

ارزیابی عملکرد لوله تخریبی بر تاسیسات زیرزمینی مجاور با استفاده از تحلیل عددی

وحید غلامرضازاده^۱؛ احسان طاهری^{۱*}

۱- گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

(نویسنده مسئول: e_taheri@modares.ac.ir)

چکیده

خطوط لوله زیرزمینی نقش حیاتی در انتقال آب، گاز و فاضلاب در مناطق شهری و غیرشهری ایفا می‌کنند. با افزایش سن این خطوط، نیاز به نوسازی و تعویض آن‌ها بیشتر می‌شود. امروزه روش‌های بدون حفاری مانند لوله‌تخریبی به دلیل مزایایی همچون کاهش هزینه‌ها، کم کردن اختلالات شهری و افزایش ایمنی، به‌عنوان راه‌حلی مؤثر برای نوسازی خطوط لوله قدیمی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیرات این روش بر زیرساخت‌های مجاور و تغییرشکل‌های سطح زمین انجام شده است. در این راستا، یک مدل عددی سه‌بعدی بر اساس آزمایش‌های عملی در نرم‌افزار *Abaqus* توسعه داده شد. پارامترهای مختلفی از جمله کرنش‌های طولی، تغییرشکل‌های عمودی و الگوی حرکات سطحی زمین مورد تحلیل قرار گرفتند. یافته‌ها حاکی از آن است که بیشترین میزان کرنش در لوله‌های مجاور زمانی اتفاق می‌افتد که منبسط‌کننده در نزدیکی آن‌ها قرار دارد. همچنین، با حرکت دستگاه منبسط‌کننده، تغییرشکل‌های زمین از الگویی متقارن به جابجایی‌های نامتقارن تغییر می‌یابند. علاوه بر این، کاهش عمق لوله‌های مدفون تغییر شکل‌های سطحی را بالاتری را نشان می‌دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی رفتار خاک و تاسیسات زیرزمینی مجاور در پروژه‌های لوله‌تخریبی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی

تکنولوژی‌های بدون حفاری، عملیات لوله‌تخریبی، نوسازی لوله مدفون، مدل‌سازی عددی سه بعدی

۱- مقدمه

افزایش است [2]. سامانه‌های خط لوله موجود ممکن است دچار خرابی شده یا از لحاظ هیدرولیکی با کاهش اندازه مواجه شوند که این امر می‌تواند به آلودگی‌های زیست‌محیطی، هدر رفت ذخایر و پیامدهای بهداشتی مرتبط، منجر شود [4]، [3]. تعمیرات، جایگزینی و احیای خط لوله‌های مدفون، گزینه‌های مهمی برای مدیریت زیرساخت‌ها هستند [5]. در روش‌های سنتی که به صورت حفاری ترانشه‌ها انجام می‌گیرد چالش‌هایی در مسائل اجتماعی، اقتصادی و

خطوط لوله زیرزمینی، خدمات ضروری از قبیل انتقال آب، گاز و فاضلاب را برای مراکز شهری و غیرشهری فراهم می‌کنند. با رشد و توسعه مراکز شهری، تقاضا برای سرویس‌های مدفون موجود نیز رو به افزایش است [1]. با افزایش سن خطوط لوله موجود و زیرساخت‌های زیرزمینی، نیاز به نوسازی و افزایش طول عمر این دارایی‌ها نیز رو به

در اطراف لوله جایگزینی، جابجایی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی تصور می‌شود که در صورت قرارگیری در حدود ۲ تا ۳ برابری قطر لوله تعویض شده، جابجایی موقتی در خدمات یا سازه‌های مجاور باید ایجاد شود. جابجایی قابل توجه فقط در نزدیکی لوله اتفاق می‌افتد؛ [11] [10].

مطالعاتی در زمینه‌های آزمایشگاهی، میدانی و تحلیل‌های عددی در زمینه اندازه‌گیری تغییرشکل‌های زمین ناشی از عملیات لوله تخریبی، صورت گرفته است.

سو و میلیگان (۱۹۹۰) فرایند لوله تخریبی را در آزمایشگاه برای لوله‌ای با قطر اولیه ۲۵ میلی‌متر که در یک مخزن خاک با محفظه‌ی شیشه‌ای دفن شده بود شبیه‌سازی کردند نوع خاک (رس اشباع، ماسه و شن)، عمق پوشش و نسبت افزایش اندازه قطر لوله‌ی جایگزین مورد پایش قرار گرفته بود.

آن‌ها گزارش نمودند که بیشترین حرکت زمین در ماسه به خاطر زاویه‌ی اتساع آن شکل می‌گیرد. شن تراکم‌پذیری بالایی را دارا بوده و تغییرشکل‌های پایینی را نشان داده و رس مقدار متوسطی از حرکات را نشان می‌داد. همچنین بالازدگی سطحی در عمق کم، بالاتر بوده است [12].

چپمن و راجرز (۱۹۹۵) طی مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی آسیب ایجاد شده ناشی از عملیات لوله تخریبی بر لوله‌های مجاور در ماسه خشک متراکم و سست پرداخته‌اند. عمق دفن و نسبت انبساط (قطر خارجی منبسط‌کننده تقسیم بر قطر داخلی لوله) پارامترهای مورد بررسی بوده و گزارش دادند که جابجایی‌های اندازه‌گیری شده زمین در طی لوله‌رانی سپری^۳ و لوله تخریبی از لحاظ الگو و اندازه مشابه هستند. [13].

اتاله و همکاران (۱۹۹۷) آزمایش‌های میدانی کنترل شده و برنامه نظارتی واقعی را انجام دادند تا اختلالات ایجاد شده در زمین و ساختارهای زیرزمینی بررسی شود. در این آزمایش از چهار نوع خاک مختلف (رس، ماسه، سیلت و رس مخلوط با گراول) استفاده شده بود. آن‌ها گزارش کردند که جابجایی‌های اندازه‌گیری شده زمین از یک الگوی متقارن به جابجایی‌های نامتقارن و نشست‌های قابل توجه تغییر می‌یابند. مشاهده شد که تغییرشکل‌های زمین به‌طور قابل توجهی به میزان افزایش اندازه قطر لوله‌ی جایگزین بستگی دارد، نوع و سطح فشردگی خاک موجود در اطراف لوله و ماهیت محصورشدگی خاک

زیست‌محیطی، مانند تراکم ترافیک، آلودگی و آسیب به زیرساخت‌های مجاور ممکن است ایجاد شود [6]. فن‌آوری بدون حفاری که از دهه ۱۹۸۰ طیف وسیعی از تکنیک‌ها را برای نوسازی و بازسازی خطوط لوله با حداقل حفاری استفاده ارائه می‌دهد. این روش‌ها امکان جایگزینی لوله موجود با یک لوله جدید را در مکان مشابه فراهم می‌سازد. لوله جایگزین در صورت عدم محدودیت فضا می‌تواند دارای اندازه یکسان یا بزرگ‌تر باشد. [7]

از مزایای اصلی نوسازی به این روش می‌توان به حداقل تداخل با ترافیک و بناهای مجاور، افزایش ایمنی برای اپراتور و عموم به سبب کاهش حفاری و صرفه‌جویی‌های زمانی و مالی قابل توجه اشاره نمود [6].

لوله تخریبی^۱ یکی از این روش‌های جایگزینی لوله است. در این روش ایجاد یک مسیر دسترسی برای تعمیر لوله‌ها کافی بوده و نیازی به ترانشه‌زنی پیوسته نیست. اندازه مسیر دسترسی موردنیاز با توجه به روش استفاده شده و شرایط کلی حاکم بر عملیات تعیین می‌شود. این روش نیازمند حفاری دو شفت ارسال و دریافت است. دستگاه منبسط‌کننده از محل قرارگیری (شفت ارسال) آغاز به حرکت می‌کند و توسط کابل یا میله‌های کشنده به سمت شفت دریافتی کشیده می‌شود. در طی عملیات، منبسط‌کننده^۲ مخروطی شکل وارد لوله موجود شده و آن را خرد می‌کند و قطعات آن را به داخل خاک اطراف فشار می‌دهد، این امر باعث گسترش حفره خاک اطراف لوله شده، بطوریکه لوله جدید که به عقب منبسط‌کننده متصل است را می‌توان به سمت محل موردنظر با استفاده از کابل کشید. قسمت جلویی یا دماغه دستگاه منبسط‌کننده، برای حفظ تعادل و حصول اطمینان از شکستن یکنواخت لوله، قطر کوچک‌تری نسبت به قطر لوله موجود دارد؛ اما پایه دستگاه منبسط‌کننده بزرگ‌تر از قطر داخلی لوله موجود است تا بتواند لوله را بشکند. [9] [8]. لوله‌های تعویضی به دلیل تداوم، انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری که ارائه می‌دهند، از پلی‌اتیلن ساخته می‌شوند.

جابجایی‌های زمین ناشی از لوله تخریبی تمایل به تمرکز در یک بخش و گسترش سریع دارند. بیش‌ترین جابجایی هنگام عبور سر منبسط‌کننده رخ می‌دهد و پس از ته‌نشینی خاک

³ Pipe Jacking

¹ Pipe Bursting

² Expander

اطراف لوله نیز عامل تعیین کننده‌ای است. [14]

مک لود (۲۰۰۸) در محیط واقعی عملیات الگوی تغییر شکل در سطح زمین اندازه‌گیری نموده و مشخص گردید که تغییر- شکل‌های عمودی، جانبی و محوری به موقعیت نسبی سرمبسط‌کننده وابسته است. ترک‌های کششی در پاسخ به جابجایی‌های جانبی بیرونی بر روی سطح ایجاد شدند و عرض این ترک‌های کششی با کاهش عمق پوشش لوله جایگزین افزایش می‌یابد. [15]

کازی رحمان و همکاران (۲۰۱۱) از تجزیه و تحلیل المان- محدود سه‌بعدی برای شبیه‌سازی گسترش حفاری حاصل از سرمبسط‌کننده و واکنش‌های خاک و خطوط لوله مجاور استفاده نمودند. آن‌ها مطالعات خود را بر اساس آزمایش‌های لاپوس انجام دادند. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس با تمرکز بر روی تجزیه و تحلیل آزمایش‌های لوله تخریبی انجام شده است. تغییرات سطح زمین، نیروهای کششی در طول عملیات لوله تخریبی با مشاهدات تجربی مقایسه شد. به‌طور میانگین، نتایج محاسبه‌شده از روش المان محدود در مقایسه با مقادیر تجربی ۲۰٪ متفاوت است. علاوه بر این، واکنش‌های تنش و کرنش خاک برای توضیح مکانیسم شکست در خاک در طول پیشروی سرمبسط‌کننده مورد بررسی قرار گرفت [16]

شی و وانگ از تجزیه و تحلیل المان محدود برای بررسی منظم تأثیر جابجایی‌های زمینی ناشی از لوله تخریبی استاتیک در خطوط لوله مجاور استفاده نمودند. هدف آن‌ها تهیه یک روش ساده برای تخمین مستقیم بیشترین کرنش حاصله بوده است. نشست زمین، ابعاد لوله، خصوصیات مواد و خصوصیات خاک پارامترهای مورد بررسی بودند. ابتدا جابجایی‌های زمین ناشی از لوله تخریبی استاتیک و مقاومت خاک‌های مختلف در برابر حرکات نسبی لوله به به طرفین بررسی شده و سپس، تجزیه و تحلیل المان محدود انجام گردید نتایج مدل‌سازی در برابر نتایج حاصل از آزمایش تأیید شد. علاوه بر این، بررسی الگوی جابجایی‌های زمین ناشی از لوله تخریبی و روش تونل سازی مورد بررسی واقع شد، جهت حرکت عمودی زمین برای این دو الگوی جابجایی زمین معکوس است. لوله تخریبی باعث می‌شود حرکات زمین به سمت بالا (بالازدگی) می‌شود، در حالی که برخلاف آن تونل زنی حرکات رو به پایین (نشست)

را ایجاد می‌کند [17].

غلامرضازاده و همکاران ۲۰۲۱ با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به بررسی الگوی جابجایی زمین در طراحی عملیات تخریبی پرداختند. در این پژوهش مطالعات عددی سه‌بعدی با نرم‌افزار آباکوس انجام شد تا واکنش خاک تحت تأثیر پارامترهای مختلف بررسی گردد. نتایج نشان داد افزایش عمق لوله مدفون سبب کاهش غیرخطی تغییر شکل‌های سطحی شده و افزایش قطر لوله جایگزین تغییر شکل‌هایی غالباً عمودی تولید می‌کند. خاک متراکم‌تر تغییر شکل‌های سطحی کمتری ایجاد کرده و اندازه تغییر شکل‌های سطحی و تغییر شکل‌های افقی وابسته به نوع دستگاه می‌باشد، انتخاب جهت‌گیری مناسب تیغه‌های منبسط کننده تغییر شکل زمین را بهینه می‌کند [18].

۲- روش انجام کار

کولوا و همکاران (۲۰۰۹) یک آزمایش بزرگ مقیاس لوله تخریبی را انجام دادند. در این آزمایش، یک لوله بتنی غیر- مسلح در مرکز یک حفره آزمایش به طول ۸ متر، عرض ۸ متر و ارتفاع ۳ متر که توسط دیواره‌های بتنی محصور شده بود قرار داده شد. یک لوله PVC (پلی‌وینیل کلرید) در ارتفاع بالاتر و عمود بر لوله بتنی که با لوله پلی اتیلن جایگزین می‌شود، قرار داده شد تا اثرات عملیات لوله تخریبی بر روی آن بررسی شود. هدف طرح پایش واکنش لوله PVC مجاور به عملیات لوله تخریبی بود [19] [20].

در جدول ۱ و شکل ۱ مشخصات و شماتیک طرح ارائه شده است. برای دستیابی به اهداف مذکور از مدل‌های المان محدود سه بعدی (نرم افزار آباکوس) استفاده خواهد شد.

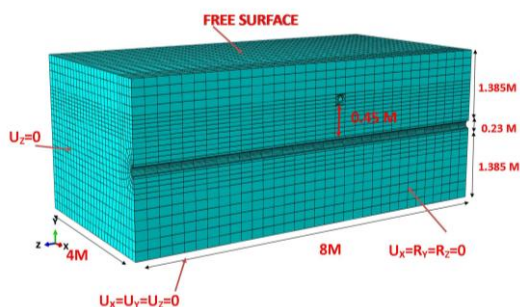
جدول ۱- مشخصات لوله‌های مورد استفاده در آزمایش [19]

کاربرد لوله	جنس لوله (mm)	قطر خارجی (mm)	ضخامت لوله (mm)	عمق پوشش (mm)
لوله قدیمی	بتنی	۲۲۹	۳۸	۱۳۸۵
لوله جدید	HDPE	۱۶۸	۱۱	۱۳۸۵
لوله پایش شونده	PVC	۱۲۲	۷	۸۱۵

آزمایش کولوا انجام شده است. از آنجا که مخزن آزمایش متقارن بود، تنها نیمی از مخزن مدل شد تا زمان محاسباتی تحلیل را کنترل کند.

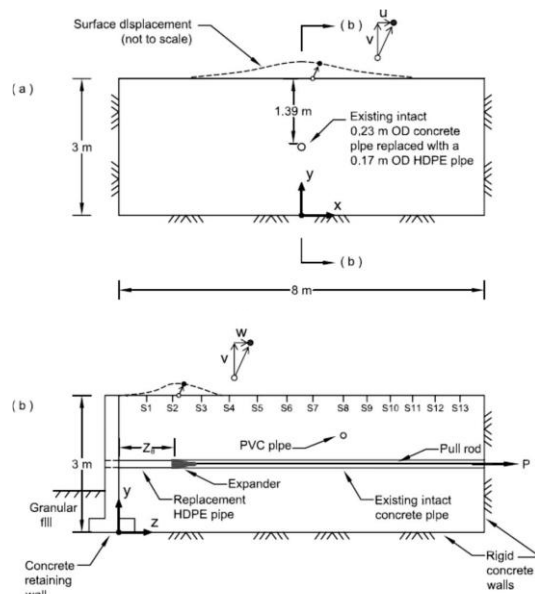
خاک به عنوان یک ماده پیوسته الاستیک-کاملاً پلاستیک با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب مدل سازی شد. زاویه اصطکاک داخلی ۴۰ درجه، وزن مخصوص ۲۱/۳۰ کیلونیوتن بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۲۰ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ برای خاک ماسه‌ای در نظر گرفته شد. همچنین برای افزایش ثبات عددی، مقدار چسبندگی کوچکی به میزان ۰/۱ کیلوپاسکال استفاده شد. تنش‌های ژئواستاتیکی براساس ضریب اولیه فشار جانبی زمین با رابطه تجربی ($K_0 = I - \sin \theta$) برآورد شده و شتاب گرانش زمین نیز با مقدار ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه در بخش Gravity در مدل اعمال گردید. [21]

لوله PVC مجاور به عنوان یک ماده ارتجاعی خطی با مدول الاستیسیته ۳۰۰۰ مگاپاسکال مدل شده و منبسط کننده به صورت یک جسم صلب با حداکثر قطر ۲۰۲ میلی‌متر که یک "نقطه مرجع" برای اعمال بارها و شرایط مرزی به آن اختصاص داده شد، ایجاد گردید. مطابق شکل ۲ جهت عمودی با محور Y، محور طولی (جهت حرکت منبسط کننده) با محور Z و جهت جانبی با محور X نشان داده شده است. همچنین شرایط مرزی صلب سخت که حرکات در تمام جهات بسته باشد در کف مدل استفاده شده است. مرزهای صلب نرم در دیواره‌های جانبی استفاده شده و سطح بالای زمین آزاد در نظر گرفته شد. مصالح قوی لوله قبلی به عنوان مرز سفت بین خاک و حفره لوله قبل از شکسته شدن لوله عمل می‌کند و پس از شکست سطح خارجی، لوله جایگزین با خاک تعامل می‌کند.



شکل ۲- ابعاد و شرایط مرزی مدل

از المان‌های شش‌وجهی برای شبکه‌بندی لوله بتنی قدیمی و لوله PVC مجاور و المان‌های منشوری مثلثی برای شبکه



شکل ۱- (a) مقطع محوری و (b) مقطع عرضی مجموعه آزمایش [19]

محافظه آزمایش از ماسه با دانه‌بندی خوب و شن پر شده بود. یکنواختی توزیع (Cu) و ضریب انحنای (Cc) مواد به ترتیب ۲۰ و ۰/۵ در نظر گرفته شد. میانگین وزن مخصوص خشک در حدود ۲۱/۳۰ کیلونیوتن بر مترمکعب بود و درصد رطوبت نیز ۴/۶ درصد در نظر گرفته شد.

لوله بتنی با یک منبسط کننده تجاری با حداکثر قطر خارجی ۲۰۲ میلی‌متر که باله ای تیز به بخش مخروطی آن وصل بود، شکسته شد. کشش منبسط کننده و لوله HDPE به داخل لوله بتنی با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از یک سری میله‌های فولادی که به دماغه سرمنبسط کننده متصل بودند، انجام شد. مطالعات تغییر شکل‌های زمین و کرنش‌ها بر روی لوله PVC مجاور با ایجاد توقف در ۱۳ مکان محوری پایش گردید

نتایج با استفاده از سنجشگرها پایش شده و حرکت بلوک‌ها با تحلیل تصاویر دیجیتال گرفته شده در مراحل مختلف کشش اندازه‌گیری شده و کرنش‌ها روی لوله PVC مجاور با نظارت بر روی کرنش‌سنج‌های نصب شده در طول لوله اندازه‌گیری شدند [19].

۳- جزئیات مدل اجزا محدود

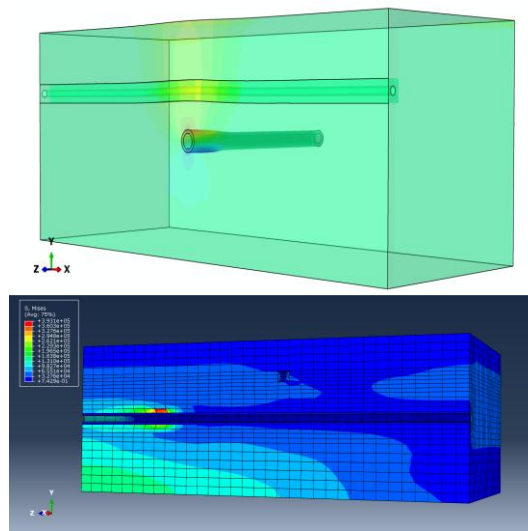
مدل‌سازی سه‌بعدی با برنامه المان محدود آباکوس بر اساس

عملیات لوله تخریبی بر لوله مجاور با داده‌های آزمایش کولوا مقایسه خواهند شد. در اثر حرکت منبسط کننده در طول عملیات، تغییر شکل‌هایی در لوله مجاور ایجاد می‌شود. مقدار این تغییر شکل‌ها به فاصله بین لوله مجاور و عملیات و سختی لوله وابسته است. شکل ۳ تغییر شکل‌های لوله *PVC* مجاور در هنگام حرکت منبسط کننده و تنش فون میسر را نشان داده شده است.

بندی خاک اطراف لوله *PVC* استفاده شده است. تراکم المان-ها در اطراف لوله بیشتر بوده و از لوله به سمت بیرون کاهش می‌یافت تا هزینه محاسباتی را کنترل کند. برهمکنش گره‌به‌گره برای ایجاد تماس لوله قدیمی و خاک اطراف و برهمکنش تماسی سطح به سطح برای تعیین تعامل بین منبسط کننده و لوله‌ی جایگزین با لوله موجود و خاک در طول انتشار منبسط کننده مورد استفاده قرار گرفت. [21]

۴- بحث

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل عددی سه بعدی تأثیر



شکل ۳- تغییر شکل لوله *PVC* و تنش فون میسر در طی عملیات لوله تخریبی

کرنش‌ها به تدریج افزایش یافته و هنگامیکه منبسط کننده به طور مستقیم زیر لوله *PVC* قرار می‌گیرد کرنش‌ها به بیشترین مقدار خود می‌رسد. کرنش‌ها در لوله *PVC* زمانی که منبسط کننده در طول لوله حرکت می‌کند تقریباً ثابت می‌مانند. کرنش بیشینه طولی محاسبه شده در حدود 8μ است. 1100 است و مقدار اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی حدود 8μ است [۱۹].

شکل ۴ همچنین توزیع کرنش‌های طولی در طول تاج و کف لوله *PVC* مجاور را در امتداد محور x نشان می‌دهد. کرنش‌های کششی در این شکل به صورت مثبت در نظر گرفته می‌شوند. تاج حداکثر کرنش کششی را زمانی که مستقیماً در بالای لوله در حال تعویض ($x=0$) قرار دارد، تجربه می‌کند و کرنش به تدریج از این بخش در جهت جانبی کاهش می‌یابد. حداکثر کرنش فشاری بر روی تاج در فاصله حدوداً 1000

کرنش‌ها در لوله *PVC*

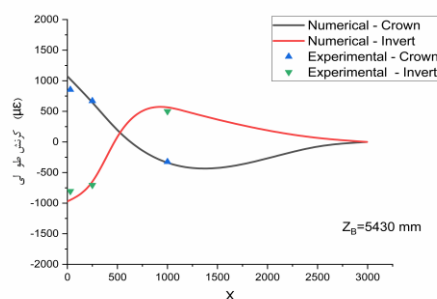
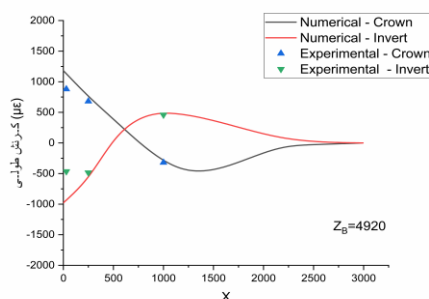
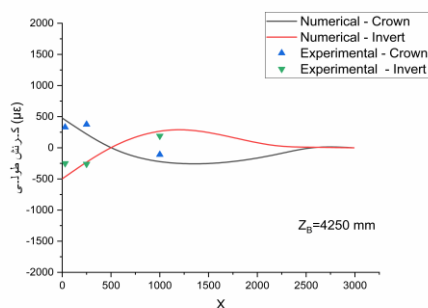
کرنش‌های طولی در طول تاج و کف لوله *PVC* در موقعیت مختلف پیشروی منبسط کننده مورد بررسی قرار گرفته که به شرح زیر است:

۱. منبسط کننده با پیشروی 4250 میلی‌متر در حال نزدیک شدن به لوله *PVC* مجاور است.
۲. منبسط کننده 4920 میلی‌متر پیشروی کرده و مستقیماً زیر لوله *PVC* قرار دارد.
۳. منبسط کننده از لوله *PVC* دور شده و پیشروی آن 5430 میلی‌متر است.

شکل ۴ نشان می‌دهد هنگامی که لوله مجاور در فاصله‌ی 700 میلی‌متر جلوتر از منبسط کننده قرار دارد (پیشروی کمتر از 4250 میلی‌متر) کرنش‌ها در لوله *PVC* تقریباً قابل اغماض هستند. اما با نزدیک شدن منبسط کننده به لوله *PVC*

در فاصله ۸۰۰ میلی‌متر از محور لوله بتنی را نشان می‌دهند؛ و "شکم دادن" بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر در جهت جانبی که ناشی از حرکات زمین در طی عملیات لوله تخریبی است.

میلی‌متر از خط مرکزی لوله جایگزین شده اتفاق می‌افتد. کرنش‌های روی کف تقریباً برابر و معکوس با کرنش‌های روی تاج هستند اما آن‌ها خمش روبه بالا بیشتری را در منطقه‌ای



شکل ۴= توزیع کرنش‌های طولی در طول تاج و کف لوله PVC برای سه موقعیت مختلف

میلی‌متر در تاج و کف لوله است. تغییرشکل عمودی با پیشروی بیشتر به تدریج افزایش یافته و هنگامیکه منبسط-کننده از زیر لوله عبور کرده و دور می‌شود (پیشروی ۵۴۳۰ میلی‌متر) بیشترین تغییرشکل در تاج و کف ثبت می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرشکل تاج و کف مساوی نیستند که نشان‌دهنده بیضی بودن مقطع لوله در هنگام حرکت منبسط کننده است. این امر باعث تغییر قطر در لوله PVC می‌شود. با نزدیک شدن انبساط کننده به لوله PVC

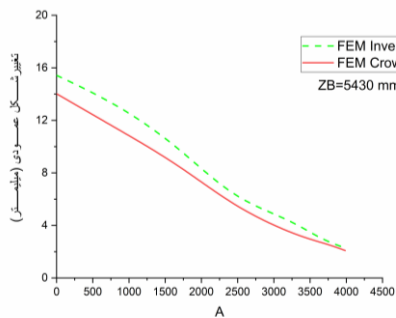
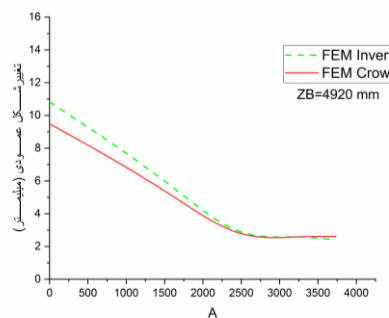
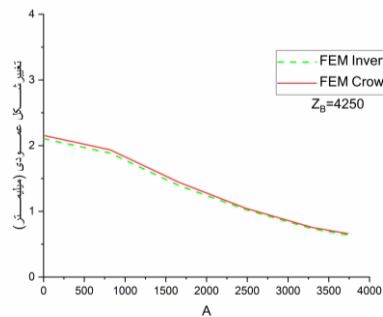
تغییرشکل لوله PVC

شکل ۵ تغییرشکل‌های عمودی تاج و کف لوله PVC را در سه موقعیت انتخاب شده بررسی نموده و نتایج مدلسازی عددی با مقادیر آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که با پیشروی ۴۲۵۰ میلی‌متری منبسط کننده تغییرشکل عمودی لوله PVC حدود ۲

تغییر شکل عمودی به سمت بالا در کف بیشتر از تغییر شکل تاج است.

توزیع تغییر شکل عمودی در طول تاج و کف لوله *PVC* نشان می‌دهد که حداکثر تغییر شکل مستقیماً بالای لوله تعویض شده ($x=0$) است و تغییر شکل به تدریج در طول مسیر جانبی کاهش می‌یابد.

قطر عمودی لوله به دلیل افزایش فشارهای جانبی زمین روی لوله *PVC* افزایش می‌یابد و باعث بیضی شدن در جهت عمودی می‌شود بنابراین تغییر شکل عمودی بالای تاج بیشتر از آن کف برای این موقعیت لوله تخریبی است. همان‌طور که منبسط‌کننده به لوله نزدیک‌تر می‌شود، تأثیر تنش جانبی کاهش می‌یابد و تنش‌های عمودی بر روی لوله افزایش می‌یابد، بنابراین قطر عمودی لوله کاهش می‌یابد. در نتیجه



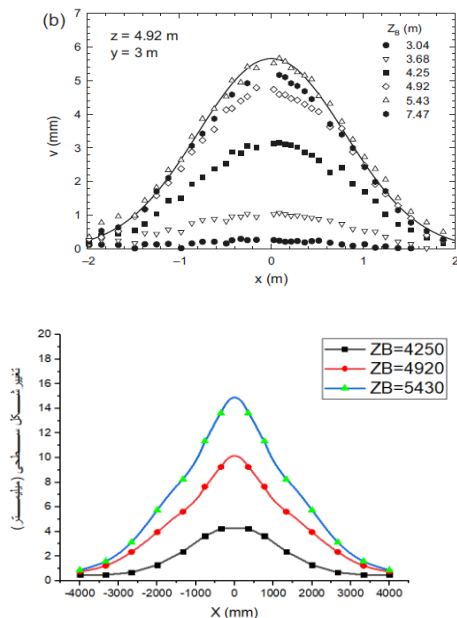
شکل ۵- توزیع تغییر شکل‌های عمودی در طول تاج و کف لوله *PVC* برای سه موقعیت مختلف

مدل‌سازی عددی وجود دارد؛ اما نتایج عددی با پیشروی بیشتر منبسط‌کننده به تدریج محافظه کارانه‌تر می‌شود.

تحلیل المان محدود الگوهای صحیح حرکات لوله *PVC* را تولید می‌کند. هنگامی که پیشروی ۴۲۵۰ میلی‌متر باشد اختلاف کمی بین محاسبات آزمایشگاهی کولوا و نتایج

دارند. این مسئله را می‌توان به معادله تشکیل‌دهنده مورد استفاده نسبت داد. در این تحلیل، به دلیل سادگی و کاربرد عملی آن، پلاستیسیته موهر-کلمب به کار گرفته شد. تنها چند پارامتر برای این مدل مورد نیاز است و این می‌تواند به آسانی از آزمایش سه محوری به دست آید. باین حال، نتایج بیشینه تجربی و عددی مطابقت داشتند. شکل‌های بالا همچنین نشان می‌دهند که نقطه‌ای بر روی سطح، تغییر شکل عمودی را هنگامی شروع می‌کند که در حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر جلوتر از منبسط‌کننده است و زمانی که منبسط‌کننده فراتر از حد ۵۰۰ میلی‌متر از آن نقطه حرکت می‌کند، به اوج تغییر شکل می‌رسد.

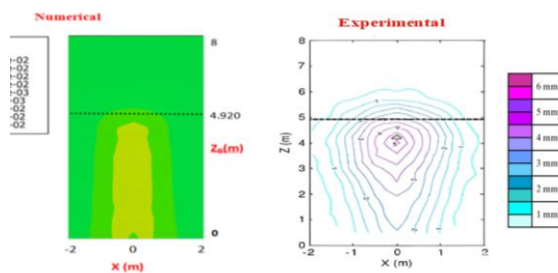
تغییر شکل‌های سطحی محاسبه شده تجربی و عددی در سطح زمین در امتداد محور x و در سه موقعیت مختلف منبسط کننده در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که بیشترین بالازدگی سطح مستقیماً بالای لوله جایگزین شده است ($x=0$) و با فاصله‌گیری از خط مرکزی تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد.



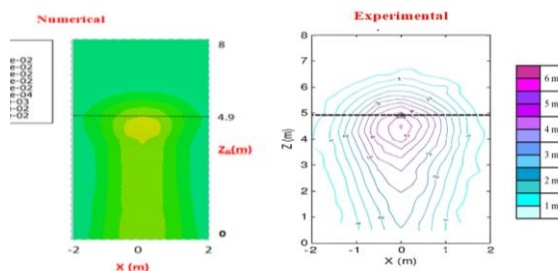
شکل ۹- تغییر شکل‌های سطحی حاصل از آزمایش‌های تجربی و مدلسازی عددی در بالای لوله PVC

حرکت‌های سطحی زمین

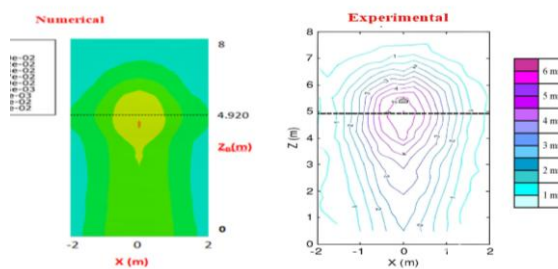
شکل ۶ تا ۸ کانتورهای دوبعدی بالازدگی سطح زمین را برای سه موقعیت مختلف منبسط‌کننده (قبل از رسیدن انبساط‌کننده به لوله مجاور، مستقیماً در زیر آن لوله و فراتر از لوله) نشان می‌دهند. کانتور داده‌های تجربی نیز برای مقایسه با نتایج نشان داده می‌شود.



شکل ۶- کانتورهای تغییر شکل سطحی برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در منبسط کننده ($ZB=4250$)



شکل ۷- کانتورهای تغییر شکل سطحی برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در منبسط کننده ($ZB=4920$)



شکل ۸- کانتورهای تغییر شکل سطحی برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در منبسط کننده ($ZB=5430$)

شکل‌های بالا نشان می‌دهند که نتایج تجربی در جهت جانبی در مقایسه با نتایج عددی گستردگی بیشتری

که منبسط‌کننده مستقیماً زیر لوله قرار گیرد. همچنین، تغییرشکل‌های عمودی در لوله‌های مجاور به دلیل بیضوی شدن مقطع لوله، در تاج و کف برابر نبوده و به موقعیت منبسط‌کننده وابسته است. تحلیل‌های عددی انجام‌شده با نرم‌افزار *ABAQUS*، اگرچه مقادیر محافظه‌کارانه‌تری نسبت به داده‌های تجربی ارائه دادند، اما الگوهای تغییرشکل و کرنش را به‌خوبی پیش‌بینی کردند. این مطالعه تأیید می‌کند که روش‌های المان محدود سه‌بعدی می‌توانند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی تأثیرات عملیات لوله‌تخریبی بر زیرساخت‌های مجاور مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، این یافته‌ها می‌توانند در طراحی و اجرای پروژه‌های مشابه برای کاهش آسیب‌های احتمالی به خطوط لوله مجاور و محیط اطراف مفید باشند.

بالازدگی سطحی محاسبه‌شده عددی کمی محافظه‌کارانه‌تر از مقادیر تجربی است. یک دلیل احتمالی ممکن است فروپاشی خاک بر روی لوله جایگزینی پس از شکسته شدن لوله قبلی باشد که نمی‌توان آن را در تحلیل عددی مدل‌سازی کرد.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر عملیات لوله‌تخریبی بر لوله‌های مجاور و تغییرشکل‌های سطحی زمین پرداخت. نتایج نشان داد که بیشترین کرنش‌ها در لوله‌های مجاور زمانی رخ می‌دهد

۶- منابع

- [1] J. Simicevic and R. L. Sterling, "Guidelines for Pipe Bursting DISCLAIMER," 2001.
- [2] A. Sanchez *et al.*, "IMECE2017-71543 Review and analysis of repair / rehabilitation methods for natural gas pipelines," 2018.
- [3] L. Geoff and C. F. N. Paul, "Damage control procedure for pipe splitting," *1998 BG Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 41–46, 1998, doi: doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00070-4.
- [4] V. Gerasimova, "Underground Engineering and Trenchless Technologies at the Defense of Environment," *Procedia Eng.*, vol. 165, pp. 1395–1401, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.870.
- [5] C. D. F. Rogers and D. N. Chapman, "Ground Movements Caused by Trenchless Pipe Installation Techniques."
- [6] C. D. F. Chapman, D N. Rogers, "Experimental and analytical modelling of pipebursting ground displacements," vol. 11, no. 1, pp. 53–68, 1996.
- [7] A. Atalah, "GROUND MOVEMENT IN HARD ROCK CONDITIONS RELATED TO PIPE BURSTING," *pipeline Eng. Constr.*, 2004, doi: 10.1061/40745(146)89.
- [8] C. Rogers and D. Chapman, "Laboratory testing of pipe splitting operations," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 99–113, 2002, doi: 10.1016/S0886-7798(01)00061-X.
- [9] B. Lapos, R. W. I. Brachman, and I. D. Moore, "LABORATORY MEASUREMENTS OF PULLING FORCE AND GROUND MOVEMENT DURING A PIPE BURSTING TEST," no. 1991, pp. 1–10, 2004.
- [10] A. Atalah and M. Asce, "Safe Distance between Large-Diameter Rock Pipe Bursting and Nearby Buildings and Buried Structures," *J. Transp. Eng.*, no. April, pp. 350–356, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:4(350).
- [11] A. Y. Vladova, "Remote Geotechnical Monitoring of a Buried Oil Pipeline," *Mathematics*, vol. 10, no. 11, 2022, doi: 10.3390/math10111813.
- [12] G. Swee, J. Milligan, "Pipe Bursting Model Tests," *Proc. of No-Dig Int.*, vol. 2, 1990.
- [13] E. C. D. F. Rogers and D. N. Chapman, "An experimental study of pipebursting in sand," 1995.
- [14] A. Atalah and P. Hadala Ray Sterling, "Ground Vibration Associated with Pipe Bursting Repository Citation." [Online]. Available: https://scholarworks.bgsu.edu/construct_mgt_pub/8
- [15] H. A. McLeod, "Field Measurements of Surface Displacements from Pipe Bursting," *Queen's Univeristy*, 2008.

- [16] K. Rahman, I. D. Moore, and R. W. Brachman, "Numerical analysis of the response of adjacent pipelines during static pipe bursting," *Soc. North Am. (NASTT), Trenchless Technol.*, 2011.
- [17] J. Shi, Y. Wang, and C. W. Ng, "Buried pipeline responses to ground displacements induced by adjacent static pipe bursting," *Can. Geotech. J.*, vol. 50, no. 5, pp. 481–492, 2013, doi: 10.1139/cgj-2012-0304.
- [18] و. غلامرضازاده، ا. طاهری، "بررسی رفتاری ماسه و رس در عملیات لوله شکافی،" نشریه علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی، ۲۰۲۱.
- [19] J. A. Cholewa, R. W. I. Brachman, and I. D. Moore, "Response of a polyvinyl chloride water pipe when transverse to an underlying pipe replaced by pipe bursting," *Can. Geotech. J.*, vol. 46, no. 11, pp. 1258–1266, Nov. 2009, doi: 10.1139/T09-070.
- [20] J. A. Cholewa, R. W. I. Brachman, I. D. Moore, and W. A. Take, "Ground Displacements from a Pipe-Bursting Experiment in Well-Graded Sand and Gravel," no. November, pp. 1713–1721, 2009.
- [21] K. Hibbitt and I. Sorensen, "ABAQUS/CAE User's Manual," 2000.



Evaluation of Pipe Bursting operation on Adjacent Structures Using 3D Numerical Analysis

Vahid Gholamreza zadeh¹; Ehsan Taheri^{1*}

¹ Faculty of Mining and Materials, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 06 January 2025 Accepted: 19 March 2025

(*Corresponding Author: e_taheri@modares.ac.ir)

Keywords

Trenchless technology
Pipe bursting operation
Buried pipeline renovation
3D numerical modeling

Final English Extended Abstract

Underground pipelines serve as essential infrastructure for transporting water, gas, and wastewater in both urban and rural environments. As these pipelines age, rehabilitation and replacement become increasingly necessary. Pipe bursting has emerged as an effective trenchless technology for pipeline renewal, offering advantages such as reduced costs, minimal surface disruption, and enhanced safety. This study investigates the effects of pipe bursting operations on adjacent underground facilities and ground surface deformations using a three-dimensional numerical model developed in

ABAQUS and validated against experimental data. The analysis examines longitudinal strains, vertical deformations, and ground movement patterns during the bursting process. The results show that maximum strains occur in adjacent pipes when the expander is in close proximity, while ground deformations transition from symmetrical to asymmetrical as the expander advances. Additionally, as the depth of buried pipes decreases, larger surface deformations occur. The findings demonstrate that numerical modeling provides an effective approach for predicting soil-structure interactions in pipe bursting projects, offering valuable insights for urban infrastructure planning and risk mitigation.
