Journal of Urban Environmental Management

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.4, No.4; 2027.pp: 122-146

Research paper
(Received 3 Oct. 2026 Accepted 15 Nov. 202?)

# Environmental Risk Assessment of Gas Transmission Pipeline Failure under Land Subsidence and Development of an Integrated Framework for Management, Monitoring, Mitigation, and Remedial Measures

Mohammad Reza Soleimani[1], Javad Fadaei[2], Mohammad Hossein Motedayen[3], Moein Abbasi-Nasab[3], Fatemeh Ghasdi[3], Danial Namjoo-Fard[3], Saeed Niazmardi[4], Farshad Homaei[*5]

*[1] Chief Executive Officer, Kerman Province Gas Company, Kerman, Iran*
*[2] Head of Research and Technology, Kerman Province Gas Company, Kerman, Iran*
*[3] Expert, Kerman Province Gas Company, Kerman, Iran*
*[4] Associate Professor, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*
*[5] Associate Professor, Department of Earthquake and Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*

## Abstract

Land subsidence is one of the major geotechnical hazards affecting arid and semi-arid regions of Iran, primarily resulting from groundwater-level decline, excessive groundwater extraction, and the progressive compaction of compressible soil layers. This phenomenon can pose a serious threat to the integrity and performance of buried infrastructure, including natural gas transmission pipelines, particularly where spatially heterogeneous subsidence produces significant ground-deformation gradients. Differential and nonuniform ground deformation can induce bending, tensile and shear strains, local buckling, and stress concentrations in the pipe body, joints, and geometric transition zones. When the resulting deformation demand exceeds the strength and ductility capacity of the pipeline, the likelihood of cracking, rupture, and gas leakage increases. This study aims to assess the environmental risk associated with gas transmission pipeline failure induced by land subsidence and to develop an integrated framework for managing, monitoring, preventing, and mitigating the associated risks. The proposed framework investigates the causal chain linking groundwater-resource depletion, land subsidence, heterogeneous ground deformation, pipeline damage, gas leakage, and subsequent environmental consequences through the integration of hydrogeological, geotechnical, structural, and environmental components. Given the critical role of differential settlement and deformation gradients in governing pipeline response, the framework emphasizes the combined use of geodetic and remote-sensing observations, particularly Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), groundwater-level data, and geotechnical information for risk assessment. The potential consequences of gas leakage, including methane emissions, associated climate impacts, and fire and explosion hazards, are also considered. Finally, a range of risk-reduction measures is proposed, including groundwater-extraction control, continuous monitoring and early-warning systems, route modification in high-risk zones, enhancement of pipeline deformation capacity, and localized strengthening of vulnerable components. The proposed framework can facilitate a transition from reactive management toward proactive, risk-informed management of gas transmission pipelines in subsidence-prone regions.

**Keywords:** Land subsidence; Gas transmission pipelines; Environmental risk; Nonuniform ground deformation; InSAR monitoring; Groundwater; Early warning; Risk management.

[*] Corresponding Author: Farshad Homaei
Email: *f.homaei@kgut.ac.ir*
Phone: 03433776611-3385

DOI: 10.48306/juem.2026.606554.1187

نشریه علمی مدیریت محیط زیست شهری

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال چهارم/شماره چهارم/زمستان ۱۴۰۵/صفحه ۱۲۲-۱۴۶

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۵/۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۸/۲۴

# ارزیابی ریسک زیست‌محیطی ناشی از خرابی خطوط انتقال گاز تحت تأثیر فرونشست زمین و ارائه چارچوب یکپارچه راهکارهای مدیریتی، پایشی، فنی و اصلاحی

محمدرضا سلیمانی[۱]، جواد فدائی[۲]، محمد حسین متدین[۳]، معین عباسی نسب[۳]، فاطمه قصدی[۳]، دانیال نامجوفرد[۳]، سعید نیازمردی[۴]، فرشاد همائی[۵*]

[۱] مدیرعامل، شرکت گاز استان کرمان، کرمان، ایران

[۲] رئیس پژوهش و فناوری، شرکت گاز استان کرمان، کرمان، ایران

[۳] کارشناس، شرکت گاز استان کرمان، کرمان، ایران

[۴] دانشیار، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی، صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۵] دانشیار، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی، صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

## چکیده

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که عمدتاً در اثر افت سطح آب زیرزمینی، برداشت بی‌رویه از منابع آب و تراکم تدریجی لایه‌های تراکم‌پذیر خاک ایجاد می‌شود. این پدیده، به‌ویژه در صورت توسعه ناهمگن و ایجاد گرادیان‌های قابل‌توجه در تغییرشکل سطح زمین، می‌تواند یکپارچگی و عملکرد زیرساخت‌های مدفون، از جمله خطوط انتقال گاز طبیعی، را به‌طور جدی تهدید کند. فرونشست نامتقارن موجب ایجاد خمش، کشش، برش، کمانش موضعی و تمرکز تنش در بدنه، اتصالات و نواحی تغییر هندسه خط لوله شده و در صورت تجاوز تقاضای تغییرشکلی از ظرفیت مقاومتی و شکل‌پذیری آن، احتمال ترک‌خوردگی، گسیختگی و نشت گاز افزایش می‌یابد. هدف این پژوهش، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی ناشی از خرابی خطوط انتقال گاز تحت تأثیر فرونشست زمین و ارائه چارچوبی یکپارچه برای مدیریت، پایش، پیشگیری و کاهش این ریسک است. در چارچوب پیشنهادی، زنجیره علّی افت منابع آب زیرزمینی، فرونشست، تغییرشکل ناهمگن، آسیب خط لوله، نشت گاز، و پیامدهای زیست‌محیطی با تلفیق مؤلفه‌های هیدروژئولوژیکی، ژئوتکنیکی، سازه‌ای و محیط‌زیستی بررسی می‌شود. با توجه به نقش تعیین‌کننده نشست تفاضلی و گرادیان تغییرشکل، استفاده هم‌زمان از داده‌های ژئودتیکی و سنجش‌ازدور، به‌ویژه InSAR، اطلاعات سطح آب زیرزمینی و داده‌های ژئوتکنیکی در ارزیابی ریسک مورد تأکید قرار می‌گیرد. همچنین، پیامدهای نشت گاز، از جمله انتشار متان، تشدید اثرات اقلیمی و ایجاد خطرات حریق و انفجار، ارزیابی می‌شوند. در نهایت، راهکارهایی شامل کنترل برداشت آب، پایش و هشدار زودهنگام، اصلاح مسیر در پهنه‌های پرخطر، افزایش انعطاف‌پذیری خط و تقویت موضعی اجزای آسیب‌پذیر ارائه می‌شود. این چارچوب می‌تواند زمینه گذار از مدیریت واکنشی به مدیریت پیشگیرانه و مبتنی بر ریسک خطوط لوله گاز در مناطق مستعد فرونشست را فراهم کند.

**کلمات کلیدی:** فرونشست زمین، خطوط انتقال گاز، ریسک زیست‌محیطی، تغییرشکل ناهمگن زمین، پایش سری زمانی InSAR، آب زیرزمینی، هشدار زودهنگام، مدیریت ریسک.

* نویسنده مسئول: فرشاد همائی

ایمیل: *f.homaei@kgut.ac.ir*

شماره تماس:۰۳۴۳۳۷۷۶۶۱۱ – داخلی ۳۳۸۵

DOI: 10.48306/juem.2026.606554.1187

## ۱-مقدمه

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و به‌ویژه در ایران [۱] است که می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای سکونتگاه‌های انسانی، فعالیت‌های اقتصادی و زیرساخت‌های حیاتی به همراه داشته باشد [۲]. این پدیده در بسیاری از دشت‌های ایران عمدتاً در ارتباط با افت سطح آب زیرزمینی و برداشت بیش از ظرفیت طبیعی آبخوان‌ها رخ می‌دهد. کاهش فشار آب منفذی در اثر برداشت مداوم از منابع آب زیرزمینی، افزایش تنش مؤثر در توده خاک و تراکم تدریجی لایه‌های تراکم‌پذیر را به دنبال داشته و در نهایت موجب کاهش ارتفاع سطح زمین می‌شود. استمرار این فرآیند می‌تواند موجب شکل‌گیری پهنه‌هایی با نرخ‌های متفاوت نشست و در نتیجه ایجاد تغییرشکل‌های ناهمگن و گرادیان‌های قابل‌توجه تغییرمکان در سطح زمین شود.

اهمیت فرونشست زمانی افزایش می‌یابد که پهنه‌های تحت تأثیر آن با زیرساخت‌های حیاتی و شبکه‌های گسترده مدفون تلاقی داشته باشند [۳]. خطوط انتقال و توزیع گاز طبیعی از جمله این زیرساخت‌ها هستند که به دلیل امتداد طولانی، پیوستگی سازه‌ای و اندرکنش مستمر با خاک پیرامون، در برابر تغییرشکل‌های ناهمگون زمین آسیب‌پذیری قابل‌توجهی دارند. برخلاف سازه‌های سطحی که امکان انتقال یا اصلاح موضعی آنها در برابر تغییرشکل زمین وجود دارد، خطوط لوله مدفون در طول مسیر خود با توده خاک درگیر بوده و تغییرشکل زمین می‌تواند مستقیماً به خط لوله منتقل شود. در نتیجه، فرونشست نامتقارن و به‌ویژه تغییرات شدید گرادیان نشست در طول مسیر می‌تواند موجب ایجاد خمش، کشش، فشار، برش و تمرکز تنش در بدنه خط لوله شود [۴-۸]. این مسئله در محل جوش‌ها، اتصالات، زانوها، تغییرات قطر و سایر نواحی دارای ناپیوستگی هندسی یا مکانیکی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

مطالعات موردی خرابی‌های مشاهده شده نشان می‌دهد که جابجایی‌های نسبی ایجاد شده در زمین، عامل اصلی برای از بین بردن یکپارچگی خطوط لوله در مناطق مختلف است. نیومارک و هال [۹] از جمله اولین کسانی بودند که به طور تحلیلی به بررسی این مسئله پرداختند. در مدل مورد بررسی، حرکت زمین به صورت راستا لغز و با فرض مهار کامل لوله در خاک در نظر گرفته شد. در مدل آنها، مقاومت جانبی خاک و همچنین سختی خمشی خط لوله نادیده گرفته شد؛ پارامترهایی که بعداً در تحلیل‌های کندی و همکاران [۱۰] و یه و وانگ [۱۱] معرفی شدند. ژائو و همکاران [۱۲] یک راهکار تحلیلی اصلاح‌شده مبتنی بر پاسخ جابه‌جایی را برای بررسی عملکرد لوله‌های دارای اتصال صلب، با قطر زیاد و نسبت طول به قطر پایین، تحت تأثیر فرونشست ناگهانی زمین ارائه می‌دهد. راهکار پیشنهادی بر اساس شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ تدوین و راستی‌آزمایی شد و می‌توان از آن برای ارزیابی جابه‌جایی، لنگر خمشی، نیروی برشی در محل اتصال و حالت‌های گسیختگی این نوع لوله‌ها در شرایط فرونشست زمین، با در نظر گرفتن موقعیت‌های مختلف عبور نوار برشی در امتداد لوله‌ها، استفاده کرد. جی لی و همکاران [۱۳] یک شاخص جدید، مقاومت در برابر فرونشست زمین، پیشنهاد دادند که برخلاف مدل‌های مرسوم ظرفیت کرنش کششی، جابجایی زمین را به عنوان پارامتر حاکم برای توصیف رفتار شکستگی دینامیکی در چارچوب تکامل آسیب در نظر می‌گیرد. کارامیتروس و همکاران [۱۴] یک روش برای محاسبه کرنش‌های خطوط لوله در خم‌های با زاویه و شعاع انحنای دلخواه، پیشنهاد دادند. در این روش، لوله به صورت یک تیر قوسی الاستیک در نظر گرفته می‌شود که تحت نیروهای عکس‌العمل محوری و عرضی خاک با توزیع یکنواخت است. پژمان و همکاران [۱۵] یک مدل غیرخطی وینکلر توسعه دادند که قادر به لحاظ کردن رفتار غیرخطی خاکِ نگهدارنده خطوط لوله می‌باشد که قادر به شبیه سازی رفتار خاک اطراف لوله در مطالعات فرونشست است. رفتار غیرخطی خاک با استفاده از رابطه هذلولیِ بار-نشست مدل‌سازی شده و خط لوله نیز به صورت یک تیر اویلر-برنولی در نظر گرفته شده است. صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های آزمایش سانتریفیوژ انجام شده است که توانایی مدل را در شبیه‌سازی دقیق جابه‌جایی‌ها و لنگرهای خمشی در طول لوله تأیید می‌کنند. کورتزیس و همکاران [۱۶] یک روش تحلیلی برای محاسبه نیروها و کرنش‌های داخلی در خطوط لوله مدفون پیوسته، که از مناطق دارای مشکل ژئوتکنیکی عبور می‌کنند و مستعد نشست دائمی سطح زمین یا ارتفاع هستند، ارائه کردند. مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل المان محدود، اثربخشی تحلیل ساده شده را برجسته می‌کند.

از دیدگاه ایمنی و مدیریت زیرساخت، اهمیت این مسئله صرفاً به خسارت مکانیکی واردشده به خط لوله محدود نمی‌شود [۱۷]. خرابی یا آسیب جدی خط انتقال گاز می‌تواند به نشت گاز و آزادسازی آن به محیط پیرامون منجر شود [۱۸]. از آنجا که گاز طبیعی عمدتاً از متان تشکیل شده است، انتشار کنترل‌نشده آن علاوه بر ایجاد یک خطر مستقیم برای ایمنی انسان و زیرساخت‌های مجاور، می‌تواند از منظر محیط‌زیستی نیز حائز اهمیت باشد. انتشار متان در اتمسفر به افزایش بار گازهای گلخانه‌ای و تشدید اثرات اقلیمی منجر می‌شود و در صورت شکل‌گیری غلظت‌های قابل‌اشتعال، احتمال وقوع حریق و انفجار نیز وجود دارد. در چنین شرایطی، یک پدیده ژئوتکنیکی اولیه، یعنی فرونشست زمین، می‌تواند از طریق یک زنجیره خرابی به یک مسئله چندبعدی شامل خطر ژئوتکنیکی، آسیب زیرساختی، نشت گاز، آلودگی و پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی تبدیل شود.

ژنگ و همکاران [۱۹] اقدام به بررسی انتشار متان از طریق لوله‌های پلی‌اتیلنی شهری، هنگام انتقال گاز طبیعیِ نمودند. لو و همکاران [۲۰] اثرات زیست‌محیطی انتشار متان را در بخش‌های مختلف زیست‌محیطی بررسی کردند و روش‌های مورد استفاده برای تعیین کمیّت این اثرات را به طور انتقادی ارزیابی نمودند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که انتشار متان از عملیات نفت و گاز اثرات زیست‌محیطی گسترده‌ای را در جو، آب و خاک اعمال می‌کند. با این حال، به دلیل تنوع گسترده روش‌شناسی در بین مطالعات موجود، عدم قطعیت‌های قابل توجهی در تعیین کمیّت این اثرات وجود دارد. جیا و همکاران [۲۱] چارچوب جامعی برای تعیین کمیّت انتشار متان ارائه دادند. بر اساس داده‌های نتیجه آزمایش نشت، عوامل انتشار متان و مدل‌های توزیع احتمال برای سه دسته انتشار توسعه داده شدند. عدم قطعیت در کل انتشار متان با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین کمیّت شد. از تحلیل حساسیت سوبول برای شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر بر تغییرپذیری و عدم قطعیت انتشار استفاده شد.

ارزیابی ریسک ناشی از فرونشست برای خطوط گاز نیازمند رویکردی فراتر از شناسایی محل‌های دارای نشست است. در واقع، باید زنجیره کامل ایجاد خطر از منبع اولیه تا پیامد نهایی مورد توجه قرار گیرد. در مناطق مستعد فرونشست، مدیریت منابع آب زیرزمینی بخشی جدایی‌ناپذیر از مدیریت ریسک زیرساخت‌های مدفون محسوب می‌شود. در کنار اقدامات مدیریتی، پایش مستمر فرونشست و تغییرات زیرسطحی نقش اساسی در کاهش ریسک دارد. از سوی دیگر، در مناطقی که فرونشست با نرخ بالا، شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی نامناسب یا سابقه تکرارشونده آسیب به زیرساخت همراه است، بررسی مجدد مسیر خط لوله و در صورت لزوم اصلاح یا تغییر مسیر آن می‌تواند یکی از گزینه‌های اساسی مدیریت ریسک باشد. با وجود اهمیت هر یک از این اقدامات، مدیریت مؤثر ریسک نیازمند یکپارچه‌سازی آنها در یک چارچوب تصمیم‌گیری واحد است. در چنین چارچوبی، فرونشست نباید صرفاً به‌عنوان یک پدیده زمین‌شناسی یا ژئوتکنیکی مستقل و خرابی خط لوله نیز نباید صرفاً به‌عنوان یک مسئله مکانیکی بررسی شود؛ بلکه لازم است ارتباط میان مخاطره، آسیب‌پذیری، احتمال خرابی، احتمال نشت، میزان مواجهه و شدت پیامدهای محیط‌زیستی به‌صورت یک زنجیره پیوسته در نظر گرفته شود.

با وجود مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی مخاطرات ژئوتکنیکی ناشی از فرونشست زمین و بررسی رفتار مکانیکی خطوط لوله مدفون، همچنان نیاز به چارچوبی یکپارچه وجود دارد که ارتباط میان تغییرشکل‌های ناشی از فرونشست، احتمال آسیب‌دیدگی و نشت گاز، میزان رهایش گاز و پیامدهای زیست‌محیطی آن را به‌صورت زنجیره‌ای و نظام‌مند بررسی کند. در بسیاری از رویکردها، تمرکز اصلی بر شناسایی پهنه‌های فرونشستی یا ارزیابی آسیب‌پذیری مکانیکی خطوط لوله است؛ درحالی‌که پیوند دادن این اطلاعات به پیامدهای زیست‌محیطی و تبدیل نتایج ارزیابی به اولویت‌های اجرایی برای مداخله، پایش و اصلاح، همچنان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در ارائه چارچوبی یکپارچه برای پیوند دادن اطلاعات فرونشست زمین، شاخص‌های مکانیکی و احتمال خرابی خطوط انتقال گاز با برآورد پیامدهای زیست‌محیطی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی، پایشی، فنی و اصلاحی است. در این چارچوب، فرونشست صرفاً بر اساس مقدار نشست تجمعی ارزیابی نمی‌شود، بلکه شاخص‌هایی نظیر نشست نامتقارن، شیب تغییرمکان و انحنای زمین نیز در تحلیل شرایط تحمیل‌شده به خط لوله مورد توجه قرار می‌گیرند تا مبنایی منسجم‌تر برای شناسایی بخش‌های پرخطر و تخصیص هدفمند منابع کنترلی فراهم شود. در این راستا، ابتدا سازوکار شکل‌گیری فرونشست و نحوه انتقال تغییرشکل زمین به خط لوله بررسی می‌شود؛ سپس مسیر تبدیل تغییرشکل زمین به آسیب خط لوله و در نهایت نشت گاز و پیامدهای زیست‌محیطی آن تشریح می‌گردد. در ادامه، سازوکار نشت گاز و پیامدهای زیست محیطی ناشی از از خرابی خطوط لوله مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت چارچوب ارزیابی ریسک زیست‌محیطی خطوط انتقال گاز در پهنه‌های فرونشستی ارائه و پیشنهاد می‌شود.

## ۲-مبانی نظری و سازوکار شکل‌گیری فرونشست زمین

فرونشست زمین پدیده‌ای چندعاملی است که در اثر تغییرشکل تدریجی یا ناگهانی توده‌های زمین و کاهش تراز سطح زمین نسبت به وضعیت اولیه ایجاد می‌شود. اگرچه فرونشست می‌تواند منشأ طبیعی داشته باشد، در بسیاری از دشت‌های توسعه‌یافته و مناطق شهری، فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه برداشت بیش از ظرفیت از منابع آب زیرزمینی، از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده آن محسوب می‌شوند. اهمیت این پدیده برای زیرساخت‌های حیاتی زمانی بیشتر می‌شود که تغییرشکل سطح زمین از حالت یکنواخت خارج شده و به‌صورت مکانی ناهمگن در طول مسیر زیرساخت توسعه یابد [۲۲]. در این شرایط، مقدار نشست به‌تنهایی معیار مناسبی برای تعیین سطح خطر نیست و پارامترهایی نظیر نشست تفاضلی، گرادیان تغییرمکان، انحنای سطح تغییرشکل‌یافته و نرخ تغییرات زمانی آن می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌تری در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های مدفون داشته باشند.

## ۲-۱-عوامل مؤثر بر فرونشست زمین

بر اساس مطالعات جامع انجام‌شده، مهم‌ترین مکانیسم‌های ایجاد فرونشست شامل تراکم سیستم آبخوان، زهکشی خاک‌های آلی، تراکم رسوبات کم‌تراکم، فعالیت‌های معدنی، استخراج نفت و گاز، انحلال و فروریزش سنگ‌های مستعد و برخی فرآیندهای زمین‌شناختی طبیعی هستند [۲۳, ۲۴]. در میان این عوامل، تراکم سیستم آبخوان در اثر برداشت آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های فرونشست در دشت‌های آبرفتی است. در چنین محیط‌هایی، رسوبات آبرفتی معمولاً از تناوبی از لایه‌های نسبتاً نفوذپذیر ماسه‌ای و شنی و لایه‌های کم‌نفوذتر رسی و سیلتی تشکیل شده‌اند. افت سطح آب زیرزمینی می‌تواند موجب تغییر وضعیت تنش در این رسوبات و در نهایت تراکم لایه‌های تراکم‌پذیر شود. هنگامی که برداشت آب زیرزمینی موجب کاهش هد و فشار آب منفذی شود، در صورت ثابت‌بودن تقریبی تنش کل ناشی از وزن لایه‌های فوقانی، سهم بیشتری از بار به اسکلت جامد خاک منتقل می‌شود و تنش مؤثر افزایش می‌یابد. در رسوبات تراکم‌پذیر، این افزایش تنش می‌تواند موجب کاهش حجم و ضخامت لایه‌های خاک و در نهایت کاهش تراز سطح زمین شود [۲۴, ۲۵]. لازم به ذکر است که بخشی از تغییرشکل‌ها ممکن است در محدوده‌ای از تنش رخ دهد که با بازیابی فشار آب زیرزمینی، امکان برگشت نسبی آن وجود داشته باشد؛ اما اگر تنش مؤثر از محدوده پیش‌تحکیمی لایه عبور کند، تراکم غیرکشسان و دائمی می‌تواند رخ دهد. در این حالت، حتی بازگشت سطح آب زیرزمینی به تراز قبلی الزاماً به بازگشت کامل سطح زمین منجر نخواهد شد. به همین دلیل، کنترل افت آب زیرزمینی و جلوگیری از عبور تنش مؤثر از آستانه‌های بحرانی، از منظر مدیریت بلندمدت فرونشست اهمیت اساسی دارد. رابطه میان مدیریت آب و مدیریت فرونشست، رابطه‌ای مستقیم و بنیادی است. کاهش برداشت از آبخوان و در شرایط هیدروژئولوژیکی مناسب، تغذیه مصنوعی آبخوان از مهم‌ترین راهکارهای کنترل فرونشست ناشی از افت آب زیرزمینی محسوب می‌شوند [۲۵].

به طور کلی عوامل مؤثر بر شدت و الگوی فرونشست را می‌توان در چهار گروه اصلی مطابق شکل ۱ طبقه‌بندی کرد. لازم به ذکر است که در یک پهنه مشخص، برهم‌کنش این عوامل تعیین می‌کند که فرونشست با چه شدت، گستره و الگویی رخ دهد. بنابراین، فرونشست را نباید صرفاً یک پارامتر ارتفاعی مانند مقدار نشست در نظر گرفت؛ بلکه یک میدان تغییرشکل سه‌بعدی و وابسته به زمان است که مشخصات مکانی آن می‌تواند مستقیماً بر رفتار زیرساخت‌های واقع در پهنه اثرگذار باشد.




*شکل ۱- عوامل مؤثر بر شدت و الگوی فرونشست*

## ۲-۲-شاخص‌های مؤثر بر ارزیابی خطر فرونشست برای زیرساخت‌های مدفون

ارزیابی خطر فرونشست برای زیرساخت‌های مدفون باید بر مبنای ارتباط میان شدت تغییرشکل زمین و ظرفیت تحمل تغییرشکل زیرساخت انجام شود. در این رویکرد، خطر صرفاً تابع مقدار نشست نیست، بلکه به ویژگی‌های هندسی و مکانیکی زیرساخت، شرایط خاک، مشخصات تغییرشکل زمین و اندرکنش متقابل آنها وابسته است [۲۶]. برای یک خط لوله مدفون، می‌توان شاخص‌های مؤثر را در پنج گروه اصلی طبقه‌بندی کرد.

الف) شاخص‌های مربوط به شدت فرونشست: این گروه شامل حداکثر نشست، نشست تفاضلی، نرخ نشست، گرادیان قائم و افقی تغییرمکان، انحنای زمین و طول ناحیه انتقال است. در میان این پارامترها، گرادیان و انحنای تغییرشکل برای خطوط لوله پیوسته اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا این کمیّت‌ها مستقیماً با میزان تطابق هندسی خط لوله با زمین مرتبط هستند.

ب) شاخص‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی: عمق و نرخ افت آب زیرزمینی، ضخامت لایه‌های تراکم‌پذیر، نوع و توالی خاک، تراکم اولیه، شاخص تراکم‌پذیری، ضریب تحکیم، نفوذپذیری، شرایط زهکشی و وضعیت پیش‌تحکیمی از جمله متغیرهایی هستند که ظرفیت و روند تغییرشکل زمین را کنترل می‌کنند. استفاده از این پارامترها برای تفکیک مناطق با پتانسیل متفاوت فرونشست ضروری است. رویکردهای مدرن تحلیل فرونشست نیز بر ارتباط میان هد آب زیرزمینی، تنش، تراکم‌پذیری و جریان آب تأکید دارند [۲۴, ۲۵].

ج) شاخص‌های مرتبط با مشخصات خط لوله: قطر، ضخامت جداره، جنس و خواص مکانیکی ماده، تنش تسلیم، مدول الاستیسیته، شکل مقطع، فشار داخلی، شرایط اتصال، کیفیت جوش‌ها، وجود خوردگی یا عیوب قبلی، شعاع انحنا و شرایط تکیه‌گاهی و دفن از عوامل تعیین‌کننده ظرفیت خط لوله در برابر تغییرشکل زمین هستند. در ارزیابی‌های مبتنی بر کرنش، تقاضای کرنش محوری و خمشی و مقایسه آن با حدود پذیرش متناظر با سطح عملکرد خط لوله اهمیت اساسی دارد. ادبیات جدید ارزیابی یکپارچگی خطوط لوله نیز حرکت زمین ناشی از مخاطرات ژئوتکنیکی را از عوامل مهم ایجاد تغییرشکل بیش از حد و در نتیجه نشت یا گسیختگی می‌داند [۲۷].

د) شاخص‌های اندرکنش خاک-خط لوله: مقاومت اصطکاکی در راستای طولی، مقاومت جانبی و قائم خاک، سختی خاک، شرایط تماس، عمق دفن، عرض ترانشه و شرایط خاکریز از جمله متغیرهایی هستند که نحوه انتقال تغییرشکل زمین به خط لوله را کنترل می‌کنند. مطالعات جدید نشان داده‌اند که تحلیل پاسخ خط لوله تحت فرونشست بدون درنظرگرفتن اندرکنش خاک-لوله می‌تواند تصویر ناقصی از توزیع تنش و تغییرشکل ارائه دهد؛ زیرا بخشی از تغییرشکل زمین از طریق انتقال نیرو و اصطکاک به خط لوله منتقل شده و بخشی نیز به‌واسطه رفتار خاک و قوس‌زدگی آن بازتوزیع می‌شود [۱۳, ۲۷].

هـ) شاخص‌های پیامدی و عملکردی: در چارچوب مدیریت ریسک، شدت تغییرشکل به‌تنهایی برای تصمیم‌گیری کافی نیست. اهمیت یک بخش از خط لوله به پیامد احتمالی خرابی آن نیز وابسته است. بنابراین، تراکم جمعیت و کاربری اراضی پیرامون، نزدیکی به مناطق مسکونی، تأسیسات صنعتی، منابع آب، مناطق زیست‌محیطی حساس، زیرساخت‌های حیاتی و اهمیت عملکردی بخش موردنظر شبکه باید در ارزیابی نهایی لحاظ شود.

استفاده از داده‌های پایش مکانی و زمانی برای تعیین شاخص‌های فوق اهمیت ویژه‌ای دارد. روش‌هایی مانند InSAR[1]، GPS[2] دقیق، ترازیابی، اکستنسومترها و پایش سطح آب زیرزمینی می‌توانند برای شناسایی روند و الگوی فرونشست به‌کار گرفته شوند. مطالعات USGS[3] نیز ترکیب اندازه‌گیری‌های زمینی و روش‌های سنجش‌ازدور، از جمله GPS، ترازیابی، اکستنسومتر و InSAR را برای اندازه‌گیری و پهنه‌بندی فرونشست توصیه کرده‌اند [۲۴]. از این رو، مناسب‌ترین رویکرد برای خطوط انتقال گاز، تبدیل نقشه فرونشست به یک نقشه خطر زیرساختی است؛ یعنی اطلاعات مربوط به شدت و روند فرونشست باید با مشخصات خط لوله و حساسیت محیط پیرامون تلفیق شود. چنین تلفیقی می‌تواند بخش‌های مختلف مسیر را به پهنه‌های با خطر کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم کرده و مبنایی برای اولویت‌بندی پایش، بازرسی، اصلاح مسیر، تقویت، افزایش انعطاف‌پذیری یا سایر اقدامات کاهش ریسک فراهم کند [۲۸-۳۰].

## ۳-اثر فرونشست زمین و سازوکارهای آسیب‌پذیری خطوط انتقال گاز در برابر آن

خطوط انتقال گاز طبیعی، به‌عنوان زیرساخت‌های خطی و پیوسته، در بسیاری از مناطق از داخل پهنه‌هایی عبور می‌کنند که تغییرات مکانی و زمانی شرایط زمین در آنها اجتناب‌ناپذیر است. اگرچه خط لوله در شرایط بهره‌برداری عادی عمدتاً برای تحمل فشار داخلی،

---

[1] Interferometric Synthetic Aperture Radar
[2] Global Positioning System
[3] United States Geological Survey

بارهای حرارتی، وزن خود و بارهای ناشی از خاک و سایر بارگذاری‌های متعارف طراحی می‌شود، حرکت دائمی زمین می‌تواند نوع متفاوتی از تقاضا را بر آن تحمیل کند [۱۲]. در این حالت، زمین عملاً به‌عنوان یک جابه‌جایی تحمیلی عمل می‌کند و خط لوله باید خود را با هندسه جدید زمین تطبیق دهد. این وضعیت با بارگذاری متعارف که در آن مقدار نیرو یا بار خارجی به‌عنوان ورودی اصلی مسئله تعریف می‌شود، تفاوت بنیادی دارد؛ زیرا در مسائل ناشی از حرکت زمین، جابه‌جایی زمین معمولاً کمیّتی قابل‌اندازه‌گیری‌تر از نیروی ایجادشده در خط لوله است و پاسخ نیرو-تغییرشکل به‌شدت به اندرکنش خاک و لوله وابسته است.

در مورد فرونشست زمین، این مسئله زمانی بحرانی‌تر می‌شود که نشست در طول مسیر خط لوله یکنواخت نباشد. نشست یکنواخت در امتداد یک خط طولانی، در حالت ایده‌آل، می‌تواند عمدتاً به‌صورت جابه‌جایی جسم صلب خط لوله تلقی شود؛ اما تغییرات مکانی نشست موجب ایجاد تغییرمکان نسبی بین خط لوله و خاک اطراف و در نتیجه ایجاد نیروها و کرنش‌های اضافی می‌شود. بنابراین، معیار اصلی در ارزیابی اثر فرونشست بر یک خط لوله، صرفاً مقدار نشست تجمعی نیست، بلکه شکل تابع تغییرمکان زمین، گرادیان آن، طول ناحیه انتقال، انحنا و میزان سازگاری هندسی و مکانیکی خط لوله با تغییرشکل زمین است [۳, ۳۱, ۳۲]. مطالعات آزمایشگاهی نیز نشان داده‌اند که پاسخ خط لوله تحت فرونشست به‌طور مستقیم با الگوی تغییرمکان، خمش لوله، قوس‌زدگی خاک و برش در فصل مشترک خاک-لوله ارتباط دارد [۱۲, ۳۳].

اندرکنش خاک-خط لوله یکی از عوامل اساسی در تعیین پاسخ مکانیکی خطوط انتقال مدفون تحت تغییرشکل‌های ناشی از فرونشست زمین است. این اندرکنش یک فرآیند دوطرفه است؛ به این معنا که تغییرشکل زمین موجب انتقال جابه‌جایی و نیرو به خط لوله می‌شود و در مقابل، سختی خمشی و محوری خط لوله نیز نحوه توزیع تغییرشکل در خاک پیرامون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. انحنای سطح زمین الزاماً برابر با انحنای محور خط لوله نیست؛ زیرا پاسخ واقعی خط به سختی خمشی و محوری لوله، مقاومت خاک در راستاهای مختلف، شرایط تماس، عمق دفن و احتمال لغزش یا جدایش در فصل مشترک وابسته است. ازاین‌رو، استفاده از پروفیل نشست برای شناسایی نواحی بحرانی و غربالگری اولیه مناسب است، اما برآورد دقیق تقاضای کرنش در بخش‌های پرخطر باید تا حد امکان بر اساس مدل مکانیکی معتبر و متناسب با شرایط پروژه انجام شود. علاوه بر این، پاسخ خط لوله تابعی از سختی نسبی خاک و لوله، شرایط تماس، عمق دفن، مشخصات خاک و خاکریز، مقاومت اصطکاکی در فصل مشترک، مقاومت جانبی و قائم خاک، هندسه ترانشه و ویژگی‌های هندسی و مکانیکی خط لوله است [۳۴, ۳۵].

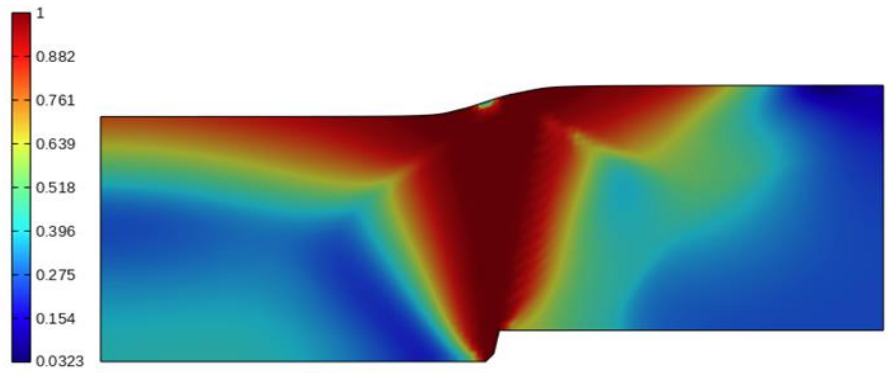
در ساده‌ترین روش‌های تحلیلی، خط لوله به‌صورت یک عضو پیوسته با رفتار تیرگونه و محیط خاک به‌صورت مجموعه‌ای از فنرهای معادل در راستاهای محوری، جانبی و قائم مدل می‌شود. این مدل‌ها امکان ارتباط دادن تغییرمکان زمین با نیروهای اندرکنشی و بررسی پاسخ خط لوله تحت حرکت زمین را فراهم می‌کنند [۳۶]. در مدل‌های پیشرفته‌تر، رفتار غیرخطی خاک، لغزش در فصل مشترک، جدایش خاک و لوله، قوس‌زدگی خاک و اندرکنش هم‌زمان مؤلفه‌های محوری، خمشی و جانبی نیز قابل لحاظ است. اهمیت این موضوع در شرایط فرونشست از آن جهت است که در صورت نشست نامتقارن زمین، ممکن است تماس میان کف لوله و خاک در بخش‌هایی از مسیر کاهش یافته یا به‌طور موضعی از بین برود. در نتیجه، خط لوله در این نواحی می‌تواند رفتاری مشابه یک عضو پل‌مانند پیدا کند و با افزایش لنگر خمشی و نیروی محوری مواجه شود. همچنین، به دلیل پدیده قوس‌زدگی، فشار وارد بر لوله الزاماً برابر با وزن مستقیم ستون خاک بالای آن نیست و بخشی از بار از طریق انتقال تنش در توده خاک به نواحی مجاور منتقل می‌شود. بنابراین، توزیع فشار تماس خاک-لوله می‌تواند هم مقدار و هم محل تمرکز نیروهای داخلی خط را تغییر دهد. لازم به ذکر است که رفتار اندرکنش خاک-لوله با افزایش دامنه حرکت زمین نیز ثابت باقی نمی‌ماند. در تغییرشکل‌های کوچک، تماس میان خاک و لوله ممکن است تقریباً پیوسته و رفتار سیستم نزدیک به الاستیک باشد؛ اما با افزایش جابه‌جایی نسبی، لغزش، تغییر وضعیت تماس، جدایش موضعی و کاهش یا بازتوزیع مقاومت خاک می‌تواند رخ دهد (شکل ۲). در نتیجه، سختی مؤثر سیستم و نحوه انتقال تغییرشکل از زمین به خط لوله تغییر می‌کند. این رفتار غیرخطی به‌ویژه در مناطقی که انتظار تغییرشکل‌های بزرگ ناشی از فرونشست وجود دارد، باید در ارزیابی مکانیکی و تحلیل یکپارچگی خط لوله مورد توجه قرار گیرد.

یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده پاسخ خط لوله، ناهمگونی تغییرشکل زمین در امتداد مسیر است. نشست یکنواخت در طول یک بازه نسبتاً طولانی الزاماً تقاضای مکانیکی شدیدی ایجاد نمی‌کند، زیرا خط لوله می‌تواند به‌تدریج با حرکت زمین سازگار شود؛ در مقابل، نشست تفاضلی و تغییر سریع جابه‌جایی زمین در یک فاصله کوتاه، موجب افزایش شیب و انحنای تحمیلی و در نتیجه افزایش کرنش‌های محوری و خمشی می‌شود. بنابراین، برای یک مقدار ثابت از نشست تجمعی، کاهش طول ناحیه‌ای که تغییرشکل در آن رخ می‌دهد می‌تواند تقاضای مکانیکی خط لوله را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. ازاین‌رو، ناحیه بحرانی الزاماً در مرکز پهنه دارای بیشترین

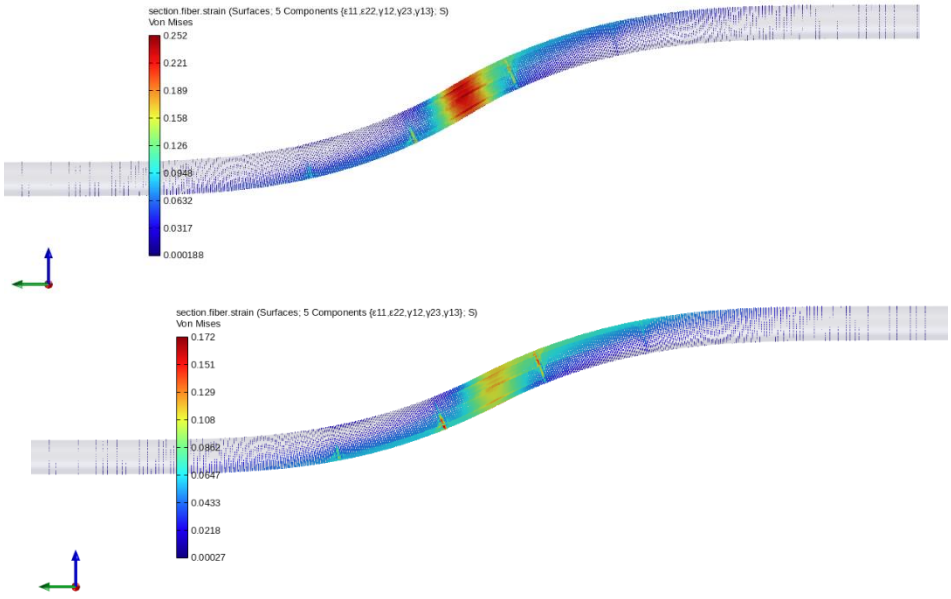
نشست قرار ندارد و ممکن است در مرز میان مناطق با نرخ یا مقدار متفاوت فرونشست ایجاد شود؛ جایی که گرادیان تغییرشکل بیشینه است (شکل ۳)

فرونشست تفاضلی می‌تواند مجموعه‌ای از سازوکارهای آسیب را در خط لوله فعال کند که مهم‌ترین آن‌ها شامل خمش، کشش یا فشار محوری، برش، تغییرشکل مقطع و در شرایط شدید، کمانش موضعی و چروکیدگی جداره است [۱۵]. هنگامی که محور خط لوله در اثر نشست نامتقارن از هندسه اولیه خود خارج می‌شود، انحنای ایجادشده موجب تولید کرنش خمشی در جداره خواهد شد. در شرایط الاستیک، لنگر خمشی تابعی از سختی خمشی خط لوله و انحنای ایجاد شده است و افزایش انحنا مستقیماً موجب افزایش اختلاف کرنش در دو سمت مقطع می‌شود. بنابراین، در یک ارزیابی مبتنی بر عملکرد، کرنش خمشی باید در کنار کرنش محوری مورد توجه قرار گیرد و نمی‌توان اثر آن‌ها را به‌صورت کاملاً مستقل بررسی کرد.

در کنار خمش، تغییرشکل زمین می‌تواند به ایجاد نیروی محوری نیز منجر شود. مقاومت اصطکاکی خاک در راستای محور خط و پیوستگی خط لوله سبب می‌شود جابه‌جایی نسبی زمین به نیروی محوری تبدیل شود. بسته به هندسه میدان تغییرشکل و شرایط مرزی، این نیرو می‌تواند کششی یا فشاری باشد. نیروی کششی در صورت وجود عیوب اولیه، خوردگی یا کاهش ضخامت جداره می‌تواند احتمال رشد ترک و گسیختگی را افزایش دهد، درحالی‌که نیروی فشاری، به‌ویژه در ترکیب با خمش، می‌تواند شرایط لازم برای ناپایداری و کمانش موضعی را فراهم کند. ازاین‌رو، ارزیابی اثر فرونشست باید بر اساس ترکیب تقاضای محوری و خمشی انجام شود و ارزیابی جداگانه هر مؤلفه ممکن است شدت واقعی تقاضا را دست‌کم بگیرد.

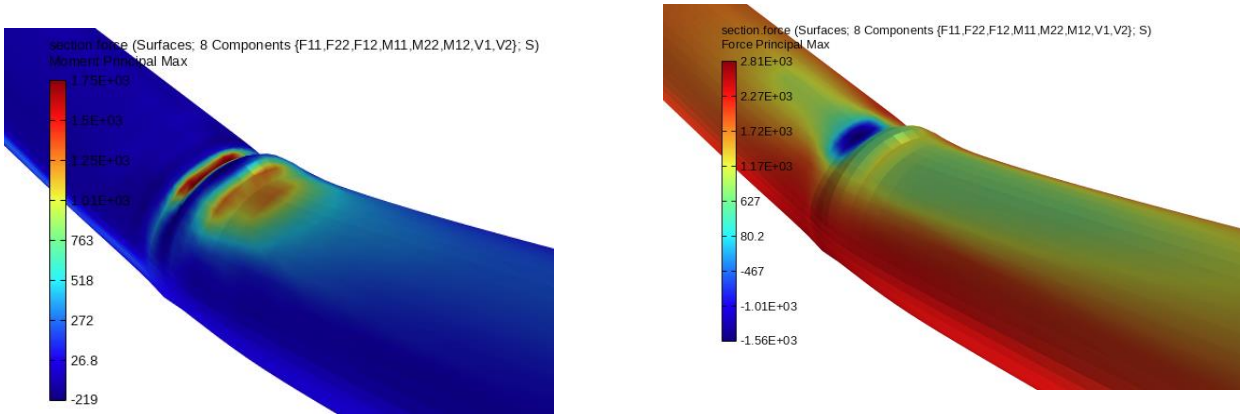



شکل ۲- توزیع نسبت بین تنش برشی و بیشینه مقاومت برشی در خاک تحت تغییر شکل‌های ناشی از فرونشست




شکل ۳- بازتوزیع کرنش فون-میسز در طول لوله تحت افزایش تغییر شکل‌های ناشی از فرونشست

حرکت نسبی میان خاک و لوله همچنین موجب ایجاد تنش‌های برشی در فصل مشترک می‌شود [۱۳]. این تنش‌ها در راستاهای محوری، جانبی و قائم ایجاد شده و نقش اساسی در انتقال نیرو از توده خاک به خط لوله دارند. مقدار مقاومت فصل مشترک به نوع و تراکم خاک، زبری سطح لوله، فشار محصورکننده، عمق دفن و شرایط رطوبتی وابسته است. با افزایش جابه‌جایی نسبی، مقاومت تماس ممکن است ابتدا افزایش یافته و سپس به مقدار حدی برسد؛ پس از آن نیز در اثر لغزش یا تغییر وضعیت تماس، امکان بازتوزیع مقاومت وجود دارد. بنابراین، استفاده از فنرهای کاملاً خطی برای تمام دامنه تغییرشکل ممکن است در شرایط فرونشست شدید کافی نباشد و در تحلیل‌های دقیق‌تر باید رفتار غیرخطی و امکان لغزش یا جدایش تماس لحاظ شود. در شرایطی که نیروی فشاری با خمش قابل‌توجه همراه شود، کمانش موضعی و چروکیدگی جداره نیز می‌تواند به یکی از مکانیزم‌های کنترل‌کننده خرابی تبدیل شود (شکل ۴). این پدیده با توجه به نسبت قطر به ضخامت، خواص فولاد، فشار داخلی، هندسه مقطع و وجود عیوب اولیه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. فرونشست تفاضلی می‌تواند از طریق افزایش انحنا و ایجاد نیروی محوری فشاری، شرایط مساعدی برای ناپایداری جداره فراهم کند. در صورت وجود مؤلفه‌های جانبی یا پیچشی در تغییرشکل زمین، پاسخ سه‌بعدی خط لوله نیز ممکن است اهمیت پیدا کند و فرض خمش صرفاً قائم دیگر کافی نباشد. بنابراین، در مناطق با تغییرشکل شدید، ارزیابی یکپارچگی باید علاوه بر خمش و کشش، احتمال کمانش، تغییرشکل مقطع و سایر مکانیزم‌های ناپایداری را نیز در نظر بگیرد [۱۵].

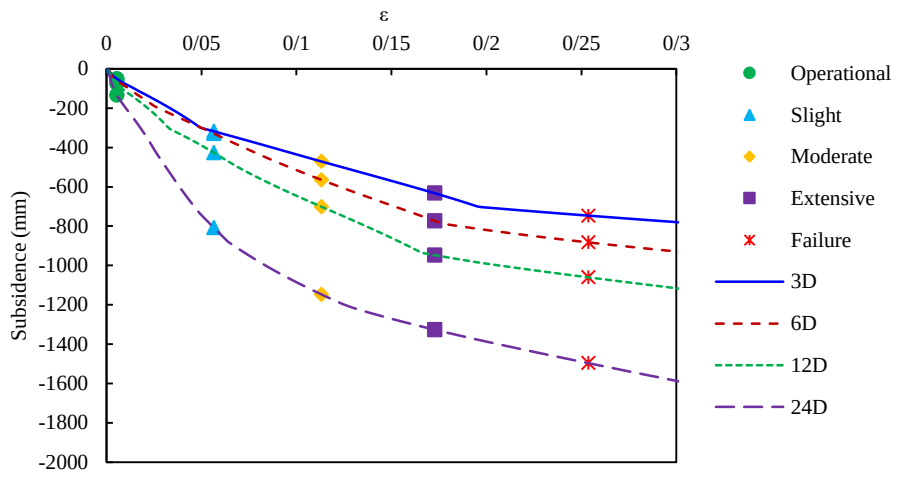



شکل ۴- چروکیدگی جداره لوله

عمق دفن و شرایط ترانشه نیز از عوامل مؤثر بر پاسخ سیستم هستند. تغییر عمق دفن، محصورشدگی خط و مقاومت خاک-لوله را تغییر می‌دهد و در عین حال بر فشار خاک وارد بر خط اثر می‌گذارد؛ بنابراین، اثر آن را نمی‌توان به‌صورت یک رابطه یکنواخت و مستقل از سایر پارامترها تفسیر کرد. به همین ترتیب، فشار داخلی و شرایط بهره‌برداری باید در ارزیابی یکپارچگی لحاظ شوند. خط لوله در حالت بهره‌برداری از پیش تحت تنش‌های ناشی از فشار داخلی و سایر شرایط عملیاتی قرار دارد و تقاضای ناشی از فرونشست به این حالت تنش موجود افزوده می‌شود. بنابراین، ظرفیت باقی‌مانده خط در برابر تغییرشکل زمین به وضعیت بهره‌برداری و تنش اولیه آن نیز وابسته است. در نهایت، وضعیت اولیه یکپارچگی خط لوله نقش تعیین‌کننده‌ای در احتمال خرابی دارد. خوردگی و کاهش ضخامت جداره، ترک‌ها، عیوب جوش، فرورفتگی‌ها، تعمیرات قبلی و سایر ناپیوستگی‌های موجود می‌توانند ظرفیت خط برای تحمل تغییرشکل‌های تحمیلی را کاهش دهند [۳۷]. ازاین‌رو، فرض یک خط لوله کاملاً سالم و یکنواخت در ارزیابی ریسک فرونشست می‌تواند به برآورد کمتر از واقع احتمال خرابی منجر شود. در چنین شرایطی، استفاده از رویکرد مبتنی بر کرنش اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا در مسائل ناشی از حرکت زمین، تغییرمکان و کرنش تحمیلی زمین از متغیرهای اصلی کنترل‌کننده پاسخ هستند و می‌توان با تبدیل این تغییرشکل‌ها به تقاضای کرنش خط لوله، ارتباط مستقیم‌تری میان رفتار زمین و معیار یکپارچگی برقرار کرد [۲۷]. در شکل ۵ نمونه‌ای از منحنی بیشینه کرنش فون-میسز در برابر میزان فرونشست در سطح زمین به همراه نقاط عملکردی مربوط به یک خط لوله، تحت فرونشست زمین نمایش داده شده است [۲۸-۳۰]. لازم به ذکر است که برای به دست آوردن این نمودارها، تغییر شکل لوله‌ای با طولی به اندازه ۳ (3D)، ۶ (6D)، ۱۲ (12D) و ۲۴ (24D) برابر قطر لوله (D) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سطوح خرابی متناظر با سطح خسارت کم (Slight)، متوسط (Moderate)، گسترده (Extensive) و نقطه گسیختگی مصالح (Failure) درنظر گرفته شده است.

در مجموع، پاسخ خط لوله در پهنه‌های فرونشستی حاصل اثر منفرد نشست زمین نیست، بلکه نتیجه اندرکنش میان الگوی مکانی و زمانی فرونشست، سختی و مقاومت خاک، مشخصات هندسی و مکانیکی خط، شرایط تماس خاک-لوله، وضعیت بهره‌برداری و نواقص اولیه است. ازاین‌رو، ارزیابی احتمال آسیب و خرابی باید از یک سو بر گرادیان و انحنای تغییرشکل زمین و از سوی دیگر بر ظرفیت واقعی

و وضعیت موجود خط لوله متمرکز باشد. این روش، مبنای مناسبی برای انتقال از ارزیابی صرفاً ژئوتکنیکی فرونشست به ارزیابی یکپارچگی و ریسک خطوط انتقال گاز فراهم می‌کند.




شکل ۵- نمونه‌ای از منحنی بیشینه کرنش فون-میسز در برابر میزان فرونشست در سطح زمین به همراه نقاط عملکردی مربوطه

## ۴-سازوکار نشت گاز و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از خرابی خطوط لوله

فرونشست زمین در صورتی که موجب کاهش یکپارچگی خط لوله شود، می‌تواند یک مخاطره ژئوتکنیکی را به یک زنجیره پیچیده از پیامدهای ایمنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی تبدیل کند. همان‌گونه که در بخش قبل تشریح شد، تغییرشکل ناهمگن زمین می‌تواند از طریق اندرکنش خاک-خط لوله موجب ایجاد کرنش‌های محوری و خمشی، تمرکز تنش، کمانش موضعی، آسیب جوش‌ها و در شرایط شدید، گسیختگی جداره شود. در صورت ایجاد منفذ، ترک یا شکست در خط، گاز تحت فشار داخلی به محیط پیرامون آزاد می‌شود. بسته به اندازه و محل آسیب، فشار و دبی خط، شرایط جوی، ویژگی‌های زمین و وجود منابع اشتعال، این نشت می‌تواند از یک انتشار محدود و موضعی تا یک حادثه گسترده همراه با حریق یا انفجار توسعه یابد.

از منظر محیط‌زیستی، مهم‌ترین پیامد مستقیم نشت گاز طبیعی، ورود متان ($CH_4$) و سایر اجزای گاز به اتمسفر است. متان، به‌عنوان جزء اصلی گاز طبیعی، یک گاز گلخانه‌ای قوی است و علاوه بر اثر مستقیم بر تراز تابشی جو، در شیمی اتمسفر و تشکیل ازن تروپوسفری نیز نقش دارد [۱۹-۲۱]. در صورت اشتعال، ماهیت آن تغییر می‌کند و محصولات احتراق، انرژی حرارتی و در برخی شرایط آلاینده‌های هوا نیز به محیط وارد می‌شوند. بنابراین، ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی خط لوله باید میان نشت بدون اشتعال، نشت همراه با آتش و نشت منجر به انفجار تمایز قائل شود. همچنین، پیامدهای ناشی از نشت باید بر اساس سناریوی فیزیکی و مسیر اثرگذاری مشخص ارزیابی شوند. انتشار مستقیم متان و پیامد اقلیمی آن، خطر حریق یا انفجار و آثار احتمالی بر آب، خاک و زیست‌بوم، از نظر سازوکار و دامنه اثر یکسان نیستند. به همین دلیل، این پیامدها ابتدا به‌صورت مستقل شناسایی و ارزیابی شوند. در صورت تجمیع آن‌ها در یک شاخص نهایی، لازم است هم‌پوشانی پیامدها، وابستگی میان سناریوها و نحوه وزن‌دهی یا تبدیل آن‌ها به معیار مشترک مشخص شود تا از دوباره‌شماری و ایجاد برآوردهای غیرواقع‌بینانه جلوگیری شود.

### ۴-۱-انتشار متان و پیامدهای اقلیمی آن

متان جزء اصلی گاز طبیعی و یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای مرتبط با زنجیره سوخت‌های فسیلی است. انتشار متان از سامانه‌های نفت و گاز می‌تواند در مراحل مختلف زنجیره تولید، فرآورش، انتقال و توزیع رخ دهد و خطوط انتقال و تجهیزات مرتبط نیز یکی از منابع انتشارهای ناخواسته محسوب می‌شوند. اهمیت زیست‌محیطی نشت متان از آنجا ناشی می‌شود که این گاز در مقایسه با دی‌اکسیدکربن، اثر گلخانه‌ای بسیار بیشتری در واحد جرم طی بازه‌های زمانی متعارف دارد [۳۸]. از دیدگاه اقلیمی، نکته مهم این است که پیامد انتشار متان به مقدار جرم متان آزادشده و مدت زمان ماندگاری آن در اتمسفر وابسته است. بنابراین، حتی یک نشت کوتاه‌مدت اما با دبی زیاد می‌تواند از نظر اثر اقلیمی قابل‌توجه باشد. در مقابل، نشت‌های کوچک و مزمن نیز در صورت مستمر می‌توانند در مقیاس زمانی طولانی مقدار قابل‌توجهی متان وارد اتمسفر کنند. ازاین‌رو، برای ارزیابی پیامد، تنها شدت لحظه‌ای نشت کافی نیست و باید حجم تجمعی انتشار

نیز مورد توجه قرار گیرد. متان نسبت به دی‌اکسیدکربن عمر جوی کوتاه‌تری دارد، اما در طول این دوره اثر گرمایشی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند. بنابراین، کاهش انتشارهای متان می‌تواند از جمله اقدامات مؤثر برای کاهش نرخ گرمایش در کوتاه‌مدت محسوب شود.

پیامد متان صرفاً به اثر گلخانه‌ای مستقیم آن محدود نمی‌شود. متان در شیمی اتمسفر نیز نقش دارد و می‌تواند در تشکیل ازن تروپوسفری مشارکت کند. متان یکی از پیش‌سازهای ازن تروپوسفری است و ازن سطح زمین نیز با آثار نامطلوب بر سلامت انسان و پوشش گیاهی مرتبط است. ازاین‌رو، در چارچوب ریسک زیست‌محیطی خطوط انتقال گاز، پیامد انتشار متان را می‌توان در سه سطح پیامد اقلیمی مستقیم ناشی از انتشار متان؛ پیامدهای شیمیایی و کیفیت هوا ناشی از نقش متان در شیمی اتمسفر و تشکیل ازن، و پیامدهای محلی و ایمنی ناشی از تجمع گاز در محدوده‌های بسته یا نیمه‌بسته و قابلیت اشتعال آن در نظر گرفت. این تفکیک از نظر مدل‌سازی ریسک اهمیت دارد، زیرا دامنه مکانی و زمانی هر یک از این پیامدها متفاوت است. لازم به ذکر است که اثر اقلیمی انتشار متان عمدتاً ماهیتی منطقه‌ای تا جهانی دارد، در حالی که خطر اشتعال و انفجار (مورد بحث در بخش بعدی) عمدتاً یک پیامد محلی و وابسته به شرایط فیزیکی محل نشت است.

## ۴-۲-خطرات حریق، انفجار و پیامدهای ثانویه محیط‌زیستی

نشت گاز طبیعی علاوه بر انتشار مستقیم متان، می‌تواند یک سناریوی ثانویه خطرناک یعنی حریق یا انفجار ایجاد کند. گاز طبیعی در صورت اختلاط با هوا در محدوده مناسب قابلیت اشتعال دارد و در صورت وجود منبع اشتعال، انرژی شیمیایی گاز می‌تواند به انرژی حرارتی و در شرایط خاص به موج فشار تبدیل شود. بنابراین، احتمال حریق یا انفجار تابعی از دبی و مدت نشت، شرایط تهویه، هندسه محیط، غلظت گاز، موقعیت منبع اشتعال و شرایط جوی است [۳۹]. در یک سناریوی حریق، آزادسازی انرژی حرارتی می‌تواند به انسان‌ها، ساختمان‌ها، پوشش گیاهی، تأسیسات و سایر زیرساخت‌های مجاور آسیب وارد کند. در صورت وجود ناحیه مسکونی یا صنعتی در اطراف خط، شدت پیامد می‌تواند به‌مراتب بیشتر از خود اثر اولیه فرونشست باشد. تحلیل‌های پیامد خطوط گاز نیز معمولاً شعاع اثر حرارتی، احتمال اشتعال و محدوده آسیب‌پذیری انسانی و ساختمانی را در سناریوهای مختلف شکست مورد بررسی قرار می‌دهند. در سناریوی انفجار، علاوه بر تابش حرارتی، موج فشار و پرتاب قطعات نیز می‌توانند موجب آسیب ثانویه شوند. همچنین، انفجار یا آتش‌سوزی می‌تواند موجب آسیب هم‌زمان به سایر شبکه‌های زیرساختی شود و در نتیجه یک اثر آبشاری ایجاد کند. برای مثال، آسیب به خطوط برق، مخابرات، تأسیسات آب، جاده‌ها یا سایر خطوط لوله در محدوده حادثه می‌تواند قابلیت پاسخ اضطراری و بازگشت عملکرد را کاهش دهد. از منظر محیط‌زیستی، حریق گاز طبیعی با نشت بدون اشتعال تفاوت اساسی دارد. در نشت بدون اشتعال، مسئله اصلی انتشار متان و خطر بالقوه تجمع گاز است؛ اما در حریق، گاز به محصولات احتراق تبدیل می‌شود و انتشار آلاینده‌هایی مانند $CO_2$، $CO$ و اکسیدهای نیتروژن نیز مطرح می‌شود. اکسیدهای نیتروژن مهم‌ترین آلاینده‌های هوا در احتراق گاز طبیعی هستند و بسته به شرایط احتراق، $CO$ و ترکیبات آلی نیز می‌توانند تولید شوند. در صورت احتراق ناقص، تشکیل مونوکسیدکربن و برخی ترکیبات آلی افزایش می‌یابد. بنابراین، در یک حادثه واقعی، کیفیت هوای پیرامون محل حادثه باید با توجه به نوع سناریوی احتراق، شرایط جوی و مدت حریق ارزیابی شود و نمی‌توان تمام پیامدهای کیفیت هوا را صرفاً به نشت متان نسبت داد.

از سوی دیگر، عملیات اطفای حریق می‌تواند یک مسیر ثانویه برای انتقال آلاینده‌ها به محیط ایجاد کند. آب یا مواد مورد استفاده برای کنترل حریق ممکن است با خاکستر، محصولات احتراق، مواد موجود در محل حادثه یا سیالات حاصل از تجهیزات آسیب‌دیده مخلوط شده و به‌صورت رواناب وارد خاک یا آب‌های سطحی شوند. بنابراین، آلودگی آب و خاک در چنین سناریویی بیشتر باید به‌عنوان پیامد ثانویه حادثه و نه پیامد مستقیم متان در نظر گرفته شود.

## ۴-۳-آثار بالقوه بر محیط انسانی، اکوسیستم‌ها و کاربری‌های پیرامونی

شدت پیامد ناشی از خرابی خط انتقال گاز تنها به مقدار گاز آزادشده وابسته نیست، بلکه به میزان مواجهه و حساسیت محیط پیرامون نیز بستگی دارد. به همین دلیل، دو نشت با دبی و مدت مشابه ممکن است پیامدهای کاملاً متفاوتی ایجاد کنند؛ برای مثال، نشت در یک منطقه کم‌تراکم و دور از کاربری‌های حساس با نشت مشابه در نزدیکی یک منطقه مسکونی، مدرسه، بیمارستان، تأسیسات صنعتی یا زیست‌بوم حساس قابل مقایسه نیست. از دیدگاه محیط انسانی، مهم‌ترین مسیرهای پیامد شامل مواجهه مستقیم با گاز یا محصولات احتراق؛ خطر آتش‌سوزی و انفجار؛ آسیب به ساختمان‌ها و زیرساخت‌های پیرامونی؛ تخلیه اضطراری جمعیت و اختلال در فعالیت‌های روزمره؛ اختلال در تأمین گاز و خدمات وابسته؛ پیامدهای روانی و اجتماعی ناشی از حادثه؛ خسارت اقتصادی مستقیم و غیرمستقیم است.

پیامدهای انتشار از خطوط لوله می‌توانند بسته به محل و ماده منتشرشده بسیار متفاوت باشند و ممکن است سلامت و ایمنی انسان، محیط‌زیست و اموال را تحت تأثیر قرار دهند. در خصوص خطوط انتقال گاز طبیعی، نزدیکی به جمعیت انسانی اهمیت ویژه‌ای دارد. در محیط‌های طبیعی، نشت بدون اشتعال می‌تواند در مقیاس محلی باعث تغییر شرایط شیمیایی و فیزیکی هوای نزدیک سطح زمین شود، اما مهم‌ترین اثر محیط‌زیستی آن در مقیاس بزرگ‌تر به انتشار متان و پیامدهای اقلیمی آن مربوط است. در صورت وقوع آتش‌سوزی، وضعیت متفاوت خواهد بود؛ زیرا پوشش گیاهی، خاک سطحی و زیستگاه‌های نزدیک می‌توانند در اثر شار حرارتی بالا، آتش مستقیم و عملیات اطفای حریق آسیب ببینند. در مناطق کشاورزی نیز حادثه می‌تواند علاوه بر خسارت مستقیم به محصولات و تجهیزات، موجب اختلال در عملیات کشاورزی، محدودیت دسترسی به اراضی و در صورت آسیب به شبکه‌های دیگر، کاهش قابلیت بهره‌برداری از زمین شود. در چنین شرایطی، پیامدهای محیط‌زیستی باید همراه با پیامدهای اقتصادی و اجتماعی ارزیابی شوند. در مناطق شهری، پیامدها می‌توانند پیچیده‌تر باشند، زیرا تراکم ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها احتمال اثر آبشاری را افزایش می‌دهد. یک حادثه ممکن است علاوه بر خط اصلی، به شبکه‌های آب، برق، ارتباطات، جاده‌ها یا تأسیسات مجاور آسیب برساند و فرآیند امدادرسانی و بازگشت به شرایط عادی را دشوار کند. ازاین‌رو، برای هر بخش از مسیر خط لوله، می‌توان محیط پیرامون را از نظر جمعیت، ساختمان‌ها، کاربری اراضی، منابع آب، مناطق کشاورزی، مناطق حفاظت‌شده، زیستگاه‌های حساس و زیرساخت‌های حیاتی مشخص کرد. سپس، این اطلاعات با احتمال خرابی و سناریوی نشت تلفیق می‌شوند.

### ۴-۴-تمایز میان آلودگی مستقیم ناشی از نشت گاز و آلودگی ثانویه ناشی از حوادث همراه

یکی از مهم‌ترین ملاحظات روش‌شناختی در ارزیابی ریسک زیست‌محیطی خطوط انتقال گاز، تفکیک صحیح مسیرهای مختلف آلودگی است. طبیعی است که آزادسازی گاز طبیعی به محیط را بتوان یک انتشار آلاینده تلقی کرد؛ اما از نظر ماهیت محیط‌زیستی، پیامد اصلی آن با نشت نفت خام، بنزین یا سایر مایعات هیدروکربنی متفاوت است. در سناریوی نشت مستقیم و بدون اشتعال، مهم‌ترین ماده منتشرشده متان و سایر اجزای گاز طبیعی هستند. در این وضعیت، مسیر اصلی انتقال، اتمسفر است و پیامدهای اصلی شامل افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مشارکت در شیمی ازن تروپوسفری و ایجاد شرایط بالقوه اشتعال در محیط پیرامون است. در سناریوی نشت همراه با اشتعال، بخش قابل‌توجهی از متان آزاد شده ممکن است به محصولات احتراق تبدیل شود. در سناریوی آتش‌سوزی گسترده یا انفجار، یک دسته دیگر از پیامدها ایجاد می‌شود که لزوماً مستقیماً از ترکیب شیمیایی گاز ناشی نمی‌شوند. این پیامدها شامل تخریب پوشش گیاهی، آسیب به ساختمان‌ها، آسیب به سایر خطوط و تأسیسات، تولید پسماند ناشی از تخریب، و احتمال انتقال آلاینده‌ها از طریق عملیات اطفای حریق است. از سوی دیگر، آلودگی خاک و آب تنها زمانی باید در مدل اصلی ریسک وارد شود که مسیر مشخصی برای وقوع آن وجود داشته باشد. برای مثال، در صورتی که حریق موجب آسیب به تأسیسات مجاور حاوی مواد شیمیایی یا نفتی شود، یا آب اطفای حریق با آلاینده‌های حاصل از سوختن و مواد موجود در محل تماس پیدا کند، احتمال انتقال ثانویه آلاینده‌ها به خاک و آب سطحی یا زیرزمینی وجود خواهد داشت. در غیر این صورت، نسبت‌دادن مستقیم آلودگی گسترده خاک یا آب به نشت متان از یک خط انتقال گاز از نظر علمی قابل دفاع نیست. این تمایز با رویکردهای رسمی مدیریت ایمنی خطوط لوله نیز همخوانی دارد.

## ۵-پیشنهاد چارچوب ارزیابی ریسک زیست‌محیطی خطوط انتقال گاز در پهنه‌های فرونشستی

فرونشست زمین در محدوده عبور خطوط انتقال گاز را نمی‌توان صرفاً یک مخاطره ژئوتکنیکی در نظر گرفت؛ زیرا در صورت ایجاد تغییرشکل‌های نامتقارن و موضعی، این پدیده می‌تواند یک زنجیره پیوسته از تغییرشکل زمین، تحمیل تقاضای مکانیکی به خط لوله، کاهش یکپارچگی، نشت گاز و ایجاد پیامدهای انسانی و زیست‌محیطی را ایجاد کند. ازاین‌رو، ارزیابی ریسک خطوط لوله در پهنه‌های فرونشستی باید ارتباط میان فرآیندهای هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی، پاسخ مکانیکی خط لوله، احتمال از دست رفتن یکپارچگی و شدت پیامدهای ناشی از نشت را به‌صورت یکپارچه بررسی کند. نکته اساسی آن است که مقدار مطلق فرونشست به‌تنهایی معیار مناسبی برای ارزیابی خطر خط لوله نیست. یک خط لوله ممکن است در پهنه‌ای با نشست تجمعی زیاد، در صورت یکنواخت بودن تغییرشکل زمین، تقاضای مکانیکی محدودی را تجربه کند؛ در مقابل، نشست تفاضلی شدید در فاصله‌ای کوتاه می‌تواند موجب ایجاد کرنش محوری و خمشی قابل‌توجه شود. بنابراین، در این پژوهش، مخاطره فرونشست از طریق تغییرشکل‌هایی تعریف می‌شود که قادر به ایجاد تقاضای مکانیکی معنی‌دار در خط لوله باشند. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی از چهار مرحله اصلی تشکیل می‌شود: (۱) تعیین تقاضای تغییرشکل ناشی از فرونشست، (۲) ارزیابی پاسخ و یکپارچگی خط لوله، (۳) تعیین احتمال نشت و مقدار آزادسازی گاز، و (۴) ارزیابی مواجهه و پیامدهای زیست‌محیطی و اولویت‌بندی اقدامات مداخله‌ای. در مرحله نخست، داده‌های فرونشست و اطلاعات ژئوتکنیکی برای

تعیین پروفیل تغییرشکل زمین و استخراج شاخص‌هایی مانند نشست تفاضلی، گرادیان و انحنا به کار می‌روند. در مرحله دوم، این اطلاعات همراه با مشخصات مکانیکی خط لوله و شرایط اندرکنش خاک و لوله برای ارزیابی تقاضای کرنش و احتمال از دست رفتن یکپارچگی استفاده می‌شوند. در مرحله سوم، احتمال نشت مشروط بر خرابی و مقدار گاز آزادشده برآورد می‌شود. در نهایت، با تلفیق اطلاعات مربوط به گیرنده‌های انسانی و محیطی، پیامدهای احتمالی و اولویت اقدامات مدیریتی تعیین خواهند شد. این توضیحات به روشن‌تر شدن مسیر اجرای چارچوب کمک می‌کنند. در این چارچوب، فرونشست "مخاطره"، تغییرشکل تحمیل‌شده به خط لوله "تقاضا"، ویژگی‌های خط و شرایط اندرکنش خاک-لوله "کنترل‌کننده پاسخ"، از دست رفتن یکپارچگی "رویداد خرابی"، نشت "رویداد پیامدزا" و اثر آن بر گیرنده‌های انسانی و محیطی "پیامد" محسوب می‌شود.

## ۵-۱-تعیین مخاطره فرونشست و تقاضای تغییرشکل زمین

مخاطره فرونشست در محدوده خطوط لوله باید بر اساس مقدار، نرخ و توزیع مکانی تغییرشکل زمین تعیین شود. مهم‌ترین پارامترها شامل نشست تجمعی $S(x,t)$، نرخ نشست $\dot{S}(x,t)$، نشست تفاضلی در طول مسیر، گرادیان نشست و انحنای سطح تغییرشکل‌یافته هستند. در میان این پارامترها، گرادیان و انحنای تغییرشکل اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا مستقیماً بر تقاضای کرنش و خمش ایجادشده در خط لوله اثر می‌گذارند. برای یک خط لوله واقع در امتداد محور x، تغییرشکل قائم زمین را می‌توان با تابع $S(x,t)$ توصیف کرد. در این حالت، شیب زمین در امتداد خط برابر است با:

$$\theta_g(x,t)=\frac{\partial S(x,t)}{\partial x}$$

و تغییرات شیب، که بیانگر انحنای پروفیل نشست هستند، از رابطه زیر به‌دست می‌آیند:

$$\kappa_g(x,t)=\frac{\partial^2 S(x,t)}{\partial x^2} \qquad (۲)$$

این دو پارامتر از نظر مهندسی اهمیت بیشتری از نشست تجمعی دارند، زیرا افزایش سریع $S$ در یک فاصله کوتاه موجب افزایش $\theta_g$ و $\kappa_g$ شده و در نتیجه احتمال ایجاد خمش و کرنش اضافی در خط لوله را افزایش می‌دهد. بنابراین، در ارزیابی مخاطره باید به جای استفاده از یک مقدار منفرد نشست، پروفیل مکانی نشست در امتداد کریدور خط لوله مورد استفاده قرار گیرد. داده‌های سری زمانی تصاویر رادار دریچه مصنوعی می‌توانند برای تعیین الگوی مکانی و روند زمانی فرونشست به‌کار روند و با داده‌های ترازیابی دقیق، GNSS، اطلاعات سطح آب زیرزمینی و داده‌های ژئوتکنیکی تلفیق شوند. این تلفیق به‌ویژه برای شناسایی نواحی گذار، پهنه‌های با گرادیان زیاد و مناطق دارای روند افزایشی فرونشست اهمیت دارد. همچنین نرخ نشست نیز از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{S}(x,t)=\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} \qquad (۳)$$

نرخ بالای نشست الزاماً به معنای خرابی فوری خط لوله نیست، اما بیانگر افزایش سرعت تغییر شرایط بارگذاری و کاهش فرصت موجود برای پایش و اجرای اقدامات پیشگیرانه است. ازاین‌رو، نرخ و روند تغییرات نشست باید در کنار وضعیت فعلی خط لوله مورد توجه قرار گیرد. در این چارچوب، داده‌های فرونشست پس از پردازش مکانی به تقاضای تغییرشکل زمین در محل خط لوله تبدیل می‌شوند. این تقاضا شامل تغییرمکان قائم، شیب تحمیلی و انحنای تحمیلی است و مبنای ارزیابی مکانیکی خط لوله در مرحله بعد قرار می‌گیرد.

## ۵-۲-ارزیابی پاسخ مکانیکی و آسیب‌پذیری خط لوله

خط لوله مدفون در برابر فرونشست به‌صورت مستقل از خاک رفتار نمی‌کند، بلکه پاسخ آن حاصل اندرکنش میان لوله و محیط خاک اطراف است. هنگامی که سطح زمین به‌صورت غیر یکنواخت نشست می‌کند، خاک اطراف لوله نیز تغییرشکل داده و از طریق مقاومت محوری و جانبی، نیروی ناشی از تغییرشکل را به خط منتقل می‌کند. در نتیجه، پاسخ خط لوله تابعی از مشخصات زمین، هندسه و

خواص مکانیکی لوله و شرایط تماس خاک-لوله است. مهم‌ترین مشخصات مؤثر شامل قطر خارجی، ضخامت جداره، تنش تسلیم مصالح، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، فشار داخلی، عمق دفن، خواص خاک اطراف، ضریب اصطکاک خاک-لوله، وضعیت خوردگی، کیفیت جوش‌ها، شعاع انحنا و وجود ناپیوستگی‌های هندسی است. تقاضای اصلی در برابر نشست نامتقارن، کرنش محوری و کرنش خمشی است. کرنش محوری ناشی از تغییرشکل محوری خط و کرنش خمشی ناشی از انحنای خط ایجاد می‌شود. برای مقطع لوله، کرنش خمشی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\varepsilon_b = C\kappa_p \qquad (۴)$$

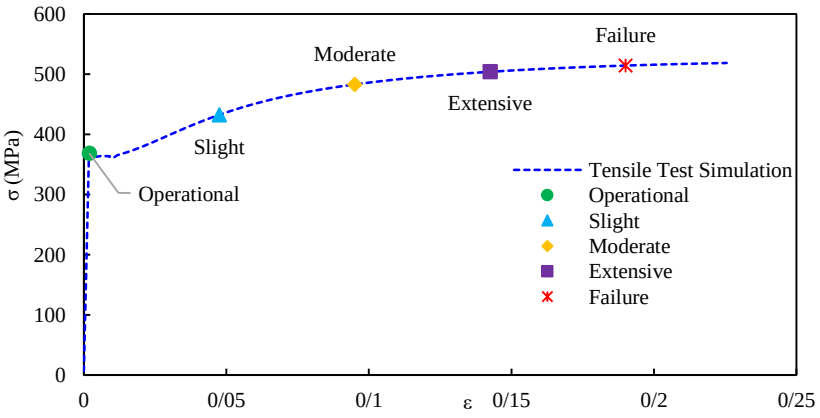
که در آن $\kappa_p$ انحنای محور خط لوله است. مقدار $\kappa_p$ الزاماً برابر با انحنای زمین نیست، زیرا بخشی از تغییرشکل زمین توسط سختی خمشی خط لوله و اندرکنش خاک–لوله جذب می‌شود. بنابراین، تعیین $\kappa_p$ باید بر اساس تحلیل اندرکنش خاک-لوله یا یک مدل مکانیکی معتبر انجام شود. کرنش کل در جداره لوله نیز باید با درنظرگرفتن هم‌زمان مؤلفه‌های محوری و خمشی تعیین شود. در حالت ساده‌شده، کرنش طولی در دو سطح متقابل جداره را می‌توان به‌صورت ترکیب کرنش محوری و خمشی بیان کرد:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_a \pm \varepsilon_b \qquad (۵)$$

که در آن $\varepsilon_a$ کرنش محوری و $\varepsilon_b$ کرنش خمشی است. این رابطه نشان می‌دهد که نشست نامتقارن می‌تواند در یک سمت مقطع باعث افزایش و در سمت دیگر باعث کاهش کرنش طولی شود. لازم به ذکر است که در مدل‌های اجزاء محدود توأم خاک-لوله، مقدار کرنش نهایی در هر مرحله از تحلیل قابل حصول است (شکل ۳). همچنین در مرحله ارزیابی یکپارچگی، این تقاضاها با ظرفیت مجاز خط لوله مقایسه می‌شوند. با در نظر گرفتن معیار پذیرش بر اساس کرنش، نسبت تقاضا به ظرفیت برای هر مقطع بحرانی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DCR_\varepsilon = \frac{|\varepsilon_L|}{\varepsilon_{\text{allow}}} \qquad (۶)$$

که در آن $\varepsilon_{\text{allow}}$ حد مجاز کرنش بر اساس معیار طراحی، مشخصات ماده، نوع بارگذاری و وضعیت موجود خط است. مقدار $DCR_\varepsilon$ بیانگر عبور تقاضای کرنش از ظرفیت تعریف‌شده و نیازمند ارزیابی مهندسی دقیق‌تر است.




شکل ۶- نمونه‌ای از نتایج آزمون کشش مصالح لوله‌های فلزی و مشخص نمودن حد مجاز کرنش برای نقاط عملکردی مختلف

شکل ۶ نمونه‌ای از نتایج آزمون کشش مصالح لوله‌های فلزی و مشخص نمودن حد مجاز کرنش برای نقاط عملکردی مختلف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است ، نقاط عملکردی بر مبنای سطح کرنش ایجاد شده در مصالح مشخص می‌گردد. برای این منظور، اولین نقطه عملکردی متناظر با نقطه تسلیم مصالح انتخاب می‌شود. ویژگی عملکردی این نقطه بدین گونه است که تا قبل از آن، رفتار مصالح ارتجاعی بوده اما پس از آن، مصالح وارد فاز رفتاری پلاستیک شده و در صورت باربرداری، تغییرشکل‌های ماندگار در آن به وجود می‌آیند. نقطه عملکردی بعدی متناظر با نقطه گسیختگی مصالح درنظر گرفته شده است که بیانگر ازبین رفتن پیوستگی مصالح و به تبع آن، پارگی جدار لوله است. مابین نقاط عملکردی تسلیم و گسیختگی، سه نقطه عملکردی دیگر نیز درنظر گرفته می‌شود. این نقاط به ترتیب بیانگر سطح خسارت کم ، متوسط و گسترده هستند. سطح کرنش متناظر با این نقاط عملکردی به ترتیب برابر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد کرنش به دست آمده در نقطه گسیختگی مصالح لوله درنظر گرفته شده است [۴۰]. این نقاط عملکردی را می‌توان بر روی منحنی‌های کرنش بیشینه-نشست نیز نمایش داده (شکل ۵)

### ۵-۳-تفکیک آسیب، از دست رفتن یکپارچگی و نشت

یکی از اجزای مهم چارچوب پیشنهادی، تفکیک آسیب، خرابی و نشت است. وجود یک ناحیه با $DCR_{\varepsilon}$ بالا لزوماً به معنای نشت گاز نیست. ممکن است خط لوله دچار تغییرشکل دائمی، تسلیم موضعی یا حتی آسیب محدود شود، اما جداره همچنان آب‌بندی خود را حفظ کند. لذا در این چارچوب، احتمال از دست رفتن یکپارچگی به‌صورت $P_F$ و احتمال نشت مشروط بر از دست رفتن یکپارچگی به‌صورت $P(L|F)$ تعریف می‌شود. بنابراین، احتمال نشت $P_L$ برابر است با:

$$P_L = P_F.P\left(L \mid F\right) \qquad (۷)$$

این رابطه از نظر مفهومی اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که احتمال نشت را نباید مستقیماً معادل احتمال خرابی مکانیکی خط لوله در نظر گرفت. مقدار $P_F$ باید بر اساس معیار حدی انتخاب‌شده و با توجه به عدم‌قطعیت موجود در بارگذاری زمین، مشخصات خط لوله، خواص خاک، شرایط بهره‌برداری و وضعیت موجود یکپارچگی تعیین شود. در صورتی که تحلیل قابلیت اعتماد انجام شود، تابع حالت حدی می‌تواند برای هر مکانیزم خرابی به‌طور مستقل تعریف شود. برای نمونه، در یک معیار کرنشی:

$$g_{\varepsilon} = \varepsilon_{\text{allow}} - \left|\varepsilon_L\right| \qquad (۸)$$

و احتمال خرابی برابر احتمال منفی شدن این تابع است:

$$P_F = P(g_{\varepsilon} \le 0) \qquad (۹)$$

لازم به ذکر است که برای مکانیزم‌های دیگری مانند کمانش یا شکست جوش، تابع حالت حدی باید متناسب با همان مکانیزم تعریف شود.

### ۵-۴-تعیین مقدار نشت و مدت انتشار گاز

پس از تعیین احتمال نشت، مرحله بعدی ارزیابی مقدار گاز آزادشده و مدت زمان انتشار است. شدت پیامد محیط‌زیستی تنها به وقوع نشت وابسته نیست، بلکه به نرخ آزادسازی و مدت زمانی که نشت ادامه دارد نیز بستگی دارد. جرم کل گاز آزادشده از انتگرال نرخ جرمی نشت در طول مدت حادثه به‌دست می‌آید:

$$M_g = \int_0^{t_r} \dot{m}_g(t)dt \qquad (۱۰)$$

که در آن $M_g$ جرم کل گاز آزادشده، $\dot{m}_g(t)$ نرخ جرمی نشت و $t_r$ زمان لازم برای تشخیص، ایزوله‌سازی و کنترل نشت است. برای ارزیابی اثر اقلیمی، در صورت مشخص بودن کسر جرمی متان در گاز طبیعی، جرم متان آزادشده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$M_{CH4} = x_{CH4} M_g \quad (۱۱)$$

که در آن $x_{CH4}$ کسر جرمی متان در گاز طبیعی است. بنابراین، در صورت استفاده از معیار معادل دی‌اکسیدکربن، انتشار معادل را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$E_{CO_2eq} = M_{CH_4} GWP_{100,CH_4} \quad (۱۲)$$

مقدار $GWP_{100,CH_4}$ باید مطابق مرجع اقلیمی و چارچوب انتخاب‌شده در مطالعه تعیین شود و به‌طور صریح گزارش گردد. این بخش از چارچوب نشان می‌دهد که سامانه تشخیص نشت و زمان واکنش بهره‌بردار مستقیماً بر پیامد زیست‌محیطی اثر می‌گذارند. کاهش زمان تشخیص و ایزوله‌سازی می‌تواند جرم کل گاز آزادشده را به‌طور محسوسی کاهش دهد، حتی اگر احتمال اولیه خرابی خط لوله تغییر نکند.

### ۵-۵-ارزیابی مواجهه و پیامدهای زیست‌محیطی

پس از تعیین احتمال نشت و مقدار بالقوه گاز آزادشده، باید مشخص شود که چه گیرنده‌هایی در محدوده اثر حادثه قرار دارند. در این پژوهش، گیرنده‌ها در چهار گروه اصلی شامل جمعیت و کاربری‌های انسانی، اکوسیستم‌ها و منابع طبیعی، منابع آب و زیرساخت‌های حساس طبقه‌بندی می‌شوند. مواجهه تابعی از موقعیت مکانی خط لوله نسبت به گیرنده، فاصله، تراکم و حساسیت گیرنده و محدوده اثر نشت است. در نتیجه، ارزیابی مواجهه باید در محیط GIS[1] انجام شود تا ارتباط مکانی میان مسیر خط لوله و گیرنده‌ها به‌صورت صریح تعیین گردد.

برای گیرنده‌های انسانی، مناطق مسکونی، مدارس، بیمارستان‌ها، مراکز تجاری، مناطق صنعتی و سایر مکان‌های پرتردد باید شناسایی شوند. برای گیرنده‌های محیط‌زیستی نیز منابع آب سطحی و زیرزمینی، تالاب‌ها، مناطق حفاظت‌شده، زیستگاه‌های حساس، اراضی کشاورزی و پوشش گیاهی باید در نظر گرفته شوند. در مورد گاز طبیعی، یک تفکیک مهم باید رعایت شود: انتشار متان در اتمسفر، پیامد مستقیم و اصلی زیست‌محیطی نشت است، در حالی که آلودگی خاک یا آب تنها در صورت وجود مسیر انتقال و مواد آلاینده مرتبط با حادثه باید وارد تحلیل شود. بنابراین، نباید صرفاً به دلیل وقوع نشت گاز، آلودگی خاک یا آب به‌عنوان پیامد قطعی فرض شود. در مقابل، در صورت وجود شرایط مناسب برای اشتعال، نشت گاز می‌تواند به حریق یا انفجار منجر شود. این رخداد ثانویه ممکن است پیامدهایی بسیار شدیدتر از انتشار مستقیم گاز ایجاد کند و موجب آسیب به افراد، پوشش گیاهی، سازه‌ها و سایر تأسیسات شود. بنابراین، فاصله از مناطق مسکونی و صنعتی، وجود منابع اشتعال و ویژگی‌های محیطی باید در ارزیابی پیامد لحاظ شوند.

### ۵-۶-محاسبه ریسک زیست‌محیطی

در چارچوب پیشنهادی، ریسک زیست‌محیطی بر اساس احتمال وقوع زنجیره خرابی و پیامد مورد انتظار آن تعیین می‌شود. برای یک واحد مشخص از خط لوله، رابطه اصلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{ENV,i} = P(F_i) P(L_i \mid F_i) E[C_{ENV,i} \mid L_i] \quad (۱۳)$$

[1] Geospatial Information System

که در آن $P(F_i)$ احتمال از دست رفتن یکپارچگی یا وقوع خرابی در واحد $i$ ام، $P(L_i \mid F_i)$ احتمال وقوع نشت مشروط بر خرابی و $E[C_{ENV,i} \mid L_i]$ پیامد مورد انتظار زیست‌محیطی مشروط بر وقوع نشت است. این مدل از نظر فیزیکی و احتمالاتی برتری قابل‌توجهی نسبت به ضرب مستقیم شاخص‌های وزنی دارد، زیرا هر جزء از زنجیره دارای معنای مشخص است و می‌توان آن را با داده‌های واقعی، مدل‌های مکانیکی یا تحلیل‌های آماری تعیین کرد. اگر پیامدهای مختلف به‌صورت مجزا محاسبه شوند، پیامد مورد انتظار می‌تواند شامل مؤلفه‌های انتشار متان، پیامد اقلیمی، اثرات حریق و انفجار و پیامدهای وارد بر گیرنده‌های حساس باشد. در این حالت، مهم است که واحد اندازه‌گیری و مبنای ارزش‌گذاری هر مؤلفه مشخص باشد و از جمع مستقیم کمیت‌های دارای واحدهای متفاوت اجتناب شود. برای نمونه، اگر $C_{CH4}$ پیامد ناشی از انتشار متان و $C_F$ پیامد ناشی از حریق باشد، تنها پس از تبدیل آن‌ها به یک مقیاس مشترک می‌توان آن‌ها را در یک معیار ریسک واحد تلفیق کرد. در غیر این صورت، بهتر است نتایج به‌صورت چندمعیاره گزارش شوند.

## ۵-۷-یک نمونه عددی

به‌منظور تشریح نحوه کاربرد چارچوب پیشنهادی، یک مثال عددی با پارامترهای مهندسی واقع‌بینانه در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که این مثال عددی با هدف تشریح نحوه کاربرد چارچوب و نشان دادن ارتباط میان تقاضای مکانیکی، احتمال از دست رفتن یکپارچگی و احتمال نشت ارائه شده است. مقادیر مورد استفاده در این مثال پارامترهای سناریویی هستند و نباید به‌عنوان مقادیر کالیبره‌شده برای یک خط انتقال واقعی تفسیر شوند. همچنین تأکید می‌شود که کاربرد عملی چارچوب مستلزم تعیین این پارامترها بر اساس مشخصات خط، داده‌های بازرسی، سوابق خرابی و تحلیل‌های تخصصی است.

در این مثال، یک بخش ۱۰۰ متری از خط انتقال گاز مدفون در پهنه‌ای با فرونشست غیریکنواخت بررسی می‌شود. فرض می‌شود برای تعیین تقاضای مکانیکی، فرض می‌شود تحلیل اندرکنش خاک-لوله با در نظر گرفتن شرایط دفن، مشخصات خاک و خواص مکانیکی خط انجام شده و کرنش طولی کششی بیشینه برابر ۰٫۲۲ به دست آمده است. برای ارزیابی احتمال از دست رفتن یکپارچگی، فرض می‌شود کرنش طولی بیشینه در مقطع بحرانی دارای توزیع نرمال با میانگین ۰٫۲۲ و انحراف معیار ۰٫۰۶ باشد و کرنش حدی انتخاب‌شده برای حالت حدی مورد بررسی برابر ۰٫۳۰ در نظر گرفته شود. در این صورت، احتمال فراگذشت کرنش از حد مجاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_F = P(\varepsilon_L \geq \varepsilon_{\lim}) = 1 - \Phi\left(\frac{\varepsilon_{\lim} - \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{0.30 - 0.22}{0.06}\right) \quad (۱۴)$$

که در آن، $\varepsilon_{\lim}$ کرنش حدی، $\mu_\varepsilon$ میانگین کرنش، $\sigma_\varepsilon$ انحراف معیار کرنش و $\Phi$ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است. با توجه به اینکه مقدار متغیر استاندارد برابر ۱٫۳۳ است، احتمال فراگذشت از حد کرنش تقریباً برابر با ۹٫۱ درصد خواهد بود. این مقدار صرفاً احتمال فراگذشت از حالت حدی کرنشی تعریف‌شده را بیان می‌کند و نباید بدون بررسی سایر سازوکارهای خرابی، معادل احتمال کلی خرابی خط لوله تلقی شود. علاوه بر این، فرض توزیع نرمال در این مثال عددی، صرفاً برای نمایش نحوه محاسبه احتمال فراگذشت از حالت حدی انتخاب شده است و لزوماً بیانگر توزیع واقعی کرنش در تمام شرایط فرونشست نیست. در کاربرد عملی، انتخاب توزیع احتمالاتی باید بر اساس ماهیت متغیرها، داده‌های موجود، نتایج تحلیل حساسیت و در صورت امکان، نتایج تحلیل‌های احتمالاتی انجام شود. همچنین استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو یا سایر روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد می‌تواند برای بررسی اثر عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی، مکانیکی و عملیاتی مفید باشد.

در مرحله بعد، برای نشان دادن تفاوت میان خرابی مکانیکی و نشت، فرض می‌شود احتمال نشت مشروط بر وقوع خرابی ۰٫۳۵ باشد. بنابراین، احتمال نشت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_L = P_F P(L \mid F) = 0.091 \times 0.35 = 0.03185 \quad (۱۵)$$

در نتیجه، احتمال نشت در این مثال تقریباً ۳٫۲ درصد است. این مقدار نشان می‌دهد که حتی در صورت وقوع خرابی مکانیکی، نشت الزاماً رخ نمی‌دهد و احتمال آن باید به‌صورت مستقل و متناسب با نوع آسیب، وضعیت جداره و اتصالات و شرایط بهره‌برداری تعیین شود.

مقدار ۰٫۳۵ در این مثال یک فرض سناریویی است و برای کاربرد عملی باید با داده‌های خرابی و نشت یا تحلیل تخصصی سازوکارهای آسیب کالیبره شود.

برای برآورد پیامد انتشار متان، فرض می‌شود در صورت وقوع نشت، متوسط نرخ جرمی آزادسازی گاز ۰٫۰۵ کیلوگرم بر ثانیه و زمان تشخیص و ایزوله‌سازی ۴۵ دقیقه باشد. با فرض ثابت بودن نرخ نشت در این بازه، جرم کل گاز آزادشده برابر است با:

$$M_g = \dot{m}_g t_r = 0.05 \times (45 \times 60) = 135\ \text{kg} \qquad (۱۶)$$

اگر کسر جرمی متان در گاز آزادشده ۰٫۹۲ فرض شود، جرم متان منتشرشده برابر خواهد بود با:

$$M_{\text{CH}_4} = 0.92 \times 135 = 124.2\ \text{kg} \qquad (۱۷)$$

برای نمایش تقریبی پیامد اقلیمی، با فرض استفاده از ضریب پتانسیل گرمایش جهانی صدساله برابر ۲۹٫۸ برای متان فسیلی، انتشار معادل دی‌اکسیدکربن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{CO_2eq} = 124.2 \times 29.8 \approx 3701\ \text{kg} \qquad (۱۸)$$

بنابراین، پیامد اقلیمی سناریوی نشت مفروض حدود ۳٫۷ تن معادل دی‌اکسیدکربن خواهد بود. این مقدار تنها مؤلفه اقلیمی انتشار را نشان می‌دهد و شامل پیامدهای احتمالی حریق، انفجار یا اثر بر گیرنده‌های انسانی و اکولوژیکی نیست. همچنین، ضریب گرمایش جهانی و افق زمانی آن باید در نسخه نهایی مقاله با مرجع اقلیمی انتخاب‌شده به‌صراحت مستند شوند. در نهایت، اگر پیامد اقلیمی هر نشت به‌عنوان معیار مستقل ارزیابی شود، مقدار مورد انتظار انتشار معادل دی‌اکسیدکربن برای این واحد خط لوله از حاصل‌ضرب احتمال نشت در پیامد مشروط بر وقوع نشت به دست می‌آید:

$$R_{ENV,i} = 0.03185 \times 3701 \approx 118\ \text{kg} \qquad (۱۹)$$

این مقدار، انتشار مورد انتظار معادل دی‌اکسیدکربن به ازای یک رویداد ارزیابی‌شده در چارچوب سناریوی فرضی است، نه انتشار سالانه یا شاخص جامع ریسک زیست‌محیطی. برای تبدیل آن به ریسک سالانه، باید احتمال یا نرخ وقوع خرابی در واحد زمان مشخص شود. همچنین، برای محاسبه ریسک جامع، پیامدهای اقلیمی باید در کنار پیامدهای حریق و انفجار و اثر بر گیرنده‌های حساس، به‌صورت جداگانه یا با استفاده از یک مقیاس مشترک و شفاف ارزیابی شوند.

### ۵-۸-تلفیق داده‌های ژئوتکنیکی، خط لوله و محیط‌زیست در محیط GIS

تلفیق داده‌ها باید به‌صورت مکانی انجام شود، زیرا همه پارامترهای ریسک در طول خط لوله یکنواخت نیستند. برای این منظور، مسیر خط لوله به واحدهای تحلیل تقسیم می‌شود و برای هر واحد، اطلاعات مربوط به فرونشست، شرایط زمین، مشخصات خط، وضعیت یکپارچگی و گیرنده‌های پیرامونی اختصاص داده می‌شود. در این راستا، لایه‌های اصلی اطلاعات شامل نرخ و روند زمانی فرونشست، گرادیان و انحنای تغییرشکل زمین، زمین‌شناسی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی، سطح و روند تغییرات آب زیرزمینی، مشخصات هندسی و مکانیکی خط لوله، وضعیت خوردگی، جوش‌ها و نواقص موجود، فشار و شرایط بهره‌برداری، کاربری اراضی و تراکم جمعیت، منابع آب و اکوسیستم‌های حساس، و زیرساخت‌ها و تأسیسات دارای اهمیت بالا هستند. در این ساختار، ابتدا نقشه تغییرشکل زمین تولید می‌شود. سپس بخش‌هایی از مسیر که در معرض گرادیان یا انحنای قابل‌توجه قرار دارند، برای ارزیابی مکانیکی دقیق‌تر انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد، احتمال از دست رفتن یکپارچگی و احتمال نشت برای هر واحد تعیین می‌شود و در نهایت اطلاعات گیرنده‌ها برای محاسبه پیامد مورد انتظار به آن افزوده می‌شود. مزیت این روش آن است که از تبدیل زودهنگام همه متغیرها به یک شاخص وزنی جلوگیری می‌کند. در واقع، ابتدا روابط فیزیکی و احتمالاتی بین متغیرها برقرار می‌شوند و تنها در صورت نیاز برای غربالگری منطقه‌ای از شاخص‌های ترکیبی استفاده می‌شود.

### ۵-۹-اولویت‌بندی بخش‌های پرخطر شبکه

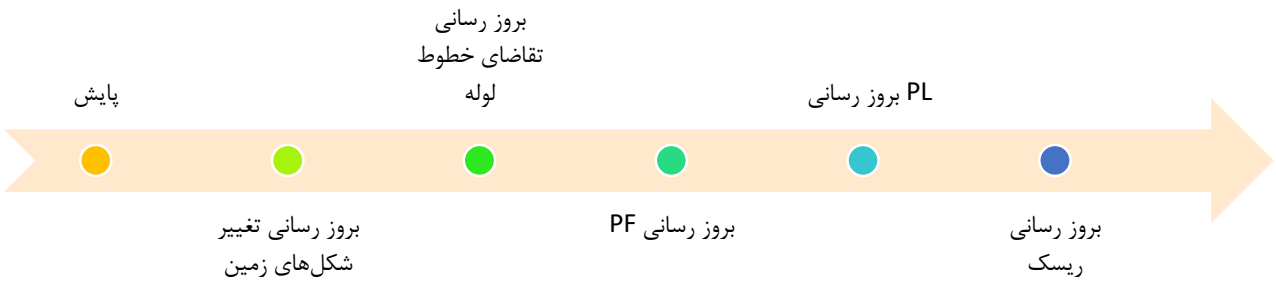
هدف نهایی ارزیابی ریسک، شناسایی مناطق بحرانی و تعیین نوع و فوریت اقدام اصلاحی است. ازاین‌رو، مسیر خط لوله باید بر اساس ترکیب اهمیت خط لوله، احتمال خرابی، احتمال نشت و پیامد بالقوه طبقه‌بندی شود. در این راستا، اولویت‌های تصمیم گیری مطابق جدول ۱ پیشنهاد می‌شوند. این طبقه‌بندی باید بر اساس حدود کمی تعیین شود که متناسب با داده‌های مطالعه، معیارهای بهره‌برداری و الزامات ایمنی انتخاب شوند؛ بنابراین، آستانه‌های چهارگانه نباید بدون کالیبراسیون به‌صورت دلخواه تعیین شوند. همچنین، برای جلوگیری از پنهان شدن یک احتمال بالا در میانگین‌گیری شاخص‌ها، علاوه بر ریسک کل، باید حداقل دو خروجی مستقل شامل احتمال خرابی/نشت و شدت پیامد نیز گزارش شوند. این موضوع به‌ویژه برای بخش‌هایی اهمیت دارد که احتمال حادثه آن‌ها نسبتاً پایین، اما پیامد بالقوه آن‌ها بسیار شدید است. لازم به ذکر است که، طبقه‌بندی ارائه‌شده در این جدول، یک چارچوب اولیه برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی است و حدود کمی عمومی و اعتبارسنجی‌شده برای تمام شبکه‌های انتقال گاز محسوب نمی‌شود. تعیین آستانه‌های کمی برای سطوح ریسک پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا باید با توجه به ویژگی‌های شبکه، معیارهای پذیرش بهره‌بردار، پیامدهای بالقوه، الزامات قانونی و کیفیت داده‌های موجود انجام شود. همچنین، احتمال خرابی یا نشت و شدت پیامد به‌صورت مستقل در فرایند اولویت‌بندی لحاظ خواهند شد تا تصمیم مدیریتی صرفاً به یک امتیاز ترکیبی وابسته نباشد.

جدول ۱- اولویت‌های تصمیم‌گیری مدیریتی

| سطح | مشخصات | اقدام پیشنهادی |
|---|---|---|
| بسیار بالا | احتمال خرابی/نشت و پیامد بالقوه هر دو بالا | اقدام فوری، ارزیابی تفصیلی و اجرای اقدامات کاهنده |
| بالا | احتمال خرابی یا پیامد بالا | پایش تقویت‌شده، ارزیابی یکپارچگی و برنامه اصلاحی کوتاه‌مدت |
| متوسط | احتمال و پیامد در سطح میانی | پایش دوره‌ای و اقدامات پیشگیرانه |
| پایین | احتمال و پیامد محدود | پایش معمول و بازنگری دوره‌ای |

### ۵-۱۰-لحاظ کردن روند زمانی ریسک

فرونشست یک فرآیند ایستا نیست و بنابراین ارزیابی ریسک نیز نباید صرفاً بر وضعیت یک مقطع زمانی متکی باشد. تغییرات برداشت آب زیرزمینی، تراز آبخوان، نرخ فرونشست، توسعه شهری و تغییر کاربری اراضی می‌توانند در طول زمان شرایط ریسک را تغییر دهند. ازاین‌رو، در هر دوره پایش باید پروفیل جدید فرونشست با وضعیت قبلی مقایسه و تغییرات نرخ و گرادیان نشست استخراج شود. اگر نرخ فرونشست یا گرادیان آن در یک بخش افزایش یابد، حتی در صورتی که وضعیت فعلی خط لوله هنوز در محدوده قابل‌قبول باشد، آن بخش باید به‌عنوان ناحیه با ریسک رو به افزایش شناسایی شود. در این حالت، فرآیند ارزیابی به‌صورت دوره‌ای تکرار و مطابق روال ارائه شده در شکل ۷ بروزرسانی ریسک انجام می‌شود.



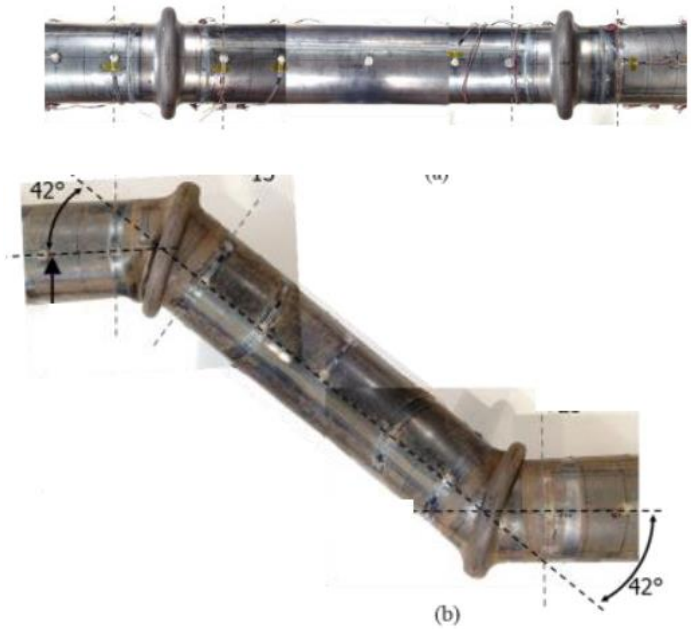

شکل ۷- چرخه بروز رسانی ریسک

### ۵-۱۱-راهکارهای مدیریت و کاهش ریسک

اقدامات کاهش ریسک باید متناسب با محل قرارگیری منبع ریسک در زنجیره خرابی انتخاب شوند. بنابراین، اقدامات پیشنهادی را می‌توان در چهار سطح طبقه‌بندی کرد. در سطح اول، کنترل منبع فرونشست قرار دارد. کاهش برداشت غیرمجاز یا بیش‌ازحد از آبخوان،

مدیریت بهره‌برداری از منابع آب و در شرایط مناسب اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی می‌تواند روند فرونشست را کاهش دهد. این اقدامات در مقیاس منطقه‌ای اجرا می‌شوند و اگرچه مستقیماً یکپارچگی خط لوله را افزایش نمی‌دهند، با کاهش تقاضای تغییرشکل زمین می‌توانند ریسک را در بلندمدت کاهش دهند. در سطح دوم، پایش و تشخیص زودهنگام قرار دارد. استفاده از روش‌های تحلیل سری زمانی InSAR،GNSS[1]، ترازیابی دقیق، پایش سطح آب زیرزمینی و بازرسی‌های دوره‌ای خط لوله امکان شناسایی تغییرات پیش‌رونده را فراهم می‌کند. در مناطق بحرانی، داده‌های پایش زمین باید به سامانه مدیریت یکپارچگی خط لوله متصل شوند تا افزایش تقاضای تغییرشکل موجب افزایش خودکار سطح پایش و ارزیابی مهندسی شود. لازم به ذکر است که داده‌های InSAR ابزار مؤثری برای شناسایی الگوی مکانی و روند زمانی فرونشست هستند، اما استفاده از آن‌ها به‌تنهایی ممکن است برای تعیین دقیق تغییرشکل در محل خط لوله کافی نباشد. بنابراین، تلفیق این داده‌ها با مشاهدات GNSS، ترازیابی دقیق، اطلاعات سطح آب زیرزمینی و داده‌های ژئوتکنیکی توصیه می‌شود. همچنین، در مناطقی که تعیین دقیق گرادیان یا انحنای تغییرشکل اهمیت زیادی دارد، کنترل کیفیت داده‌ها و بررسی تفکیک مکانی و زمانی اندازه‌گیری‌ها باید پیش از استفاده در تحلیل مکانیکی خط لوله انجام شود.

در سطح سوم، کاهش تقاضای مکانیکی خط لوله قرار دارد. بسته به شرایط محلی، این اقدامات می‌توانند شامل اصلاح بستر، تغییر شرایط خاک اطراف، افزایش قابلیت تغییرشکل مسیر، اصلاح هندسه، حذف تمرکزهای موضعی تغییرشکل و استفاده از جزئیات مناسب در نواحی انتقالی باشند. به عنوان مثال، یکی از مهم‌ترین نوآوری‌ها در این زمینه، توسعه لوله‌های فولادی موج‌دار ویژه موسوم به SPF[2] است. این فناوری که حاصل تحقیقات گسترده پژوهشگرانی نظیر ناکازونو و همکاران [۴۱] و وام و همکاران [۴۲, ۴۳] است، به‌طور ویژه برای استفاده در مناطق دارای خطر بالای ژئوتکنیکی طراحی شده است. اساس عملکرد این سیستم بر ایجاد بخش‌های موج‌دار در طول لوله است. این برجستگی‌ها در واقع به عنوان نواحی کنترل‌شده تغییرشکل عمل می‌کنند و امکان جذب بخش عمده‌ای از جابه‌جایی زمین را فراهم می‌سازند. برخلاف لوله‌های صلب که تنش را به صورت مستقیم به کل بدنه منتقل می‌کنند، در سیستم SPF تغییرشکل عمدتاً در ناحیه موج‌دار متمرکز می‌شود (شکل ۸).




شکل ۸- رفتار SPF تحت تغییر شکل‌های اعمال شده به لوله [۴۱]

در سطح چهارم، کاهش پیامد حادثه قرار دارد. نصب و ارتقای سامانه‌های تشخیص نشت، کاهش زمان تشخیص، بهبود قابلیت قطع و ایزوله‌سازی، افزایش سرعت واکنش اضطراری و تعیین سناریوهای مناسب برای مدیریت حادثه می‌تواند جرم گاز آزاد شده و شدت پیامد را کاهش دهد، حتی در شرایطی که احتمال اولیه خرابی تغییر نکرده باشد.

[1] Global Navigation Satellite System
[2] Steel Pipe for Fault Crossing

بنابراین، راهبرد کاهش ریسک باید الزاماً بر کاهش فرونشست متمرکز نباشد، بلکه می‌تواند هر یک از مؤلفه‌های زنجیره مخاطره-تقاضا-خرابی-نشت-پیامد را هدف قرار دهد. همچنین خروجی نهایی چارچوب نباید صرفاً یک نقشه فرونشست یا نقشه خطر باشد، بلکه باید یک نقشه ریسک و اولویت مداخله مکانی-زمانی باشد که برای هر بخش از خط لوله مشخص کند: (۱) میزان و روند تغییرشکل زمین چقدر است؛ (۲) تقاضای مکانیکی وارد بر خط چه مقدار است؛ (۳) احتمال از دست رفتن یکپارچگی و نشت چقدر است؛ (۴) چه گیرنده‌هایی در معرض قرار دارند؛ (۵) پیامد بالقوه نشت چه شدتی دارد؛ و (۶) چه نوع اقدام پیشگیرانه، پایشی یا اصلاحی باید در اولویت قرار گیرد.

## ۶-نتیجه‌گیری

فرونشست زمین در دشت‌های تحت تأثیر افت سطح آب زیرزمینی، در صورت عبور از مسیر خطوط انتقال گاز، می‌تواند یک مخاطره ژئوتکنیکی را به زنجیره‌ای از تغییرشکل زمین، تقاضای مکانیکی، آسیب زیرساختی، از دست رفتن یکپارچگی، نشت گاز و پیامدهای انسانی و زیست‌محیطی تبدیل کند. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که ارزیابی این خطر با تکیه صرف بر مقدار نشست تجمعی یا پهنه‌بندی عمومی فرونشست، برای بیان سطح واقعی ریسک کافی نیست. پاسخ خط لوله بیش از آنکه تابع مقدار مطلق نشست باشد، به الگوی مکانی و زمانی تغییرشکل زمین، به‌ویژه نشست تفاضلی، گرادیان، انحنا و طول ناحیه انتقال وابسته است. همچنین، پاسخ نهایی تابع اندرکنش متقابل خاک و خط لوله، شرایط دفن و تماس، مشخصات ژئوتکنیکی خاک، هندسه و خواص مکانیکی لوله، فشار داخلی و وضعیت اولیه یکپارچگی آن است. ازاین‌رو، وجود خوردگی، کاهش ضخامت، عیوب جوش، ترک، فرورفتگی و سایر ناپیوستگی‌های اولیه می‌تواند ظرفیت واقعی خط را کاهش داده و احتمال آسیب و از دست رفتن یکپارچگی را افزایش دهد. از سوی دیگر، در این مطالعه بر ضرورت تفکیک مفهومی و احتمالاتی آسیب مکانیکی، از دست رفتن یکپارچگی و نشت گاز تأکید شد. وقوع تغییرشکل یا حتی تسلیم موضعی لزوماً به معنای نشت نیست؛ بنابراین، فرض برابری خرابی مکانیکی و نشت گاز می‌تواند به برآورد نادرست ریسک منجر شود. در چارچوب پیشنهادی، احتمال از دست رفتن یکپارچگی و احتمال نشت مشروط بر خرابی به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شده‌اند تا ارتباط میان تقاضای مکانیکی، وضعیت خط و وقوع نشت به‌صورت واقع‌بینانه‌تری مدل شود. همچنین، مقدار گاز آزادشده تابع نرخ نشت، مدت زمان تشخیص و ایزوله‌سازی و شرایط بهره‌برداری است؛ بنابراین، سامانه تشخیص نشت و سرعت واکنش بهره‌بردار می‌توانند حتی بدون تغییر احتمال اولیه خرابی، شدت پیامد نهایی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند. پیامدهای زیست‌محیطی نیز به‌صورت تفکیک‌شده در نظر گرفته شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که انتشار مستقیم متان، پیامدهای اقلیمی، حریق و انفجار و اثر بر گیرنده‌های حساس از یکدیگر متمایز شده و آلودگی خاک و آب تنها در صورت وجود مسیر فیزیکی مشخص و سناریوی ثانویه وارد ارزیابی می‌شود.

مهم‌ترین نوآوری این پژوهش، ارائه یک چارچوب یکپارچه و فیزیک‌مبنا برای ارزیابی ریسک زیست‌محیطی خطوط انتقال گاز در پهنه‌های فرونشستی است. برخلاف رویکردهایی که فرونشست، آسیب خط لوله و پیامدهای زیست‌محیطی را به‌صورت مستقل یا در قالب یک شاخص وزنی ترکیبی ارزیابی می‌کنند، چارچوب پیشنهادی زنجیره علّی و احتمالاتی میان این پدیده‌ها را به‌صورت پیوسته دنبال می‌کند. در این چارچوب، داده‌های پایش فرونشست، از جمله InSAR، GNSS و ترازیابی، همراه با اطلاعات سطح آب زیرزمینی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی، ابتدا برای تعیین الگوی مکانی و زمانی تغییرشکل زمین به کار گرفته می‌شوند. سپس، پارامترهایی مانند نشست تفاضلی، گرادیان و انحنا به‌عنوان تقاضای تغییرشکل تعیین و از طریق تحلیل اندرکنش خاک-خط لوله به تقاضای مکانیکی، به‌ویژه کرنش‌های محوری و خمشی، تبدیل می‌شوند. این تقاضا با ظرفیت و وضعیت واقعی خط مقایسه شده و احتمال از دست رفتن یکپارچگی تعیین می‌شود. در مرحله بعد، با لحاظ احتمال نشت مشروط بر خرابی، نرخ و مدت نشت و مشخصات گیرنده‌های پیرامونی، پیامد مورد انتظار تعیین و در نهایت ریسک زیست‌محیطی هر بخش از خط ارزیابی می‌شود. بدین ترتیب، ریسک حاصل یک شاخص انتزاعی و صرفاً وزنی نیست، بلکه نتیجه یک زنجیره فیزیکی و احتمالاتی قابل ردیابی است. یکی از پیامدهای مهم این ساختار آن است که شدت زیاد فرونشست لزوماً به معنای بالاترین ریسک یا اولویت مداخله نیست. ممکن است بخشی از خط تحت تغییرشکل شدید قرار داشته باشد، اما به دلیل احتمال پایین نشت یا قرارگیری در محیطی با حساسیت محدود، اولویت مدیریتی آن کمتر از بخشی با تغییرشکل متوسط ولی مجاورت با جمعیت متراکم، منابع آب، زیست‌بوم‌های حساس یا زیرساخت‌های حیاتی باشد. ازاین‌رو، GIS در چارچوب پیشنهادی صرفاً ابزار نمایش فرونشست نیست، بلکه بستری برای تلفیق مکانی اطلاعات مربوط به مخاطره، تقاضای مکانیکی، یکپارچگی خط، احتمال نشت و گیرنده‌های در معرض خطر است. خروجی نهایی، به جای یک نقشه ساده فرونشست، نقشه مکانی–زمانی ریسک و اولویت مداخله خواهد بود. مزیت دیگر چارچوب پیشنهادی، ماهیت پویا و قابل‌به‌روزرسانی آن است. از آنجا که فرونشست فرآیندی زمان‌مند است، تغییر نرخ یا الگوی تغییرشکل می‌تواند پیش از وقوع خرابی، سطح ریسک یک بخش از خط را تغییر دهد. بنابراین، ورود مستمر

داده‌های پایش امکان به‌روزرسانی تقاضای مکانیکی، احتمال از دست رفتن یکپارچگی، احتمال نشت و پیامد مورد انتظار را فراهم می‌کند. این ویژگی، چارچوب را از یک ارزیابی ایستای مبتنی بر شرایط موجود به یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری برای مدیریت پیش‌نگر ریسک تبدیل می‌کند. بر همین اساس، اقدامات کاهش ریسک نیز می‌توانند در حلقه‌های مختلف زنجیره اعمال شوند؛ از مدیریت منابع آب و کنترل منشأ فرونشست گرفته تا پایش یکپارچگی، کاهش تقاضای مکانیکی، ارتقای سامانه تشخیص نشت، کاهش زمان ایزوله‌سازی و بهبود پاسخ اضطراری.

در مجموع، چارچوب ارائه‌شده نشان می‌دهد که ارزیابی ریسک خطوط انتقال گاز در پهنه‌های فرونشستی باید از رویکرد سنتی مبتنی بر مقدار نشست به رویکردی یکپارچه مبتنی بر تغییرشکل زمین-پاسخ خط-یکپارچگی-نشت-مواجهه-پیامد منتقل شود. ارزش افزوده اصلی پژوهش حاضر در ایجاد همین ارتباط نظام‌مند و قابل ردیابی است که امکان تبدیل داده‌های پایش زمین و اطلاعات وضعیت خط لوله به تصمیم‌های مشخص برای شناسایی نقاط بحرانی، اولویت‌بندی بازرسی و پایش، ارزیابی مکانیکی تفصیلی و انتخاب اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی را فراهم می‌کند. بنابراین، چارچوب پیشنهادی می‌تواند مبنایی برای توسعه سامانه‌های مدیریت ریسک خطوط انتقال گاز در مناطق فرونشستی و حرکت از واکنش پس از خرابی به مدیریت پیشگیرانه و مبتنی بر ریسک باشد.

## ۷-تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی شرکت گاز استان کرمان و در چارچوب قرارداد پژوهشی به شماره پیمان ۰۶۲۸۶۶ انجام شده است. بدین‌وسیله مجریان طرح مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از آن شرکت محترم و همچنین از کلیه مدیران، ناظران و کارشناسان گرامی که با حمایت، همکاری و ارائه دیدگاه‌های تخصصی خود در اجرای این پژوهش مشارکت داشته‌اند، اعلام می‌دارند.

## ۸-منابع و مراجع

1. Herrera-García, G., et al., *Mapping the global threat of land subsidence.* Science, 2021. **371**(6524): p. 34–36.doi: https://doi.org/10.1126/science.abb8549
2. Bagheri-Gavkosh, M., et al., *Land subsidence: A global challenge.* Science of The Total Environment, 2021. **778**: p. 146193.doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193
3. Wu, Y., X. You ,and S. Zha, *Mechanical behavior analysis of buried polyethylene pipe under land subsidence.* Engineering Failure Analysis, 2020. **108**: p. 104351. doi: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104351
4. Jennings, P.C., *Engineering features of the San Fernando earthquake of February 9, 1971*. 1971.
5. Takada ,S., et al., *Report on Taiwan Earthquake.* RCUSS, Earthquake Laboratory of Kobe University, 1999: p. 2–9.
6. Kaya, E.S., et al., *Failure analysis of a welded steel pipe at Kullar fault crossing.* Engineering Failure Analysis, 2017. **71**: p. 43–62. doi: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.10.004
7. McCaffrey ,M. and T. O'Rourke, *Surface faulting and its effect on buried pipelines. Geotechnical engineering report*. 1983, Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). School of Civil and Environmental Engineering.
8. O'Rourke, T.D. and M. Palmer, *Earthquake performance of gas transmission pipelines.* Earthquake Spectra, 1996. **12**(3): p. 493–527.
9. Newmark, N.M. and W.J. Hall. *Pipeline design to resist large fault displacement*. in *Proceedings of US national conference on earthquake engineering*. 1975. Ann Arbor, Michigan.
10. Kennedy Robert, P., A. Williamson Robert, and M. Chow Andrew, *Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline.* Transportation Engineering Journal of ASCE, 1977. **103**(5): p. 617–633. doi:https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000659

11. YEH, Y.-H. and L. Ru-Liang Wang. *Dynamic responses of buried pipelines in a soil liquefaction environment during earthquakes*. in *International conference on numerical methods in geomechanics*. 1985.
12. Zhao, H., et al., *Modified displacement-response solution for large diameter jointed rigid pipes under abrupt ground subsidence.* Engineering Structures, 2026. **358**: p. 122599. doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2026.122599
13. Li, H.-J., et al., *Experimental investigation on pipe-soil interaction due to ground subsidence via high-resolution fiber optic sensing.* Tunnelling and Underground Space Technology, 2022. **127**: p. 104586. doi: https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104586
14. Karamitros, D.K., C. Zoupantis, and G.D. Bouckovalas, *Buried pipelines with bends: analytical verification against permanent ground displacements.* Canadian Geotechnical Journal, 2016. **53**(11): p. 1782–1793. doi: https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0060
15. Pejman, M., G. Habibagahi, and M. Veiskarami, *Response of buried pipelines subjected to ground subsidence using a nonlinear Pasternak approach.* Transportation Geotechnics, 2025. **51**: p. 101504. doi: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101504
16. Kouretzis, G.P., D.K. Karamitros, and S.W. Sloan, *Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave.* Can. Geotech. J. Editors' Choice, 2014. **01**(04): p. 1058–1071. doi: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101504
17. Zibo, D., et al., *Model test study of polyurethane grouting repair for gas pipelines in mining subsidence areas.* Tunnelling and Underground Space Technology ۱۷٤ :۲۰۲٦ ,p. 107702. doi: https://doi.org/10.1016/j.tust.2026.107702.
18. Yan, Y., X. Dong, and J. Li, *Experimental study of methane diffusion in soil for an underground gas pipe leak.* Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. **27**: p. 82–89. doi: https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.039
19. Zheng, D., et al., *Investigation on the methane emissions from permeation of urban gas polyethylene pipes under the background of hydrogen-mixed natural gas transportation.* Journal of Cleaner Production, 2024. **479**: p. 144070. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144070.
20. Lu, H., et al., *Environmental impacts of methane emissions from the oil and gas industry.* Cell Reports Sustainability, 2026. **3**(1): p. 100587. doi: https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100587.
21. Jia, W., et al., *Quantifying methane emissions and assessing uncertainties in China's natural gas compressor stations.* Journal of Cleaner Production, 2026. **558**: p. 148264. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.148264.
22. Lee ,S., et al., *From prediction to decision: An explainable AI framework for Urban ground subsidence risk management.* International Journal of Disaster Risk Reduction, 2026. **140**: p. 106158. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2026.106158
23. Carpenter, M., *Land Subsidence in the United State: Circular 11* ۸۲US Geological Survey. In: Mining Ground Water, Part I (ed. by D. Galloway, DR Jones & SE Ingebritsen), 1999: p. 65–81.
24. Galloway, D.L. and S.A. Leake, *Regional land subsidence caused by the compaction of susceptible aquifer systems accompanying groundwater extraction.* Handbook of Applied Hydrology. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016: p. 56.1–56.11.

25. Galloway, D.L. and T.J. Burbey, *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction.* Hydrogeology Journal, 2011. **19** :(۸)p. 1459–1486.
26. Lee, S., J. Kang, and J. Kim, *Prediction Modeling of Ground Subsidence Risk Based on Machine Learning Using the Attribute Information of Underground Utilities in Urban Areas in Korea.* Applied Sciences, 2023. **13**(9): p. 5566. doi: https://doi.org/10.3390/app13095566
27. Schell, C.A., E. Lever, and K.M. Groth, *Strain-based design and assessment for pipeline integrity management: A review of applications and gaps.* International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023. **204**: p. 104973. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104973
28. Homaei, F. and S. Niazmardi, *Investigating the behavior of pipelines in the gas supply network of Kerman province under land subsidence, identifying accident-prone spots, and proposing corrective solutions - Fourth Phase Study Report: Modeling and analysis of distribution gas network pipes under ground subsidence*. 2026, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran: Gas Company of Kerman Province, Kerman, Iran. p. 91.
29. Homaei, F. and S. Niazmardi, *Investigating the behavior of pipelines in the gas supply network of Kerman province under land subsidence, identifying accident-prone spots, and proposing corrective solutions - Third Phase Study Report: Modeling and analysis of supply gas network pipes under ground subsidence*. 2026, Graduate University of Advanced Technology, Kerman , Iran: Gas Company of Kerman Province, Kerman, Iran. p. 114.
30. Homaei, F. and S. Niazmardi, *Investigating the behavior of pipelines in the gas supply network of Kerman province under land subsidence, identifying accident-prone spots, and proposing corrective solutions - Second Phase Study Report: Modeling and analysis of transmission gas network pipes under ground subsidence*. 2025, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran: Gas Company of Kerman Province, Kerman, Iran. p. 107.
31. Zhang, J ,.et al., *Buckling behavior of buried pipe crossing stratum subsidence area.* Engineering Failure Analysis, 2022. **135**: p. 106130. doi: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106130.
32. Wu, Y., X. You, and S. Zha, *Investigation of mechanical behavior of buried DN110 polyethylene pipe with a scratch defect under land subsidence.* Engineering Failure Analysis, 2021. **125**: p. 105371. doi: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105371.
33. Qin, X., S. Zheng, and P. Ni, *On the response of jointed rigid pipes under abrupt ground subsidence: A closed-form analytical solution.* Tunnelling and Underground Space Technology, 2024. **145**: p. 105613. doi: https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105613
34. Zhang, Y., et al., *Biaxial response of buried pipelines to arbitrary excavation-induced ground-movement fields: A pipe–soil interaction solution with Bayesian updating from sparse field settlement monitoring.* Computers and Geotechnics, 2027. **203**: p. 108698. doi: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2026.108698.
35. Cheng, X., et al., *An analytical solution for seismic response of pipe piles under vertical ground motion considering water-pile-soil interaction.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025. **199**: p. 109686. doi: https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109686.
36. Sinha, T. and A.S. Dhar, *Beam-on-spring modeling of buried MDPE pipes in sand subjected to lateral loads at a pipe junction.* Journal of Pipeline Science and Engineering, 2023. **3**(3): p. 100125. doi: https://doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100125.

37. Zhang, Y., et al., *Time-variant burst strength of Q235 steel pipe considering stress-corrosion deterioration based on ductile damage mechanics*. Thin-Walled Structures, 2026. **226**: p. 114918 doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2026.114918
38. Aleshina, S., L. Delgado-Antequera, and G. Gemar, *Assessing the economic implications of carbon emissions on climate change: Estimating the impact using methane-adjusted DICE model.* Structural Change and Economic Dynamics, 2024. **71**: p. 35–44. doi: https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.06.001
39. Copur, H., et al., *A case study on the methane explosion in the excavation chamber of an EPB-TBM and lessons learnt including some recent accidents.* Tunnelling and Underground Space Technology, 2012. **27**(1): p. 159–167.doi: https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.06.009.
40. Homaei, F. and S. Niazmardi, *Investigating the behavior of pipelines in the gas supply network of Kerman province under land subsidence, identifying accident-prone spots, and proposing corrective solutions - First Phase Study Report: Collecting Required Information and Validation*. 2025, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran: Gas Company of Kerman Province, Kerman, Iran. p. 75.
41. Nakazono, H., Hasegawa, N., Wham, B.P., O'Rourke, T.D., and Blake, B. *Innovative Solution to Large Ground Displacement Using Steel Pipe for Crossing Fault*, in *Pipelines 2019*. p. 334–345. doi: https://doi.org/10.1061/9780784482483.038
42. Wham, B., et al., *Large-scale testing of JFE steel pipe crossing faults: Testing of SPF wave feature to resist fault rupture.* Final Report Submitted to: JFE Engineering Corporation, Connell University, 2016.
43. Wham, B., et al., *Large axial deformation performance of steel pipeline designed for fault crossings*, in *Pipelines 2017*. 2017. p. 96–106. doi: https://doi.org/10.1061/9780784480878.010