدیل شده است. از دیدگاه بسیاری از محققان، بهره‌گیری از تحلیل‌های فضایی و سیستم‌های هوشمند مانند GIS و منطق فازی، افق‌های نوینی برای ارزیابی آسیب‌پذیری این شبکه‌ها گشوده است.

مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل ریسک خطوط لوله انجام شده است. برخی پژوهش ها از رویکردهای اماری یا شبیه سازی عددی مانند MATLAB و FLUENT استفاده می‌کنند، اما در سال های اخیر استفاده از GIS و منطق فازی در تحلیل ریسک محبوبیت بیشتری یافته است.

پولیانشگ، بونو و گوتیرز و (۲۰۱۰) در پژوهشی با عنوان «ارزیابی خطر زلزله در سیستم‌های زیرساختی حیاتی وابسته: مورد شبکه‌های گاز و برق اروپایی» آسیب‌پذیری زلزله‌ای شبکه‌های انتقال گاز و برق وابسته به یکدیگر از نقطه نظر توپولوژیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. آن‌ها یک مدل قابلیت اطمینان احتمالی پیاده‌سازی می‌کنند که توزیع فضایی هر دو ساختار شبکه و مواجهه آن‌ها با خطر زلزله را با استفاده از یک سیستم اطلاعات جغرافیایی شامل می‌شود.

یو و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی با عنوان «تحلیل آسیب‌پذیری برای سیستم شبکه خط لوله گاز طبیعی شهری» یک مفهوم برای تحلیل آسیب‌پذیری سیستم شبکه ایجاد می‌کند و مبنایی برای تحلیل کمی آسیب‌پذیری فراهم می نماید. پژوهشگر در این پژوهش مدل FIM را پیاده‌سازی می‌کند که اطلاعات سیستم زمین‌شناسی ArcGIS، زبان برنامه‌نویسی جاوا و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، امکان تحلیل دقیق‌تر و شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر شبکه را فراهم می‌سازد. این رویکرد نه‌تنها به درک بهتر نقاط ضعف زیرساخت‌ها کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ای برای تدوین راهبردهای مؤثر مدیریت ریسک در شبکه‌های گاز شهری فراهم می‌آورد.

وانگ، ژانگ و لی (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان «روش تحلیل آسیب‌پذیری بر اساس ارزیابی ریسک برای قابلیت‌های انتقال گاز شبکه‌های خط لوله گاز طبیعی» یک روش تحلیل جدید به نام ریسک–آسیب‌پذیری پیشنهاد می شود که ویژگی‌های ارزیابی ریسک و روش‌های تحلیل آسیب‌پذیری را ترکیب می‌کند تا اجزای حیاتی یک شبکه خط لوله را شناسایی شود.

محجوب در سال (۲۰۲۴) نتایج پژوهشی با عنوان «تحلیل فضایی برای مسیربندی، نظارت، و شناسایی مناطق پرخطر خطوط لوله گاز طبیعی» که با استفاده از تحلیل فضایی به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و نقاط پرخطر در خطوط لوله گاز طبیعی بر اساس عوامل مختلف و وابستگی فضایی آن‌ها می‌پردازد، نشان می‌دهد که که گسل‌ها و خطرات ژئولوژیکی تقریباً ۹۷٪ از لوله‌های گاز طبیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در حال حاضر نیز بیشتر خطوط لوله در معرض خطرات مختلف از جمله نقص‌ها و خطرات جغرافیایی قرار دارند.

قهروردی (۱۳۸۸) در مقاله «کاربرد GIS در مدیریت یکپارچه مخاطرات طبیعی، بیان می‌کند که استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی(GIS)» برای تجزیه و تحلیل فضایی به ذینفعان این امکان را می‌دهد که مداخلات را بر اساس آسیب‌پذیری‌ها تجسم و اولویت‌بندی کنند و در نهایت ایمنی و قابلیت اعتماد شبکه‌های گاز را بهبود بخشند؛ بدین ترتیب که همواره مدیریت مخاطرات طبیعی به کمک GIS شکل گرفته و توسعه این مدیریت نیز در گرو پیشرفت علم GIS است، در سال های اخیر نیز فن‌های تصمیم گیری چندمعیاره به همراه تحلیل های مکانی و شبکه ای GIS برای کمک مدیریتی و همچنین اولویت‌بندی معیارها بسیار استفاده می‌شود.

یالدریم و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله «روش فضایی یکپارچه برای کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی خطوط انتقال» بیان می‌کند که GIS امکان شناسایی مسیرهایی را که از مناطق حساس مانند جویبارها و خاک‌های با کیفیت دوری می‌کنند، فراهم می‌آورد و بدین ترتیب اختلالات اکولوژیکی را کاهش می‌دهد.

با وجود آنکه مطالعات بسیاری از منطق فازی و GIS برای ارزیابی ریسک فضایی استفاده کرده‌اند، تعداد اندکی به مقایسه نظام‌مند الگوی اصلی استنتاج فازی- مامدانی با بهره‌گیری از مجموعه داده‌های مکانی پرداخته‌اند. پژوهش‌های موجود اغلب تأثیر ساختار مدل بر خروجی‌های ریسک فضایی، کارایی محاسباتی یا تفسیرپذیری را بررسی نمی‌کنند. پژوهش حاضر این شکاف را برطرف می‌کند. این پژوهش یک فرآیند قابل بازتولید برای پایش ریسک خطوط لوله در مناطق کوهستانی ارائه می‌دهد که شامل تعریف خبره‌محور توابع عضویت، آزمون حساسیت و اعتبارسنجی مبتنی بر اجماع کارشناسان است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شهر ایلام مرکز استان ایلام می‌باشد، که یکی از استان‌های غربی ایران است. این شهر با مساحت ۲۱۲۸۰۴/۶۷ هکتار شامل ۱۰/۶۲ درصد مساحت استان را به خود اختصاص داده و از لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۳۳ درجه و ۲۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۵۱ دقیقه و ۴۸ ثانیه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۴۱ دقیقه و ۰۷ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۵۱ دقیقه و ۱۹ ثانیه طول شرقی در شمال غربی استان ایلام می‌باشد. منطقه و آب‌وهوای شهر ایلام کوهستانی می‌باشد و خودِ شهر ایلام نیز در حصاری از کوه‌ها و ارتفاعات قرار دارد و با شهرستان‌های ایوان، شیروان وچرداول، دره‌شهر، مهران و کشورعراق همسایه است. بلندترین نقطه استان، قله کان‌صیفی با ارتفاع ۳۰۶۲ متر از سطح دریا در منطقه کبیرکوه، در محدوده این شهرستان واقع شده است. همچنین پست‌ترین نقطه آن با ۱۹۶ متر ارتفاع از سطح دریا قرار دارد که گویای تفاوت ارتفاعی چشمگیر در منطقه است. از کوه‌های شاخص منطقه می‌توان به مانشت، سیاه‌کوه و گچان اشاره کرد که در شکل‌گیری شرایط طبیعی و زیست‌محیطی نقش مؤثری دارند.



شکل ۱. نقشه استان ایلام و شهر ایلام
Fig 1. Map of Ilam Province and Ilam City

سیستم‌های فازی‌ساز و قطعی‌ساز (ممدانی)

این سیستم استنتاج در سال ۱۹۷۵توسط ممدانی[1] و اسیلیان[2] ابداء شد. این سیستم دارای دو قسمت مقدم قواعد (که قواعد آن بر پایه مجموعه‌های فازی تعریف می‌شوند) و قسمت تالی (نتیجه) قواعد فازی (که خروجی هر قانون را به‌صورت غیرخطی و در قالب مجموعه‌های فازی تولید می‌کند) است. در این مدل، برای تبدیل خروجی فازی به یک مقدار قطعی (فرآیند دفازی‌سازی)، روش‌های مختلفی به‌کار می‌رود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: MOM، LOM، BOA، SOM و COA.

1. Mamdani
2. Assilian

مراحل پیاده‌سازی سیستم استنتاج ممدانی

۱- فازی سازی: یکی از مهم‌ترین مراحل روند فازی‌سازی می‌باشد. فازی سازی به وسیله فازی‌ساز انجام می‌گیرد. در واقع فازی‌ساز، مجموعه قواعدی است که تابع تبدیل داده‌های عددی ورودی به داده های فازی را شامل می‌شود. این مرحله از این رو حائز اهمیت است که اعداد تولید شده در این مرحله در مدل پخش شده و تأثیر مستقیم در خروجی نهایی دارند. تابع فازی‌ساز می‌تواند از دانش افراد خبره و یا از داده‌های ورودی بهره‌برداری شود.

۲- ورودی‌های مدل: مورد مطالعه این پژوهش شبکه لوله‌های انتقال گاز استان ایلام می‌باشد. که بسته به مکان، دارای قطر متفاوت هستند، در اینجا برای تهیه نقشه معیارهای فاصله از مسیل، زمین رانش و نشتی، بر اساس برداشت‌های میدانی انتخاب شدند.

۳- خروجی مدل: بعد از مشخص شدن مقادیر و توابع ورودی، لازم است که توابع عضویت خروجی نیز تعیین گردد و براساس این دو قواعد اگر – آنگاه بیان شود.

۴- تعریف قواعد فازی: در این مرحله رفتار و بازخورد سیستم به وسیله قواعد اگر – آنگاه توصیف می‌گردد. درواقع طور در مرحله استنتاج فازی از روی متغیرهای زبانی ورودی، قواعد سیستم و توابع عضویت (مقادیر فازی)، متغیرهای زبانی خروجی استخراج می شوند.

۵- قطعی سازی: قطعی‌سازی به وسیله قطعی‌ساز انجام می‌گیرد. در واقع قطعی‌ساز (تابع ریاضی یا مقدار آستانه فازی)، مجموعه ترکیبی فازی را به مجموعه کلاسیک باز می‌گرداند و نتیجه مدلسازی را سرعت می بخشد.

داده‌ها و اطلاعات

در این پژوهش داده‌ها و اطلاعات استفاده شده در ۲ قسمت قرار گرفتند: ۱- داده‌های متنی مانند کتاب، مقاله، پایان‌نامه، گزارش‌ها و اسناد پروژه، داده‌های عملیاتی و ... ۲- داده‌های مکانی که خود شامل داده‌های GPS و شیپ‌فایل‌ها بودند.

برای ارزیابی ریسک خطوط انتقال گاز، مجموعه‌ای از شاخص‌های مکانی و فنی انتخاب شد که نقش آن‌ها در احتمال شکست یا نشت خطوط لوله در ادبیات مرتبط با مهندسی خطوط انتقال، ژئوتکنیک و مکانیک سیالات مستند شده است. هر شاخص بر اساس مبانی فیزیکی و گزارش‌های عملیاتی شرکت‌های بهره‌برداری خطوط لوله انتخاب شده و سپس به‌صورت کمی پارامترگذاری شده است. در ادامه، منطق علمی انتخاب هر شاخص، واحد اندازه‌گیری، آستانه‌های طبقه‌بندی و منابع علمی ارائه شده‌اند.

فاصله از مسیل

در تمام نقاط جهان سیلاب‌ها به عنوان شایع‌ترین مخاطره طبیعی شناخته‌شده‌اند (کانتررس و همکاران، ۲۰۱۵). و از نظر میزان تکرار وقوع جایگاه دوم مخاطرات طبیعی را به خود اختصاص داده اند. از جمله عوامل موثر در وقوع سیلاب‌ها وجود شیب‌های تند می‌باشد. قرارگیری شهر ایلام در منطقه کوهستانی و افزایش سطح بارندگی در فصول زمستان و بهار احتمال وقوع سیلاب در این منطقه را افزایش می‌دهد. از جمله حوادثی که بر اثر وقوع سیل بر روی خطوط گاز ممکن است اتفاق بیافتد آبشستگی خطوط لوله انتقال گاز، بیرون‌زدگی خطوط گاز، آبگرفتگی تأسیسات گاز، تخریب جاده‌های دسترسی و بناهای ایستگاه‌های کنترل فشار، شکستگی لوله، انفجار و آتش‌سوزی بر روی خطوط گاز می‌باشد (ال گولی و همکاران، ۲۰۰۷). فاصله از مسیل بر حسب متر اندازه‌گیری می‌شود. مطابق استاندارد ASME B31.8 فاصله کمتر از ۲۵۰ متر خطر بالایی را ایجاد می‌کند ASME B31.8 (گیو و همکاران، ۲۰۱۶). شکل ۲. موقعیت خطوط لوله انتقال گاز شهر ایلام را نسبت به مسیر سیلاب‌ها (مسیل) نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت خطوط انتقال گاز نسبت به مسیل‌ها
Fig 2. Location of Gas Transmission Pipelines in Relation to Waterways

زمین‌لغزش

یکی از وقایعی که در نقاط با شیب بالا رخ می‌دهد زمین‌لغزش است که در نتیجه فعالیت‌های لرزه‌ای زمین به وقوع می‌پیوندد و اصلی‌ترین پیامد آن آسیب به زیرساخت‌های منطقه به ویژه خطوط انتقال گاز می‌باشد. فشارهای جانبی غیریکسان و جابه‌جایی توده‌ای خاک باعث ایجاد تنش محوری و خمش اضافی روی لوله می‌شود؛ مطالعات نشان می‌دهد بیشترین شکست‌های خطوط لوله در مناطق ناپایدار شیب‌دار رخ می‌دهد (اسفورد، اسمیت و جانسون، ۲۰۰۴). طبق مطالعات فاصله خطوط لوله از زمین لغزش بر حسب متر اندازه‌گیری می‌شود و اگر این فاصله کمتر از ۱۰۰ متر باشد، منطقه پر خطر و اگر بیشتر از ۱۰۰ متر باشد کم خطر محسوب می شود (مالینوسکا، ۲۰۲۲؛ او-روک و جون، ۲۰۱۹). شکل ۳ موقعیت نقاط زمین‌لغزش را نسبت به خطوط لوله انتقال گاز شهر ایلام نشان می‌دهد.

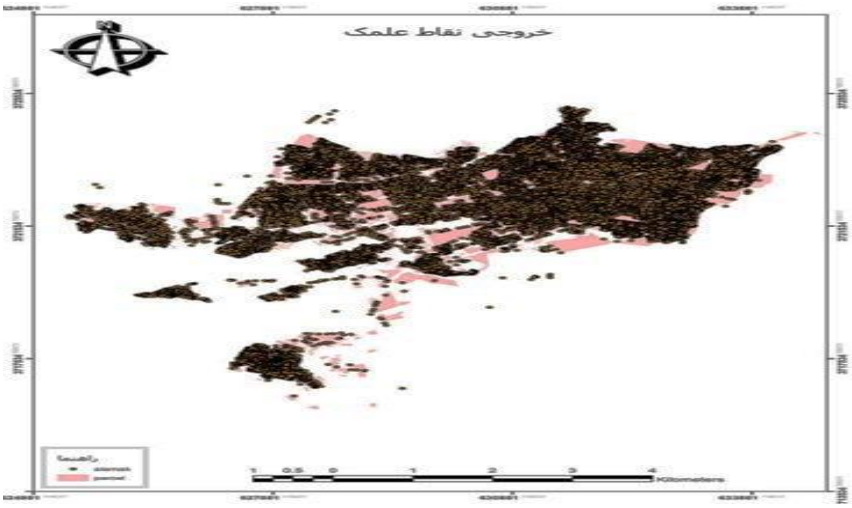


شکل ۳. موقعیت خطوط انتقال گاز نسبت به نقاط زمین لغزش
Fig 3. Location of Gas Transmission Pipelines in Relation to Landslide Sites

تراکم علمک گاز

با افزایش مصرف گاز و گسترش شبکه توزیع آن و تقاضا برای دریافت اشتراک گاز شهری، نصب علمک یا رگلاتور برای هر مشترک ضروری است. شرکت گاز طی روند انتقال و توزیع سراسری گاز طبیعی وظیفه استخراج گاز، انتقال و رساندن گاز به دست مصرف‌کننده را بر عهده دارد. طی این مسیر انتقال گاز، فشار در چند مرحله توسط ایستگاه‌های تنظیم فشار کاهش می‌یابد.

تجربه نشان داده است که بروز حادثه در علمک گاز به دلیل اتصال مستقیم به لوله توزیع باعث سرایت سریع آن به نقاط دیگر می‌شود. بنابراین هرچه فاصله علمک‌های نصب شده در یک ناحیه کمتر باشد تراکم علمک بیشتر می‌گردد و در نتیجه آن میزان ریسک نیز بالاتر می‌رود. شکل ۴ علمک‌های موجود در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ٤. موقعیت علمک ها در منطقه مورد مطالعه

Fig 4. Location of Gas Meters in the Study Area

قطر لوله

خطوط لوله انتقال گاز از مسیرهایی عبور می‌کنند که دارای ساختار زمین‌شناسی متنوع می‌باشد و و باید از موانعی مانند جاده و خیابان، سایر خطوط لوله انرژی و مسیل‌ها و نقاط پرجمعیت عبور کنند که همه این‌ها می‌توانند به سلامت خطوط لوله آسیب برسانند، و این آسیب ممکن است شامل موارد زیر شود:

در رابطه با نشتی، بر اساس مرجع UKOPA سناریوهای مورد استفاده در ارزیابی ریسک خط لوله می تواند به این صورت باشد که: روزنه ریز با اندازه نشتی تا ۶ میلی متر، روزنه کوچک با قطر نشتی ۶ تا ۴۰ میلی متر، روزنه بزرگ با قطر نشتی بیش از ۴۰ میلی متر ولی کوچکتر از قطر، از این رو برای معیار نشتی قطر لوله را در نظر می‌گیریم، هرچه قطر لوله بیشتر باشد ریسک میزان نشتی کمتر است.

روش تحقیق

روش این پژوهش ترکیبی از تحلیل مکانی GIS و مدل سازی فازی به روش ممدانی است. نرم‌افزار ARC GIS جهت ترسیم نقشه‌ها و روی‌هم‌گذاری و ترکیب لایه‌ها و دسترسی به موقعیت مکانی هر یک از متغیرهای مورد بررسی و با مدل استنتاج فازی ممدانی مدلسازی شد.

قالب کلی در نظریه مجموعه‌های فازی این است که هر عضو از مجموعه می‌تواند هر مقداری بین ۰ تا ۱ را به خود بگیرد که نشان‌دهنده درجه قطعیت عضویت است. تا به امروز سیستم‌های استنتاج فازی مختلفی ارائه شده‌است. که در این میان مناسب‌ترین آن‌ها برای استفاده در مسائل زمین‌شناسی مهندسی سیستم استنتاج فازی ممدانی می‌باشد (لیتگو، واردمن و تونر؛ ۲۰۰۴). در مدل فازی ممدانی، قوانین اگر–آنگاه جایگزین مجموعه معادلات معمول مورد استفاده برای توصیف یک سیستم می‌شوند. این مدل توسط لطفی زاده ممدانی در سال ۱۹۷۵ معرفی شد و به دلیل سادگی و قابلیت تفسیر آن از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار است.

مدل استنتاج فازی ممدانی شامل چهار بخش اصلی است:

ورودی‌ها (Input Variables): متغیرهایی که می‌خواهیم بر اساس آن‌ها تصمیم‌گیری کنیم. با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، تحلیل سوابق حوادث، مشاهدات میدانی و مشورت با کارشناسان صنعت گاز، چهار معیار کلیدی مؤثر بر آسیب‌پذیری خطوط انتقال گاز شناسایی شد: فاصله از مسیل‌ها (Flood Proximity)، فاصله از نقاط زمین‌لغزش (Landslide Zones)، تراکم علمک‌های گاز شهری (Gas Regulator Density)، قطر لوله (Pipe Diameter)

قوانین فازی (Fuzzy Rules): مجموعه‌ای از قوانین که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را مشخص می‌کند. این قوانین معمولاً به شکل «اگر–آنگاه» نوشته می‌شوند. بر اساس ترکیب حالات ورودی و تحلیل رفتار سیستم در شرایط مختلف، ۲۴ قاعده فازی به‌صورت «اگر–آنگاه» تعریف شد. مثال:

- اگر فاصله از مسیل کم باشد و تراکم علمک زیاد باشد، آنگاه ریسک زیاد است.
- اگر فاصله از زمین‌لغزش زیاد و قطر لوله بالا باشد، آنگاه ریسک کم است.

این قواعد توسط کارشناسان و با تلفیق یافته‌های پیشین تنظیم گردید تا بیشترین پوشش حالات ممکن را دربرگیرد. (جدول شماره ۱و ۲).

جدول ۱. متغیرهای ورودی و سطوح فازی

متغیر ورودی	سطوح فازی
فاصله از مسیل	کم، زیاد (۲حالت)
فاصله از زمین‌لغزش	کم، زیاد (۲ حالت)
تراکم علمک گاز	کم، زیاد (۲حالت)
قطر لوله	کم، متوسط، زیاد (۳ حالت)

تعداد قاعده فازی (تعداد کل ترکیب‌ها) ۲۴ = ۳ × ۲ × ۲ × ۲

جدول ۲. نمونه جدول قواعد فازی (تعداد ۱۰ مورد اول از ۲٤ مورد)

ردیف	فاصله از مسیل	فاصله از لغزش	تراکم علمک	قطر لوله	نتیجه ریسک
۱	کم	کم	کم	کم	متوسط
۲	کم	کم	کم	زیاد	کم
۳	کم	کم	کم	کم	زیاد
۴	کم	کم	کم	زیاد	متوسط
۵	کم	کم	زیاد	کم	زیاد
۶	کم	کم	زیاد	زیاد	متوسط
۷	کم	کم	زیاد	کم	زیاد
۸	کم	کم	زیاد	زیاد	زیاد
۹	کم	متوسط	کم	کم	متوسط
۱۰	کم	متوسط	کم	زیاد	کم

تابع عضویت (Membership Functions): برای هر ورودی و خروجی، تابعی تعریف می‌شود که میزان تعلق آن مقدار به مجموعه‌های فازی مختلف را مشخص می‌کند. برای هر معیار ورودی، تابع عضویت مناسب از نوع مثلثی یا ذوزنقه‌ای تعریف شد که مقادیر پیوسته را به دسته‌های زبانی (کم، متوسط، زیاد) نگاشت می‌کرد. به‌طور نمونه:

- برای فاصله از مسیل:
  - فاصله کم ⟶ ریسک زیاد
  - فاصله زیاد ⟶ ریسک کم
- برای تراکم علمک:
  - تراکم زیاد ⟶ احتمال حادثه بالا

خروجی (Output): نتیجه نهایی که از فرآیند استنتاج به‌دست می‌آید. لایه نهایی ریسک با استفاده از روش Maximum Aggregation و سپس فازی‌زدایی با روش‌های Lom (بیشینه کمینه‌ها) و Som (کمینه بیشینه‌ها) تولید شد. نتیجه نهایی به شکل نقشه‌ای طبقه‌بندی‌شده ارائه شد که نواحی دارای آسیب‌پذیری بالا، متوسط و پایین را مشخص می‌کرد.

مدل فازی ممدانی به شکل زیر است:

$$R_i: if\ x_i is\ A_{i1} \dots and\ x_j is\ A_{ij}, then\ y\ is\ B_i$$
$$for\ i = 1,2, \dots, k\ and\ j = 1,2, \dots, r$$

رابطه ۱)

که در آن k تعداد قوانین، متغیرهای ورودی، y متغیرهای خروجی و Aij و Bi اصطلاحات زبانی هستند.

در مدل ممدانی، هر قاعده یک رابطه فازی است.$R_i(X \times Y \to [0,1])$ که با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_{Ri}(x,y) = I\left(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i,}(y)\right)$$

رابطه ۲)

که در آن عملگر I می‌تواند یا یک استلزام فازی یا یک عملگر عطف باشد. چهار مرحله استنتاج در سیستم استنتاج فازی ممدانی وجود دارد، مانند فازی‌سازی، ارزیابی قواعد، تجمیع و غیرفازی سازی (دفازی).

مرحله ۱: درجه تحقق αi مقدم برای هر قانون i محاسبه می‌شود.

$$\propto_i = \mu_{A_{i1}}(x1)\hat{}, \mu_{A_{i2}}(x2)\hat{}\mu_{A_{in}}(xn) \le i \le k$$

رابطه ۳)

مرحله ۲: برای هر قانون، مجموعه فازی خروجی استخراج می‌شود.

$$\mu_{\overset{\circ}{R}\overset{\circ}{i}}(y) = \propto_i \hat{}\,\mu_{B_i}(y)$$

رابطه ۴)

مرحله ۳: مجموعه‌های فازی خروجی را با استفاده از روش Max تجمیع می‌شوند.

$$\mu_{\dot{|}i}(x,y) = \max_{i=1,2,\dots,k}(\mu_{Bi}{}_{-i}y)$$

رابطه ۵)

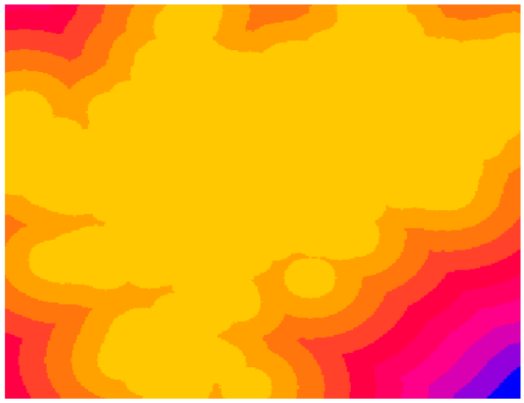
در این پژوهش، به دلیل سادگی در محاسبات و تولید نتایج سازگارتر، از روش Som و Lom برای فرآیند دفازی استفاده شد. منطق فازی و مدل استنتاج ممدانی امکان ترکیب‌های انعطاف‌پذیری از نقشه‌های وزنی را فراهم می‌کند که می‌توان به راحتی در نرم‌افزار GIS مدل‌سازی و پیاده‌سازی شود (اوربینا، آویاما و مولبارو؛ ۲۰۰۴).

نتایج و بحث

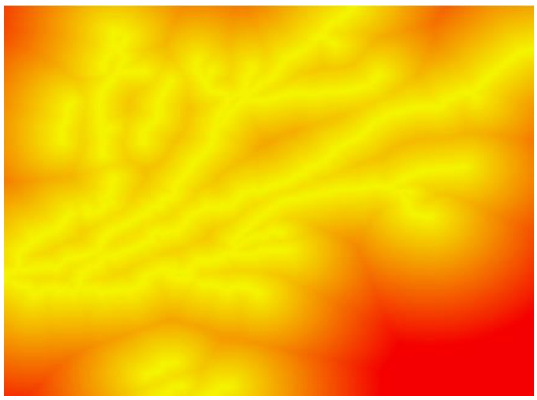
هرکدام از معیارها را در نرم‌افزار Arc map نسبت به خطوط لوله انتقال گاز تحلیل نموده و ضمن محاسبه و بیان قوانین به دست آمده، نقشه ریسک نهایی بدست آمد. در روش ممدانی لایه‌های فاصله از مسیل و فاصله از نقاط لغزش و تعداد علمک با استفاده از شیپ‌فایل‌های معتبر و بکارگیری رابطه اقلیدوسی در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد و قطر لوله با استفاده از شیپ‌فایل ارائه‌شده توسط شرکت گاز منطقه و ابزار Feature to taster در نرم‌افزار ArcGIS و بر اساس ویژگی‌های مورد نیاز لایه‌های رستری تهیه شدند. شکل‌های ۵ الی ۸ لایه‌های رستری تولید شده را نشان می دهد.



شکل ۵. رستر تولید شده برای لایه نقاط زمین‌لغزش
Fig 5. Raster Generated for the Landslide Points Layer



شکل ٦. رستر تولید شده برای لایه تعداد علمک
Fig 6. Raster Generated for the Gas Meter Count Layer

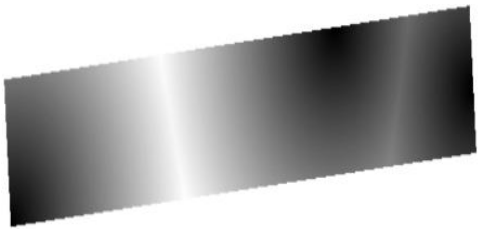


شکل ۷. رستر تولید شده برای لایه مسیل
Fig 7. Raster Generated for the Waterway Layer

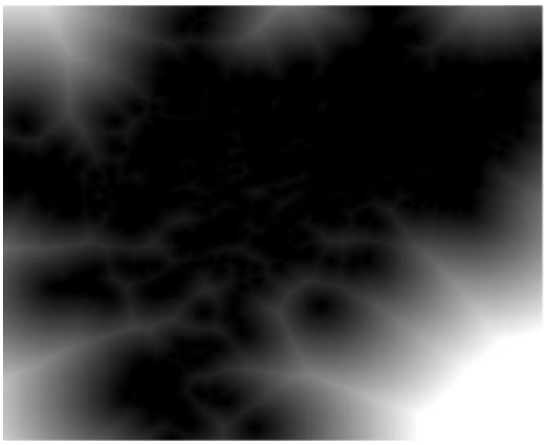


شکل ۸ رستر تولید شده برای لایه قطر لوله
Fig 8. Raster Generated for the Pipe

سپس به منظور یکسان‌سازی داده‌ها در حالت فازی، تمام رسترهای تولید شده بین صفر و یک تنظیم شد نتیجه در شکل‌های ۹ الی ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۹. تبدیل رستر تولید شده لایه نقاط زمین‌لغزش به حالت فازی
Fig 9. Conversion of the Generated Landslide Points Layer Raster to Fuzzy



شکل ۱۰. تبدیل رستر تولید شده لایه علمک به حالت فازی
Fig 10. Conversion of the Generated Gas Meter Layer Raster to Fuzzy Format

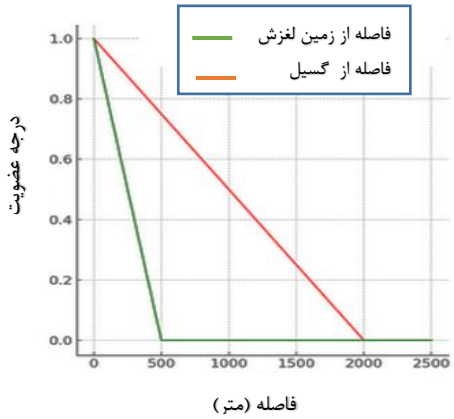


شکل ۱۱. تبدیل رستر تولید شده لایه مسیل به حالت فازی
Fig 11. Conversion of the Generated Waterway Layer Raster to Fuzzy Format



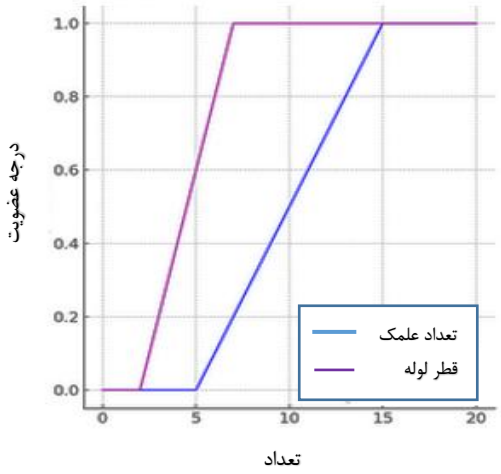
شکل ۱۲. تبدیل رستر تولید شده لایه قطر لوله به حالت فازی
Fig 12. Conversion of the Generated Pipe Diameter Layer Raster to Fuzzy Format

پس از اینکه تمام لایه‌ها را در حالت فازی (۰و۱) تنظیم شدند، توابع عضویت برای هریک از لایه‌ها تعریف شد. در این پژوهش، متغیرهای مؤثر بر ریسک خطوط انتقال گاز استان ایلام به دو دسته کلی تقسیم شدند: متغیرهای متأثر از فاصله شامل فاصله از مسیل و فاصله از زمین‌لغزش، و متغیرهای متأثر از ویژگی شامل تعداد علمک‌ها و تعداد نشتی‌های ثبت‌شده. برای هر یک از این متغیرها، توابع عضویت فازی بر اساس داده‌های مکانی و آمار موجود در استان ایلام و با بهره‌گیری از مطالعات مشابه در حوزه ارزیابی ریسک خطوط لوله تعیین گردید. در این راستا، شکل ۱۳ نشان می‌دهد برای متغیرهای فاصله‌ای، توابع عضویت نزولی در نظر گرفته شده است؛ بدین معنی که هرچه فاصله خط لوله از مسیل یا زمین‌لغزش کمتر باشد، ریسک افزایش یافته و با افزایش فاصله، میزان ریسک به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. در مقابل، همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است برای متغیرهای ویژگی‌محور، توابع عضویت صعودی به‌کار گرفته شده است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش تعداد علمک‌ها یا نشتی‌های ثبت‌شده، میزان ریسک به‌طور فزاینده افزایش می‌یابد. این طبقه‌بندی و توابع عضویت با توجه به شرایط جغرافیایی و زیرساختی استان ایلام و در هماهنگی با رویکردهای مطرح در مطالعات مشابه (محجوب، ۲۰۲۴) تنظیم گردید.



شکل ۱۳. نمودار تابع عضویت برای توابع وابسته به فاصله

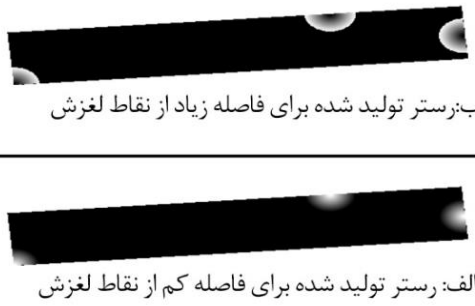
Fig 13. Membership Function Diagram for Distance-Dependent Functions



شکل ۱٤. نمودار تابع عضویت برای توابع وابسته به ویژگی

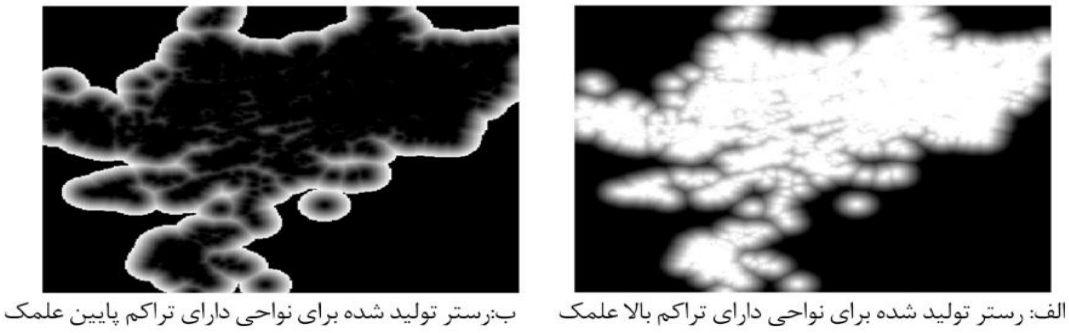
Fig 14. Membership Function Diagram for Attribute-Dependent Functions

تعریف توابع عضویت با کمک ابزار raster calculator در Arc GIS انجام شده‌است. در ادامه رسترهای توابع عضویت برای هریک از لایه‌ها نشان داده‌شده‌است شکل ۱۵ الی ۱۸.



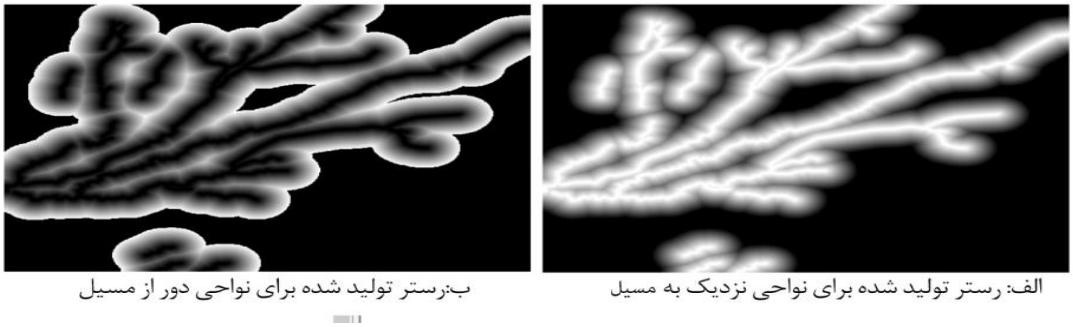
شکل ۱۵. رسترهای توابع فازی لایه نقاط لغزش

Fig 15. Fuzzy Function Rasters of the Landslide Points Layer



شکل ۱۶. رسترهای توابع فازی لایه علمک

Fig 16. Fuzzy Function Rasters of the Gas Meter Layer



شکل ۱۷. رسترهای توابع فازی لایه مسیل

Fig 17. Fuzzy Function Rasters of the Waterway Layer



شکل ۱۸. رسترهای توابع فازی برای قطر لوله

Fig 18. Fuzzy Function Rasters for Pipe Diameter

در روش ممدانی پس از تهیه لایه‌های توابع عضویت، تمامی قوانین ممکن از ترکیب توابع، در لایه‌های مجزا محاسبه شد. با توجه به تعداد حالت‌های در نظر گرفته‌شده برای هر پارامتر، ۲۴ قانون داشتیم. قوانین به شرح زیر بود.

۱- فاصله از نقاط لغزش زیاد، تراکم علمک بالا، فاصله از مسیل زیاد، قطر لوله کم.

۲- فاصله از نقاط لغزش زیاد، تراکم علمک بالا، فاصله از مسیل زیاد، قطر لوله متوسط.

. . . .
. . . .
۲۴- .

بعد از نوشتن ترکیب توابع عضویت و ساخت لایه‌های مربوط به قوانین فازی، به منظور تهیه یک لایه واحد که تمام قوانین را مشتمل شود تمامی لایه‌های ایجادشده برای قوانین تجمیع[1] شدند، همانطور که در شکل ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است تجمیع توابع با روش‌های Max و Sum انجام شد.



شکل ۱۹. لایه حاصل از تجمیع قوانین در مدل ممدانی به روش Sum
Fig 19. Layer Resulting from Aggregation of Rules in the Mamdani Model Using the Sum Method



شکل ۲۰. لایه حاصل از تجمیع قوانین در مدل ممدانی به روش Max
Fig 20. Layer Resulting from Aggregation of Rules in the Mamdani Model Using the Max Method

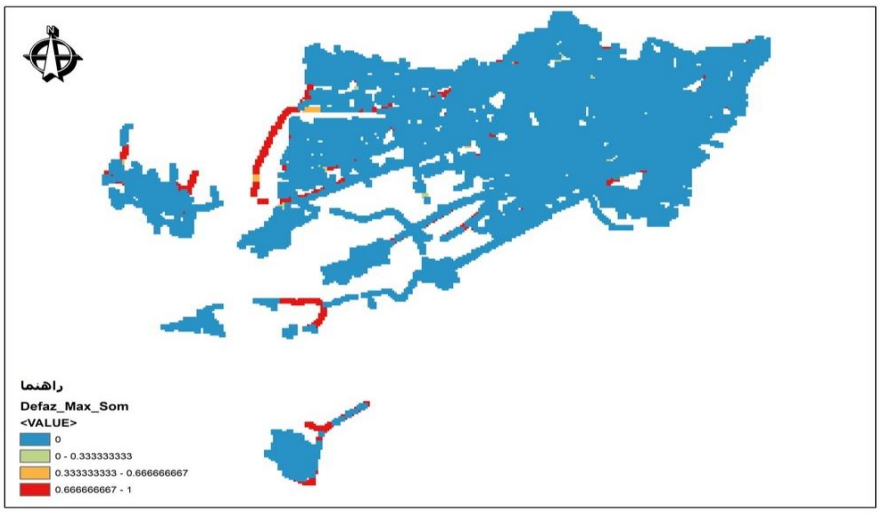
پس از تجمیع لایه‌های قوانین، لایه حاصل، لایه‌ای فازی بود. از این رو در شکل های ۲۱ و ۲۲ نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های lom و som عملیات فازی‌زدایی انجام شد. شکل ۲۱ و ۲۲ به مقایسه الگوی فضایی به‌دست‌آمده از لایه تجمیع MAX با استفاده از دو روش متفاوت LOM و SOM می‌پردازد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در روش LOM ، لکه‌های با ارزش بالا به‌صورت پیوسته و متراکم نمایان شده‌اند و تراکم قابل‌توجهی در بخش‌های مرکزی و محدوده‌های خاص مشاهده می‌شود. این امر بیانگر آن است که روش LOM توانایی بالاتری در برجسته‌سازی نواحی بحرانی و خوشه‌های اصلی دارد و برای شناسایی محدوده‌های با اهمیت بالای مکانی (Hotspots) مناسب است. در مقابل، روش SOM الگوی پراکنده‌تر و گسترده‌تری از داده‌ها ارائه می‌دهد؛ به‌طوری‌که لکه‌ها به‌صورت گسسته و در بخش‌های مختلف منطقه توزیع شد.

1. Aggregation



شکل ۲۱. فازی زدایی لایه Max روش Lom (نمایش رستری)

Fig 21. Defuzzification of the Max Layer Using the LOM Method (Raster Display)



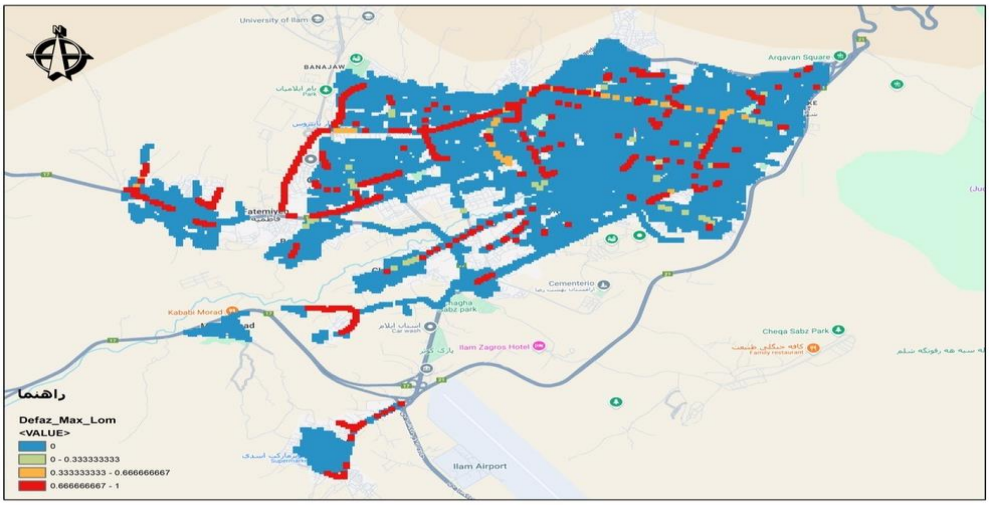
شکل ۲۲. فازی زدایی لایه Max روش Som (نمایش رستری)

Fig 22. Defuzzification of the Max Layer Using the SOM Method (Raster Display)

در ادامه در شکل های ۲۳ و ۲۴ فازی زدایی بر روی افزونه Google street نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ها نشان داده شده است، در روش LOM، مسیرهای با ریسک بالا با رنگ‌های گرم‌تر (قرمز و نارنجی) و به‌صورت خطوطی منسجم و پیوسته مشخص شده‌اند. این امر بیانگر توانایی بالاتر این روش در برجسته‌سازی خوشه‌های پرریسک و تعیین دقیق نواحی بحرانی (Hotspots) است. پیوستگی خطوط پرریسک در این روش نیز حفظ شده، که برای هدف‌گذاری و مداخله در مناطق کلیدی اهمیت دارد. در مقابل، روش SOM توزیعی گسسته‌تر و پراکنده‌تر از ریسک را نشان می‌دهد. لکه‌های با ریسک بالا در این روش به‌صورت مقطعی و در نواحی مختلف دیده می‌شوند و رنگ‌بندی آن طیف وسیع‌تری را پوشش می‌دهد. این ویژگی نشان‌دهنده رویکرد کلی‌نگرتر و هموارتر SOM در تحلیل ریسک است و می‌تواند در درک بهتر پراکندگی منطقه‌ای آسیب‌پذیری‌ها مؤثر باشد.

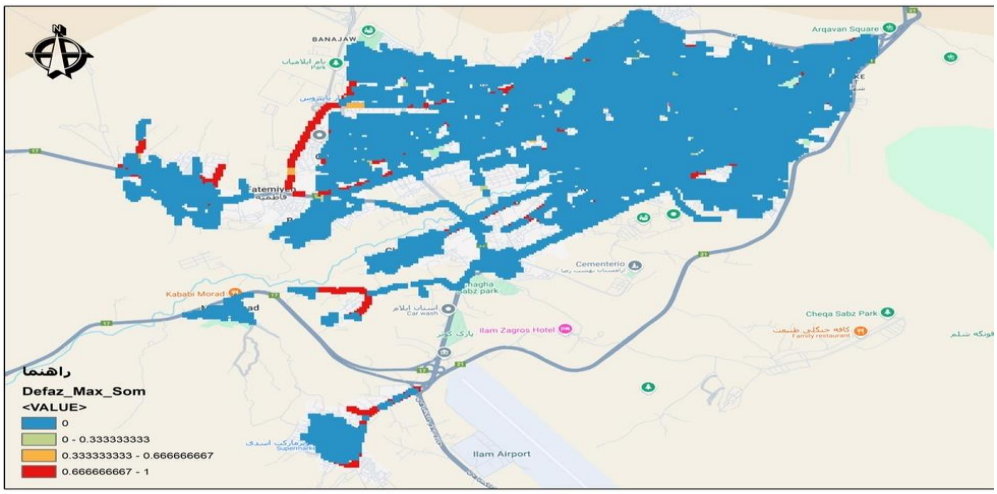
بنابراین، انتخاب میان این دو روش وابسته به هدف نهایی تحلیل است:

- چنانچه تمرکز بر شناسایی و اولویت‌بندی نواحی بحرانی باشد، روش LOM گزینه مناسب‌تری است؛
- ولی اگر هدف، بررسی الگوی توزیع کلی ریسک در سطح شبکه باشد، SOM عملکرد متعادل‌تری دارد.



شکل ۲۳ . فازی زدایی لایه Max روش Lom بر روی افزونه Google street

Fig 23. Defuzzification of the Max Layer Using the LOM Method on the Google Street Plugin



شکل ۲٤. فازی زدایی لایه Max روش Som بر روی افزونه Google street

Fig 24. Defuzzification of the Max Layer Using the SOM Method on the Google Street Plugin

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

خطوط لوله انتقال گاز شهرستان ایلام با توجه به گستردگی منطقه مورد مطالعه و کوهستانی‌بودن منطقه و همچنین گذر خطوط لوله از مناطق مسکونی و پرجمعیت از چند جهت دارای مخاطرات است. با توجه به شرایط کوهستانی و شرایط آب و هوایی منطقه، در فصول دارای بارندگی شاهد وقوع سیلاب‌های متعدد هستیم که می‌توانند باعث تغییر در مسیر لوله و حتی گسست آن شوند. در نقشه نهایی ریسک شاهد این موضوع هستیم که نواحی‌ای دارای ریسک بالاتر هستند که در مجاورت مسیل قرار گرفته‌اند. نقاط زمین لغزش معیار مورد مطالعه دیگر می‌باشد که واقع شدن منطقه مورد مطالعه در ارتفاعات و همچنین بارش

نزولات در فصول بارانی امکان وقوع زمین‌لغزش و مخاطره ناشی از آن برای خطوط لوله گاز را تشدید می‌کند. عامل دیگری که به عنوان معیار موثر در ریسک خطوط لوله در نظر گرفته‌شده است، معیار تراکم علمک که به دلیل اینکه منطقه مورد مطالعه منطقه شهری می‌باشد و بالقوه با مناطق پرجمعیت و مسکونی روبرو هستیم این معیار به عنوان عامل موثر در ریسک خط لوله محسوب می‌شود چنانکه با بررسی نقشه ریسک نهایی متوجه خواهیم شد که نقاط دارای تراکم علمک، دارای ریسک بیشتری هستند. در رابطه با نشتی، در نواحی که قطر لوله کم است احتمال نشتی بیشتر است.

در مطالعات گذشته نیز، با توجه به موقعیت و شرایط محیط اطراف و ویژگی های خط لوله، حوادث گوناگونی به منزله عوامل خرابی در نظر گرفته شدند (هان و ونگ؛ ۲۰۱۰). شناسایی این عوامل با کمک آنالیز حوادث دوره‌ای و نظر کارشناسان و تحلیل های سلسله مراتبی انجام شدند.

مدل فازی ممدانی در این پژوهش توانست به‌صورت دقیق و انعطاف‌پذیر ترکیبی از معیارهای متنوع مکانی و غیرمکانی را در قالب یک سیستم استنتاجی تحلیل نماید. خروجی مدل، نقشه‌ای کاربردی برای شناسایی نواحی بحرانی در خطوط گازرسانی شهر ایلام فراهم کرد که می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری‌های ایمنی، اولویت‌بندی تعمیرات و مدیریت بحران در شبکه گاز شهری قرار گیرد. همانطور که در این پژوهش شاهد بودیم با یکسان‌سازی داده‌ها و قراردادن آن‌ها در حالت فازی می‌توان انواع مختلف داده‌ها را فارغ از نوع، حجم و تعداد گویه با یکدیگر ترکیب کرد و توابع فازی را به وجود آورد که ریسک‌های احتمالی مرتبط با خطوط انتقال گاز را شناسایی و نمایان نماید. در تحقیقات گذشته نیز این نتایج بدست آمده که سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند نقش بسیار فعالی در مدیریت علمی، تحلیل‌ها و مدل‌سازی جنبه‌های محیطی داشته باشد و با قابلیت تولید، پردازش، تحلیل، و مدیریت اطلاعات مکانی و مدلسازی روابط فضایی این امکان را فراهم می‌سازد(ریباچوک؛ ۲۰۱۰). رضایی نوده، کریمی و جباری قره باغ (۱۳۹۵) نیز تأیید کردند که ترکیب فرآیند برآورد ریسک خطوط لوله انتقال با قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) این امکان را فراهم می‌سازد که تغییرات مکانی عوامل مؤثر بر ریسک در طول مسیر خطوط لوله با دقت بیشتری تحلیل شده و مراحل و محاسبات مربوطه به‌صورت بصری و دقیق‌تری در فواصل مختلف از خط لوله اجرا شود.

منابع

رضایی نوده، فریده؛ کریمی، محمد؛ جباری قره‌باغ، موسی و عسگریان، امیرحسین. (۱۳۹۵). ارزیابی ریسک خطوط انتقال گاز با استفاده از شاخص‌گذاری ریسک در محیط GIS. *اولین کنفرانس ملی فناوری اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئوماتیک*، ۲۹–۳۰ مهر.

قهرودی، منیژه. (۱۳۸۸). کاربرد GIS در مدیریت یکپارچه مخاطرات طبیعی. *مجله ژئوماتیک و مدیریت مخاطرات طبیعی*، ۱۶(۷)، ۱۱۹–۱۳۴.

Contreras, A., Quej-Aké, L. M., Lizárraga, C. R., & Pérez, T. (2015). The role of calcareous soils in SCC of X52 pipeline steel. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1766, 95–106. https://doi.org/10.1557/opl.2015.95

El Golli, R., Bézian, J. J., Delenne, B., & Menu, F. (2007). Modelling of a pressure regulator. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(4), 234–243. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.11.004

Esford, R., Smith, D., & Johnson, P. (2004). Vulnerability analysis for urban natural gas pipeline network system. *Information & Security: An International Journal*, 13(1), 11–28. https://doi.org/10.11610/isij.1301

Guo, Y., Meng, X., Wang, D., Meng, T., Liu, S., & He, R. (2016). Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *33*, 18–29.

Han, Z., & Weng, W. (2010). An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(3), 428–436. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.01.004

Li, H., & Lu, Y. (2019). The multiple effectiveness of state natural gas consumption constraint policies for achieving sustainable development targets in China. *Applied Energy*, 235, 685–698. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.091

Lohani, A. K., Goel, N. K., & Bhatia, K. K. S. (2006). Takagi–Sugeno fuzzy inference system for modeling stage–discharge relationship. *Journal of Hydrology*, 331(1–2), 146–160. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.006

Lythgoe, W. F., Wardman, M., & Toner, J. P. (2004, October 4–6). Enhancing rail passenger demand models to examine station choice and access to the rail network. *European Transport Conference 2004*, Strasbourg, France. https://etcproceedings.org/paper/enhancing-rail-passenger-demand-models

Mahjoob, A. (2024). Spatial analysis for natural gas pipeline routing, monitoring, and high risk areas identification. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15(2). https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000724

Malinowska, A., Cui, X., Salmi, E. F., & Hejmanowski, R. (2022). A novel fuzzy approach to gas pipeline risk assessment under influence of ground movement. *International Journal of Coal Science & Technology*, *9*(1), 1–11. https://doi.org/10.1007/s40789-022-00511-2

Muhlbauer, W. K. (2004). *Pipeline risk management manual: Ideas, techniques, and resources* (3rd ed.). Gulf Professional Publishing, Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-075067579-6/50003-0

Poljanšek, K., Bono, F., & Gutiérrez, E. (2010). GIS-based method to assess seismic vulnerability of interconnected infrastructure: A case of EU gas and electricity networks. *EUR 24275 EN, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen (JRC-IPSC), European Commission*. https://doi.org/10.2788/34713

Rybaczuk, M. (2010). GIS in environmental health risk analysis. *Environmental Health Perspectives*, 109(6), 551–556. https://doi.org/10.1289/ehp.01109551

Wang, X., Zhang, Y., & Li, J. (2021). Vulnerability analysis based on risk assessment for the transmission capabilities of natural gas pipeline networks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 70, 104–120. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104120

You, Q., Zhu, W., Zheng, J., & Tang, S. (2018). Vulnerability analysis for urban natural gas pipeline network system. *Information & Security: An International Journal*, 40(1), 11–28. https://doi.org/10.11610/isij.4001

Yildirim, V., Yomralioglu, T., Nisanci, R., Colak, E. H., Bediroglu, S., & Memisoglu, T. (2016). An integrated spatial method for minimizing environmental damage of transmission pipelines. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(6), 2653–2663. https://doi.org/10.15244/pjoes/63053