نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴

Vol.13, No.2, Summer 2025

۵۷ -۸۵

مقاله پژوهشی

تحلیل مکانی - آماری خطوط لوله نفت و گاز با استفاده از مدل نسبت فراوانی در مواجهه با مخاطرات محیطی

رحیم نظری[۱]، مصطفی کابلی زاده[۲*]، کاظم رنگزن[۳]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی رشته سنجش از دور و *GIS*، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه سنجش از دور و *GIS*، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد گروه سنجش از دور و *GIS* ، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸

چکیده

صنعت نفت و گاز به‌عنوان شریان حیاتی اقتصاد، همواره با چالش مدیریت ریسک خطوط لوله مواجه بوده است. اگرچه مطالعات متعددی به ارزیابی مخاطرات پرداخته‌اند، اما تحلیل فضایی-آماری هم‌زمان چندین مخاطره محیطی با روش کمی در مناطق نفت‌خیز ایران کمتر موردتوجه قرارگرفته است. در این مطالعه از سه روش تحلیل فراوانی نسبی، تحلیل تراکم کرنل و رگرسیون فضایی استفاده شد. تحلیل فراوانی نسبی نشان داد که بیشترین نسبت شکستگی در مناطق با پتانسیل فرونشست بالا (۰,۳۰۵) و زلزله کم (۰,۷۶) رخداده است. تحلیل تراکم کرنل با تابع گاوسی، نقاط داغ شکستگی را در جنوب مسجدسلیمان شناسایی کرد که با مناطق فرونشست همپوشانی دارد. در تحلیل تراکم کرنل، تمرکز ۶۸٪ از شکستگی‌ها در نواحی جنوبی مسجدسلیمان شناسایی شد که با پهنای باند بهینه ۱,۰۶ کیلومتر (محاسبه شده با روش سیلورمن) و عدم قطعیت مدل ±۵٪ همراه بود. نتایج رگرسیون فضایی حاکی از تأثیر معنادار زلزله (ضریب ۰,۴۶۱، $p<0.01$) و فرونشست (ضریب ۰,۳۵۷، $p<0.01$) بر شکستگی خطوط لوله بود، درحالی‌که ضریب تعیین مدل (R^2) برابر با ۰,۲۹۵، مقدار آماره F برابر با ۱۷,۷۳ ($p<0.001$) و مقادیر *VIF* بین ۱,۰۴ تا ۲,۳۶ (نشان‌دهنده عدم وجود هم‌خطی شدید) به دست آمد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که فرونشست زمین و زلزله از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده خطوط لوله در منطقه هستند. نتایج حاصل می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت خطوط لوله مورداستفاده قرار گیرد و به کاهش خسارات ناشی از مخاطرات محیطی کمک کند. این مطالعه با ترکیب روش‌های آماری-فضایی، چارچوبی جامع برای ارزیابی ریسک خطوط لوله ارائه می‌دهد که برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مناطق نفت‌خیز کاربرد دارد.

کلیدواژه‌ها : مدل نسبت فراوانی، خطوط لوله نفت و گاز، مخاطرات محیطی، تحلیل فضایی، مسجدسلیمان.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: گروه سنجش از دور و *GIS*، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

تلفن: ۰۹۱۶۳۴۷۰۱۷۷

Email: m.kabolizade@scu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

۱- مقدمه

صنعت نفت و گاز نقش بی‌بدیلی در تامین انرژی و رشد و توسعه کشورها ایفا می‌کند. با این حال، شبکه گسترده خطوط لوله انتقال نفت و گاز، همواره در معرض انواع مخاطرات طبیعی و انسانی قرار دارد که می‌تواند منجر به حوادث فاجعه‌بار با پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی جبران‌ناپذیری شود. از این رو، شناسایی، پایش و مدیریت ریسک این خطوط، از جمله ضروری‌ترین اقدامات در راستای تضمین پایداری و ایمنی این زیرساخت حیاتی است. عدم توجه به این مخاطرات می‌تواند به توقف جریان انرژی، خسارات مالی هنگفت، آلودگی‌های زیست‌محیطی گسترده و حتی تلفات جانی منجر شود [۱]. نتایج این تحقیق، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف مهندسی، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران خواهد داشت. در زمینه مهندسی، این پژوهش می‌تواند به طراحی بهینه‌تر مسیر خطوط لوله جدید، انتخاب مواد مقاوم‌تر و بهبود پروتکل‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه کمک کند. در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، شناخت مناطق پرخطر و آسیب‌پذیر، امکان تدوین طرح‌های توسعه شهری با در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی خطوط لوله را فراهم می‌آورد. همچنین، این مطالعه ابزار ارزشمندی برای مدیریت بحران، شامل پیش‌بینی حوادث احتمالی، تخصیص منابع اضطراری و کاهش زمان پاسخگویی به سوانح را فراهم می‌سازد. به طور کلی، افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های انرژی در برابر مخاطرات محیطی، از جمله دستاوردهای کلیدی این پژوهش خواهد بود. در طول سالیان متمادی، مطالعات متعددی به ارزیابی مخاطرات و آسیب‌پذیری خطوط لوله پرداخته‌اند. روش‌های رایج در این زمینه را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های تحلیلی[1] و روش‌های مبتنی بر داده[2] تقسیم کرد. روش‌های تحلیلی اغلب شامل مدل‌های فیزیکی و مکانیکی هستند که به بررسی رفتار سازه‌ای خطوط لوله در برابر تنش‌های وارده می‌پردازند. این روش‌ها گرچه دقت بالایی در تحلیل مکانیزم شکست دارند، اما نیازمند اطلاعات دقیق و بعضاً دشوار در دسترس هستند و اغلب قادر به پوشش جامع اثرات همزمان چندین عامل محیطی با ماهیت پیچیده نیستند.

در مقابل، روش‌های مبتنی بر داده، از جمله رویکردهای آماری و یادگیری ماشین، با استفاده از داده‌های تاریخی حوادث و اطلاعات عوامل محیطی، به پیش‌بینی و ارزیابی ریسک می‌پردازند. از جمله این روش‌ها می‌توان به رگرسیون لجستیک[3]، شبکه‌های عصبی مصنوعی[4]، ماشین‌های بردار پشتیبان[5] و درختان تصمیم[6] اشاره کرد. اگرچه این روش‌ها انعطاف‌پذیری بالایی در مدل‌سازی روابط پیچیده دارند، اما برخی از آن‌ها مانند شبکه‌های عصبی، ماهیت جعبه سیاه[7] دارند و تفسیر نتایج آن‌ها دشوار است. همچنین، بسیاری از این روش‌ها به حجم وسیعی از داده‌های دقیق و معتبر نیاز دارند که همواره در دسترس نیستند. یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد برخی از این روش‌ها، عدم توانایی در تبیین صریح سهم هر عامل در وقوع حوادث و عدم امکان تحلیل فضایی مستقیم اثرات عوامل محیطی است. به عنوان مثال، در حالی که رگرسیون لجستیک می‌تواند احتمال وقوع شکستگی را بر اساس عوامل محیطی پیش‌بینی کند، اما تحلیل دقیق نسبت فراوانی شکستگی‌ها در نواحی مختلف با ویژگی‌های خاص (مانند مناطق با فرونشست بالا یا زلزله کم) را به سادگی ارائه نمی‌دهد. در این راستا، روش تحلیل نسبت فراوانی، به دلیل سادگی، قابلیت تفسیر بالا و توانایی در

[1] *Analytical Methods*
[2] *Data-Driven Methods*
[3] *Logistic Regression*
[4] *Artificial Neural Networks*
[5] *Support Vector Machines*
[6] *Decision Trees*
[7] *Black Box*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

کمی‌سازی ارتباط بین حوادث و عوامل محیطی در فضای جغرافیایی، به عنوان یک ابزار قدرتمند در مطالعات مخاطرات طبیعی شناخته شده است. این روش امکان می‌دهد تا به طور مستقیم، نسبت وقوع حوادث را در طبقات مختلف هر عامل محیطی بررسی کرده و سهم هر عامل را در افزایش یا کاهش احتمال وقوع حوادث کمی‌سازی کنیم.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که تحقیقات پیشین در زمینه ارزیابی ریسک خطوط لوله، اغلب بر روی یک یا دو عامل مخاطره‌آمیز خاص تمرکز داشته‌اند و کمتر به تحلیل همزمان و یکپارچه چندین عامل محیطی پرداخته‌اند. برای مثال، بسیاری از مطالعات تنها به بررسی اثر فرونشست یا زلزله پرداخته‌اند، در حالی که در واقعیت، تعامل پیچیده این عوامل می‌تواند منجر به تشدید آسیب‌پذیری شود. علاوه بر این، در بسیاری از پژوهش‌ها، دقت مکانی تحلیل‌ها محدود بوده و خروجی‌ها در مقیاس‌های بزرگ و بدون جزئیات کافی برای برنامه‌ریزی‌های اجرایی ارائه شده‌اند. همچنین، فقدان رویکردهای کمی و آماری برای ارزیابی سهم نسبی هر عامل در وقوع حوادث، از دیگر نقاط ضعف مطالعات پیشین است. در مطالعات پیشین، داده‌های مورد استفاده نیز دارای محدودیت‌هایی بوده‌اند. داده‌های مربوط به حوادث خطوط لوله اغلب ناقص یا با خطای موقعیت مکانی همراه بوده‌اند که دقت تحلیل‌ها را تحت تاثیر قرار داده است. در بسیاری از موارد، از داده‌های تاریخی با قدمت بالا استفاده شده که ممکن است با تغییرات محیطی فعلی همخوانی نداشته باشند. همچنین، داده‌های مربوط به عوامل محیطی مانند فرونشست یا فعالیت‌های لرزه‌ای، در برخی مناطق فاقد پوشش مکانی کافی یا با رزولوشن پایین بوده‌اند. این محدودیت‌ها در داده‌ها، به طور مستقیم بر دقت و اعتبار نتایج و قابلیت تعمیم‌پذیری آن‌ها تاثیر منفی گذاشته است.

با توجه به کاستی‌های فوق، ضرورت انجام مطالعه‌ای جامع که نه تنها به تحلیل همزمان چندین مخاطره محیطی بپردازد، بلکه با استفاده از رویکردهای فضایی-آماری پیشرفته، امکان کمی‌سازی دقیق روابط و شناسایی نقاط داغ خطر را فراهم آورد، بیش از پیش احساس می‌شود. این مطالعه تلاش می‌کند تا با تلفیق روش‌های تحلیل فراوانی نسبی، تحلیل تراکم کرنل[1] و رگرسیون فضای[2] یک چارچوب تحلیلی قوی برای ارزیابی ریسک خطوط لوله در مناطق نفت‌خیز ارائه دهد. با در نظر گرفتن موارد فوق، اهداف اصلی این تحقیق به شرح زیر تدوین شده‌اند.

- شناسایی و کمی‌سازی ارتباط بین مخاطرات محیطی (فرونشست و زلزله) و وقوع شکستگی در خطوط لوله نفت و گاز منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش تحلیل نسبت فراوانی.
- تعیین و مکان‌یابی نقاط داغ شکستگی خطوط لوله در منطقه مورد مطالعه با بهره‌گیری از تحلیل تراکم کرنل.
- مدل‌سازی فضایی و آماری اثرات متقابل مخاطرات محیطی بر شکستگی خطوط لوله و تعیین سهم نسبی هر عامل با استفاده از رگرسیون فضایی.

با توجه به اهمیت این موضوع، ارزیابی و تحلیل ریسک شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در مواجهه با مخاطرات محیطی به یکی از اولویت‌های اصلی در مدیریت پایدار زیرساخت‌های انرژی تبدیل‌شده است. در این راستا، استفاده از روش‌های کمی و فضایی می‌تواند به درک بهتر تأثیرات این مخاطرات و شناسایی مناطق پرخطر کمک کند. مدل نسبت فراوانی[3] به‌عنوان یک روش آماری-فضایی، امکان تحلیل هم‌زمان چندین عامل خطر و تعیین نقش هر یک از آن‌ها در افزایش احتمال شکستگی خطوط را فراهم می‌کند. در نهایت، این مطالعه با ارائه یک چارچوب جامع مبتنی بر تحلیل‌های فضایی-آماری، گامی مهم در جهت بهبود

[1] *Kernel Density Estimation*
[2] *Spatial Regression*
[3] *Frequency Ratio*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

ارزیابی ریسک و مدیریت بهینه خطوط لوله نفت و گاز در مناطق مستعد مخاطرات محیطی برمی‌دارد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در فرآیند تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت خطوط لوله مورد استفاده قرار گیرد و به کاهش خسارات ناشی از حوادث و افزایش ایمنی زیرساخت‌های حیاتی انرژی کمک شایانی نماید.

۲- اهمیت تحقیق و مروری بر منابع

در راستای تضمین پایداری و تاب‌آوری شبکه انتقال انرژی، درک عمیق از عوامل مخاطره‌آمیز و توسعه روش‌های پیشرفته برای ارزیابی و مدیریت ریسک شکستگی و نشت در خطوط لوله از اهمیت بالایی برخوردار است. این حوادث که همواره زیرساخت‌های اصلی صنعت نفت و گاز را تهدید می‌کنند، می‌توانند پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و انسانی ویرانگری به دنبال داشته باشند و تحت تأثیر تعامل پیچیده عوامل طبیعی و انسانی، به‌ویژه مخاطرات محیطی مانند زلزله، فرونشست، زمین‌لغزش، قرار می‌گیرند [۳].

۲-۱- مطالعات ارزیابی ریسک خطوط لوله

موهبائور[1] (۲۰۰۴) [۱]، در اثر جامع خود با عنوان "مبانی ارزیابی ریسک خطوط لوله" [۷]، به تحلیل گسترده‌ای از روش‌های ارزیابی ریسک پرداخته و راهکارهایی را برای کاهش خطرات ناشی از آن‌ها ارائه نموده است. این کتاب، به‌عنوان یک مرجع بنیادین در زمینه ارزیابی ریسک زیرساخت‌های خط لوله، به تفصیل انواع روش‌های احتمالی (مانند درخت خطا و تحلیل رویداد) و روش‌های مبتنی بر پیامد (مانند تحلیل سناریو) را تشریح می‌کند. از منظر مدل‌سازی، این اثر، چارچوب‌های نظری جامعی را برای ارزیابی ریسک ارائه می‌دهد. با این حال، نقطه ضعف اصلی این اثر از دیدگاه تحقیق حاضر، تمرکز کلی بر انواع ریسک‌های عملیاتی و فنی خطوط لوله است و به طور خاص، تمرکز کافی بر مخاطرات محیطی و ژئوهزاردهای فعال (مانند فرونشست یا زلزله) و تأثیر کمی آن‌ها بر شکستگی خطوط لوله ندارد .علاوه بر این، موهبائور عمدتاً به چارچوب‌های مفهومی و روش‌شناسی کلی می‌پردازد و داده‌های کمی خاص در مورد کارایی مدل‌های ارزیابی ریسک در سناریوهای واقعی مخاطرات محیطی، میزان کاهش خطر با اعمال روش‌های پیشنهادی یا مقایسه کمی عملکرد مدل‌های مختلف در شرایط میدانی ارائه نمی‌دهد. این عدم ارائه داده‌های کمی و تحلیل‌های موردی خاص، کاربرد مستقیم رویکردهای وی را در مطالعاتی با تمرکز بر برهم‌کنش‌های محیطی محدود می‌سازد و تحلیل تأثیر عوامل فضایی بر آسیب‌پذیری را به چالش می‌کشد.

کاپلان و گریک[2] (۱۹۸۱) [۱]، چارچوبی کلی را برای ارزیابی ریسک در دستگاه‌های پیچیده، ازجمله خطوط لوله نفت و گاز، ارائه کرده‌اند [۸]. این چارچوب مفهومی، شامل سه مرحله اصلی شناسایی خطر، ارزیابی احتمال وقوع و پیامدها و در نهایت تصمیم‌گیری برای کاهش ریسک است. این رویکرد، مبنایی نظری و روش‌شناختی برای بسیاری از مطالعات بعدی در زمینه ارزیابی ریسک در صنایع مختلف، از جمله صنعت نفت و گاز، فراهم آورده و به عنوان یک مدل پایه در ادبیات ریسک شناخته می‌شود. با این حال، نقطه ضعف اصلی این چارچوب در کاربرد عملی برای تحلیل مخاطرات محیطی خطوط لوله، ماهیت عمومی و عدم ارائه جزئیات کمی و فضایی کافی است. این چارچوب، هرچند یک مدل مفهومی ارزشمند را ارائه می‌دهد، اما نیازمند تطبیق و بسط با شرایط خاص هر منطقه، نوع خطر (مانند زلزله یا فرونشست) و داده‌های مکانی موجود است. به عنوان مثال، در حالی که این چارچوب به طور کلی به کاهش ریسک از طریق کاهش احتمال وقوع حادثه یا پیامدهای آن اشاره می‌کند، میزان دقیق کاهش ریسک، کارایی نسبی روش‌های مختلف کاهش ریسک (به صورت کمی)، یا

[1] *Moehbaur*

[2] *Kaplan and Garrick*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

تحلیـل هزینـه-فایـده اقـدامات مختلـف را بـه صـورت مشخص و با داده‌های عملیاتی ارائه نمی‌دهد. همچنین، این چارچوب به تنهایی قادر به شناسایی و مـدل‌سـازی روابط فضایی پیچیده بین عوامل محیطـی و شکسـتگی خطـوط لولـه نیسـت و بـرای چنـین تحلیـل‌هـایی بـه رویکردهای مکمل و داده‌محور نیاز دارد. این کمبودهـا، محدودیت‌هایی را برای کاربرد مستقیم این چارچوب در ارزیابی ریسـک بـا رویکـرد فضـایی-آمـاری در منـاطق خاص ایجاد می‌کند.

گئو[1] و همکـاران (۲۰۱۳) مـدلی بـرای ارزیـابی ریسـک خطوط لوله نفـت و گـاز بـا در نظـر گـرفتن خـوردگی، آسیب‌های مکانیکی و خطرات طبیعـی ارائـه کـرده‌انـد [۹]. این مدل، باوجود جامعیت، به داده‌های زیادی نیـاز دارد و پیاده‌سازی آن دشوار است.

- خوردگی: با استفاده از نـرخ خـوردگی، نـوع پوشـش، شرایط محیطی و سن لوله ارزیابی مـی‌شـود. افـزایش نـرخ خـوردگی از ۰/۱ بـه ۰/۵ میلـی‌متـر در سـال، احتمال نشت را ۵۰٪ افزایش می‌دهد.
- آسیب‌های مکانیکی: با استفاده از ضخامت لوله، فشـار داخلی، احتمال برخورد اجسام خارجی و عمـق دفـن ارزیابی می‌شود. افزایش عمـق دفـن از ۱ بـه ۲ متـر، احتمـال شکسـت ناشـی از برخـورد را ۳۰٪ کـاهش می‌دهد.
- خطرات طبیعی: با اسـتفاده از احتمـال وقـوع زلزلـه، زمین‌لغزش (بر اسـاس شـیب، نـوع خـاک و پوشـش گیاهی) و سیل (بر اساس ارتفاع، فاصله از رودخانـه و بارندگی) ارزیابی می‌شود. قرار گـرفتن در فاصـله ۱۰ کیلومتری از گسل، احتمال آسـیب بـه خـط لولـه در زلزله ۷ ریشتری را ۴۰٪ افزایش می‌دهد.
- نتایج: مدل، شاخص ریسک کلـی را بـرای هـر بخـش خط لوله محاسبه می‌کنـد (۱۰٪ احتمـال نشـت و ۱ میلیون دلار خسارت). استفاده از مدل در یک مطالعه موردی، ۲۰٪ از خطوط لولـه را «پرخطـر» شناسـایی کرد.

ژانـگ[2] و همکـاران (۲۰۲۰) رویکـردی نوآورانـه را بـا به‌کارگیری شبکه‌هـای بیـزین *(Bayesian Networks)* بـرای ارزیـابی ریسـک خطـوط لولـه و تحلیـل عـدم قطعیت‌ها ارائه دادند [۱۰]. در ایـن مـدل، شـبکه‌هـای بیزین به عنوان ابزاری قدرتمند برای ترکیـب داده‌هـای متنوع و محاسبه احتمال وقوع حـوادث مـورد اسـتفاده قرار گرفتند. نقطه قوت اصلی ایـن روش، قابلیـت ذاتـی آن در مـدیریت خودکـار عـدم قطعیـت‌هـای ناشـی از خطای اندازه‌گیری، تغییرات مکانی و کمبود داده اسـت که اغلب در مدل‌سازی ریسک مشاهده می‌شود. ژانگ و همکاران، به طور خاص، احتمال نشت خطوط لوله را بر اساس متغیرهایی نظیر خوردگی، فشـار داخلـی، دمـا و کیفیت جوش مدل‌سازی کردند. نتـایج آن‌هـا حـاکی از بهبود ۱۵ درصدی در دقت پیش‌بینـی نشـت و کـاهش ۲۰ درصدی در عدم قطعیت بود که خوردگی و کیفیت جوش را به عنـوان مهـم‌تـرین عوامـل مـؤثر بـر نشـت شناسایی کرد. با وجود مزایای قابـل توجـه شـبکه‌هـای بیزین در مدیریت عدم قطعیت و ترکیب داده‌هـا، نقطـه ضعف اصلی این مطالعه و رویکرد مشـابه، عـدم تمرکـز صریح بر مخاطرات محیطی گسترده و تعاملات پیچیده فضایی آن‌ها است. در حالی که این مدل به عوامل فنـی و عملیاتی خط لولـه مـی‌پـردازد، تحلیـل دقیـق تـأثیر پدیده‌های ژئوهارد مانند فرونشست و زلزلـه در مقیـاس منطقـه‌ای و مکـانی در ایـن پـژوهش غایـب اسـت. همچنین، تفسیر روابط پیچیـده در شـبکه‌هـای بیـزین بزرگ می‌تواند دشوار باشد و نیـاز بـه تخصـص بـالا در طراحی ساختار شبکه دارد. این امر، بکارگیری مستقیم این رویکرد را برای تحلیل جامع مخاطرات محیطـی در مقیاس فضایی بزرگ، بدون افزودن لایـه‌هـای تحلیلـی فضایی، محدود می‌سازد.

[1] *Guo*

[2] *Zhang*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

۲-۲- مطالعات ارزیابی ریسک خطوط لوله در اثر مخاطرات محیطی

علاوه بر مطالعات کلی، تعدادی از پژوهش‌ها به‌طور خاص به بررسی تأثیر مخاطرات محیطی بر خطوط لوله پرداخته‌اند.

عزیزی و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی روش‌های ارزیابی ریسک ناشی از انفجار خطوط لوله نفت و گاز و آثار مخرب زیست‌محیطی آن پرداخته‌اند. این مطالعه به خوبی نشان می‌دهد که انتخاب روش مناسب ارزیابی ریسک، تحت تأثیر عواملی همچون میزان داده‌های موجود، پیچیدگی فرآیند، دسترسی به اطلاعات و تخصص موردنیاز قرار دارد. از مدل‌های مورد بحث در این پژوهش می‌توان به روش‌های تعییناتی[1] و احتمالی[2] اشاره کرد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که روش‌های احتمالی در مقایسه با روش‌های تعیینیاتی، نتایج دقیق‌تری در ارزیابی ریسک انفجار ارائه می‌دهند. با این حال، نقطه ضعف اصلی این مطالعه از منظر پژوهش حاضر، تمرکز خاص آن بر مخاطره "انفجار" است و سایر مخاطرات محیطی گسترده‌تر مانند فرونشست، زلزله یا زمین‌لغزش را به صورت جامع مورد بررسی قرار نمی‌دهد. این محدودیت موضوعی، قابلیت تعمیم نتایج آن را به تحلیل جامع‌تر آسیب‌پذیری خطوط لوله در برابر طیف وسیعی از مخاطرات محیطی کاهش می‌دهد. علاوه بر این، پژوهش مقایسه کمی و دقیقی بین روش‌های تعیینیاتی و احتمالی از نظر دقت عددی، کارایی محاسباتی، یا تحلیل هزینه-فایده در شرایط واقعی ارائه نکرده است. این کمبود در تحلیل کمی و مقایسه‌ای، مانع از انتخاب بهینه روش‌ها برای سناریوهای مختلف می‌گردد و نیاز به مطالعاتی با رویکرد کمی‌تر در این زمینه را برجسته می‌سازد.

معصومی و قهرمانی (۲۰۲۳) در مطالعه خود به ارزیابی کمی ریسک ناشی از نشت نفت از یک خط لوله ۳۵ کیلومتری خاص پرداخته‌اند [۵]. این پژوهش با استفاده از مدل تحلیل کمی ریسک[3] (*QRA*) و بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تخصصی *OLGA* و *PHAST*، به شبیه‌سازی دقیق و مدل‌سازی پیامدهای نشت پرداخته است. نرم‌افزار *OLGA* برای شبیه‌سازی جریان نفت و گاز و تعیین نرخ و گسترش نشت با دقت بالا (خطای ۵ درصدی) به کار رفته است. در ادامه، *PHAST* برای مدل‌سازی پیامدهای نشت شامل ابر بخار، آتش‌سوزی و انفجار و ارزیابی خسارات جانی و مالی با دقت مناسب (خطای ۱۰ درصدی) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد که شکستگی کامل خط لوله می‌تواند منجر به رها شدن ۵۰۰۰ مترمکعب نفت و آلودگی ۲۰ کیلومترمربع از اراضی شود، در حالی که خطر مرگ یا جراحت برای ۱۰۰۰ نفر و خسارات مالی ۱۰ میلیون دلاری برآورد شده است. نقطه قوت این پژوهش، دقت بالای مدل‌سازی پیامدهای نشت با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی و ارائه ارزیابی کمی از خسارات است. با این حال، نقطه ضعف اصلی آن، محدود بودن دامنه تحقیق به یک خط لوله خاص و تمرکز صرف بر نشت و پیامدهای آن، بدون در نظر گرفتن جامعیت مخاطرات محیطی مؤثر بر شکستگی خطوط لوله (نظیر فرونشست و زلزله) در مقیاس وسیع‌تر جغرافیایی است. در واقع، این مطالعه به مکانیسم وقوع شکستگی ناشی از عوامل محیطی و تحلیل فضایی این پدیده‌ها نمی‌پردازد و بیشتر بر پیامدهای پس از نشت متمرکز است. همچنین، استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند *OLGA* و *PHAST*، هرچند دقت را افزایش می‌دهد، اما نیازمند داده‌های ورودی بسیار دقیق و بعضاً دشوار در دسترس برای شبیه‌سازی در مقیاس‌های بزرگ‌تر است، که این امر می‌تواند تعمیم‌پذیری و کاربرد آن را در مطالعات منطقه‌ای با دسترسی محدود به داده‌های بسیار ریز، چالش‌برانگیز سازد.

[1] *Deterministic Methods*
[2] *Probabilistic Methods*
[3] *Quantitative Risk Assessment*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

طرفی علیوی و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش خود، با استفاده از نرم‌افزار تخصصی *PHAST*، به ارزیابی پیامد و تعیین حریم ایمن در ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی پرداختند [۶]. این مطالعه با مدل‌سازی سناریوهای انتشار و انفجار گاز، نشان داد که محدوده‌های با پتانسیل خطر بالا به ویژه مربوط به انتشار و انفجار گاز است و بیشترین محدوده خطر (با شعاع ۵۰۰ متر) متعلق به سناریوی انفجار گاز می‌باشد. نتایج این تحقیق، فواصل ایمن مورد نیاز برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از انفجار گاز را بر اساس سناریوهای مختلف انتشار گاز به دقت تعیین کرده است. نقطه قوت این پژوهش، ارائه یک روش دقیق برای تعیین حریم ایمن در اطراف تأسیسات گازی خاص و دقت بالای نرم‌افزار *PHAST* در مدل‌سازی پیامدها است. با این حال، نقطه ضعف عمده آن از دیدگاه پژوهش حاضر، محدود بودن دامنه تحقیق به یک نوع خاص از تأسیسات (ایستگاه تقلیل فشار گاز) و تمرکز صرف بر مخاطرات ناشی از "انتشار و انفجار گاز" است. این مطالعه خطرات ناشی از سایر عوامل محیطی مانند فرونشست، زلزله، یا زمین‌لغزش را که می‌توانند منجر به آسیب به خطوط لوله متصل به این تأسیسات شوند، در نظر نگرفته است. این محدودیت، توانایی تعمیم نتایج را به شبکه گسترده خطوط لوله که در معرض طیف وسیع‌تری از مخاطرات قرار دارند، کاهش می‌دهد و نشان‌دهنده نیاز به رویکردهای جامع‌تری است که بتوانند تمامی عوامل محیطی مؤثر بر آسیب‌پذیری زیرساخت‌های نفت و گاز را مورد تحلیل قرار دهند.

مرور جامع مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی به ارزیابی ریسک و پیامدهای حوادث در خطوط لوله نفت و گاز پرداخته‌اند، اما چندین خلأ مهم تحقیقاتی در این زمینه وجود دارد که نیاز به توجه بیشتر دارند:

اولاً، بسیاری از مطالعات بر روی مخاطرات خاص (مانند انفجار یا نشت) یا عوامل فنی و عملیاتی تمرکز کرده‌اند و به تحلیل جامع و هم‌زمان طیف وسیعی از مخاطرات محیطی فعال (مانند فرونشست، زلزله، و زمین‌لغزش) و تعاملات پیچیده آن‌ها با یکدیگر در محیط‌های جغرافیایی خاص کمتر پرداخته‌اند. در نتیجه، تصویر کاملی از تأثیر ترکیبی این عوامل بر آسیب‌پذیری خطوط لوله ارائه نشده است.

ثانیاً، در بسیاری از موارد، پژوهش‌های موجود فقدان رویکردهای کمی و فضایی دقیق برای مدل‌سازی ارتباط بین این مخاطرات محیطی و وقوع شکستگی خطوط لوله را نشان می‌دهند .اغلب مطالعات به چارچوب‌های نظری کلی بسنده کرده یا فاقد تحلیل‌های فضایی با رزولوشن بالا برای شناسایی نقاط داغ خطر و مناطق آسیب‌پذیر بوده‌اند. عدم ارائه داده‌های کمی و تحلیل‌های موردی خاص، کاربرد نتایج در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و برنامه‌ریزی‌های مکانی را محدود می‌سازد.

ثالثاً، داده‌های مورد استفاده در برخی مطالعات با محدودیت‌هایی از نظر دقت مکانی، کامل بودن یا به‌روز بودن همراه بوده‌اند .این کمبودها، به طور مستقیم بر اعتبار و تعمیم‌پذیری نتایج تأثیر می‌گذارند و نیاز به استفاده از داده‌های دقیق‌تر و تحلیل‌های فضایی قوی‌تر را در مناطق حساس برجسته می‌سازند.

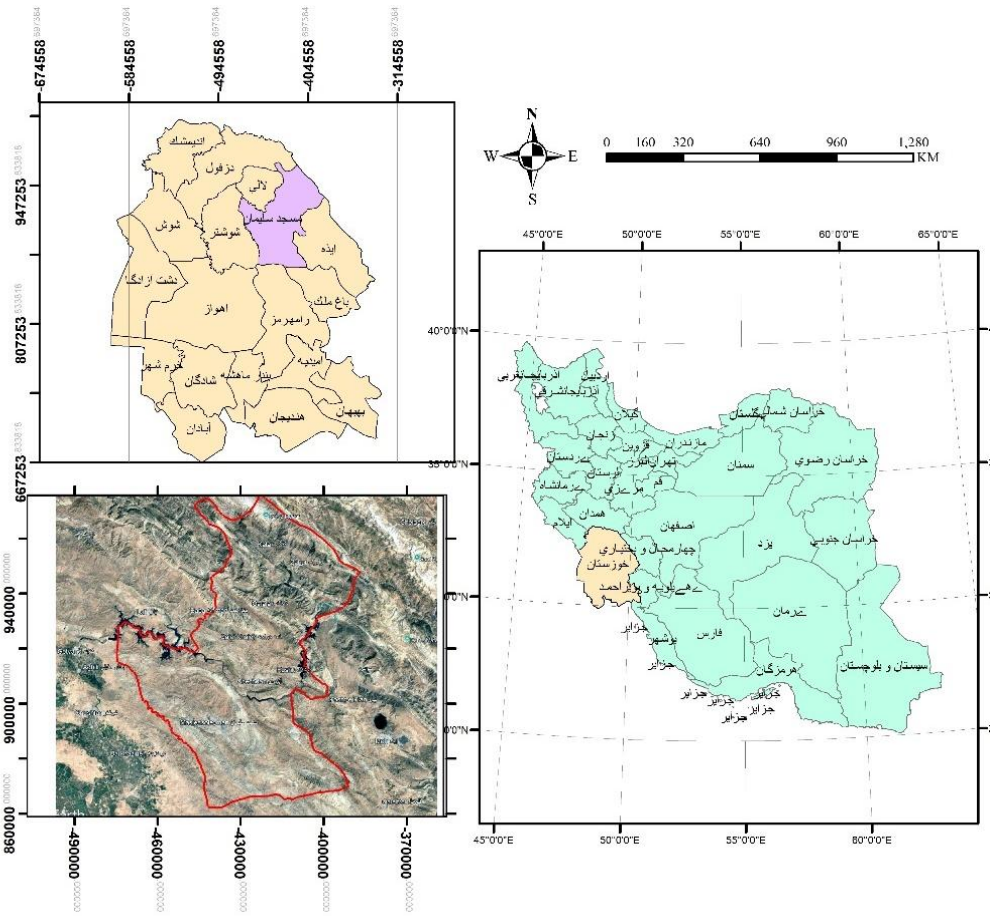
در نهایت، با وجود اهمیت مناطق نفت‌خیز در کشورهایی مانند ایران، مطالعات کمی و کاربردی که به تحلیل دقیق مخاطرات محیطی بر خطوط لوله در این مناطق با رویکردهای فضایی-آماری نوین بپردازند، همچنان محدود است .این کمبودها، لزوم انجام پژوهشی را فراهم می‌آورد که با تمرکز بر این خلأها، چارچوبی جامع برای ارزیابی ریسک خطوط لوله در برابر مخاطرات محیطی در مناطق حساس ارائه دهد.

۳- منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در شهرستان مسجدسلیمان، یکی از مهم‌ترین مناطق نفت‌خیز ایران، انجام‌شده است (شکل(۱)). این منطقه با مساحت حدود ۶۷۰۰ کیلومترمربع، دارای توپوگرافی متنوعی شامل ارتفاعات، دره‌ها و دشت‌ها است. مسجدسلیمان به دلیل قرار

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

گرفتن در دامنه‌های زاگرس مرکزی و داشتن گسل‌های متعـدد، ازنظـر تکتـونیکی فعـال بـوده و در معـرض مخـاطرات طبیعـی ماننـد زلزلـه، فرونشسـت زمـین و زمین‌لغزش قرار دارد [۱۱]. برداشت بـی‌رویـه از منـابع آب زیرزمینی و تغییرات اقلیمی نیز پدیده فرونشست را در این منطقه تشدید کرده است. مسجدسلیمان میزبان شبکه گسترده‌ای از خطوط لوله نفـت و گـاز اسـت کـه نقش حیاتی در انتقال انرژی کشور ایفا مـی‌کننـد. ایـن خطـوط کـه صـدها کیلـومتر طـول دارنـد، از منـاطق نفت‌خیز جنوبی و غربی شهرستان به سمت پالایشگاه‌ها و پایانه‌های صادراتی امتداد می‌یابند [۱۲]. خطوط لوله نفت و گاز در مسجدسلیمان به دلیل شرایط جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه، در معـرض مخـاطرات محیطـی متعددی قرار دارند. عبور این خطوط از مناطق با شـیب تند و ناپایدار، خطر زمـین‌لغـزش را افـزایش مـی‌دهـد. فعالیت گسل‌های فعال، خطر زلزله و جابه‌جایی زمین را بالا می‌برد. پدیده فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی نیز می‌تواند باعـث ایجـاد تـنش در خطوط لوله و افزایش احتمال شکستگی آن‌ها شود. این عوامـل، خطـوط لولـه نفـت و گـاز در ایـن منطقـه را به‌طورجدی تهدید کرده و نیـاز بـه ارزیـابی و مـدیریت ریسک دقیق را آشکار می‌سازند.



شکل ۱: محدوده شهرستان مسجدسلیمان برروی تصاویر ماهوارهای

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

۴- مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر مخاطرات محیطی بر شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان، از روش تحلیل نسبت فراوانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (*GIS*) استفاده کرده است. در این راستا، ابتدا داده‌های مربوط به شکستگی‌های رخداده در منطقه و داده‌های مربوط به عوامل مؤثر بر آن جمع‌آوری و پردازش شدند. سپس، با استفاده از مدل نسبت فراوانی، ارتباط بین این عوامل و شکستگی خطوط لوله تحلیل شد. درنهایت، نتایج حاصل در محیط *GIS* برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر مورداستفاده قرار گرفتند. تمام داده‌های مورداستفاده در این پژوهش در سیستم اطلاعات جغرافیایی (*GIS*) با استفاده از نرم‌افزار *ArcGIS* پردازش و تحلیل شدند. روش‌های مختلفی برای ارزیابی ریسک خطوط لوله وجود دارد، اما در این پژوهش، روش تحلیل نسبت فراوانی به دلایل زیر انتخاب شد: سادگی و سهولت اجرا، قابلیت تحلیل داده‌های فضایی، کارایی در شناسایی مناطق پرخطر و مناسب بودن برای داده‌های موجود. این روش به‌طور مؤثری مناطق با احتمال بالای وقوع شکستگی را شناسایی می‌کند و با توجه به نوع و ماهیت داده‌های موجود برای منطقه موردمطالعه، مناسب‌ترین گزینه برای ارزیابی ریسک شکستگی خطوط لوله بود. درمجموع، مدل نسبت فراوانی با ارائه یک روش کمی، عینی و قابل‌اعتماد برای تحلیل شکست خطوط لوله، نقش مهمی در بهبود مدیریت ریسک و افزایش ایمنی این زیرساخت‌های حیاتی ایفا می‌کند. این مدل با شناسایی مناطق پرخطر، درک بهتر عوامل مؤثر و فراهم کردن اطلاعات دقیق و قابل‌اعتماد، به مدیران و تصمیم‌گیریان کمک می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌تری درزمینه مدیریت خطوط لوله اتخاذ کنند و از بروز حوادث ناگوار جلوگیری کنند[۱۴]. تحقیق حاضر به‌منظور ارزیابی فضایی-آماری شکستگی خطوط نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان تحت تأثیر مخاطرات محیطی، از مدل تحلیل نسبت فراوانی استفاده نموده است. همان‌طور که ذکر شد، مدل تحلیل نسبت فراوانی یک روش آماری-فضایی است که برای ارزیابی ارتباط بین پدیده‌های مختلف و عوامل مؤثر بر آن‌ها استفاده می‌شود. این مدل در ارتباط با داده‌های مکانی و رخدادهای نادر کاربرد فراوانی دارد. اساس این مدل بر این ایده استوار است که احتمال وقوع یک پدیده در یک منطقه خاص، با فراوانی وقوع آن پدیده در آن منطقه نسبت مستقیم دارد. به‌عبارت‌دیگر، هرچه فراوانی رخداد یک پدیده در یک منطقه بیشتر باشد، احتمال وقوع آن پدیده در آینده نیز در آن منطقه بیشتر خواهد بود.

۴-۱- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل دودسته اصلی بودند: داده‌های شکستگی خطوط لوله و داده‌های عوامل مؤثر.

- داده‌های شکستگی خطوط لوله شامل موقعیت جغرافیایی نقاطی است که در آن‌ها شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ رخ داده است و از شرکت بهره‌بردار خطوط لوله در منطقه مسجدسلیمان به دست آمد.
- لایه اطلاعاتی شامل نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله با وضوح مکانی ۱:۲۵۰،۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. این نقشه بر اساس داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و تحلیل گسل‌های فعال منطقه تهیه‌شده است. وضوح زمانی این داده‌ها به‌صورت پهنه‌های با خطر نسبی بالا، متوسط و کم می‌باشد.
- مشاهدات میدانی شامل نقاط کنترل فرونشست با دقت ۵ سانتیمتر. داده‌های ماهواره‌ای مربوط به سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ می‌باشد.
- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با وضوح مکانی ۱:۵۰،۰۰۰ بر اساس داده‌های توپوگرافی (مدل رقومی ارتفاع با وضوح ۳۰ متر از *SRTM*)، زمین‌شناسی (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی)

داده‌های عوامل مؤثر، شامل اطلاعات مربوط به

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

مخاطرات محیطی و سایر عوامل مؤثر بر شکستگی خطوط لوله است. عوامل مورد بررسی در این پژوهش عبارت‌اند از زلزله (لایه اطلاعاتی از سازمان زمین‌شناسی)، فرونشست زمین (بر اساس داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی)، زمین‌لغزش (بر اساس داده‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و پوشش گیاهی).

۴-۲- مدل نسبت فراوانی

مدل تحلیل نسبت فراوانی، یک روش آماری-فضایی است که برای ارزیابی ارتباط بین وقوع یک پدیده (در این پژوهش، شکستگی خطوط لوله) و عوامل مؤثر بر آن استفاده می‌شود. اساس این مدل بر این ایده استوار است که احتمال وقوع یک پدیده در یک منطقه خاص، با فراوانی وقوع آن پدیده در آن منطقه نسبت مستقیم دارد .مراحل اجرای مدل تحلیل نسبت فراوانی در این پژوهش شامل تهیه لایه‌های اطلاعاتی، طبقه‌بندی عوامل مؤثر، محاسبه فراوانی شکستگی، محاسبه نسبت فراوانی و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر بود.

به تعداد تکرارهای هر مقدار از ستون رده یا حدود رده، «فراوانی»[1] می‌گویند. این مقدار در ستون فراوانی قرار می‌گیرد. باید در حالتی که حدود رده وجود دارد دقت کرد که یک مشاهده در دو رده شمارش نشود. به‌این‌ترتیب مجموع ستون فراوانی برای همه رده‌ها برابر با تعداد نمونه یا مشاهدات (n) خواهد بود. فراوانی مربوط به رده i ام را با f_i نشان می‌دهند. اگر فراوانی هر رده را به جمع فراوانی‌ها تقسیم کنیم، «فراوانی نسبی»[2] حاصل می‌شود. البته می‌توان مقدار این ستون را به‌صورت درصدی نیز نمایش داد. برای این کار کافی است حاصل تقسیم را در ۱۰۰ ضرب و حاصل را با علامت ٪ نشان داد. نماد مربوط به فراوانی نسبی رده i ام، به‌صورت r_i است [۱۲]. اگر تعداد کل فراوانی‌ها در جدول فراوانی را با n نشان داد، برای نمایش شیوه محاسبه فراوانی نسبی می‌توان از رابطه(۱) کمک گرفت [۱۳]:

$$r_i = \frac{f_i}{n}$$ رابطه(۱) (مرجع [۲۳])

در رابطه(۱):

- r_i: فراوانی نسبی رده i ام
- f_i: فراوانی مربوط به رده i ام
- n: تعداد کل فراوانی‌ها در جدول فراوانی

درنتیجه با ضرب طرفین این تساوی، می‌توان مقدار فراوانی را بر اساس فراوانی نسبی نیز طبق رابطه(۲) محاسبه کرد.

$$f_i = r_i \times n$$ رابطه(۲) (مرجع [۲۳])

جمع ستون فراوانی نسبی برابر با ۱ و در حالتی که مقدارهای آن به‌صورت درصدی باشند برابر با ۱۰۰٪ خواهد بود.

در حالتی که دو کمیت A و B با عدم قطعیت‌های ΔA و ΔB باشند، نسبت فراوانی به‌صورت رابطه(۳) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{A}{B}$$ رابطه(۳) (مرجع [۲۳])

در رابطه(۳):

- A: فراوانی رخداد پدیده در یک کلاس خاص از یک عامل
- B: فراوانی رخداد پدیده در کل منطقه

حال عدم قطعیت برای نسبت فراوانی‌های مدل شده در رابطه بالا، با استفاده از قانون انتشار خطاها به شکل رابطه(۴) بررسی می‌شود.

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{(\frac{\Delta A}{A})^2 + (\frac{\Delta B}{B})^2}$$ رابطه(۴) (مرجع [۲۳])

و عدم قطعیت مطبق برای ΔR به‌صورت رابطه(۵) محاسبه می‌شود.

$$\Delta R = R.\sqrt{(\frac{\Delta A}{A})^2 + (\frac{\Delta B}{B})^2}$$ رابطه(۵) (مرجع [۲۳])

توزیع نسبت فراوانی با عدم قطعیت[3] به بررسی چگونگی توزیع احتمالی نسبت دو کمیت می‌پردازد، زمانی که هر یک از این کمیت‌ها با عدم قطعیت همراه باشند. این مفهوم در تحلیل داده‌ها، آمار و علوم تجربی

[1] *Frequency*
[2] *Relative Frequency*
[3] *Distribution of Frequency Ratio with Uncertainty*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

کاربرد دارد و به‌ویژه زمانی مهم است که عـدم قطعیـت در نسبت‌های محاسبه‌شده مدل‌سازی شود.

در این صورت اگر A و B هر دو از توزیع نرمـال پیـروی نمایند، یعنی از رابطه(۶) پیروی نمایند.

رابطه(۶) (مرجع [۲۳])

$$A\sim N(\mu A.\sigma_A^2).B\sim N(\mu B.\sigma_B^2).$$

در رابطه(۶) داریم:

- $\sim N$: توزیـــع نرمـــال
- $A\mu A$: میانگین کمیت A
- σ_A^2: واریانس کمیت A
- $B\sim N$: توزیـع نرمـال کمیت B
- μB: میانگین کمیـت B
- σ_B^2: واریـانس کمیـت B

آنگاه توزیع نسبت $R=\frac{A}{B}$ به‌طورکلی یک توزیع نرمال نخواهد بود، بلکه از توزیع نسبت دو متغیر نرمال پیروی می‌کند. این توزیع به‌صورت تحلیل پیچیـده اسـت، امـا می‌توان آن را با روش‌های عددی یا تقریـب‌هـا بررسـی کرد.

۴-۳- تحلیل تراکم کرنل

تحلیل تراکم کرنل یک روش نا پارامتری برای تخمـین تابع چگالی احتمال[1] یک متغیر تصادفی است، بر اسـاس یک مجموعه داده محدود. به‌عبـارت‌دیگـر، KDE[2] راهـی برای هموارسازی داده‌های نقطه‌ای و ایجاد یک تخمـین پیوسته از توزیع زیربنایی آن‌ها است. (x) در یک نقطـه x بـا اسـتفاده از KDE بـه‌صـورت رابطـه(۷) محاسـبه می‌شود:

رابطه(۷) (مرجع [۲۴])

$$\left(\frac{x_i+x}{h}\right)K\sum_{i=0}^{n}\left(\frac{1}{nh}\right)=(x)\hat{}f$$

در رابطه(۷):

- n تعداد نقاط داده است.
- xi مقدار i- امین نقطه داده است.

[1] *Probability Density Function - PDF*
[2] *Kernel Density Estimation - KDE*

- $h>0$ پهنای باند[3] یا پارامتر هموارسازی اسـت. ایـن پارامتر تعیین می‌کنـد کـه چقـدر تخمـین چگـالی هموار باشد.
- $K(\cdot)$ تابع کرنل[4] است. این‌یک تابع وزن دهی اسـت که تعیین می‌کند چگونه هر نقطه داده در تخمـین چگالی در نقطه x مشارکت می‌کند. کرنـل معمـولاً یک تابع غیرمنفی، متقارن و با انتگرال واحد است.

توابـع کرنـل رایـج شـامل گاوسـی[5]، اپـانچنیکوف[6]، یکنواخـت[7]، مثلثـی[8] و کوارتیـک[9] هسـتند. ازنظـر محاسباتی، انتخاب کرنل معمولاً تأثیر قابـل‌تـوجهی بـر پیچیدگی محاسباتی ندارد، زیرا ارزیابی تابع کرنل برای هـر نقطـه داده در هـر نقطـه تخمـین موردنیـاز اسـت. پیچیدگی بستگی به پیچیدگی خود تابع کرنل دارد. در این تحقیق به‌منظور ارزیابی شکستگی خطـوط نفـت و گاز از تابع کرنل گوسی استفاده‌شده است؛ که رابطه آن به شرح ذیل می‌باشد.

رابطه(۸) (مرجع [۲۴])

$$\mathrm{k(u)}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}u^2}$$

در رابطه(۸) داریم:

- $u=\frac{x-x_i}{h}$ فاصله بین نقطه تخمین x و نقطـه داده xi را نسبت به پهنای باند h نرمال‌سازی می‌کند.
- e عدد نپر (پایه لگاریتم طبیعی) است.
- $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$ این‌یک عامل نرمـال‌سـازی اسـت کـه تضـمین می‌کند انتگرال تابع کرنل برابر با ۱ باشد.
- $e^{-\frac{1}{2}u^2}$ این بخش، هسته اصلی تـابع گاوسـی اسـت. این‌یک تابع زنگوله‌ای شـکل متقـارن اسـت کـه در $u=0$ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و به‌سـرعت بـا افزایش $/u/$ صفر میل می‌کند.

[3] *bandwidth*
[4] *kernel function*
[5] *Gaussian*
[6] *Epanechnikov*
[7] *Uniform*
[8] *Triangular*
[9] *Quartic*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

شکل تابع کرنل گاوسی یک منحنی زنگوله‌ای شکل متقارن است که در مرکز آن (جایی که $u=0$) به اوج خود می‌رسد و به‌طور پیوسته با دور شدن از مرکز به سمت صفر میل می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود که نقاط داده نزدیک به نقطه تخمین، وزن بیشتری در تخمین چگالی داشته باشند، درحالی‌که نقاط دورتر، تأثیر کمتری می‌گذارند.

با استفاده از تابع کرنل گاوسی، تخمین چگالی (x) در یک نقطه x توسط رابطه(۹) محاسبه می‌شود:

رابطه(۹) (مرجع [۲۴])

$$f(x) = \left(\frac{1}{nh}\right)\sum_{i=0}^{n} k\left(\frac{x_i+x}{h}\right) = \left(\frac{1}{nh}\right)\sum_{i=0}^{n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i+x}{h}\right)^2}$$

پهنای باند یک پارامتر بحرانی است که میزان هموارسازی تخمین چگالی را کنترل می‌کند .روش‌های مختلفی برای انتخاب پهنای باند وجود دارد، ازجمله قوانین سرانگشتی (مانند قانون سیلورمن و قانون اسکات) و روش‌های مبتنی برداده (مانند اعتبارسنجی متقابل). ازنظر محاسباتی، انتخاب پهنای باند معمولاً یک مرحله پیش‌پردازش است و مستقیماً بر پیچیدگی محاسبه $f(x)$ تأثیر نمی‌گذارد، اما بر کیفیت نتیجه نهایی تأثیر می‌گذارد. یک روش رایج برای انتخاب h، قانون سیلورمن[1] است (که برای کرنل گوسی به شرح ذیل محاسبه می‌شود):

رابطه(۱۰) (مرجع [۲۴])

$$h = \left(\frac{4\hat{\sigma}^5}{3n}\right)^{1/5} \approx 1.06\hat{\sigma}n^{-1/5}$$

در رابطه(۱۰) داریم:

- $\hat{\sigma}$ نحراف معیار نمونه‌ای داده‌ها می‌باشد.

در *GIS*، *KDE* اغلب برای ایجاد نقشه‌های تراکم از داده‌های نقطه‌ای (مانند موقعیت جرم‌ها، تصادفات، یا گونه‌های گیاهی) استفاده می‌شود. در این حالت، n تعداد نقاط داده است و m تعداد پیکسل‌های نقشه خروجی است. اگر نقشه دارای وضوح بالایی باشد، m می‌تواند بسیار بزرگ باشد و هزینه محاسباتی قابل‌توجه خواهد بود. به همین دلیل، بهینه‌سازی‌های محاسباتی در نرم‌افزارهای *GIS* برای انجام تحلیل تراکم کرنل بر روی مجموعه داده‌های بزرگ بسیار مهم هستند. به‌طور خلاصه، تحلیل تراکم کرنل ازنظر محاسباتی شامل انتخاب کرنل و پهنای باند و سپس محاسبه تخمین چگالی در نقاط موردنظر با جمع‌آوری مشارکت هر نقطه داده با استفاده از تابع کرنل است. پیچیدگی محاسباتی پایه $O(m \cdot n)$ است، اما روش‌های بهینه‌سازی می‌توانند این پیچیدگی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند.

۴-۴- رگرسیون فضایی

با توجه به ماهیت فضایی پدیده شکستگی خطوط لوله و توزیع مکانی عوامل مؤثر بر آن، استفاده از مدل‌های رگرسیون فضایی برای تحلیل روابط علت و معلولی و در نظر گرفتن وابستگی‌های مکانی ضروری است. مدل‌های رگرسیون خطی معمولی (*OLS*) فرض می‌کنند که مشاهدات از یکدیگر مستقل هستند و این فرض در مورد داده‌های فضایی اغلب نقض می‌شود که منجر به برآوردگرهای ناکارا و بایاس شده می‌گردد. از این رو، برای غلبه بر این محدودیت و بهره‌مندی از اطلاعات مکانی، از رگرسیون فضایی استفاده شد.

رگرسیون فضایی[2] یک روش آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل داده‌های مکانی استفاده می‌شود و در آن وابستگی فضایی[3] بین مشاهدات در نظر گرفته می‌شود. برخلاف رگرسیون معمولی که فرض می‌کند

[1] *Silverman's Rule of Thumb*

[2] *Spatial Regression*

[3] *Spatial Dependence*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

داده‌ها مستقل هستند، رگرسیون فضایی ایـن فـرض را رد می‌کند و ارتباط بـین نقـاط مجـاور را در مـدل وارد می‌سازد. مدل تأخیر فضایی، در این مدل، متغیر وابسته در یک منطقه نه‌تنها تحـت تـأثیر متغیرهـای مسـتقل همان منطقه، بلکه تحت تأثیر مقادیر متغیر وابسـته در مناطق همسایه قرار می‌گیرد (رابطه(۱۱)).

$$y=\rho Wy+X\beta+\epsilon \qquad \text{رابطه(۱۱)}$$

در رابطه(۱۱) داریم:

Y: بردار مقادیر متغیر وابسته در n مکان مختلف است (n تعداد مشاهدات است).

X: مـاتریس مقـادیر متغیرهـای مسـتقل در n مکـان مختلف است.

B: بردار ضرایب متغیرهای مستقل است.

P: ضریب تـأخیر فضـایی اسـت کـه قـدرت وابسـتگی فضایی را نشان می‌دهد.

W: ماتریس وزن فضایی است که روابط همسایگی بین مکان‌ها را تعریف می‌کند.

Wy: بردار تأخیر فضایی متغیر وابسته است. این بردار، میانگین وزنـی مقـادیر متغیـر وابسـته در مکـان‌هـای همسایه هر مکان را نشان می‌دهد.

ϵ: بردار خطا است.

مـاتریس وزن فضـایی (W) سـاختار فضـایی داده‌هـا را تعیین مـی‌کنـد. هـر عنصـر wij از ایـن مـاتریس، وزن ارتباط بین مکـان iو مکـان j را نشـان مـی‌دهـد. اگـر مکـان‌هـای i و j همسـایه باشـند، wij مقـدار مثبتـی خواهد داشت. در غیر ایـن صـورت، wijبرابـر بـا صـفر خواهد بود. روش‌های مختلفی برای تعریـف همسـایگی وجـــود دارد، ازجملـــه: مـــاتریس وزن فضـــایی (W)، نشان‌دهنده ارتباط بین نقاط مختلف است و معمولاً بـر اساس معیارهای مجاورت دودویی، فاصله معکـوس و یـا مرزهای مشترک محاسبه خواهد شد. رگرسیون فضـایی به پژوهشـگران کمـک مـی‌کنـد تـا تـأثیر مکـان را در تحلیل‌هـای خـود لحـاظ کننـد و از خطـای مشخصـه-گذاری[1] جلوگیری نمایند. مدل تأخیر فضایی معمولاً بـا استفاده از روش حداکثر شباهت[2] تخمین زده می‌شـود. این روش، مقادیر پارامترهای ρ و β را به‌گونه‌ای تعیـین می‌کند که احتمال مشاهده داده‌هـای واقعـی، حـداکثر شود. مدل تأخیر فضایی، وابستگی فضـایی را در متغیـر وابسته (y) مدل می‌کند، درحالی‌که مدل خطای فضایی، وابستگی فضایی را در جملات خطا (ϵ) مـدل مـی‌کنـد. انتخـاب بـین ایـن دو مـدل بسـتگی بـه ایـن دارد کـه وابستگی فضایی در کدام بخـش از مـدل وجـود داشـته باشد. به‌طور خلاصـه، مـدل تـأخیر فضـایی یـک ابـزار قدرتمند برای تحلیل داده‌های فضایی است کـه بـه مـا امکان می‌دهد وابستگی فضایی را در متغیـر وابسـته در نظر بگیریم و روابط بین متغیرها را به‌طـور دقیـق‌تـری مدل کنیم.

پیش از اجرای رگرسـیون فضـایی، انجـام آزمـون‌هـای تشخیصـی بـرای تعیـین وجـود و نـوع خودهمبسـتگی مکانی در داده‌ها از اهمیت بالایی برخـوردار اسـت. ایـن آزمون‌ها به توجیه انتخاب نوع مناسب مـدل رگرسـیون فضایی (SLM)[3] یا (SEM)[4] کمک می‌کنند.

- آمـاره مـوران آی $(Moran's\ I)$: بـرای سـنجش خودهمبسـتگی مکـانی در متغیـر وابسـته (توزیـع شکستگی خطوط لوله) و همچنـین باقیمانـده‌هـای مدل OLS، از آماره موران آی اسـتفاده شـد. مقـدار این آماره بین -۱ تا +۱ متغیر است و مقادیر مثبـت نشان‌دهنده خوشه‌بندی و وابسـتگی مکـانی مثبـت

[1] *Specification Error*
[2] *Maximum Likelihood Estimation - MLE*
[3] *Spatial Lag Model*
[4] *Spatial Error Model*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

(مقادیر مشابه در مکان‌های نزدیک) و مقادیر منفی نشان‌دهنده پراکندگی و وابستگی مکانی منفی (مقادیر متفاوت در مکان‌های نزدیک) است.

- آزمون‌های تشخیصی خودهمبستگی فضایی : پس از اجرای مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی *(OLS)*، مجموعه‌ای از آزمون‌های تشخیصی رگرسیون فضایی شامل آزمون‌های رگرسیون لگ رنج مالتی پلایر فضایی و رگرسیون ارور لگ رنج مالتی پلایر فضایی *SEM* و نسخه‌های قوی *(Robust)*آن‌ها *SLM* انجام شد. این آزمون‌ها به ما کمک می‌کنند تا تعیین کنیم کدام نوع وابستگی فضایی (در متغیر وابسته یا در باقیمانده‌ها) غالب است و در نتیجه، کدام مدل فضایی *SLM* یا *SEM* برای داده‌های مورد مطالعه مناسب‌تر است .
- مدل تأخیر فضایی: این مدل زمانی مناسب است که خودهمبستگی فضایی در متغیر وابسته وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، مقدار متغیر وابسته در یک مکان خاص، به مقادیر همان متغیر در مکان‌های مجاور وابسته است. هدف *SLM* ، مدل‌سازی وابستگی مکانی در متغیر وابسته است.
- مدل خطای فضایی: این مدل زمانی مناسب است که خودهمبستگی فضایی در باقیمانده‌ها (خطاهای مدل) وجود داشته باشد و نه در متغیر وابسته. هدف *SEM*، مدل‌سازی وابستگی مکانی در خطاهای مدل است که نشان‌دهنده تأثیر عوامل حذف شده از مدل یا خطای اندازه‌گیری است که در فضا توزیع خوشه‌ای دارند.

بر اساس نتایج آزمون‌های تشخیصی، از آنجایی که آماره *SLM* معنی‌دار بود و آماره *SEL* معنی‌دار نبود، مدل تأخیر فضایی به عنوان مدل بهینه برای تحلیل روابط انتخاب شد. این انتخاب نشان می‌دهد که وابستگی مکانی غالب در متغیر وابسته (شکستگی خطوط لوله) وجود دارد و وقوع شکستگی در یک منطقه، تحت تأثیر شکستگی‌ها در مناطق مجاور قرار می‌گیرد.

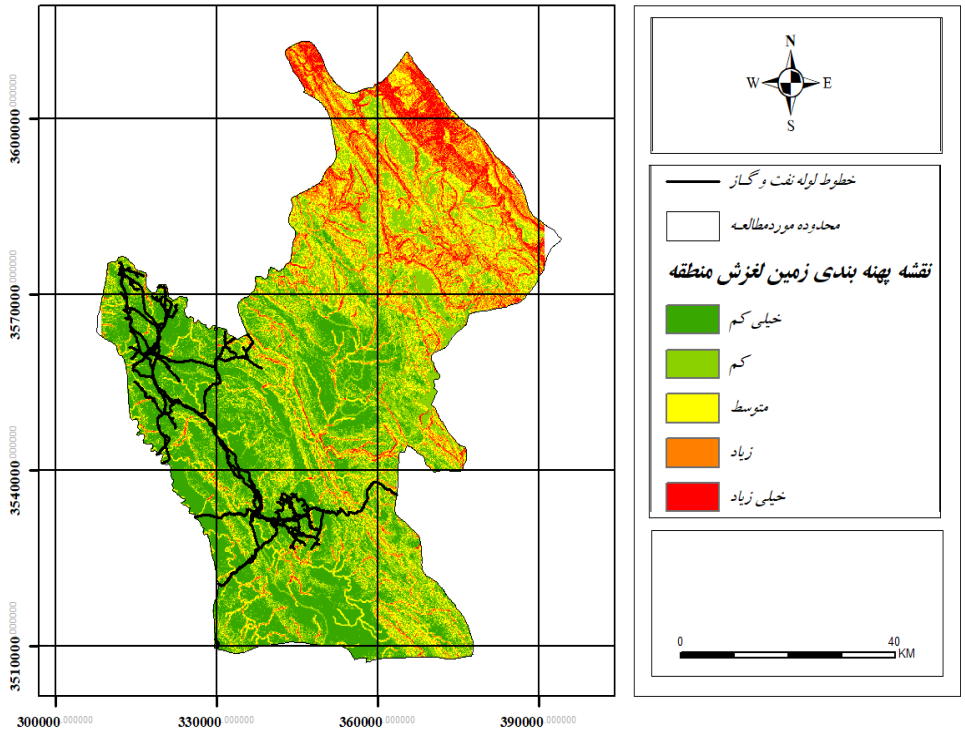
۴-۵- معیارهای مخاطرات محیطی

در این پژوهش، سه معیار اصلی مخاطرات محیطی شامل زلزله، فرونشست، زمین‌لغزش، به‌منظور تحلیل آسیب‌پذیری خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرارگرفته‌اند؛ که در ذیل به تشریح هرکدام پرداخته می‌شود.

۴-۵-۱- فرونشست

فرونشست زمین، ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تغییرات اقلیمی و عوامل زمین‌شناسی، خطوط لوله نفت و گاز را در معرض تغییر شکل، جابه‌جایی و شکستگی قرار می‌دهد [۱۶]. تحلیل نرخ فراوانی شکست، با مقایسه نرخ شکستگی در مناطق با درجات مختلف فرونشست، به ارزیابی تأثیر این پدیده کمک می‌کند. این تحلیل، اطلاعات مفیدی را برای مدیریت خطوط لوله، اتخاذ اقدامات پیشگیرانه (مانند تقویت خطوط لوله) و درک بهتر مکانیسم‌های شکستگی فراهم می‌کند. 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 را دارند، درحالی‌که مناطق دور از نقاط نمونه‌برداری واریانس بالاتری نشان دادند (شکل(۲)).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

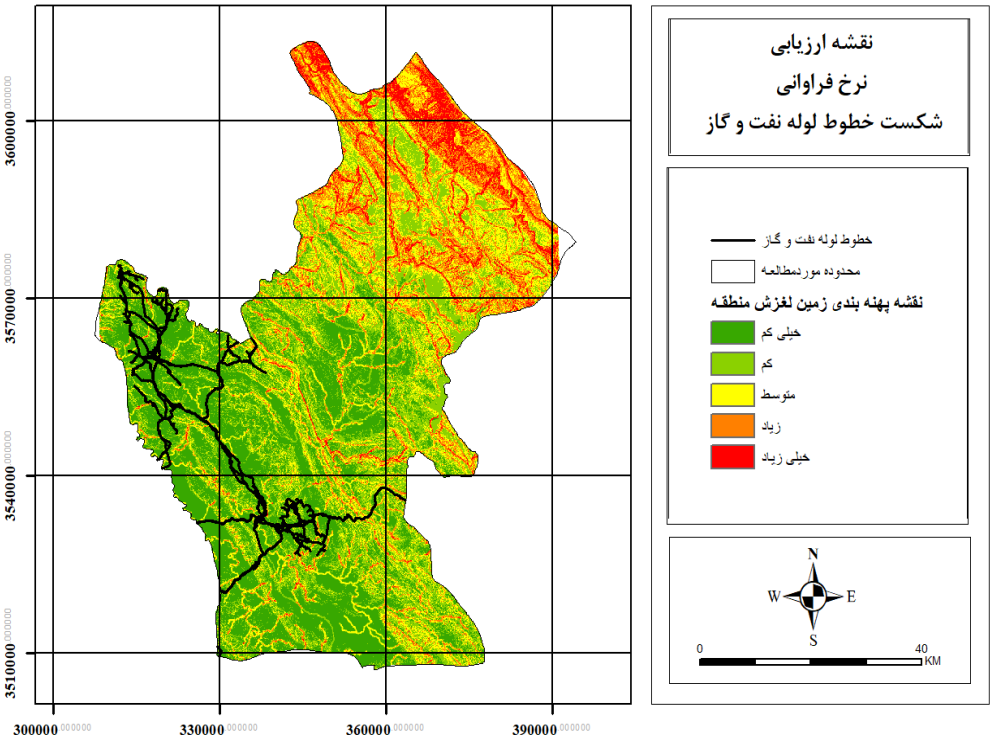


شکل ۲: نقشه پهنه‌بندی فرونشست منطقه مورد مطالعه

۴-۵-۲- زمین‌لغزش

زمین‌لغزش، به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی شایع در مناطق کوهستانی و شیب‌دار، می‌تواند تأثیرات مخربی بر خطوط لوله نفت و گاز داشته باشد. این پدیده که به دلیل عوامل مختلفی مانند بارندگی‌های شدید، شیب تند زمین و عوامل انسانی مانند تخریب پوشش گیاهی و ساخت‌وسازهای غیرمجاز رخ می‌دهد، می‌تواند منجر به جابه‌جایی و تغییر شکل خطوط لوله، ایجاد تنش‌های برشی و خمشی و درنهایت شکستگی آن‌ها شود. تحلیل نرخ فراوانی شکست، به‌عنوان یک روش آماری، می‌تواند به ارزیابی میزان تأثیر زمین‌لغزش بر شکستگی خطوط لوله کمک کند[۱۷]. 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 وزن‌دهی 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 (شکل(۳)).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]



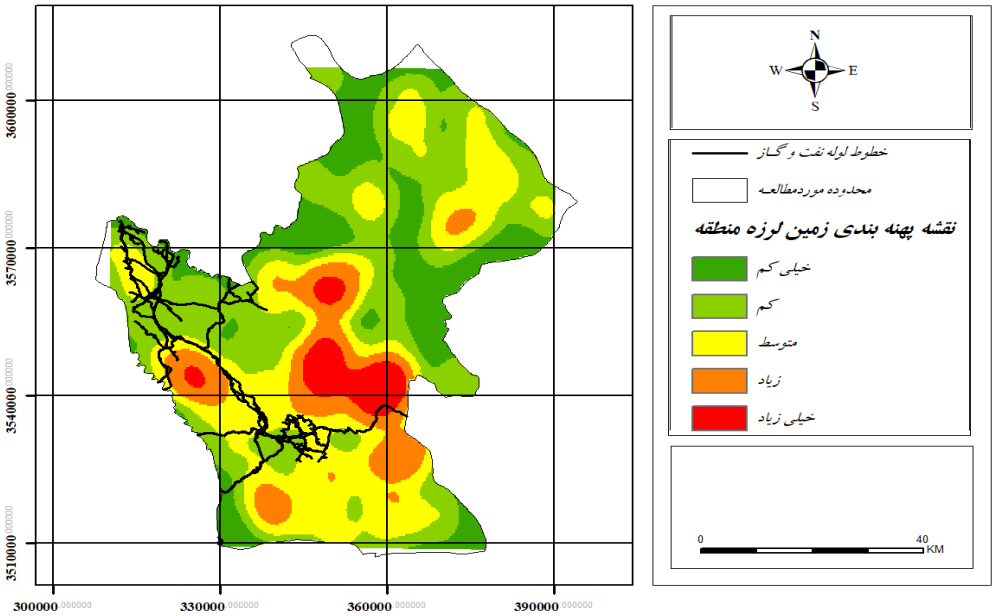
شکل ۳: نقشه پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه

۴-۵-۳- زلزله

تحلیل نرخ فراوانی شکست، با بررسی داده‌های زلزله‌های گذشته و شکستگی خطوط لوله، تأثیر زلزله را بر شکستگی ارزیابی می‌کند [۱۸]. چالش‌های این تحلیل شامل ماهیت دینامیکی زلزله، گستردگی تأثیر آن و پیچیدگی عوامل مؤثر است. باوجوداین چالش‌ها، این تحلیل، اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت خطوط لوله در مناطق زلزله‌خیز فراهم می‌کند و به بهبود ایمنی و جلوگیری از خسارات کمک می‌کند. 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[1] 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 (شکل(۴)).

[1] *FAHP*

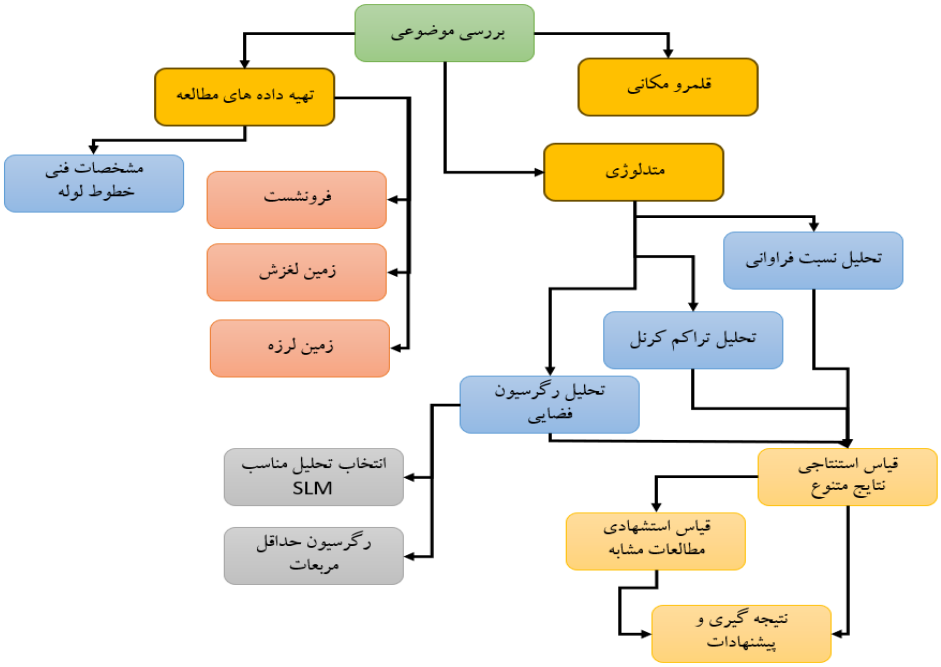
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]



شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه

۵- پیاده‌سازی مدل و نتایج

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل دقیق‌تر عوامل مؤثر بـر شکستگی خطوط لوله نفت و گاز، علاوه بر روش تحلیل نسـبت فراوانـی، روش‌هـای تحلیـل تـراکم کرنـل و رگرسیون فضایی نیز مورداستفاده قرار گرفت. کلیه روند پیاده سازی مدل مورد استفاده در این تحلیل به صورت خلاصه در فلوچارت شکل(۵) نمایش داده شـده اسـت.



شکل ۵: فلوچارت مدل مورد استفاده در تحقیق

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

در شیوه تحلیل فراوانی نسبی، برای ارزیابی احتمال وقوع شکستگی خطوط لوله بر اساس نسبت رخدادها در هر کلاس از مخاطرات محیطی استفاده شد. داده‌های زلزله، فرونشست و زمین‌لغزش به پنج کلاس (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد) تقسیم‌شده و برای هر کلاس، تعداد رخدادهای شکستگی (A) و مساحت کل منطقه (B) محاسبه گردید (جدول(۱)).

بر اساس محاسبات انجام‌شده با استفاده از رابطه(۱) (فراوانی نسبی)، نتایج نشان می‌دهد که در مناطق با پتانسیل زلزله بسیار کم (۱۱ رخداد) نسبت فراوانی ۰,۵۲ محاسبه‌شده است. این مقدار در مناطق با پتانسیل کم به حداکثر مقدار خود (۰,۷۶ برای ۴۳ رخداد) می‌رسد که نشان‌دهنده بالاترین سطح خطر در این مناطق است. جالب‌توجه است که با افزایش پتانسیل زلزله به سطوح زیاد و بسیار زیاد، نسبت فراوانی به ترتیب به ۰,۰۳ (۲ رخداد) و ۰,۰۱ (۱ رخداد) کاهش می‌یابد. این الگوی غیرمنتظره می‌تواند ناشی از طراحی متفاوت لوله‌ها در مناطق پرخطر یا اثر تجمعی تنش‌های محیطی باشد.

محاسبات نسبت فراوانی بر اساس رابطه(۳)، نشان داد که بیشترین مقدار این شاخص (۰,۳۰۵) مربوط به مناطق با پتانسیل فرونشست زیاد (۲۲ رخداد) است. این نتیجه با رابطه مستقیم بین شدت فرونشست و احتمال شکستگی لوله‌ها همخوانی دارد. در مقابل، مناطق با پتانسیل بسیار کم فرونشست کمترین نسبت فراوانی (۰,۰۴۲ برای ۶ رخداد) را نشان دادند. عدم قطعیت محاسبات با استفاده از رابطه (۵) تأیید کرد که خطای نتایج در حد قابل قبولی (±۵٪) قرار دارد.

جدول ۱: اطلاعات کلی نسبت فراوانی و لایه‌های مخاطرات محیطی و کلاس با بیشترین تأثیر

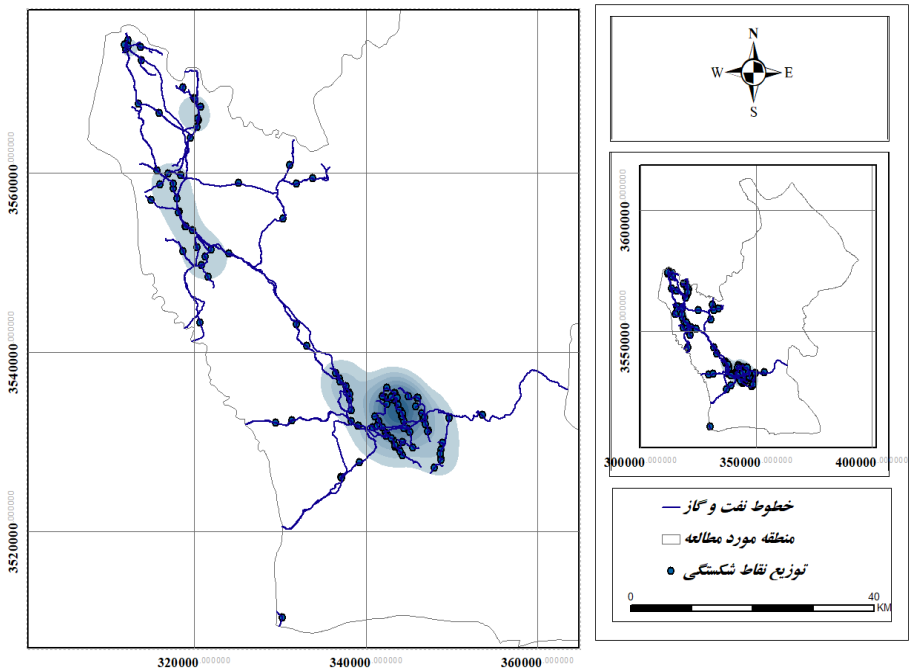
نسبت فراوانی	شکستگی لوله	تعداد رخداد	کلاس طبقاتی	لایه محاسباتی
۰/۱۲	گزارش‌شده	۱۱	پتانسیل بسیار کم	مناطق با پتانسیل وقوع زلزله
۰/۷۶	گزارش‌شده	۴۳	پتانسیل کم	
۰/۵	گزارش‌شده	۳۹	پتانسیل متوسط	
۰/۰۳	گزارش‌شده	۲	پتانسیل زیاد	
۰/۰۱	گزارش نشده	۱	پتانسیل بسیار زیاد	
۰/۰۴۲	گزارش‌شده	۶	پتانسیل بسیار کم	مناطق با پتانسیل وقوع فرونشست
۰/۰۶۳	گزارش‌شده	۸	پتانسیل کم	
۰/۰۸۴	گزارش‌شده	۲۹	پتانسیل متوسط	
۰/۳۰۵	گزارش‌شده	۲۲	پتانسیل زیاد	
۰/۲۷۴	گزارش‌شده	۲۶	پتانسیل بسیار زیاد	
۰/۱۴	گزارش‌شده	۲۴	پتانسیل بسیار کم	مناطق با پتانسیل وقوع زمین‌لغزش
۰/۳۷	گزارش‌شده	۶۲	پتانسیل کم	
۰/۰۴	گزارش‌شده	۶	پتانسیل متوسط	
۰/۰۲	گزارش‌شده	۳	پتانسیل زیاد	
۰/۰۱	گزارش‌شده	۱	پتانسیل بسیار زیاد	

نتایج حاصل از تحلیل توزیع فراوانی نسبی (رابطه(۱)) نشان داد که برخلاف انتظار، بیشترین نسبت فراوانی شکستگی (۰,۳۷ برای ۶۲ رخداد) در مناطق با پتانسیل زمین‌لغزش کم مشاهده‌شده است. این یافته می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر سایر عوامل محیطی یا طراحی خاص خطوط لوله در این مناطق باشد. در مناطق با پتانسیل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

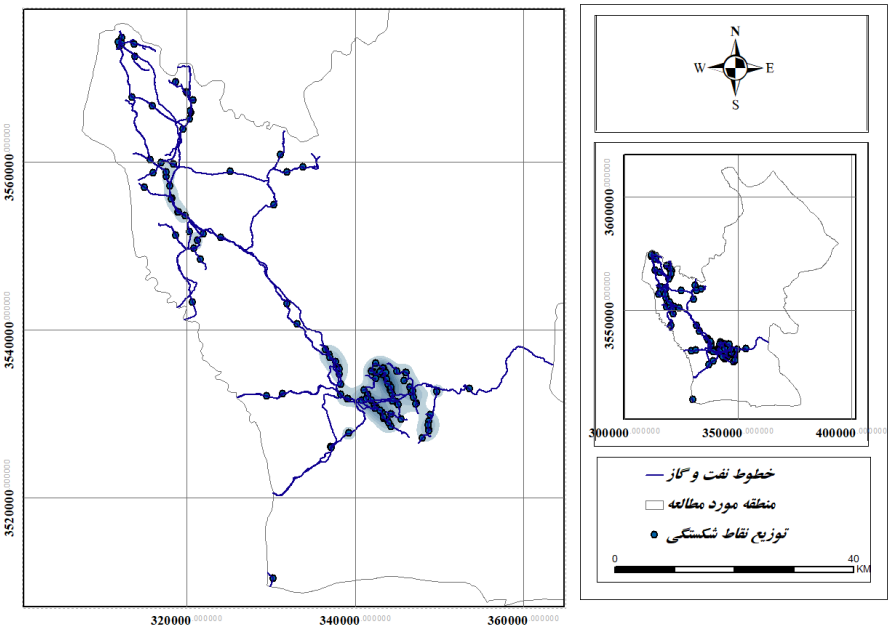
بسیار زیاد زمین‌لغزش، نسبت فراوانی به حداقل مقدار خود (۰,۰۱ برای ۱ رخداد) رسیده است. تحلیل عدم قطعیت با استفاده از رابطه (۴) دقت بالای محاسبات را تأیید نمود.

تحلیل تراکم کرنل به‌عنوان یک روش نا پارامتری قدرتمند برای تخمین توزیع مکانی نقاط شکستگی خطوط لوله در منطقه مسجدسلیمان به کار گرفته شد. این روش با تخمین تابع چگالی احتمال *(PDF)* بر اساس داده‌های نقطه‌ای شکستگی‌های تاریخی (۲۰۲۲-۲۰۱۵)، امکان شناسایی نقاط داغ (*Hotspots*) و الگوهای خوشه‌ای شکستگی را فراهم می‌سازد. برای تحلیل تراکم مکانی شکستگی‌های خطوط لوله، از تابع کرنل گاوسی (رابطه(۸)) در محیط *ArcGIS* استفاده شد. پهنای باند (h): با استفاده از قانون سیلورمن (رابطه(۱۰)) و بر اساس انحراف معیار داده‌ها ($\sigma \approx$ *1.06*) محاسبه شد. تعیین پهنای باند (با انحراف معیار $\sigma \approx$ ۱,۰۶) نشان‌دهنده تمرکز نسبی داده‌ها و تأثیر پهنای باند انتخابی بر میزان هموارسازی نقشه تراکم است. تحلیل تراکم کرنل بر روی داده‌های شکستگی خطوط لوله در منطقه مسجدسلیمان، تمرکز چشمگیر این وقایع را در بخش جنوبی منطقه آشکار می‌سازد. این ناحیه به‌عنوان یک نقطه داغ با الگوی خوشه‌ای و متمرکز بر شکستگی‌ها شناسایی‌شده، درحالی‌که سایر نواحی پراکندگی کمتری داشته و شکستگی‌ها بیشتر در امتداد مسیر لوله‌ها رخ می‌دهند. ارتباط این تمرکز با عواملی نظیر فرونشست، زمین‌لغزش و نقشه زمین‌لرزه در جنوب، احتمال نقش محوری ناپایداری‌های زمین‌شناسی در افزایش آسیب‌پذیری خطوط لوله در این بخش را تقویت می‌کند (شکل‌های(۶)، (۷) و (۸)).

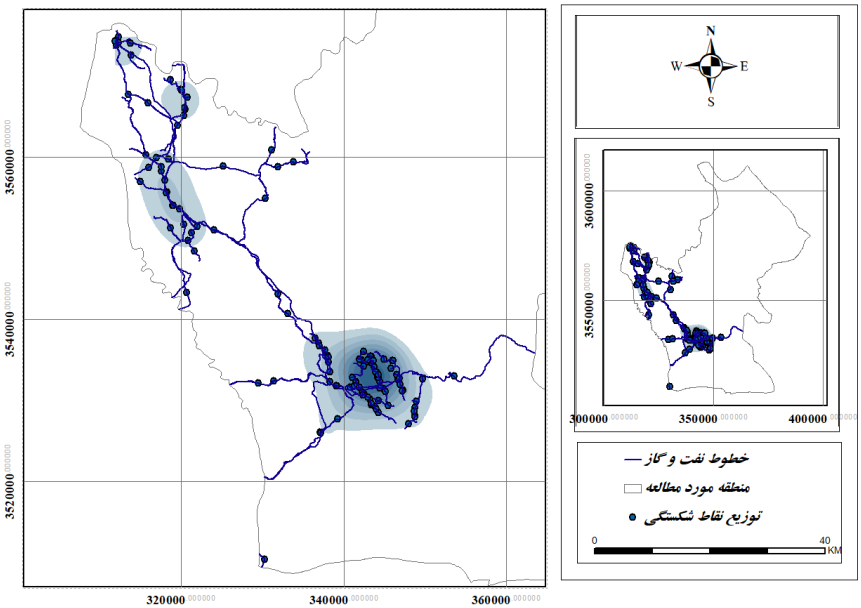


شکل ۶: نقشه توزیع شکستگی خطوط لوله نفت و گاز و زمین لرزه از تحلیل تراکم کرنل در منطقه موردمطالعه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]



شکل ۷: نقشه توزیع شکستگی خطوط لوله نفت و گاز و فرونشست از تحلیل تراکم کرنل در منطقه موردمطالعه



شکل ۸: نقشه توزیع شکستگی خطوط لوله نفت و گاز و زمین لغزش از تحلیل تراکم کرنل در منطقه موردمطالعه

نتایج تحلیل تراکم کرنل حاکی از توزیع غیر تصادفی شکستگی‌ها و تمرکز آن‌ها در مناطق خاص است. بیشترین تراکم شکستگی (۰٫۶۸) در نواحی جنوبی مسجدسلیمان مشاهده می‌شود که ازنظر مخاطرات محیطی، با پتانسیل بالای فرونشست و احتمال پایین زلزله مشخص می‌گردند. این یافته با نتایج مدل نسبت فراوانی که نقش مهم فرونشست در وقوع شکستگی‌ها را نشان می‌دهد، همخوانی دارد. تحلیل حساسیت نشان

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

داده که تغییرات پهنای باند تأثیر محدودی (کمتر از ۵٪) بر دقت نقشه نهایی دارد که نشان‌دهنده پایداری مدل است. برای شناسایی دقیق‌تر نقاط داغ، از تابع کرنل گاوسی با پهنای باند بهینه ۱،۰۶ کیلومتر استفاده‌شده است.

به‌طور خلاصه، نتایج تحلیل تراکم کرنل، تمرکز فضایی بالای شکستگی‌ها را در مناطقی با فرونشست بالا و زلزله کم تأیید می‌کند. بر اساس اعتبارسنجی با داده‌های تاریخی، عدم قطعیت مدل ±۵٪ برآورد می‌شود که ناشی از محدودیت‌های داده‌های ورودی و خطاهای احتمالی در تعیین دقیق موقعیت شکستگی‌ها است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که شکستگی خطوط لوله در منطقه موردمطالعه به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی محلی، به‌ویژه فرونشست زمین، قرار دارد.

پیش از اجرای رگرسیون فضایی، برای ارزیابی وجود خودهمبستگی مکانی در متغیر وابسته (توزیع شکستگی خطوط لوله) و باقیمانده‌های مدل *OLS*، آزمون آماره موران آی انجام شد. نتایج این آزمون‌ها در جدول(۲) ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج آزمون آماره *moran i* برای خودهمستگی مکانی

متغیر	مقدار آماره موران آی	مقدار *z-score*	*p-value*	وضعیت خودهمبستگی
توزیع شکستگی خطوط لوله (متغیر وابسته)	۰/۴۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	مثبت و معنی‌دار
باقیمانده مدل *OLS*	۰/۲۸	۴/۱۵	۰/۰۰۰۳	مثبت و معنی‌دار

همانطور که در جدول(۲) قابل مشاهده است، آماره موران آی برای متغیر وابسته (توزیع شکستگی خطوط لوله) و باقیمانده‌های مدل *OLS* هر دو معنی‌دار (*P-value < 0.05*) و مثبت هستند، که نشان‌دهنده وجود خودهمبستگی مکانی قابل توجه در هر دو و لزوم استفاده از مدل‌های رگرسیون فضایی است. با توجه به وجود خودهمبستگی مکانی، آزمون‌های تشخیصی رگرسیون فضایی (*LM Test*) برای تعیین مدل مناسب انجام شد. نتایج این آزمون‌ها در جدول(۳) ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج آزمون های تشخیصی رگرسیون فضایی (*LM Tests*)

آزمون	مقدار آماره (X^2)	*P-value*
Spatial Lag LM Test	۸/۵۵	۰/۰۰۳۵
Robust Spatial Lag LM Test	۶/۱۲	۰/۰۱۳۴
Spatial Error LM Test	۲/۱۰	۰/۱۴۷۲
Robust Spatial Error LM Test	۰/۹۸	۰/۳۲۲۰

بر اساس نتایج جدول(۴)، آماره[1] *SEL* دارای *P-value* معنی‌دار (*P-value = 0.0134 < 0.05*) بود، در حالی که آماره *Robust Spatial Error LM Test* معنی‌دار نبود (*P-value = 0.3220 > 0.05*). این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که خودهمبستگی مکانی غالب در متغیر وابسته (توزیع شکستگی خطوط لوله) وجود دارد. بنابراین، مدل تأخیر فضایی (*SLM*) به عنوان مدل بهینه برای تحلیل روابط انتخاب شد. این انتخاب، به دلیل توانایی مدل *SLM* در به حساب آوردن تأثیر

[1] *Robust Spatial Lag LM Test*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

مقادیر متغیر وابسته در واحدهای فضایی همسایه، منجر به برآوردهای دقیق‌تر و معتبرتری از روابط می‌شود. پس از تعیین مدل مناسب، رگرسیون فضایی از نوع *SLM* اجرا شد. نتایج این مدل در جدول(۴) ارائه شده است.

جدول ۴: نتایج مدل رگرسیون تاخیر فضایی برای پیش بینی شکستگی خطوط لوله نفت و گاز

متغیر	ضریب *(Coefficient)*	خطای استاندارد *(Std. Error)*	مقدار *Z*	*P-value*
ثابت*(Intercept)*	-۰/۱۵۰	۰/۰۳۲	-۴/۶۸	۰/۰۰۱<
زلزله*(Earthquake)*	۰/۴۶۱	۰/۰۲۵	۱۸/۴۴	۰/۰۰۱<
فرونشست *(Land Subsidence)*	۰/۳۵۷	۰/۰۲۱	۱۷/۰۰	۰/۰۰۱<
تأخیر فضایی متغیر وابسته	۰/۲۵۰	۰/۰۴۰	۶/۲۵	۰/۰۰۱<

آماره‌های برازش مدل :

R^2 : *0.385*

Log-Likelihood: *-250.56*

AIC: *509.56*

همانطور که در جدول(۵) مشاهده می‌شود، ضرایب متغیرهای زلزله و فرونشست هر دو مثبت و از نظر آماری در سطح معنی‌داری بسیار بالا (*P-value* < *0.001*) معنی‌دار هستند. این نتایج قویاً نشان می‌دهد که با افزایش شدت زلزله و پتانسیل فرونشست در یک منطقه، احتمال وقوع شکستگی در خطوط لوله به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. ضریب زلزله (۰,۴۶۱) نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن سایر عوامل، با افزایش یک واحد در مقیاس زلزله، میزان شکستگی خطوط لوله به طور متوسط ۰,۴۶۱ واحد افزایش می‌یابد. ضریب فرونشست (۰,۳۵۷) نیز حاکی از آن است که با افزایش یک واحد در پتانسیل فرونشست، میزان شکستگی خطوط لوله به طور متوسط ۰,۳۵۷ واحد افزایش می‌یابد.

مقدار ضریب تأخیر فضایی که برابر با ۰,۲۵۰ و از نظر آماری در سطح معنی‌داری بسیار بالا *(P-value* < *0.001)* معنی‌دار است، نشان‌دهنده وجود تأثیر قوی همسایگی بر متغیر وابسته (شکستگی خطوط لوله) است. این ضریب مثبت و معنی‌دار تأیید می‌کند که نرخ شکستگی خطوط لوله در یک منطقه، به طور قابل توجهی تحت تأثیر نرخ شکستگی در مناطق همسایه قرار دارد. به عبارت دیگر، شکستگی‌ها تمایل به خوشه‌بندی فضایی دارند و وقوع شکستگی در یک مکان، احتمال وقوع شکستگی در مکان‌های مجاور را افزایش می‌دهد. این یافته بر اهمیت در نظر گرفتن وابستگی فضایی در تحلیل و پیش‌بینی حوادث خطوط لوله تأکید می‌کند.

ضریب تعیین (R^2) مدل برابر با ۰/۳۸۵ است که نشان می‌دهد تقریباً ۳۸/۵ درصد از واریانس در توزیع شکستگی خطوط لوله توسط مدل رگرسیون تأخیر فضایی تبیین می‌شود. این مقدار *R2* نسبت به نتایج رگرسیون *OLS* افزایش معناداری را نشان می‌دهد، که برتری مدل فضایی را در تبیین روابط مکانی و بهبود قدرت پیش‌بینی مدل تأیید می‌کند.

در بخش دیگری از این مطالعه به بررسی عوامل مؤثر بر شکستگی خطوط لوله با استفاده از تحلیل رگرسیون حداقل مربعات معمولی *(OLS)* پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که فرونشست زمین و زمین‌لرزه تأثیر مثبت و معنی‌داری بر شکستگی خطوط لوله دارند *(p < 0.01)*، درحالی‌که زمین‌لغزش تأثیر معنی‌داری

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

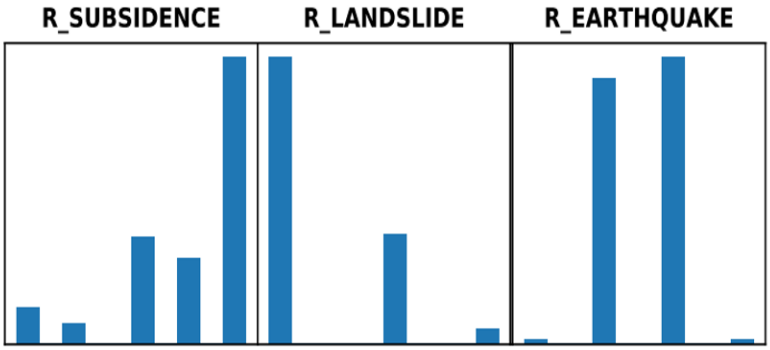
نشان نمی‌دهد .*(p = 0.162)* قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده شکستگی، زمین‌لرزه با ضریب ۰,۴۶۱ است.

مدل *OLS* به‌طورکلی معنی‌دار است(*F = 17.73* ، *p < 0.001*) و ۲۹,۵ درصد از واریانس متغیر وابسته را تبیین می‌کند*(R² = 0.295)* . آزمون‌های تشخیصی نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها دارای توزیع نرمال هستند (*Jarque-Bera = 4.80*، *p = 0.091*) و واریانس همسان دارند (*Koenker-BP = 2.57*، *p = 0.463*) مقادیر *VIF* بین ۱,۰۴ و ۲,۳۶ است که نشان‌دهنده عدم وجود هم خطی شدید است. باوجوداین یافته‌ها، این مطالعه دارای محدودیت‌هایی است. اولاً، مدل *OLS* تغییرات فضایی در روابط بین متغیرها را در نظر نمی‌گیرد. ثانیاً، ضریب تعیین نسبتاً پایین است که نشان می‌دهد متغیرهای مهم دیگری نیز ممکن است بر شکستگی خطوط لوله تأثیر بگذارند. به‌طور خلاصه، این تحلیل *OLS* روابط کلی بین مخاطرات محیطی و شکستگی خطوط لوله را مشخص کرده است. مطالعات آینده باید از روش‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی *(GWR)* برای بررسی تغییرات فضایی روابط استفاده کنند و متغیرهای اضافی را برای بهبود قدرت توضیحی مدل در نظر بگیرند.

تحلیل رگرسیون حداقل مربعات معمولی *(OLS)* برای بررسی رابطه بین مخاطرات محیطی و شکستگی خطوط لوله انجام شد. نتایج نشان داد که فرونشست زمین (ضریب = ۰,۳۵۷۴۳۱، *p = 0.000000*) و زلزله (ضریب = ۰,۴۶۱۴۶۷، *p = 0.000000*) تأثیر مثبت و معنی‌داری بر شکستگی خطوط لوله دارند، به‌طوری‌که افزایش یک واحدی در هر یک از این مخاطرات منجر به افزایش قابل‌توجهی در شکستگی خطوط لوله می‌شود.

در مقابل، زمین‌لغزش (ضریب = -۰,۱۰۲۷۲۸، *p = 0.161937*) در این مطالعه رابطه معنی‌داری با شکستگی خطوط لوله نشان نداد. به‌طور خلاصه، فرونشست زمین و زلزله عوامل خطرناک و مهمی برای شکستگی خطوط لوله هستند، درحالی‌که تأثیر زمین‌لغزش ازنظر آماری قابل‌توجه نیست. علامت ضریب نشان‌دهنده جهت رابطه است و مقادیر *p* کوچک نشان‌دهنده اهمیت آماری است.

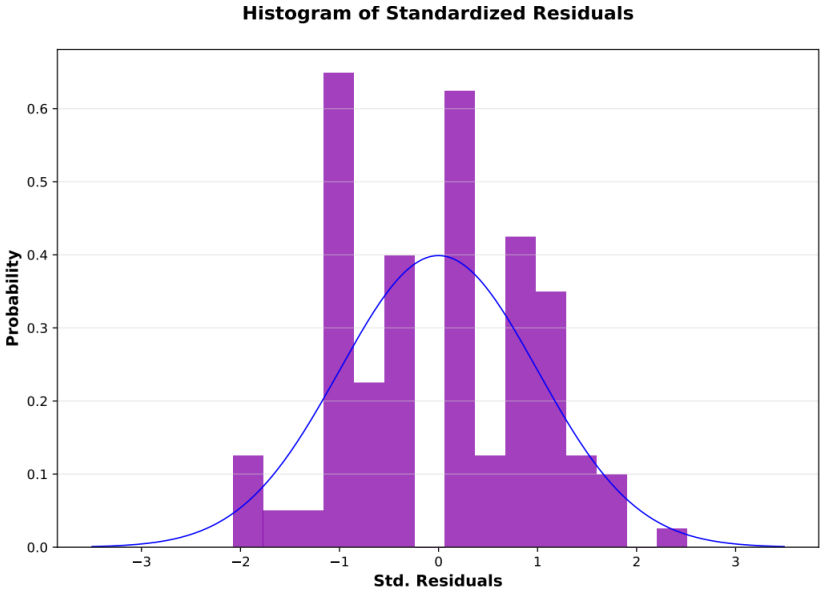
شکل(۹) توزیع فراوانی یا شدت سه نوع خطر زمین‌شناسی مختلف را نشان می‌دهد. نمودار سمت چپ مربوط به فرونشست زمین است و توزیع رویدادها یا مناطق با سطوح مختلف خطر فرونشست را نشان می‌دهد. نمودار میانی توزیع مشابهی را برای رانش زمین به تصویر می‌کشد، با یک میله‌ی بلند که نشان‌دهنده‌ی فراوانی نسبتاً بالای مناطق یا رویدادها در یک سطح خاص از خطر رانش است. درنهایت، نمودار سمت راست توزیع فراوانی یا شدت زلزله‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۹: نمودار توزیع فراوانی تحلیل رگرسیون فضایی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

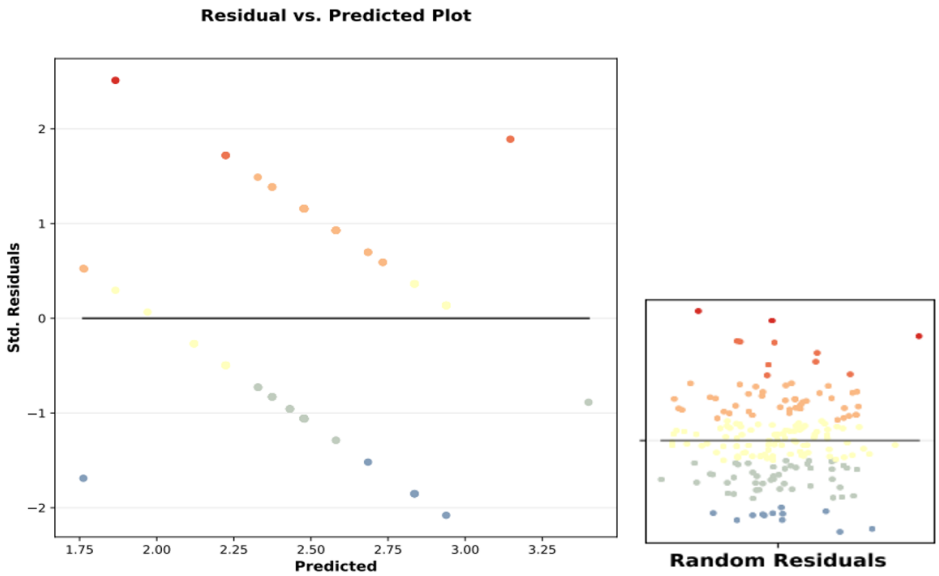
شکل(۱۰)، نمودار باقیمانده در مقابل مقادیر برازش یافته است و توزیع خطاهای مدل رگرسیون را نشان می‌دهد، جایی که باقیمانده تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی هستند و برای تسهیل مقایسه، با انحراف استانداردشان برازش شده‌اند. در یک مدل با برازش مناسب، باقیمانده به‌طور تصادفی در اطراف صفر توزیع می‌شوند و از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، به‌طوری‌که هیستوگرام تقریباً شکل منحنی نرمال را به خود می‌گیرد، اما انحراف قابل‌توجه از این منحنی ممکن است نشان‌دهنده مشکلاتی مانند غیرخطی بودن، ناهمسانی واریانس یا وجود داده‌های پرت باشد که در این مورد، هیستوگرام تا حدودی از منحنی نرمال منحرف می‌شود و بررسی بیشتر مدل را ضروری می‌سازد.



شکل ۱۰: هیستوگرام باقیمانده در مقابل مقادیر برازش یافته

نمودار باقیمانده در مقابل مقدار پیش‌بینی‌شده برای ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون از طریق بررسی توزیع باقیمانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی‌شده استفاده می‌شود. محور عمودی نشان‌دهنده باقیمانده‌های استانداردشده (خطاها مقیاس بندی شده برحسب انحراف استاندارد) و محور افقی نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل است. هدف این نمودار شناسایی الگوها یا روندهای سامانمند در باقیمانده‌ها است. در یک مدل ایده آل، باقیمانده‌ها باید به‌طور تصادفی در اطراف صفر پراکنده شوند و هیچ الگوی مشخصی نباید وجود داشته باشد. الگوهایی مانند انحنا نشان‌دهنده غیرخطی بودن، گسترش یا باریک شدن نشان‌دهنده ناهمسانی واریانس و نقاط پرت نشان‌دهنده داده‌های پرت تأثیرگذار هستند. در مورد نمودار ارائه‌شده، به نظر می‌رسد نقاط تا حدودی تصادفی هستند، اما توزیع آن‌ها کاملاً یکنواخت نیست و ممکن است با افزایش مقادیر پیش‌بینی‌شده، پراکندگی باقیمانده‌ها کمی افزایش یابد. به‌طور خلاصه، این نمودار برای بررسی تصادفی یا ساختاری بودن خطاهای مدل رگرسیون به کار می‌رود (شکل(۱۱)).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]



شکل ۱۱: نمودار باقیمانده استاندارد شده و مقدار پیش بینی شده عملکرد رگرسیون فضایی

۶- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل نسبت فراوانی، تراکم کرنل و رگرسیون فضایی، مشخص شد که مخاطرات محیطی نقش مهمی در شکستگی خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان دارند. در این میان، فرونشست زمین و زلزله به‌عنوان عوامل اصلی خطر شناسایی شدند. نتایج تحلیل نسبت فراوانی نشان داد که بیشترین نسبت فراوانی شکستگی در مناطقی با پتانسیل فرونشست زیاد (۰,۳۰۵) و به‌طور غیرمنتظره‌ای در مناطقی با پتانسیل زلزله کم (۰,۷۶) رخ‌داده است. این یافته غیرمنتظره می‌تواند ناشی از طراحی متفاوت خطوط لوله در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا یا اثرات تجمعی تنش‌های زمین‌شناسی باشد. تحلیل تراکم کرنل نیز تمرکز بالای شکستگی‌ها را در نواحی جنوبی مسجدسلیمان، هم‌زمان با پتانسیل بالای فرونشست و احتمال پایین زلزله، نشان داد. تحلیل رگرسیون فضایی، تأثیر مثبت و معنی‌دار فرونشست زمین و زلزله بر شکستگی خطوط لوله را تأیید کرد (p < ۰,۰۱). در این میان، زلزله قوی‌ترین پیش‌بینی کننده شکستگی بود. بااین‌حال، زمین‌لغزش تأثیر معنی‌داری بر شکستگی خطوط لوله نشان نداد ($p = 0.162$).

نتایج حاصل از این پژوهش، به ویژه یافته‌های مدل رگرسیون تأخیر فضایی (*SLM*)، اهمیت در نظر گرفتن خودهمبستگی مکانی در تحلیل مخاطرات خطوط لوله را برجسته می‌سازد. همانطور که نتایج نشان داد، تأثیر همسایگی (*Rho* معنادار) بر توزیع شکستگی خطوط لوله قابل توجه است. این امر تأیید می‌کند که پدیده شکستگی خطوط لوله صرفاً نتیجه عوامل محلی نیست، بلکه از الگوهای فضایی و تأثیر پذیری از مناطق مجاور نیز پیروی می‌کند.

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش بر اهمیت در نظر گرفتن مخاطرات محیطی، به‌ویژه فرونشست و زلزله، در برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت خطوط لوله نفت و گاز در منطقه مسجدسلیمان تأکید دارد. این یافته‌ها می‌توانند در کاهش خسارات ناشی از شکستگی خطوط لوله و افزایش ایمنی این زیرساخت‌های حیاتی مورداستفاده قرار گیرند.

در این پژوهش، سه روش تحلیل شامل نسبت فراوانی، تراکم کرنل و رگرسیون فضایی برای بررسی تأثیر مخاطرات محیطی بر شکستگی خطوط لوله نفت و گاز

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

به کار گرفته‌شده است. هر یک از این روش‌ها، با ارائه نتایج منحصربه‌فرد، درک جامعی از این پدیده پیچیده فراهم می‌کنند.

تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که شکستگی خطوط لوله بیشتر در مناطقی با پتانسیل بالای فرونشست (نسبت فراوانی ۰,۳۰۵) و به‌طور غیرمنتظره‌ای در مناطق با خطر زلزله کم (نسبت فراوانی ۰,۷۶) رخ داده است. روش نسبت فراوانی با سادگی اجرا و امکان ارزیابی کمی، مناطق پرخطر را شناسایی می‌کند، اما نمی‌تواند روابط پیچیده فضایی را تحلیل کند. از سوی دیگر، تحلیل تراکم کرنل، تمرکز شکستگی‌ها را در جنوب مسجدسلیمان، منطبق بر مناطق فرونشست بالا و خطر زلزله پایین، نشان می‌دهد. این روش با شناسایی نقاط داغ، تصویر روشنی از پراکنش مکانی ارائه می‌کند، اما نتایج آن به انتخاب پهنای باند وابسته است و رابطه علت و معلولی را مشخص نمی‌کند. رگرسیون فضایی (p>۰,۰۱) تأثیر معنادار فرونشست و زلزله بر شکستگی خطوط لوله را تأیید کرد و نشان داد که زلزله قوی‌ترین پیش‌بینی کننده است. این روش با مدل‌سازی روابط فضایی، تحلیل عمیق‌تری از عوامل مؤثر ارائه می‌دهد، اما پیچیدگی محاسباتی آن بیشتر است و نیازمند انتخاب دقیق مدل است. درمجموع، ترکیب این روش‌ها می‌تواند همزمان به شناسایی مناطق بحرانی و تحلیل روابط علّی کمک کند، اما برای تفسیر دقیق‌تر، بررسی عوامل اضافی مانند طراحی لوله‌ها و شرایط محیطی نیز ضروری است.

جدول۵: خلاصه مقایسه مزایا و معایب روشهای تحلیل مورد استفاده

روش	نقاط قوت	نقاط ضعف
نسبت فراوانی	ساده، سریع، کمی سازی خطر	عدم مدلسازی روابط پیچیده
تراکم کرنل	شناسایی نقاط داغ، تصویرسازی فضایی	وابستگی به پهنای باند، عدم تحلیل علّی
رگرسیون فضایی	تحلیل علّی، مدلسازی روابط فضایی	پیچیدگی محاسباتی، نیاز به داده های دقیق

در مقایسه نتایج، همسویی بین تحلیل تراکم کرنل و نسبت فراوانی در تأکید بر نقش مهم فرونشست در وقوع شکستگی‌ها مشاهده می‌شود. تحلیل رگرسیون فضایی نیز روابط به‌دست‌آمده از دو روش دیگر را ازنظر آماری تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که فرونشست و زلزله به‌طور معنی‌داری با شکستگی خطوط لوله مرتبط هستند. درواقع، این سه روش مکمل یکدیگر هستند؛ تحلیل نسبت فراوانی دید کلی از میزان خطر نسبی هر عامل ارائه می‌دهد، تحلیل تراکم کرنل الگوهای فضایی شکستگی‌ها را نشان می‌دهد و تحلیل رگرسیون فضایی روابط علت و معلولی را به‌صورت کمی تعیین می‌کند. به‌طورکلی، پژوهش حاضر با به‌کارگیری مناسب این سه روش، ارزیابی جامعی از تأثیر مخاطرات محیطی بر شکستگی خطوط لوله ارائه داده است.از سویی دیگر مقایسه مطالعات و روشهای تحقیق سایر پژوهشگران نتایجی را بدست آورد که در ذیل به شرح آن پرداخته شده است.

مطالعه حاضر و پژوهش گئو و همکاران (۲۰۱۶) هر دو به ارزیابی ریسک شکستگی خطوط لوله نفت و گاز پرداخته‌اند، اما با رویکردهای متفاوت. درحالی‌که گئو و همکاران از یک مدل فازی پتری‌نت برای ترکیب عوامل طبیعی (مانند زلزله) و عوامل انسانی (مانند خوردگی و فشار عملیاتی) استفاده کردند، این پژوهش بر تحلیل فضایی-آماری مخاطرات طبیعی (زلزله، فرونشست و زمین‌لغزش) با روش‌های نسبت فراوانی و رگرسیون فضایی در محیط *GIS* تمرکز داشته است. هر دو مطالعه تأثیر معنادار زلزله و فرونشست را بر شکستگی خطوط لوله تأیید می‌کنند، اما تفاوت اصلی در نحوه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

مدل‌سازی ریسک و نوع داده‌هـای مورداسـتفاده اسـت. مطالعه گئو و همکـاران بـا در نظـر گـرفتن متغیرهـای عملیاتی مانند خوردگی، به شاخص‌های ریسک عـددی دست یافتند، درحـالی‌کـه ایـن پـژوهش بـا اسـتفاده از داده‌های ماهواره‌ای (*InSAR*) و زمین‌شناسی، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر را تولید کرده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که اگرچه هر دو روش قابلیت شناسایی منـاطق پرخطر رادارند، انتخـاب روش بایـد مبتنـی بـر اهـداف مطالعه (تمرکز بر عوامل طبیعی یا انسانی) و دسترسـی به داده‌ها باشد. بـرای مطالعـات آینـده، تلفیـق ایـن دو رویکرد می‌تواند بـه مـدل‌سـازی جـامع‌تـری از ریسـک خطوط لوله منجر شود[۱۸].

مطالعه حاضر و پژوهش *Al-Abadi* و *Shahid* (۲۰۲۲)، هر دو از مدل نسبت فراوانی به‌عنوان روش اصلی بـرای ارزیابی آسیب‌پذیری خطوط لوله استفاده کرده‌انـد، امـا در روش‌های تکمیلـی تفـاوت‌هـای اساسـی دارنـد. *Al-Abadi* و *Shahid* در مطالعه خود از ترکیب مدل نسبت فراوانی با رگرسیون لجستیک بهـره بردنـد تـا احتمـال وقوع آسـیب را در مقیـاس ۰ تـا ۱ محاسـبه کننـد. در مقابل، این پژوهش از رگرسیون فضایی در محـیط *GIS* استفاده کرده است که علاوه بر محاسبه ضـرایب تـأثیر، الگوهای مکانی و خودهمبستگی فضـایی داده‌هـا را نیـز تحلیل می‌کند. هر دو مطالعه تأیید می‌کننـد کـه مـدل نسـبت فراوانـی ابـزاری کارآمـد بـرای شناسـایی اولیـه منـاطق پرخطـر اسـت، امـا در مطالعـه *Al-Abadi & Shahid*، رگرسیون لجستیک با تبدیل مقـادیر پیوسـته به احتمالات، تفسیر نتـایج را بـرای تصـمیم‌گیرنـدگان آسـان‌تـر کـرده اسـت، درحـالی‌کـه در ایـن پـژوهش، رگرسیون فضایی با در نظر گـرفتن روابـط مکـانی بـین نقاط (از طریـق مـاتریس وزن فضـایی) امکـان تحلیـل عمیق‌تـری از توزیـع جغرافیـایی خطـر را فـراهم آورده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که انتخـاب بـین این دو روش باید بر اساس هدف مطالعه صـورت گیـرد: اگر هدف پیش‌بینی احتمال صرف وقـوع حادثـه باشـد، ترکیب با رگرسیون لجستیک مناسب‌تر اسـت، امـا اگـر هـدف درک الگوهـای فضـایی و روابـط مکـانی باشـد، رگرسیون فضایی گزینه بهتری محسوب می‌شود [۱۹].

در مقایسه مطالعـه حاضـر و پـژوهش لیـو و همکـاران (۲۰۲۳) می‌توان اشاره نمود که هر دو به بررسـی تـأثیر بحرانی فرونشسـت زمـین‌بـر یکپـارچگی خطـوط لولـه پرداخته‌اند. درحالی‌که *Liu* و همکاران به‌طور انحصـاری از فناوری پیشرفته *InSAR* با وضوح مکانی بـالا (تـا ۲۰ متر) برای پایش نرخ فرونشسـت اسـتفاده کردنـد، ایـن پژوهش از رویکرد ترکیبی شامل داده‌های ماهواره‌ای (با وضوح ۳۰ متر) همراه با مشاهدات میـدانی و داده‌هـای زمین‌شناسی بهره برده است. هر دو مطالعه به نتیجه‌ای مشابه در مورد نقش محوری فرونشسـت در شکسـتگی خطوط لوله دست‌یافته‌اند، با این تفـاوت کـه داده‌هـای *InSAR* در مطالعـه لیـو و همکـاران امکـان شناسـایی تغییرات میلی‌متری و الگوهـای موضـعی فرونشسـت را فـراهم کـرده، درحـالی‌کـه در ایـن پـژوهش، ترکیـب داده‌های مختلف منجر به ایجاد یک چارچوب جـامع‌تـر برای ارزیابی خطر شده است. یافتـه‌هـای ایـن مقایسـه نشان می‌دهد که اگرچه فناوری‌های نوین مانند *InSAR* می‌توانند دقت سنجش تغییرات سطح زمین را بـه‌طـور چشمگیری افزایش دهند، اما در منـاطقی بـا دسترسـی محدود به داده‌های مـاهواره‌ای بـا وضـوح‌بـالا، رویکـرد ترکیبی این پژوهش می‌تواند جـایگزین مناسـبی باشـد. این مطالعـه همچنـین نشـان داد کـه ادغـام داده‌هـای میـدانی بـا تحلیـل‌هـای فضـایی مـی‌توانـد برخـی محـدودیت‌هـای روش‌هـای سـنجش از دور محـض را جبران کند [۲۰].

با مقایسه مطالعه حاضر و پژوهش *Yariyan* و همکـاران (۲۰۲۲) می‌توان دریافت هر دو از مدل نسـبت فراوانـی به‌عنوان چارچوب اصلی برای ارزیابی خطر خطوط لولـه استفاده کرده‌اند، اما در رویکرد مـدیریت عـدم قطعیـت تفاوت‌های اساسی دارند. مطالعه *Yariyan* و همکاران بـا تلفیق منطق فازی و مدل نسبت فراوانی، عـدم قطعیـت ذاتی در داده‌های کیفی (مانند ارزیابی‌های کارشناسـی) را از طریـق توابـع عضـویت فـازی مـدیریت کردنـد،

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

درحالی‌که این پژوهش با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته (شامل تحلیل حساسیت و محاسبه خطای استاندارد) به کمّی سازی عدم قطعیت پرداخته است. در مطالعه *Yariyan* و همکاران، نقشه‌های خطر نهایی بر اساس قوانین فازی و عملگرهای ترکیبی تولید شدند، درحالی‌که در این پژوهش، نتایج بر اساس تحلیل‌های آماری فضایی و محاسبه دقیق حدود اطمینان ارائه گردید. این مقایسه نشان می‌دهد که اگرچه رویکرد فازی در مواجهه با داده‌های کیفی و دانش کارشناسی انعطاف‌پذیری بیشتری دارد، اما روش‌های آماری مورداستفاده در این پژوهش برای داده‌های کمّی با توزیع مشخص، دقت بالاتری در برآورد خطر ارائه می‌دهند. یافته‌ها حاکی از آن است که انتخاب روش مدیریت عدم قطعیت باید بر اساس ماهیت داده‌های در دسترس و سطح دقت موردنیاز صورت گیرد [۲۱].

مراجع

[1] Ghaffari, A., & Taklif, A. (2015). Application of rational model in strategic decision-making for sustainable production from South Pars-North Dome joint field: A conceptual model with emphasis on legal requirements. Iranian Journal of Energy Economics, 4(16), 137-180.

[2] Mohebbi Kandsari, E. (1400/2021). The role of land use change in increasing the environmental risks of floods in Guilan Province (Roudsar County). International Conference on Management, Tourism and Technology.

[3] Bariha, N., Mishra, I.M., & Srivastava, V.C. (2016). Hazard analysis of failure of natural gas and petroleum gas pipelines. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 40, 217-226.

[4] Azizi, F., Salehi, A., & Ghorbani Nia, Z. (1401/2022). A review of risk assessment methods for oil and gas pipeline explosion and its destructive environmental effects. Sixth International Conference on Safety and Health, Tehran.

[5] Masoumi, M., & Ghahramani, H. (1402/2023). Quantitative risk assessment of oil leakage from the 35 km pipeline transferring oil from Mansouri field to Ahvaz booster by quantitative risk analysis model and OLGA dynamic software. Modeling in Engineering, 21(75), 181-191. doi: 10.22075/jme.2023.28775.2353

[6] Tarafi Alavi, A., Shahraki, F., Sardashti Birjandi, M.R., & Khalili Pour, M.M. (1402/2023). Consequence assessment and determination of safe distance in natural gas pressure reduction station using PHAST software (Case study: Broumi station in Ahvaz city). Journal of Occupational Health, 15(1), 37-57.

[7] Muhlbauer, W.K. (2004). Pipeline risk management manual: Ideas, techniques, and resources. Gulf Professional Publishing.

[8] Kaplan, S., & Garrick, B.J. (1981). On the quantitative definition of risk. Risk analysis, 1(1), 11-27.

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

[10] Zhang, J., Cai, B., Mulenga, K., Liu, Y., & Xie, M. (2018). Bayesian network-based risk analysis methodology: A case of atmospheric and vacuum distillation unit. Process Safety and Environmental Protection, 117, 660-674.

[11] Omidvar, B., & Kivi, H.K. (2016). Multi-hazard failure probability analysis of gas pipelines for earthquake shaking, ground failure and fire following earthquake. Natural hazards, 82, 703-720.

[12] Nazeri, S. (1391/2012). The effects of the economic role of oil on Masjed Soleiman city. Geographical Information Quarterly "Sepehr", 21(81), 35-37.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

[13] Guru, B., Seshan, K., & Bera, S. (2017). Frequency ratio model for groundwater potential mapping and its sustainable management in cold desert, India. Journal of King Saud University-Science, 29(3), 333-347.

[14] Lee, M.J., Kang, J.E., & Jeon, S. (2012, July). Application of frequency ratio model and validation for predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. 2012 IEEE international geoscience and remote sensing symposium (pp. 895-898). IEEE.

[15] 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.

[16] Payab, M., & Sayyaf, H. (1401/2022). The impact of subsidence on infrastructure and ways to control these effects. Majlis Research Center of the Islamic Consultative Assembly.

[17] Bayati Khatibi, M., Hassanpour, S., & Feyzizadeh, B. (1403/2024). Risk assessment of gas pipeline crossing mountainous areas and investigation of their threat by slope landslides using hybrid-fuzzy algorithms (Case study: Tehran third pipeline). Quantitative Geomorphological Researches, 12(4), 128-149. doi: 10.22034/gmpj.2024.425714.1465

[18] Guo, Y., et al. (2016). Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 33, 18-29.

[19] Al-Abadi, A.M., & Shahid, S. (2022). A Hybrid Frequency Ratio and Logistic Regression Model for Assessing Pipeline Vulnerability to Natural Hazards. Environmental Earth Sciences, 81(4), 1-18.

[20] Liu, Y., et al. (2023). Quantifying the Impact of Land Subsidence on Oil Pipeline Integrity Using InSAR and Spatial Statistics. Remote Sensing of Environment, 285, 113402.

[21] Yariyan, P., et al. (2022). GIS-Based Spatial Modeling of Oil Pipeline Accidents Using Fuzzy Logic and Frequency Ratio Approaches. Science of the Total Environment, 806, 150584.

[22] Silverman, B. W. (1986). Density estimation for statistics and data analysis. Chapman and Hall/CRC.

[23] Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2000). Quantitative geography perspectives on spatial data analysis. SAGE Publications.

[24] Anselin, L. (1988). Spatial econometrics: Methods and models. Springer Science & Business Media.

[25] LeSage, J. P., & Pace, R. K. (2009). Introduction to spatial econometrics. CRC Press.

[26] Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.2, Summer 2025

Research Paper

Spatial-Statistical Analysis of Oil and Gas Pipelines Using the Frequency Ratio Model To Assess Environmental Hazard Exposure

Rahim Nazari [1], Mostafa Kabolizadeh [2*], Kazem Rangzan [3]

1- Ph.D. Student in Remote Sensing and GIS, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3- Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Abstract

The oil and gas industry, as the lifeblood of the economy, has always faced the challenge of pipeline risk management. Although numerous studies have assessed the environmental hazards, the simultaneous spatial-statistical analysis of multiple environmental risks using quantitative methods in Iran's oil-rich regions has received less attention. This study employed three analytical methods: Relative Frequency Analysis (RFA), Kernel Density Estimation (KDE), and Spatial Regression.The Relative Frequency Analysis revealed that the highest proportion of pipeline fractures has occurred in areas with high land subsidence potential (0.305) and low earthquake risk (0.76). The Gaussian-based Kernel Density Analysis identified fracture hotspots in southern Masjed Soleyman, overlapping with subsidence-prone zones. In the KDE analysis, 68% of fractures were concentrated in the southern regions of Masjed Soleyman, with an optimal bandwidth of 1.06 km (calculated using Silverman's method) and a model uncertainty of ±5%. The Spatial Regression results indicated a significant impact of earthquakes (coefficient: 0.461, $p < 0.01$) and land subsidence (coefficient: 0.357, $p < 0.01$) on pipeline fractures. The model's coefficient of determination (R^2) was 0.295, the F-statistic was 17.73 ($p < 0.001$), and VIF values ranged between 1.04 and 2.36 (indicating no severe multicollinearity). The findings demonstrate that land subsidence and earthquakes are among the most critical threats to pipelines in the region. The results can serve as an effective tool for pipeline planning, design, and management, helping to mitigate the environmental hazard-related damages. By integrating the spatial-statistical methods, this study provides a comprehensive framework for pipeline risk assessment, that is used in decision-making in oil-rich regions.

Key words: *Frequency Ratio Model, Oil and Gas Pipelines, Environmental Hazards, Spatial Analysis, Masjed Soleyman.*

Correspondence Address: *Department of Remote Sensing and GIS, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.*
Tel : *+98 6133339338*
Email*: m.kabolizade@scu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-06]