

### مدل سازی عددی عملیات لوله شکافی در ماسه و رس

#### پژوهشی

وحید غلامرزازاده<sup>۱</sup>؛ احسان طاهری<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ تونل و فضاهای زیرزمینی، گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس،

v\_gholamrezazadeh@modares.ac.ir

۲- استادیار؛ گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، e\_taheri@modares.ac.ir

دریافت دست نوشته: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹

شماره صفحات: ۱۹۹ تا ۲۱۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11410.1437

واژگان کلیدی	چکیده
فن آوری بدون حفاری لوله شکافی مدل سازی عددی تغییر شکل زمین	فناوری های بدون حفاری به دلیل اجتناب از حفاری های روباز و کاهش آسیب به زیرساخت های مجاور به طور گسترده ای برای راه اندازی خط لوله های جدید و جایگزینی خطوط لوله های غیر استاندارد استفاده می شوند. در طول عملیات لوله شکافی، گسترش حفره خاک و حرکت های محوری منبسط کننده باعث ایجاد تغییر شکل سه بعدی در سطح و اطراف لوله قدیمی شده است که ممکن است، سبب آسیب زیرساخت های دفنی و پیاده روی های سطحی شود؛ بنابراین الگوی جابه جایی زمین از مهم ترین ملاحظات برای طراحی عملیات لوله شکافی است. در این پژوهش مطالعات عددی سه بعدی با نرم افزار آباکوس برای تجزیه و تحلیل آزمایش های لوله شکافی انجام شده و واکنش خاک تحت تأثیر پارامترهای مختلف بررسی گردیده است. نتایج نشان داده بولت تغییر شکل افقی و کلمپورستر تغییر شکل عمودی بیشتری ایجاد کرده اند. افقی یا عمودی بودن تغییر شکل ها به جهت گیری تیغه وابسته بوده و افزایش عمق لوله مدفون سبب کاهش غیر خطی تغییر شکل های سطحی شده است، بطوریکه که با افزایش ۴۰۰ میلی متری عمق، تغییر شکل ها ۲۰ میلی متر کاهش یافته است. با افزایش قطر لوله الگوی کلی تغییر شکل ها یکسان بوده، اما مقادیر متغیری ثبت شده است. تغییر شکل های سطحی در ماسه بیشتر از رس بوده که این مقدار برای ماسه و رس به ترتیب ۳۶ و ۱۲ میلی متر شده است. میزان تغییر شکل های جانبی ماسه در اطراف لوله نیز دو برابر رس گزارش شده است.

#### ۱- مقدمه

مسائل اجتماعی و اقتصادی و زیست محیطی مانند تراکم ترافیک، آلودگی و آسیب به زیرساخت های مجاور مانند پوشش پیاده روها و آزادسازی تنش در زمین است. فن آوری های بدون حفاری روش هایی ارائه می دهد که از طیف وسیعی از فنون برای بازسازی خطوط لوله با حداقل حفاری استفاده می شود (Simicevic & Sterling, 2001). لوله تخریبی (Pipe Bursting) یکی از این فنون است که در دهه ۱۹۷۰ در انگلستان توسط کمپانی رایان (Rayan Company)

خطوط لوله های زیرزمینی برای انتقال آب، فرآورده های سوختی و فاضلاب مورد نیاز است. تعمیرات، جایگزینی و احیای خط لوله های مدفون، از عوامل مهم برای مدیریت زیرساخت ها هستند. در روش سنتی که کندوپوش (Cut and Cover) نامیده می شود، ابتدا ترانشه ها حفاری شده و پس از تعمیر یا جایگزینی لوله موجود، بخش های حفاری شده دوباره پر می شوند. این روش دربرگیرنده برخی

این حرکات بر خطوط لوله نزدیک برای لوله‌های با جنس‌ها و قطرهای مختلف در عمق پوشش مختلف در زیر سطح زمین اندازه‌گیری نموده‌اند. تحقیقات آن‌ها نشان داده که حرکات در اطراف یک منطقه گوه‌ای شکل بین تاج لوله و سطح خاک متمرکز شده‌است (Leach & Reed, 1989). لوله‌ای با قطر اولیه ۲۵ میلی‌متر برای خاک‌های رس اشباع و ماسه تحت تأثیر عمق پوشش و نسبت افزایش اندازه قطر لوله‌ی جایگزین توسط سو و میلیگان شبیه‌سازی شده که بیشترین جابه‌جایی در ماسه به خاطر زاویه اتساع آن گزارش شده‌است؛ همچنین رس مقدار متوسطی از حرکات را نشان داده و بالازدگی سطحی در عمق پوشش کم، بیشتر بوده- است (Swee & Milligan, 1990). چپمن و راجرز، آزمایشی برای ماسه خشک متراکم و سست با هدف بررسی آسیب ناشی از عملیات جایگزینی بر لوله‌های مجاور انجام داده و جابجایی‌های اندازه‌گیری شده را از لحاظ الگو و اندازه مشابه لوله‌رانی سپری (Jacking shield) گزارش نموده‌اند (Rogers & Chapman, 1995). آن‌ها حرکات زمینی ماده متراکم‌تر را بیشتر و جابجایی‌های لوله‌گذاری بدون ترانشه را بسیار کوچک‌تر از روش برش باز (Open cut) گزارش نموده‌اند (Chapman & Rogers, 1996). مطالعات میدانی اتاله (Atalah) و همکاران نشان داده تغییرشکل‌های زمین از یک الگوی متقارن به جابجایی‌های نامتقارن و نشست‌های قابل‌توجه تغییر یافته و به میزان افزایش اندازه قطر، نوع و سطح فشردگی خاک موجود در اطراف لوله و ماهیت محصورشدگی خاک اطراف لوله بستگی داشته‌است. Atalah, (1998: Atalah & Asce, 2006) مک‌لود، آزمایشی میدانی با هدف افزایش اندازه لوله‌ی مدفون انجام داده و تغییرشکل‌های عمودی و سطحی رو به بالا، جابه‌جایی جانبی و محوری در جلو و عقب را به موقعیت نسبی سر منبسط‌کننده وابسته دانسته و همچنین ترک‌های کششی سطحی را به جابجایی‌های جانبی بیرونی و عرض این ترک‌ها را به عمق پوشش لوله جایگزین مرتبط دانسته‌است (McLeod, 2008). با توجه به هزینه بالای مطالعات آزمایشگاهی و میدانی و به دلیل دشوار بودن اندازه‌گیری تنش و تغییرشکل‌های زیرسطحی زمین در لوله‌شکافی و تأثیر این عملیات بر زیرساخت‌های مجاور، برنامه‌های عددی ابزارهای بالقوه‌ای را برای تجزیه و تحلیل این نوع مسائل ارائه

(DJ Ryan) برای جایگزینی خط لوله چدنی انتقال گاز بریتانیا برای افزایش قطر لوله انجام شده‌است (Howell, 1995). لوله‌تخریبی شامل شکستن لوله موجود که اغلب رسی، بتنی یا چدنی است و فشردن قطعات شکسته شده به سمت خارج به منظور گسترش حفره‌ی خاکی توسط دستگاه منبسط‌کننده مخروطی شکل و کشیدن لوله جایگزین که عمدتاً از جنس پلی‌اتیلن به دلیل تداوم، انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری است به محل با کابل یا میله کشنده، از طریق حفره گسترش یافته‌است. وجود یک مسیر دسترسی (شفت) ارسال و دریافت) برای تعمیر لوله‌ها کافی بوده و نیازی به ترانشه‌زنی پیوسته نیست. گسترش حفره خاک اطراف لوله سبب می‌شود بتوان از لوله با اندازه یکسان یا بزرگ‌تر از لوله قدیمی استفاده نمود (Brachman & Mcleod, 2010). برای حفظ تعادل و حصول اطمینان از شکستن یکنواخت لوله، دماغه دستگاه منبسط‌کننده قطر کوچک‌تری نسبت به قطر لوله موجود دارد؛ اما پایه دستگاه منبسط‌کننده بزرگ‌تر از قطر داخلی لوله موجود بوده تا توان شکست لوله را داشته و اصطکاک روی لوله جدید را کاهش دهد (Geotech. 2001). لوله‌شکافی (Pipe Splitting) از تکنیک‌های لوله‌تخریبی است که از ایجاد شکاف در امتداد یک خط به‌جای شکستن قطعات در عملیات جایگزینی برای لوله‌های غیرشکننده استفاده می‌کند (Chapman & Rogers, 2007). شکافتن لوله موجود سبب ایجاد حفره در پشت شکاف شده و اجازه ورود لوله جدید را داده و لوله قدیمی را به موقعیت اطراف لوله جایگزین منتقل نموده تا لوله جدید را از آسیب محافظت نماید (Rogers & Chapman, 2002). اثر ترکیبی گسترش حفره و حرکت شکاف‌دهنده در طول لوله‌شکافی منجر به حرکت سه‌بعدی زمین می‌شود که می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر زیرساخت‌های مجاور مانند سایر خطوط لوله، پیاده‌روها و یا بناهای اطراف داشته باشد (Atalah, 2004)؛ بنابراین تخمین حرکات زمین و واکنش زیرساخت‌های مجاور در طول عملیات جایگزینی بسیار مفید است. لیچ و رید، داده‌های جابجایی و کرنش را برای لوله‌ی چدن نشکن (Ductile Iron) در بالای یک لوله سفالی قابل تعویض بررسی و الگوی معمول جابجایی‌های زمین را بر اساس مکانیسم ایجاد حرکات زمینی و میزان حرکت، همراه با تأثیر

متر برای جایگزینی یک لوله چدن نشکن با لوله‌ی پلی‌اتیلن بوده، انجام شده‌است و تأثیر پارامترهای نوع خاک، نوع دستگاه شکاف‌دهنده، عمق پوشش، جهت‌گیری تیغه‌های شکاف‌دهنده و قطر لوله مورد شکاف مورد بررسی واقع شده‌است (Rogers & Chapman, 2002). برای دستیابی به اهداف ذکرشده، از نرم‌افزار سه‌بعدی آباکوس به دلیل امکان ایجاد سریع مدل با هندسه پیچیده، ایجاد تماس ساده بین سطوح و مدل‌های رفتاری پیشرفته که بر پایه مدل‌های المان محدود است، استفاده شده است.

می‌دهند. در این مقاله از مدل‌سازی سه‌بعدی برای تحلیل واکنش زمین طی عملیات لوله‌شکافی استفاده شده و به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان تغییرشکل‌ها در طی عملیات لوله‌شکافی پرداخته شده‌است.

## ۲- روش تحقیق

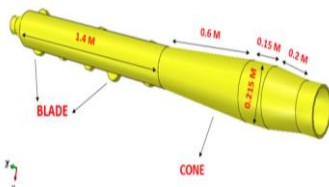
مدل‌های عددی بر اساس آزمایش لوله‌شکافی دانشگاه بیرمنگام انگلستان که متشکل از ۱۰ آزمون مطابق جدول ۱، در مخزنی با ابعاد طولی ۳ متر و عرض ۲/۳ متر و ارتفاع ۲

جدول ۱- برنامه آزمایش‌های لوله‌شکافی (Rogers & Chapman, 2002)

نوع دستگاه	جهت تیغه دستگاه (°)	قطر خارجی لوله‌شکاف (میلی‌متر)	قطر داخلی لوله (میلی‌متر)	قطر خارجی لوله (میلی‌متر)	عمق پوشش (میلی‌متر)	نوع خاک (میلی‌متر)	آزمایش
بولت	۱۳۵	۲۱۵	۱۵۸	۱۷۵	۹۰۰	ماسه	۱
بولت	۲۱۰	۲۱۵	۱۵۸	۱۷۵	۹۰۰	ماسه	۲
کلمپورستر	۲۱۰	۲۲۰	۱۵۸	۱۷۵	۹۰۰	ماسه	۳
کلمپورستر	۲۱۰	۲۲۰	۱۵۸	۱۷۵	۹۰۰	ماسه	۴
بولت	۲۱۰	۲۱۵	۱۵۸	۱۷۵	۵۰۰	ماسه	۵
بولت	۲۱۰	۱۸۰	۱۰۵	۱۲۰	۹۰۰	ماسه	۶
بولت	۲۱۰	۱۸۰	۱۰۵	۱۲۰	۵۰۰	ماسه	۷
بولت	۲۱۰	۲۱۵	۱۵۸	۱۷۵	۵۰۰	ماسه	۸
بولت	۲۱۰	۲۱۵	۱۵۸	۱۷۵	۵۰۰	رس	۹
بولت	۲۱۰	۱۸۰	۱۰۵	۱۲۰	۵۰۰	رس	۱۰



الف: لوله شکاف بولت



ب: مدل ایجادشده از لوله شکاف

شکل ۱- دستگاه لوله شکاف بولت در آزمایش‌ها

## ۲-۱- مدل‌سازی عددی

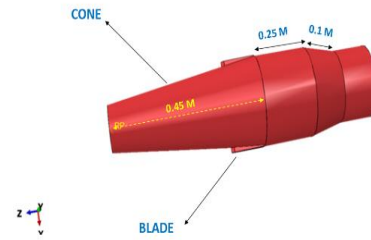
در سیستم مختصات محور  $X$  جهت جانبی،  $Y$  جهت پیشروی لوله‌شکاف و محور  $Z$  جهت عمودی نشان داده شده‌است. لوله‌شکاف بولت (*Bullet*) دارای چرخ‌های دوار و طول ۲/۴ متر در شکل ۱ نشان داده شده‌است. لوله‌شکاف‌ها به دلیل مقاومت و سختی خیلی بیشتر از خاک اطراف و لوله شکسته شده قدیمی و همچنین کاهش زمان حل به‌عنوان اجسام صلب (*Discrete Rigid*) ایجاد شده‌اند. کلمپورستر (*Clampbuster*) با طول ۰/۷ متر دارای دو تیغه شکاف دهنده روی قسمت مخروطی و بخش استوانه‌ای برای گسترش حفره ایجادشده در شکل ۲ به همراه مدل ایجادشده آن نشان داده شده‌است.

خاک در مدل‌سازی به‌عنوان یک ماده پیوسته الاستیک-کاملاً پلاستیک با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب مدل‌سازی شده‌است. مشخصات خاک‌های آزمایش در جدول ۲ و لوله چدنی در جدول ۳، آورده شده‌است. از زاویه اصطکاک حالت بحرانی خاک برای تعیین ضریب شکست موهر-کولمب استفاده شده و زاویه اتساع ( $\psi$ ) نیز بر اساس رابطه تجربی ۱ به‌دست آمده‌است (Hibbitt & Sorensen, 2000).

رابطه ۱  $\psi = \phi - 30$   
 مقدار چسبندگی برای ماسه صفر بوده اما به‌منظور افزایش ثبات عددی ۰/۱ کیلوپاسکال استفاده شده‌است؛ همچنین تنش‌های ژئواستاتیکی با ضریب اولیه فشار جانبی زمین ( $K_0$ ) بر اساس رابطه تجربی ۲ برآورد شده‌است.  
 رابطه ۲  $K_0 = 1 - \sin \phi$



الف: لوله شکاف کلمپورستر



ب: مدل ایجادشده از لوله شکاف

شکل ۲- دستگاه لوله شکاف کلمپورستر در آزمایش

جدول ۲- خصوصیات خاک‌های آزمایش (Rogers & Chapman, 2002) و (Thelen, 1952)

خاک	زاویه اصطکاک داخلی ( $^{\circ}$ )	زاویه اتساع ( $^{\circ}$ )	چسبندگی (کیلوپاسکال)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	نسبت پواسون
ماسه	۳۳/۲	۳/۲	۰/۱	۲۰	۰/۳
رس	۴	۰	۱۵	۵۰	۰/۳

که ثوابت ماده در آن نرخ کرنش به دست می‌آیند و به‌عنوان نرخ کرنش مرجع معرفی می‌شود.  $T^*$  نیز ضریب نرم شوندگی حرارتی ماده در دماهای بالا است (Johnson & Cook, 1985). مقادیر معرفی‌شده‌ی بالا برای چدن نشکن در مدل ساخته‌شده در جدول ۴، آورده شده‌است.

جدول ۴- خصوصیات پلاستیک چدن نشکن بر اساس مدل جانسون-کوک (Murugesan & Jung, 2019)

A (MPa)	B (MPa)	n	m	C
۳۲۴	۱۱۴	۰/۴۲	۰	۰/۰۰۲۶

کرنش شکستگی به نسبت تنش سه محوری، نرخ کرنش و دما وابسته بوده و مدل شکستگی را می‌توان با توجه به رابطه ۴ به شرح زیر نوشت؛ همچنین آسیب یک عنصر بر اساس قانون آسیب تجمعی تعریف شده‌است و می‌تواند به‌صورت خطی نیز تعریف شود. خصوصیات آسیب

جدول ۳- خصوصیات چدن نشکن (Company, 2018)

چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	نسبت پواسون
۷۳۰۰	$170 \times 10^3$	۰/۲۱۱

برای تعریف آسیب، بررسی شکست و مدل‌سازی شکاف ایجادشده در لوله چدنی، از مدل جانسون-کوک (Johnson-Cook) استفاده شده است که به دلیل سادگی و توصیف مناسب اکثر فرآیندها، از پرکاربردترین مدل‌ها در شبیه‌سازی فرآیندها است (Johnson & Cook, 1985). تنش در مدل جانسون-کوک توسط رابطه ۳ بیان می‌گردد:

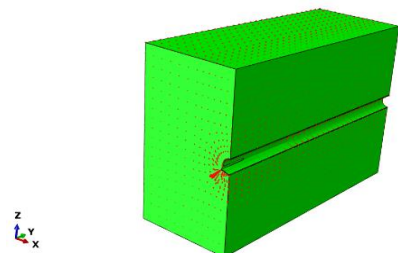
$$\sigma = (A + B \epsilon_p^n) (1 + C \ln \epsilon_p^*) (1 - T^{*m}) \quad \text{رابطه ۳}$$

A: تنش تسلیم ماده در شرایط مرجع B: ثابت سختی کرنش n: ضریب سختی کرنش C: ضریب تقویت‌کننده نرخ کرنش m: ضریب نرم شوندگی حرارتی است. کرنش پلاستیک مؤثر و برابر تعریف می‌شود که نرخ کرنشی است

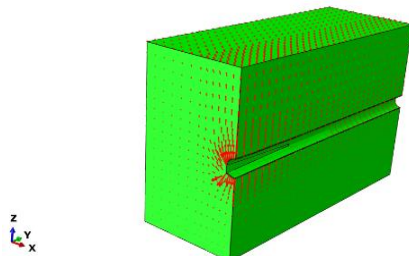
بخش تعریف شده‌است که بخش ابتدایی تماس لوله قدیمی و مخزن آزمایش پیش از عملیات لوله‌شکافی و بخش دوم ایجاد تماس بین لوله‌شکاف با لوله قدیمی و خاک اطراف و همچنین تماس بین لوله جایگزین با لوله قدیمی و خاک اطراف است. رفتار تماسی از نوع سخت بین دو سطح به‌دلیل جلوگیری از نفوذ گره‌های سطح فرعی به داخل سطوح اصلی، استفاده شده‌است. رفتار مماسی بین سطوح نیز از نوع پنالتی با ضریب اصطکاک ۰/۲ در نظر گرفته شده‌است (Baltay & Gjelsvik, 1990). تحلیل مدل در ۴ مرحله صورت گرفته‌است. ابتدا خصوصیات اولیه مدل از قبیل شرایط مرزی اولیه و تنش‌های ژئواستاتیکی و در گام دوم تنش‌ها، نیروی گرانش و سایر شرایط مرزی اعمال شده‌است. در گام سوم که مهم‌ترین بخش تحلیل است، عملیات لوله‌شکافی با پیشروی دستگاه صورت گرفته‌است. در گام نهایی نیز میزان جابه‌جایی‌های باقی‌مانده پس از اتمام عملیات لوله‌شکافی مورد بررسی قرار گرفته‌است

### ۳- بحث

به‌منظور بررسی ماهیت سه‌بعدی تغییرشکل‌های ایجادشده در طی عملیات لوله‌شکافی شکل ۴، الگوی تغییرشکل خاک در طول پیشروی منبسط‌کننده را در دو بازه زمانی مختلف نشان داده‌است.



الف: پیشروی ۵۰۰ میلی‌متری



ب: پیشروی ۱۲۰۰ میلی‌متری لوله شکاف

شکل ۴- الگوی تغییرشکل سه‌بعدی زمین

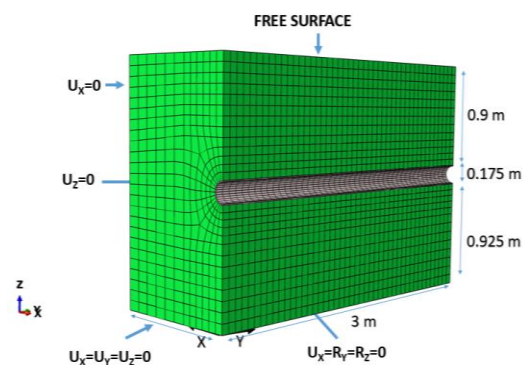
برای لوله چدنی طبق جدول ۵ در مدل اعمال شده‌است که  $d_1$  تا  $d_5$  ثوابت آسیب مدل،  $p$  میانگین تنش و  $\sigma_y$  تنش معادل هستند.

$$\epsilon_f = \left[ d_1 + d_2 \exp\left(-d_3 \left(\frac{p}{\sigma_y}\right)\right) \right] (1 + d_4 \ln \epsilon) (1 + d_5 \theta) \quad \text{رابطه ۴}$$

جدول ۵- خصوصیات آسیب چدن نشکن بر اساس مدل جانسون-کوک (Murugesan & Jung, 2019)

نرخ کرنش مرجع	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
۱	-۰/۷۷	۱/۴۵	۰/۴۷	۰/۰۰۱	۰

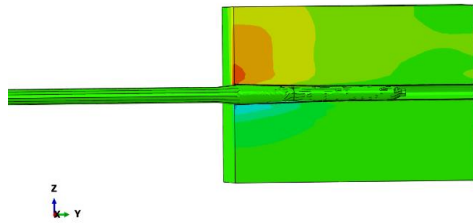
برای شبکه‌بندی از المان‌های پیوسته استفاده شده‌است که در تحلیل‌های خطی و غیرخطی پیچیده شامل تماس، پلاستیسیته و تغییرشکل‌های بزرگ به کار می‌روند. به‌منظور شبکه‌بندی مناسب‌تر، قطعات به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم شده و تراکم شبکه‌بندی در لوله‌ی قدیمی و اطراف آن به‌دلیل کاهش زمان اجرا، بیشتر بوده و با فاصله‌گیری از لوله کمتر شده‌است. نوع شبکه‌بندی و شرایط مرزی در شکل ۳، نشان داده شده‌است. شرایط مرزی موردنیاز لوله‌شکافی نیز به نقطه مرجع تعریف شده اختصاص یافته و با اعمال یک سرعت ثابت به لوله‌شکاف در جهت پیشروی، فرآیند شکست لوله در طول آزمایش صورت گرفته‌است.



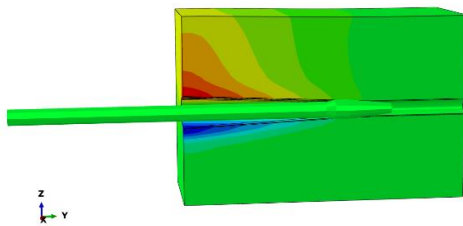
شکل ۳- شبکه‌بندی و شرایط مرزی اعمال شده در مدل

با توجه به شرایط حاکم بر مدل، برای تعریف تماس بین اجسام از شرایط تماسی سطح اصلی و فرعی در دو بخش استفاده شده که این شرایط مشخص‌کننده حرکات لغزشی بزرگ دو جسم نسبت به یکدیگر است. تماس در دو

زیادی سریع‌تر از مواردی است که به‌وسیله بولت ایجاد شده‌است.



الف: لوله شکاف بولت



ب: لوله شکاف کلمپورستر

شکل ۶- تغییر شکل‌های ایجاد شده در طی عملیات

نوع شکاف لوله در طی آزمایش در شکل ۷، برای شرایط تجربی و مدلسازی عددی مورد مقایسه قرار گرفته‌است. بولت شکاف صافی در لوله ایجاد کرده، اما کلمپورستر قطعات بیشتری را ایجاد و لوله را خرد کرده‌است.

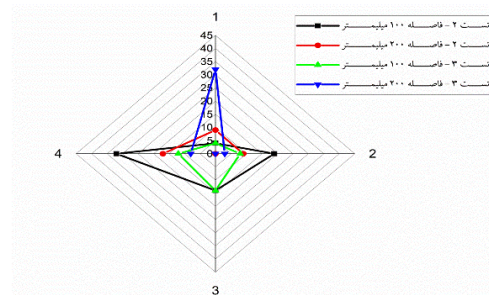
تغییر شکل‌های سطح مخزن در راستای پیشروی لوله شکاف در شکل ۸، نشان داده که تغییر شکل‌ها در عقب دستگاه لوله شکاف پس از عبور آن کمی افزایش یافته و این امر برای کلمپورستر نسبت به بولت بیشتر شده‌است.

تغییر شکل‌های در سطح مخزن در طول عملیات لوله‌شکافی تحت تأثیر نوع دستگاه لوله‌شکاف در راستای عمود بر جهت انتشار لوله‌شکاف برای پیشروی ۱۷۰۰ میلی‌متری لوله شکاف در مکان‌های ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌متری مخزن و برای پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متر در مکان‌های ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌متری مخزن اندازه‌گیری در شکل ۹ الف و ب نشان داده شده‌است.

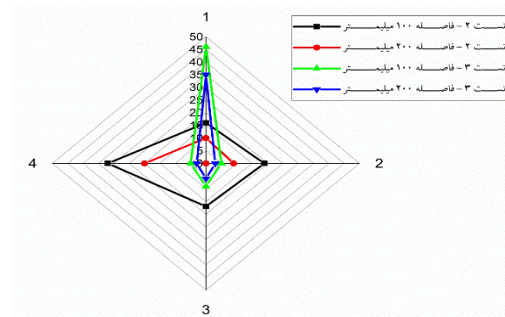
تغییر شکل‌های ایجاد شده در طول انجام عملیات بیشترین مقادیر ممکن را ثبت کرده‌اند. اشکال نشان‌گر حرکت ذرات خاک در سه جهت بوده و با پیشروی دستگاه الگوی تغییر شکل مشهودتر شده‌است.

### ۳-۱- نوع دستگاه لوله‌شکاف

نوع دستگاه و نحوه‌ی شکافتن لوله موجود توسط لوله‌شکاف به‌عنوان اولین مؤلفه مورد بررسی واقع شده که در شکل ۵ با هدف صحت‌سنجی، نتایج حاصل از مدلسازی عددی و آزمایش‌های تجربی مقایسه شده‌اند. داده‌های حاصل از نتایج تجربی از سنجشگرهای موجود که در فاصله ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متری اطراف لوله به‌دست آمده‌است.



الف: آزمایش‌های تجربی

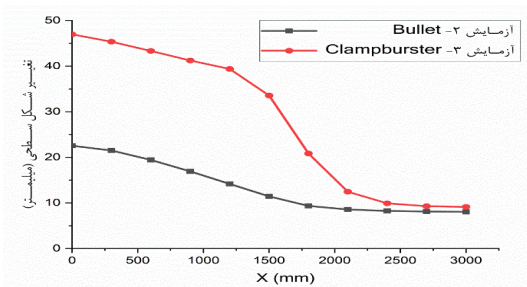


ب: مدلسازی عددی

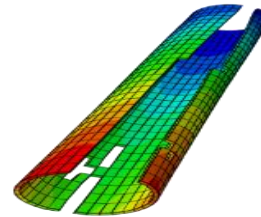
شکل ۵- بیشترین تغییر شکل (میلی‌متر) آزمایش ۲ و ۳ در اطراف لوله

*Error! Reference source not found.*

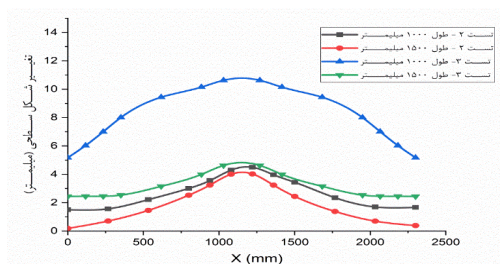
تغییر شکل‌ها را هنگام پیشروی یکسان لوله‌شکاف‌ها نشان داده که با توجه به طول کوتاه‌تر کلمپورستر، جایجایی‌های حاصل از این دستگاه تا حد



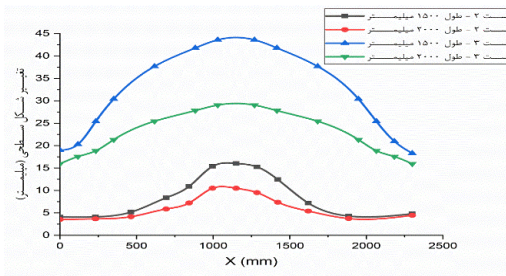
شکل ۸- تغییرهای سطحی در راستای حرکت لوله شکاف (آزمایش ۲ و ۳)



الف: بولت



الف: پیشروی ۱۷۰۰ میلی‌متری لوله شکاف



ب: پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متری لوله شکاف



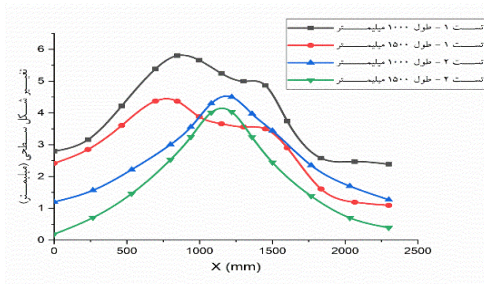
ب: کلمپبورستر

شکل ۹- تغییرهای سطحی در پیشروی دستگاه‌ها (آزمایش ۲ و ۳)

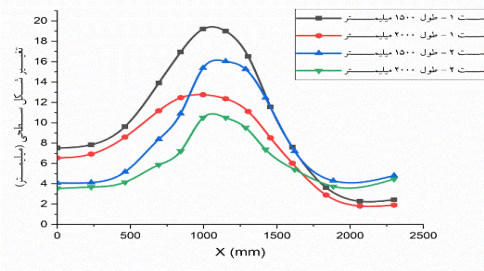
شکل ۷- مقایسه نحوه‌ی شکست لوله در عملیات لوله شکافی

۳-۲- جهت‌گیری تیغه‌های دستگاه شکاف‌دهنده جهت‌گیری تیغه‌های شکاف‌دهنده در طول آزمایش ۱۳۵ و ۲۱۰ درجه بوده که به‌عنوان دومین مؤلفه، مورد بررسی قرار گرفته‌است. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و مقادیر تجربی در شکل ۱۰، در اطراف لوله نشان داده شده‌است؛ که حداکثر جابجایی‌ها در جهت عمود بر تیغه اتفاق افتاده اما بیش‌ترین تغییرشکل‌های سطحی وقتی‌که جهت تیغه‌ها نسبت به سطح زمین در کمترین زاویه قرار گرفته رخ داده‌است.

مقایسه عملکرد دو دستگاه نشان داده که تغییرشکل‌های سطحی ایجادشده هنگام استفاده از کلمپبورستر به دلیل چرخش تیغه‌های آن در طول آزمون بیشتر بوده و بولت تغییرشکل‌های افقی بیشتری نسبت به تغییرشکل‌های عمودی ایجاد کرده‌است که در نتایج تجربی نیز این شرایط حاکم است؛ همچنین میزان تغییرشکل‌های ثبت‌شده در مدل‌سازی عددی در برخی از مکان‌ها به میزان ۱۰ درصد نسبت به نتایج تجربی متغیر بوده‌است.

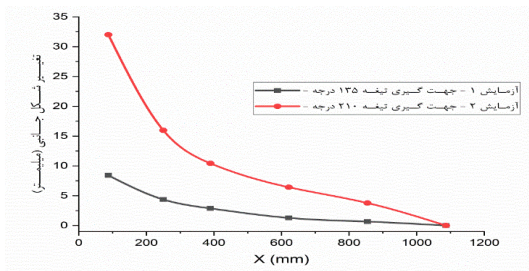


الف: پیشروی ۱۷۰۰ میلی‌متری لوله‌شکاف



ب: پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متری لوله‌شکاف

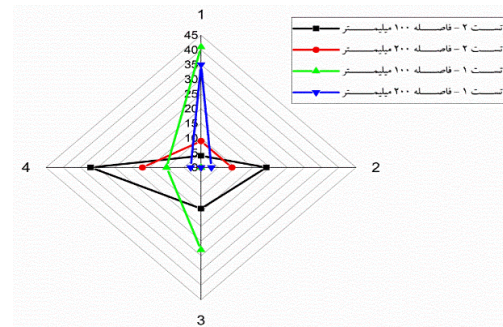
شکل ۱۱- تغییرهای سطحی در پیشروی دستگاهها (آزمایش ۱ و ۲)



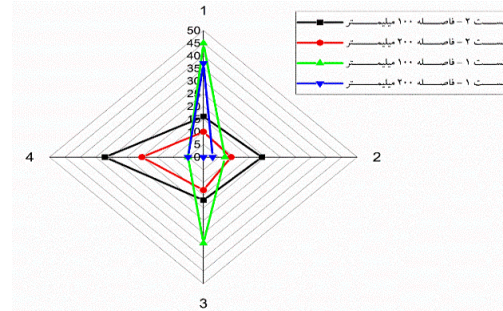
شکل ۱۲- تغییر شکل‌های جانبی در عملیات لوله‌شکافی (آزمایش ۱ و ۲)

### ۳-۳- عمق پوشش لوله جایگزین

گستره منطقه برشی ایجادشده در خاک اطراف یک لوله مدفون تحت تأثیر عمق است. هندسه منطقه شکست برشی خاک برشی که به صورت مخروطی شکل از محل تخریب لوله توسعه و به تدریج به سمت سطح گسترش یافته عاملی مهم در کاهش غیرخطی تغییر شکل‌های سطحی است (Leach & Reed, 1989). ناحیه برش در عمق تدفین بالا بر روی یک سطح بزرگ‌تر توزیع شده و از آنجا که تغییر شکل سطح در یک ناحیه بزرگ‌تر رخ داده‌است. حداکثر تغییر شکل عمودی برای این شرایط مشروط بر اینکه مقدار



الف: آزمایش‌های تجربی



ب: مدل‌سازی عددی

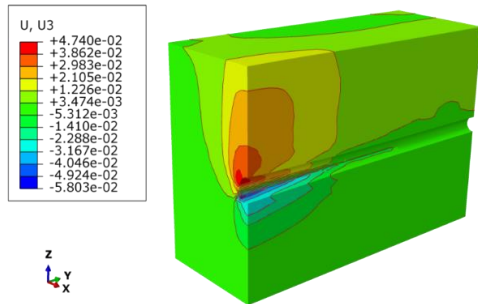
شکل ۱۰- بیشترین تغییر شکل (میلی‌متر) آزمایش ۱ و ۲ در اطراف لوله

تغییر شکل‌های سطحی به‌مانند حالت قبلی برای هر دو حالت جهت‌گیری تیغه محاسبه گردیده که در شکل ۱۱ الف و ب نشان داده شده‌است. در حالت ۱۳۵ درجه‌ای جهت تیغه‌ها، در سمت چپ به دلیل قرارگیری تیغه‌ها، تغییر شکل‌های بیشتر و نامتقارنی رخ داده‌است. بیشترین تغییر شکل‌های سطحی ثبت‌شده برای جهت‌گیری ۱۳۵ درجه تیغه ۲۰ میلی‌متر و برای جهت ۲۱۰ درجه‌ای ۱۵ میلی‌متر بوده‌است.

بیشترین تغییر شکل جانبی در اطراف لوله قدیمی رخ داده که با فاصله‌گیری از آن کمتر شده‌است. مطابق شکل ۱۲، تغییر شکل‌های جانبی در آزمایش ۱ کمتر از آزمایش ۲ است؛ زیرا جهت ۱۳۵ درجه‌ای تیغه باعث حرکت رو به بالا خاک و تغییر شکل‌های عمودی بیشتری در مدل شده‌است. افقی یا عمودی بودن تغییر شکل‌ها به جهت‌گیری تیغه وابسته بوده و برای تیغه با جهت رو به پایین (۲۱۰ درجه) تغییر شکل‌های افقی و برای تیغه‌ها در حالت ۱۳۵ درجه، تغییر شکل‌های عمودی بیشتری رؤیت شده‌است.

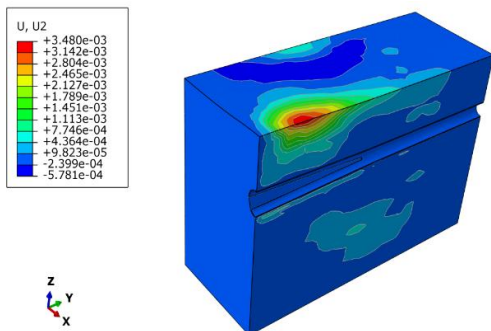


رو به بالا بیشتر از حرکات عمودی رو به پایین رخ داده‌است.



شکل ۱۴- کانتور سه‌بعدی تغییر شکل‌های عمودی (میلی‌متر) زمین برای شرایط جایگزینی با عمق تدفین ۹۰۰ میلی‌متر

در شکل ۱۵، نمای سه‌بعدی از تغییر شکل محوری برای آزمایش جایگزینی با عمق تدفین ۵۰۰ میلی‌متر نشان داده شده‌است.

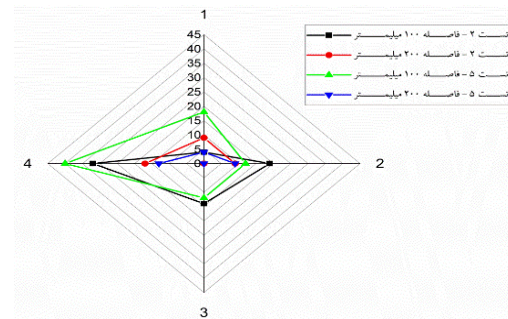


شکل ۱۵- کانتور سه‌بعدی از تغییر شکل‌های محوری (میلی‌متر) برای شرایط جایگزینی با عمق تدفین ۵۰۰ میلی‌متر

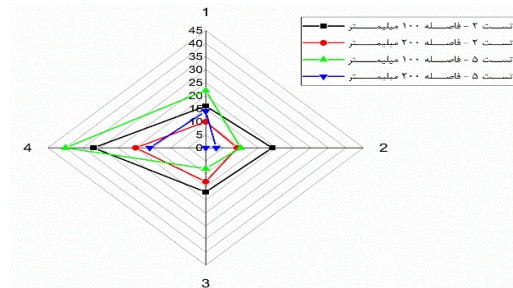
حداکثر تغییر شکل محوری در سطح زمین زمانی رخ داده که بزرگ‌ترین قسمت لوله شکاف در فاصله حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر پشت نقطه مورد نظر قرار داشته و حرکت روبه‌جلو در هر دو طرف جلو و پشت آن کاهش یافته‌است. در جهت جانبی، حداکثر تغییر شکل‌های محوری در بالای خط مرکزی لوله رخ داده و به تدریج به سمت دیواره‌های کناری کاهش داشته‌است. همچنین الگوی تغییر شکل‌های محوری برای عمق‌های مختلف و نسبت‌های افزایش سازه مشابه بوده، اما مقادیر آن متغیر گزارش شده‌است. تغییر شکل‌های سطحی برای پیشروی ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰

انبساط ثابت باقی بماند، پایین است. همچنین تغییر شکل‌های زیرسطحی در بالای لوله موجود به سختی خاک وابسته است، بنابراین خاک مجاور محل شکاف تغییر شکل بیشتری را متحمل شده و حرکات زمین قبل از رسیدن به سطح تضعیف شده‌است و برای دفن عمیق، تنها مقدار کمی از تغییر شکل به سطح زمین خواهد رسید (Swee & Milligan, 1990).

نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایش تجربی در دو عمق پوشش ۹۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متری در شکل ۱۳، مورد مقایسه واقع شده‌است. مطابق انتظار افزایش عمق پوشش عملیات سبب کاهش میزان تغییر شکل‌های سطحی گردیده‌است.



الف: آزمایش‌های تجربی



ب: مدل‌سازی عددی

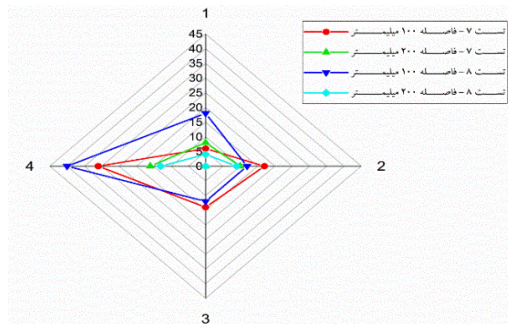
شکل ۱۳- بیشترین تغییر شکل (میلی‌متر) آزمایش ۲ و ۵ در اطراف لوله

شکل ۱۴ الف الگوی سه‌بعدی تغییر شکل‌های عمودی را زمانی که منبسط‌کننده در مرکز سلول آزمایش در عمق ۹۰۰ میلی‌متری بوده نشان داده‌است. حداکثر تغییر شکل‌های عمودی در نزدیکی سطح و در اطراف لوله جایگزین شده ایجاد شده و به تدریج در جهت جانبی و محوری کاهش یافته‌است. از آنجاکه سطح بالای زمین آزاد است، ذرات خاک برای بالا رفتن آزاد بوده و حرکات عمودی

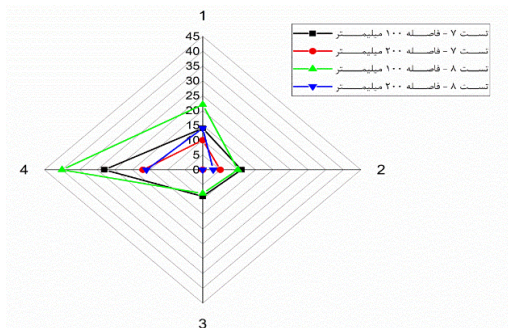
مطابق انتظار، کاهش عمق موجب ایجاد جابجایی سطحی بیشتر و تغییر جهت حداکثر جابجایی از بالای یک صفحه افقی به یک صفحه عمودتر شده‌است. علاوه بر این، در آزمایش تجربی با عمق پوشش ۵۰۰ میلی‌متری ترک‌ها و شکاف سطحی نسبتاً بزرگی تشکیل شده که قرائت برخی از شمارنده‌های سطح را مختل کرده‌است.

### ۳-۴- قطر لوله جایگزین

شکل ۱۷، نتایج تغییرشکل‌های حاصل از مدلسازی عددی انجام‌شده را با مقادیر تجربی برای قطرهای ۱۵۸ و ۱۷۵ میلی‌متری لوله برای فواصل ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متری مورد مقایسه قرار داده‌است.



الف: آزمایش‌های تجربی

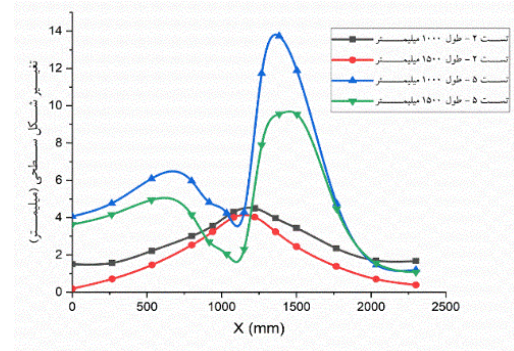


ب: مدلسازی عددی

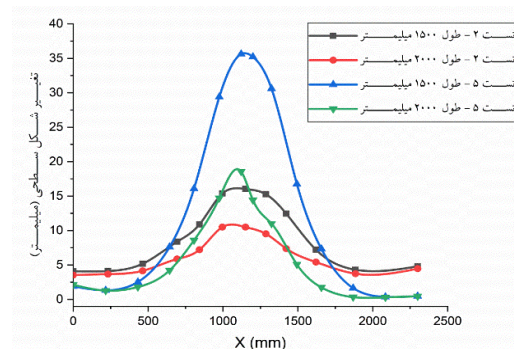
شکل ۱۷- بیشترین تغییرشکل (میلی‌متر) آزمایش ۷ و ۸ در اطراف لوله

با بررسی نمودارها می‌توان ادعا نمود که الگوی کلی تغییر شکل‌ها در هر دو حالت یکسان بوده است؛ اما مقادیر آن متغیر است. همچنین نتایج حاصل از مدلسازی به میزان ۵ تا ۱۰ درصد نسبت به نتایج تجربی بیشتر بوده است. تغییرشکل‌های سطحی در شرایط مختلف پیشروی لوله‌شکافی به‌مانند بخش‌های قبلی بررسی شده و در شکل ۱۸

میلی‌متری به‌مانند حالت‌های قبلی برای دو عمق تدفین محاسبه گردیده که در شکل ۱۶ الف و ب نشان داده شده‌است.



الف: پیشروی ۱۷۰۰ میلی‌متری لوله‌شکافی

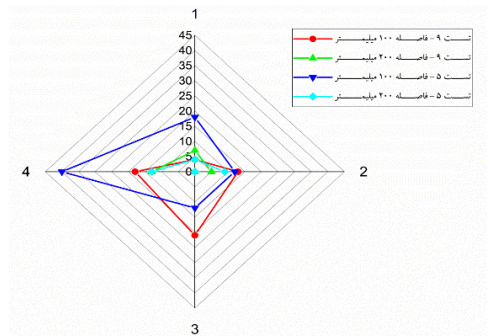


ب: پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متری لوله‌شکافی

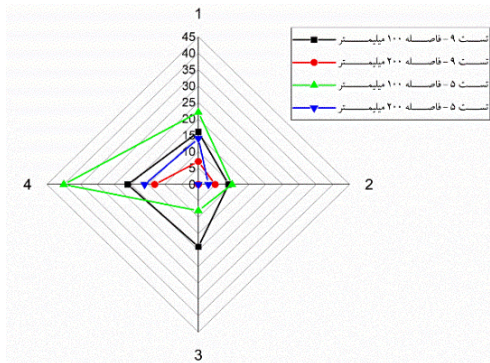
شکل ۱۶- تغییرهای سطحی در پیشروی دستگاه (آزمایش ۲ و ۵)

این شکل‌ها نشان می‌دهند که حداکثر تغییرشکل عمودی مستقیماً در بالای لوله جایگزین شده رخ داده و به‌تدریج در جهات عمودی و جانبی کاهش یافته‌است. به‌دلیل ایجاد شکاف در طرف چپ لوله توسط تیغه‌ها و بطبع آن نفوذ مقداری از خاک به داخل لوله یا زیر لوله، افت تغییرشکل‌ها در این بخش رخ داده‌است. این افت در آزمایش ۵ نسبت به آزمایش ۲ به دلیل عمق لوله مدفون مشهود شده‌است؛ بنابراین تغییرشکل‌ها در سطح زمین به‌طور غیرخطی با کاهش عمق بیشتر شده‌است؛ چراکه توسعه منطقه‌ی گسیختگی برشی و واکنش مواد غیرخطی خاک عوامل اصلی رفتارهای غیرخطی هستند. بیشینه بالازدگی در سطح زمین برای آزمایش جایگزینی لوله در عمق ۹۰۰ میلی‌متری ۱۶ میلی‌متر و عمق ۵۰۰ میلی‌متر ۳۶ میلی‌متر ثبت شده‌است.

تغییر شکل الاستیک به‌سختی خاک و مقدار تغییر شکل پلاستیک به معیار شکست و قانون جریان پلاستیک بستگی دارند. از آنجایی‌که معادله ساختاری موهر-کولمب در این تحلیل بکار گرفته شده‌است، مکانیزم شکست برشی توسط زاویه اصطکاک خاک کنترل می‌شود. از آنجاکه یک قاعده جریان غیرهمراه مورد استفاده قرار گرفته، زاویه اتساع کم‌تر از زاویه اصطکاک شده‌است. مقدار انبساط حجمی ناشی از برش خاک بستگی به بزرگی زاویه اتساع داشته و خواص مواد خاک در هنگام لوله‌شکافی، مقدار تغییر شکل زمین را تحت تأثیر قرار داده‌است. شکل ۱۹، مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و مقادیر تجربی را برای دو نوع خاک مورد مطالعه نشان داده‌است.



الف: آزمایش‌های تجربی

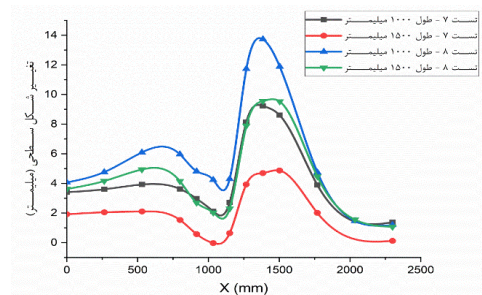


ب: مدل‌سازی عددی

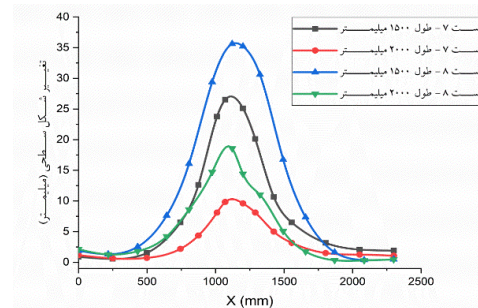
شکل ۱۹- بیشترین تغییر شکل (میلی‌متر) آزمایش ۵ و ۹ در اطراف لوله

از نمودارهای فوق می‌توان نتیجه گرفت تغییر شکل‌های ایجاد شده در ماسه بیشتر به سمت بالا و حرکات افقی به سمت چپ بوده‌است؛ اما در خاک رسی تغییر شکل‌ها در نزدیکی لوله و رو به پایین رخ داده‌است.

الف و ب نشان داده شده‌است. مقدار انبساط حفره مخزن متناسب با قطر خارجی لوله‌های موجود بوده و طبق مشاهدات حداکثر تغییر شکل‌های عمودی و جانبی حفره با افزایش فاصله از لوله نرمال شده‌است. این روش نرمال‌سازی نتایجی را تولید کرده که می‌تواند برای تعداد زیادی از هندسه‌های لوله اعمال شود. همچنین این اشکال نشان می‌دهند که حرکت سطحی به‌طور قابل توجهی برای لوله‌های با قطر بزرگ‌تر، افزایش یافته و رابطه خطی نیست. با توجه به شکل بیشترین تغییر شکل سطحی برای لوله با قطر ۱۵۸ میلی‌متری ۲۶ میلی‌متر و لوله‌ی ۱۷۵ میلی‌متری ۳۶ میلی‌متر شده‌است.



الف: پیشروی ۱۷۰۰ میلی‌متری لوله‌شکاف



ب: پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متری لوله‌شکاف

شکل ۱۸- تغییرهای سطحی در پیشروی دستگاه‌ها (آزمایش ۷ و ۸)

### ۳-۵- تأثیر نوع خاک

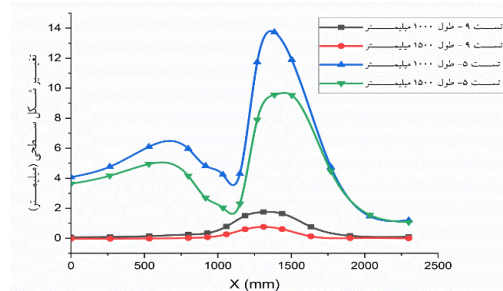
عملیات لوله شکافی در ماسه و رس با عمق پوشش ۵۰۰ میلی‌متر برای بررسی تأثیر نوع خاک انجام گردیده‌است. مکانیزم شکست برشی تأثیر قابل توجهی بر روی حرکات زمین دارد. از آنجاکه خاک به‌صورت یک محیط الاستیک-پلاستیک مدل‌سازی شده، تغییر شکل کلی دو مؤلفه دارد: (۱) تغییر شکل الاستیک و (۲) تغییر شکل پلاستیک. مقدار

مورد واکنش خاک در زیرزمین ارائه داده که بیانگر این مورد است که بیشترین تغییرشکل‌ها در مجاورت لوله قدیمی رخ داده‌است. تنش‌های ایجادشده در خاک به دلیل انبساط حفره و حرکت محوری باعث ایجاد ناحیه برشی خاک شده و میزان ناحیه شکست برشی وابسته به معیار شکست موهر-کولمب است. لوله شکاف بولت یک شکاف خالص در لوله ایجاد کرده و عمدتاً باعث جابجایی افقی شده‌است، درحالی‌که کلمپورستر با نرخ جابجایی سریع‌تر باعث تولید خرده قطعات بسیاری در لوله میزبان شده و باعث جابجایی‌هایی عمدتاً به‌صورت عمودی به سمت بالا شده‌است. در این شرایط مقادیر حاصل از مدل‌سازی به میزان ۱۰ درصد نسبت به نتایج تجربی بیشتر بوده‌است. افقی یا عمودی بودن تغییرشکل‌ها به جهت‌گیری تیغه وابسته بوده، بطوریکه تیغه با جهت ۲۱۰ درجه تغییرشکل‌های افقی و تیغه با جهت ۱۳۵ درجه تغییرشکل‌های عمودی بیشتری ایجاد کرده‌است. کاهش عمق پوشش از ۹۰۰ میلی‌متر به ۵۰۰ میلی‌متر سبب ایجاد ترک‌های سطحی و نشست در اطراف تیغه‌ها و افزایش تغییر شکل‌های سطحی از ۱۶ به ۳۶ میلی‌متر شده‌است. با افزایش قطر لوله میزبان الگوی کلی تغییر شکل‌ها یکسان بوده اما مقادیر متغیر ثبت شده‌است بطوریکه با افزایش قطر لوله از ۱۵۸ به ۱۷۵ میلی‌متر، تغییر شکل‌های سطحی ۱۰ میلی‌متر افزایش یافته‌است. ماسه تغییر شکل‌های سطحی بیشتری نسبت به رس متحمل شده‌است بطوریکه تغییر شکل‌های سطحی در ماسه و رس به ترتیب ۳۶ و ۱۲ میلی‌متر بوده‌است؛ همچنین میزان تغییر شکل‌های جانبی برای ماسه در اطراف لوله دو برابر رس گزارش شده‌است.

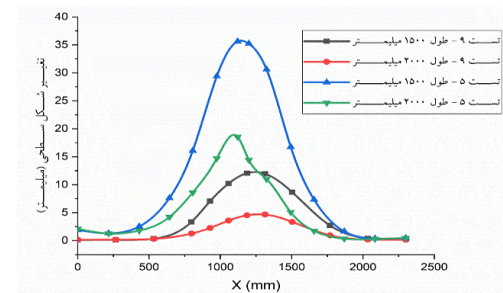
#### ۵- سپاس‌گزاری

بدینوسیله از شرکت نفت فلات قاره ایران و شرکت سمندیس که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند صمیمانه تشکر می‌نماییم.

حداکثر تغییرشکل‌های سطحی در ماسه بیشتر بوده‌است.



الف: پیشروی ۱۷۰۰ میلی‌متری لوله‌شکاف



ب: پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متری لوله‌شکاف

شکل ۲۰- تغییرهای سطحی در پیشروی دستگاه‌ها (آزمایش ۵ و ۹)

مطابق شکل ۲۰ الف و ب حداکثر تغییرشکل‌های سطحی برای ماسه در آزمون تجربی و مدل‌سازی عددی به ترتیب ۳۵ و ۳۶ میلی‌متر بوده‌است. این در حالیست که برای رس این مقدار به ترتیب ۵ و ۱۲ میلی‌متر بوده‌است که نشانگر نتایج محافظه‌کارانه‌تر مدل‌سازی عددی یوده‌است؛ همچنین تغییرشکل‌های جانبی در اطراف لوله قدیمی نیز در ماسه به میزان دو برابر رس بوده‌است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی عملیات لوله‌شکافی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای توضیح پاسخ خطوط لوله تحت شرایط مختلف بر اساس آزمایش لوله شکافی چپمن و راجرز صورت گرفته‌است. مدل سه‌بعدی به‌طور مؤثری الگوی تغییرشکل خاک را در حین لوله‌شکافی ضبط نموده و اطلاعاتی در

## ۶-سیاهه‌ی نمادها

در جدول ۶، آورده شده است.

جدول ۶- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
$\psi$	°	زاویه اتساع	$\varepsilon * \square$	-	کرنش پلاستیک مؤثر
$\varphi$	°	زاویه اصطکاک داخلی خاک	$C$	-	ضریب تقویت‌کننده نرخ کرنش
$E$	Mpa	مدول الاستیسیته	$\sigma$	-	نرخ کرنشی ثوابت ماده
$K$	-	ضریب اولیه فشار جانبی	$T * k^o$	-	نرم شونده‌ی حرارتی ماده در دماهای بالا
$c$	KPa	چسبندگی	$m$	-	ضریب نرم شونده‌ی حرارتی
$\nu$	-	نسبت پواسون	$f\varepsilon$	-	کرنش شکستگی
$g$	m/s <sup>2</sup>	شتاب گرانش زمین	$P$	Pa	میانگین تنش
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	چگالی	$\sigma y$	Pa	تنش معادل
$\sigma$	Mpa	تنش جانسون-کوک	$V$	Mm	حداکثر بالازدگی سطحی
$A$	Mpa	تنش تسلیم ماده در شرایط مرجع	$W$	Mm	گسترش مثلث بالازدگی
$B$	-	ثابت سختی کرنش	$Ux$	Mm	تغییر شکل‌های جانبی
$n$	-	ضریب سختی کرنش	$Uy$	Mm	تغییر شکل‌های محوری
			$Uz$	Mm	تغییر شکل‌های عمودی

## ۷-مراجع

- Atalah, A. (1998). *The effect of pipe bursting on nearby utilities, pavement, and structures*. Louisiana Tech University.
- Atalah, A. (2004). *GROUND MOVEMENT IN HARD ROCK CONDITIONS RELATED TO PIPE BURSTING*.
- Atalah, A., & Asce, M. (2006). *Safe Distance between Large-Diameter Rock Pipe Bursting and Nearby Buildings and Buried Structures*. April, 350–356.
- Baltay, P., & Gjelsvik, A. (1990). *Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 40–46.
- Brachman, R. W. I., Mcleod, H. A., Moore, I. D., & Take, W. A. (2010). *Three-dimensional ground displacements from static pipe bursting in stiff clay*. 450, 439–450. <https://doi.org/10.1139/T09-118>
- C, Rogers, D. C., Wan, F., Ng, P. C. F., & Smith, S. (2002). *Laboratory testing of pipe splitting operations*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(1), 99–113. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00061-X)
- Chapman, D N. Rogers, C. D. F. (1996). *Experimental and analytical modelling of pipebursting ground displacements*. 11(1), 53–68.
- Chapman, D. N., Ng, P. C. F., & Karri, R. (2007). *Research needs for on-line pipeline replacement techniques*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(5–6), 503–514. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.05.004>

- Company, P. (2018). *Ductile Iron*. In *Metals Handbook Desk Edition*.  
<https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.a0003108>
- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. (2001). In *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1729-0>
- Hibbitt, K., & Sorensen, I. (2000). *ABAQUS/CAE User's Manual*.
- Howell, N. (1995). *The Polyethylene Pipe Philosophy for Pipeline Renovation*. *Proceedings of No-Dig International*.
- Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1985). *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures*. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1), 31-48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)
- Leach, G. Reed, K. (1989). *Observation and Assessment of the Disturbance Caused by Displacement Methods of Trenchless Construction*. *Proceedings of No-Dig International*, 2.
- McLeod, H. A. (2008). *Field Measurements of Surface Displacements from Pipe Bursting*. *Queen's Univeristy*.
- Murugesan, M., & Jung, D. W. (2019). *Johnson cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications*. *Materials*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/ma12040609>
- Rogers, E. C. D. F., & Chapman, D. N. (1995). *An experimental study of pipebursting in sand*.
- Simicevic, J., & Sterling, R. L. (2001). *Guidelines for Pipe Bursting DISCLAIMER*.
- Swee, J. Milligan, G. (1990). *Pipe Bursting Model Tests*. *Proceedings of No-Dig International*, 2.
- Thelen, E. (1952). *Properties of Soils*. *Journal of the Franklin Institute*, 254(4), 323-325. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(52\)90904-6](https://doi.org/10.1016/0016-0032(52)90904-6)
- es. *Modern Management of Mine Proudcting, Geology & Environmental Protection* (pp. 27-34). *Albena: International Scientific GeoConference*.
- Jalali, S. M., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). *Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction*. *Safety Science*, 49(5), 664-669. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.12.015>
- Jalali, S. M., Emami, M., Najafi, M., Gharib-Bolok, F., Mohammadi, H., & Ramezanzadeh, A. (2015). *Underground Coal Gasification as a Strategy to Improve Energy Economy of Iran*. *Iranian Energy Economics*, 4(13), 63-88. Retrieved from [http://jieee.atu.ac.ir/article\\_852\\_202.html](http://jieee.atu.ac.ir/article_852_202.html)
- Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) *Amsterdam: Elsevier B.V.*

## *Numerical modeling of pipe splitting operations in sand and clay*

V. Gholamrezazadeh<sup>1</sup>; E. Taheri<sup>\*2</sup>

1- M.Sc. in tunneling and underground space; Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, v\_gholamrezazadeh@modares.ac.ir

2- Assistant Professor; Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, e\_taheri@modares.ac.ir

Received: 22 Nov 2021; Accepted: 28 Feb 2022

DOI: 10.22044/TUSE.2022.11410.1437

### **Keywords**

*Trenchless technology  
Pipe splitting  
Numerical modeling  
Soil deformation*

### **Extended Abstract**

#### **Summary**

Trenchless technology is used to launch new pipelines and replace non-standard pipelines. In the present work, numerical modeling of pipe splitting strategy considering the expander transmission, the surrounded soil response, and also, geotechnical parameters have been regarded. The simulation has been carried out using Abaqus software considering the pipe spilling experimental test case profound analysis. Moreover, evaluation of three-dimensional (3D) deformation of the ground during pipe splitting operation has been performed using the Abaqus software in clay and sand. In this research, the embedded depth, the replaced pipe diameter, the type of soil, and the pipe splitting machine type, and also the blade orientation have been evaluated. The results show that the bullet has more horizontal deformation and the clamp buster has more vertical deformation. The orientation of the blade determines whether the deformations are horizontal or vertical, and increasing the depth of the buried pipe causes a nonlinear decrease in surface deformations. With an increase of 400 mm in depth, the deformations have been reduced by 20 mm. As the diameter of the pipe increases, the general pattern of deformations is the same, but the values are different. Surface deformation in sand is greater than in clay. The deformation values for sand and clay are 36 and 12 mm, respectively. The amount of lateral deformation of the sand around the pipe has also been doubled. A general result is that the type and size of the deformations depend on the type of pipe splitter, the direction of the blade, the buried depth, the diameter of the pipe and the type of soil.

### **Introduction**

Trenchless methods are increasingly utilized to replace the worn out pipelines or to fabricate the new pipelines. The advantage of these methods is to prevent the abundant amount of excavations, and also, to reduce damages to the adjacent facilities. The settlement of the surface area is one of the greatest concerns in trenchless methods. The pipe splitting method is a sophisticated 3D activity.

### **Methodology and Approaches**

In the present work, numerical modeling of pipe splitting strategy considering the expander transmission, the surrounded soil response, and also, geotechnical parameters have been regarded. The simulation has been carried out using the Abaqus software considering the pipe spilling experimental test case profound analysis. In this research, not only the embedded depth, the replaced pipe diameter, the type of soil, and the pipe splitting machine type have been evaluated, but also the blade orientation has been assessed.

### **Results and Conclusions**

The results show that the bullet has more horizontal deformation and the clamp buster has more vertical deformation. The orientation of the blade determines whether the deformations are horizontal or vertical, and increasing the depth of the buried pipe causes a nonlinear decrease in surface deformations. With an increase of 400 mm in depth, the

*deformations have been reduced by 20 mm. As the diameter of the pipe increases, the general pattern of deformations is the same, but the values are different. Surface deformation in sand is greater than in clay. The values for sand and clay are 36 and 12 mm, respectively. The amount of lateral deformation of the sand around the pipe has also been doubled.*

---