

# حفاظت از لوله مدفون با استفاده از کیسه خاک

امیر فرهنگ احمدیان (دانشجوی دکتری) fahmadian@mail.kntu.ac.ir

سید ناصر مقدس تفرشی (استاد) (نویسنده مسئول) nas\_moghaddas@kntu.ac.ir

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## چکیده

امروزه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها جهت تسلیح توده خاک روی لوله‌ها، تحت بارهای استاتیکی و تکراری در حال توسعه است. در این میان کیسه‌های خاک به دلیل عملکرد محدودکنندگی توده خاک در داخل خود، علاوه بر مناسب بودن به عنوان حائل در هنگام وقوع سیل، در تقویت بستر راه، پایداری شیروانی‌ها و دیوارهای حائل کاربرد دارند. در این مقاله بررسی رفتار لوله مدفون در ترانشه غیرمسلح و مسلح با کیسه خاک مدنظر است. از این رو تعدادی آزمایش بر روی ترانشه غیرمسلح و مسلح با یک کیسه خاک، دو لایه کیسه خاک با چینش ستونی (با و بدون فاصله) و دو لایه کیسه خاک با چینش پلکانی، حاوی لوله با قطر ۱۶۰ میلی‌متر تحت بار استاتیکی انجام گردید. نتایج آزمایش‌ها مبین تاثیر لایه کیسه خاک بر کاهش نشست بستر با محصور نمودن خاک داخل و جلوگیری از حرکت جانبی توده خاک بالای لوله است. همچنین کیسه با توزیع تنش در سطح گسترده‌تر و کاهش چشمگیر آن در عمق، سبب کاهش تنش انتقالی به تاج لوله و در نتیجه کاهش تغییرشکل لوله می‌گردد.

**کلید واژه:** لوله مدفون، کیسه‌های خاک، تسلیح، نشست

## ۱. مقدمه

لوله و عملکرد غشایی لایه یا لایه‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید می‌تواند باعث کاهش فشار روی تاج لوله گردد<sup>[۱-۶]</sup>. در این میان استفاده از لایه ژئوسل علاوه بر عملکرد غشایی، به دلیل ایجاد محصورکنندگی باعث بازتوزیع بهتر تنش در ترانشه و در نتیجه کاهش تنش وارد بر لوله و تغییرشکل آن می‌گردد<sup>[۷ و ۸]</sup>.

هج و سیتارام (۲۰۱۵)<sup>[۹]</sup> با انجام بارگذاری استاتیکی روی لوله مدفون در بستر غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید، ژئوسل و ترکیب این دو به این نتیجه رسیدند که استفاده از ژئوسل و ترکیب آن با لایه ژئوگرید علاوه بر جلوگیری از گسیختگی سیستم، سبب افزایش باربری سیستم به علت اثر توأم محصورشدگی خاک در سلول‌های ژئوسل و عملکرد غشایی لایه ژئوگرید و در نتیجه پخش بار در سطح بیش‌تر (کاهش تنش) و جلوگیری از حرکت رو به پایین لایه‌های بستر می‌گردد. این امر می‌تواند سبب کاهش انتقال فشار وارد بر لوله مدفون و در نتیجه تغییرشکل آن گردد.

کیسه‌های پلیمری خاک (کیسه‌های خاک<sup>۲</sup>) با توجه به عملکرد سه بعدی و قابلیت محصورکنندگی توده خاک درون خود در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی نظیر دیوار حائل جهت پایداری شیروانی‌ها<sup>[۱۰-۱۱]</sup>

خطوط لوله انتقال نفت، گاز، آب و ... به علت کاربرد در سطحی بسیار وسیع و اهمیت بالای آن‌ها در زندگی انسان‌ها، شریان‌های حیاتی نامیده می‌شوند. این خطوط معمولاً به دلایل اقتصادی، زیبایی، ایمنی و شرایط زیست محیطی در عمق زمین دفن می‌شوند. آسیب‌پذیری لوله‌های مدفون در برابر بارهای زلزله، بارهای ناشی از عبور وسایل نقلیه، بارهای ناشی از خاکبرداری در اطراف لوله‌ها (برخورد جام بیل مکانیکی و لودر) و همچنین در برابر اثرات مواد شیمیایی موجود در خاک، مبین ضرورت بررسی راهکارهایی جهت حفظ ایمنی و عملکرد آن‌ها است. از این‌رو به منظور حفاظت و کاهش خسارات وارد بر لوله‌ها، تحقیقات متعددی در خصوص امکان کاهش میزان تنش انتقالی از سطح خاک بر روی لوله، کاهش نشست سطح خاک و تغییرشکل لوله و شناخت بهتر از اندرکنش خاک با لوله، نحوه تغییرشکل لوله و مدهای گسیختگی آن، انجام شده‌است.

امروزه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها جهت تسلیح توده خاک روی لوله‌ها در حال توسعه است. بهره‌گیری مناسب از قوس‌زدگی<sup>۱</sup> ترانشه روی

<sup>[۱۲]</sup>، بستر راه و راه آهن<sup>[۱۳]</sup> یا در سازه‌های خاکی تحت بارهای زلزله یا بارهای سیکلی نظیر بار ترافیک<sup>[۱۴-۱۷]</sup> مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. از ویژگی‌های خاص این سیستم قابلیت همسانی با بافت موجود و مقاومت در برابر تنش‌های ناشی از زلزله و برقراری توازن و تعادل در انواع خاک بدون به‌کارگیری مواد و مصالح سخت، خاص و پرهزینه نظیر فولاد، بتن و آسفالت است. علی‌رغم عدم استفاده از کیسه‌های خاک در گذشته در ساخت سازه‌های دائم به دلیل فسادپذیری مصالح کیسه، با توسعه محصولات پلیمری و فسادناپذیری آن‌ها، امروزه استفاده از آن‌ها در پروژه‌های مختلف اعم از موقت یا دائم به سهولت میسر شده است.

ماتسوکا و لیو<sup>[۱۸]</sup> (۲۰۰۳) در مطالعات خود روی کاربرد کیسه‌های خاک به عنوان مسلح‌کننده، فواید استفاده از سیستم کیسه خاک را به شرح زیر بیان نمودند:

- ✓ افزایش ۵ الی ۱۰ برابری ظرفیت باربری زمین‌های نرم
- ✓ سهولت در ساخت بدون نیاز به ماشین آلات خاص
- ✓ دوست‌دار محیط زیست
- ✓ امکان استفاده از ضایعات مصالحی نظیر بتن، آسفالت، خرده چوب، خرده لاستیک و ... به عنوان مصالح پرکننده کیسه
- ✓ مقاومت فشاری تا ۳ مگاپاسکال (حدود ۰/۱ مقاومت فشاری بتن معمولی) بسته به جنس کیسه
- ✓ کاهش ارتعاش ناشی از ترافیک یا ماشین به دلیل جذب ارتعاش توسط کیسه‌های خاک
- ✓ جلوگیری از انبساط ناشی از یخ‌زدگی در صورت استفاده از مصالح دانه‌ای درشت

ژانگ و همکاران<sup>[۱۹]</sup> (۲۰۲۳) و ونگ و همکاران<sup>[۲۰]</sup> (۲۰۱۹) با بررسی تاثیر کیسه‌های خاک بر ظرفیت باربری پی مستقر روی خاک نرم به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری بستر مسلح با کیسه‌های خاک در مقایسه با بستر غیرمسلح از افزایش مناسبی برخوردار است، به طوری که کیسه‌های خاک سبب افزایش مدول الاستیسیته بستر و کاهش انتقال فشار در عمق می‌شود.

لیو و همکاران<sup>[۲۱]</sup> (۲۰۲۰) با انجام تعدادی آزمایش بارگذاری قائم تکراری به بررسی امکان استفاده از کیسه‌های خاک جهت تسلیح بستر روسازی در مقابل بارهای ناشی از ترافیک پرداختند. آن‌ها عملکرد مناسب کیسه‌های خاک در کاهش نشست و افزایش مدول الاستیسیته بستر راه تحت بارهای تکراری و همچنین افزایش میزان میرایی شتاب در عمق بستر مسلح با کیسه خاک نسبت به بستر

غیرمسلح گزارش نمودند. کاستیگلیا و همکاران<sup>[۲۲]</sup> (۲۰۲۱)، عملکرد مناسب کیسه‌های خاک جهت جلوگیری از بالا آمدن لوله حین وقوع زلزله را بدون در نظر گرفتن تاثیر آن بر تغییر شکل لوله گزارش نمودند.

اگرچه محققین پیشین تاثیر کیسه‌های خاک بر بهبود باربری سازه‌های خاکی نظیر بستر راه، راه‌آهن و پی‌ها<sup>[۱۳-۱۷]</sup>، عملکرد کیسه‌های شن جهت جلوگیری از بالا آمدن لوله حین وقوع زلزله را بدون در نظر گرفتن تاثیر آن بر تغییر شکل لوله<sup>[۲۳]</sup> یا تاثیر تسلیح ترانسه حاوی لوله مدفون با ژئوسنتتیک‌ها (ژئوتکستایل، ژئوگرید و ژئوسل) را بر بهبود عملکرد لوله‌های مدفون<sup>[۹-۱۱]</sup> بررسی نموده‌اند، اما تاکنون اثر تسلیح با کیسه خاک بر رفتار ترانسه مسلح حاوی لوله مدفون به منظور کنترل تغییر شکل لوله و نشست سطح بستر بررسی نشده است. از این رو در این پژوهش با توجه به اهمیت ایمنی لوله‌های مدفون، سهولت اجرای کیسه خاک و عملکرد مناسب آن بر بهبود رفتار بستر<sup>[۲۳-۲۴]</sup>، بررسی آزمایشگاهی عملکرد کیسه خاک به عنوان یک مسلح‌کننده سه بعدی زیر سطح بارگذاری (در بالای لوله) بر بهبود رفتار بستر و لوله مدفون از حیث کنترل تغییر شکل لوله و نشست سطح بستر توسط یک مدل فیزیکی مدنظر است. در این آزمایش‌ها اثر عوامل زیر بررسی می‌گردد:

- استفاده از لایه کیسه خاک
- عمق مدفون لوله در ترانسه غیرمسلح و مسلح با کیسه
- عمق مدفون قرارگیری کیسه خاک
- چینش کیسه‌های خاک (چینش ستونی با و بدون فاصله و چینش پلکانی)

با توجه به سهولت ساخت کیسه خاک و اجرای آن در ترانسه حاوی لوله مدفون، این روش تسلیح می‌تواند ضمن ارائه یک روش مناسب در اجراء، امکان ایمنی لوله‌های مدفون را فراهم کند.

## ۲. مصالح مصرفی

### ۲.۱. خاک

خاک مورد استفاده در داخل ترانسه (در اطراف و بالای لوله) و داخل کیسه‌های خاک مطابق سیستم طبقه‌بندی یکنواخت<sup>۳</sup> ASTM D۱۱-۲۴۸۷<sup>[۲۳]</sup> از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده (SW<sup>۴</sup>) و دارای توزیع اندازه ذرات مطابق شکل ۱ است. حداکثر اندازه دانه‌های این خاک ۹/۵ میلی‌متر و متوسط اندازه ذرات آن ۲/۲۲ میلی‌متر است. لازم به ذکر است که اندازه دانه‌های این خاک معیار

نتیجه رسیدند که محدوده‌ی تاثیر تنش در امتداد طول لوله برابر عرض بار به علاوه‌ی ۱/۵ برابر عمق مدفون لوله است. لذا با توجه به بیشینه‌ی عمق مدفون در این پژوهش برابر ۲D و قطر صفحه‌ی بارگذاری برابر ۱۵۰ میلی‌متر، محدوده‌ی تاثیر تنش در امتداد طول لوله حدود ۶۳۰ میلی‌متر است. لذا جهت عدم تاثیر شرایط انتهایی و طول لوله بر فشارها و کرنش‌های جانبی و همچنین با توجه به ابعاد مدل فیزیکی موجود، از لوله به طول ۶۸۰ میلی‌متر استفاده گردید.

### ۳.۲. کیسه

جهت تولید کیسه خاک از ژئوتکستایل از جنس پلی‌پروپیلن<sup>۶</sup> با مشخصات مورد نظر در جدول ۱ استفاده گردید. کیسه‌ها با استفاده از ماشین خیاطی دوخته شدند، به طوری که ابتدا سه وجه آن با ماشین و پس از پر کردن کیسه از خاک، وجه چهارم آن به صورت دستی با سوزن و نخ دوخته شد. ابعاد کیسه‌های خاک در تمامی آزمایش‌ها در طول و عرض به ترتیب ۶۸۰ (معادل طول لوله) و ۳۰۰ میلی‌متر و در ضخامت (ارتفاع) حدود ۸۰ میلی‌متر با وزن مخصوص  $0.19 \pm 1$  کیلونیوتن بر متر مکعب، پس از تراکم خاک داخل کیسه است.

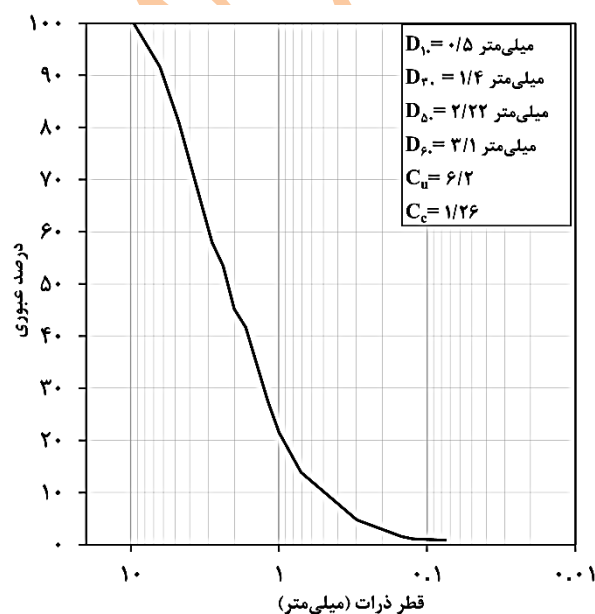
جدول ۱: خصوصیات ژئوتکستایل مورد استفاده در تولید کیسه خاک

واحد	مقدار	پارامتر
kN/m	۱۳	مقاومت کششی در جهت ماشین، MD
kN/m	۱۰	مقاومت کششی در جهت مقابل ماشین، CD
g/m <sup>۲</sup>	۱۳۸	وزن واحد سطح
mm	۰/۸	ضخامت

### ۱.۳. دستگاه آزمایش

این دستگاه شامل سه قسمت اصلی سیستم بارگذاری، سیستم ثبت و قرائت اطلاعات و جعبه آزمایش (ترانشه) است. سیستم بارگذاری شامل یک سیلندر هیدرولیک، مخزن روغن و بخش کنترل‌کننده با قابلیت اعمال بار تا حدود ۱۰ کیلونیوتن است. میزان دقیق بار وارد بر صفحه بارگذاری حین آزمایش، توسط سلول بار اندازه‌گیری می‌شود.

موردنظر در استاندارد ASTM D۲۳۲۱-۱۴<sup>[۲۴]</sup> مبنی بر محدود نمودن اندازه بزرگترین دانه خاک بر روی لوله به ۳۸ میلی‌متر را از اساس آزمایش تراکم اصلاح شده بر اساس استاندارد ASTM D۱۲-۱۵۵۷<sup>[۲۵]</sup> بیشینه وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه این خاک به ترتیب ۱۹/۶۴ کیلونیوتن بر متر مکعب و ۹/۵ درصد هستند. توده ویژه خاک در آزمایشگاه بر اساس استاندارد ASTM D۸۵۴-۱۴<sup>[۲۶]</sup>، برابر ۲/۶۵ و زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی آن با استفاده از آزمایش فشاری سه محوری بر روی نمونه‌هایی با وزن مخصوص مرطوب ۱۸/۵ کیلونیوتن بر متر مکعب و رطوبت ۵ درصد به ترتیب برابر ۳۵ درجه و ۱۱ کیلوپاسکال به دست آمدند. لازم به ذکر است در تمامی آزمایش‌ها ترانشه مورد نظر با مقادیر وزن مخصوص و درصد رطوبت مذکور (درصد تراکم ۹۰ درصد) آماده شدند.



شکل ۱: توزیع اندازه ذرت خاک ترانشه و داخل کیسه خاک

### ۲.۲. لوله

لوله‌های از جنس پلی‌وینیل کلراید<sup>۵</sup> با قطر در محدوده ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر غالباً برای کاربردهای زهکشی و فاضلاب استفاده می‌شوند.

از آن جا که مطابق با آیین نامه ۹۱۱۸-ISIRI<sup>[۲۷]</sup>، لوله با نسبت قطر لوله به ضخامت دیواره برابر ۵۰ جهت استفاده در پروژه‌های انتقال فاضلاب مناسب است، لذا در این پژوهش از لوله در مقیاس واقعی به قطر خارجی ۱۶۰ میلی‌متر، ضخامت ۳/۲ میلی‌متر و مقاومت ۴ اتمسفر استفاده گردید. توکلی مهرجردی و همکاران (۲۰۱۵)<sup>[۲۸]</sup> در مطالعاتشان روی رفتار لوله‌های مدفون به این

سیستم قرائت و ثبت اطلاعات با استفاده از یک واحد قرائت و ثبت داده‌ها، قابل کنترل به وسیله یک پردازش‌گر داخلی، جریان‌های خروجی از حس‌گرهای مختلف را دریافت می‌کند. میزان نشست سطح بستر توسط حس‌گر اندازه‌گیری نشست (حس‌گر با ظرفیت ۵۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ درصد حداکثر ظرفیت خود) و تغییر در قطر قائم لوله توسط حس‌گر اندازه‌گیری نشست (حس‌گر با ظرفیت ۲۵ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ درصد حداکثر ظرفیت خود)، میزان بار قائم وارد بر صفحه بارگذاری به وسیله یک سلول اندازه‌گیری بار (سلول بار با ظرفیت ۱۰ کیلونیوتن و دقت ۰/۰۱ درصد حداکثر ظرفیت خود) و فشار قائم وارد بر تاج لوله با استفاده از فشارسنج (فشارسنج با ظرفیت یک مگاپاسکال و دقت اندازه‌گیری تا ۰/۱ کیلوپاسکال) به طور مستقیم اندازه‌گیری شدند.

با در نظر گرفتن قطر لوله (D) بر حسب میلی‌متر، حداقل عرض ترانشه (W) بر حسب میلی‌متر توسط استاندارد ASTM D14-2321<sup>[۲۴]</sup> و آیین‌نامه BS ۱۹۸۰-۵۹۵۵<sup>[۲۹]</sup> به ترتیب  $D+300$  و  $1/25D+300$  پیشنهاد می‌شود. همچنین (۲۰۱۰) AASHTO<sup>[۳۰]</sup> نیز حداقل عرض ترانشه را بر حسب میلی‌متر، حداکثر حاصل از دو مقدار  $D+305$  و  $D+406$  توصیه می‌کند.

از این‌رو با توجه به طول و قطر لوله به ترتیب ۶۸۰ و ۱۶۰ میلی‌متر و به منظور ارضاء حداقل عرض موردنظر آیین‌نامه‌های مذکور، ترانشه آزمایش به طول و عرض ۷۰۰ میلی‌متر و ارتفاع متغیر با توجه به عمق مدفون لوله انتخاب گردید. با توجه به توصیه مقدس تفرشی و توکلی مهرجردی (۲۰۰۸)<sup>[۳۱]</sup> مبنی بر عمق مدفون  $2D$  به عنوان عمق مدفون بهینه قرارگیری لوله در ترانشه مسلح با ژئوگرید، در این پژوهش، حداکثر عمق مدفون لوله در آزمایش‌ها برابر  $2D$  لحاظ گردید. ترانشه آزمایش در یک جعبه با اسکلت فولادی با چهار وجه جانبی سبک (جهت سهولت در جابجایی جعبه) از صفحات MDF متحرک با ضخامت ۲۰ میلی‌متر همراه با مهارهای مناسب جهت جلوگیری از هرگونه حرکت جانبی، آماده گردید. لازم به ذکر است در صورت استفاده از لوله با قطر بزرگ‌تر، مثلاً ۳۰۰ میلی‌متر، باید با توجه به ملزومات استاندارد ۱۴-ASTM D2321<sup>[۲۴]</sup> و آیین‌نامه BS ۵۹۵۵-۱۹۸۰<sup>[۲۹]</sup> حداقل عرض ترانشه تعیین گردد.

### ۲.۳. آماده سازی و روش انجام آزمایش‌ها

خاک ترانشه در کلیه آزمایش‌ها دارای دانسیته مرطوب ۱۸/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب و رطوبت حدود ۵ درصد است. جهت آماده‌سازی ترانشه، بعد از قرار دادن حسگر سنجش تغییرمکان در داخل لوله (شکل ۲)، قرار دادن لوله در کف ترانشه، نصب فشارسنج روی لوله و ثابت کردن آن (شکل ۳)، لایه‌های خاک با احتیاط در اطراف و بالای لوله به طور یکنواخت متراکم می‌گردند. با در نظر گرفتن ضخامت لایه‌های خاک معادل ۴ سانتی‌متر و با توجه به میزان دانسیته موردنظر، عمل تراکم هر لایه به وسیله کوبش با یک چکش لاستیکی به صورت ضربه‌ای و یکنواخت بر روی یک صفحه فلزی به ابعاد  $20 \times 20$  سانتی‌متر در طول ترانشه انجام می‌گردد. در صورت وجود لایه تسلیح (کیسه خاک)، پس از رسیدن به تراز موردنظر و قراردادن کیسه یا کیسه‌های خاک در آن تراز، کیسه خاک با استفاده از چکش لاستیکی جهت دستیابی به وزن مخصوص  $19/1 \pm$  کیلونیوتن بر متر مکعب متراکم می‌گردد (شکل ۴). سپس با توجه به عمق قرارگیری کیسه خاک، لایه‌های خاک روی آن تا رسیدن به سطح ترانشه متراکم می‌گردند. پس از آماده‌شدن ترانشه و قرار دادن صفحه بارگذاری صلب بر مرکز بستر و نصب حسگرهای موردنظر (حسگر اندازه‌گیری تغییرشکل سطح و اندازه‌گیری بار)، سیستم آماده بارگذاری می‌گردد.

### ۳.۳. ابعاد صفحه بارگذاری و نوع بارگذاری روی آن

از آن جا که در این پژوهش بررسی رفتار لوله مدفون در بستر مسلح با کیسه خاک تحت بار معادل ترافیک چرخ وسائط نقلیه مدنظر است، لذا ابعاد صفحه بارگذاری براساس سطح تماس چرخ وسائط نقلیه تعیین می‌گردد. با توجه به مطالعات بریتو و همکاران (۲۰۰۹)<sup>[۳۲]</sup>، صفحه بارگذاری جهت شبیه‌سازی سطح تماس چرخ وسائط نقلیه نیمه سنگین تا سنگین به صورت دایره‌ای با قطر بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و تنش ناشی از بار چرخ وسائط نقلیه نیمه سنگین و سنگین به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال توصیه می‌گردد. استاندارد ASTM D1195-09<sup>[۳۳]</sup> انجام آزمایش بارگذاری صفحه تحت بار تکراری و استاندارد ASTM 1196-12<sup>[۳۴]</sup> انجام آزمایش بارگذاری صفحه تحت بار غیرتکراری استاتیکی را جهت ارزیابی رفتار و طراحی بستر انعطاف‌پذیر راه و فرودگاه پیشنهاد می‌کنند. در مطالعه حاضر، با توجه به محدودیت در سیستم بارگذاری جهت اعمال بار تکراری (سیکلی)، بر اساس توصیه استاندارد ASTM D1196-12<sup>[۳۴]</sup> بار استاتیکی (غیرسیکلی) - استاتیکی) بر صفحه بارگذاری اعمال گردید. لذا با توجه به موارد فوق در تمامی آزمایش‌ها به منظور شبیه‌سازی و اعمال تنش ناشی از بار چرخ وسائط نقلیه نیمه‌سنگین، بار استاتیکی (غیرسیکلی) روی





شکل ۳: تصویری از لوله حین آماده‌سازی آزمایش



شکل ۴: تصویری از کیسه خاک در ترانشه و خاک اطراف حین آماده‌سازی ترانشه

#### ۴. برنامه آزمایش‌ها

برنامه آزمایش‌ها جهت بررسی عوامل موثر بر ترانشه حاوی لوله با توجه به امکانات موجود تنظیم گردید. به منظور بررسی این عوامل، تعداد ۱۲ آزمایش مستقل مطابق جدول ۲ انجام گردید. آزمایش‌های سری اول روی لوله مدفون در ترانشه غیر مسلح واقع در سه عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  (شکل ۵ الف)، آزمایش‌های سری دوم روی لوله مدفون در عمق  $2D$  در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک در عمق ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر (شکل ۵ ب)، آزمایش‌های سری سوم روی لوله مدفون واقع در سه عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک در عمق ۲۵ میلی‌متر (شکل ۵ ب)، آزمایش‌های سری چهارم روی لوله مدفون در عمق  $2D$  مسلح با دو لایه کیسه خاک با چینش ستونی با فاصله و بدون فاصله (شکل ۵ ج) و آزمایش سری پنجم روی لوله در عمق مدفون

صفحه بارگذاری به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر با سرعت ۱/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه تا رسیدن به میزان تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال ادامه یافت. از آن جا که در مدل آزمایش، هدف رسیدن به حالت گسیختگی در توده خاک زیر صفحه بارگذاری و تعیین ظرفیت باربری نهایی آن مشابه یک پی نیست، لذا در غالب آزمایش‌ها، به منظور بررسی و ارزیابی تغییر شکل لوله و نشست سطح ترانشه، تنش وارد بر صفحه بارگذاری (به عنوان سطح تماس چرخ وسیله نقلیه نیمه سنگین با سطح ترانشه) به مقدار ۴۰۰ کیلوپاسکال (در بعضی آزمایش‌ها تا ۵۵۰ کیلوپاسکال) محدود گردید. همچنین با توجه به محدوده ابعاد صفحه بارگذاری و قطر لوله مورد بررسی (حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر، عرض کیسه خاک دو برابر صفحه بارگذاری (۳۰۰ میلی‌متر برای صفحه به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ۶۰۰ میلی‌متر برای صفحه به قطر ۳۰۰ میلی‌متر) خواهد بود.

لازم به ذکر است که سیاه و مائو (۲۰۰۵)<sup>[۳۵]</sup> در خصوص بررسی اثر میزان سطح تماس چرخ ماشین با بستر زیر خود، قطر صفحه‌ی بارگذاری با اندازه‌ی بزرگ‌تر از ۱۵ برابر اندازه‌ی متوسط دانه‌های خاک ( $D_{50}$ ) را جهت عدم تاثیر قابل توجه در نشست صفحه‌ی بارگذاری توصیه نمودند، که با توجه به متوسط اندازه ذرات برابر ۲/۲۲ میلی‌متر، استفاده از صفحه بارگذاری به قطر ۱۵۰ میلی‌متر مناسب است.

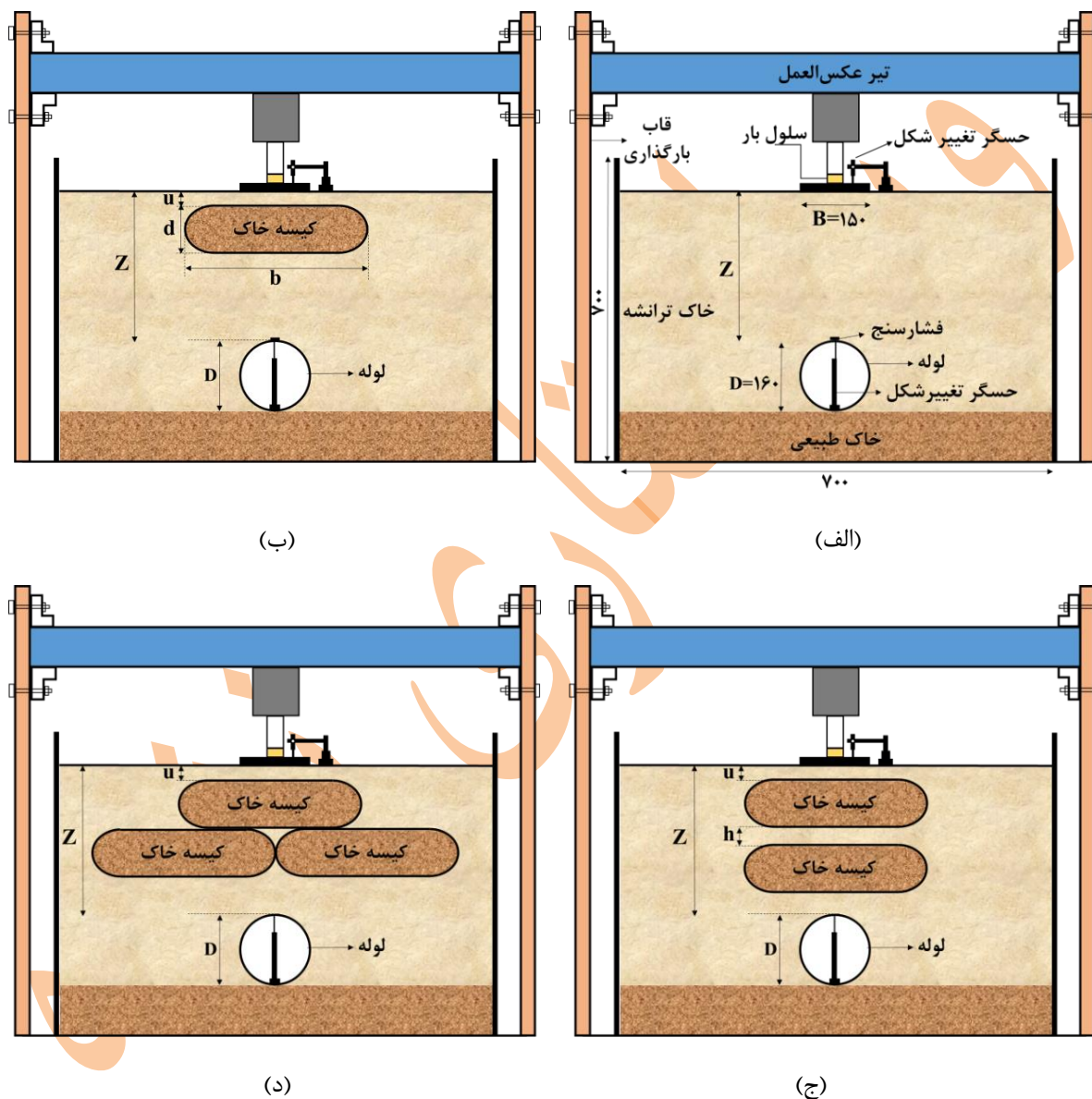


شکل ۲: تصویری از حسگر سنجش تغییر مکان و نصب آن داخل لوله

۲D مسلح با دو لایه کیسه خاک با چینش پلکانی (شکل ۵ د) انجام گردیدند.

از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرار پذیری نتایج به منظور حصول اطمینان از عملکرد مناسب سیستم و دقت در اندازه‌گیری پارامترها (تنش وارد بر صفحه بارگذاری، فشار روی

لوله، تغییرشکل صفحه بارگذاری و تاج لوله) است. بدین منظور تعداد ۸ آزمایش تکراری، جهت کنترل صحت آزمایش‌ها و تکرارپذیری آنها صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های تکراری شده در مقایسه با یکدیگر اختلافی کم‌تر از ۴ درصد را نشان می‌دهند، که این مقدار در محدوده مطالعات ژئوتکنیکی مورد قبول است.



شکل ۵: طرح شماتیک آزمایش‌های سری الف) اول ب) دوم و سوم ج) چهارم د) پنجم (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

جدول ۲: برنامه و مشخصات آزمایش‌ها روی لوله مدفون در ترانسه غیرمسلح و مسلح با کیسه خاک

سری آزمایش	نوع آزمایش	نسبت عمق مدفون لوله (Z) به قطر آن (D)	پوشش خاک روی کیسه خاک u (mm)	تعداد لایه کیسه خاک N	فاصله دو لایه کیسه خاک (mm) h	تعداد آزمایش
۱	غیرمسلح (خاک تنها)	۱، ۱/۵ و ۲	-----	----	----	۲+۳*
۲	مسلح با کیسه خاک	۲	۲۴۰ و ۱۶۰، ۸۰، ۲۵	۱	----	۲+۴*
۳	مسلح با کیسه خاک	۱، ۱/۵ و ۲	۲۵	۱	----	۲+۲*
۴	مسلح با دو لایه کیسه خاک ستونی	۲	۲۵	۲	۵۵ و ۰	۱+۲*
۵	مسلح با دو لایه کیسه خاک پلکانی	۲	۲۵	۲	۰	۱+۱*

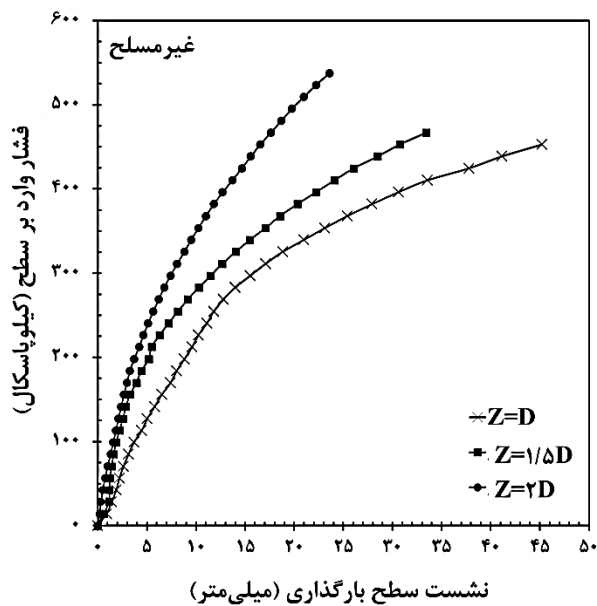
\*آزمایش‌های تکراری

## ۵. نتایج و بحث

کاهش یافته است. علت این امر دور شدن لوله از سطح بستر یا به عبارتی دور شدن از حوزه تاثیر تنش‌های وارد بر سطح بستر است.

به منظور بررسی رفتار لوله مدفون و درک بهتر از اثر کیسه خاک بر رفتار سیستم مرکب خاک-کیسه خاک-لوله، نتایج آزمایش‌ها ارائه و تحلیل می‌گردند. از آنجا که معیار اصلی در ایمنی لوله‌های انعطاف‌پذیر، کنترل میزان تغییرشکل آن است، لذا میزان کرنش قطر قائم لوله به عنوان معیار اصلی از رفتار سیستم مدنظر است. (AASHTO<sup>[۳۰]</sup> ۲۰۱۰) میزان مجاز کرنش قطر قائم لوله‌های انعطاف‌پذیر را جهت جلوگیری از ایجاد پدیده کمانش در آن‌ها به ۵ درصد و آیین‌نامه لوله‌های PVC<sup>[۳۶]</sup>، برای عدم بروز هرگونه آسیب در بدنه لوله، میزان آن را به ۲ درصد محدود می‌نماید. همچنین جهت دوام و عمر بیش‌تر لوله‌ها و همچنین کاهش هزینه نگهداری و ترمیم آن‌ها، توصیه به محدود نمودن کرنش قطر لوله به مقادیر هر چه کم‌تر از ۲ درصد شده است<sup>[۳ و ۸]</sup>.

### ۱.۵ اثر عمق مدفون لوله در ترانسه غیرمسلح



شکل ۶: تغییرات نشست سطح بارگذاری با فشار وارد بر سطح ترانسه غیرمسلح برای لوله مدفون در سه عمق D، ۱/۵D و ۲D

شکل ۷ تغییرات کرنش قائم قطر لوله (نسبت تغییر در قطر قائم لوله به قطر لوله بر حسب درصد) در مقابل فشار وارد بر سطح را برای لوله مدفون در سه عمق مختلف در ترانسه غیرمسلح نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش عمق مدفون، میزان کرنش قائم قطر لوله به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. علت این امر کاهش

شکل ۶ تغییرات نشست سطح بارگذاری با فشار وارد بر سطح ترانسه را برای لوله مدفون در سه عمق مختلف در ترانسه غیرمسلح نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش فشار وارد بر سطح ترانسه از همان ابتدا نشست سطح بارگذاری صرف‌نظر از عمق مدفون لوله افزایش می‌یابد، اما با افزایش عمق مدفون لوله، در میزان مشخص از فشار مقدار نشست سطح خاک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، مقدار نشست از حدود ۳۱ میلی‌متر در عمق مدفون D به حدود ۱۳ میلی‌متر در عمق مدفون ۲D

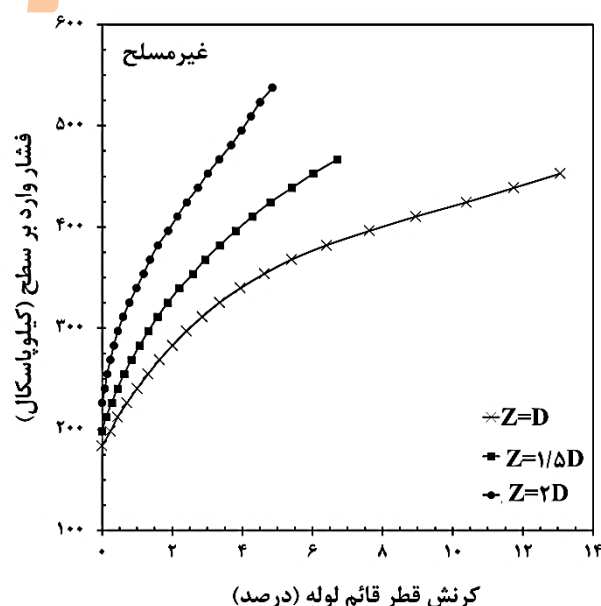
میزان تنش منتقل شده به تاج لوله، با افزایش عمق مدفون آن است [۱۸ و ۳۱]

## ۲.۵. اثر عمق مدفون کیسه خاک

همان طور که در بخش قبل ملاحظه گردید، اگرچه افزایش عمق مدفون لوله یکی از راهکارهای کاهش فشار وارد بر لوله و در نتیجه کاهش تغییرشکل آن است، لیکن این امر موجب افزایش خاکبرداری و خاکریزی مجدد ترانشه با مصالح مناسب می‌گردد. لذا جهت اجتناب از این امر و تامین ایمنی بیش‌تر لوله‌های مدفون، استفاده از تسلیح خاک روی لوله مدفون با ژئوسنتتیک‌ها نظیر ژئوگرید، ژئوتکتایل یا ژئوسل توصیه شده است [۹-۱۱]. با توجه به عملکرد مناسب کیسه خاک در بهبود باربری بستر [۱۳-۱۲]، استفاده از آن به عنوان لایه تسلیح سه بعدی و ایجاد عملکرد محدودکنندگی توده خاک محصور در خود در کاربردهای مختلف مدنظر است.

به منظور تعیین عمق مدفون مناسب کیسه خاک چهار آزمایش برای لوله مدفون در عمق ۲D در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک، واقع در اعماق ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر (شکل ۵ ب) انجام گردید. شکل ۸ تغییرات نشست سطح بستر در مقابل فشار وارد بر سطح را برای چهار عمق مدفون مذکور نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش عمق مدفون کیسه خاک، نشست سطح بارگذاری افزایش می‌یابد و منحنی تغییرات به سمت منحنی ترانشه غیرمسلح حرکت می‌کند. به طوری که در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال در حالت کیسه مدفون در عمق ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر، میزان نشست سطح به ترتیب ۶/۸، ۹/۳، ۱۰/۸ و ۱۱/۴ میلی‌متر است. با افزایش عمق مدفون کیسه خاک به علت کاهش سختی ترانشه زیر سطح بارگذاری (افزایش ضخامت لایه خاک روی کیسه خاک و دور شدن کیسه خاک از حوزه تنش حداکثر)، ناحیه نشست‌پذیر زیر سطح بارگذاری توسعه می‌یابد. بنابراین استفاده از کیسه خاک در فاصله نزدیک به سطح بارگذاری می‌تواند منجر به کنترل نشست سطح بستر گردد. به هر حال پوشش ۲۵ میلی‌متر به عنوان ضخامت مناسب خاک روی کیسه می‌تواند علاوه بر توزیع یکنواخت تنش روی کیسه خاک، نقش محافظ کیسه در برابر اشعه فرابنفش خورشید و جلوگیری از پارگی آن در برابر عبور ترافیک را ایفا می‌کند [۲۱].

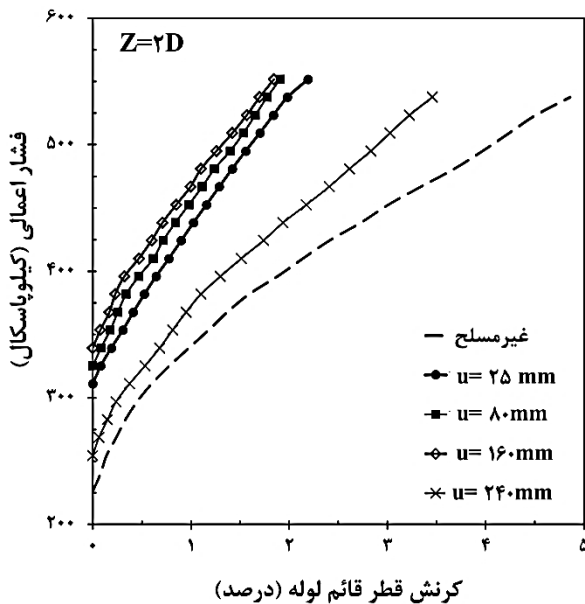
مطابق این شکل برای دو عمق مدفون D و ۱/۵D، با رسیدن فشار وارده بر سطح به حدود ۴۰۰ کیلوپاسکال، میزان کرنش قطر قائم لوله از مقادیر ۲ و حتی ۵ درصد (مقدار مجاز دو آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC<sup>[۳۶]</sup> و AASHTO<sup>[۳۰]</sup> (۲۰۱۰) تجاوز می‌کند. این امر می‌تواند سبب صدمه جدی به لوله مدفون یا حتی شکست آن گردد. همچنین با افزایش عمق مدفون لوله به میزان دو برابر قطر آن کرنش قطر قائم لوله در میزان فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح بستر به حدود ۲ درصد می‌رسد که مطابق آیین‌نامه لوله‌های PVC<sup>[۳۶]</sup> در آستانه بروز آسیب در بدنه لوله قرار گرفت. نکته قابل توجه و حائز اهمیت در شکل ۷ عدم وقوع تغییرشکل در لوله تا رسیدن میزان فشار بر سطح ترانشه به یک مقدار حداقل است. این مقدار از فشار برای لوله مدفون در عمق D، ۱/۵D و ۲D به ترتیب حدود ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوپاسکال است. به عبارت دیگر برای وقوع تغییرشکل در لوله، میزان تنش انتقال یافته بر روی لوله، باید به یک میزان حداقلی برسد. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد، علی‌رغم کاهش کرنش قطر قائم لوله با افزایش عمق مدفون لوله، همچنان مقدار آن در عمق ۲D و فشار بیشتر از ۴۰۰ کیلو پاسکال بیش از ۲ درصد است، که این امر مبین لزوم بهبود رفتار سیستم است.



شکل ۷: تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه غیرمسلح برای لوله مدفون در سه عمق D، ۱/۵D و ۲D



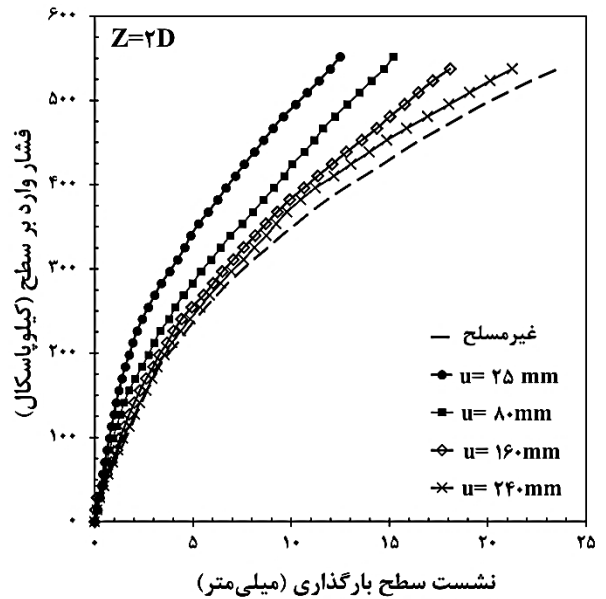
و کاهش فشار وارد بر لوله می‌گردد. بنابراین عدم قرارگیری کیسه خاک دقیقاً روی لوله و به عبارتی وجود توده خاک بین کیسه خاک و لوله ضروری است.



شکل ۹: تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح برای بستر غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه خاک در چهار عمق مدفون ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر برای لوله مدفون در عمق ۲D

شکل ۱۰: تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح را برای لوله مدفون در عمق ۲D در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک در چهار عمق مدفون ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر نشان می‌دهد. مطابق این شکل فشار روی تاج لوله با افزایش عمق مدفون کیسه خاک تا ۱۶۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد، اما با رسیدن عمق مدفون کیسه به ۲۴۰ میلی‌متر میزان آن زیاد می‌گردد. مقدار فشار روی تاج لوله در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال برای کیسه مدفون در عمق ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۴/۵، ۳/۲، ۲/۱ و ۸/۶ کیلوپاسکال است. کاهش فشار روی تاج لوله می‌تواند به علت توزیع بار در اعماق پایین‌تر توسط کیسه خاک باشد.

در مجموع مطابق شکل ۹ و شکل ۱۰، با افزایش عمق مدفون کیسه خاک به ۱۶۰ میلی‌متر، میزان تغییر شکل لوله و فشار روی آن از کاهش مناسبی برخوردار است. این امر می‌تواند به علت توزیع فشار روی لوله ناشی از کیسه خاک باشد. به عبارت دیگر وجود کیسه خاک در نزدیکی لوله از حرکت توده خاک و اعمال تنش زیاد بر لوله جلوگیری می‌کند، بنابراین قرارگیری کیسه خاک در نزدیکی لوله مدفون می‌تواند در کنترل تغییر شکل لوله و در نتیجه کاهش صدمه و آسیب به آن موثر باشد. لیکن قرارگیری مستقیم کیسه

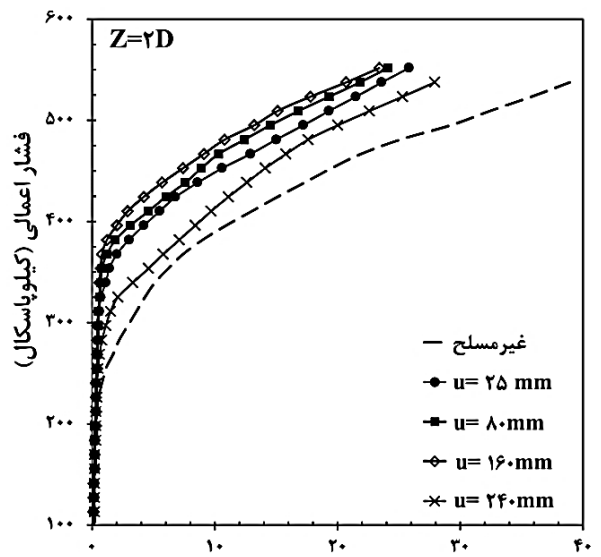


شکل ۸: تغییرات نشست سطح بستر با فشار وارد بر سطح ترانشه برای بستر غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه خاک در چهار عمق مدفون ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر و لوله مدفون در عمق ۲D

شکل ۹: تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح را برای لوله مدفون در عمق ۲D در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک در چهار عمق مدفون ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش عمق مدفون کیسه خاک تا ۱۶۰ میلی‌متر، کرنش قطر قائم لوله کاهش می‌یابد. اما با قرارگیری کیسه خاک در عمق ۲۴۰ میلی‌متر (دقیقاً روی لوله) میزان آن افزایش قابل توجهی می‌یابد. به عنوان مثال در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال در حالت کیسه مدفون در عمق ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر، میزان کرنش قطر قائم لوله به ترتیب ۰/۱۵۲، ۰/۱۳۶ و ۱/۳۵ درصد است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد استفاده از کیسه خاک به عنوان لایه تسلیح در اعماق مختلف ۲۵ تا ۱۶۰ میلی‌متر سبب کنترل تغییر شکل قطر قائم لوله به کم‌تر از مقدار مجاز جهت بروز هرگونه آسیب در بدنه لوله (۲ درصد) در آیین‌نامه لوله‌های PVC<sup>[۳۶]</sup> می‌گردد.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد قرارگیری کیسه خاک دقیقاً روی لوله (میلی‌متر  $u=240$ ) موجب بروز تغییر شکل قابل توجه در لوله می‌گردد، به طوری که در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال میزان کرنش قطر قائم لوله به ۱/۳ درصد می‌رسد که این میزان در مقایسه با حالت‌های دیگر قرارگیری کیسه خاک در عمق‌های کمتر بیش‌تر است. این امر می‌تواند به علت وقوع برش سوراخ‌کننده در توده خاک روی کیسه و اعمال مستقیم فشار به لوله از طریق کیسه باشد. به عبارتی قرارگیری مستقیم کیسه خاک روی لوله، مانع از توزیع مناسب بار

خاک روی لوله و بدون وجود لایه خاک بین آن‌ها سبب افزایش فشار به لوله می‌گردد.



فشار روی تاج لوله (کیلوپاسکال)

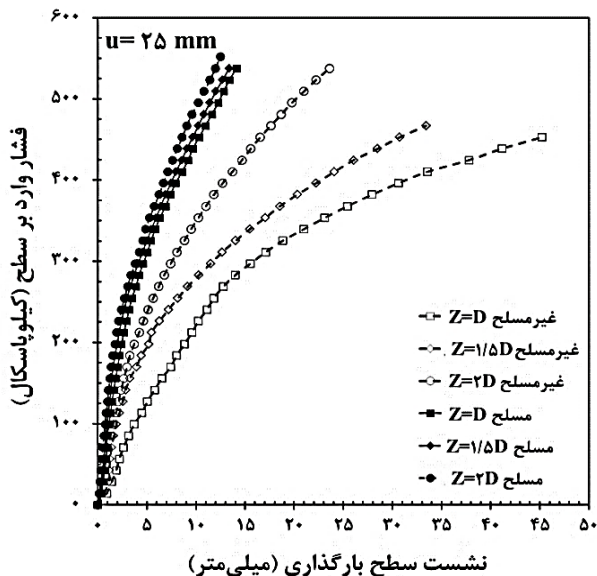
شکل ۱۰: تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح برای بستر غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه خاک در چهار عمق مدفون ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر برای لوله مدفون در عمق ۲D

با توجه به این که قرارگیری کیسه خاک در اعماق نزدیک به لوله سبب افزایش نشست سطح به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌گردد، بنابراین استفاده از حداقل پوشش خاک روی کیسه خاک علاوه بر محافظت از آن، نقش مهمی در کنترل نشست سطح و تغییر شکل لوله دارد. بنابراین در آزمایش‌های آتی عمق مدفون کیسه خاک برابر ۲۵ میلی‌متر (میلی‌متر  $u=25$ ) در نظر گرفته شده است. همچنین وجود کیسه خاک در نزدیکی لوله (در این مطالعات قرارگیری در عمق ۱۶۰ میلی‌متر) تاثیر مناسبی بر کاهش تغییر شکل لوله دارد. لذا استفاده از دو لایه کیسه خاک یکی در نزدیکی سطح ترانشه جهت کنترل نشست سطح و دیگری در نزدیکی لوله جهت کنترل تغییر شکل لوله می‌تواند مفید باشند.

### ۳.۵. اثر عمق مدفون لوله در ترانشه مسلح با کیسه خاک

به منظور بررسی اثر عمق مدفون لوله در ترانشه مسلح، سه آزمایش (شکل ۵ ب) روی لوله مدفون در اعماق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک واقع در عمق ۲۵ میلی‌متر از سطح بارگذاری (سطح ترانشه) انجام گردید. شکل ۱۱ تغییرات نشست سطح بستر در مقابل فشار وارد بر سطح را برای لوله مدفون در سه عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  در دو حالت ترانشه غیرمسلح و مسلح با کیسه خاک نشان می‌دهد. مطابق این شکل تحت فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح بستر، استفاده از لایه کیسه خاک، موجب کاهش کرنش قطر قائم لوله به ترتیب

مدفون لوله، استفاده از لایه کیسه خاک سبب کاهش قابل توجه در میزان نشست سطح بستر نسبت به حالت غیرمسلح می‌گردد. در واقع کیسه خاک با محصور نمودن خاک داخل خود و کاهش تنش در عمق، از نشست لایه‌های فوقانی خاک و در نتیجه حرکت توده خاک بالای لوله جلوگیری می‌نماید. مطابق شکل ۱۱، میزان کاهش در نشست در مقایسه با حالت غیرمسلح در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح برای لوله مدفون در عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  حدود ۷۴ درصد، ۶۶ درصد و ۴۷ درصد است. این مقادیر کاهش مبین آن است که با افزایش عمق مدفون لوله، علی‌رغم بهبود در رفتار سیستم، تاثیر تسلیح با کیسه خاک (نسبت به ترانشه غیرمسلح)، کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌گردد که افزایش عمق مدفون لوله، در کاهش میزان نشست سطح بستر در حالت ترانشه مسلح در مقایسه با ترانشه غیرمسلح محسوس نیست. لازم به ذکر است که انتظار می‌رود با افزایش تراز فشار وارد بر سطح، عمق مدفون لوله در ترانشه مسلح تاثیر گذارتر گردد. به عبارتی می‌توان گفت با وجود لایه کیسه خاک، برای رسیدن به یک میزان نشست مشخص از سطح بستر، امکان قرار دادن لوله در عمق مدفون کم‌تر وجود دارد که این امر نیازمند بررسی بیشتر است.



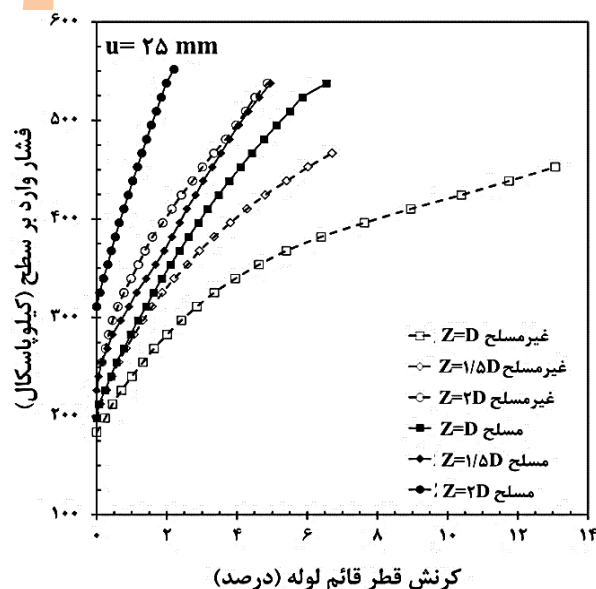
شکل ۱۱: تغییرات نشست سطح بستر با فشار وارد بر سطح ترانشه در حالت غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه خاک برای لوله مدفون در سه عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$

شکل ۱۲ تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه را برای لوله واقع در سه عمق مدفون  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  در دو حالت ترانشه غیرمسلح و مسلح با کیسه خاک نشان می‌دهد. مطابق این شکل تحت فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح بستر، استفاده از لایه کیسه خاک، موجب کاهش کرنش قطر قائم لوله به ترتیب

شکل ۱۳ تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه را برای لوله واقع در سه عمق مدفون  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  در دو حالت ترانشه غیرمسلح و مسلح مقایسه می‌کند. مقادیر فشار برای ترانشه غیرمسلح روی تاج لوله در تراز فشار وارد بر سطح  $400$  کیلوپاسکال برای لوله مدفون در سه عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  به ترتیب حدود  $74$ ،  $34$  و  $11$  کیلوپاسکال هستند. با استفاده از رابطه بوسینسک<sup>[۳۷]</sup> تنش قائم در زیر مرکز یک سطح بارگذاری دایره‌ای، مقدار فشار در عمق موردنظر (روی لوله) در حالت فشار وارد بر سطح  $450$  کیلوپاسکال در سه عمق مدفون  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  به ترتیب حدود  $103$ ،  $52$  و  $30$  کیلوپاسکال محاسبه می‌گردد. همان طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر فشار اندازه‌گیری شده از آزمایش به ترتیب برای سه عمق مدفون  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  برابر  $0/72$ ،  $0/65$  و  $0/36$  فشار حاصل از رابطه بوسینسک هستند. کاهش فشار روی لوله در مقایسه با فشار حاصل از رابطه بوسینسک با افزایش عمق مدفون لوله را می‌توان به وجود لوله، وقوع پدیده قوس‌زدگی به علت تغییر شکل لوله و نشست توده خاک روی آن و رفتار پلاستیک خاک تحت بارهای وارده (برخلاف فرض رفتار الاستیک در روش بوسینسک) نسبت داد.

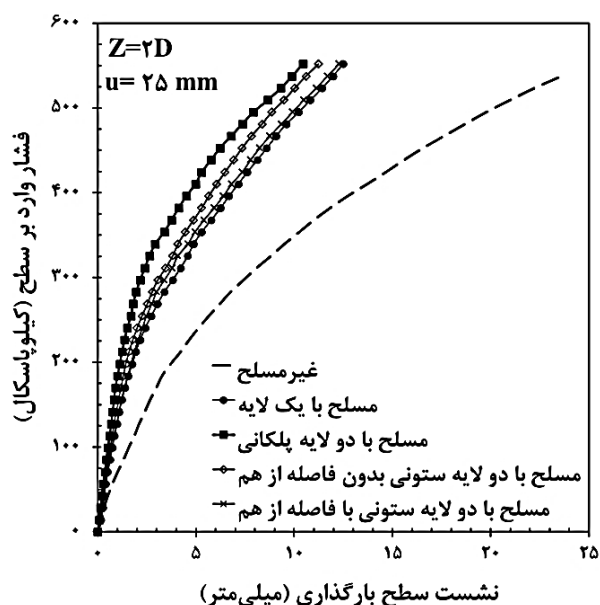
در حالت وجود یک لایه کیسه خاک، فشار وارد بر لوله به میزان قابل توجهی نسبت به حالت غیرمسلح کاهش می‌یابد. در فشار وارد بر سطح  $400$  کیلوپاسکال، برای لوله واقع در عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  بر سطح این میزان کاهش به ترتیب حدود  $46$ ،  $14$  و  $7$  کیلوپاسکال نسبت به حالت غیرمسلح است. علت این میزان کاهش عملکرد محدودکنندگی خاک توسط کیسه و توزیع بار در سطح وسیع‌تر است. این امر نشان می‌دهد که با افزایش عمق مدفون لوله، اگرچه همچنان کیسه خاک تاثیر قابل توجهی بر رفتار لوله دارد، اما به هر حال از نرخ تاثیر آن بر کاهش فشار کاسته می‌گردد.

حدود  $63$ ،  $38$  و  $65$  درصد نسبت به ترانشه غیرمسلح برای لوله واقع در سه عمق مدفون  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$  می‌شود. کاهش کرنش قطر قائم لوله به علت وجود لایه کیسه خاک، عملکرد محصورکنندگی آن و توزیع بار در سطح گسترده‌تر (کاهش تنش انتقالی به روی لوله) است. مقدار کرنش قطر قائم لوله در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک برای لوله در عمق مدفون  $2D$  در فشار  $400$  کیلوپاسکال برابر  $0/7$  درصد است که با توجه به آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC<sup>[۳۶]</sup> آسیمی به بدنه لوله وارد نمی‌گردد. در حالیکه این مقدار در ترانشه غیرمسلح حدود  $2$  درصد است. بنابراین می‌توان جهت جلوگیری از آسیب به لوله مدفون و ایمنی بیش‌تر آن، علاوه بر افزایش عمق مدفون لوله، از لایه کیسه خاک استفاده نمود. لازم به ذکر است بر خلاف عدم تاثیر قابل توجه عمق مدفون لوله بر نشست سطح خاک در ترانشه مسلح، عمق مدفون لوله در حالت وجود کیسه خاک بر میزان تغییر شکل لوله تاثیر قابل توجهی دارد. محققین پیشین در مطالعات خود روی رفتار لوله در ترانشه مسلح با ژئوسل (لایه تسلیح سه بعدی مشابه کیسه خاک) عملکرد مشابهی از تاثیر لایه تسلیح در کاهش تغییر شکل لوله و نشست بستر را گزارش نمودند<sup>[۴-۷]</sup>. همچنین تاثیر قابل ملاحظه کیسه خاک بر بهبود عملکرد سیستم لوله مدفون، مشابه تاثیر آن در بهبود ظرفیت باربری بستر در مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)<sup>[۱۹]</sup>، ونگ و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۲۰]</sup> و لیو و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۲۱]</sup> است.



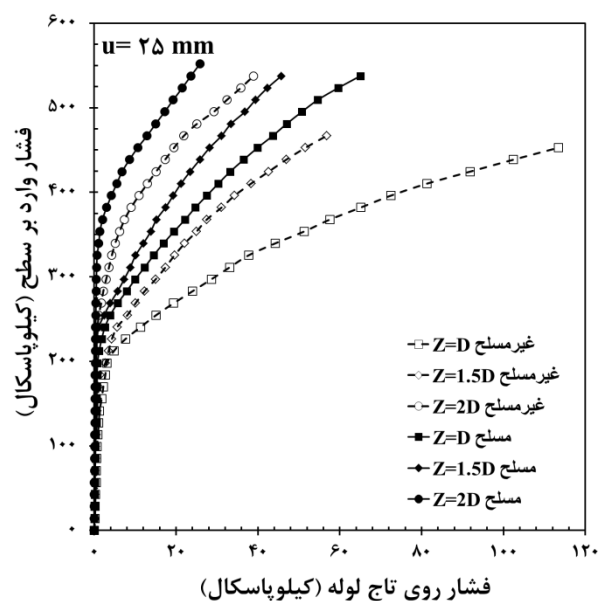
شکل ۱۲: تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه خاک برای لوله مدفون در سه عمق  $D$ ،  $1/5D$  و  $2D$

نشست در این سه حالت در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۴/۶، ۶/۵ و ۵/۷ میلی‌متر (۲۹ و ۱۹ درصد کاهش) است.



شکل ۱۴: تغییرات نشست سطح بستر با فشار وارد بر سطح ترانشه برای بستر غیرمسلح و مسلح با یک لایه و دو لایه کیسه خاک (پلکانی و ستونی) برای لوله مدفون در عمق ۲D

شکل ۱۵ تغییرات کرنش قطر قائم لوله در مقابل فشار وارد بر سطح را برای لوله واقع در عمق ۲D در ترانشه غیرمسلح و مسلح با یک و دو لایه کیسه خاک (پلکانی و ستونی) نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد لایه‌های کیسه خاک به دو لایه، مقادیر کرنش قطر قائم لوله کاهش چشمگیری می‌یابند. همچنین استفاده از دو لایه پلکانی از کیسه خاک سبب کاهش تغییرشکل لوله به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌گردد. به عنوان مثال برای دو لایه پلکانی از کیسه خاک در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، کرنش قائم لوله در حدود صفر درصد است که با افزایش فشار حتی به ۵۵۰ کیلوپاسکال، کرنش قائم لوله به حدود ۰/۷ درصد می‌رسد. این مقادیر از کرنش قطر قائم لوله بسیار پایین‌تر از مقدار مجاز آن جهت بروز هرگونه آسیب در بدنه لوله (۲ درصد) در آیین‌نامه لوله‌های PVC<sup>[۳۶]</sup> است. همانطور که ملاحظه می‌گردد قرارگیری کیسه‌های خاک به صورت ستونی سبب کاهش تغییرشکل لوله می‌گردد. در حالت مسلح با دو لایه ستونی از کیسه خاک بدون فاصله از هم در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، کرنش قائم لوله برابر ۰/۳ درصد است که با نزدیک شدن کیسه خاک به لوله (حالت ستونی با فاصله از هم) کرنش قائم لوله در این فشار به حدود ۰/۱ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اگرچه استفاده از دو لایه ستونی از



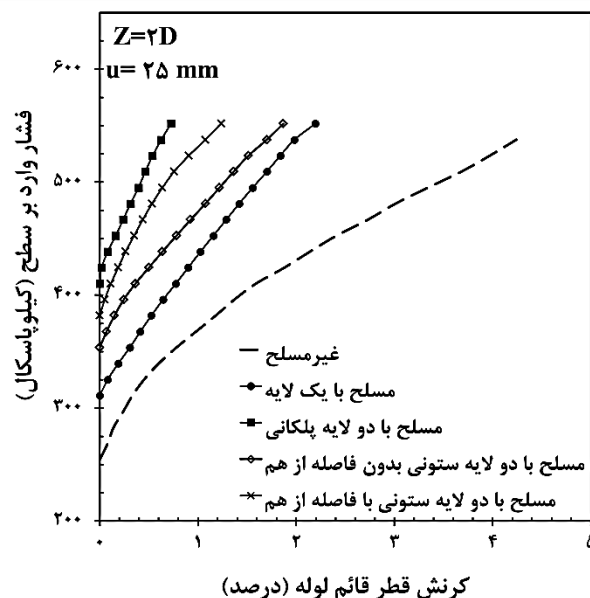
شکل ۱۳: تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه خاک برای لوله مدفون در سه عمق ۲D و ۱/۵D، D

#### ۴.۵. اثر تعداد لایه و چینش کیسه خاک بر رفتار لوله مدفون

در بخش‌های قبل اثر تنها یک کیسه خاک بر رفتار لوله و نشست سطح بستر بررسی گردید. نتایج نشان داد که قرارگیری تنها یک کیسه خاک در عمق ۲۵ میلی‌متری (میلی‌متر  $u=25$ ) موجب بروز کم‌ترین نشست در سطح بارگذاری و قرارگیری یک کیسه خاک در عمق ۱۶۰ میلی‌متری (میلی‌متر  $u=160$ ) موجب وقوع کم‌ترین تغییرشکل در لوله گردید. از این رو در این بخش اثر تعداد لایه و نحوه چینش کیسه‌های خاک روی یکدیگر به صورت ستونی و پلکانی بررسی گردید (شکل ۵ ج و ۵ د). در خصوص دو لایه کیسه خاک ستونی با فاصله از هم یک کیسه خاک در عمق ۲۵ میلی‌متری (میلی‌متر  $u=25$ ) و کیسه خاک دیگر در عمق ۱۶۰ میلی‌متری (میلی‌متر  $u=160$ ) قرار گرفت. شکل ۱۴ تغییرات نشست سطح در مقابل فشار وارد بر سطح را برای لوله مدفون در عمق ۲D واقع در ترانشه غیرمسلح و مسلح با یک لایه و دو لایه کیسه خاک با چینش ستونی با فاصله و بدون فاصله قائم و چینش پلکانی نشان می‌دهد. مطابق این شکل ملاحظه می‌گردد که استفاده از دو لایه کیسه خاک با چینش ستونی و بدون فاصله از هم در مقایسه با چینش ستونی با فاصله از هم و همچنین یک لایه کیسه خاک عملکرد بهتری در کاهش نشست سطح دارد. استفاده از چینش پلکانی دو لایه در مقایسه با چینش دو لایه ستونی با فاصله و بدون فاصله از هم عملکرد مناسب‌تری در کاهش نشست برخوردار است. به طوری که



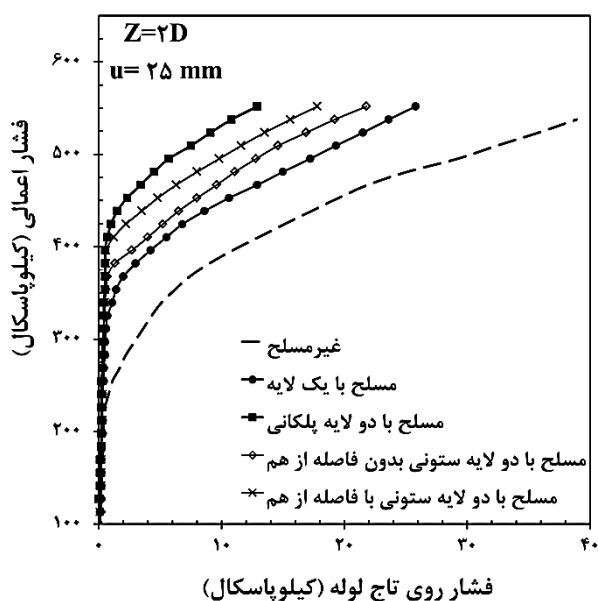
کیسه خاک با فاصله از هم در مقایسه با یک لایه کیسه خاک تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نشست بستر ندارد، لیکن تاثیر زیادی بر کاهش تغییرشکل لوله دارد. علت این امر عملکرد کیسه نزدیک به لوله در توزیع بار در سطح گسترده‌تر و در نتیجه کاهش تراز تنش وارد بر تاج لوله است.



شکل ۱۵: تغییرات کرش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح برای بستر غیرمسلح و مسلح با یک لایه و دو لایه کیسه خاک (پلکانی و ستونی) برای لوله مدفون در عمق ۲D

شکل ۱۶ تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح را برای لوله مدفون در عمق ۲D در ترانشه غیرمسلح و مسلح با یک و دو لایه کیسه خاک (پلکانی و ستونی) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش تعداد لایه‌های کیسه خاک، فشار در عمق و روی لوله به میزان اندکی منتقل می‌گردد. در حالت استفاده از دو لایه پلکانی از کیسه خاک، در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال فشار به روی لوله منتقل نمی‌شود. این حالت سبب بهبود عملکرد کیسه‌های خاک در کاهش نشست سطح و تغییرشکل لوله نسبت به حالت قرارگیری کیسه‌های خاک به صورت ستونی بدون فاصله و با فاصله از هم می‌گردد. چینش پلکانی کیسه‌های خاک به دلیل فرورفتن<sup>۷</sup> کیسه فوقانی در کیسه‌های تحتانی سبب ایجاد مقاومت اصطکاکی بین لایه‌های تسلیح و در نتیجه افزایش باربری سیستم و کاهش تغییرشکل آن می‌گردد. این عملکرد در مطالعات لیو و همکاران<sup>[۲۰۲۰]</sup> در خصوص استفاده از کیسه خاک جهت تسلیح بستر راه نیز گزارش شده است. همچنین با توجه به شکل استفاده از دو لایه به صورت ستونی با فاصله از هم سبب کاهش فشار وارد بر تاج

لوله نسبت به حالت قرارگیری دو لایه ستونی بدون فاصله از هم می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است اگرچه چینش پلکانی از چینش ستونی با یا بدون فاصله از هم عملکرد بهتری دارد، اما تعداد کیسه‌ها در دو چینش به ترتیب سه و دو عدد است. لذا با توجه به عدم تفاوت قابل توجه بین خروجی دو چینش و تامین ایمنی مناسب لوله، استفاده از چینش ستونی با یا بدون فاصله نیز می‌تواند مناسب باشد، در حالی که مصرف کیسه خاک ۳۳ درصد کم‌تر است.



شکل ۱۶: تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه غیرمسلح و مسلح با یک و دو لایه کیسه خاک (پلکانی و ستونی) برای لوله مدفون در عمق ۲D

#### ۶. اثر مقیاس

معمولاً به علت وجود اثر مقیاس، رفتار مدل آزمایشگاهی به صورت کامل منطبق بر رفتار مدل واقعی نیست و همواره تفاوت‌هایی به علت وجود این اثر وجود دارد. در این خصوص نتایج حاصل از آزمایش‌های کوچک مقیاس می‌تواند با استفاده از برون‌یابی، در تخمین رفتار مدل‌های واقعی استفاده شود<sup>[۳۸ و ۳۹]</sup>. وقتی آزمایش روی یک مدل در مقیاس کوچک (کاهش یافته) انجام می‌شود، لازم است تأثیر مقیاس با توجه به ضریب مقیاس مدل ( $\lambda$ )، به درستی روی پارامترهای مصالح (در مطالعه حاضر مدول برشی خاک، سختی لوله و سختی ژئوسینتتیک) و ابعاد هندسی (در مطالعه حاضر ابعاد صفحه بارگذاری، قطر لوله، کیسه خاک و ...) بررسی و اعمال شود. محققین مختلف اثر مقیاس روی مدل‌های آزمایشگاهی را جهت تبدیل پارامترهای طراحی از مدل کوچک مقیاس به پارامترهای طراحی در مدل واقعی بررسی نموده‌اند<sup>[۴۰ و ۴۱]</sup>.

به طور مشابه برای  $(\pi_{10})_p=(\pi_{10})_m$  و  $(\pi_{11})_p=(\pi_{11})_m$  می‌توان در خصوص سختی لوله  $(K_p)$  و سختی ژئوسنتتیک  $(K_g)$  نوشت:

$$\frac{(K_p)_p}{(K_p)_m} = \lambda^2 \quad (6)$$

$$\frac{(K_g)_p}{(K_g)_m} = \lambda^2 \quad (7)$$

یعنی سختی لوله و سختی مصالح ژئوسنتتیک در مدل واقعی باید  $\lambda^2$  برابر مقادیر متناظر در مدل آزمایشگاهی باشند.

در نهایت برای  $i=12$  و در نظر گرفتن  $(\pi_{12})_p=(\pi_{12})_m$  مقدار تنش وارد بر سطح بارگذاری (تنش ناشی از بار چرخ و وسایل نقلیه) در مدل واقعی خواهد شد:

$$\frac{(q)_p}{(q)_m} = \lambda \quad (8)$$

در مدل آزمایشگاهی حاضر رفتار لوله مدفون به قطر ۱۶۰ میلی‌متر با کاربرد زهکشی و دفع فاضلاب در ترانشه غیرمسلح و ترانشه مسلح با کیسه خاک بررسی گردید. از آن‌جا که قطر لوله‌های متداول برای کاربرد زهکشی و فاضلاب از حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر متغیر است، لذا حداکثر قطر لوله مورد کاربرد در مقیاس واقعی  $D_p$  (در حیطه مورد بررسی در این تحقیق) می‌تواند ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب گردد. همچنین همان‌طور که قبلاً بیان گردید در این مطالعات بررسی رفتار سیستم تحت بار چرخ و وسایل نقلیه مدنظر است، لذا از آن‌جا که بار ترافیک و وسایل نقلیه سنگین وارد بر سطح ترانشه ۸۰۰ کیلوپاسکال (کیلوپاسکال  $q_p=800$ ) و قطر صفحه موردنظر به عنوان نماینده سطح تماس چرخ با سطح ترانشه ۳۰۰ میلی‌متر است<sup>[۳۲]</sup>، لذا با توجه به بعد صفحه بارگذاری، قطر لوله و تنش موردنظر در مطالعه آزمایشگاهی  $\frac{B_p}{B_m} = \frac{D_p}{D_m} = \frac{q_p}{q_m} = 2$  می‌باشد. از این رو در محدوده مطالعات موردنظر و با توجه به قطر لوله، ابعاد صفحه بارگذاری و تنش وارد بر آن در مدل آزمایشگاهی، در خصوص مدل واقعی می‌توان گفت:

- در محدوده کاربرد برای لوله‌های زهکش و دفع فاضلاب، قطر لوله در مدل واقعی حدود دو برابر مدل آزمایشگاهی یعنی ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب شود.
- صفحه بارگذاری به عنوان نماینده سطح تماس چرخ و وسایل نقلیه سنگین با سطح بستر ۳۰۰ میلی‌متر است.

در مطالعه حاضر، پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر رفتار مدل شامل  $b, D, Z, d, \Delta, \gamma, S, u, h, \phi, K_p, K_g, G$  هستند، که  $b$  و  $d$  به ترتیب عرض و ضخامت کیسه خاک،  $S$  و  $\Delta$  به ترتیب نشست صفحه بارگذاری و تغییرشکل قطر قائم لوله،  $G$  مدول برشی خاک،  $K_p$  و  $K_g$  به ترتیب سختی ژئوسنتتیک (مورد استفاده در تولید کیسه) و سختی لوله،  $\gamma$  وزن مخصوص خاک،  $\phi$  زاویه اصطکاک خاک و  $q$  فشار وارد بر صفحه بارگذاری می‌باشند (سایر پارامترها در بخش‌های قبلی تعریف شده‌اند). از این رو تابع  $f$  حاکم بر سیستم متغیرهای مذکور مطابق رابطه (۱) قابل بیان است:

$$f(B, D, Z, b, d, h, u, S, \Delta, \gamma, G, K_g, K_p, q, \phi) = 0 \quad (1)$$

علی‌رغم وجود تعداد ۱۵ متغیر در رابطه اخیر، مدل تنها شامل دو بعد اولیه از نیرو  $(F)$  و طول  $(L)$  است. مطابق رابطه (۲) سیستم حاضر می‌تواند توسط ۱۳ پارامتر مستقل بی‌بعد بیان گردد. در این رابطه  $\pi_1$  تا  $\pi_{13}$  نسبت باکینگهام برای ۱۳ پارامتر مستقل هستند.

$$g(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{13}) = g\left(\frac{D}{B}, \frac{Z}{B}, \frac{b}{B}, \frac{d}{B}, \frac{h}{B}, \frac{u}{B}, \frac{S}{B}, \frac{\Delta}{B}, \frac{G}{\gamma B}, \frac{K_g \gamma}{G^2}, \frac{K_p \gamma}{G^2}, \frac{q}{\gamma B}, \phi\right) = 0 \quad (2)$$

در رابطه فوق  $g$  تابع حاکم بر سیستم می‌باشد. اگر نسبت بعد صفحه بارگذاری در مدل واقعی  $(B_p)$  به مدل آزمایشگاهی  $(B_m)$  مطابق رابطه (۳) برابر  $\lambda$  (ضریب مقیاس و اندیس‌های  $p$  و  $m$  به ترتیب مربوط به مدل واقعی و آزمایشگاهی هستند). فرض گردد:

$$\frac{B_p}{B_m} = \lambda \quad (3)$$

برای تضمین تشابه، باید نسبت‌های باکینگهام  $(\pi_i)$  در رابطه ۲ در مدل آزمایشگاهی و واقعی یکسان باشند  $(\pi_i)_p=(\pi_i)_m$ . بنابراین برای  $i=1$  تا  $8$  می‌توان نوشت:

$$\frac{D_p}{D_m} = \frac{Z_p}{Z_m} = \frac{b_p}{b_m} = \frac{d_p}{d_m} = \frac{h_p}{h_m} = \frac{u_p}{u_m} = \frac{S_p}{S_m} = \frac{\Delta_p}{\Delta_m} = \lambda \quad (4)$$

برای  $i=9$  با فرض یکسان بودن دانسیته خاک در هر دو مدل و در نظر گرفتن  $(\pi_9)_p=(\pi_9)_m$  و رابطه (۳)، نسبت مدول برشی خاک  $(G)$  در مدل واقعی و آزمایشگاهی خواهد شد:

$$\frac{(G)_p}{(G)_m} = \lambda \quad (5)$$

- عرض و ضخامت کیسه خاک برای صفحه بارگذاری به قطر ۳۰۰ میلی‌متر، به ترتیب ۶۰۰ و ۱۶۰ میلی‌متر می‌باشند. در صورت لزوم می‌توان با قضاوت مهندسی به جای استفاده از یک کیسه خاک به عرض ۶۰۰ میلی‌متر، از دو کیسه خاک به عرض ۳۰۰ میلی‌متر در کنار یکدیگر و بدون فاصله استفاده کرد.
- سختی لوله و سختی مصالح ژئوستنتتیک (یا مقاومت کششی آن) در مدل واقعی نیز ۴ برابر مدل آزمایشگاهی انتخاب گردند.
- لازم به ذکر است علی‌رغم  $\lambda=2$  برابر شدن مقادیر نشست سطح بارگذاری (S) و تغییر قطر قائم لوله ( $\Delta$ ) در مدل واقعی نسبت به مدل آزمایشگاهی، نسبت  $\frac{(S)_p}{(B)_p}$  و  $\frac{(\Delta)_p}{(D)_p}$  ثابت خواهند ماند.

## ۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از یک مدل فیزیکی، رفتار لوله مدفون در ترانشه غیرمسلح و مسلح با کیسه خاک تحت بارگذاری استاتیکی با انجام آزمایش‌های مختلف بررسی گردید. در این آزمایش‌ها تاثیر عمق مدفون لوله، اثر کیسه خاک به عنوان لایه تسلیح، عمق مدفون آن و اثر تعداد و چینش لایه تسلیح در ترانشه حاوی لوله مدفون بر نشست سطح بارگذاری و رفتار لوله مدنظر بود. در خصوص نتایج به طور خلاصه می‌توان گفت:

- لوله در بستر مسلح با کیسه خاک تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نشست سطح بارگذاری ندارد.
- کیسه خاک با توزیع بار در سطح گسترده‌تر، موجب کاهش فشار روی لوله و در نتیجه تغییرشکل آن می‌گردد. به طوری که کرنش قطر قائم لوله مدفون در عمق ۲D در ترانشه مسلح با یک لایه کیسه خاک در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال ۰/۷ درصد است. این مقدار از ۲ درصد کرنش مورد نظر در آیین‌نامه لوله‌های PVC<sup>۱۳۶</sup> برای عدم بروز هرگونه آسیب در بدنه لوله کم‌تر است. بنابراین با افزایش توام عمق مدفون لوله و تسلیح ترانشه حاوی لوله با کیسه خاک می‌توان از عملکرد مناسب لوله در هنگام بهره‌برداری اطمینان حاصل نمود.
- افزایش عمق قرارگیری کیسه خاک سبب افزایش نشست سطح بستر به علت کاهش سختی ناحیه زیر سطح بارگذاری می‌گردد. بنابراین جهت کنترل نشست سطح بستر، لازم است کیسه خاک تا حد امکان زیر سطح بارگذاری قرار می‌گیرد. استفاده از لایه نازک خاک به ضخامت ۲۵ میلی‌متر روی کیسه خاک می‌تواند نقش محافظ کیسه را ایفا کند.
- در تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال افزایش عمق مدفون کیسه خاک از ۲۵ میلی‌متر به ۱۶۰ میلی‌متر سبب کاهش تغییرشکل و فشار وارد بر تاج لوله به ترتیب به میزان ۴۷ و ۵۳ درصد گردید. این امر می‌تواند به علت توزیع بار در اعماق پایین‌تر توسط کیسه خاک و در نتیجه کاهش فشار روی لوله باشد. بنابراین قرارگیری کیسه خاک در اعماق مدفون بیش‌تر و نزدیک به لوله مدفون می‌تواند سبب کنترل تغییرشکل لوله و در نتیجه کاهش صدمه و آسیب به آن گردد. لیکن قرارگیری آن روی لوله سبب اعمال فشار به لوله توسط کیسه و در نتیجه افزایش تغییرشکل لوله می‌گردد.
- چینش ستونی دو لایه کیسه خاک با فاصله از عملکرد بهتری در بهبود رفتار لوله در مقایسه با چینش دو لایه ستونی بدون فاصله (کاهش ۸۰ درصدی تغییرشکل لوله در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال) برخوردار است.
- استفاده از دو لایه کیسه خاک با چینش پلکانی سبب کاهش نشست سطح، فشار وارد بر لوله و تغییرشکل آن در مقایسه با چینش دو لایه کیسه خاک ستونی می‌گردد. به طوری که در این حالت در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، فشار وارد بر تاج لوله و تغییر شکل آن تقریباً صفر است.

استفاده نمود، اما مشابه هر مطالعه آزمایشگاهی دارای محدودیت‌هایی است. در این آزمایش‌ها تنها یک نوع خاک، یک جنس و قطر لوله، یک اندازه (عرض و ارتفاع) و جنس از کیسه استفاده شده‌است، لذا نتایج حاصل محدود به این شرایط می‌باشد و انجام مطالعات آتی روی انواع خاک، لوله و کیسه خاک و نوع بارگذاری تکراری مفید خواهد بود.

اما با توجه به عدم تفاوت محسوس بین رفتار دو چینش پلکانی و ستونی (با یا بدون فاصله)، استفاده از سیستم ستونی با ۳۳ درصد صرفه جویی در کیسه خاک توصیه می‌گردد.

لازم به ذکر است که اگرچه می‌توان با اعمال اثر مقیاس نتایج حاصل از این مطالعه را با احتیاط و قضاوت مهندسی در مقیاس واقعی (بار ترافیک وسایل نقلیه سنگین، بعد صفحه بارگذاری به قطر ۳۰۰ میلی‌متر و لوله به قطر ۳۰۰ میلی‌متر با کاربرد زهکشی و فاضلاب

### علائم اختصاری

- D= قطر خارجی لوله  
 Z = عمق مدفون لوله  
 B = عرض صفحه بارگذاری  
 u= عمق مدفون کیسه خاک  
 h= فاصله دو لایه کیسه خاک  
 b= عرض کیسه خاک  
 d= ضخامت کیسه خاک  
 S= نشست سطح بارگذاری  
 Δ= تغییر شکل لوله  
 γ= وزن مخصوص خاک  
 G= مدول برشی خاک  
 K<sub>g</sub>= سختی ژئوسنتتیک  
 K<sub>p</sub>= سختی لوله  
 φ= زاویه اصطکاک خاک  
 q= فشار وارد بر صفحه بارگذاری  
 λ= ضریب مقیاس

### پانوشتها

۱. Arching
۲. Soilbags
۳. Unified Classification System
۴. Well-Graded Sand
۵. uPVC
۶. Polypropylene
۷. Insertion

### منابع (References)

۱. Moghaddas Tafreshi, S. N., and Khalaj, O., ۲۰۰۸. "Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated-load".

*Geotextiles and Geomembranes*, ۲۶(۲), pp. ۱۴۵-۱۶۳. [doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.06.002](https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.06.002).

۲. El Nagggar, H., Turan, A., and Valsangkar, A., ۲۰۱۵. "Earth pressure reduction system using geogrid-reinforced platform bridging for buried utilities". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ۱۴۱(۴), ۰۴۰۱۵۰۲۴. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001307).
۳. Azizian, M., Moghaddas Tafreshi, S. N., and Joz Darabi, N., ۲۰۲۰. "Experimental evaluation of an expanded polystyrene (EPS) block-geogrid system to protect buried pipes". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۲۹, ۱۰۵۹۶۵. [doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105965](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105965).
۴. Babagiray, G., Akbas, S. O., and Anil, O., ۲۰۲۳. "Full-Scale Field Impact Load Experiments on Buried Pipes in Geosynthetic-Reinforced Soils". *Transportation Geotechnics*, ۳۸, ۱۰۰۹۲۷. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100927>.
۵. Bildik, S., & Laman, M., ۲۰۲۰. "Effect of geogrid reinforcement on soil-structure-pipe interaction in terms of bearing capacity, settlement and stress distribution". *Geotextiles and Geomembranes*, ۴۸(۴), pp. ۸۴۴-۸۵۳. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2020.07.004>.
۶. Pires, A. C., and Palmeira, E. M., ۲۰۲۱. "The influence of geosynthetic reinforcement on the mechanical behaviour of soil-pipe systems". *Geotextiles and Geomembranes*, ۴۹(۵), pp. ۱۱۱۷-



۷. Tavakoli Mehrjardi, Gh., Moghaddas Tafreshi, S. N., and Dawson, A. R. "Combined use of geocell reinforcement and rubber–soil mixtures to improve performance of buried pipes". *Geotextiles and Geomembranes*, ۳۴, pp. ۱۱۶-۱۳۰. [doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.05.004](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.05.004).
۸. Moghaddas Tafreshi, S. N., Darabi, N. J., and Dawson, A. R., ۲۰۲۰. "Combining EPS geofom with geocell to reduce buried pipe loads and trench surface rutting". *Geotextiles and Geomembranes*, ۴۸(۳), pp. ۴۰۰-۴۱۸. [doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.12.011](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.12.011).
۹. Hegde, A. M., and Sitharam, T. G., ۲۰۱۵. "Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells". *Geotextiles and Geomembranes*, ۴۳(۵), pp. ۳۷۲-۳۸۱. [doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.010](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.010).
۱۰. Wang, Y. Q., Li, Y. L., Liu, K., Li, X., and Yang, F., ۲۰۲۲. "Slope displacement and soil pressure of soilbag-retaining wall influenced by arrangement". *Geosynthetics International*, ۳۰(۳), pp. ۲۴۷-۲۵۸. [doi.org/10.1060/jgein.21.0041a](https://doi.org/10.1060/jgein.21.0041a).
۱۱. Liu, S., Gao, C., Fan, K., Zhang, C., Wang, Z., Shen, C., and Han, Z., ۲۰۲۲. "Repairing expansive soil channel slope with soilbags". *Geosynthetics International*, pp. ۱-۱۰. [doi.org/10.1060/jgein.22.0025f](https://doi.org/10.1060/jgein.22.0025f)
۱۲. Lai, Z., Jiang, E., Fan, K., Liu, S. H., and Wang, Y., ۲۰۲۳. "Full-scale tests on soilbag-constructed retaining walls with a panel". *Geosynthetics International*, ۳۰(۲), pp. ۱۲۹-۱۳۶. [doi.org/10.1060/jgein.21.0093](https://doi.org/10.1060/jgein.21.0093).
۱۳. Xu, Y., Huang, J., Du, Y., and Sun, D. A., ۲۰۰۸. "Earth reinforcement using soilbags". *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۶(۳), pp. ۲۷۹-۲۸۹. [doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.10.003](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.10.003).
۱۴. Ye, B., Muramatsu, D., Ye, G. L., and Zhang, F., ۲۰۱۱. "Numerical assessment of vibration damping effect of soilbags". *Geosynthetics International*, ۱۸(۴), pp. ۱۵۹-۱۶۸. [doi.org/10.1060/jgein.2011.18.4.159](https://doi.org/10.1060/jgein.2011.18.4.159).
۱۵. Liu, S. H., Gao, J. J., Wang, Y. Q., and Weng, L. P., ۲۰۱۴. "Experimental study on vibration reduction by using soilbags". *Geotextiles and Geomembranes*, ۴۲(۱), pp. ۵۲-۶۲. [doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.007).
۱۶. Ding, G., Wu, J., Wang, J., and Hu, X., ۲۰۱۷. "Effect of sand bags on vibration reduction in road subgrade". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۰۰, pp. ۵۲۹-۵۳۷. [doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.007](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.007).
۱۷. Wang, Y. Q., Li, X., Liu, K., and Liu, G., ۲۰۱۹. "Experiments and DEM analysis on vibration reduction of soilbags". *Geosynthetics International*, ۲۶(۵), pp. ۵۵۱-۵۶۲. [doi.org/10.1060/jgein.19.004d](https://doi.org/10.1060/jgein.19.004d).
۱۸. Matsuoka, H., and Liu, S., ۲۰۰۳. "New earth reinforcement method by soilbags ("donow")". *Soils and foundations*, ۴۳(۶), pp. ۱۷۳-۱۸۸. [doi.org/10.3208/sandf.43.6.173](https://doi.org/10.3208/sandf.43.6.173).
۱۹. Zhang, C., Liao, J., Zhang, Y., & Wang, L., ۲۰۲۲. "Plate Load Tests of Soft Foundations Reinforced by Soilbags with Solid Wastes for Wind Farms". *Materials*, ۱۶(۱۱), pp. ۴۱۷۳. [doi.org/10.3390/ma16114173](https://doi.org/10.3390/ma16114173).
۲۰. Wang, L., Liu, S., Liao, J., and Fan, K., ۲۰۱۹. "Field load tests and modelling of soft foundation reinforced by soilbags". *Geosynthetics International*, ۲۶(۶), pp. ۵۸۰-۵۹۱. [doi.org/10.1060/jgein.19.003f](https://doi.org/10.1060/jgein.19.003f).
۲۱. Liu, S. H., Liao, J., Bong, T. T., and Fan, K. W., ۲۰۲۱. "Repeated loading of soilbag-reinforced road subgrade". *Geosynthetics International*, ۲۸(۲), pp. ۱۱۳-۱۲۴. [doi.org/10.1060/jgein.20.0030](https://doi.org/10.1060/jgein.20.0030).
۲۲. Castiglia, M., de Magistris, F. S., Onori, F., and Koseki, J., ۲۰۲۱. "Mitigation systems for the uplift of buried pipelines in liquefiable soils under repeated shaking through model tests." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۴۸ ۱۰۶۸۵۰. [doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106850](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106850).

۲۳. American Society for Testing and Materials (ASTM), ۲۰۱۱. "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, ASTM D۲۴۸۷-۱۱. [DOI: ۱۰,۱۵۲۰/D۲۴۸۷-۱۱](https://doi.org/10.1520/D2487-11).
۲۴. American Society for Testing and Materials (ASTM), ۲۰۱۴. "Standard practice for underground installation of thermoplastic pipe for sewers and other gravity-flow applications", *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, ASTM D۲۳۲۱-۱۴. [DOI: ۱۰,۱۵۲۰/D۲۳۲۱-۱۴](https://doi.org/10.1520/D2321-14).
۲۵. American Society for Testing and Materials (ASTM), ۲۰۱۲. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort", *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, ASTM D۱۵۵۷-۱۲. [DOI: ۱۰,۱۵۲۰/D۱۵۵۷-۱۲](https://doi.org/10.1520/D1557-12).
۲۶. American Society for Testing and Materials (ASTM), ۲۰۱۴. "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, ASTM D۸۵۴-۱۴. [DOI: ۱۰,۱۵۲۰/D۰۸۵۴-۱۴](https://doi.org/10.1520/D0854-14).
۲۷. Institute of standard and Institute of Research of Iran, ۲۰۱۰. "Plastic-Unplasticized Poly (Vinyle Choride) (PVC-U), Fittings and Piping systems for non Pressure Underground Drainage and Swerage Specificaton". ISIRI-۹۱۱۸. [In Persian].
۲۸. Tavakoli Mehrjardi, Gh, S. N. Moghaddas Tafreshi, and Andrew Dawson, ۲۰۱۵. "Numerical analysis on Buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture". *International Journal of Civil Engineering* ۱۳,۲. [doi.org/۱۰,۲۲۰۶۸/IJCE.۱۳,۲,۹۰](https://doi.org/10.22068/IJCE.13.2.90).
۲۹. British Standard Institution (BSI), ۱۹۸۰. "Plastics pipework (thermoplastics materials)- Code of practice for the installation of unplasticized PVC pipework for gravity drains and sewers". BS ۵۹۵۵.
۳۰. American Association of State Highway and Transportation officials (AASHTO), ۲۰۱۰. "Bridge Construction specifications". *Washington DC, USA*.
۳۱. Moghaddas Tafreshi, S. N, and Tavakoli Mehrjardi, Gh., ۲۰۰۸. "The use of neural network to predict the behavior of small plastic pipes embedded in reinforced sand and surface settlement under repeated load". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ۲۱(۶), pp. ۸۸۳-۸۹۴. [doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.engappai.۲۰۰۷,۰۹,۰۰۱](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.09.001).
۳۲. Brito, L.A.T., Dawson, A.R. and Kolisoja, P.J., ۲۰۰۹. "Analytical evaluation of unbound granular layers in regard to permanent deformation". *Proceedings of the 8th International on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields (BCR2A'09), Champaign IL, USA*, pp. ۱۸۷-۱۹۶.
۳۳. American Society for Testing and Materials (ASTM), ۲۰۲۱. "Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements", *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, ASTM D۱۱۹۵M-۲۱. [DOI: ۱۰,۱۵۲۰/D۱۱۹۵\\_D1195M-۲۱](https://doi.org/10.1520/D1195_D1195M-21).
۳۴. American Society for Testing and Materials (ASTM), ۲۰۲۱. "Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements", *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, ASTM D۱۱۹۶M-۲۱. [DOI: ۱۰,۱۵۲۰/D۱۱۹۶\\_D1196M-۲۱](https://doi.org/10.1520/D1196_D1196M-21).
۳۵. Hsieh, C. and Mao, H.L., ۲۰۰۵. "A Bench-scale performance test for evaluation the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses", *Geosynthetics Research and Development*, pp. ۱-۱۱ (۲۰۰۵). [doi.org/۱۰,۱۰۶۱/۴.۷۸۲\(۱۶۱\)۹](https://doi.org/10.1061/4.782(161)9).
۳۶. Association, Uni-Bell PVC Pipe., ۲۰۱۳. "Handbook of PVC pipe design and construction". *Industrial Press*.
۳۷. Boussinesq, J., ۱۸۸۵. "Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Paris, Gauthier-Villars. Reprinted, ۱۹۶۹ with an introduction by A Caquot", *Paris, Albert Blanchard*, pp. ۲۲۱.

۳۸. Love, J. P., ۱۹۸۴. "Model Testing of Geogrids in Unpaved Roads.", PhD thesis, *Oxford University, Oxford, UK*.
۳۹. Fakher, A., and Jones, C. J., ۱۹۹۶ "Discussion: bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand." *Journal of Geotechnical Engineering*, ۱۲۲(۴), pp. ۳۲۶-۳۲۷. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:4\(326\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(326)).
۴۰. El-Emam, M. & Bathurst, R. J., ۲۰۰۴. "Experimental design, instrumentation and interpretation of reinforced soil wall response using a shaking table." *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, ۴, No.۴, pp. ۱۳-۳۲. [doi.org/10.1680/ijpmg.2004.4.4.13](https://doi.org/10.1680/ijpmg.2004.4.4.13).
۴۱. Sireesh, S., Sitharam, T. G., and Dash, S. K., ۲۰۰۹. "Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void". *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۷(۲), pp. ۸۹-۹۸. [doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.09.005](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.09.005).



## Protection of buried pipe using soilbag

A.F. Ahmadian: E-mail address: fahmadian@mail.kntu.ac.ir

S.N. MoghaddasTafreshi (Corresponding Author): E-mail address: [nas\\_moghaddas@kntu.ac.ir](mailto:nas_moghaddas@kntu.ac.ir)

Civil Engineering Department, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

**Abstract:** Today, the use of geosynthetics to reinforce the soil mass on the pipes is being developed under static and repetitive loads. In the meantime, soilbags are considered as a suitable option for dealing with floods and other geotechnical applications such as roadbeds, slope stability, and retaining walls. In this paper, the investigation of the buried pipe's behavior in the unreinforced trench and reinforced trench with soilbag is considered. Therefore, a series of tests were conducted on the unreinforced and reinforced trench (reinforced by one soilbag, two soil bags in columnar arrangement with and without spacing, and three soil bags in two layers of stepped arrangement) containing a pipe with a diameter of 160 mm under static load. The results of the tests show the effect of the soilbag layer on reducing the bed settlement by enclosing the soil inside and preventing the lateral movement of the soil mass above the pipe. Also, the bag, by distributing the stress on a wider surface and significantly reducing it in depth, reduces the transfer stress to the pipe crown and as a result, reduces the deformation of the pipe. Increasing the buried depth of the soilbag results in a reduction in deformation and pressure on the pipe crown and an increase in soil surface settlement. The columnar arrangement of two layers of soilbags with spacing provides better performance in improving pipe behavior compared to those without spacing. Moreover, the use of two layers of soilbag with a stepped arrangement leads to a reduction in surface settlement, pressure on the pipe, and pipe deformation compared to two layers of soilbag with a column arrangement. However, considering the lack of significant difference between the behavior of the stepped and column arrangements (with or without spacing), the use of a column system is recommended, as it saves 33% of the soilbag.

**Keywords:** Buried Pipe, Soilbags, Reinforcement, Settlement.