Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Autumn 2025, Vol. 15 (3): 270 - 293

Research Article

Assessment of the Risk of Oil and Gas Pipeline Failures in the Masjed Soleiman Area under the Influence of Geohazards Using a Geospatial Approach

Rahim Nazari[1], Mostafa Kabolizadeh[1]*, Kazem Rangzan[1]

1- Remote Sensing and GIS Department, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz

Keywords: *Geological hazards, Oil and Gas Pipelines, Geospatial Information System, and Masjid Soleiman.*

1-Introduction

Geological hazards such as pipelines pose a serious threat to critical infrastructure. These complex, multifactorial phenomena cause sudden or gradual changes in Earth's surface, placing significant stress on pipelines and increasing the likelihood of extensive damage. Energy transmission infrastructures, including pipelines, are at risk in areas susceptible to geological hazards, such as alluvial plains. Land subsidence, landslides, and earthquakes introduce stresses and deformations in pipelines, potentially resulting in sagging, bending, or even rupture, leading to economic losses, environmental pollution, and disruptions to energy supply (Lee et al., 2003).

Geographic Information Systems (GIS) is a powerful spatial analysis and risk assessment tool in various fields, including pipeline management. Integrating diverse spatial data, such as topography, geology, and hydrology, within a GIS environment can enable a more comprehensive and accurate analysis of high-risk areas. This approach allows better-informed decision-making in infrastructure planning, monitoring, and risk mitigation, ultimately enhancing pipeline resilience against geological hazards.

2-Material and methods

Masjed Soleiman, a historic city in southwestern Iran, is one of the oldest oil-producing regions in the country. This city is also known as the cradle of Iran's oil industry, where many pioneering developments in the sector have occurred. Today, Masjed Soleiman faces various challenges, including environmental issues arising from industrial activities and natural hazards such as earthquakes and land subsidence. One of the most significant challenges confronting Masjed Soleiman is the threat of geological hazards. Phenomena such as land subsidence, landslides, and earthquakes continuously threaten the area.

Geological Hazards

Land Subsidence

Land subsidence is a serious hazard in the Masjed Soleiman region and many other areas, resulting from excessive groundwater extraction and other natural factors. This phenomenon causes significant economic damage and can severely impact infrastructure, buildings, and pipelines, increasing the risk of landslides. Various methods are utilized to assess the subsidence risk, including measuring changes in ground level using remote sensing techniques, analyzing groundwater data, and numerical modeling (Payab and Saeef, 2022).

* Corresponding author: m.kabolizade@scu.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2025.49175.2501
Received: 2025-03-08
Accepted: 2025-12-21

ISSN: 2717-0764

Earthquakes

Earthquakes are another critical hazard in the Masjed Soleiman area, potentially causing severe shaking that can demolish buildings, infrastructure, and pipelines. The tremors resulting from earthquakes can lead to slope instability and trigger landslides.

Landslides

Landslides are among the most common geological hazards in areas with steep slopes and heavy rainfall. Proper management can mitigate the impacts of landslides, reducing the risk of land subsidence.

These geological hazards pose significant threats to Masjed Soleiman, requiring effective monitoring and risk management strategies to protect the community and its vital infrastructure.

3-Results and discussions

In the present study, a Geographic Information System (GIS)-based approach is employed to identify pipeline failure patterns in the Masjed Soleiman area. This approach enables a more precise, visual analysis of the data. Initially, various information layers, including pipeline layers, subsidence areas, landslide and earthquake zones, and layers containing information on common fluids, pipe materials, and maintenance history, were imported into the GIS environment. Then, using overlay operations to superimpose the layers, areas with a high likelihood of pipeline failure were identified. Accurate modeling of pipeline fracture risk, particularly in areas with significant geological activity, is paramount. A more comprehensive assessment of this risk can be achieved by utilizing GIS and integrating it with advanced statistical methods. One effective method in this context is the analysis of overlaying information layers. By combining pipeline-related layers with geological hazard maps such as subsidence, landslides, and earthquakes, areas where pipelines are at greatest risk can be identified.

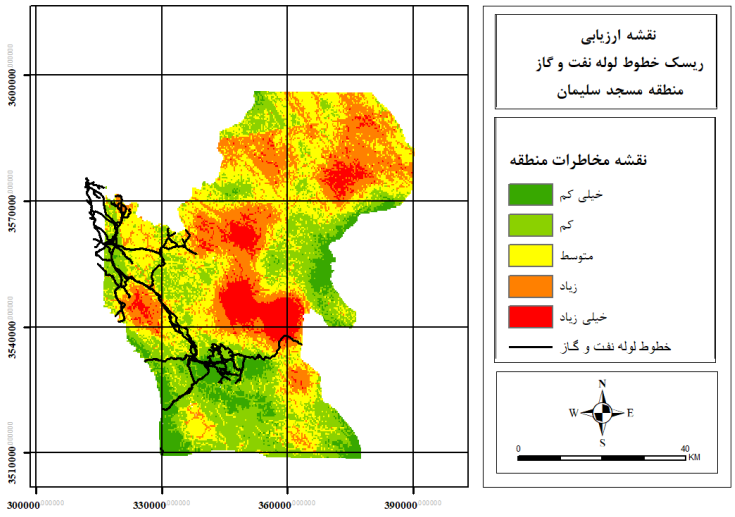


Fig. 1. Location of oil and gas pipelines on geological hazard risk zones in the study area

The provided map (Figure 1) clearly shows the spatial distribution of oil and gas pipelines in the Masjed Soleiman region, along with the zoning of geological hazards. Many pipelines traverse areas with a high geological potential for hazards, such as sliding, subsidence, and earthquakes. This overlap between pipelines and high-risk regions increases the likelihood of incidents and damage from these hazards.

4-Conclusion

The present research examines the status of oil and gas pipelines in the Masjed Soleiman area, which is subject to geological hazards. Based on analyses of the provided data, we can conclude that the failure rate of pipelines in areas with a high risk of geological hazards, particularly subsidence, significantly increases.

ISSN: 2717-0764
CC BY

Various factors, including corrosion, third-party interference, and cracks, contribute to these failures. However, what is evident is the direct relationship between the level of geological hazards and the likelihood of failure. A comprehensive and multifaceted approach must be adopted to mitigate these failures. This approach includes improving pipeline design, selecting more robust materials, conducting regular inspections, managing geological hazard risks, raising public awareness, training personnel, and updating safety standards. Investing in research and developing new technologies to monitor and supervise pipelines can enhance their performance and safety.

5-References

Lee, S., Kang, J., Kim, J., 2023. A study on factors influencing ground subsidence and a risk analysis method using the attributes of sewer pipes. Applied Sciences, 13 (17), 9714. https://doi.org/10.3390/app13179714

Payab, M., Sayaf, H., 2022. The impact of subsidence on infrastructure and solutions to control these effects. Tehran, Iran: Research Center of the Islamic Consultative Assembly.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Nazari, R., Kabolizadeh, M., Rangzan, K., 2025. Assessment of the Risk of Oil and Gas Pipeline Failures in the Masjed Soleiman Area under the Influence of Geohazards Using a Geospatial Approach. Adv. Appl. Geol. 15 (3), 270-293.
DOI: 10.22055/aag.2025.49175.2501
https://aag.scu.ac.ir/article_20459.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

ارزیابی خطر شکستگی خطوط لوله نفت و گاز تحت تأثیر مخاطرات زمین‌شناختی منطقه مسجدسلیمان با استفاده از رویکرد سیستم اطلاعات مکانی

رحیم نظری
دانشجوی دکتری رشته سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
مصطفی کابلی زاده
دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
کاظم رنگزن
استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
m.kabolizade@scu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

چکیده

مسجدسلیمان، به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین مناطق نفت‌خیز ایران، در سال‌های اخیر با مخاطرات جدی زمین‌شناختی مواجه شده است. تحلیل شکست خطوط لوله امری حیاتی برای اطمینان از ایمنی و عملکرد صحیح این تأسیسات است. پژوهش حاضر باهدف بررسی تأثیر مخاطرات زمین‌شناختی بر خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان انجام‌شده است. به این منظور، با بهره‌گیری از داده‌های مکانی و اطلاعات توصیفی خطوط لوله نفت و گاز، ارتباط بین مناطق با مخاطرات زمین‌شناسی و وقوع حوادث در خطوط لوله موردبررسی قرارگرفته است. در این پژوهش، یک رویکرد کمّی برای ارزیابی تأثیر مخاطرات زمین‌شناختی بر پایداری خطوط لوله نفت و گاز توسعه یافت. داده‌های مکانی برداری (لایه‌های خطوط لوله، فرونشست، زمین‌لغزش و لرزه‌خیزی) و مشخصات فنی خطوط لوله (نوع سیال، جنس لوله و تاریخچه شکستگی‌ها) در محیط GIS یکپارچه شدند. با استفاده از ابزارهای تحلیل همپوشانی فضایی و فراوانی نسبی، ارتباط مکانی بین نقاط شکستگی و نواحی تحت تأثیر مخاطرات ارزیابی شد. این تحلیل شامل هم‌جواری و تعیین تراکم شکستگی‌ها در مناطق پرمخاطره بود. علاوه بر این، برای تلفیق چندمعیاره و پهنه‌بندی ریسک، روش همپوشانی فازی با توابع عضویت فازی بر اساس معیارهای فرونشست، زمین‌لغزش و لرزه‌خیزی اعمال گردید. نتایج نشان می‌دهد که مخاطرات زمین‌شناختی به‌عنوان یکی از عوامل مهم در بروز حوادثی مانند خوردگی و ترک‌خوردگی در خطوط لوله محسوب می‌شود. با استفاده از تحلیل‌های مکانی، مشخص شد که درصد قابل‌توجهی از نقاط شکستگی در مناطقی با نرخ‌مخاطرات بالا واقع‌شده‌اند. این یافته نشان می‌دهد که فرونشست یکی از عوامل مهم در بروز خرابی خطوط لوله در منطقه موردمطالعه است.

واژه‌های کلیدی: *مخاطرات زمین‌شناختی، خطوط نفت و گاز، سیستم اطلاعات مکانی، مسجدسلیمان.*

۱-مقدمه

مخاطرات زمین‌شناختی، تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های حیاتی مانند خطوط لوله محسوب می‌شوند. این پدیده‌های پیچیده و چندعاملی، با ایجاد تغییرات ناگهانی یا تدریجی در سطح زمین، تنش‌های قابل‌توجهی را به خطوط لوله وارد کرده و احتمال بروز خسارات گسترده را افزایش می‌دهند. با اتخاذ راهکارهای مدیریت بهینه و مانیتورینگ مناطق با پتانسیل ریسک مخاطرات زمین‌شناختی، می‌توان از بروز خسارات جبران‌ناپذیر ناشی از شکستگی خطوط لوله جلوگیری کرد و به توسعه پایدار دست‌یافت (Akbarian et al., 2024). زیرساخت‌های انتقال انرژی مانند خطوط لوله، به‌ویژه در مناطق مستعد مخاطرات زمین‌شناسی مانند دشت‌های آبرفتی، همواره در معرض تهدید قرار دارند. فرونشست زمین، زمین‌لغزش و زلزله با ایجاد تنش‌ها و تغییر شکل در خطوط لوله، می‌توانند منجر به تغییر شیب، خمیدگی و حتی گسیختگی لوله شوند. این امر علاوه بر خسارات اقتصادی، به آلودگی محیط‌زیست و اختلال در تأمین انرژی منجر می‌شود. (Lee, et al., 2003). زمین‌لغزش‌ها با ایجاد جابجایی‌های بزرگ در سطح زمین و با ایجاد جابجایی‌های ناگهانی در توده‌های خاک و سنگ، می‌توانند باعث ایجاد ترک‌های طولانی، خمیدگی و شکستگی در خطوط لوله شده و آسیب‌های جدی وارد کرده و حتی آن‌ها را به‌طور کامل تخریب کنند. بارندگی‌های شدید، زلزله، فعالیت‌های

انسانی و شیب تند زمین ازجمله عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش هستند. زلزله نیز با ایجاد لرزش‌های شدید، می‌تواند باعث ایجاد گسیختگی در خاک و سنگ شده و به خطوط لوله آسیب رسانده و منجر به نشت مواد خطرناک شود. این پدیده نه‌تنها بر زیرساخت‌های شهری و روستایی تأثیر می‌گذارد، بلکه خطوط لوله انتقال نفت و گاز را نیز با تهدید جدی مواجه می‌کند (Rafiei et al., 2016). این مخاطرات، با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی هر منطقه، می‌توانند به‌صورت ترکیبی یا جداگانه رخ دهند و تأثیرات متفاوتی بر زیرساخت‌ها داشته باشند. در مناطق کوهستانی و شیب‌دار، خطر زمین‌لغزش و در مناطق لرزه‌خیز، خطر زلزله بیشتر است. تأثیرات مخاطرات زمین‌شناسی به خطوط لوله که می‌تواند منجر به خسارات اقتصادی و خطرات ایمنی شوند به شرح زیر است:

- تغییر شکل خط لوله: مخاطرات زمین‌شناختی باعث ایجاد کشش، فشردگی، خمیدگی و حتی شکستگی در خط لوله می‌شود. این تغییرات شکل، یکپارچگی لوله را به خطر می‌اندازد.
- ایجاد تنش‌های داخلی: تغییر شکل‌های ناشی از حوادث زمین‌شناختی، تنش‌های زیادی را در نقاط مختلف لوله ایجاد می‌کند. این تنش‌ها می‌توانند منجر به ترک‌خوردگی و درنهایت نشت لوله شوند.
- آسیب به اتصالات: اتصالات خط لوله که معمولاً نقاط ضعف لوله هستند، در اثر مخاطرات زمین‌شناختی بیش از سایر نقاط تحت تأثیر قرار می‌گیرند و ممکن است دچار آسیب‌دیدگی شوند.
- تغییر درشیب خط لوله: با تغییر شیب‌خط لوله جریان سیال در لوله و عملکرد پمپ‌ها تأثیر نیز دچار تغییرات منفی می‌شوند و می‌تواند به کاهش فشار و دبی جریان منجر شود.
- افزایش سرعت خوردگی: تنش‌های ناشی از مخاطرات زمین‌شناختی، سرعت خوردگی لوله را افزایش می‌دهند. خوردگی، ضخامت لوله را کاهش داده و مقاومت آن را در برابر فشار و تنش کم می‌کند.

شکستگی خطوط لوله می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری ازجمله آلودگی محیط‌زیست و خسارات مالی و جانی به دنبال داشته باشد. برای پیشگیری از چنین حوادثی، ارزیابی دقیق ریسک شکستگی از اهمیت بالایی برخوردار است. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) یک ابزار قدرتمند برای تحلیل فضایی و ارزیابی ریسک در حوزه‌های مختلف، ازجمله خطوط لوله، محسوب می‌شود. با تلفیق داده‌های مکانی متنوع مانند توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی در محیط GIS، می‌توان به تحلیل جامع‌تر و دقیق‌تری از مناطق مستعد خطر دست‌یافت. این کار با توجه به عوامل مؤثر بر شکستگی مانند فاصله از گسل‌ها، شیب زمین و نوع خاک انجام می‌شود. یکی از مزایای اصلی استفاده از GIS در ارزیابی ریسک، امکان تلفیق و تحلیل هم‌زمان داده‌های متنوع است. علاوه بر داده‌های مکانی، داده‌های توصیفی مانند جنس لوله، تاریخچه تعمیرات و نتایج بازرسی‌های دوره‌ای نیز به مدل وارد می‌شوند. این امر به ایجاد مدل‌های ریسک جامع‌تری منجر می‌شود که عوامل مختلف مؤثر بر شکستگی را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرند. همچنین، با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین‌های بردار پشتیبان، می‌توان روابط پیچیده‌تری بین عوامل مختلف را شناسایی کرده و مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه داد. برای حفظ اعتبار مدل‌های ریسک، به‌روزرسانی مداوم آن‌ها ضروری است. تغییرات در شرایط محیطی، فعالیت‌های انسانی و بروز حوادث می‌تواند بر ریسک شکستگی خطوط لوله تأثیر بگذارد. با استفاده از GIS، می‌توان به‌راحتی داده‌های جدید را به مدل اضافه کرده و مدل را به‌روزرسانی نمود. همچنین، می‌توان از سامانه‌های هشدار زودهنگام برای نظارت بر تغییرات در شرایط محیطی و شناسایی سریع هرگونه تهدید بالقوه استفاده کرد. محققان با استفاده از GIS به بررسی آسیب‌پذیری خطوط لوله در برابر زلزله و سایر مخاطرات زمین‌شناسی پرداخته‌اند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که فاصله از گسل‌ها، نوع خاک و جنس لوله ازجمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری خطوط لوله هستند. همچنین، فرونشست و زمین‌لغزش می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر عمر مفید خطوط لوله تأثیر گذاشته و احتمال بروز نشت و شکستگی را افزایش دهند. در این خصوص Dash و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به بررسی آسیب‌پذیری خطوط لوله گاز در برابر زلزله پرداخته‌اند. آن‌ها با تلفیق داده‌های خطوط لوله، نقشه‌های گسل‌ها و مناطق لرزه‌خیز، مناطقی را که خطوط لوله در معرض بیشترین خطر قرار دارند، شناسایی کرده‌اند. همچنین، با استفاده از تحلیل‌های آماری، ارتباط بین شدت زلزله و میزان آسیب به خطوط لوله را

بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فاصله از گسل‌ها، نوع خاک و جنس لوله ازجمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری خطوط لوله در برابر زلزله هستند. Lee و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر روی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین و روش تحلیل ریسک با استفاده از ویژگی‌های لوله‌های فاضلاب انجام دادند. آن‌ها با بررسی داده‌های مرتبط با لوله‌های فاضلاب و وقوع فرونشست، مدل‌هایی را برای شناسایی مناطق پرخطر توسعه دادند. نتایج تحقیق آن‌ها بر اهمیت مشخصات زیرساخت‌های زیرزمینی مانند جنس و عمر لوله در پیش‌بینی فرونشست زمین تأکید دارد و نشان می‌دهد که تحلیل ویژگی‌های شبکه لوله‌کشی می‌تواند در ارزیابی و کاهش ریسک فرونشست کمک‌کننده باشد. He و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی ارزیابی ریسک بلایای مهندسی زمین‌شناسی در خطوط لوله را با استفاده از GIS و مدل‌های WOE-GA-BP موردبررسی قراردادند. آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، مدل‌هایی را برای پیش‌بینی مناطق آسیب‌پذیر در برابر مخاطرات زمین‌شناختی توسعه دادند. نتایج مطالعه آن‌ها کاربرد تلفیقی GIS و روش‌های یادگیری ماشین را در شناسایی دقیق مناطق پرخطر برای زیرساخت‌های خطوط لوله در مواجهه با بلایای زمین‌شناسی نشان می‌دهد. Karbalayi و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر روی تشخیص نشت و پارگی خطوط لوله مدفون تحت سفره آب با استفاده از داده‌های مکانی انجام دادند. آن‌ها با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک‌های تحلیل فضایی، روشی را برای شناسایی تغییرات سطحی ناشی از نشت یا پارگی در خطوط لوله زیرزمینی ارائه کردند. این مطالعه به اهمیت پایش دقیق تغییرات زمین و کاربرد ابزارهای سنجش‌ازدور در پیش‌بینی و مدیریت حوادث خطوط لوله تأکید دارد.

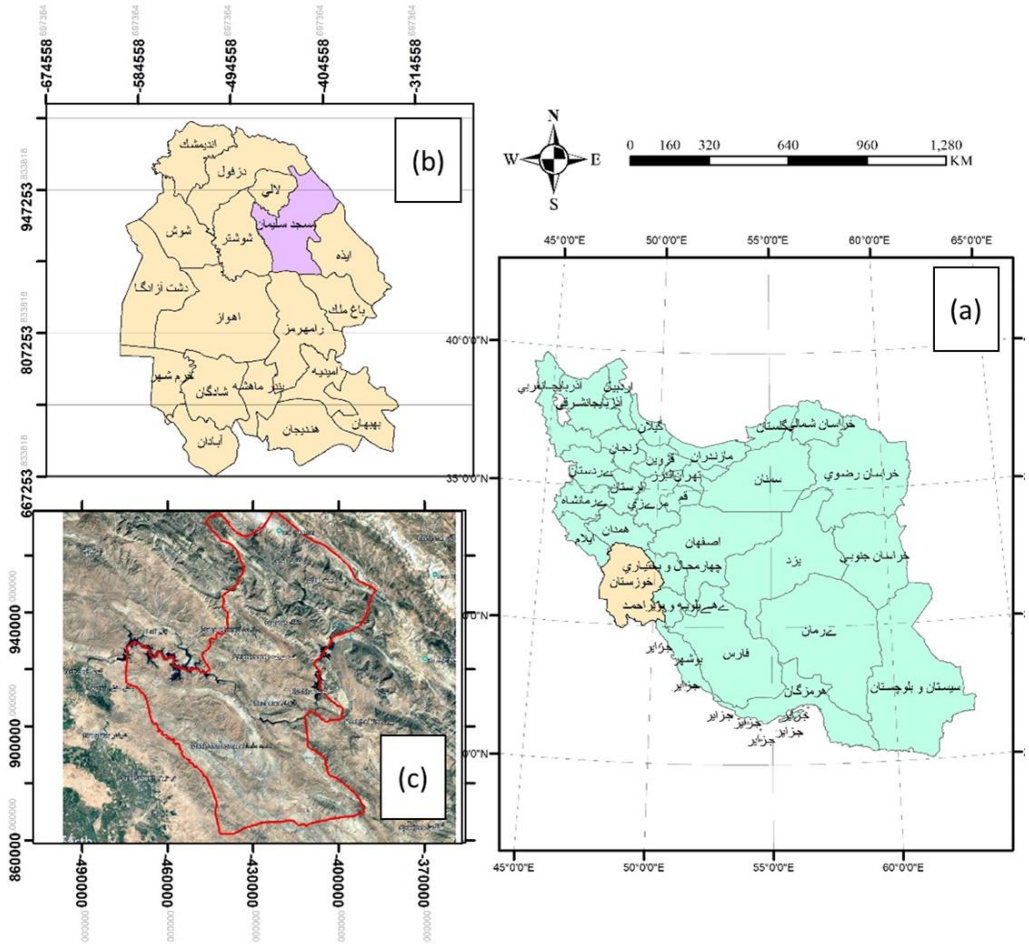
Hong و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود به داده‌کاوی فضایی مبتنی بر شبکه‌های لوله زیرزمینی شهری پرداختند. آن‌ها روش‌هایی را برای تحلیل داده‌های حجیم مربوط به شبکه‌های لوله‌کشی شهری و شناسایی الگوهای فضایی مرتبط با خرابی‌ها یا نیاز به تعمیرات ارائه کردند. این تحقیق نشان می‌دهد که داده‌کاوی فضایی می‌تواند در بهینه‌سازی مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های لوله‌کشی شهری و کاهش خطرات ناشی از فرسودگی یا آسیب‌های محیطی مفید باشد. Lee و همکاران در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۳، یک مدل پیش‌بینی کننده ریسک فرونشست زمین مبتنی بر یادگیری ماشین را با استفاده از ویژگی‌های خطوط لوله زیرزمینی در مناطق شهری توسعه دادند. این پژوهش به بررسی چگونگی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانی خطوط لوله (مانند عمق، قطر، سن و مواد سازنده) بر احتمال وقوع فرونشست زمین می‌پردازد. یافته‌های آن‌ها کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در ارتقای دقت پیش‌بینی ریسک فرونشست زمین و ارائه راهکارهای مؤثر برای مدیریت شهری نشان می‌دهد. Cui و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌های عددی و GIS، به ارزیابی ریسک ناشی از مخاطرات زمین‌شناختی بر خطوط لوله پرداخته‌اند. آن‌ها با شبیه‌سازی فرآیند فرونشست و رانش زمین و تحلیل تنش‌های ایجادشده در خطوط لوله، میزان تغییر شکل و احتمال شکست خطوط لوله را در مناطق مختلف برآورد کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرونشست و زمین‌لغزش می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر عمر مفید خطوط لوله تأثیر گذاشته و احتمال بروز نشت و شکستگی را افزایش دهد. همچنین Alzarooni و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای با استفاده از GIS، یک مدل جامع برای ارزیابی ریسک شکستگی خطوط لوله ارائه کرده‌اند. آن‌ها با تلفیق داده‌های مختلفی مانند نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی و همچنین داده‌های مربوط به خطوط لوله، یک‌لایه اطلاعاتی جامع از مخاطرات ایجاد کرده‌اند. سپس با استفاده از روش‌های وزن دهی و ترکیب لایه‌ها، نقشه ریسک شکستگی خطوط لوله را تهیه‌کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به‌طور مؤثری مناطق با ریسک بالا را شناسایی کرده و به تصمیم‌گیران در برنامه‌ریزی برای کاهش ریسک کمک کند. خطوط لوله نفت و گاز به‌عنوان شریان‌های حیاتی اقتصاد بسیاری از کشورها، نقش محوری در تأمین انرژی ایفا می‌کنند. بااین‌حال، این خطوط لوله در معرض مخاطرات مختلفی ازجمله زمین‌لرزه، فرونشست زمین و زمین‌لغزش قرار دارند. وقوع حوادثی مانند شکستگی خطوط لوله می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری ازجمله آلودگی محیط‌زیست، خسارات مالی هنگفت و تهدید جان انسان‌ها را به دنبال داشته باشد. برای ارزیابی دقیق‌تر ریسک، می‌توان سناریوهای مختلفی را با توجه به‌شدت و فرکانس رخداد مخاطرات زمین‌شناسی شبیه‌سازی کرد. به‌عنوان‌مثال، می‌توان سناریوهای زلزله با شدت‌های مختلف را در نظر گرفته و تأثیر هر یک‌بر خطوط لوله را بررسی

کرد. نوآوری این پژوهش در توسعه و به‌کارگیری یک رویکرد جامع و کمی‌سازی شده مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی (GIS) برای ارزیابی خطر شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان است که به‌طور خاص به تلفیق هم‌زمان و چندمعیاره چهار دسته از مخاطرات زمین‌شناختی کلیدی شامل فرونشست، زمین‌لغزش، لرزه‌خیزی و شکستگی‌های پیشین خطوط لوله، با استفاده از روش همپوشانی فازی می‌پردازد. این رویکرد، با ادغام داده‌های مکانی برداری و مشخصات فنی خطوط لوله، امکان تحلیل دقیق ارتباط مکانی بین نقاط شکستگی و نواحی پرخطر را فراهم آورده و منجر به پهنه‌بندی ریسک با جزئیات بالا و شناسایی مناطق مستعد آسیب‌پذیری بیشتر در یک بستر زمین‌شناختی پیچیده و نفتی شده است که این سطح از جامعیت و دقت در ارزیابی ریسک، یک گام روبه‌جلو در مدیریت ایمنی زیرساخت‌های حیاتی در مناطق مشابه محسوب می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل‌های GIS می‌تواند به مدیران کمک کند تا تصمیمات مدیریتی بهتری اتخاذ کنند. درمجموع، GIS یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی ریسک شکستگی خطوط لوله است که می‌تواند به بهبود ایمنی و پایداری سیستم‌های خطوط لوله کمک شایانی کند. با استفاده از این ابزار، می‌توان مناطق با ریسک بالا را شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه مناسب را برنامه‌ریزی و اجرا نمود. همچنین، GIS می‌تواند در نظارت بر تغییرات شرایط محیطی و به‌روزرسانی مداوم مدل‌های ریسک نیز مورداستفاده قرار گیرد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مسجدسلیمان، شهری تاریخی در جنوب غربی ایران و یکی از قدیمی‌ترین مناطق نفت‌خیز کشور است. این منطقه به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص و فعالیت‌های صنعتی گسترده، با چالش‌های زیست‌محیطی و زمین‌شناسی متعددی روبرو است. مسجدسلیمان در منطقه‌ای کوهستانی و با آب‌وهوای گرم و خشک قرار دارد. این شهر از شمال به شهرستان لالی، از جنوب به شهرستان ایذه و از غرب به شهرستان شوشتر محدود می‌شود. مسجدسلیمان به‌عنوان یکی از اولین شهرهای صنعتی ایران، نقش مهمی در توسعه صنعت نفت و اقتصاد کشور داشته است. این شهر همچنین به‌عنوان مهد صنعت نفت ایران شناخته می‌شود و بسیاری از نخستین‌ها در صنعت نفت ایران در این شهر رخ‌داده است. امروزه مسجدسلیمان با چالش‌های مختلفی ازجمله مسائل زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و مخاطرات طبیعی مانند زلزله و فرونشست زمین مواجه است. بااین‌حال، این شهر همچنان به‌عنوان یکی از شهرهای تاریخی و صنعتی ایران اهمیت خود را حفظ کرده است. وجود منابع غنی نفت و گاز در این منطقه، در کنار فعالیت‌های اکتشافی و استخراجی، باعث تغییرات قابل‌توجهی در محیط‌زیست و زمین‌شناسی منطقه شده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مسجدسلیمان، مخاطرات زمین‌شناسی است. پدیده‌هایی مانند فرونشست زمین، زمین‌لغزش و زلزله، به‌طور مداوم این منطقه را تهدید می‌کنند. فرونشست زمین، عمدتاً به دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و تغییرات اقلیمی رخ می‌دهد و باعث ایجاد ترک‌ها و شکاف‌های گسترده‌ای در زمین می‌شود (Bazaluk et al., 2023). زمین‌لغزش نیز به دلیل عوامل طبیعی مانند بارندگی‌های شدید و شیب تند زمین و عوامل انسانی مانند تخریب پوشش گیاهی، به وقوع می‌پیوندد. زلزله نیز به‌عنوان یک تهدید دائمی، به دلیل وجود گسل‌های فعال در منطقه، خطرات جدی برای زیرساخت‌ها و ساکنان ایجاد می‌کند. پیامدهای ناشی از مخاطرات زمین‌شناسی در منطقه مسجدسلیمان بسیار گسترده است. علاوه بر خسارات اقتصادی ناشی از آسیب به زیرساخت‌ها، این مخاطرات به آلودگی محیط‌زیست، اختلال در تأمین انرژی و تهدید سلامت ساکنان منطقه نیز منجر می‌شود. نشت مواد نفتی و گازی از خطوط لوله آسیب‌دیده، می‌تواند به آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی و همچنین ایجاد آتش‌سوزی منجر شود. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به اتخاذ رویکردی جامع و چندجانبه است. مسجدسلیمان با توجه به پتانسیل‌های موجود و چالش‌های پیش رو، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و مدیریتی هوشمندانه است. با اتخاذ تدابیر مناسب و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و فناوری‌های نوین، می‌توان از این منطقه به‌عنوان یک‌قطب صنعتی و اقتصادی پایدار بهره‌برداری کرد و درعین‌حال، از محیط‌زیست و سلامت ساکنان آن محافظت نمود.



شکل ۱- (a) نقشه موقعیت استان خوزستان در ایران، (b) نقشه موقعیت شهرستان مسجدسلیمان در استان خورستان، (c) نقشه موقعیت شهرستان مسجدسلیمان بر روی تصویر ماهواره‌ای Google Earth

Fig. 1- (a) Location map of Khuzestan Province in Iran, (b) Location map of Masjed Soleyman County in Khuzestan Province, (c) Location map of Masjed Soleyman County on Google Earth satellite imagery

۲-۲- تحلیل مخاطرات زمین‌شناسی

تحلیل مخاطرات زمین‌شناسی فرآیندی است که طی آن، انواع مختلف مخاطرات زمین‌شناسی مانند زلزله، رانش زمین و فرونشست شناسایی، ارزیابی و طبقه‌بندی می‌شوند. هدف اصلی از این تحلیل، تعیین میزان آسیب‌پذیری مناطق مختلف در برابر این مخاطرات و تدوین برنامه‌های کاهش خطر است. با انجام تحلیل مخاطرات زمین‌شناسی، می‌توان مناطق پرخطر را شناسایی کرد و اقدامات پیشگیرانه‌ای برای کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از وقوع این مخاطرات انجام داد. اهمیت تحلیل مخاطرات زمین‌شناسی با توجه به افزایش جمعیت جهان و توسعه شهرنشینی، مخاطرات زمین‌شناسی به یکی از چالش‌های مهم بشر تبدیل‌شده است. این تحلیل به برنامه‌ریزان شهری، مسئولان مدیریت بحران و سایر ذینفعان کمک می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای در زمینه سرمایه‌گذاری، توسعه زیرساخت‌ها و مدیریت اراضی اتخاذ کنند. همچنین، این تحلیل می‌تواند به افزایش آگاهی عمومی در مورد مخاطرات زمین‌شناسی و اهمیت آمادگی برای مقابله با آن‌ها کمک کند. تحلیل مخاطرات زمین‌شناختی در منطقه مسجدسلیمان نشان می‌دهد که فرونشست، زمین‌لرزه و زمین‌لغزش از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع ریسک مخاطرات زمین‌شناختی هستند که بیشترین اثر را در خرابی خطر شبکه لوله نفت و گاز ایجاد می‌کند. برای کاهش خطر رانش زمین، نیاز به یک رویکرد جامع و چندجانبه است که شامل ارزیابی دقیق مخاطرات، مدیریت منابع آب، مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها و آموزش جوامع محلی است.

با اتخاذ این اقدامات، می‌توان از خسارات جانی و مالی ناشی از رانش زمین جلوگیری کرد و ایمنی و رفاه ساکنان منطقه را تضمین کرد. در ادامه، به بررسی هر یک از مخاطرات زمین‌شناسی مذکور پرداخته خواهد شد.

۲-۳- فرونشست

فرونشست زمین، یکی از مخاطرات جدی در منطقه مسجدسلیمان و بسیاری از مناطق دیگر است که به دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و عوامل طبیعی دیگر رخ می‌دهد. این پدیده، علاوه بر ایجاد خسارات اقتصادی قابل‌توجه، می‌تواند به زیرساخت‌ها، ساختمان‌ها و خطوط لوله آسیب جدی وارد کند و خطر رانش زمین را افزایش دهد. فرونشست زمین با ایجاد تنش‌های غیریکنواخت در خاک و تغییر شیب زمین، می‌تواند باعث ناپایداری شیب‌ها و وقوع رانش زمین شود. همچنین، فرونشست می‌تواند باعث ترک‌خوردگی لوله‌ها و سایر زیرساخت‌ها شود که در صورت نفوذ آب به داخل خاک، می‌تواند باعث کاهش مقاومت خاک و افزایش احتمال رانش زمین شود. برای ارزیابی خطر فرونشست، از روش‌های مختلفی مانند اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور، تحلیل داده‌های آب زیرزمینی و مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود (Payab et al., 2022). این روش‌ها به شناسایی مناطق مستعد فرونشست و پیش‌بینی میزان و سرعت فرونشست کمک می‌کنند. مدیریت فرونشست نیازمند یک رویکرد جامع و چندجانبه است که شامل کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی، استفاده از منابع آب جایگزین، تقویت زیرساخت‌ها و آموزش جوامع محلی است. با مدیریت صحیح فرونشست، می‌توان از خسارات ناشی از این پدیده جلوگیری کرد و خطر رانش زمین را کاهش داد. در این مطالعه، نقشه فرونشست زمین با استفاده از روش کریجینگ در محیط GIS تهیه شد. داده‌های فرونشست از طریق مشاهدات میدانی جمع‌آوری و با تحلیل ساختار مکانی (نیم‌تغییرنما) و درون‌یابی کریجینگ پردازش شدند. دقت مدل با محاسبه بایاس (۰٫۱۲ سانتیمتر) و واریانس (کمتر از ۰٫۵ سانتیمتر) ارزیابی شد که نشان‌دهنده دقت مناسب و تخمین بی‌طرفانه بود. نتایج نشان داد مناطق مرکزی با برداشت بیش‌ازحد منابع زیرزمینی بیشترین فرونشست رادارند، درحالی‌که مناطق دور از نقاط نمونه‌برداری واریانس بالاتری نشان دادند. رنگ‌های مختلف در این نقشه، شدت فرونشست زمین را در مناطق مختلف نشان می‌دهند.

۲-۴- زمین‌لرزه

زمین‌لرزه یکی دیگر از مخاطرات مهم در منطقه مسجدسلیمان است که می‌تواند باعث ایجاد لرزش‌های شدید و تخریب ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها و خطوط لوله شود. لرزش‌های ناشی از زمین‌لرزه می‌توانند باعث ناپایداری شیب‌ها و وقوع رانش زمین شوند. زلزله با ایجاد لرزش‌های شدید، می‌تواند باعث شل شدن خاک و کاهش مقاومت آن در برابر نیروهای برشی شود. همچنین، لرزش‌های زمین‌لرزه می‌توانند باعث افزایش فشار آب‌های زیرزمینی و کاهش چسبندگی ذرات خاک شوند که هر دو این عوامل می‌توانند خطر رانش زمین را افزایش دهند. برای ارزیابی خطر زمین‌لرزه، از روش‌های مختلفی مانند تحلیل داده‌های لرزه‌نگاری، مدل‌سازی عددی و تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لرزه استفاده می‌شود. این روش‌ها به شناسایی گسل‌های فعال، تعیین بزرگی احتمالی زمین‌لرزه‌ها و برآورد شتاب زمین در مناطق مختلف کمک می‌کنند. آمادگی برای زمین‌لرزه شامل مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، آموزش جوامع محلی، تهیه برنامه‌های اضطراری و ایجاد سیستم‌های هشدار زودهنگام است. با آمادگی مناسب، می‌توان خسارات ناشی از زمین‌لرزه را کاهش داد و از وقوع رانش زمین جلوگیری کرد (He et al., 2021). نقشه خطر زمین‌لرزه ارائه‌شده در این مطالعه با تلفیق داده‌های چندمنبعه شامل داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی (شامل زمین‌لرزه‌های با بزرگی ≤۴ در ۵۰ سال اخیر)، گسل‌های فعال (از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی) تهیه‌شده است. پس از یکپارچه‌سازی لایه‌ها در محیط GIS با سیستم تصویر UTM و تبدیل به رستر ۱×۱ کیلومتر، از روش تحلیل سلسله مراتبی با وزن دهی بیشترین عامل نقاط تاریخی رخداد زلزله استفاده و نقشه نهایی در پنج کلاس خطر (بسیار کم، کم، متوسط، بالا، بسیار بالا) استفاده شد. صحت‌سنجی نقشه با مقایسه با رویدادهای تاریخی و محاسبه شاخص ROC (۰/۸۵) انجام گرفت که دقت بالای مدل را تأیید می‌کند. کلیه داده‌ها از سازمان زمین‌شناسی و مرکز لرزه‌نگاری کشور اخذ شده‌اند.

۲-۵- زمین‌لغزش

زمین‌لغزش یکی از رایج‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی است که در مناطق با شیب زیاد و بارندگی فراوان رخ می‌دهد. زمین‌لغزش می‌تواند به صورت‌های مختلفی مانند ریزش سنگ، لغزش در

سنگ و خاک، لغزش‌های چرخشی و انتقال مستقیم رخ دهد. زمین‌لغزش می‌تواند باعث جابجایی خاک و سنگ و درنتیجه آسیب دیدن خطوط لوله شود. همچنین، زمین‌لغزش می‌تواند باعث مسدود شدن رودخانه‌ها و ایجاد سیل شود که می‌تواند به‌نوبه خود باعث فرسایش خاک و افزایش خطر رانش زمین شود. برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش، از روش‌های مختلفی مانند تحلیل پایداری شیب‌ها، استفاده از مدل‌های عددی و تهیه نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش استفاده می‌شود. این روش‌ها به شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش و ارزیابی احتمال وقوع زمین‌لغزش کمک می‌کنند. مدیریت زمین‌لغزش شامل شناسایی مناطق مستعد، تثبیت شیب‌ها، ایجاد سیستم‌های زهکشی و آموزش جوامع محلی است. با مدیریت صحیح زمین‌لغزش، می‌توان از خسارات ناشی از این پدیده جلوگیری کرد و خطر رانش زمین را کاهش داد (Fanni et al., 2018). روش تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش: نقشه خطر زمین‌لغزش ارائه‌شده در این مطالعه با تلفیق داده‌های چند مرجع شامل داده‌های مورفومتری (شیب، جهت شیب و انحنای توپوگرافی) از مدل رقومی ارتفاع ۱۲/۵ متری ALOS PALSAR، داده‌های زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) و داده‌های بارش (ایستگاه‌های سینوپتیک و محصولات ماهواره‌ای GPM با تفکیک ۰/۱ درجه) تهیه‌شده است. پس از یکپارچه‌سازی لایه‌ها در محیط ArcGIS 10.8 با سیستم تصویر UTM Zone 39N و تبدیل به رستر ۳۰×۳۰ متر، از روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) با وزن دهی عوامل به روش AHP (بر اساس نظر ۱۰ کارشناس) برای تهیه نقشه نهایی در پنج کلاس خطر استفاده شد. صحت‌سنجی با ۸۵ نقطه زمین‌لغزش تاریخی و شاخص ROC (۰/۸۲) دقت مناسب مدل را تأیید می‌کند.

۳- پیاده‌سازی مدل و بحث

تحلیل شکست خطوط لوله امری حیاتی برای اطمینان از ایمنی و عملکرد صحیح این تأسیسات است. روش‌های متنوعی برای این منظور وجود دارد. بازرسی‌های دوره‌ای یکی از روش‌های متداول است که به‌صورت چشمی یا با ابزارهای پیشرفته‌ای مانند اولتراسونیک انجام می‌شود تا عیوب ظاهری و داخلی لوله‌ها شناسایی شود. با این‌حال، این روش‌ها برای پیش‌بینی شکست‌های آینده محدودیت دارند. مدل‌سازی عددی روشی پیشرفته‌تر است که با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، رفتار لوله را تحت شرایط مختلف شبیه‌سازی می‌کند و به مهندسان اجازه می‌دهد تا نقاط ضعف بالقوه را شناسایی کنند. در کنار این، تحلیل‌های آماری با بررسی داده‌های تاریخی شکست، الگوها و عوامل مؤثر بر شکست را شناسایی کرده و برای پیش‌بینی شکست‌های آینده استفاده می‌شود. روش‌های مبتنی بر فیزیک نیز با استفاده از اصول مکانیک شکست، رشد ترک‌ها را مدل‌سازی کرده و عمر باقیمانده لوله را تخمین می‌زنند (Karimi et al., 2013). درنهایت، روش‌های مبتنی بر ریسک با در نظر گرفتن تمام عوامل مؤثر بر شکست و پیامدهای آن، به ارزیابی جامع ریسک شکست پرداخته و در تصمیم‌گیری برای کاهش ریسک کمک می‌کنند. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. انتخاب روش مناسب به عوامل مختلفی ازجمله نوع خط لوله، مواد تشکیل‌دهنده آن، شرایط محیطی و هدف از تحلیل بستگی دارد. در بسیاری از موارد، ترکیبی از این روش‌ها برای انجام یک تحلیل جامع و دقیق مورداستفاده قرار می‌گیرد. در کل، تحلیل شکست خطوط لوله فرآیندی پیچیده و چندوجهی است که نیازمند دانش تخصصی در زمینه‌های مختلف مهندسی، مواد و آمار است. با استفاده از روش‌های تحلیل مناسب، می‌توان ریسک شکست خطوط لوله را به حداقل رساند و از بروز حوادث ناگوار جلوگیری کرد. در پژوهش حاضر، برای شناسایی الگوهای شکست خطوط لوله در منطقه مسجدسلیمان، از یک رویکرد مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته‌شده است. این رویکرد، امکان تحلیل دقیق‌تر و بصری‌تر داده‌ها را فراهم می‌کند. در این روش، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مختلفی ازجمله لایه خطوط لوله، لایه مناطق با فرونشست، زمین‌لغزش و زلزله و همچنین لایه‌های حاوی اطلاعاتی مانند سیال رایج، جنس لوله و تاریخچه تعمیرات، در محیط GIS واردشده‌اند. سپس، با استفاده از عملیات همپوشانی (Overlay) این لایه‌ها بر روی یکدیگر، مناطق با احتمال بالای وقوع شکست خطوط لوله شناسایی‌شده است. به‌عبارت‌دیگر، با تعیین نقاط تلاقی خطوط لوله با مناطق دارای مخاطرات زمین‌شناسی و سایر عوامل مؤثر، می‌توان نقاط بحرانی و مستعد شکست را به‌صورت دقیق مشخص کرد. علاوه بر این، از ابزارهای آماری مانند آمار توصیفی و آزمون‌های آماری برای تحلیل داده‌های حاصل از همپوشانی لایه‌ها استفاده‌شده است. به‌عنوان‌مثال، با محاسبه تراکم نقاط شکست در مناطق مختلف و مقایسه آن با تراکم مخاطرات زمین‌شناسی، می‌توان

به ارتباط بین این دو عامل پی برد. همچنین، با استفاده از ابزارهای مدل‌سازی مکانی، می‌توان نقشه‌های خطر را با دقت بیشتری تهیه کرد. در این پژوهش، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل دقیق داده‌های مکانی و شناسایی الگوهای پنهان استفاده‌شده است. داده‌های مکانی به‌صورت نقطه‌ای و خطی، محل دقیق خطوط لوله و نقاط آسیب‌دیده را مشخص می‌کنند و نقشه‌های حاصل از این داده‌ها، امکان شناسایی مناطق مستعد آسیب و اولویت‌بندی اقدامات تعمیراتی و پیشگیرانه را فراهم می‌آورند. ارزیابی دقیق و مستمر سلامت خطوط لوله از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا نشت مواد نفتی و گازی می‌تواند منجر به آلودگی محیط‌زیست، خسارات اقتصادی هنگفت، اختلال در تأمین انرژی و تهدید سلامت ساکنین شود. حوادث ناشی از آسیب‌دیدگی خطوط لوله، علاوه بر تأثیر منفی بر محیط‌زیست و اقتصاد، می‌تواند جان انسان‌ها را نیز به خطر اندازد؛ بنابراین، حفظ سلامت این خطوط برای تضمین امنیت انرژی، حفاظت از محیط‌زیست و سلامت جامعه ضروری است (Karimi et al., 2013)؛ تحلیل داده‌های ارائه‌شده در خصوص حوادث خطوط لوله، بینش‌های ارزشمندی را در مورد علل اصلی خرابی‌ها و نقاط ضعف سیستم ارائه می‌دهد. به‌طور خلاصه، خوردگی به‌عنوان عامل اصلی خرابی‌ها شناسایی‌شده است که نشان‌دهنده نیاز به بهبود روش‌های مقابله با خوردگی در خطوط لوله می‌باشد. همچنین، حوادث ناشی از عوامل انسانی مانند حفاری غیرمجاز، اهمیت بالای مدیریت صحیح مسیر خطوط لوله و آگاهی‌رسانی به عموم را نشان می‌دهد. (Lee et al., 2023). لازم به ذکر است سامانه‌های اطلاعات مکانی ابزاری قدرتمند برای ارزیابی جامع و دقیق سلامت خطوط لوله است که امکان برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر این زیرساخت‌های حیاتی را فراهم می‌آورد. تحلیل داده‌های ارائه‌شده در خصوص حوادث خطوط لوله، بینش‌های ارزشمندی را در مورد علل اصلی خرابی‌ها و نقاط ضعف سیستم ارائه می‌دهد. برای کاهش حوادث ناشی از عوامل انسانی، ضرورت دارد تا نظارت بر مسیرهای خطوط لوله تقویت شود، آگاهی عمومی در مورد خطرات حفاری در نزدیکی خطوط لوله افزایش یابد و همکاری نزدیک با شرکت‌های حفاری برقرار گردد. نوع سیال حمل شده و جنس لوله نیز بر احتمال وقوع خرابی تأثیرگذار بوده، به‌طوری‌که سیالات خورنده و مواد نامناسب برای لوله می‌توانند احتمال خرابی را افزایش دهند. سیالات خورنده مانند گاز غنی و کندانس احتمال خوردگی را افزایش می‌دهند، درحالی‌که سیالات پرفشار مانند نفت خام سنگین و گاز غنی ممکن است باعث ایجاد انواع دیگری از خرابی‌ها شوند. برای کاهش این مشکلات، استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی، پوشش‌های محافظ، سیستم‌های حفاظت کاتدی، تقویت نظارت بر مسیر خطوط لوله، افزایش آگاهی عمومی و همکاری نزدیک با شرکت‌های حفاری ضروری است. (معصومی و قهرمانی، ۱۴۰۲). فراوانی بالای حوادث مرتبط با خوردگی، ضرورت اتخاذ استراتژی‌های مؤثر برای مقابله با این پدیده را برجسته می‌سازد. استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی، پوشش‌های محافظ و سیستم‌های حفاظت کاتدی ازجمله راهکارهای مؤثر برای کاهش خوردگی در خطوط لوله می‌باشند. درنتیجه، انتخاب مواد مناسب برای لوله و اتصالات و همچنین طراحی سیستم‌های حفاظتی متناسب با نوع سیال حمل شده، از اهمیت بالایی برخوردار است. تحلیل نقاط داغ (Hot Spot Analysis) که با استفاده از آمارگر Getis-Ord Gi* انجام می‌شود، یک روش قدرتمند در آمار فضایی (Spatial Statistics) است که به‌منظور شناسایی خوشه‌های آماری معنی‌دار از مقادیر بالا (نقاط داغ) یا مقادیر پایین (نقاط سرد) در یک مجموعه داده فضایی به کار می‌رود. برخلاف ابزارهای عمومی‌تر تحلیل خوشه که تنها وجود خوشه را نشان می‌دهند، Getis-Ord Gi* قادر است مشخص کند که آیا یک خوشه از مقادیر بالا (Hot Spot) یا یک خوشه از مقادیر پایین (Cold Spot) تشکیل‌شده است. این ابزار با بررسی هر ویژگی مکانی در زمینه همسایگی آن، یک مقدار Z-score و p-value برای هر نقطه (پلی گون) محاسبه می‌کند. Z-score بالا و مثبت همراه با p-value کوچک، نشان‌دهنده یک Hot Spot (خوشه معنی‌دار از مقادیر بالا) است، درحالی‌که Z-score پایین و منفی با p-value کوچک، بیانگر یک Cold Spot (خوشه معنی‌دار از مقادیر پایین) است. در مورد تحلیل خرابی خطوط لوله نفت و گاز در ارتباط با زمین‌لرزه، هدف اصلی از انجام Hot Spot Analysis، شناسایی مناطق جغرافیایی است که در آن‌ها تمرکز خرابی‌های خطوط لوله به‌صورت آماری و معنی‌داری بالا (نقاط داغ) یا پایین (نقاط سرد) است. این تحلیل به‌ویژه هنگامی ارزشمند است که بخواهیم ارتباط فضایی بین وقوع پدیده‌های مخرب (مانند خرابی‌های لوله) و عوامل تأثیرگذار (مانند پتانسیل زمین‌لرزه یا

وقوع زمین‌لرزه‌ها) را ارزیابی کنیم. با ورودی دادن نقاط خرابی لوله و احتمالاً وزن‌دهی آن‌ها بر اساس شدت یا نوع خرابی، یا حتی استفاده از وقوع زمین‌لرزه‌ها به‌عنوان نقاط ورودی، می‌توان نقشه‌ای تولید کرد که مناطق بحرانی را با اطمینان آماری بالا مشخص می‌کند؛ مناطقی که در آن‌ها تجمع حوادث بیش‌ازحد انتظار تصادفی است. خروجی بصری تحلیل نقاط داغ معمولاً به‌صورت یک نقشه رنگی است که به‌وضوح Hot Spots (اغلب بارنگ‌های قرمز)، Cold Spots (اغلب بارنگ‌های آبی) و مناطقی که ازنظر آماری معنی‌دار نیستند (معمولاً خاکستری یا بی‌رنگ) را نشان می‌دهد. این نقشه‌ها ابزاری حیاتی برای تصمیم‌گیرندگان و مدیران ریسک محسوب می‌شوند، زیرا امکان اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه، بازرسی‌های میدانی و تخصیص منابع را فراهم می‌آورند. با شناسایی دقیق نواحی پرخطر، می‌توان استراتژی‌های هدفمندتری برای کاهش آسیب‌پذیری خطوط لوله در برابر مخاطرات زمین‌شناختی و سایر عوامل مخرب، مانند اجرای پروژه‌های مقاوم‌سازی، برنامه‌ریزی برای پایش‌های مداوم یا به‌روزرسانی زیرساخت‌ها، اتخاذ کرد.

جدول ۱- خلاصه گزارش خرابی خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان

Table 1. Summary report of failures in oil and gas pipeline lines in the Masjed Soleiman region

Common Fluid	Freq.	Other Fluids Causing Failure	Freq.	Pipe Material	Main Cause	Type of Failure	Total Frequency
crude oil	63	Live crude oil	35	*PVC*	Perforation	Corrosion	98
crude oil	29	Rich gas	6	*PVC*	Unauthorized cutting	Third-party interference	35
crude oil	4	Rich gas	1	*PVC*	Thinning	Crack	5

مدل‌سازی دقیق ریسک شکستگی خطوط لوله، به‌ویژه در مناطقی با فعالیت زمین‌شناسی بالا، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تلفیق آن با روش‌های آماری پیشرفته، می‌توان به ارزیابی جامع‌تری از این ریسک دست‌یافت. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، تحلیل همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی است. با تلفیق لایه‌های مربوط به خطوط لوله و نقشه‌های مخاطرات زمین‌شناسی مانند فرونشست، زمین‌لغزش و زلزله، می‌توان مناطقی را که خطوط لوله در معرض بیشترین خطر قرار دارند، شناسایی کرد. برای تعیین اهمیت نسبی هر عامل در ایجاد ریسک، از روش سلسله‌مراتب تحلیلی (AHP) استفاده می‌شود. همچنین، روش‌های آماری مانند رگرسیون لجستیک به مدل‌سازی رابطه بین عوامل مختلف و احتمال وقوع شکستگی کمک می‌کنند. تحلیل همپوشانی خطوط لوله با مناطق مستعد زمین‌لغزش، به کمک دستور Spatial Join در نرم‌افزارهای GIS، امکان شناسایی دقیق‌تر بخش‌هایی از خطوط لوله را که در معرض خطر مستقیم قرار دارند، فراهم می‌کند. این تحلیل به برنامه‌ریزی برای اقدامات پیشگیرانه مانند تقویت خطوط لوله، نظارت دقیق‌تر و حتی جابجایی خطوط لوله در صورت لزوم کمک شایانی می‌کند. ارزیابی ریسک ناشی از زلزله نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به‌شدت زمین‌لرزه‌های پیش‌بینی‌شده برای هر منطقه، می‌توان سناریوهای مختلفی را شبیه‌سازی کرده و میزان خسارت وارده به خطوط لوله را برآورد نمود. نتایج این تحلیل‌ها به برنامه‌ریزی برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، طراحی مسیرهای جایگزین و تدوین برنامه‌های مدیریت بحران در صورت وقوع زلزله کمک می‌کند. برای ارزیابی جامع‌تر ریسک، پهنه‌های مخاطره‌آمیز منطقه از همپوشانی فرونشست، زمین‌لغزش و زمین‌لرزه تهیه می‌شود. در این تحقیق، از روش Fuzzy Overlay برای تلفیق این سه لایه استفاده‌شده است. با استفاده از توابع عضویت فازی، لایه‌ها استانداردسازی شده و سپس با روش گامای فازی تلفیق می‌شوند. لایه حاصل به کلاس‌های مختلف خطر تقسیم‌بندی شده و با لایه خطوط لوله همپوشانی می‌یابد. این نقشه‌های ریسک به تصمیم‌گیران کمک می‌کنند تا مناطق بحرانی را شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه مناسب را انجام دهند. درنهایت، این روش‌ها و تحلیل‌ها به ایجاد درک عمیق‌تری از ریسک‌های مرتبط با خطوط لوله کمک کرده و امکان برنامه‌ریزی بهتر برای مدیریت و نگهداری این زیرساخت‌های

حیاتی را فراهم می‌آورند. تحلیل نقاط داغ که مبتنی بر آمارگر Getis-Ord Gi* است، یک روش تحلیل فضایی است که برای شناسایی خوشه‌های آماری معنی‌دار از مقادیر بالا (نقاط داغ) یا مقادیر پایین (نقاط سرد) در یک مجموعه داده فضایی به کار می‌رود. این تحلیل به شما کمک می‌کند تا مناطق دارای تجمع غیر تصادفی از یک ویژگی خاص را در یک نقشه شناسایی کنید. فرمول این آمارگر به‌صورت محلی عمل می‌کند، به این معنی که برای هر ویژگی (نقطه یا پلی گون) در مجموعه داده، یک مقدار Gi* محاسبه می‌شود که میزان خوشه‌بندی آن ویژگی و همسایگانش را نسبت به میانگین کل داده‌ها ارزیابی می‌کند. فرمول عمومی برای آمارگر Gi* به شرح زیر است:

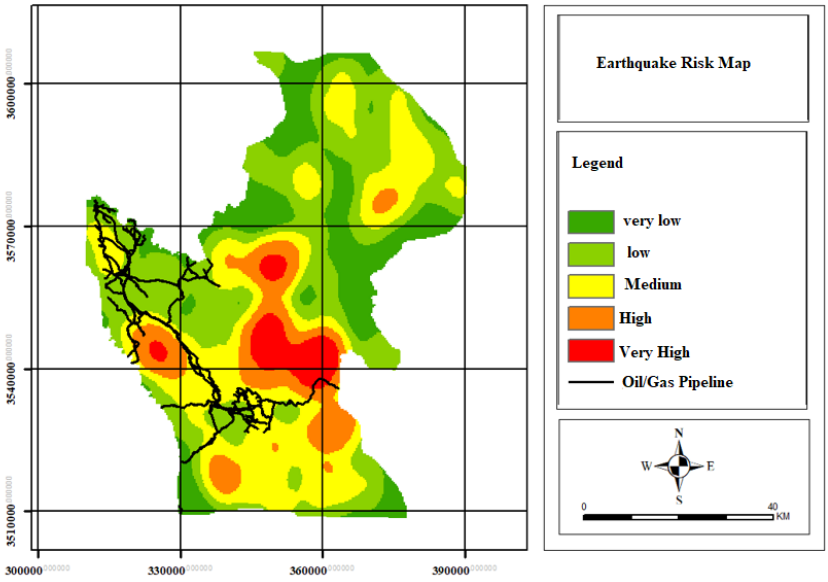
رابطه ۱

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}}{S\sqrt{\frac{[n\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^{n} w_{i,j})^2]}{n-1}}}$$

که در آن:

- Gi* مقدار Z-score استانداردشده برای ویژگی i است. این مقدار، آمارگر Gi* را نرمال‌سازی می‌کند تا بتوان آن را با توزیع نرمال استاندارد (Z-distribution) مقایسه کرد و معنی‌داری آماری آن را سنجید.
- xj: مقدار ویژگی (مثلاً تعداد خرابی‌ها، شدت زمین‌لرزه، یا هر مقدار وزنی دیگر) برای ویژگی j.
- N: تعداد کل ویژگی‌های در مجموعه داده است.
- S: انحراف معیار مقادیر ویژگی (xj) برای کل مجموعه داده است.
- wi,j: مجموع وزن‌های مکانی برای همه ویژگی‌های همسایه ویژگی iاست.

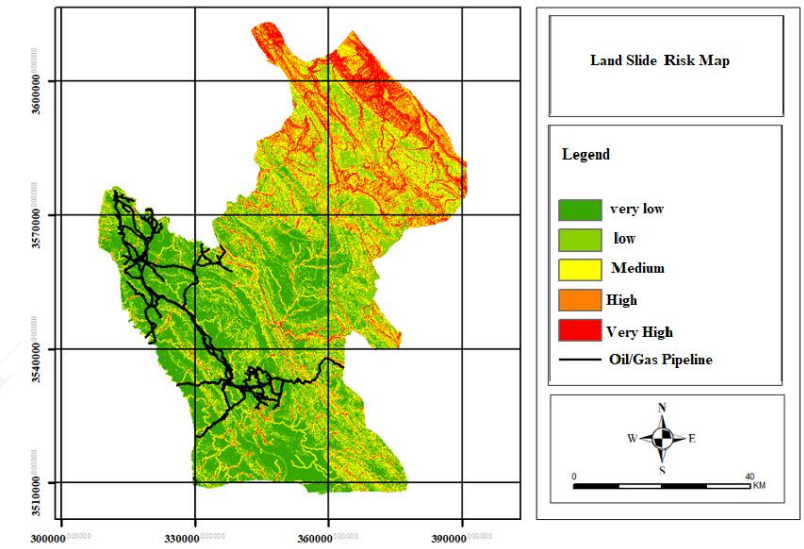
پس از محاسبه Gi* برای هر ویژگی، این مقادیر به Z-scoreتبدیل می‌شوند که امکان ارزیابی معنی‌داری آماری را فراهم می‌کنند. مقادیر Z-score بالا و مثبت، به همراه مقادیر p-valueکوچک (مثلاً کمتر از ۰.۰۱ یا ۰.۰۵)، نشان‌دهنده خوشه‌های آماری معنی‌دار از مقادیر بالا (Hot Spots) هستند. به‌عبارت‌دیگر، احتمال اینکه این تجمع بالای مقادیر به‌صورت تصادفی رخداده باشد، بسیار پایین است. هرچه Z-score بالاتر باشد و p-value کوچک‌تر، اعتماد به اینکه آن منطقه یک Hot Spotواقعی است، بیشتر خواهد بود. در مقابل، مقادیر Z-score پایین و منفی، همراه با مقادیر p-value کوچک، نشان‌دهنده خوشه‌های آماری معنی‌دار از مقادیر پایین (Cold Spots) هستند. این مناطق نشان‌دهنده تمرکز غیر تصادفی از مقادیر کم ویژگی موردنظر هستند. مناطقی که Z-score آن‌ها نزدیک به صفر است یا p-value آن‌ها بالا است، ازنظر آماری معنی‌دار تلقی نمی‌شوند و توزیع ویژگی در آن‌ها تصادفی در نظر گرفته می‌شود. این تحلیل به‌ویژه در مدیریت خطرات، مانند شناسایی نواحی بحرانی خرابی خطوط لوله، نقش حیاتی ایفا می‌کند.



شکل ۲- جانمایی خطوط انتقال نفت و گاز بر پهنه‌های ریسک زمین‌لرزه در منطقه موردمطالعه

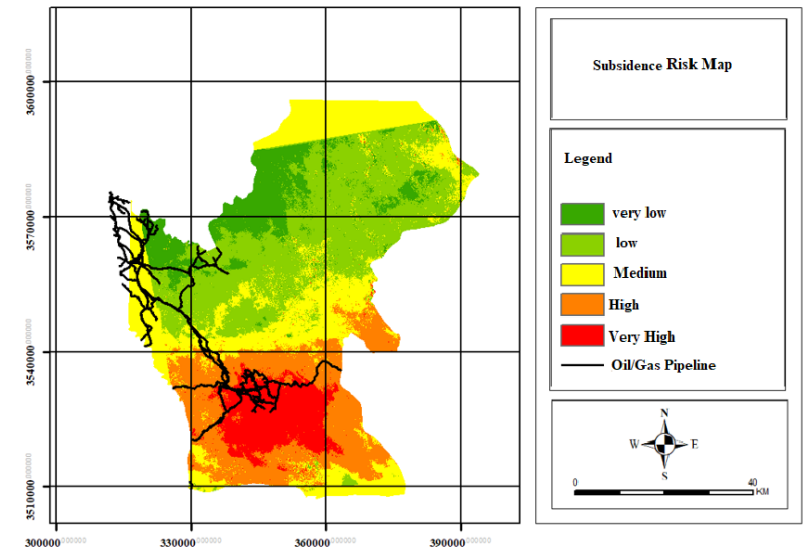
Figure 2 - Location of oil and gas pipelines on earthquake risk zones in the study area

تصویر ارائه‌شده، یک نقشه پهنه‌بندی ریسک زمین‌لرزه بر خطوط لوله در منطقه مسجدسلیمان را نمایش می‌دهد. در این نقشه، با استفاده از رنگ‌های مختلف، مناطق با ریسک پایین (سبز)، متوسط (زرد)، بالا (نارنجی) و بسیار بالا (قرمز) ازنظر احتمال وقوع زمین‌لرزه مشخص‌شده‌اند. خطوط سیاه‌رنگ نیز نشان‌دهنده مسیر خطوط لوله هستند.



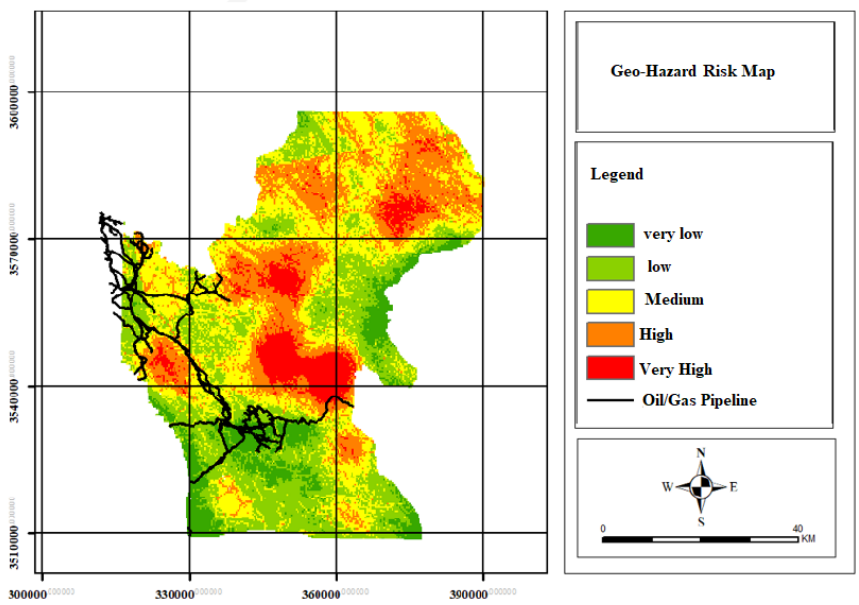
شکل ۳- جانمایی خطوط انتقال نفت و گاز بر پهنه‌های ریسک زمین‌لغزش در منطقه موردمطالعه
Fig. 3. Location of oil and gas pipelines on landslide risk zones in the study area

نقشه ارائه‌شده، یک تصویر بسیار گویا از ارتباط بین مخاطرات طبیعی (زمین‌لغزش) و زیرساخت‌های حیاتی (خطوط لوله نفت و گاز) ارائه می‌دهد. مناطق مختلف بارنگ‌های متفاوت نشان‌دهنده سطح خطر زمین‌لغزش هستند. با مقایسه محل خطوط لوله و مناطق با خطر بالای زمین‌لغزش، می‌توان به‌راحتی مناطقی را شناسایی کرد که هم‌زمان در معرض خطر زمین‌لغزش و آسیب به خطوط لوله قرار دارند.



شکل ۴- جانمایی خطوط انتقال نفت و گاز بر پهنه‌های ریسک فرونشست در منطقه موردمطالعه
Fig. 4. Location of oil and gas pipelines on subsidence risk zones in the study area

این نقشه، تصویری واضح از ارتباط بین پدیده فرونشست زمین و خطوط لوله نفت و گاز ارائه می‌دهد. مناطق با رنگ قرمز، بالاترین میزان فرونشست را تجربه می‌کنند، درحالی‌که مناطق بارنگ سبز، کمترین میزان فرونشست را دارند. خطوط سیاه‌رنگ نیز نشان‌دهنده مسیر عبور خطوط لوله نفت و گاز هستند. با مقایسه این دولایه اطلاعاتی (فرونشست و خطوط لوله)، می‌توان مناطقی را که هم‌زمان با خطر فرونشست زمین و خطر آسیب به خطوط لوله مواجه هستند، شناسایی کرد.



شکل ۵- جانمایی خطوط انتقال نفت و گاز بر پهنه‌های ریسک مخاطرات زمین‌شناختی در منطقه موردمطالعه
Fig. 5. Location of oil and gas pipelines on geological hazard risk zones in the study area

نقشه ارائه‌شده، تصویری واضح از توزیع مکانی خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان در کنار پهنه‌بندی مخاطرات زمین‌شناسی ارائه می‌دهد. بسیاری از خطوط لوله از مناطقی عبور می‌کنند که ازنظر زمین‌شناسی دارای پتانسیل بالایی برای وقوع مخاطرات مانند لغزش، رانش و زمین‌لرزه هستند. این همپوشانی خطوط لوله با مناطق پرخطر، احتمال بروز حوادث و خسارات ناشی از این مخاطرات را افزایش می‌دهد.

۴- بحث و بررسی

تحقیق حاضر به بررسی وضعیت خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان که با پدیده مخاطرات زمین‌شناختی مواجه است، می‌پردازد. این مطالعه باهدف ارزیابی ریسک ناشی از فرونشست، زمین‌لغزش و زمین‌لرزه بر روی زیرساخت‌های حیاتی منطقه انجام‌شده است؛ که مشروح این نتایج در ذیل موردبررسی قرارگرفته است.

بر اساس این تحقیق، تعداد ۲۸۱ خط لوله که در آن‌ها ۱۳۸ مورد خرابی گزارش گردیده موردبررسی قرارگرفته است.

۴-۱- مهم‌ترین علل خرابی‌ها

عمده‌ترین علت خرابی‌ها، خوردگی با ۹۸ مورد و به عبارتی ۷۱ درصد از کل موارد بوده است. این نشان‌دهنده اهمیت بسیار بالای کنترل و پیشگیری از خوردگی در خطوط لوله است. نوع دوم خرابی که به‌طور قابل‌توجهی رخ‌داده است، دخالت شخص ثالث با ۳۵ مورد و به عبارتی ۲۵.۴ درصد از کل موارد بوده است. این نشان می‌دهد که عوامل انسانی و فعالیت‌های خارجی نیز نقش مهمی در ایجاد خرابی در خطوط لوله دارند. همچنین ترک با ۵ مورد و به عبارتی ۳.۶ درصد از کل موارد، از دیگر علل قابل‌توجه خرابی بوده است.

۴-۲- مهم‌ترین انواع خرابی‌ها

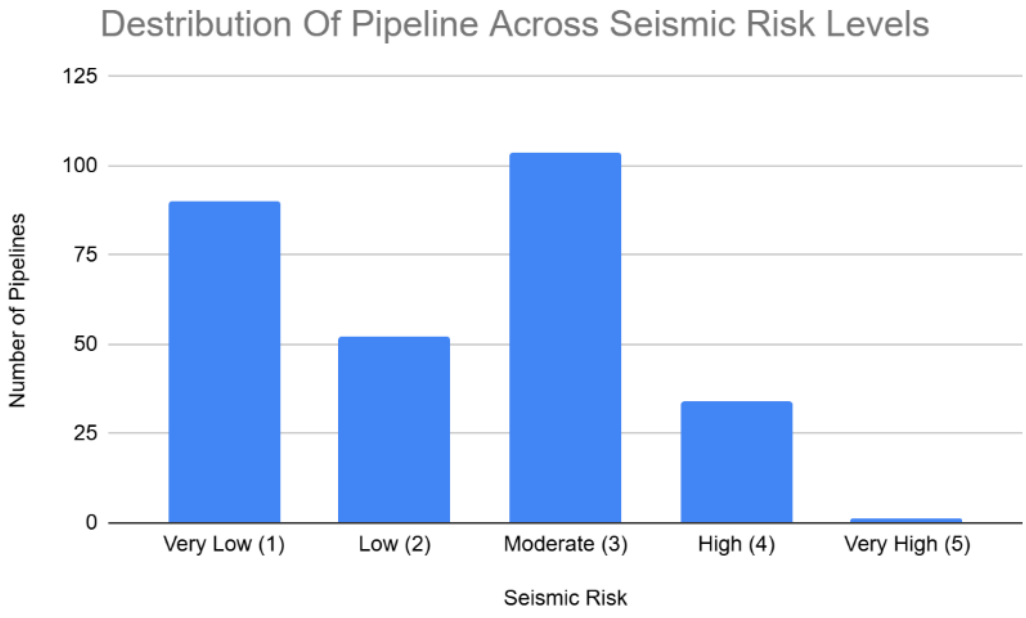
ازنظر نوع خرابی، سوراخ شدگی با ۹۸ مورد و به عبارتی ۷۱ درصد از کل موارد، شایع‌ترین نوع خرابی بوده است. این نشان می‌دهد که بسیاری از خرابی‌ها به نشت سیال منجر شده‌اند. برش غیرمجاز با ۳۵ مورد و به عبارتی ۲۵.۴ درصد از کل موارد، از دیگر انواع خرابی‌های گزارش‌شده است. نازک شدن با ۵ مورد

و به عبارتی ۳.۶ درصد از کل موارد، از دیگر انواع خرابی‌ها بوده است.

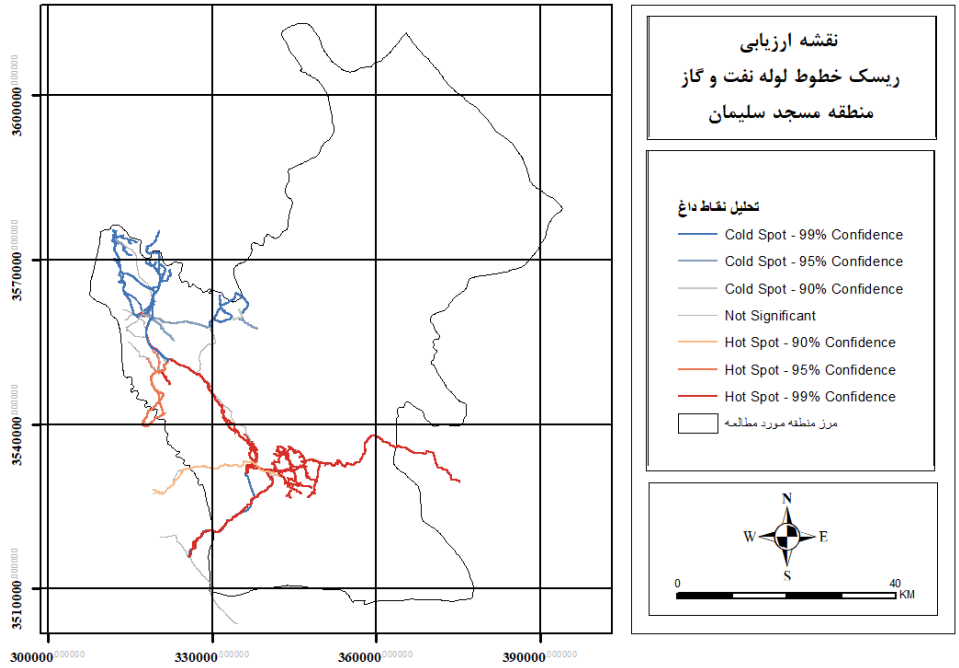
۴-۳- مهم‌ترین سیالات

نفت خام با ۶۳ مورد و به عبارتی ۴۵.۷ درصد از کل موارد، شایع‌ترین سیال حمل شده در خطوط لوله بوده است. نفت خام زنده + گاز غنی با ۳۵ مورد و گاز غنی با ۶ مورد، از دیگر سیالات مهم حمل شده در خطوط لوله دارای گزارش خرابی هستند.

بررسی دقیق‌تر داده‌های مرتبط با خرابی خطوط لوله در منطقه موردمطالعه، ابعاد مهمی از عوامل مؤثر بر آسیب‌ها را آشکار می‌سازد. از میان ۲۸۱ خط لوله توزیع‌شده، تنها یک خط لوله به‌طور مستقیم در مناطق با ریسک بسیار بالای زمین‌لرزه قرارگرفته است که خوشبختانه تاکنون هیچ گزارش رسمی مبنی بر خرابی آن دریافت نشده است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده اثربخشی اقدامات پیشگیرانه و نظارتی خاص برای این خط لوله باشد. بخش قابل‌توجهی از خطوط لوله (۹۱.۲ درصد) در مناطقی با خطر لرزه‌ای پایین تا متوسط واقع‌شده‌اند؛ شامل ۴۲ درصد در مناطق با خطر لرزه‌ای بسیار پایین و پایین، ۳۶.۹ درصد در مناطق با خطر لرزه‌ای متوسط و تنها ۱۲.۳ درصد (۳۴ خط لوله) در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا. نکته حائز اهمیت این است که از ۳۴ خط لوله واقع در مناطق پرخطر لرزه‌ای، تنها دو گزارش خرابی دریافت شده که هر دو نیز ناشی از دخالت شخص ثالث بوده‌اند و ارتباط مستقیمی با فعالیت‌های لرزه‌ای منطقه ندارند. این الگو نشان می‌دهد که عمده خرابی‌های گزارش‌شده در منطقه موردمطالعه، ناشی از عوامل غیر زمین‌شناختی بوده‌اند. این نتیجه‌گیری با توجه به فراوانی خرابی‌ها در مناطق با پتانسیل لرزه‌ای کم و بسیار کم تقویت می‌شود؛ در این مناطق تاکنون ۴۷ مورد خرابی ثبت‌شده است که از این میان ۲۸ مورد به شکستگی خطوط لوله نفت و گاز، ۷ مورد به دخالت شخص ثالث و ۱۲ مورد نیز به خوردگی و نازک شدن لوله‌ها اختصاص دارد. این آمار در مقایسه با تعداد بسیار ناچیز خرابی‌های مرتبط (و نه لزوماً مستقیم) با عوامل زمین‌شناختی در مناطق پرخطر، به‌وضوح نشان می‌دهد که عوامل انسانی (مانند دخالت شخص ثالث) و عوامل محیطی (مانند خوردگی) نقش غالب و تعیین‌کننده‌ای در وقوع خرابی‌های خطوط لوله در منطقه مسجدسلیمان ایفا می‌کنند. این یافته بر ضرورت تمرکز بر راهکارهای پیشگیری و مدیریت این دسته از عوامل در کنار پایش خطرات زمین‌شناختی تأکید می‌کند.



شکل ۶- نمودار وضعیت پراکندگی خطوط لوله در مناطق با پتانسیل زمین‌لرزه
Fig. 6. Diagram of pipeline distribution in areas with earthquake potential

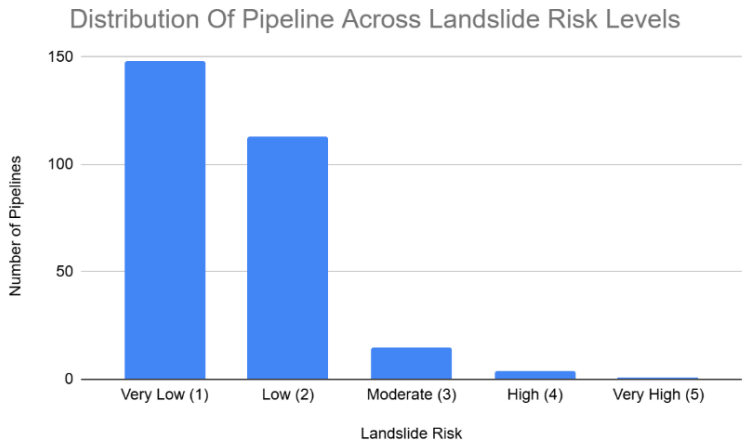


شکل ۷- تحلیل نقاط داغ شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در ارتباط با پتانسیل زمین‌لرزه در منطقه

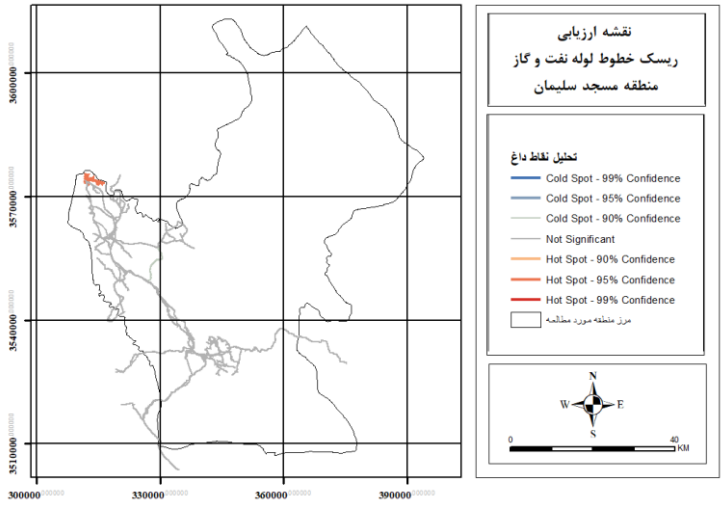
Fig 7: Hot Spot Analysis of Oil and Gas Pipeline Fractures in relation to Earthquake Potential in the region

شکل ۷، نقشه ارائه‌شده تحلیل نقاط داغ (Hot Spot Analysis) ریسک خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان را نشان می‌دهد که با توجه به توضیحات شما، احتمالاً این تحلیل ریسک زمین‌لرزه را نیز در نظر گرفته است. این نقشه مناطق با خوشه‌بندی آماری معنی‌دار از ریسک بالا (نقاط داغ) و پایین (نقاط سرد) را بر اساس سطوح اطمینان مختلف (۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪) به تصویر می‌کشد. خطوط لوله مشخص‌شده بارنگ‌های قرمز و نارنجی، نقاط داغ را نشان می‌دهند که به معنای تجمع آماری بالای ریسک در این مناطق است؛ به‌ویژه رنگ قرمز (۹۹٪ اطمینان) که بالاترین سطح اطمینان را در خوشه‌بندی ریسک بالا دارد، مناطق بسیار حساسی را برجسته می‌کند. در مقابل، رنگ‌های آبی نقاط سرد را نشان می‌دهند که دارای تجمع آماری ریسک پایین هستند. خطوط خاکستری نیز مناطقی را نشان می‌دهند که ازنظر آماری، خوشه معنی‌داری از ریسک بالا یا پایین ندارند. این نقشه ابزار مهمی برای شناسایی بصری و اولویت‌بندی بخش‌های حیاتی شبکه خطوط لوله است که در معرض ریسک قابل‌توجهی (مانند آسیب‌پذیری در برابر زمین‌لرزه) قرار دارند و به برنامه‌ریزی هدفمند برای اقدامات کاهشی، نظارت و مدیریت ریسک در این منطقه کمک می‌کند.

در ادامه بر اساس داده‌های ارائه‌شده، تنها یک مورد خط لوله در مناطق با پتانسیل بسیار بالای زمین‌لغزش قرار دارد که تاکنون گزارشی مبنی بر خرابی این خط لوله دریافت نشده است. همچنین ۴ خط لوله در مناطق با پتانسیل بالای زمین‌لغزش واقع‌شده است که تاکنون سه گزارش خرابی مربوط به شکستگی براثر نازک شدن در خطوط لوله نفت دریافت شده است. همچنین تعداد ۱۵ خط لوله در مناطق با پتانسیل زمین‌لغزش متوسط واقع‌شده است که تاکنون ۶ گزارش دریافت شده که ۵ مورد مربوط به شکستگی براثر نازک شدن و یک مورد دخالت شخص ثالث موردبررسی قرارگرفته است. همچنین در کل ۱۸۹ خط لوله با تعداد ۸۶ گزارش دریافت شده در مناطق با پتانسیل کم و بسیار کم زمین‌لغزش واقع‌شده است.



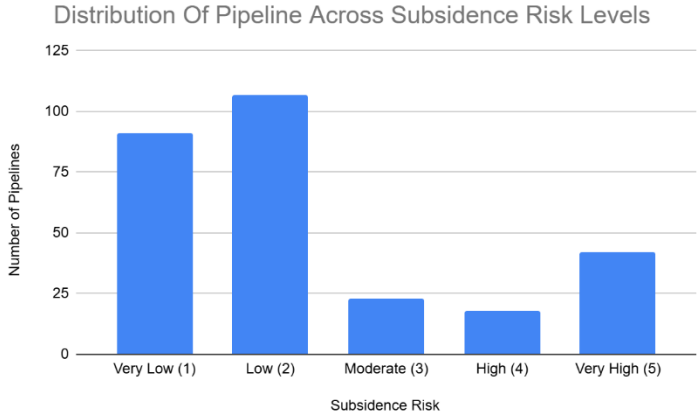
شکل ۸- نمودار وضعیت پراکندگی خطوط لوله در مناطق با پتانسیل زمین‌لغزش
Fig. 7. Diagram of pipeline distribution in areas with landslide potential



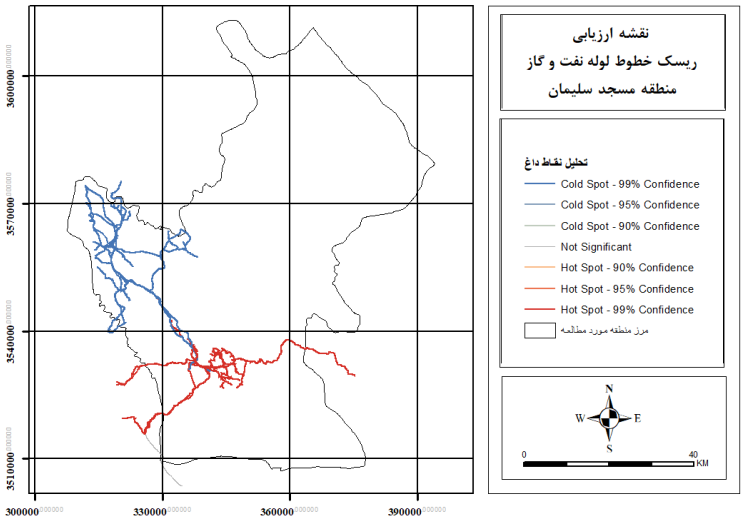
شکل ۹- تحلیل نقاط داغ شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در ارتباط با پتانسیل زمین‌لغزش
Fig 9: Hot Spot Analysis of Oil and Gas Pipeline Fractures in relation to Landslide

نقشه ارزیابی ریسک خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان، با استفاده از تحلیل نقاط داغ، مناطق با خوشه‌بندی آماری معنی‌دار از مقادیر ریسک بالا (نقاط داغ) و پایین (نقاط سرد) را مشخص کرده است. نقاط داغ که بارنگ‌های قرمز (۹۹٪ اطمینان)، نارنجی (۹۵٪ اطمینان) و نارنجی روشن (۹۰٪ اطمینان) نشان داده‌شده‌اند، مناطقی هستند که دارای تجمع آماری قابل‌توجهی از ریسک بالا (چه زمین‌لغزش، فعالیت لرزه‌ای، یا سایر عوامل) هستند و به‌ویژه ناحیه کوچک قرمزرنگ در شمال غربی شبکه خطوط لوله نیازمند توجه فوری و اقدامات کاهشی است. در مقابل، نقاط سرد بارنگ‌های آبی تیره (۹۹٪ اطمینان)، آبی متوسط (۹۵٪ اطمینان) و آبی روشن (۹۰٪ اطمینان) مشخص‌شده‌اند که تجمع آماری ریسک پایین را نشان می‌دهند و خطوط خاکستری نیز مناطقی هستند که ازنظر آماری خوشه معنی‌داری از ریسک بالا یا پایین ندارند. به‌طورکلی، این نقشه با دقت بخش‌های حیاتی شبکه خطوط لوله را که در معرض ریسک قابل‌توجهی قرار دارند، شناسایی می‌کند و راهنمای مهمی برای اولویت‌بندی بررسی‌های دقیق‌تر، نظارت و اجرای اقدامات ایمنی جهت حفظ یکپارچگی خطوط لوله و جلوگیری از حوادث احتمالی ارائه می‌دهد.

از سویی دیگر با بررسی خطر فرونشست و تأثیر آن بر خطوط لوله نفت و گاز، اکثریت‌قریب‌به‌اتفاق خرابی‌های خطوط لوله (۴۲ مورد از مجموع ۱۳۸ مورد) در مناطقی با ریسک بسیار بالای فرونشست رخداده است. در این خصوص ۱۸ مورد از کل خطوط لوله نفت و گاز در مناطق با ریسک فرونشست بالا واقع‌شده‌اند که از این میان ۸ مورد خرابی (۳ مورد شکستگی خطوط نفت و گاز، ۳ مورد دخالت شخص ثالث و ۲ مورد خوردگی و نازک شدگی) گزارش‌شده است. این نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین میزان ریسک فرونشست و احتمال وقوع خرابی در خطوط لوله وجود دارد. به‌عبارت‌دیگر، هرچه ریسک فرونشست در یک منطقه بالاتر باشد، احتمال رخداد خرابی در خطوط لوله آن منطقه نیز بیشتر است. علاوه بر این، خوردگی به‌عنوان اصلی‌ترین علت خرابی خطوط لوله در تمام سطوح ریسک فرونشست شناسایی‌شده است. این نشان می‌دهد که خوردگی یک چالش اساسی در صنعت خطوط لوله است و نیاز به اقدامات پیشگیرانه جدی دارد. عوامل دیگری مانند دخالت شخص ثالث و ترک نیز در بروز خرابی‌ها نقش داشته‌اند، اما سهم آن‌ها نسبت به خوردگی کمتر بوده است. با توجه به این داده‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که برای کاهش تعداد خرابی‌های خطوط لوله، نیاز به اتخاذ تدابیر جامع و ترکیبی است که شامل اقدامات پیشگیرانه برای مقابله با خوردگی، بهبود ایمنی و کاهش دخالت‌های انسانی باشد.



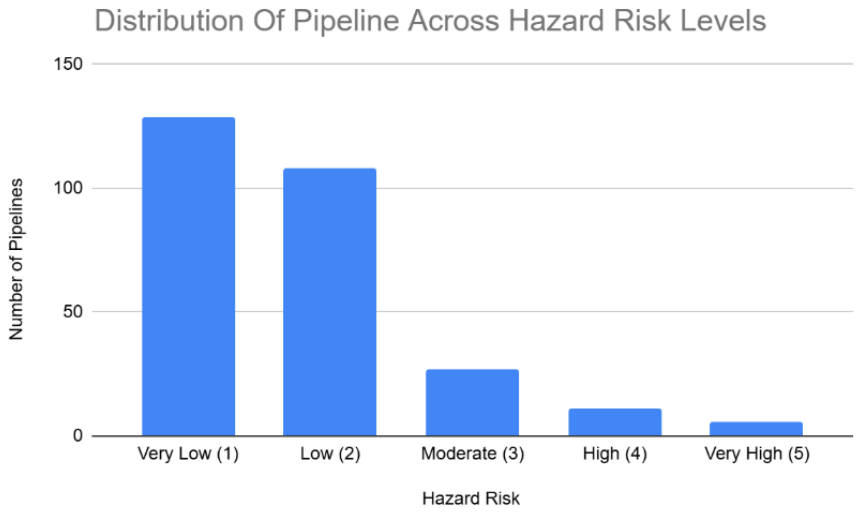
شکل ۱۰- نمودار وضعیت پراکندگی خطوط لوله در مناطق با پتانسیل فرونشست
Fig. 8. Diagram of pipeline distribution in areas with subsidence potential



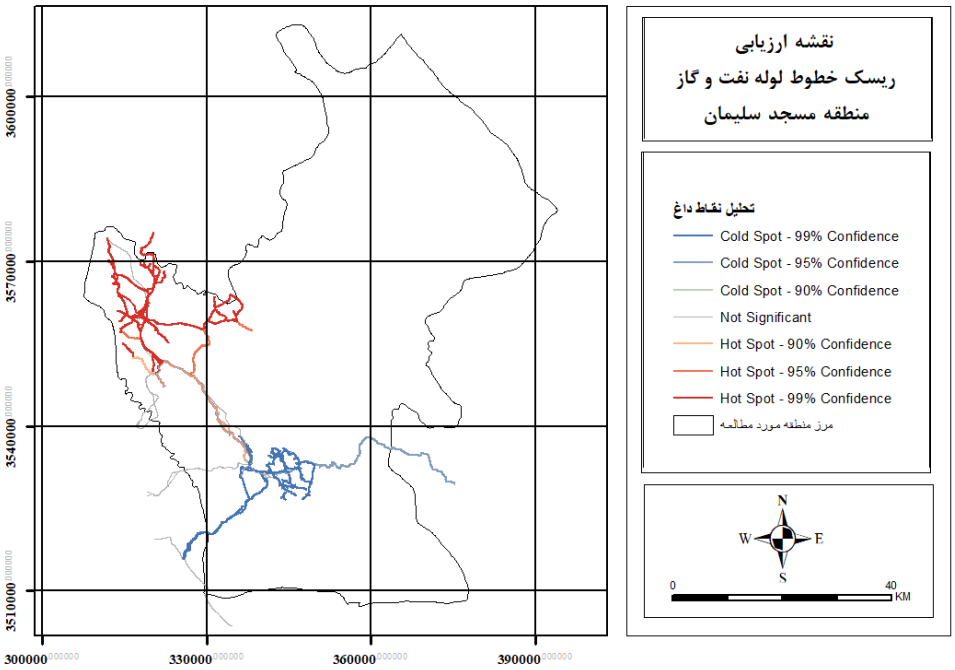
شکل ۱۱- تحلیل نقاط داغ شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در ارتباط با فرونشست زمین
Fig 7: Hot Spot Analysis of Oil and Gas Pipeline Fractures in relation to Subsidence

نقشه ارزیابی ریسک خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان، با استفاده از تحلیل نقاط داغ (Hot Spot Analysis)، مناطق با خوشه‌بندی آماری معنی‌دار از ریسک بالا (نقاط داغ) و پایین (نقاط سرد) را بر اساس سطوح اطمینان مختلف نشان می‌دهد. بخش‌های قرمزرنگ خطوط لوله، نمایانگر «نقاط داغ با ٪۹۹ اطمینان» هستند که به معنای وجود خوشه‌های آماری بااهمیت بسیار بالا از ریسک (احتمالاً ناشی از فرونشست) در این نواحی است که ازجمله می‌توان به خوشه‌ای در جنوب شرقی و خوشه‌ای دیگر در بخش میانی نقشه اشاره کرد. مناطق نارنجی‌رنگ بیانگر «نقاط داغ با ٪۹۵ اطمینان» و «نقاط داغ با ٪۹۰ اطمینان» هستند که اگرچه از اطمینان آماری کمتری نسبت به نقاط قرمز برخوردارند، اما همچنان نشان‌دهنده خوشه‌های ریسک بالا هستند. در مقابل، بخش‌های آبی‌رنگ (آبی تیره برای ٪۹۹ اطمینان، آبی متوسط برای ٪۹۵ اطمینان و آبی روشن برای ٪۹۰ اطمینان) «نقاط سرد» را نشان می‌دهند که دارای خوشه‌های آماری معنی‌دار از ریسک پایین هستند و اغلب در شمال غربی منطقه موردمطالعه قرارگرفته‌اند. خطوط خاکستری نیز «مناطق غیر معنی‌دار» را نشان می‌دهند که در آن‌ها خوشه‌بندی آماری معناداری از ریسک بالا یا پایین مشاهده نمی‌شود. این تحلیل امکان شناسایی دقیق و هدفمند مناطق پرخطر در شبکه خطوط لوله را فراهم می‌کند که این امر برای برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه و مدیریتی ضروری است.

درنهایت نمودار ارائه‌شده در شکل ۹ ارتباط بین ریسک مخاطرات زمین‌شناسی و وقوع خرابی در خطوط لوله را نشان می‌دهد. جدول ارائه‌شده ارتباط بین ریسک مخاطرات زمین‌شناسی و وقوع خرابی در خطوط لوله را نشان می‌دهد. درواقع از مجموع ۲۸۱ خط لوله در منطقه موردمطالعه، ۶ خط لوله در مناطق با ریسک بسیار زیاد شناسایی شدند که از این میان ۳ گزارش خرابی شکستگی براثر خوردگی و یک گزارش مبنی بر دخالت شخص ثالث بر روی خطوط لوله نفت خام دریافت شده است. همچنین تعداد ۲۷ مورد از خطوط لوله نفت و گاز در مناطق با ریسک بالای مخاطرات منطقه شناسایی‌شده است که از این میان ۱۱ فقره گزارش مبنی بر خرابی خطوط لوله (۳ فقره خورندگی خطوط نفت، ۶ فقره دخالت شخص ثالث در خطوط نفت و ۲ فقره شکستگی در اثر نازک شدن خطوط لوله) دریافت شده است. همچنین تعداد ۴۶ گزارش در مناطق با پتانسیل کم و ۵۸ گزارش در مناطق با پتانسیل بسیار پایین مخاطرات زمین‌شناختی دریافت شده است. علاوه بر این، جدول نشان می‌دهد که خوردگی به‌عنوان اصلی‌ترین علت خرابی خطوط لوله در تمام سطوح ریسک مخاطرات زمین‌شناسی شناسایی‌شده است. این نشان می‌دهد که خوردگی یک چالش اساسی در صنعت خطوط لوله است و نیاز به اقدامات پیشگیرانه جدی دارد. عوامل دیگری مانند دخالت شخص ثالث و ترک نیز در بروز خرابی‌ها نقش داشته‌اند، اما سهم آن‌ها نسبت به خوردگی کمتر بوده است.



شکل ۱۲- نمودار وضعیت پتانسیل خطر زمین‌شناسی
Fig 12: Geological Hazard Potential Status Diagram



شکل ۱۳- تحلیل نقاط داغ شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در ارتباط با مخاطرات محیطی
Fig 13: Hot Spot Analysis of Oil and Gas Pipeline Fractures in relation to Hazard

تحلیل نقاط داغ در پهنه‌های مخاطره‌آمیز زیستی و اثرات آن بر شکستگی خطوط لوله نفت و گاز، با استفاده از درصد اطمینان، خوشه‌بندی آماری مناطق با ریسک بالا (نقاط داغ) و ریسک پایین (نقاط سرد) در شکل ۱۱، مشخص گردید. بر اساس نقشه، بخش‌های قرمزرنگ خطوط لوله نمایانگر «نقاط داغ با ۹۹٪ اطمینان» هستند که نشان‌دهنده خوشه‌های آماری بسیار قوی از شکستگی خطوط لوله در ارتباط با مخاطرات محیطی در این نواحی است، به‌خصوص در بخش‌های شمالی و شمال غربی و همچنین یک خوشه بزرگ‌تر در بخش مرکزی و غربی نقشه. مناطق نارنجی‌رنگ بیانگر «نقاط داغ با ۹۵٪ اطمینان» و «نقاط داغ با ۹۰٪ اطمینان» هستند که اگرچه از سطح اطمینان آماری کمتری برخوردارند، اما همچنان نشان‌دهنده خوشه‌های ریسک بالا هستند. در مقابل، بخش‌های آبی‌رنگ (با درصدهای اطمینان ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪) «نقاط سرد» را نشان می‌دهند که دارای خوشه‌های آماری معنی‌دار از ریسک پایین‌تر شکستگی خطوط لوله هستند که عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی نقشه متمرکزشده‌اند. خطوط خاکستری نیز «مناطق غیر معنی‌دار» را نشان می‌دهند که در آن‌ها خوشه‌بندی آماری معناداری از ریسک بالا یا پایین مشاهده نمی‌شود. این تحلیل امکان شناسایی دقیق و اولویت‌بندی بخش‌های حساس شبکه خطوط لوله را فراهم می‌آورد که این امر برای برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه، مدیریت ریسک و کاهش آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات محیطی و جلوگیری از شکستگی‌های احتمالی ضروری است.

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده بر روی‌داده‌های ارائه‌شده، می‌توانیم به این نتیجه برسیم که خرابی خطوط لوله در ارتباط با مخاطرات زمین‌شناسی به‌ویژه فرونشست، با افزایش پتانسیل مخاطره زمین‌شناختی، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. عوامل متعددی ازجمله خوردگی، دخالت شخص ثالث و ترک در این خرابی‌ها نقش دارند؛ اما آنچه به‌وضوح مشخص است، ارتباط مستقیم بین سطح مخاطرات زمین‌شناسی و احتمال وقوع خرابی است. برای کاهش این خرابی‌ها، نیاز به اتخاذ رویکردی جامع و چندجانبه است. این رویکرد شامل بهبود طراحی خطوط لوله، انتخاب مواد مقاوم‌تر، انجام بازرسی‌های دوره‌ای، مدیریت ریسک مخاطرات زمین‌شناسی، افزایش آگاهی عمومی و آموزش کارکنان و به‌روزرسانی استانداردهای ایمنی است. همچنین، سرمایه‌گذاری در تحقیقات و توسعه فناوری‌های نوین برای پایش و نظارت بر خطوط لوله می‌تواند به بهبود عملکرد و ایمنی آن‌ها کمک کند.

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف بنیادی ارزیابی تأثیر مخاطرات زمین‌شناختی بر پایداری و ایمنی خطوط لوله انتقال نفت و گاز در منطقه استراتژیک مسجدسلیمان که از کهن‌ترین مناطق نفت‌خیز ایران به شمار می‌رود، با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم اطلاعات مکانی (GIS) صورت پذیرفت. این مطالعه تلاش کرد تا با یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی مربوط به خطوط لوله و لایه‌های مخاطرات زمین‌شناسی شامل فرونشست، زمین‌لغزش و لرزه‌خیزی، ارتباط فضایی و همبستگی بین این پدیده‌ها و وقوع خرابی‌ها را به‌صورت کمی تحلیل و ارزیابی کند. نتایج حاصل از این تحلیل جامع، بنیان محکمی برای ارائه راهکارهای مدیریتی و پیشگیرانه فراهم آورد.

یافته‌های کلیدی پژوهش نشان داد که اگرچه مخاطرات زمین‌شناختی، به‌ویژه پدیده فرونشست زمین، پتانسیل قابل‌توجهی برای افزایش خرابی خطوط لوله در مناطق با ریسک بالا دارند و این افزایش به‌طور چشمگیری نسبت به مناطق با ریسک پایین‌تر این مخاطرات مشهود است، اما در تحلیل کلی، عمده‌ترین علل خرابی‌های گزارش‌شده در منطقه موردمطالعه، ناشی از عوامل غیر زمین‌شناختی بوده‌اند. این نکته بیانگر آن است که در کنار اهمیت پایش و مدیریت ریسک‌های ژئولوژیکی، توجه به سایر عوامل مخرب نیز امری حیاتی است از میان عوامل غیر زمین‌شناختی شناسایی‌شده، خوردگی به‌عنوان عامل اصلی خرابی‌ها با سهمی معادل ۷۱ درصد (۹۸ مورد) از کل موارد، برجسته‌ترین نقش را ایفا می‌کند. این درصد بالا به‌وضوح بر لزوم سرمایه‌گذاری بیشتر در برنامه‌های جامع کنترل و پیشگیری از خوردگی، ازجمله بهبود پوشش‌های محافظتی، سیستم‌های حفاظت کاتدی و نظارت مستمر بر وضعیت خوردگی خطوط لوله، تأکید دارد. دومین عامل مهم، دخالت شخص ثالث بود که مسئولیت ۲۵.۴ درصد (۳۵ مورد) از خرابی‌ها را بر عهده داشت. این آمار نشان‌دهنده اهمیت بسیار بالای افزایش آگاهی عمومی، اعمال قوانین سخت‌گیرانه‌تر و نظارت فعال‌تر بر فعالیت‌های ساخت‌وساز و حفاری در مجاورت خطوط لوله است. عامل دیگر شناسایی‌شده در این پژوهش، ترک بود که با سهم ۳.۶ درصد (۵ مورد) از کل موارد، هرچند کمتر از دو عامل پیشین، اما همچنان به‌عنوان یک علت قابل‌توجه خرابی مطرح می‌شود که می‌تواند ناشی از خستگی مواد، نقص‌های ساختاری یا تنش‌های بیش‌ازحد عملیاتی باشد. مجموع این عوامل غیر زمین‌شناختی، تصویر واضحی از ماهیت غالب خرابی‌ها در منطقه ارائه می‌دهند.

بررسی تأثیر مخاطرات لرزه‌ای نیز نتایج جالبی را به همراه داشت. باوجوداینکه تنها یک خط لوله از ۲۸۱ خط لوله توزیع‌شده مستقیماً در منطقه با ریسک بسیار بالای زمین‌لرزه قرار دارد و خوشبختانه تاکنون هیچ گزارش رسمی مبنی بر خرابی آن دریافت نشده و همچنین از ۳۴ خط لوله واقع در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا، تنها دو گزارش خرابی (توسط شخص ثالث) دریافت شده، این یافته‌ها مؤید آن است که زلزله در این منطقه، عامل غالب واصلی بروز شکستگی‌های گسترده در خطوط لوله نبوده است. این موضوع نشان می‌دهد که اقدامات مهندسی و ایمنی در برابر زلزله، حداقل برای این دسته از خطوط، اثربخش بوده‌اند. جالب‌توجه است که در مقابل، در مناطق با پتانسیل لرزه‌ای کم و بسیار کم (که اکثریت‌قریب‌به‌اتفاق خطوط لوله یعنی ۹۱.۲ درصد در آن قرار دارند)، ۴۷ مورد خرابی گزارش‌شده است. از این تعداد، ۲۸ مورد شکستگی بر روی خطوط لوله نفت و گاز بوده، ۷ مورد در اثر دخالت شخص ثالث و ۱۲ مورد نیز مربوط به خوردگی و نازک شدن لوله‌ها بوده است. این اختلاف فاحش در آمار خرابی‌ها بین مناطق پرخطر و کم‌خطر لرزه‌ای، بیش‌ازپیش بر فرضیه غلبه عوامل غیر زمین‌شناختی در وقوع خرابی‌های کلی تأکید می‌کند.

پژوهش حاضر باهدف ارزیابی جامع خطر شکستگی خطوط لوله نفت و گاز تحت تأثیر مخاطرات زمین‌شناختی در منطقه مسجدسلیمان، رویکردی نوین را در مقایسه با مطالعات پیشین ارائه می‌دهد. در این راستا، مقایسه‌ای بامطالعه Lee و همکاران (۲۰۲۳) که درزمینه‌ی ارزیابی ریسک زیرساخت‌های خط لوله انجام‌شده، ضروری به نظر می‌رسد. هرچند هر دو پژوهش از قابلیت‌های سیستم اطلاعات مکانی (GIS) برای تحلیل مکانی استفاده می‌کنند، تفاوت‌های کلیدی در گستره مخاطرات، نوع زیرساخت موردبررسی و هدف نهایی تحلیل، نوآوری و تمایز پژوهش حاضر را آشکار می‌سازد. درحالی‌که مطالعه Lee و همکاران (۲۰۲۳) عمدتاً بر روی فرونشست زمین و تأثیر آن بر خطوط لوله فاضلاب تمرکز دارد و عوامل مؤثر بر فرونشست را با استفاده از ویژگی‌های داخلی لوله‌ها بررسی می‌کند، پژوهش حاضر گستره وسیع‌تری از مخاطرات زمین‌شناختی شامل فرونشست، زمین‌لغزش، لرزه‌خیزی و سوابق شکستگی خطوط

لوله را به‌صورت هم‌زمان و چندمعیاره در محیط GIS تلفیق می‌نماید. این رویکرد جامع‌تر و یکپارچه‌سازی هم‌زمان چهار عامل خطر، از نقاط قوت بارز پژوهش کنونی است که فراتر از تمرکز تک عاملی بر فرونشست یا سایر مخاطرات عمل می‌کند. همچنین، به‌کارگیری روش همپوشانی فازی (Fuzzy Overlay) در پژوهش حاضر، امکان کمی سازی و ادغام دقیق‌تر عدم قطعیت‌ها در داده‌های مکانی و عوامل خطر را فراهم می‌آورد که در مطالعات پیشین کمتر به این سطح از جزئیات و جامعیت در ارزیابی خطر پرداخته‌شده است. علاوه بر این، تمرکز پژوهش حاضر بر خطوط لوله حیاتی نفت و گاز در یک منطقه قدیمی و استراتژیک مانند مسجدسلیمان با پیچیدگی‌های ژئولوژیکی خاص خود، ارزش کاربردی و اهمیت نتایج را در حوزه مدیریت زیرساخت‌های انرژی دوچندان می‌کند. نتایج مطالعه Lee و همکاران (۲۰۲۳) عمدتاً به شناسایی مناطق پرخطر فرونشست مرتبط با خطوط فاضلاب شهری و درنهایت، به برنامه‌ریزی برای نگهداری و بهبود این زیرساخت‌ها در محیط‌های شهری کمک می‌کند. در مقابل، خروجی اصلی پژوهش حاضر، ارائه یک نقشه پهنه‌بندی ریسک جامع و دقیق برای شکستگی خطوط لوله نفت و گاز است. این نقشه، ابزاری حیاتی برای تصمیم‌گیری‌های عملیاتی در مدیریت ایمنی و برنامه‌ریزی استراتژیک زیرساخت‌های حیاتی نفتی در منطقه مسجدسلیمان محسوب می‌شود. قابلیت این پژوهش در شناسایی دقیق ارتباط مکانی بین نقاط شکستگی و نواحی تحت تأثیر مخاطرات زمین‌شناختی، با استفاده از ابزارهای تحلیل همپوشانی فضایی و فراوانی نسبی، امکان اولویت‌بندی مناطق آسیب‌پذیر و تخصیص بهینه منابع برای اقدامات پیشگیرانه را فراهم می‌سازد. این تمایز در نوع زیرساخت (نفت و گاز در مقابل فاضلاب)، بستر کاربرد (منطقه نفتی در مقابل شهری) و رویکرد چندعاملی در ارزیابی خطر، بر نوآوری و اهمیت عملی پژوهش حاضر در مقایسه بامطالعه ذکرشده، تأکید می‌ورزد.

درنهایت، این پژوهش بر لزوم اتخاذ یک رویکرد جامع و چندجانبه برای کاهش و مدیریت مؤثر خرابی‌های خطوط لوله تأکید می‌کند. این رویکرد باید فراتر از صرفاً مدیریت مخاطرات زمین‌شناختی باشد و شامل بهبود طراحی خطوط لوله برای مقاومت بیشتر در برابر عوامل مختلف، انتخاب مواد مقاوم‌تر در برابر خوردگی و تنش‌های مکانیکی و اجرای دقیق برنامه‌های بازرسی‌های دوره‌ای و نگهداری پیشگیرانه باشد. علاوه بر جنبه‌های فنی، مدیریت ریسک مخاطرات زمین‌شناختی با استفاده از پایش مستمر و به‌روزرسانی نقشه‌های خطر و همچنین افزایش آگاهی عمومی در جامعه و آموزش مستمر کارکنان در خصوص پروتکل‌های ایمنی و پایداری خطوط لوله، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌روزرسانی مداوم استانداردها و مقررات ایمنی نیز برای همگام شدن با پیشرفت‌های علمی و چالش‌های جدید محیطی ضروری است. همچنین، سرمایه‌گذاری راهبردی در تحقیقات و توسعه فناوری‌های نوین برای پایش و نظارت لحظه‌ای بر وضعیت خطوط لوله، مانند استفاده از حسگرهای پیشرفته، سیستم‌های هوشمند هشدار زودهنگام و تحلیل داده‌های بزرگ (Big Data)، می‌تواند به بهبود چشمگیر عملکرد، افزایش ایمنی و کاهش احتمال بروز حوادث در این تأسیسات حیاتی کمک شایانی نماید. این رویکرد جامع، ضامن پایداری و امنیت شبکه انتقال نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان خواهد بود.

مراجع

Abedini, M., Nazari Gazik, Z., 2024. Analysis of land subsidence rate and its effects on geomorphosites of the tourist city of Shandiz, Khorasan Razavi. Quantitative Geomorphological Research 12(4), 171-192. https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.423463.1462

Akbarian, M., Gharodi Tali, M., 2023. Evaluation of land subsidence in Asadabad Plain, Hamedan and its hazards. Environmental Hazards Management, 10 (4), 277-290. https://doi.org/10.22059/jhsci.2024.370217.807

Alzarooni, E., Ali, T., Atabay, S., Yilmaz, A.G., Mortula, M.M., Fattah, K.P., Khan, Z., 2023. GIS-based identification of locations in water distribution networks vulnerable to leakage. Applied Sciences 13(8), 4692. https://doi.org/10.3390/app13084692

Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P., Soltabayeva, S., Brui, H., Lozynskyi, V., Cherniaiev, O., 2023. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. Scientific Reports, 13(1), 19327. https://doi.org/10.1038/s41598-023-46814-5

Cui, J.Y., Liu, F.Y., Geng, Y.W., Pu, C., Miao, M., 2023. Numerical simulation of ground subsidence factors resulting from unpressurized pipeline rupture below the water table. Applied Sciences 13(17), 9536. https://doi.org/10.3390/app13179536

Dash, S.R., Sehgal, S., Nair, G., 2015. Seismic vulnerability of pipelines in India. In V. Matsagar (Ed.). Proceedings of the Structural Engineering Convention. Indian Institute of Technology Delhi, p. 2949-2959.

Fanni, Z., Ghasemi, S.M., 2018. Zoning and spatial analysis of the susceptibility to four environmental hazards: Landslide, flood, earthquake, and subsidence (Case study: 22 districts of Tehran). Geographical Information Sepehr Journal 27(108), 77-89. https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.34621

He, B., Bai, M., Shi, H., Li, X., Qi, Y., Li, Y., 2021. Risk assessment of pipeline engineering geological disaster based on GIS and WOE-GA-BP models. Applied Sciences, 11(21), 9919. https://doi.org/10.3390/app11219919

Hong, L., Zhijing, L., Xiumei, M., 2023. Spatial data mining based on urban underground pipe networks. 4th International Conference on Computers and Artificial Intelligence Technology (CAIT), p. 295-304. https://doi.org/10.1109/CAIT59945.2023.10469172

Karbalayi, P., Mousavi, S. S., Azizi, M., Saadat, N., Alaboud, A., Azami, M., 2023. An advanced method for detecting buried pressurized pipeline rupture below the water table. Applied Sciences, 13 (17), 9536. https://doi.org/10.3390/app13179536

Karimi, M., Ghanbari, A., Amiri, S., 2013. Measuring the risk of urban settlements to land subsidence (Case study: District 18 of Tehran). Spatial Planning, 3 (1), 37-56. https://doi.org/20.1001.1.22287485.1392.3.1.3.0

Lee, S., Kang, J., Kim, J., 2023. A study on factors influencing ground subsidence and a risk analysis method using the attributes of sewer pipes. Applied Sciences, 13(17), 9714. https://doi.org/10.3390/app13179714

Li, H., 2024. Research and application of spatial data mining based on water supply network data warehouse. In Proceedings of the 2024 Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area International Conference on Digital Economy and Artificial Intelligence. Association for Computing Machinery. P. 398-404. https://doi.org/10.1145/3675417.3675483

Masoumi, M., Ghahremani, H., 2023. Quantitative risk assessment of oil leakage from the 35 km oil pipeline from Mansouri to Booster Ahvaz using quantitative risk analysis model and OLGA dynamic software. Modeling in Engineering 21(75), 181-191. https://doi.org/10.22075/jme.2023.28775.2353

Payab, M., Sayaf, H., 2022. The impact of subsidence on infrastructure and solutions to control these effects. Tehran, Iran: Research Center of the Islamic Consultative Assembly.

Rafiei, J., Sedighi, M., 2016. Determining the rate of subsidence based on radar interferometry (InSAR) in the Naft-Shahr oil field. Paper presented at the National Geomatics Conference, Iran.

Sial, A.H., Rashdi, S.Y.S., Khan, A.H., 2021. Comparative analysis of data visualization libraries Matplotlib and Seaborn in Python. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 10(1), 277-281. https://doi.org/10.30534/ijatcse/2021/391012021