

Research Article

## Risk assessment of oil and gas pipeline routes using GIS and FAHP technique (a case study of Marun oil field)

Mostafa Kabolizadeh<sup>1\*</sup>, Yasmin Elhaei<sup>1</sup>, Shahin Mohamadi<sup>1</sup>

1- Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

**Keywords:** *Oil and gas pipeline; Fossil Fuels; Fuzzy hierarchical analysis process; Sustainable Development, Maroon oilfield.*

### 1-Introduction

Traditional methodologies for selecting optimal routes for oil and gas pipelines primarily rely on technical and financial criteria, often overlooking the significant environmental and social implications of such projects. In countries rich in oil and gas reserves, the transportation and export of these resources through pipelines is of paramount importance, as the economic stability of these nations heavily relies on the effective operation of these infrastructures. Among various methods for transporting large quantities of oil and gas, pipelines are widely recognized for their reliability. Therefore, optimizing pipeline routes can enhance both management efficiency and safety. Numerous studies have highlighted the adverse environmental impacts of pipeline construction, which can disrupt ecosystems, affect local amenities, and deteriorate human quality of life (Shojaei, 2011). Recent advancements in risk assessment methodologies, such as the application of Artificial Neural Networks (ANN) and Fuzzy Inference Systems (FIS) (Raeiagh et al., 2020), as well as the integration of Bayesian Networks (BN) and Analytic Hierarchy Process (AHP) (Yu et al., 2023), signify a shift towards more sophisticated techniques for evaluating pipeline risks. Nonetheless, limited research has addressed the determination of optimal pipeline routes with an emphasis on sustainable development and regional context. This study aims to create a risk zoning assessment of pipelines within the Maroon oil region using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). This assessment focuses on the consequences of incidents involving the leakage of flammable, non-toxic gases and unstable liquid petroleum products, analyzed through both technical and environmental criteria.

### 2-Material and methods

This study employs a risk zoning model tailored for pipeline risk assessment. Initially, key factors influencing pipeline risk levels during incidents, specifically relating to the leakage of flammable, non-toxic gases and unstable liquid petroleum products, were identified through literature review and consultations with pipeline inspection experts. Following the identification of relevant criteria and sub-criteria, data was gathered from various sources. Subsequently, the weights of the criteria and sub-criteria were determined using expert opinions and pairwise comparisons through the FAHP method. The fuzzification of these layers was facilitated using fuzzy membership functions within the ArcMap 10.5 software environment. The weights assigned to each criterion were then applied to their respective fuzzy layers. For the final zoning, the information layers were integrated based on the environmental and technical criteria pertinent to each incident type (i.e., gas or liquid oil leaks).

\* Corresponding author: m.kabolizade@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.44928.2413

Received: 2023-10-08

Accepted: 2024-02-25

### 3-Results and discussions

In the risk zoning analysis of the Maroon oil region, the assessment was conducted separately for environmental criteria concerning gas leakage and the leakage of liquid petroleum products. Following this initial zoning, the existing pipeline routes were overlaid onto the maps. The findings indicate that, in the majority of the assessed areas, the pipeline route primarily traverses regions classified as low or very low risk. However, a notable exception exists in the southern section of the field, where the pipeline aligns closely with areas categorized as very high risk for both gas and liquid leakage. These high-risk zones are predominantly characterized by agricultural lands, waterway networks, and loose sandy soils.

A subsequent analysis based on technical and facility criteria further revealed that the current pipeline route exhibits a high degree of alignment with locations identified as low and very low risk. This zoning assessment demonstrated comparable risk levels for events related to both gas leakage and liquid oil leakage.

To generate a comprehensive risk assessment, the final risk maps were developed by integrating the prior zoning analyses for both environmental and technical criteria. The resultant maps provide a combined view of risk levels for gas leakage and liquid petroleum product spills within the Maroon oil region.

Specifically, the mapping results (as shown in Fig. 1a for liquid petroleum product leakage) indicate that the current pipeline route traverses areas classified as high and very high risk predominantly in the southern segment, covering a distance of 52.28 km, which constitutes approximately 30% of the total pipeline length in this oil field. These high-risk zones correlate with existing infrastructural elements such as major roads and bridges, in addition to natural features like agricultural lands and flowing sand areas. Conversely, the mapping of gas leakage (Fig. 1b) highlights that a total of 4.4 km of the pipeline route, representing 1.76% of the overall pipeline length, intersects regions classified as high risk.

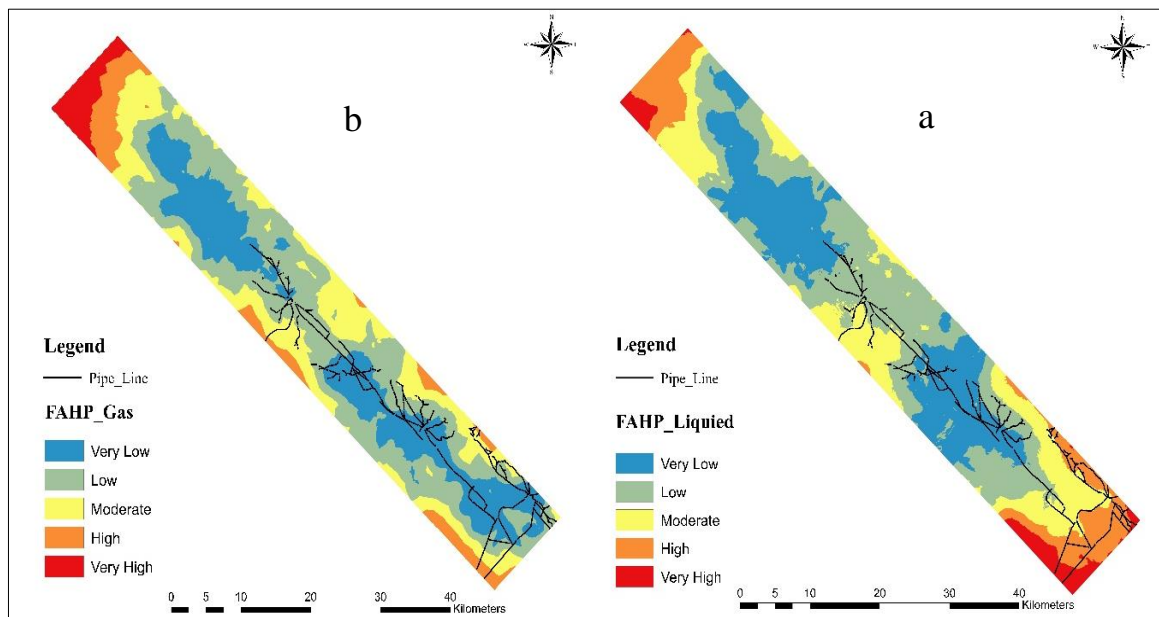


Fig.1. Risk map for the Maroon oil region in terms of the occurrence of (a) oil spill and (b) gas leak.

### 4-Conclusion

The findings of this study underscore the necessity of incorporating environmental factors into the decision-making process surrounding pipeline design and routing, particularly to promote sustainable development. Despite the evident risks identified in the current pipeline design, which largely disregards environmental considerations, the application of the FAHP method offers a balanced approach, integrating both objective and subjective data. This dual-data utilization enriches the decision-making framework, enabling stakeholders to articulate their assessments using linguistic variables. The derived risk zoning maps not only provide a clearer understanding of the route's risk profiles but also facilitate the development of

targeted strategies to mitigate potential accidents. This study advocates for the adoption of such methodologies as viable alternatives to traditional field inspections, particularly given the practical challenges of accessibility and cost associated with some pipeline routes. Future pipeline design efforts should prioritize eco-friendly alignment to minimize environmental and economic impacts aligned with sustainable development objectives.

## 5-References

- Malinowska, A., Cui, X., Salimi, E., Ryszard, H., 2021. A Novel Fuzzy Approach to Gas Pipeline Risk Assessment Under Influence of Ground Movement. *International Journal of Coal Science & Technology*.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s40789-022-00511-2>
- Raeihagh, H., Behbahaninia, A., Macki Aleagha, M., 2020. Risk assessment of sour gas inter-phase onshore pipeline using ANN and Fuzzy inference system case study: The South Pars Gas field.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104238>.
- Shojaei, p., Mohamadi, A., 2011. determining gas pipeline optimum route by using integrated FAHP/GRA model, *Australian Journal of Business and Management Research* 1(3),75-88.  
<http://dx.doi.org/10.52283/NSWRCA.AJBMR.20110103A07>.
- Yu, Q., Hou, L., Li, Y., Chai, C., Yang, K., Liu, J. 2023. Pipeline Failure Assessment Based on Fuzzy Bayesian Network and AHP. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* Volume 14 - Issue 1 - February 2023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000698).

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Kabolizadeh, M., Elhaei, Y., Mohamadi, S., 2024. Risk assessment of oil and gas pipeline routes using GIS and FAHP technique (a case study of Marun oil field). *Adv. Appl. Geol.* 537-555.

DOI: 10.22055/aag.2024.44928.2413

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_19069.html](https://aag.scu.ac.ir/article_19069.html)

©2024 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

## تحلیل خطرپذیری مسیر خطوط لوله نفت و گاز با استفاده از GIS و تکنیک FAHP

### ( مطالعه‌ی موردی میدان نفتی مارون )

مصطفی کابلی زاده

دانشیار، گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

یاسمین الهایی

دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

شاهین محمدی

دکتری سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

\* [m.kabolizade@scu.ac.ir](mailto:m.kabolizade@scu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶

#### چکیده

امروزه سهم زیادی از منابع انرژی دنیا را نفت و گاز تشکیل می‌دهد. حمل و نقل نفت خام و محصولات آن به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که از این میان بیش‌ترین سهم انتقال، بر عهده خطوط لوله‌ی انتقال است. با توجه به گستردگی خطوط در مناطق مختلف تأسیساتی و یا حتی مسکونی و همچنین پتانسیل بالای آسیب‌پذیری، ایمنی خطوط لوله و رعایت اصول مدیریت خطرپذیری آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش باهدف پهنه‌بندی خطرپذیری مسیر خطوط لوله با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FUZZY-AHP) و تلفیق اطلاعات سنجش از دور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در منطقه میدان نفتی مارون استان خوزستان انجام شده است. در پهنه‌بندی خطرپذیری مسیر خطوط لوله، پس از شناسایی لایه‌های مؤثر (تأسیسات/ فنی و محیطی) وزن هر کدام از معیارها و زیر معیارها با استفاده از نظرات کارشناسان و روش تحلیل سلسله‌مراتبی - فازی محاسبه گردید. نقشه‌ی خطرپذیری خطوط لوله یک‌بار از منظر فنی و بار دیگر از منظر عوامل محیطی برای پیامد ناشی از نشت گاز و پیامد ناشی از نشت سیالات مایع نفتی پهنه‌بندی گردید. سپس نقشه‌های نهایی به دست آمده از هر دو لایه محیطی و فنی به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری نهایی مسیر خطوط لوله باهم تلفیق شدند. در نهایت تلفیق نقشه‌های خطرپذیری نهایی (محصولات نفتی مایع و گاز) و مسیر خطوط لوله نفت و گاز موجود در منطقه نفتی مارون نشان داد که در قسمت جنوب و جنوب شرقی منطقه مسیر خطوط لوله در صورت وقوع حوادث ناشی از نشت محصولات نفتی مایع می‌تواند خطرپذیرتر از سایر مناطق باشد. همچنین میزان خطرپذیری ناشی از نشت گاز نسبت به نشت محصولات مایع نفتی در این مناطق بسیار بیشتر بوده است و حدود ۶۰ درصد از مسیر خط لوله میدان نفتی، معادل مسیری به طول حدود ۱۴۹/۲۴ کیلومتر را شامل می‌شود. این مسیر برای رخداد نشت مایع نفتی معادل ۸۸ کیلومتر است که ۳۵/۳۰ درصد از مسیر کلی خطوط لوله را شامل می‌شود. طبق نقشه کاربری منطقه این مسیر بیشتر از زمین‌های کشاورزی، جاده‌های اصلی و پل‌ها می‌گذرد. در نتیجه بااطلاع از این مسئله پیامدهای ناشی از حوادث با مدیریت صحیح این موضوع می‌تواند قابل کنترل باشد.

**واژه‌های کلیدی:** خطوط لوله نفت و گاز، سوخت فسیلی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، توسعه پایدار، میدان نفتی مارون.

#### ۱- مقدمه

کشورها به شدت به عملکرد صحیح خطوط لوله بستگی دارد. برای انتقال حجم عظیمی از نفت و گاز، راه‌های مختلفی وجود دارد که خطوط لوله از جمله راه‌های قابل اطمینان در این زمینه هستند. بنابراین مدیریت مؤثر و افزایش میزان ایمنی این مسیرها با ترسیم مسیر بهینه امکان‌پذیر است. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که احداث این خطوط لوله بر محیط زیست، تأسیسات، مناطق مسکونی و در نهایت کیفیت

در رویکرد سنتی صرفاً از اصول فنی و مالی برای انتخاب مسیر بهینه خط لوله نفت و گاز استفاده می‌شود، در حالی که اجرای این پروژه‌ها تأثیر زیادی بر محیط زیست و مناطق مسکونی دارد. یکی از مهم‌ترین پروژه‌هایی که در هر کشوری (به ویژه کشورهای که ذخایر عمده نفت و گاز دارند) اهمیت زیادی دارد، انتقال و صادرات نفت و گاز از طریق خط لوله است. اقتصاد این

سیستم استنتاج فازی (FIS)، برای ارزیابی خطر حامل‌های گاز طبیعی مایع در حین بارگیری/تخلیه در پایانه‌ها نشان داد که می‌توان خطر را به صورت کمی با استفاده از مدل فازی محاسبه کرد (Elsayed, 2009). Markowski و Manan (۲۰۰۹)، از این سیستم بر اساس تحلیل لایه حفاظتی فازی fuzzy (Layer of Protection Analysis (fLOPA))، استفاده کردند. در ارزیابی خطر خط لوله مدرن، محققان تلاش بیشتری برای تغییر مدل‌های قدیمی به مدل‌سازی شبکه عصبی (NNM) به‌ویژه برای خطوط لوله نفت و گاز انجام دادند (Markowski & Mannan, 2009). Han و Weng (۲۰۱۰)، با در نظر گرفتن ارزیابی احتمال حادثه و خطر، از یک روش تحلیل کمی خطر یکپارچه برای خط لوله گاز طبیعی استفاده کردند. Han و Weng (۲۰۱۱)، از روش‌های ارزیابی کمی و کیفی خطر برای شبکه خط لوله گاز طبیعی شهری استفاده کردند، روش کیفی ارائه شده در این مقاله به‌ویژه برای شبکه خط لوله گاز طبیعی شهری مناسب است و روش کمی پیامدهای مختلف حوادث را در نظر می‌گیرد. Shahriar و همکاران (۲۰۱۲)، از یک تحلیل پاپیونی مبتنی بر روش فازی به منظور ارزیابی خطر خطوط لوله نفت و گاز استفاده کردند. آن‌ها عمدتاً ارتباط عوامل مختلف را با وقوع حوادث خط لوله بررسی کردند. Alidoosti و همکاران (۲۰۱۲)، مدل شبکه عصبی (NNM) را برای تحلیل میزان خطر و مدیریت حفاظت از دارایی‌های حیاتی در نظر گرفتند. Jamshidi و همکاران (۲۰۱۳)، یک مدل FIS جدید را با استفاده از الگوریتم ممدانی (Mamdani Algorithm) برای ارزیابی خطر خط لوله توسعه دادند. De Masi و همکاران (۲۰۱۴)، نیز از این مدل برای بررسی خوردگی داخلی خط لوله بر اساس داده‌های واقعی استفاده کردند. همچنین برای خطوط لوله دریایی با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در بروز حوادث از این مدل استفاده شد (El-Abbasy et al., 2014). Aljaroudi و همکاران (۲۰۱۵)، نیز یک ارزیابی یکپارچه مبتنی بر خطر را برای پیش‌بینی خرابی‌ها و پیامدهای خط لوله نفت خام دریایی طراحی کردند. رویکرد ارزیابی خطرپذیری جامع که برای توصیف و کاهش سطح خطرپذیری خط لوله به کار می‌رود ضروری است (Lu et al., 2015). Bonvicini و همکاران (۲۰۱۵)، روشی را ارائه کردند که رویکردی برای ارزیابی کمی خطر زیست‌محیطی به دلیل وجود مسیر خطوط لوله در ساحل ارائه می‌دهد. شاخص‌های

زندگی انسان‌ها تأثیر می‌گذارد، این تأثیرات مخرب شامل از بین بردن جنگل‌ها، مزارع، آب شرب و غیره می‌شود (Shojaei, 2011). بنابراین برای انتخاب مسیر بهینه نیاز به یک مدل یکپارچه وجود دارد که با استفاده از رویکرد توسعه پایدار امکان‌پذیر است. در توسعه پایدار، تحلیل فنی و همچنین تأثیرات زیست‌محیطی و تأثیرات اجتماعی-اقتصادی مورد توجه قرار می‌گیرد. پیامدهایی از جمله نشت گازهای غیر سمی قابل اشتعال و محصولات نفتی مایع ناپایدار و همچنین نشت نفت مایع از یک خط لوله ممکن است در درازمدت منجر به یک حادثه انسانی خطرناک و خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجه شود. با این حال، خطر شکست و پیامدهای ناشی از آن را می‌توان با انتخاب راهکارهای مدیریت خطر کارآمد به سطح قابل قبولی کاهش داد. در این رابطه مطالعات متعددی به جنبه‌های مختلف مربوط به ارزیابی خطر خطوط لوله پرداخته‌اند. (Arnaldos et al., 1998; Cagno et al., 2000; Jo and Ahn, 2002; Sklavounos and Rigas, 2006). در حال حاضر، خطوط لوله به‌طور گسترده برای انتقال نفت و گاز در فواصل طولانی استفاده می‌شود. حمل و نقل نفت و گاز از چاه به مصرف‌کنندگان نهایی در سطح بالایی از کارایی و اثربخشی نیازمند داشتن یک سیستم لوله‌کشی پیچیده است. بر اساس تخصیص خط لوله، پیامدهای خاص فرهنگی، اجتماعی و زیست‌محیطی در آن منطقه خاص به وجود می‌آید (Markowski et al., 2009). عوامل مخربی مانند خوردگی، بلایای طبیعی، عوامل خارجی و نقص در طراحی و بهره‌برداری و همچنین مسیریابی نادرست نقش بسزایی در حوادث ناشی از خط لوله دارند. پیامدهایی از جمله نشت گازهای غیر سمی قابل اشتعال و محصولات نفتی مایع ناپایدار و همچنین نشت نفت مایع از یک خط لوله ممکن است در درازمدت منجر به یک حادثه انسانی خطرناک و خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجه شود. با این حال، خطر شکست خطوط لوله و پیامدهای ناشی از آن را می‌توان با انتخاب راهکارهای مدیریت خطر کارآمد به سطح قابل قبولی کاهش داد. با توجه به این نگرانی‌ها، مطالعات متعددی در مورد خطرات مربوط به خط لوله انجام شده است. برای مثال، Carno و همکاران (۲۰۰۸)، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در تعیین توزیع خرابی‌های شبکه خط لوله گاز شهری در یک رویکرد بیزی قوی (Bayesian Method) با در نظر گرفتن نرخ شکست استفاده کردند. بررسی

که توجه به مسیر کلی خط لوله در یک منطقه نفتی و کاربری‌هایی که این مسیرها را در برمی‌گیرد از جنبه‌های زیست‌محیطی، توسعه پایدار و نیز مدیریت بحران بسیارحایز اهمیت می‌باشند. همچنین، مطالعات پیشین بیشتر از روش‌های AHP انجام می‌شد در حالیکه در چند سال اخیر استفاده از روش فازی در تلفیق با روش AHP توانسته است نتایج رضایت بخش تری را ارائه کند، بنابراین هدف از این مطالعه تحلیل خطرپذیری مسیر خطوط لوله منطقه نفتی مارون با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) است. در واقع این مطالعه با یک رویکرد جدید اقدام به تولید نقشه خطرپذیری کلی و اولیه از منطقه مورد مطالعه می‌کند، به نحوی که با یکسان در نظر گرفتن مشخصات خطوط لوله و نیز مشخص و مجزا نمودن انواع پیامدهای ناشی از حوادث آن، علاوه بر تسهیل‌کنندگی شناخت و اولویت‌بندی خطرات، می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های بعدی نیز مثر ثمر واقع گردد. بدین منظور پهنه‌بندی خطرپذیری مسیر خطوط لوله از منظر پیامدهای ناشی از رخدادهایی از جمله نشت گازهای غیر سمی قابل اشتعال و محصولات نفتی مایع ناپایدار با توجه به دو معیار تأسیسات/فنی و محیطی صورت گرفت.

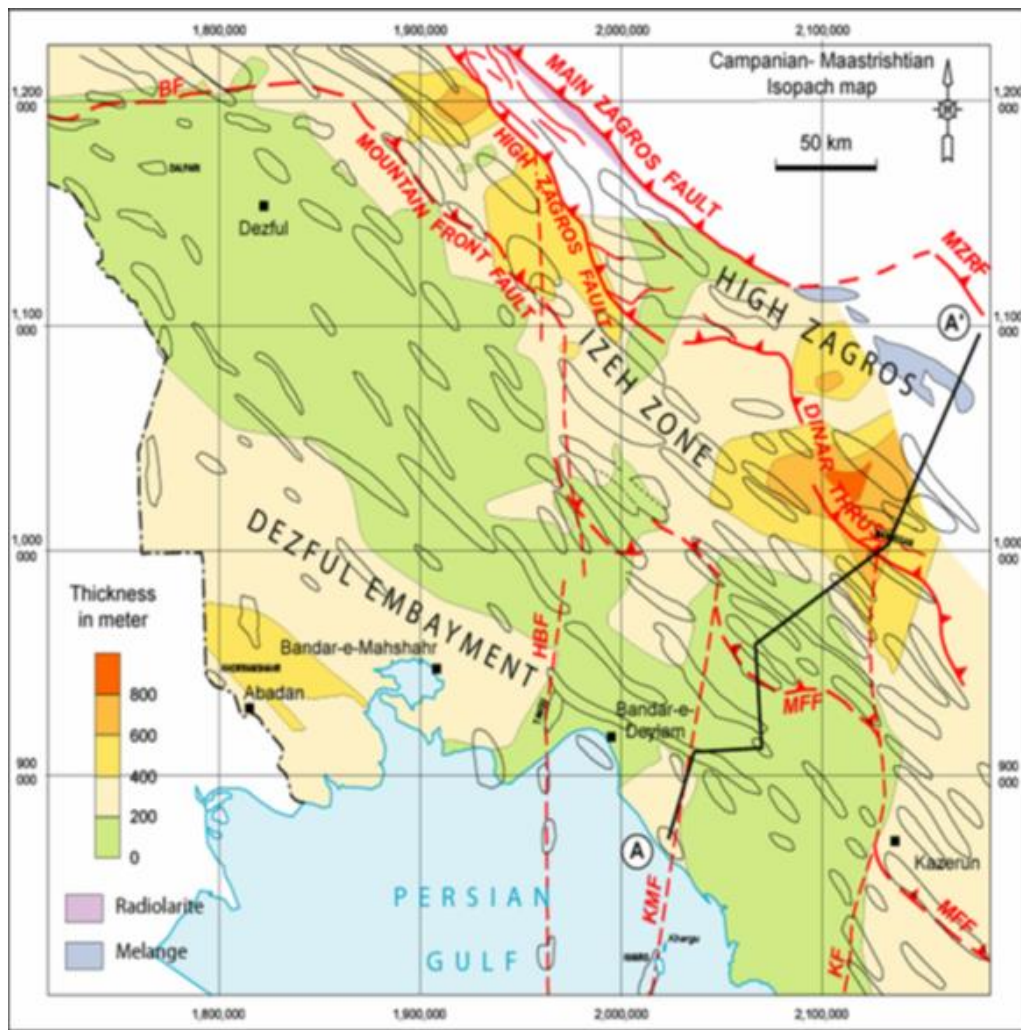
## ۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

### ۲-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

میدان مارون در فرو افتادگی دزفول از کمربند چین خورده زاگرس واقع شده است. رخنمون سطحی این میدان سازند آجاجاری بوده و سازندهای آسماری، گروه‌های بنگستان و خامی، مخازن نفتی موجود در این میدان می‌باشند. میدان مارون دارای ساختمانی تاقدیسی است که با جهت شمال غرب- جنوب شرق بخصوص در قسمت‌های غربی و مرکزی مشخص می‌شود. این میدان یک تاقدیس تقریباً نامتقارن است که دارای شیب ۴۵-۶۰ درجه در یال جنوب غربی و ۲۵ الی ۴۵ درجه در یال شمال شرقی می‌باشد (شکل ۱). میدان نفتی مارون همانند میادین حوضه فروافتاده دزفول دارای جهت شمال غربی - جنوب شرقی است ولی انتهای شرقی آن در اثر خمشی که پس از چین خوردگی صورت گرفته است از جهت اصلی خود خارج شده و در جهت شمال شرقی - جنوب غربی تحت تأثیر نیروهای تراکمی و بالآمدگی‌های احتمالی قدیمی و ادامه آن تا به امروز ایجاد شده است (Qolipour Haqi, 1990).

خسارت بر اساس گسترش آلودگی استنباط از سناریوهای مختلف تخلیه مشخص شد. Dong Yeong Kim (۲۰۱۶)، رابطه‌ای بین ANN و FIS را برای تعیین سطح آب راکتورهای اتمی به منظور پیش‌بینی رویدادهای نامطلوب تلفیق کرد و نتایج ارزشمندی به دست آورد. David Tian (۲۰۱۸)، از الگوریتم ژنتیک (GA) برای تقویت معماری ANN استفاده کرد تا حوادث ناگوار ناشی از انواع دنده‌های خنک کننده در نیروگاه‌های اتمی را پیش‌بینی کند. نتایج آن‌ها دقیق‌تر از راهکارهای گذشته مورد استفاده در نیروگاه‌های اتمی بود. Kosa Golić (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای مدلی بر اساس مجموعه‌های فازی نوع ۲ بمنظور ارزیابی اثرات سیستم‌های خط لوله بر محیط‌زیست ارائه داد. Rangzan و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای به عنوان مسیریابی بهینه آزادراه پل زال- خرم آباد با استفاده از سنجش از دور و GIS و ملحظات زیست محیطی از هشت عامل مؤثر و روش فازی و AHP استانداردسازی شده استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که عوامل مناطق حفاظت شده، چینه شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در انتخاب مسیر جدید دارند. Raeihagh و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ی خود از یک شبکه عصبی مصنوعی Model(NNM) Network Neural و یک سیستم استنتاج فازی (Fuzzy Inference System) برای تهیه مدل جدیدی برای ارزیابی خطر خط لوله با دقت بالاتر استفاده کردند. Malinowska (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ای نشان داد روش مبتنی بر هوش مصنوعی امکان ارزیابی احتمال خطر شکست در بخش‌های مختلف خط لوله گاز را فراهم می‌کند. در این پژوهش از استنتاج فازی ممدانی استفاده شد. Yu و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعه‌ای مدلی را ارائه می‌کنند که به‌طور سیستماتیک شبکه بیزی (BN)، نظریه فازی، و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) را برای تجزیه و تحلیل احتمال شکست خط لوله ادغام می‌کند. مدل پیشنهادی می‌تواند تصمیم‌گیری مؤثری را برای مدیران خط لوله برای جلوگیری و مدیریت خرابی‌های خط لوله فراهم کند.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات فقط از منظر احتمال و پیامد به ارزیابی کمی خطر در خطوط لوله با توجه به مشخصات فیزیکی خطوط لوله پرداخته‌اند و این پارامترها نمی‌توانند به‌تنهایی تمام جنبه‌های خطر در مسیر خطوط لوله‌های نفت و گاز را پوشش دهند. این در حالی است



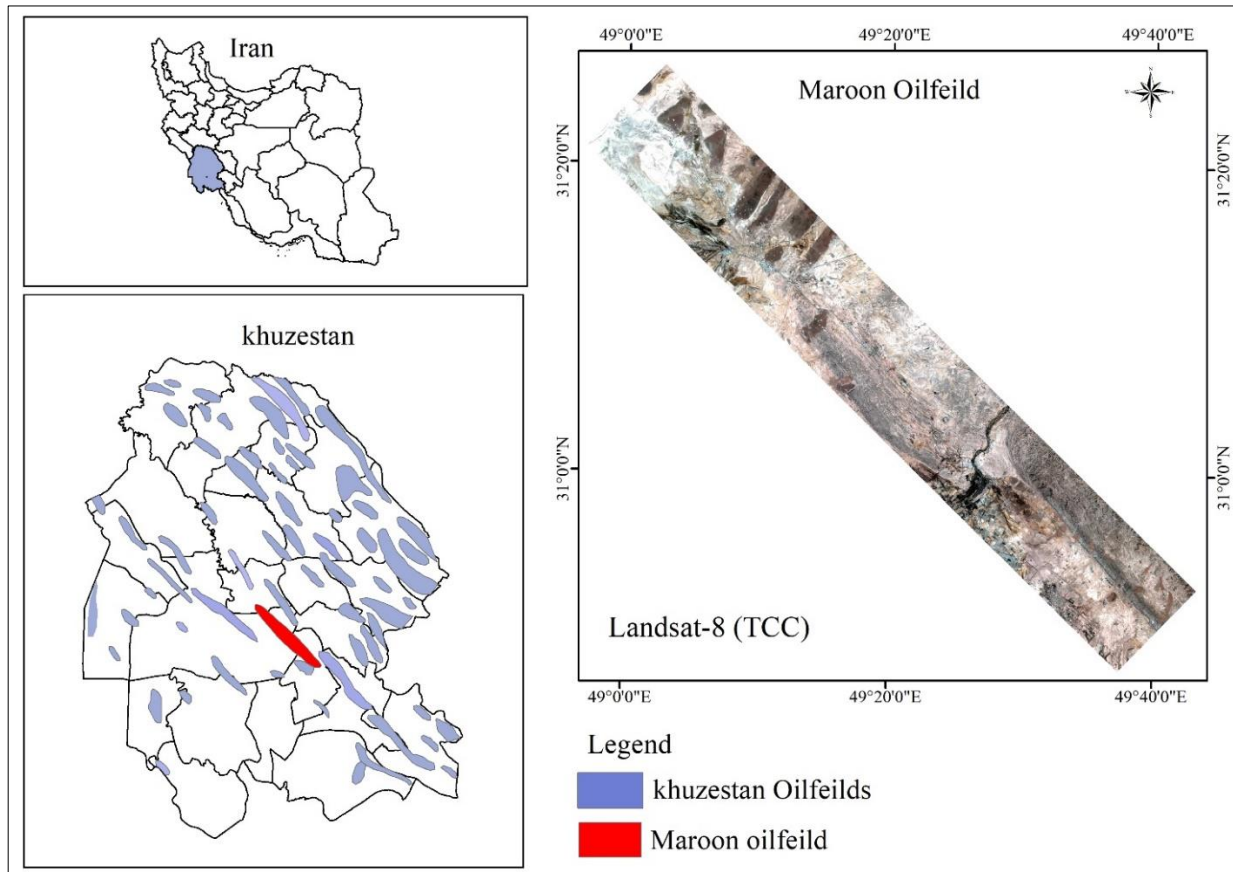
شکل ۱- موقعیت میدان مارون در ارتباط با میدان مجاور در فروافتادگی دزفول (Sherkati, 2004)

Fig. 1. The location of the Maroon field in relation to the adjacent fields in Dezful subsidence (Sherkati, 2004)

سالیانه محدوده مورد مطالعه ۳۲۸ میلی متر و عمده نزولات جوی در ماه های آبان تا فروردین در این منطقه نازل می شود. میانگین حداکثر دما ۳۵/۵ درجه میانگین حداقل دما ۱۱/۱۵ درجه، حداکثر مطلق ۵۰ درجه سانتی گراد در تیرماه، حداقل درجه حرارت مطلق ۱- درجه سانتی گراد در بهمن ماه و میانگین کلی درجه حرارت سالیانه ۲۴/۱ درجه سانتی گراد گزارش شده است (گزارش شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب). مساحت کل منطقه نفتی مارون ۱۲۱۳/۱۳ کیلومترمربع و مجموع طول مسیر خطوط لوله موجود در این میدان معادل ۲۴۹/۱۴ کیلومتر است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی نشان داده شده است.

## ۲-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

میدان نفتی مارون یکی از بزرگترین میدان نفتی حوضه دزفول شمالی است که از شمال غرب به میدان کوپال و از غرب به میدان رامین و از شمال شرقی به میدان آغاچاری محدود می گردد، این میدان در فاصله ۶۰ کیلومتری شرق شهرستان اهواز و ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان رامهرمز در مجاورت بخش شرقی جاده رامهرمز به اهواز واقع شده است. رودخانه های مارون و کوپال به ترتیب از جنوب به سمت شمال شرق و بخش غربی منطقه مورد مطالعه در جریان هستند و قسمت هایی از دشت های اطراف خود را سیراب می کنند. بر اساس آمار و اطلاعات اداره هواشناسی شهرستان رامهرمز متوسط بارندگی



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی میدان مارون در ارتباط با میادین مجاور (ترکیب رنگ طبیعی تصویر لندست ۸)

Fig. 2. The geographical location of Maroon oilfield in relation to the adjacent oilfield (natural color combination of Landsat 8 image).

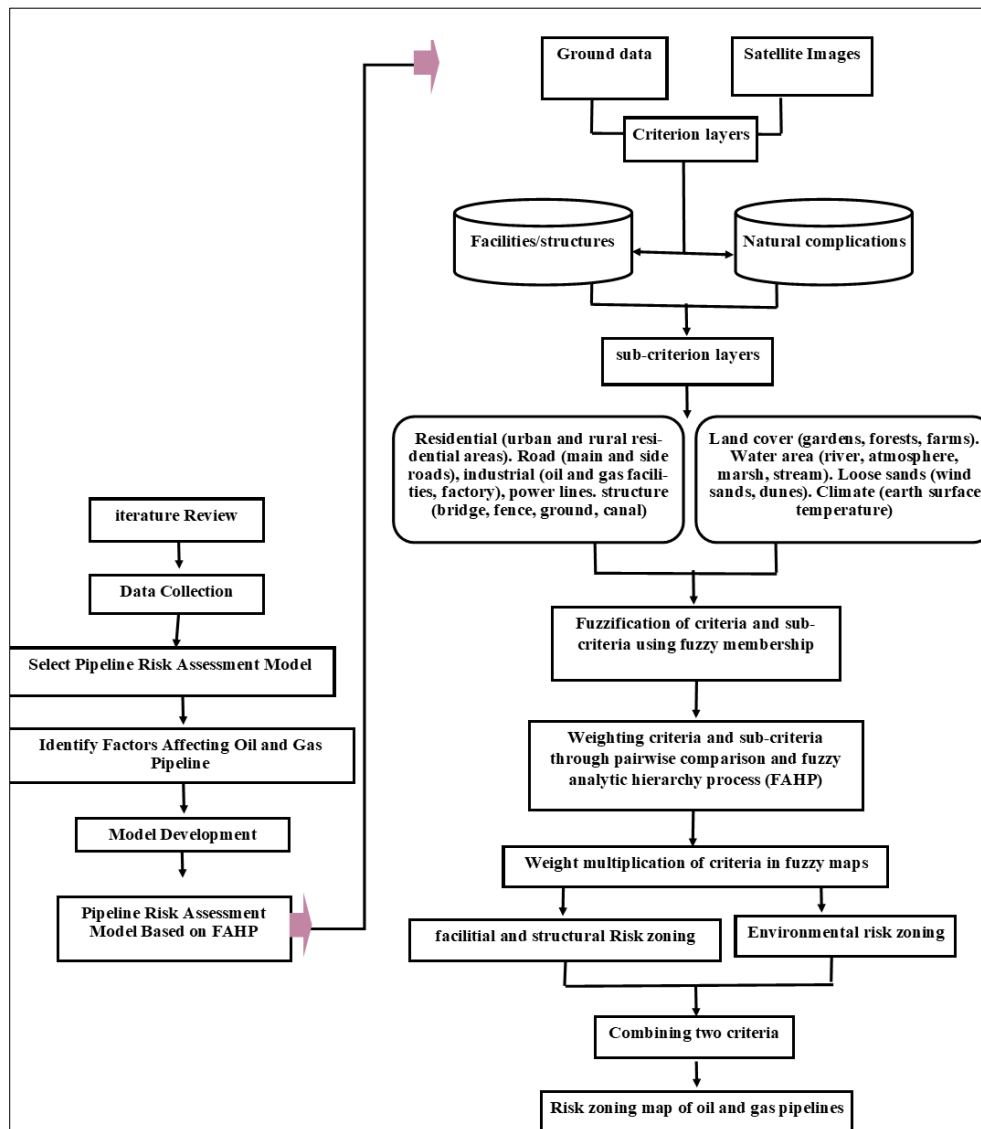
سطح زمین و غیره) از منابع مختلف جمع‌آوری و آماده‌سازی شدند. سپس از طریق نظرات کارشناسان و مقایسه زوجی، با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)، وزن هرکدام از معیارها و زیر معیارها مشخص گردید. پس از فازی سازی لایه‌های معیار و زیر معیار با استفاده از توابع عضویت فازی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 وزن هرکدام از معیارها در لایه‌ی فازی شده آن ضرب شد. در نهایت برای مدل‌سازی مکانی و پهنه‌بندی نهایی، لایه‌های اطلاعاتی بر اساس معیارهای محیطی و فنی و با توجه به نوع رخداد (نشت گاز یا نفت مایع) تلفیق شدند. شکل ۳ مراحل اجرای تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- روش تحقیق

در مطالعه حاضر ابتدا از میان روش‌ها و تکنیک‌های پهنه‌بندی خطرپذیری خط لوله، الگوی پهنه‌بندی خطرپذیری انتخاب شد. در گام بعد، عوامل مؤثر بر میزان خطرپذیر بودن خطوط لوله در صورت وقوع رخدادهایی از جمله نشت گازهای غیر سمی قابل اشتعال و محصولات نفتی مایع ناپایدار از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و با نظر کارشناسان بازرسی میدانی خطوط لوله شناسایی شد. پس از شناسایی معیارها و زیر معیارها، داده‌های موردنیاز (از جمله زمین‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین دمای





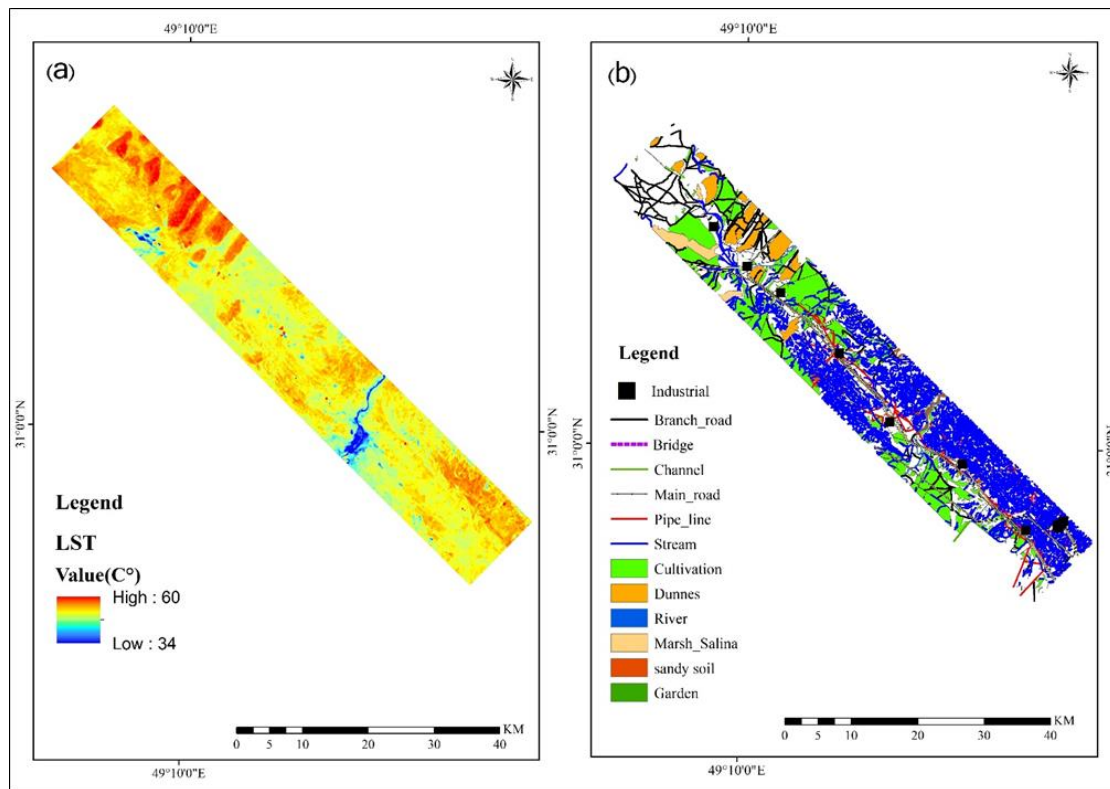
شکل ۳- مراحل اجرای تحقیق

Fig. 3. Flowchart of research

رودخانه)، شن روان (ماسه‌های بادی، تپه‌های شنی)، اقلیم (دمای سطح زمین) و لایه تأسیسات/سازه‌ها شامل: مسکونی (مناطق مسکونی شهری و روستایی)، جاده (جاده‌های اصلی و فرعی)، صنعتی (تأسیسات نفت و گاز، کارخانه، خطوط برق، می‌باشند (شکل ۴a). از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (سنجنده OLI) به‌دست‌آمده از تارنمای سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده USGS نیز برای تهیه لایه اقلیم که شامل لایه میانگین دمای سطح زمین (LST) منطقه نفتی مارون است استفاده‌شده است (شکل ۴b).

### ۲-۲- آماده‌سازی لایه‌های موردنیاز در پهنه‌بندی خطرپذیری

در این مرحله با استفاده از نقشه‌ی سازندهای زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور و نقشه کاربری اراضی ۱:۲۵۰۰۰ شرکت ملی نفت ایران برای منطقه میدان نفتی مارون، لایه‌های اطلاعاتی رقومی سازی شدند. لایه‌های عوارض طبیعی شامل لایه‌های: پوشش سطح زمین (باغ و جنگل، کشتزار)، شبکه آبراهه، پهنه آبی (نهر، جوی، مرداب،



شکل ۴- (a) نقشه کاربری منطقه نفتی مارون ، (b) میانگین دمای سطح زمین (LST) منطقه نفتی مارون

Fig. 4. (a) Land use map of Maroon oilfield, (b) Average land surface temperature (LST) of Maroon oilfield

تفاوت آشکار آن‌ها در ساختار تئوری آن‌هاست، اغلب پیچیدگی فرآیند آن‌ها استفاده از آن‌ها را دشوار می‌کند. روش تحلیل سلسله‌مراتب فازی توسط چانگ، محقق چینی، در سال ۱۹۹۶ ارائه شد. اعداد مورد استفاده در این روش اعداد فازی مثلثی هستند (Bozburu, 2006). از تئوری اعداد فازی برای حل مسائلی استفاده می‌شود که معیار دقیقی ندارند که در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی زاده ارائه شد (Zadeh, 1965). اعداد فازی انواع مختلفی دارند که هر کدام برای تحلیل ساختار مبهم استفاده می‌شوند. در این تحقیق از اعداد فازی استفاده شد زیرا این اعداد می‌توانند برای کمی سازی مفید باشند. اعداد فازی مثلثی نیز کاربرد گسترده‌ای در این مدل دارند و در میان اشکال مختلف اعداد فازی، می‌توان آن‌ها را به راحتی توسط تصمیم‌گیرندگان مدیریت کرد. یک مدل خوب تصمیم‌گیری نیاز به در نظر داشتن ابهام دارد، زیرا ناشناخته بودن و مبهم بودن از ویژگی‌های مشترک در اکثر مسائل تصمیم‌گیری است. روش FAHP یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است که بر پایه تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) توسعه یافته است و از

### ۳-۲- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

هر چند هدف از به کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی کسب نظرات کارشناسی است ولی روش AHP معمولاً به درستی نحوه تفکر آدمی را انعکاس نمی‌دهد. زیرا در مقایسات زوجی از اعداد دقیق استفاده می‌شود. از دیگر نقاط ضعف این روش می‌توان به وجود مقیاس نامتوازن، عدم قطعیت و غیردقیق بودن مقایسات اشاره داشت. تصمیم‌گیرندگان اغلب به علت طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظراتشان را در مورد برتری‌ها اعلام کنند، به همین دلیل در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را به جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند. که به این دلیل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه شده است. در سال ۱۹۸۳ دو محقق هلندی به نام‌های لارهورن و پدریک روشی را برای فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد نمودند که بر اساس روش حداقل مجذورات لگاریتمی بنا نهاده شده بود. پیچیدگی مراحل این روش باعث شده این روش چندان مورد استفاده قرار نگیرد. در ادبیات مروری فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) انواع مختلفی از روش‌ها شرح داده شده است که

می‌باشد و در معیار تاسیسات، زیر معیارهای مناطق مسکونی، صنعتی، تاسیسات، خطوط انتقال نیرو و جاده‌ها قرار داده شد.

### ۳-۳-۲- پرسشنامه و نظرسنجی

تحلیل AHP به نظرات افراد بر اساس اولویت‌ها و اهمیت‌ها اعتماد دارد. در FAHP، با افزودن عناصر فازی، افراد می‌توانند نظرات خود را با اطمینان ناقص یا مفهومات فازی اعلام کنند. بخش پرسشنامه یکی از گام‌های مهم است که از نظرات افراد برای تخمین و ارزیابی اولویت‌ها و اهمیت‌ها استفاده می‌شود. این بخش به منظور جمع‌آوری اطلاعات فازی از نظرات افراد در مورد میزان اهمیت و تأثیر مختلف عوامل یا گزینه‌ها ایجاد می‌شود. برای این منظور از نظر کارشناسان خبره شرکت نفت و اساتید دانشگاه استفاده شد. تعریف اعداد فازی به منظور انجام مقایسه‌های زوجی و برای انجام مقایسه‌ها نیاز به تعریف اعداد فازی و مقیاس‌های فازی است جدول (۱).

مفاهیم فازی برای مدل‌سازی نظرات ناپذیری و عدم قطعیت در تصمیم‌گیری استفاده می‌کند (Zou et al., 2013). در AHP، تصمیمات چندگانه معیاره را با استفاده از یک سلسله‌مراتب از فرضیات و گزینه‌ها تحلیل می‌گردد. در FAHP، این ایده با افزودن بخش‌های فازی به ماتریس تصمیم‌گیری AHP بهبود یافته است و دارای دقت بهتری می‌باشد (Zou et al., 2013). فرآیند FAHP در این تحقیق در پنج مرحله خلاصه شده است:

### ۳-۳-۱- تعیین سلسله مراتب

ابتدا، مسأله به شکل سلسله‌مراتبی ارائه می‌شود. این سلسله‌مراتب ممکن است شامل اهداف، معیارها، و گزینه‌ها باشد. در ابتدا در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق کلیه زیر معیارهای در دو دسته معیار عوارض طبیعی و تاسیسات تقسیم بندی شد که معیار عوارض طبیعی شامل زیر معیارهای خاک، پوشش گیاهی، پهنه آبی، رودخانه‌ها و لایه دمای سطح زمین

جدول ۱- متغیرهای زبانی و فازی و مقیاس‌های آن جهت اولویت‌بندی معیارها

Table 1. The value applied to each of the criteria and sub-criteria using the FAHP method

Scale of Importance	Fuzzy Scale	Fuzzy Reciprocal Scale
Equal	(1,1,1)	(1,1,1)
Intermediate value	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)
Moderately more	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
Intermediate value	(3,4,5)	(1/5,1/4,1/3)
Significantly more	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
Intermediate value	(5,6,7)	(1/7,1/6,1/5)
Extremely more	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
Intermediate value	(7,8,9)	(1/9,1/8,1/7)
Absolutely more	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)

زوجی جامع که در روش تحلیلی سلسله مراتبی فازی بکار می‌رود، یک عدد فازی مثلثی است که مؤلفه اول آن حداقل نظرسنجی‌ها، مؤلفه دوم آن میانگین نظرسنجی‌ها و مؤلفه سوم آن حداکثر نظرسنجی‌ها می‌باشد. اعداد مثلثی فازی در جدول ۱ با  $\tilde{A} = l, m, n$  نشان داده شده‌اند که در آن  $l$  و  $n$  حد بالا و پایین و  $m$  مقدار میانگین می‌باشد و مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌شود. از طرف دیگر مطابق رابطه ۲ ماتریس مقایسات زوجی تهیه می‌شود (Castro et al., 2023) که در آن

$$\tilde{a}_{in} = (1/n, 1/(m), 1) \quad \text{رابطه ۱} \quad \text{با}$$

مقدار فازی مقایسه زوجی بین معیار  $i$  و معیار  $n$  مطابقت دارد (Castro et al., 2023).

### ۳-۳-۳- ماتریس مقایسات زوجی

اطلاعات به دست آمده از نظرات افراد به یک ماتریس فازی تبدیل می‌شود. این ماتریس شامل اعداد فازی است که نشان‌دهنده نظرات مبهم افراد می‌باشند. بصورت کلی در این مرحله از ابتدا تا انتهای فرآیند مراحل، تجمیع نظرات کارشناسان خبره، تبدیل اعداد بین ۰ تا ۱۰، به اعداد فازی، ایجاد ماتریس فازی و مرتب سازی ماتریس فازی انجام شد. تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با به‌کارگیری اعداد فازی، ماتریس مقایسه زوجی  $\tilde{r}_i$  حاوی اعداد فازی تعریف شده است و به‌صورت رابطه ۲ خواهد بود: اگر کمیته تصمیم‌گیرنده دارای چندین تصمیم‌گیرنده باشد، درایه‌های ماتریس مقایسه

با کمک نرم افزار ArcGIS تهیه گردید و در تحلیل های بعدی از آن ها استفاده شد.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- استاندارسازی لایه ها

به منظور استانداردسازی لایه های موجود از نظرات کارشناسی و منابع موجود استفاده گردید؛ بنابراین، در این مرحله پس از آماده سازی و آنالیز لایه های مؤثر این لایه ها به دودسته لایه معیار اصلی شامل لایه اطلاعاتی زیست محیطی و لایه اطلاعاتی تأسیسات / سازه ها تقسیم شدند. سپس با استفاده از توابع عضویت فازی (جدول ۲) و با در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به این توابع، لایه های مؤثر در پهنه بندی خطرپذیری مسیر خطوط لوله استانداردسازی شدند (شکل ۵ الف و ب). در استانداردسازی لایه ها با توجه به این که در اندازه گیری معیارها، دامنه متنوعی از مقیاس ها مورد استفاده قرار می گیرد، بر همین اساس لازم است ارزش های موجود در لایه های مختلف نقشه معیار به واحدهای قابل مقایسه و در تناسب باهم، تبدیل شوند. یکی از روش های استانداردسازی، روش فازی می باشد. عملیات فازی سازی، ورودی ها را گرفته و توسط توابع عضویت مربوطه، یک درجه مناسب به هر یک نسبت می دهد. متغیرهای ورودی هر یک باید در محدوده رقمی تعریف شده خود باشند و خروجی ها، درجه عضویت فازی از مجموعه های تعیین کننده زبانی (بین صفر و یک) هستند.

$$M_i = (a+b+c)/3 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (\text{رابطه ۶})$$

جدول ۲- توابع عضویت لایه های معیار و زیر معیار

Table 2. Membership functions of criteria and sub-criteria layers

Criterion	Sub-criterion	Fuzzy function type
Facilities/Technical	Residential	Linear
	Industrial	Linear
	Structures	Linear
	Power lines	Linear
	Road	Linear
	Waterbody	Linear
Environmental	Vegetation	Linear
	Stream	Linear
	Soil	Linear
	Surface temperature	Small

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \times \dots \times \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (\text{رابطه ۲})$$

##### ۳-۳-۴- محاسبه وزن فازی

محاسبه اولویت ها به منظور تخصیص وزن به عوامل و گزینه ها بر اساس نظرات فازی انجام می شود. این مرحله بر اساس ماتریس فازی که در مرحله قبلی تولید شده است، صورت می گیرد. بنابراین در این مرحله وزن هر زیرمعیار و معیار محاسبه می گردد و جدول آن در بخش نتایج ارائه شده است. مرحله اول برای محاسبه وزن فازی در ابتدا ضرب اعداد فازی می باشد که مطابق با رابطه ۳ انجام می شود (Castro et al., 2023):

(رابطه ۳)

$$\tilde{A}_1 * \tilde{A}_2 * \dots * \tilde{A}_n = (l_1, m_1, u_1) * (l_2, m_2, u_2) * \dots * (l_n, m_n, u_n)$$

در نهایت محاسبه وزن فازی برای هر معیار (۵ زیر معیار)

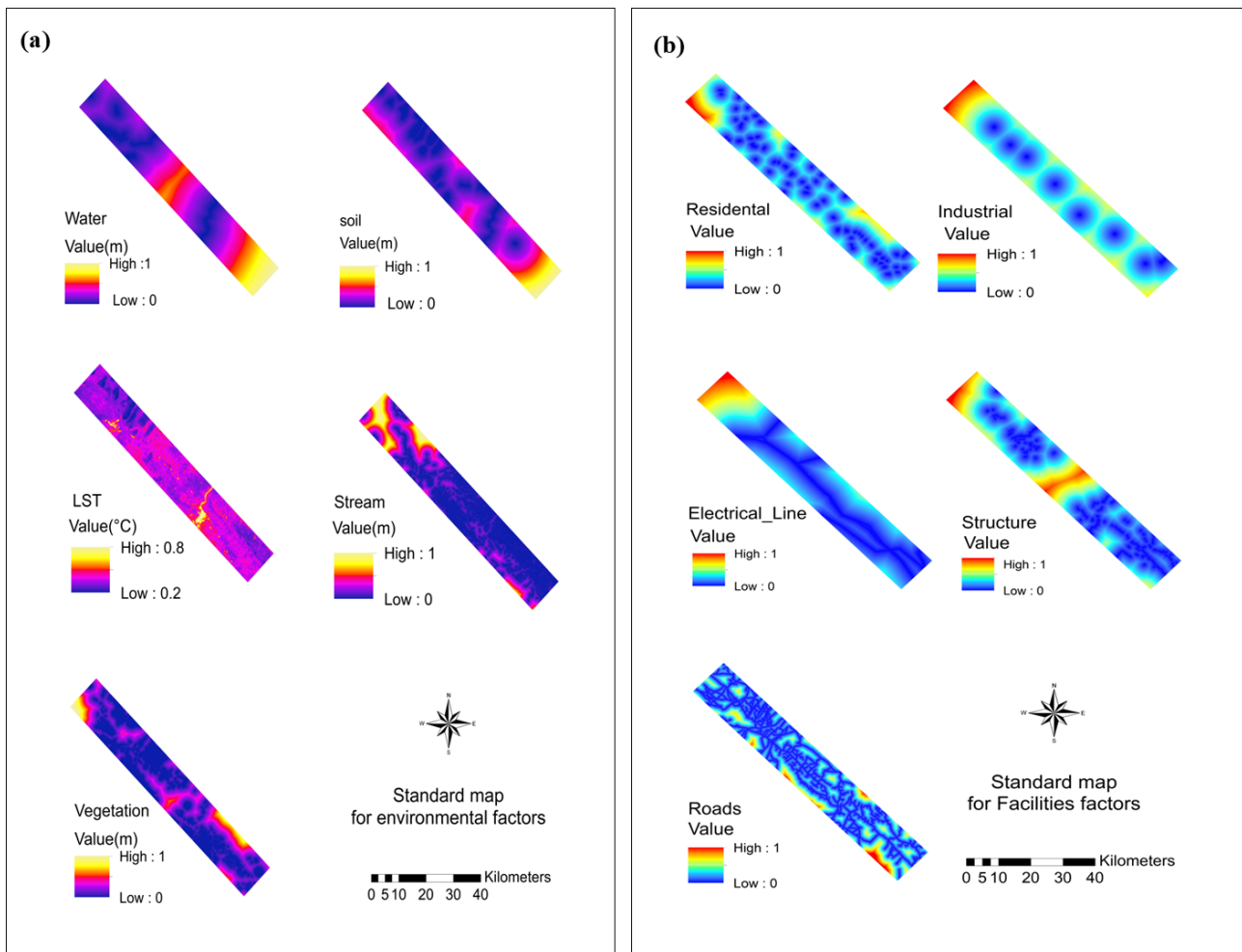
با استفاده از رابطه ۴ استفاده می گردد:

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \times (\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \dots + \tilde{r}_n)^{-1} \quad (\text{رابطه ۴})$$

البته باید توجه داشت که مجموع وزن های زیر معیارها در هر معیار باید یک شود، در غیر این صورت، بردار وزن نهایی از نرمال کردن بردار زیر معیارها برای هر معیار محاسبه می گردد (Castro et al., 2023). با در نظر گرفتن  $\tilde{w}_1 = [a, b, c]$ ، وزن های فازی با استفاده از رابطه ۵ به یک عدد مثبت معادل تبدیل شدند و سپس با استفاده از رابطه ۶ نرمال شدند (Castro et al., 2023):

##### ۳-۳-۵- تحلیل و تصمیم گیری

پس از تعیین بردار وزن نهایی هر لایه در این مرحله، با ضرب وزن هر زیر معیار در لایه آن، نقشه خطرپذیری برای معیار زیست محیطی و فنی از نظر رخداد نشت گاز و نشت مایع نفتی



شکل ۵- (a) لایه‌ی محیطی استاندارد شده، (b) لایه‌ی تأسیسات/فنی استاندارد شده  
 Fig. 5. (a) Standardized environmental layers, (b) Standardized facility/technical layers

ترتیب کمترین و بیشترین اهمیت را نشان می‌دهند. وزن دهی به لایه‌های زیر معیار طبق نظر کارشناس برای دو پیامدمهم در مسیر خطوط لوله که شامل (۱) نشت گاز و (۲) نشت محصولات نفتی مایع می‌باشد تعیین شد. مقایسات زوجی معیارها و زیر معیارها با استفاده از نظر کارشناسان جمع‌آوری شد. این مقایسات زوجی که با متغیرهای زبانی توصیف شده‌اند و با اعداد فازی مثلثی بیان می‌شوند، به‌عنوان ورودی مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی عمل می‌کنند. بر اساس این روش وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها بر اساس جدول ۳ تا ۶ تعیین گردید. همچنین در جدول ۷ ماتریس مقایسات زوجی فازی برای معیار محیطی-فنی، برای دو رخداد نشت گاز و نشت مایع نفتی نشان داده شده است.

#### ۲-۴- تعیین وزن معیارها از طریق فرآیند تحلیل

##### سلسله مراتبی فازی (FAHP)

وزن هر عامل نشان‌دهنده میزان اهمیت و ارزشان نسبت به عامل‌های دیگر در عملیات پهنه‌بندی خطرپذیری مسیر خطوط لوله است؛ بنابراین انتخاب آگاهانه و صحیح وزن‌ها کمک بزرگی در جهت یافتن مناطق با خطرپذیری بالا می‌کند. در مجموع، ۱۰ عامل مهم و تأثیرگذار بر میزان خطرپذیری مسیر خط لوله شناسایی و مقادیر هر شاخص بر طبق نظر کارشناسی وزن دهی شد. هر یک از کارشناسان با اختصاص دادن اعداد بین ۱ تا ۹ بر اساس تجربه و دانش خود، اهمیت تأثیر هر یک از عوامل را بر مطالعه خطرپذیری خط لوله تعیین کردند. عدد ۱ و ۹ به

جدول ۳- ماتریس مقایسه زوجی فازی برای معیار فنی- رخدادهای مایع نفتی

Table 3. The fuzzy pair-wise comparison matrix of Technical-Liquid

Parameter	Residential	Industrial	Structures	Power lines	Road	Weight
Residential	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.33, 0.50, 1.00)	0.21
Industrial	(0.33, 0.50, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.33, 0.50, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.50)	0.12
Structures	(0.33, 0.50, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.33, 0.50, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.50)	0.12
Power lines	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.33, 0.50, 1.00)	0.21
Road	(1.00, 2.00, 3.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.36

جدول ۴- ماتریس مقایسه زوجی فازی برای معیار فنی- رخدادهای نشت گاز

Table 4. The fuzzy pair-wise comparison matrix of Technical -Gas

Parameter	Residential	Industrial	Structures	Power lines	Road	Normal
Residential	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(4.00, 5.00, 6.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	0.38
Industrial	(0.33, 0.50, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(4.00, 5.00, 6.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	0.30
Structures	(0.25, 0.33, 0.50)	(0.25, 0.33, 0.50)	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.13
Power lines	(0.17, 0.2, 0.25)	(0.17, 0.2, 0.25)	(0.25, 0.33, 0.50)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.50)	0.06
Road	(0.25, 0.33, 0.50)	(0.25, 0.33, 0.50)	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.13

جدول ۵- ماتریس مقایسه زوجی فازی برای معیار محیطی- رخدادهای مایع نفتی

Table 5. The fuzzy pair-wise comparison matrix of Environmental - Liquid

Parameter	Water	Vegetation	Stream	Soil	Temperature	Weight
Water	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(4.00, 5.00, 6.00)	0.34
Vegetation	0.25, 0.33, 0.50	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.50)	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	0.13
Stream	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(4.00, 5.00, 6.00)	0.34
Soil	(0.25, 0.33, 0.50)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.50)	(1.00, 1.00, 1.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	0.13
Temperature	(0.17, 0.2, 0.25)	(0.25, 0.33, 0.50)	(0.17, 0.2, 0.25)	(0.25, 0.33, 0.50)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.06

جدول ۶- ماتریس مقایسه زوجی فازی برای معیار محیطی- رخدادهای نشت گاز

Table 6. The fuzzy pair-wise comparison matrix of Environmental - Gas

Parameter	Water	Vegetation	Stream	Soil	Temperature	Weight
Water	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.20
Vegetation	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.20
Stream	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.20
Soil	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.20
Temperature	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.20

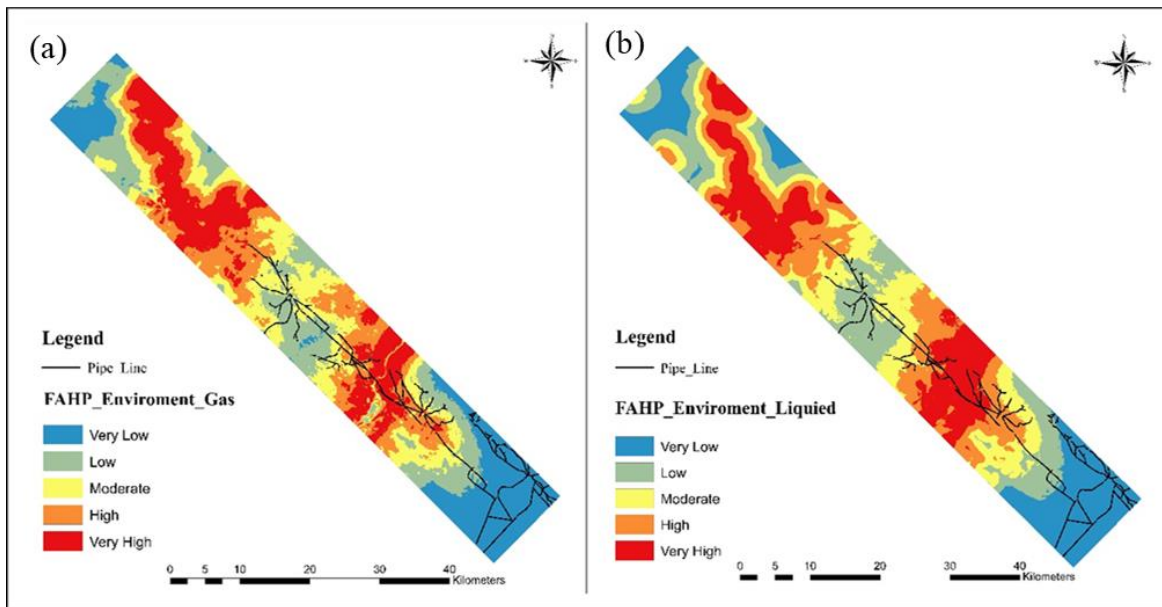
جدول ۷- ماتریس مقایسه زوجی فازی برای معیار محیطی- فنی و رخدادهای نشت گاز و مایع نفتی

Table 7. The fuzzy pair-wise comparison matrix of Technical - Environmental, Gas & Liquid

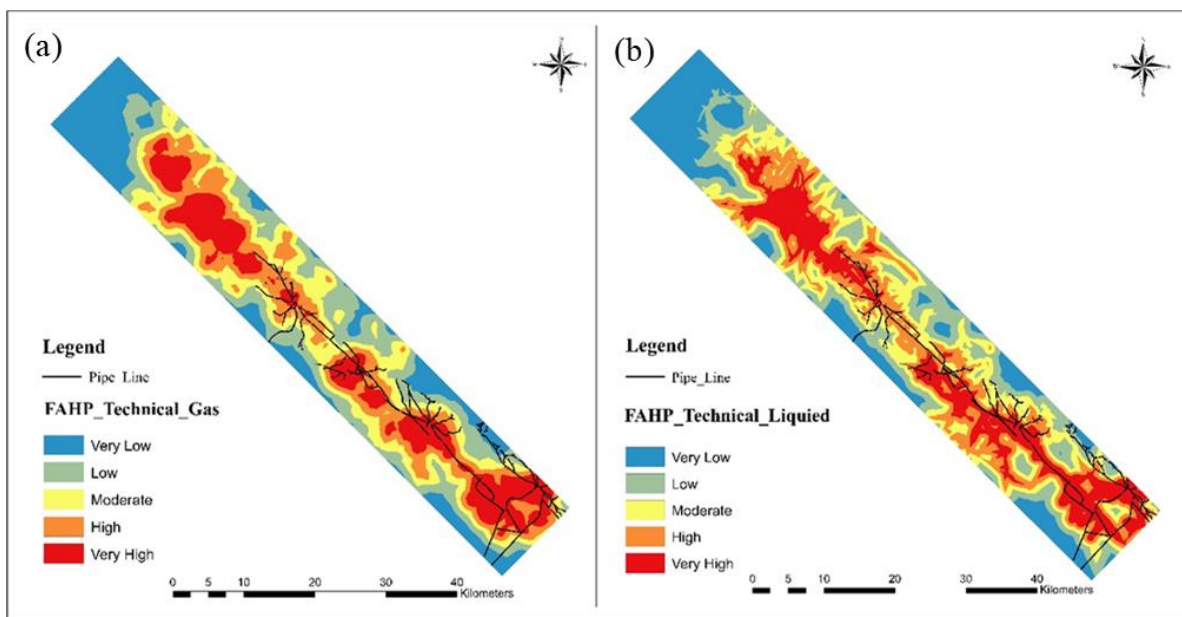
Type	Parameter	Technical	Environmental	Weight
Gas	Technical	(1.00, 1.00, 1.00)	(7.00, 8.00, 9.00)	0.89
	Environmental	(0.11, 0.13, 0.14)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.11
Liquid	Technical	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.5)	0.26
	Environmental	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	0.74

ذکر شده تهیه گردید (شکل ۶ و ۷). شکل ۶، نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری منطقه نفتی مارون برای معیار زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. در این نقشه، پهنه‌بندی یکبار از منظر رخدادهای نشت گاز و یکبار از منظر نشت محصولات نفتی مایع صورت گرفته است و مسیر خطوط لوله فعلی بروی نقشه انطباق داده شده است.

در نهایت وزن‌های به‌دست‌آمده از روش FAHP در لایه‌های فازی شده زیرمعیارها ضرب گردید. در این مرحله ابتدا نقشه‌های خطرپذیری برای معیار زیست‌محیطی در صورت رخدادهای نشت گاز و نشت محصولات مایع نفتی در مسیر خطوط لوله و سپس نقشه‌های خطرپذیری برای معیار تأسیسات و سازه‌ها در صورت وقوع دو رخداد



شکل ۶- نقشه خطرپذیری برای معیار زیست محیطی از نظر (a) رخدادهای مایع نفتی و (b) نشت گاز  
Fig. 6. Risk map for environmental criteria of (a) oil spill and (b) gas leakage



شکل ۷- نقشه خطرپذیری برای معیار تأسیسات/فنی از نظر (a) رخدادهای گاز و (b) نشت مایع نفتی  
Fig. 7. Risk map for (a) gas leakage and (b) facility/technical criteria of petroleum liquid leakage

این مناطق بیشتر شامل زمین‌های کشاورزی شبکه‌های آبراهه موجود در منطقه و شن‌های روان می‌باشند (شکل ۶). در شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی مسیر خطوط لوله بر اساس معیار تأسیسات/فنی، نشان می‌دهد که مسیر خط لوله فعلی انطباق بالایی بر نواحی با خطرپذیری خیلی زیاد به‌ویژه در مناطق جنوبی و مرکزی این میدان دارد. در حالی که معیار

نتایج نشان می‌دهد، در این پهنه‌بندی مسیر خطوط لوله در بیشتر نواحی از مناطق با خطرپذیری زیاد و خیلی زیاد عبور می‌کند و به‌ویژه در مناطق مرکزی میدان مسیر خطوط لوله انطباق زیادی با مناطق با خطرپذیری خیلی بالا (از نظر نشت گاز و هم از نظر نشت محصولات نفتی مایع) را نشان می‌دهند.

مساحت کل میدان نفتی مورد مطالعه را شامل می‌شود. طول مسیر خطوط لوله که از مناطق با خطرپذیری بالا عبور می‌کند ۴۱/۳۳ کیلومتر و طول این مسیر برای مناطق با خطرپذیری خیلی بالا معادل ۴۶/۶۴ کیلومتر می‌باشد. این مسیر مجموعاً ۳۵/۳۰ درصد از مسیر کلی خطوط لوله در این میدان نفتی را شامل می‌شود.

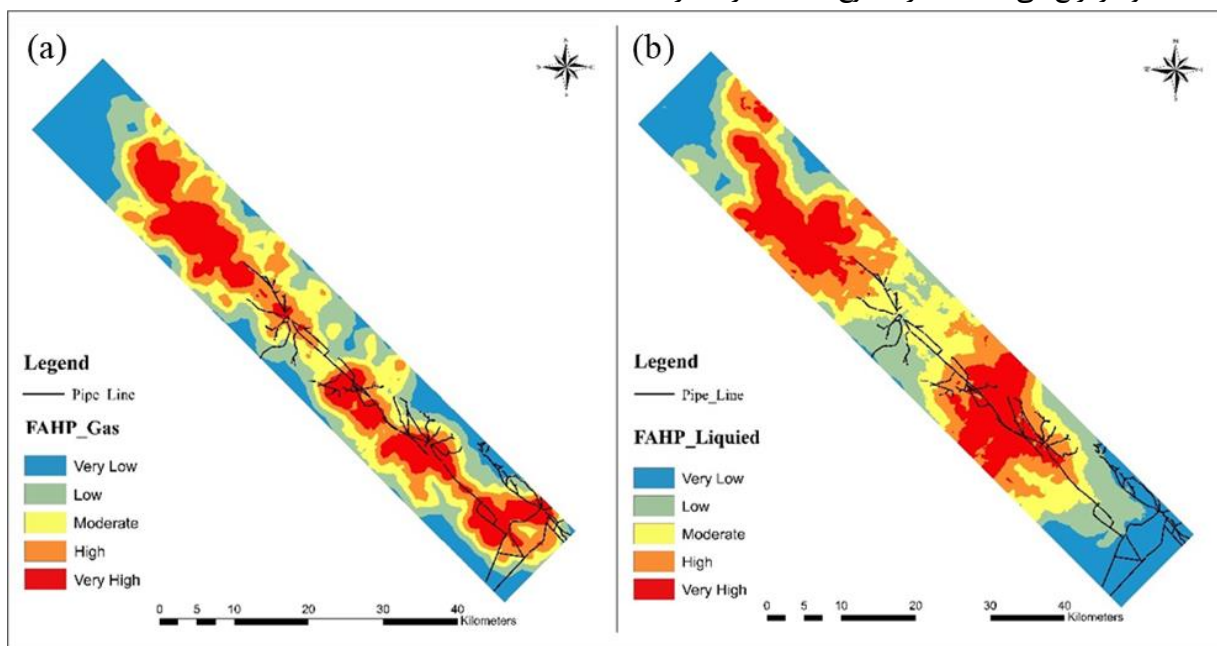
در نقشه (شکل ۸a) مسیر خط لوله منطقه انطباق قابل توجهی را بر نواحی با خطرپذیری زیاد و خیلی زیاد از منظر رخداد نشت گاز را نشان می‌دهد. مساحت این مناطق که بیشتر در بخش مرکزی و جنوبی میدان نفتی قرار دارند ۴۳۴/۱۰ کیلومترمربع معادل حدوداً ۳۶ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در رخداد نشت گاز مناطق جنوبی خطرپذیری بالای را نشان می‌دهند در حالی که در رخداد مایع نفتی مناطق جنوبی از میزان خطرپذیری پایینی برخوردار هستند. در این نقشه ۸۶/۰۸ کیلومتر از مسیر خطوط لوله از مناطق با خطرپذیری خیلی زیاد و ۶۳/۱۶ کیلومتر از مناطق با خطرپذیری زیاد عبور می‌کند. این مناطق بر مسیر جاده‌های اصلی، پل‌های موجود در منطقه، مناطق مسکونی و همچنین بر عوارض طبیعی که شامل زمین‌های کشاورزی شبکه‌های آبراه و شن‌های روان می‌باشند منطبق است.

زیست‌محیطی قسمت جنوبی میدان از خطرپذیری کمی برخوردار بوده است. در این پهنه‌بندی در هر دو رخداد نشت گاز و نشت نفت مایع نفتی نتایج مشابهی را از نظر میزان خطرپذیری نشان می‌دهد و بیشتر این مناطق منطبق بر مسیر جاده‌ها، مناطق صنعتی و مناطق مسکونی موجود در منطقه می‌باشد.

پس‌از آن نقشه خطرپذیری نهایی نشت گاز و محصولات نفتی مایع از تلفیق نقشه‌های قبلی در دو معیار زیست‌محیطی و تأسیسات / سازه‌ها به دست آمد. حاصل این تلفیق دو نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری نهایی برای منطقه نفتی مارون می‌باشد:

۱. نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری حاصل تلفیق دو معیار محیطی و فنی برای رخداد محصولات نفتی مایع (شکل ۸a)
۲. نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری حاصل تلفیق دو معیار محیطی و فنی برای رخداد نشت گاز (شکل ۸b)

نتایج نشان می‌دهد مسیر خطوط لوله فعلی منطقه در نقشه (شکل ۸b) که حاصل پهنه‌بندی خطرپذیری برای رخداد نشت محصولات نفتی مایع می‌باشد، در قسمت‌های مرکزی میدان از مناطق با خطرپذیری بالا و خیلی بالا عبور می‌کند. مساحت مناطق با خطرپذیری بالا در محدوده میدان نفتی ۲۳۴ کیلومترمربع و مساحت مناطق با خطرپذیری خیلی بالا ۲۴۰/۶۲۱ کیلومترمربع می‌باشد که در مجموع ۳۹/۰۷ درصد از



شکل ۸- نقشه خطرپذیری برای منطقه نفتی مارون از نظر رخداد (a) نشت مایع نفتی و (b) نشت گاز  
Fig. 8. Risk map for the Maroon oil field of the occurrence of (a) oil spill and (b) gas leak



## ۵- بحث و نتیجه گیری

این مطالعه باهدف تحلیل خطرپذیری مسیر خطوط لوله نفت و گاز با استفاده از GIS و تکنیک FAHP انجام گرفت. ارزیابی نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد که مطالعه حاضر باهدف ایجاد توسعه پایدار انجام شده است، بنابراین با توجه به وزن‌های محاسبه شده و نظرات متخصصان باید وزن قابل توجهی به عوامل محیطی اختصاص داده شود. در صورتی که نتایج پهنه‌بندی نشان داد که در طراحی مسیر خطوط لوله فعلی موجود در منطقه توجه خاصی به این مسئله نشده است و مساحت قابل توجهی از منطقه پرخطر از نظر نشت گاز و نفت مایع مربوط به لایه معیار محیطی است. با توجه به وسعت گسترده خطوط لوله نفت و گاز در مناطق مختلف تأسیساتی و مسکونی و نیز بالا بودن پتانسیل آسیب‌پذیری این خطوط، مدیریت ایمنی این خطوط از اهمیت بالایی برخوردار است. از جمله آسیب‌های ناشی از حوادث خطوط لوله عبارت‌اند از؛ افزایش تهدید سلامت جانی انسان، تهدید اموال انسان، بی‌ثباتی اجتماعی و نیز آسیب‌های زیست‌محیطی و زیان مالی ناشی از قطع عرضه، که هر کدام از این پیامدها، تهدیدی برای انسان‌ها، محسوب می‌شوند. به بیانی روشن‌تر یک منطقه، زمانی در معرض خطر منطقه‌ای است که اثرات و رویدادهای خروجی آن، از آستانه بحرانی فراتر رود و دارای پیامدهای منفی برای افراد، محیط‌زیست و تأسیسات و دارایی‌ها شود (Dziubinski et al., 2006). به‌عنوان یک مزیت، می‌توان گفت که در این تحقیق از داده‌های عینی و ذهنی به‌طور هم‌زمان استفاده شده است زیرا روش FAHP این قابلیت را دارد که داده‌های عینی و ذهنی را در مدل درج کند،

همچنین رویکرد فازی به‌کاررفته تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا نظرات خود را در قالب متغیرهای زبان‌شناسی منعکس کنند. از آنجا که عدم قطعیت، جزء جدایی‌ناپذیر محاسبه خطرپذیری می‌باشد و نیز با در نظر گرفتن این که روش‌های کلاسیک، نمی‌تواند عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌های سیستم‌ها را مدیریت کند، لزوم توجه به مدل‌های فازی، جهت صحت بیشتر نتایج، امری حائز اهمیت است (Raeiagh et al., 2020).

در نهایت می‌توان گفت این فرآیند با ایجاد دید کلی از مسیر خطوط لوله نفت و گاز به مدیران کمک می‌کند تا با شناسایی مناطق با پیامد خطر مختلف با توجه به شرایط، مناسب‌ترین راهکارها را برای کاهش سطح خطرپذیری در صورت وقوع هرگونه حادثه در مسیر خط لوله نفت و گاز را انجام دهند. با توجه به صعب‌العبور بودن برخی از این مسیرها و گاهی هزینه بالای بازدیدهای میدانی این روش می‌تواند در عمل بسیار مفید واقع بشود و حتی جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی بازرسی‌های میدانی باشد. از سوی دیگر برای تعیین مسیرهای خطوط انتقال نفت و گاز در آینده می‌توان با توجه بیشتر به عوامل محیطی در طراحی این مسیرها و با داشتن رویکرد توسعه پایدار مسیرهای بهینه‌تر که آسیب کمتری از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی دارند طراحی کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به‌منظور بالا بردن دقت در تصمیم‌گیری‌های نهایی از اطلاعات تکمیلی مربوط به خطوط لوله و کاربری اراضی محیط اطراف آن‌ها به‌صورت یک پایگاه اطلاعاتی جامع و به‌روز استفاده کرد.

## مراجع

- Alidoosti, A., Yazdani, M., Basiri, M., 2011. Risk assessment of critical asset using fuzzy inference system. *Risk Management* 14, 77-91. <http://dx.doi.org/10.2307/41407084>.
- Aljaroudi, A., Khan, F., Akinturk, A., Haddara, M., Thodi, P. 2015. Risk assessment of offshore crude oil pipeline failure. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 37, 101-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.07.004>.
- American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 2000. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis (2nd Ed.). New York: AIChE. 51 P.
- Arnaldos, J., Casal, J., Montiel, H., Sanchez-Carricondo, M., Vilchez, J.A., 1998. Design of a computer tool for the evaluation of the consequences of accidental natural gas releases in distribution pipes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 11, 135e148. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230\(97\)00041-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230(97)00041-7).

- Biezma, M. V., Agudo, D., Barron, G., 2018. A fuzzy logic method: predicting pipeline external corrosion rate. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 163, 55-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.05.001>
- Bonvicini, S., Antonioni, G., Morra, P., Cozzani, V., 2015. Quantitative assessment of environmental risk due to accidental spills from onshore pipelines. *Process Safety and Environmental Protection* 93, 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.007>.
- Cagno, E., Caron, F., Mancini, M., Ruggeri, F. 2000. Using AHP in determining the prior distributions on gas pipeline failures in a robust Bayesian approach. *Reliability Engineering & System Safety* 67(3), 275-284. [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(99\)00070-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(99)00070-8).
- Castro, A.O., Robles-Algarín, C., Hernández-Callejo, L., Muñoz Maldonado, Y., Cordero, A.M. Feasibility Analysis of Offshore Wind Power Projects in the Caribbean Region of Colombia: A Case Study Using FAHP-GIS. *Sustainability* 2023, 15, 16620. <https://doi.org/10.3390/su152416620>.
- David Tian, J. D., Gopika Vinod, T.V. Santhosh, Hissam Tawfik. 2018. A Constraint-based Genetic Algorithm for Optimizing Neural Network Architectures for Detection of Loss of Coolant Accidents of Nuclear Power Plants. *Neurocomputing*, 322, 102-119. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.09.014>.
- De Masi, G., Vichi, R., Gentile, M., Bruschi, R., Gabetta, G., 2014. A neural network predictive model of pipeline internal corrosion profile. Paper presented at the Proceeding of First International Conference on Systems Informatics; Modeling and Simulation. IEEE Computer Society Washington. DC, USA. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.08.009>.
- Dong Yeong Kim, K. H.Y., Geon Pil Choi, Ju Hyun Back, Man Gyun Na. 2016. Reactor Vessel Water Level Estimation During Severe Accidents Using Cascaded Fuzzy Neural Networks. *Nuclear Engineering and Technology* 3, 702-710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.02.002>.
- Dziubinski, M., Frątczak, M., & Markowski, A. 2006. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19(5), 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.10.007>.
- El-Abbasy, M.S., Senouci, A., Zayed, T., Mirahadi, F., Parvizsedghy, L., 2014. Artificial neural network models for predicting condition of offshore oil and gas pipelines. *Automation in Construction* 45, 50-65. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.003>.
- Elsayed, T., 2009. Fuzzy inference system for the risk assessment of liquefied natural gas carriers during loading/offloading at terminals. *Applied Ocean Research* 31(3), 179-185. <http://doi.org/10.1016/j.apor.2009.08.004>.
- 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.2010.02.003>
- Han, Z., Weng, W., 2011. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of hazardous materials* 189(1-2), 509-518. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.067>
- Jamshidi, A., Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S. H., Khaleghi, S. 2013. Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 26(1), 197-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2012.10.010>.
- Jo, Y.,D., Ahn, B. J. 2005. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. *Journal of hazardous materials* 123(1-3), 1-12.
- Kaplan, S., Garrick, B. J. 1981. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11e27.
- Kosa., Golić, 2019."A Fuzzy Model for Assessing Impacts of Natural Gas Pipeline Systems on Environment," *Journal of Advanced Management Science* 7, 47-53, June 2019. <http://dx.doi.org/10.18178/joams.7.2.47-53>.
- Liu, Y.; Eckert, C.M.; Earl, C.A 2020. Review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems With Applications*, 161, 113738.

- Lu, L., Liang, W., Zhang, L., Zhang, H., Lu, Z., & Shan, J. 2015. A comprehensive risk evaluation method for natural gas pipelines by combining a risk matrix with a bow-tie model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 25, 124-133. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jngse.2015.04.029>.
- Malinowska, A., Cui, X., Salimi, E., Ryszard, H., 2021. A novel fuzzy approach to gas pipeline risk assessment under influence of ground movement. *International Journal of Coal Science & Technology* <http://dx.doi.org/10.1007/s40789-022-00511-2>
- Markowski, A. S., Mannan, M. S. 2009. Fuzzy logic for piping risk assessment (pfLOPA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22(6), 921-927. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.06.011>.
- Markowski, A.S., Mannan, M.S., Bigoszewska, A., 2009. Fuzzy logic for process safety analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22(6), 695-702. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2008.11.011>.
- Qolipour, M. A., Haghi, A., 1990. Geological study of Maron oil field, report No. P-4210, General Directorate of Extension Geology, National Company of Southern Oil-bearing Regions 55 pages.
- Raeihagh, H., Behbahaninia, A, Macki Aleagha, M., 2020. Risk assessment of sour gas inter-phase onshore pipeline using ANN and Fuzzy inference system case study. *The South Pars Gas field*<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104238>.
- Rangzan, K., Mousavi,S., Saberi,A., Darvishi,S.,2019. Optimum route selection for Pole Zal - Khorram Abad. highway using GIS and environmental consideration. *Advanced Applied Geology (Adv.Appl.Geol.)* 284-299. <https://doi.org/10.22055/aag.2019.28145.1920>.
- Shahriar, A., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. 2012. Risk analysis for oil & gas pipelines: A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industrie* 25(3), 505-523.
- Sherkati, S. and Letouzey, J. 2004 Variation of Structural Style and Basin Evolution in the Central Zagros (Izeh Zone and Dezful Embayment) Iran. *Marin and Petroleum Geology* 21, 535-554. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007>
- Shojaei, p., Mohamadi, A., 2011. Determining gas pipeline optimum route by using integrated FAHP/GRA model, *Australian Journal of Business and Management Research* 1(3), 75-88. <http://doi.org/10.52283/NSWRCA.AJBMR.20110103A07>.
- Sklavounos, S., & Rigas, F. 2006. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19, 24e31.
- Torfi, F, Farahani, RZ, Rezapour, S. (2010). Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives. *Applied Soft Computing* 10(2), 520-528. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.08.021>.
- Yu, Q., Hou, L., Li, Y., Chai, C., Yang, K., Liu, J. 2023. Pipeline Failure Assessment Based on Fuzzy Bayesian Network and AHP. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* Volume 14 - Issue 1 - February 2023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000698).
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. *Information Control* 8, 338-353. [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- Zou, Q., Zhou, J. Z., Zhou, C., Song, L. X., Guo, J., 2013. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP Stoch. *Environmental Risk Assessments* 27, 525-546. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0598-5>.