

حفاظت از لوله‌ی مدفون با استفاده از کیسه‌ی خاک

امیرفرهنگ احمدیان (دانشجوی دکتری)

سیدناصر مقدس تفرشی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۳
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۲، صص. ۱۱۳-۱۲۶، (پژوهشی)

امروزه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها جهت تسلیح توده‌ی خاک روی لوله‌ها، تحت بارهای استاتیکی و تکراری در حال توسعه است. در این میان، کیسه‌های خاک به دلیل عملکرد محدودکنندگی توده‌ی 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 نوشتار حاضر، بررسی رفتار لوله‌ی مدفون در ترانشه‌های غیرمسلح و مسلح با کیسه‌ی خاک مدنظر است. از این رو تعدادی آزمایش بر روی ترانشه‌های غیرمسلح و مسلح با یک کیسه‌ی خاک، دو لایه کیسه‌ی خاک با چینش ستونی (با و بدون فاصله) و دو لایه کیسه‌ی خاک با چینش پلکانی حاوی لوله با قطر ۱۶۰ میلی‌متر تحت بار استاتیکی انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها مبین تأثیر لایه‌ی کیسه‌ی خاک در کاهش نشست بستر خاک با محصور ساختن خاک داخل و جلوگیری از حرکت جانبی توده‌ی خاک بالای لوله است. همچنین کیسه‌ی خاک 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 شده است.

واژگان کلیدی: لوله‌ی مدفون، کیسه‌های خاک، تسلیح، نشست.

۱. مقدمه

خطوط لوله‌های انتقال نفت، گاز، آب و ... به علت کاربرد در سطحی بسیار وسیع و اهمیت بالای آنها در زندگی انسان‌ها، شریان‌های حیاتی نامیده می‌شوند؛ که 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 وسائط نقلیه، بارهای ناشی از خاک‌برداری در اطراف لوله‌ها (برخورد جام بیل مکانیکی و لودر) و همچنین در برابر آثار مواد شیمیایی موجود در خاک مبین ضرورت بررسی راهکارهایی جهت حفظ ایمنی و عملکرد آنهاست. لذا به منظور حفاظت و کاهش خسارت‌های وارد بر لوله‌ها، پژوهش‌های بسیاری 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، نحوه‌ی تغییرشکل لوله و مدهای گسیختگی آن انجام شده است.

امروزه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها جهت تسلیح توده‌ی خاک روی لوله‌ها در حال توسعه است. بهره‌گیری مناسب از قوس‌زدگی^۱ ترانشه روی لوله و عملکرد غشایی لایه یا لایه‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید می‌تواند باعث کاهش فشار روی تاج لوله

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۵/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۲/۹/۱۰، پذیرش ۱۴۰۲/۹/۱۱.

استناد به این مقاله:

احمدیان، امیرفرهنگ و مقدس تفرشی، سیدناصر، ۱۴۰۳. حفاظت از لوله‌ی مدفون با استفاده از کیسه‌ی خاک. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۲)، صص. ۱۱۳-۱۲۶.

DOI:10.24200/J30.2023.62766.3241

شود.^[۶-۱] در این میان، استفاده از لایه‌ی ژئوسل علاوه بر عملکرد غشائی، به دلیل ایجاد محصورکنندگی باعث بازتوزیع بهتر تنش در ترانشه و در نتیجه کاهش تنش وارد بر لوله و تغییرشکل آن می‌شود.^[۸،۷]

هچ و سیتارام^[۹] (۲۰۱۵) با انجام بارگذاری استاتیکی روی لوله‌ی مدفون در بسترهای غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید، ژئوسل، و ترکیب آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از ژئوسل و ترکیب آن با لایه‌ی ژئوگرید علاوه بر جلوگیری از گسیختگی سیستم، سبب افزایش باربری سیستم به علت اثر توأم محصورشدگی خاک در سلول‌های ژئوسل و عملکرد غشایی لایه‌ی ژئوگرید و در نتیجه پخش بار در سطح بیشتر (کاهش تنش) و جلوگیری از حرکت رو به پایین لایه‌های بستر می‌شود. این امر می‌تواند سبب کاهش انتقال فشار وارد بر لوله‌ی مدفون و در نتیجه تغییرشکل آن شود.

کیسه‌های پلیمری خاک (کیسه‌های خاک)^۳ با توجه به عملکرد سه‌بعدی و قابلیت محصورکنندگی توده‌ی خاک درون خود در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی نظیر دیوار حائل جهت پایداری شیروانی‌ها،^[۱۰-۱۲] بستر راه و راه‌آهن،^[۱۳] یا در سازه‌های خاکی تحت بارهای زلزله یا بارهای سیکلی نظیر بار ترافیک،^[۱۴-۱۷] مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. از ویژگی‌های خاص سیستم اخیر قابلیت همسانی با بافت

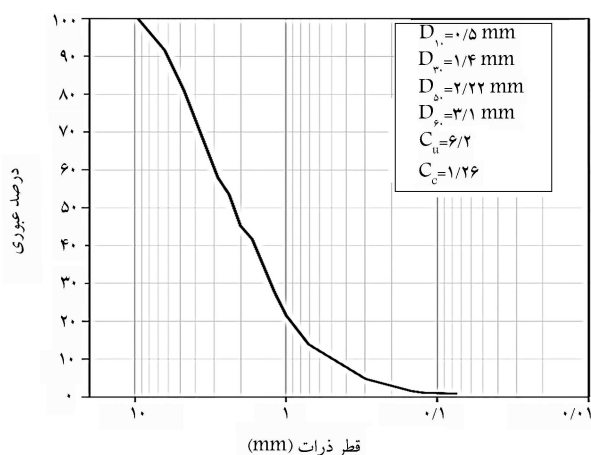
و لوله‌ی مدفون از حیث کنترل تغییر شکل لوله و نشست سطح بستر توسط یک مدل فیزیکی مدنظر بوده است. در آزمایش‌های مذکور، اثر این عوامل بررسی شده است:

- استفاده از لایه‌ی کیسه‌ی خاک؛
 - عمق مدفون لوله در ترانشه‌های غیرمسلح و مسلح با کیسه؛
 - عمق مدفون قرارگیری کیسه‌ی خاک؛
 - چینش کیسه‌های خاک (چینش ستونی با و بدون فاصله و چینش پلکانی).
- با توجه به سهولت ساخت کیسه‌ی خاک و اجرای آن در ترانشه‌ی حاوی لوله‌ی مدفون، این روش تسلیح می‌تواند ضمن ارائه‌ی روشی مناسب در اجرا، امکان ایمنی لوله‌های مدفون را فراهم کند.

۲. مصالح مصرفی

۱.۲. خاک

خاک استفاده شده در داخل ترانشه (در اطراف و بالای لوله) و داخل کیسه‌های خاک مطابق سیستم طبقه‌بندی یکنواخت^۹ ASTM D۱۱ - ۲۴۸۷، از نوع ماسه‌ی خوب دانه‌بندی شده (SW) ۱° و دارای توزیع اندازه‌ی ذرات مطابق شکل ۱ است. بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های خاک استفاده شده، ۹/۵ میلی‌متر و متوسط اندازه‌ی ذرات آنها ۲/۲۲ میلی‌متر بوده است. این تذکر لازم است که اندازه‌ی دانه‌های خاک مصرفی، معیار موردنظر در استاندارد ۱۴ - ASTM D۲۳۲۱،^[۲۴] مبنی بر محدود ساختن اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ی خاک بر روی لوله به قطر ۳۸ میلی‌متر را ارضاء می‌کند. براساس آزمایش تراکم اصلاح شده براساس استاندارد ۱۲ - ASTM D۱۵۵۷،^[۲۵] بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه‌ی خاک مصرفی به ترتیب ۱۹/۶۴ کیلونیوتن بر مترمکعب و ۹/۵٪ بوده است. توده‌ی ویژه‌ی خاک در آزمایشگاه براساس استاندارد ۱۴ - ASTM D۸۵۴،^[۲۶] برابر ۲/۶۵ و زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی آن با استفاده از آزمایش فشاری سه‌محوری بر روی نمونه‌هایی با وزن مخصوص مرطوب ۱۸/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب و رطوبت ۵٪ به ترتیب برابر ۳۵ درجه و ۱۱ کیلوپاسکال به‌دست آمدند. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها، ترانشه‌ی موردنظر با مقادیر وزن مخصوص و درصد رطوبت مذکور (تراکم ۹۰٪) آماده شدند.



شکل ۱. توزیع اندازه‌ی ذرات خاک ترانشه و داخل کیسه‌ی خاک.

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 به‌دلیل فسادپذیری مصالح کیسه، با توسعه‌ی 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^۴ (۲۰۰۳)،^[۱۸] در مطالعات خود روی کاربرد کیسه‌های خاک به‌عنوان مسلح‌کننده، فواید استفاده از سیستم کیسه‌ی خاک را به این شرح بیان کرده‌اند:

- افزایش ۵ الی ۱۰ برابری ظرفیت باربری زمین‌های نرم؛
- سهولت در ساخت بدون نیاز به ماشین‌آلات خاص؛
- دوست‌دار محیط‌زیست؛
- امکان استفاده از ضایعات مصالحی، نظیر: بتن، آسفالت، خرده چوب، خرده لاستیک و ... به‌عنوان مصالح پرکننده‌ی کیسه؛
- مقاومت فشاری تا ۳ مگاپاسکال (حدود ۰/۱ مقاومت فشاری بتن معمولی) بسته به جنس کیسه؛
- کاهش ارتعاش ناشی از ترافیک یا ماشین به‌دلیل جذب ارتعاش توسط کیسه‌های خاک؛
- جلوگیری از انبساط ناشی از یخ‌زدگی در صورت استفاده از مصالح دانه‌بی درشت.

ژانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۱۹] و ونگ^۶ و همکاران (۲۰۱۹)^[۲۰] با بررسی تأثیر کیسه‌های خاک در ظرفیت باربری پی مستقر روی خاک نرم به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری بستر مسلح با کیسه‌های خاک در مقایسه با بستر غیرمسلح، افزایش مناسبی دارد؛ به‌طوری که کیسه‌های خاک سبب افزایش مدول کشسانی بستر و کاهش انتقال فشار در عمق می‌شوند.

لیو^۷ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۲۱] 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 و عملکرد مناسب کیسه‌های خاک در کاهش نشست و افزایش مدول کشسانی بستر راه تحت بارهای تکراری و همچنین افزایش میزان میرایی شتاب در عمق بستر مسلح با کیسه‌ی خاک نسبت به بستر غیرمسلح را گزارش کردند. کاستیگلیا^۸ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۲] عملکرد مناسب کیسه‌های خاک جهت جلوگیری از بالا آمدن لوله حین وقوع زلزله را بدون در نظر گرفتن تأثیر آن در تغییر شکل لوله گزارش کردند.

اگرچه پژوهشگران پیشین تأثیر کیسه‌های خاک در بهبود باربری سازه‌های خاکی، نظیر: بستر راه، راه‌آهن و پی‌ها^[۱۷-۱۳] عملکرد کیسه‌های شن جهت جلوگیری از بالا آمدن لوله حین وقوع زلزله را بدون در نظر گرفتن تأثیر آن در تغییر شکل لوله،^[۲۲] یا تأثیر تسلیح ترانشه حاوی لوله‌ی مدفون با ژئوسنتتیک‌ها (ژئوتکستایل، ژئوگرید و ژئوسل) را در بهبود عملکرد لوله‌های مدفون،^[۹-۱] بررسی کرده‌اند؛ اما تاکنون اثر تسلیح با کیسه‌ی خاک در رفتار ترانشه‌ی مسلح حاوی لوله‌ی مدفون به‌منظور کنترل تغییر شکل لوله و نشست سطح بستر بررسی نشده است. از این رو در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت ایمنی لوله‌های مدفون، سهولت اجرای کیسه‌ی خاک و عملکرد مناسب آن در بهبود رفتار بستر،^[۲۳-۲۲] بررسی آزمایشگاهی عملکرد کیسه‌ی خاک به‌عنوان یک مسلح‌کننده‌ی سه‌بعدی زیر سطح بارگذاری (در بالای لوله) بر بهبود رفتار بستر

جدول ۱. خصوصیات ژئوتکستایل استفاده شده در تولید کیسه‌ی خاک.

پارامتر	مقدار	واحد
مقاومت کششی در جهت ماشین، (MD)	۱۳	kN/m
مقاومت کششی در جهت مقابل ماشین، (CD)	۱۰	kN/m
وزن واحد سطح	۱۳۸	g/m ²
ضخامت	۰٫۸	mm

۲.۲. لوله

لوله‌های از جنس پلی وینیل کلراید (UPVC) با قطر در محدوده‌ی ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر غالباً برای کاربردهای زهکشی و فاضلاب استفاده می‌شوند. از آنجا که مطابق با آیین‌نامه‌ی ۹۱۱۸ - ISIRI،^[۲۷] لوله با نسبت قطر لوله به ضخامت دیواره برابر ۵۰ جهت استفاده در پروژه‌های انتقال فاضلاب مناسب است؛ لذا در پژوهش حاضر، از لوله در مقیاس واقعی به قطر خارجی ۱۶۰ میلی‌متر، ضخامت ۳/۲ میلی‌متر و مقاومت ۴ اتمسفر استفاده شده است. توکلی مهرجری و همکاران (۲۰۱۵)،^[۲۸] در مطالعات‌شان روی رفتار لوله‌های مدفون به این نتیجه رسیدند که محدوده‌ی تأثیر تنش در امتداد طول لوله برابر عرض بار به‌علاوه‌ی ۱/۵ برابر عمق مدفون لوله است. لذا با توجه به بیشینه‌ی عمق مدفون در پژوهش حاضر برابر ۲D و قطر صفحه‌ی بارگذاری برابر ۱۵۰ میلی‌متر، محدوده‌ی تأثیر تنش در امتداد طول لوله حدود ۶۳۰ میلی‌متر بوده است. لذا جهت عدم تأثیر شرایط انتهایی و طول لوله در فشارها و کرنش‌های جانبی و همچنین با توجه به ابعاد مدل فیزیکی موجود، از لوله به طول ۶۸۰ میلی‌متر استفاده شده است.

۳.۲. کیسه

جهت تولید کیسه‌ی خاک از ژئوتکستایل از جنس پلی‌پروپیلن^{۱۲} با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است. کیسه‌ها با استفاده از ماشین خیاطی دوخته شدند، به‌طوری‌که ابتدا سه وجه آنها با ماشین و پس از پر کردن کیسه‌ها از خاک، وجه چهارم آنها به‌صورت دستی با سوزن و نخ دوخته شدند. 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 0.9 ± 0.1 کیلونیوتن بر مترمکعب، پس از تراکم خاک داخل کیسه بوده است.

۳. نحوه‌ی آزمایش

۱.۳. دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش، شامل سه قسمت اصلی سیستم بارگذاری، سیستم ثبت و قرائت اطلاعات و جعبه‌ی 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 صفحه‌ی بارگذاری حین آزمایش، توسط سلول بار اندازه‌گیری می‌شود.

سیستم قرائت و ثبت اطلاعات با استفاده از یک واحد قرائت و ثبت داده‌ها، قابل کنترل به وسیله‌ی 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 ۰٫۱٪ بیشینه‌ی ظرفیت خود)

و تغییر در قطر قائم لوله توسط حسگر اندازه‌گیری نشست (حسگر با ظرفیت ۲۵ میلی‌متر و دقت ۰٫۱٪ بیشینه‌ی ظرفیت خود)، میزان بار قائم وارد بر صفحه‌ی بارگذاری به وسیله‌ی یک سلول اندازه‌گیری بار (سلول بار با ظرفیت ۱۰ کیلونیوتن و دقت ۰٫۱٪ بیشینه‌ی ظرفیت خود) و فشار قائم وارد بر تاج لوله با استفاده از فشارسنج (فشارسنج با ظرفیت ۱ مگاپاسکال و دقت اندازه‌گیری تا ۰٫۱ کیلوپاسکال) مستقیماً اندازه‌گیری شدند.

با در نظر گرفتن قطر لوله (D) برحسب میلی‌متر، کمینه‌ی عرض ترانشه (W) برحسب میلی‌متر توسط استاندارد ۱۴ - ASTM D۲۳۲۱^[۲۴] و آیین‌نامه‌ی ۵۹۵۵ - BS ۱۹۸۰ به ترتیب $1/25D + 300$ و $D + 300$ پیشنهاد شده است. همچنین دستورالعمل (۲۰۱۰) AASHTO،^[۲۹] کمینه‌ی عرض ترانشه را برحسب میلی‌متر، بیشینه‌ی حاصل از دو مقدار $1/5D + 300$ و $D + 400$ توصیه کرده است.

لذا با توجه به طول و قطر لوله به ترتیب ۶۸۰ و ۱۶۰ میلی‌متر و به‌منظور ارضاء کمینه‌ی عرض موردنظر آیین‌نامه‌های مذکور، ترانشه‌ی آزمایش به طول و عرض ۷۰۰ میلی‌متر و ارتفاع متغیر با توجه به عمق مدفون لوله انتخاب شد. با توجه به توصیه‌ی مقدس تفرشی و توکلی مهرجری (۲۰۰۸)،^[۳۱] مبنی بر عمق مدفون ۲D به‌عنوان عمق مدفون بهینه‌ی قرارگیری لوله در ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید، در پژوهش حاضر، بیشینه‌ی عمق مدفون لوله در آزمایش‌ها برابر ۲D لحاظ شده است. ترانشه‌ی 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 شد. این تذکر لازم است که در صورت استفاده از لوله با قطر بزرگ‌تر، مثلاً ۳۰۰ میلی‌متر، باید با توجه به ملزومات استاندارد ۱۴ - ASTM D۲۳۲۱^[۲۴] و آیین‌نامه‌ی ۱۹۸۰ - BS ۵۹۵۵،^[۲۹] کمینه‌ی عرض ترانشه تعیین شود.

۲.۳. آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها

خاک ترانشه در کلیه‌ی آزمایش‌ها دارای چگالی مرطوب ۱۸/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب و رطوبت حدود ۵٪ بوده است. جهت آماده‌سازی ترانشه، بعد از قراردادن حسگر سنجش تغییر مکان در داخل لوله (مطابق شکل ۲)، قرار دادن لوله در کف ترانشه، نصب فشارسنج روی لوله و ثابت کردن آن (مطابق شکل ۳)، لایه‌های خاک با احتیاط در اطراف و بالای لوله به‌طور یکپارچه متراکم شدند. با در نظر گرفتن ضخامت لایه‌های خاک معادل ۴ سانتی‌متر و با توجه به میزان چگالی موردنظر،



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

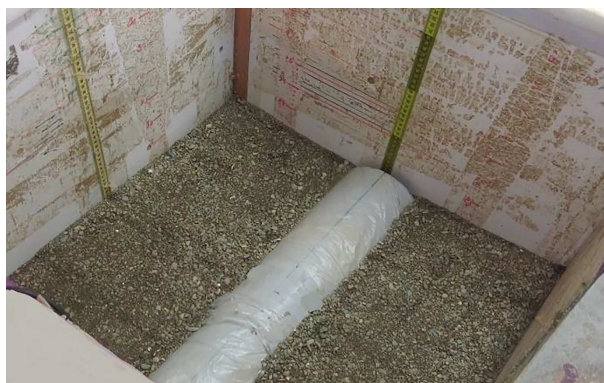
و طراحی بستر انعطاف‌پذیر راه و فرودگاه پیشنهاد کرده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به محدودیت در سیستم بارگذاری جهت اعمال بار تکراری (سیکلی)، براساس توصیه‌ی استاندارد ۱۲ - ASTM D۱۱۹۶^[۳۴]، بار استاتیکی (غیرسیکلی - استاتیکی) بر صفحه‌ی بارگذاری اعمال شد. لذا با توجه به موارد ذکر شده، در تمامی آزمایش‌ها به‌منظور شبیه‌سازی و اعمال تنش ناشی از بار چرخ و سائط نقلیه‌ی نیمه‌سنگین، بار استاتیکی (غیرسیکلی) روی صفحه‌ی 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 آنجا که در مدل آزمایش، هدف رسیدن به حالت گسیختگی در توده‌ی خاک زیر صفحه‌ی بارگذاری و تعیین ظرفیت باربری نهایی آن مشابه یک پی نیست، لذا در غالب آزمایش‌ها، به‌منظور بررسی و ارزیابی تغییرشکل لوله و نشست سطح ترانشه، تنش وارد بر صفحه‌ی بارگذاری (به‌عنوان سطح تماس چرخ و سیله‌ی نقلیه‌ی نیمه‌سنگین با سطح ترانشه) به مقدار ۴۰۰ کیلوپاسکال (در بعضی آزمایش‌ها تا ۵۵۰ کیلوپاسکال) محدود شد. همچنین با توجه به محدوده‌ی ابعاد صفحه‌ی بارگذاری و قطر لوله‌ی بررسی شده (حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر)، عرض کیسه‌ی خاک دو برابر صفحه‌ی بارگذاری (۳۰۰ میلی‌متر برای صفحه به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ۶۰۰ میلی‌متر برای صفحه به قطر ۳۰۰ میلی‌متر) بوده است.

لازم به ذکر است که سیاه و ماثو^{۱۴} (۲۰۰۵)،^[۳۵] 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 تأثیر قابل توجه در نشست صفحه‌ی بارگذاری توصیه کرده‌اند، که با توجه به متوسط اندازه‌ی ذرات برابر ۲/۲۲ میلی‌متر، استفاده از صفحه‌ی بارگذاری به قطر ۱۵۰ میلی‌متر مناسب بوده است.

۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

برنامه‌ی آزمایش‌ها جهت بررسی عوامل مؤثر در ترانشه‌ی حاوی لوله با توجه به امکانات موجود تنظیم شد. به‌منظور بررسی عوامل مذکور، ۱۲ آزمایش مستقل مطابق جدول ۲ انجام شدند. آزمایش‌های سری اول روی لوله‌ی مدفون در ترانشه‌ی غیرمسلح واقع در سه عمق D ، $1/5D$ و $2D$ (شکل ۵ - الف)، آزمایش‌های سری دوم روی لوله‌ی مدفون در عمق $2D$ در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه‌کیسه‌ی خاک در عمق‌های ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر (شکل ۵ - ب)، آزمایش‌های سری سوم روی لوله‌ی مدفون واقع در سه عمق D ، $1/5D$ و $2D$ در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه‌کیسه‌ی خاک در عمق ۲۵ میلی‌متر (شکل ۵ - ب)، آزمایش‌های سری چهارم روی لوله‌ی مدفون در عمق $2D$ مسلح با دو لایه‌کیسه‌ی خاک با چپش ستونی با فاصله و بدون فاصله (شکل ۵ - ج) و آزمایش سری پنجم روی لوله در عمق مدفون $2D$ مسلح با دو لایه‌کیسه‌ی خاک با چپش پلکانی (شکل ۵ - د) انجام شدند.

از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرارپذیری نتایج به‌منظور اطمینان یافتن از عملکرد مناسب سیستم و دقت در اندازه‌گیری پارامترها (تنش وارد بر صفحه‌ی بارگذاری، فشار روی لوله، تغییرشکل صفحه‌ی بارگذاری و تاج لوله) است. بدین منظور ۸ آزمایش تکراری، جهت کنترل راستی‌آزمایی آزمایش‌ها و تکرارپذیری آنها صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های تکراری شده در مقایسه با یکدیگر اختلافی کمتر از ۴٪ را نشان داده‌اند، که این مقدار در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی مورد تأیید است.



شکل ۳. تصویری از لوله حین آماده‌سازی آزمایش.



شکل ۴. تصویری از کیسه‌ی خاک در ترانشه و خاک اطراف حین آماده‌سازی ترانشه.

عمل تراکم هر لایه به وسیله‌ی کوبش با یک چکش لاستیکی به‌صورت ضربه‌یی و یکنواخت بر روی یک صفحه‌ی فلزی به ابعاد 20×20 سانتی‌متر در طول ترانشه انجام شد. در صورت وجود لایه‌ی تسلیح (کیسه خاک)، پس از رسیدن به تراز موردنظر و قرار دادن کیسه یا کیسه‌های خاک در آن تراز، کیسه‌ی خاک با استفاده از چکش لاستیکی جهت دستیابی به وزن مخصوص $19/1 \pm$ کیلونیوتن بر مترمکعب متراکم شد (مطابق شکل ۴). سپس با توجه به عمق قرارگیری کیسه‌ی خاک، لایه‌های خاک روی آن تا رسیدن به سطح ترانشه متراکم شدند. پس از آماده شدن ترانشه و قرار دادن صفحه‌ی بارگذاری صلب بر مرکز بستر و نصب حسگرهای موردنظر (حسگر اندازه‌گیری تغییرشکل سطح و اندازه‌گیری بار)، سیستم آماده‌ی بارگذاری شده است.

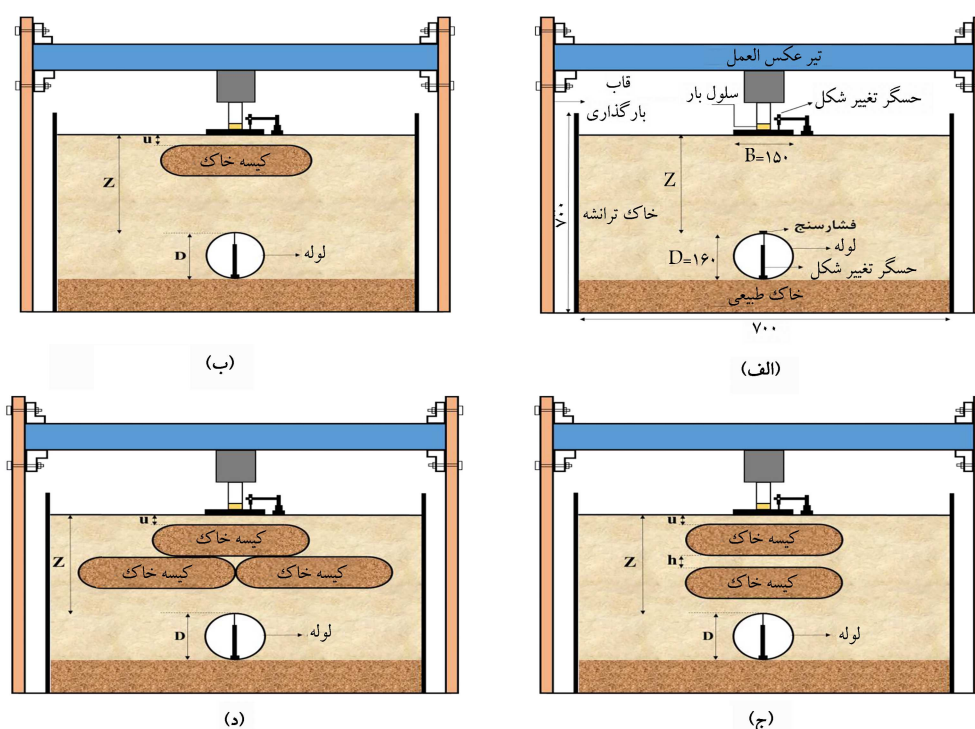
۳.۳. ابعاد صفحه‌ی بارگذاری و نوع بارگذاری روی آن

از آنجا که در پژوهش حاضر، بررسی رفتار لوله‌ی مدفون در بستر مسلح با کیسه‌ی خاک تحت بار معادل ترافیک چرخ و سائط نقلیه مدنظر بوده است، لذا ابعاد صفحه‌ی بارگذاری براساس سطح تماس چرخ و سائط نقلیه تعیین شده است. با توجه به مطالعات بریتو^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۹)،^[۳۲] صفحه‌ی بارگذاری جهت شبیه‌سازی سطح تماس چرخ و سائط نقلیه‌ی نیمه‌سنگین تا سنگین به‌صورت دایره‌یی با قطر بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و تنش ناشی از بار چرخ و سائط نقلیه‌ی نیمه‌سنگین و سنگین به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال توصیه شده است. استاندارد ۹ - ASTM D۱۱۹۵^[۳۳]، انجام آزمایش بارگذاری صفحه تحت بار تکراری و استاندارد ۱۲ - ASTM D۱۱۹۶^[۳۴]، انجام آزمایش بارگذاری صفحه تحت بار غیرتکراری استاتیکی را جهت ارزیابی رفتار

جدول ۲. برنامه و مشخصات آزمایش‌ها روی لوله‌ی مدفون در ترانشه‌های غیرمسلح و مسلح با کیسه‌ی خاک.

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

* آزمایش‌های تکراری



شکل ۵. طرح شماتیک آزمایش‌های سری.

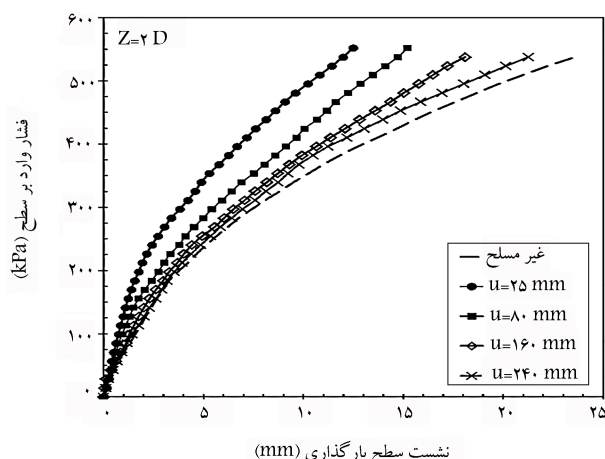
۵. نتایج و بحث

۵.۱. اثر عمق مدفون لوله در ترانشه‌ی غیرمسلح

در شکل ۶، تغییرات نشست سطح بارگذاری با فشار وارد بر سطح ترانشه برای لوله‌ی مدفون در سه عمق مختلف در ترانشه‌ی غیرمسلح مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش فشار وارد بر سطح ترانشه از همان ابتدا نشست سطح بارگذاری صرف‌نظر از عمق مدفون لوله افزایش یافته است، اما با افزایش عمق مدفون لوله، در میزان مشخص از فشار، مقدار نشست سطح خاک کاهش یافته است. 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 کاهش یافته است. علت این امر دور شدن لوله از سطح بستر یا به عبارتی، دور شدن از حوزه‌ی تأثیر تنش‌های وارد بر سطح بستر است.

در شکل ۷، تغییرات کرنش قائم قطر لوله (نسبت تغییر در قطر قائم لوله به

به منظور بررسی رفتار لوله‌ی مدفون و درک بهتر از اثر کیسه‌ی خاک در رفتار سیستم مرکب خاک - کیسه‌ی خاک - لوله، نتایج آزمایش‌ها ارائه و تحلیل شده‌اند. 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 بوده است. آیین‌نامه‌ی (AASHTO ۲۰۱۰)^[۳۰] میزان مجاز کرنش قطر قائم لوله‌های انعطاف‌پذیر را جهت جلوگیری از ایجاد پدیده‌ی کمانش در آنها به ۰.۵٪ و آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC^[۳۶] برای عدم بروز هرگونه آسیب در بدنه‌ی لوله، میزان آن را به ۰.۲٪ محدود کرده است. همچنین جهت دوام و عمر بیشتر لوله‌ها و نیز کاهش هزینه‌ی نگهداری و ترمیم آنها، توصیه به محدود ساختن کرنش قطر لوله به مقادیر هر چه کمتر از ۰.۲٪ شده است.^[۸۳]

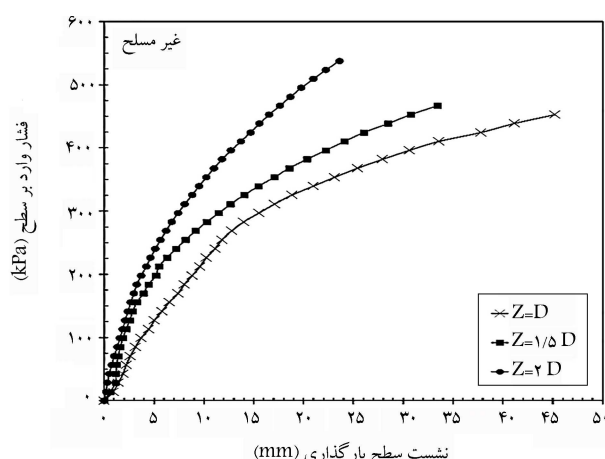


شکل ۸. تغییرات نشست سطح بستر با فشار وارد بر سطح ترانشه برای بسترهای غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک در ۴ عمق مدفون: ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر و لوله‌ی مدفون در عمق ۲D.

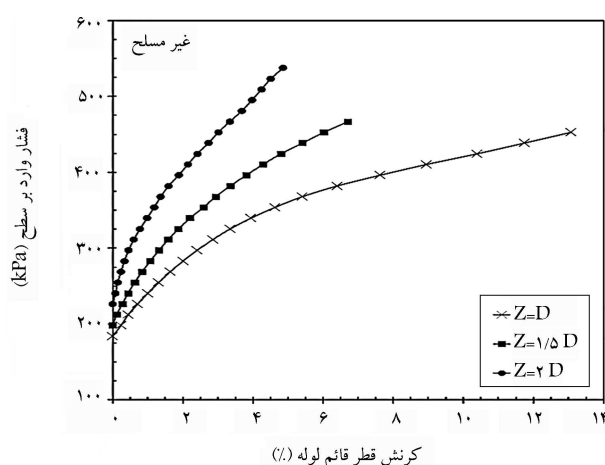
وقوع تغییرشکل در لوله، میزان تنش انتقال یافته بر روی لوله، باید به یک میزان کمینه برسد. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهند که علی‌رغم کاهش کرنش قطر قائم لوله با افزایش عمق مدفون لوله، همچنان مقدار آن در عمق ۲D و فشار بیشتر از ۴۰۰ کیلوپاسکال بیش از ۲٪ است، که این امر مبین لزوم بهبود رفتار سیستم است.

۲.۵. اثر عمق مدفون کیسه خاک

همان‌طور که در بخش قبل ملاحظه شد، 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 می‌شود. لذا جهت اجتناب از این امر و تأمین ایمنی بیشتر لوله‌های مدفون، استفاده از تسلیح خاک روی لوله‌ی مدفون با ژئوسنتتیک‌ها، نظیر: ژئوگرید، ژئوتکستایل، یا ژئوسل توصیه شده است.^[۹-۱۱] با توجه به عملکرد مناسب کیسه‌ی خاک در بهبود باربری بستر،^[۱۲-۱۳] استفاده از آن به‌عنوان لایه‌ی تسلیح سه‌بعدی و ایجاد عملکرد محدودکنندگی توده‌ی خاک محصور در خود، در کاربردهای مختلف مدنظر است. به‌منظور تعیین عمق مدفون مناسب کیسه‌ی خاک، ۴ آزمایش برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک، واقع در اعماق ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر (شکل ۵ - ب) انجام شده است. در شکل ۸، تغییرات نشست سطح بستر در مقابل فشار وارد بر سطح برای ۴ عمق مدفون مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش عمق مدفون کیسه‌ی خاک، نشست سطح بارگذاری افزایش یافته و منحنی تغییرات به سمت منحنی ترانشه‌ی غیرمسلح حرکت کرده است. به‌طوری که در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال در حالت کیسه‌ی مدفون در عمق‌های ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر، میزان نشست سطح به ترتیب ۶/۸، ۹/۳، ۱۱/۴ و ۱۱/۸ میلی‌متر بوده است. با افزایش عمق مدفون کیسه‌ی خاک به‌علت کاهش سختی ترانشه زیر سطح بارگذاری (افزایش ضخامت لایه‌ی خاک روی کیسه‌ی خاک و دور شدن کیسه‌ی خاک از حوزه‌ی تنش بیشینه)، ناحیه‌ی نشست‌پذیر زیر سطح بارگذاری توسعه می‌یابد. بنابراین استفاده از کیسه‌ی خاک در فاصله‌ی نزدیک به سطح بارگذاری می‌تواند منجر به کنترل نشست سطح بستر شود. به هر حال پوشش ۲۵ میلی‌متر به‌عنوان ضخامت مناسب خاک روی کیسه می‌تواند علاوه بر توزیع یکنواخت تنش روی کیسه‌ی خاک، نقش محافظ کیسه در برابر اشعه‌ی



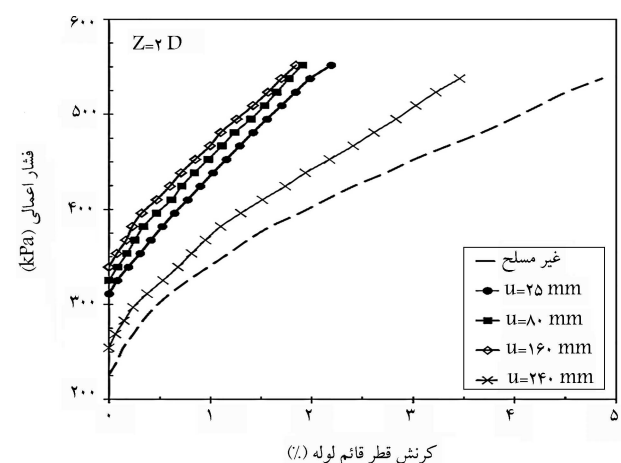
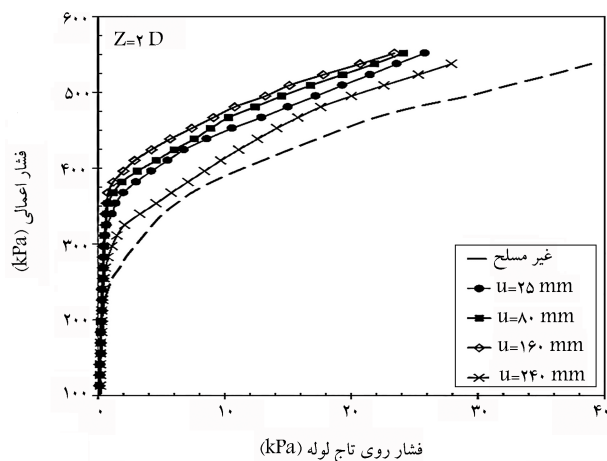
شکل ۶. تغییرات نشست سطح بستر با فشار وارد بر سطح ترانشه‌ی غیرمسلح برای لوله‌ی مدفون در سه عمق D، ۱/۵D و ۲D.



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

قطر لوله بر حسب درصد) در مقابل فشار وارد بر سطح برای لوله‌ی مدفون در سه عمق مختلف در ترانشه‌ی غیرمسلح مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش عمق مدفون، میزان کرنش قطر قائم لوله به نحو چشمگیری کاهش یافته است، که به دلیل کاهش میزان تنش منتقل شده به تاج لوله، هم‌زمان با افزایش عمق مدفون آن است.^[۱۴]

مطابق شکل اخیر، 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،^[۱۶] و AASHTO (۲۰۱۰)^[۱۷]) تجاوز کرده است. این امر می‌تواند سبب صدمه‌ی جدی به لوله‌ی مدفون یا حتی شکست آن شود. همچنین با افزایش عمق مدفون لوله به میزان ۲ برابر قطر آن ($Z = 2D$)، کرنش قطر قائم لوله در میزان فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح بستر به حدود ۲٪ رسیده است، که مطابق آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC،^[۱۶] درآستانه‌ی بروز آسیب در بدنه‌ی لوله قرار گرفته است. نکته‌ی قابل توجه و حائز اهمیت در شکل ۷، عدم وقوع تغییرشکل در لوله تا رسیدن میزان فشار بر سطح ترانشه به یک مقدار کمینه است. این مقدار از فشار برای لوله‌ی مدفون در عمق‌های D، ۱/۵D و ۲D به ترتیب حدود ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوپاسکال است. به عبارت دیگر، برای



شکل ۹. تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح برای بسترهای غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک در ۴ عمق مدفون: ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D.

شکل ۱۰. تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح برای بسترهای غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک در ۴ عمق مدفون: ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D.

کیلوپاسکال بوده است. کاهش فشار روی تاج لوله می‌تواند به علت توزیع بار در اعماق پایین‌تر توسط کیسه‌ی خاک باشد.

در مجموع مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، با افزایش عمق مدفون کیسه‌ی خاک به ۱۶۰ میلی‌متر، میزان تغییرشکل لوله و فشار روی آن، کاهش مناسبی داشته است. این امر می‌تواند به علت توزیع فشار روی لوله ناشی از کیسه‌ی خاک باشد. به عبارت دیگر، وجود کیسه‌ی خاک در نزدیکی لوله از حرکت توده‌ی خاک و اعمال تنش زیاد بر لوله جلوگیری می‌کند، بنابراین قرار گرفتن کیسه‌ی خاک در نزدیکی لوله‌ی مدفون می‌تواند در کنترل تغییرشکل لوله و در نتیجه کاهش صدمه و آسیب به آن مؤثر باشد. لیکن قرار گرفتن مستقیم کیسه‌ی خاک روی لوله و بدون وجود لایه‌ی خاک بین آنها سبب افزایش فشار به لوله می‌شود.

با توجه به اینکه قرار گرفتن کیسه‌ی خاک در اعماق نزدیک به لوله سبب افزایش نشست سطح به میزان قابل ملاحظه‌ی می‌شود، بنابراین استفاده از کمین‌ی پوشش خاک روی کیسه‌ی خاک علاوه بر محافظت از آن، نقش مهمی در کنترل نشست سطح و تغییرشکل لوله دارد. بنابراین در آزمایش‌های آتی، عمق مدفون کیسه‌ی خاک برابر ۲۵ میلی‌متر (میلی‌متر ۲۵) در نظر گرفته شده است. همچنین وجود کیسه‌ی خاک در نزدیکی لوله (در مطالعه‌ی حاضر قرار گرفتن در عمق ۱۶۰ میلی‌متر)، تأثیر مناسبی در کاهش تغییرشکل لوله داشته است. لذا استفاده از دو لایه کیسه‌ی خاک، یکی در نزدیکی سطح ترانشه، جهت کنترل نشست سطح و دیگری در نزدیکی لوله، جهت کنترل تغییرشکل لوله می‌تواند مفید باشد.

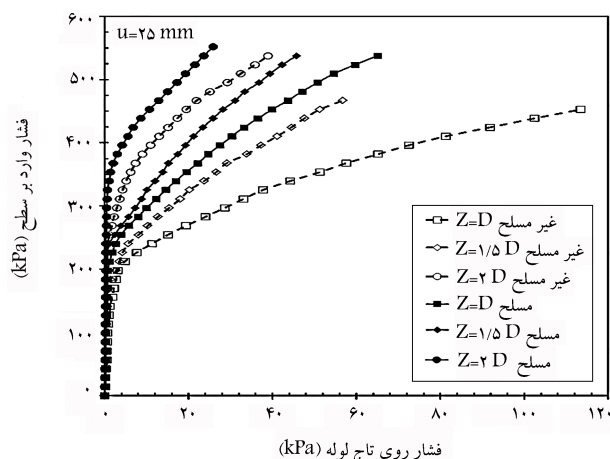
۳.۵. اثر عمق مدفون لوله در ترانشه‌ی مسلح با کیسه‌ی خاک

به منظور بررسی اثر عمق مدفون لوله در ترانشه‌ی مسلح، سه آزمایش (شکل ۵ - ب) روی لوله‌ی مدفون در اعماق D، ۱/۵D و ۲D در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک واقع در عمق ۲۵ میلی‌متر از سطح بارگذاری (سطح ترانشه) انجام شده است. در شکل ۱۱، مقایسه‌ی تغییرات نشست سطح بستر در مقابل فشار وارد بر سطح برای لوله‌ی مدفون در سه عمق D، ۱/۵D و ۲D در دو حالت ترانشه‌ی غیرمسلح و مسلح با کیسه‌ی خاک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، صرف‌نظر از عمق مدفون لوله، استفاده از لایه‌ی کیسه‌ی خاک سبب کاهش قابل توجه در میزان نشست سطح بستر نسبت به حالت غیرمسلح شده است. در واقع، کیسه‌ی خاک

فرابنفش خورشید و جلوگیری از پارگی آن در برابر عبور ترافیک را نیز ایفا کند.^[۲۱] در شکل ۹، تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک در ۴ عمق مدفون ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش عمق مدفون کیسه‌ی خاک تا ۱۶۰ میلی‌متر، کرنش قطر قائم لوله کاهش یافته است. اما با قرار گرفتن کیسه‌ی خاک در عمق ۲۴۰ میلی‌متر (دقیقاً روی لوله)، میزان آن افزایش قابل توجهی یافته است. به عنوان مثال، در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال در حالت کیسه‌ی مدفون در عمق‌های ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر، میزان کرنش قطر قائم لوله، به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۵۲، ۰/۳۶ و ۱/۳۵ درصد بوده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از کیسه‌ی خاک به عنوان لایه‌ی تسلیح در اعماق مختلف ۲۵ تا ۱۶۰ میلی‌متر سبب کنترل تغییرشکل قطر قائم لوله به کمتر از مقدار مجاز جهت بروز هرگونه آسیب در بدنه‌ی لوله ۲٪ در آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC^[۳۶] شده است.

همچنین، قرار گرفتن کیسه‌ی خاک دقیقاً روی لوله (میلی‌متر ۲۴۰) موجب بروز تغییرشکل قابل توجه در لوله شده است، به طوری که در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، میزان کرنش قطر قائم لوله به ۱/۳٪ رسیده است، که این میزان در مقایسه با حالت‌های دیگر قرار گرفتن کیسه‌ی خاک در عمق‌های کمتر، بیشتر بوده است. این امر می‌تواند به علت وقوع برش سوراج‌کننده در توده‌ی خاک روی کیسه و اعمال مستقیم فشار به لوله از طریق کیسه باشد. به عبارتی، قرار گرفتن مستقیم کیسه‌ی خاک روی لوله، مانع از توزیع مناسب بار و کاهش فشار وارد بر لوله می‌شود. بنابراین عدم قرارگیری کیسه‌ی خاک دقیقاً روی لوله و به عبارتی وجود توده‌ی خاک بین کیسه‌ی خاک و لوله ضروری است.

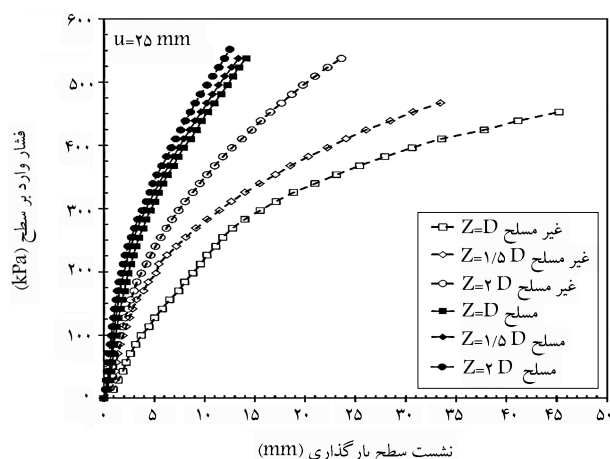
در شکل ۱۰، تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک در ۴ عمق مدفون ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر از سطح بستر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، فشار روی تاج لوله با افزایش عمق مدفون کیسه‌ی خاک تا ۱۶۰ میلی‌متر کاهش یافته است، اما با رسیدن عمق مدفون کیسه به ۲۴۰ میلی‌متر میزان آن زیاد شده است. مقدار فشار روی تاج لوله در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال برای کیسه‌ی مدفون در عمق‌های ۲۵، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۴/۵، ۳/۲، ۲/۱ و ۸/۶



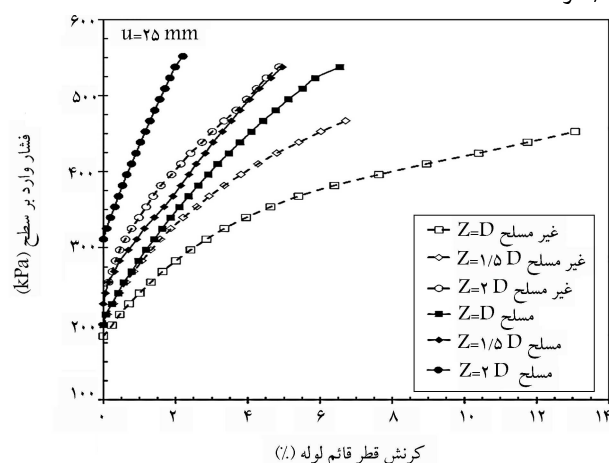
شکل ۱۳. تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه در حالت‌های غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک برای لوله‌ی مدفون در سه عمق: D، ۱/۵D و ۲D.

غیرمسلح و مسلح با کیسه‌ی خاک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تحت فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح بستر، استفاده از لایه‌ی کیسه‌ی خاک، موجب کاهش کرنش قطر قائم لوله به ترتیب حدود ۶۳، ۳۸ و ۶۵ درصد نسبت به ترانشه‌ی غیرمسلح برای لوله‌ی واقع در سه عمق مدفون D، ۱/۵D و ۲D شده است. کاهش کرنش قطر قائم لوله به علت وجود لایه‌ی کیسه‌ی خاک، عملکرد محصورکنندگی آن و توزیع بار در سطح گسترده‌تر (کاهش تنش انتقالی به روی لوله) بوده است. مقدار کرنش قطر قائم لوله در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک برای لوله در عمق مدفون ۲D در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال برابر ۰/۷٪ بوده است، که با توجه به آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC، [۲۶] آسیمی به بدنه‌ی لوله وارد نمی‌شود. در حالی که این مقدار در ترانشه‌ی غیرمسلح حدود ۲٪ است. بنابراین می‌توان جهت جلوگیری از آسیب به لوله‌ی مدفون و ایمنی بیشتر آن، علاوه بر افزایش عمق مدفون لوله، از لایه‌ی کیسه‌ی خاک استفاده کرد. لازم به ذکر است که برخلاف عدم تأثیر قابل توجه عمق مدفون لوله در نشست سطح خاک در ترانشه‌ی مسلح، عمق مدفون لوله در حالت وجود کیسه‌ی خاک در میزان تغییرشکل لوله تأثیر قابل توجهی دارد. پژوهشگران پیشین در مطالعات خود روی رفتار لوله در ترانشه‌ی مسلح با ژئوسل (لایه‌ی تسلیح سه‌بعدی مشابه کیسه‌ی خاک) عملکرد مشابهی از تأثیر لایه‌ی تسلیح در کاهش تغییرشکل لوله و نشست بستر را گزارش کرده‌اند. [۲۷-۲۹] همچنین تأثیر قابل ملاحظه‌ی کیسه‌ی خاک در بهبود عملکرد سیستم لوله‌ی مدفون، مشابه تأثیر آن در بهبود ظرفیت باربری بستر در مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)، [۱۹] و نگ و همکاران (۲۰۱۹) [۲۰] و لیو و همکاران (۲۰۲۰) [۲۱] بوده است.

در شکل ۱۳، تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه برای لوله‌ی واقع در سه عمق مدفون D، ۱/۵D و ۲D در دو حالت ترانشه‌ی غیرمسلح و مسلح مقایسه شده است. مقادیر فشار برای ترانشه‌ی غیرمسلح روی تاج لوله در تراز فشار وارد بر سطح ۴۰۰ کیلوپاسکال برای لوله‌ی مدفون در سه عمق D، ۱/۵D و ۲D به ترتیب حدود ۷۴، ۳۴ و ۱۱ کیلوپاسکال بوده است. با استفاده از رابطه‌ی بوسینسک [۲۷]، (۱۸۸۵)، تنش قائم در زیر مرکز یک سطح بارگذاری دایره‌ای، مقدار فشار در عمق موردنظر (روی لوله) در حالت فشار وارد بر سطح ۴۵۰ کیلوپاسکال در سه عمق مدفون D، ۱/۵D و ۲D به ترتیب حدود ۱۰۳،



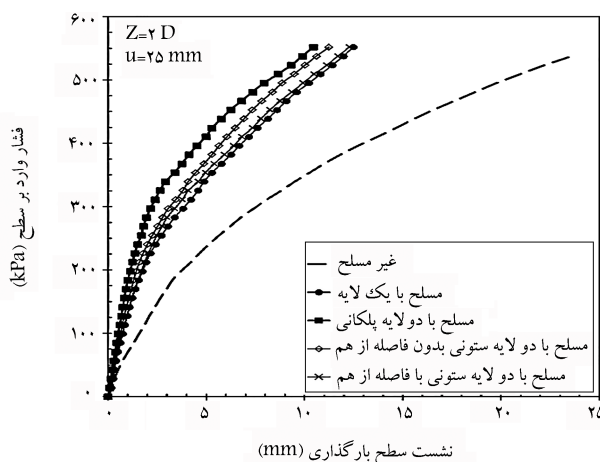
شکل ۱۱. تغییرات نشست سطح بستر با فشار وارد بر سطح ترانشه در حالت‌های غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک برای لوله‌ی مدفون در سه عمق: D، ۱/۵D و ۲D.



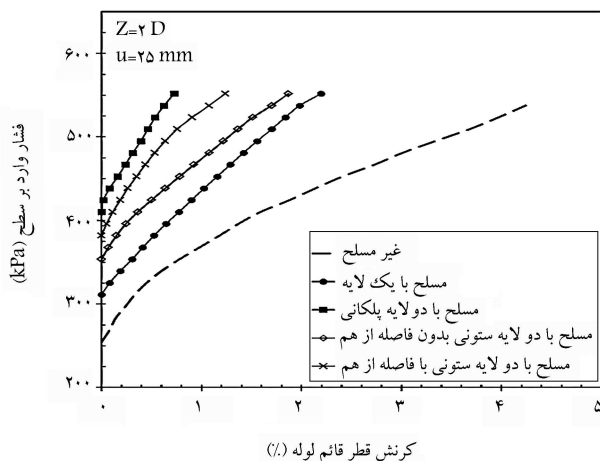
شکل ۱۲. تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه در حالت‌های غیرمسلح و مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک برای لوله‌ی مدفون در سه عمق: D، ۱/۵D و ۲D.

با محصور کردن خاک داخل خود و کاهش تنش در عمق، از نشست لایه‌های فوقانی خاک و در نتیجه حرکت توده‌ی خاک بالای لوله جلوگیری می‌کند. مطابق شکل ۱۱، میزان کاهش در نشست در مقایسه با حالت غیرمسلح در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح برای لوله‌ی مدفون در عمق‌های D، ۱/۵D و ۲D به ترتیب حدود ۷۴، ۶۶ و ۴۷ درصد بوده است. این مقادیر کاهش مبین آن است که با افزایش عمق مدفون لوله، علی‌رغم بهبود در رفتار سیستم، تأثیر تسلیح با کیسه‌ی خاک (نسبت به ترانشه‌ی غیرمسلح) کاهش یافته است. همچنین ملاحظه می‌شود که افزایش عمق مدفون لوله، در کاهش میزان نشست سطح بستر در حالت ترانشه‌ی مسلح در مقایسه با ترانشه‌ی غیرمسلح محسوس نیست. این تذکر لازم است که انتظار می‌رود با افزایش تراز فشار وارد بر سطح، عمق مدفون لوله در ترانشه‌ی مسلح تأثیرگذارتر شود. به عبارتی می‌توان گفت با وجود لایه‌ی کیسه‌ی 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.

در شکل ۱۲، تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح ترانشه برای لوله‌ی واقع در سه عمق مدفون D، ۱/۵D و ۲D در دو حالت ترانشه‌ی



شکل ۱۴. تغییرات نشست سطح بستر با فشار وارد بر سطح ترانسه برای بسترهای غیرمسلح و مسلح با یک و دو لایه کیسه‌ای خاک (پلکانی و ستونی) برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D.



شکل ۱۵. تغییرات کرنش قطر قائم لوله با فشار وارد بر سطح برای بسترهای غیرمسلح و مسلح با یک و دو لایه کیسه‌ای خاک (پلکانی و ستونی) برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D.

است. این مقادیر از کرنش قطر قائم لوله بسیار پایین‌تر از مقدار مجاز آن جهت بروز هرگونه آسیب در بدنه‌ی لوله (۲٪) در آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC^[۲۶] بوده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، قرار گرفتن کیسه‌های خاک به صورت ستونی سبب کاهش تغییرشکل لوله شده است. در حالت مسلح با دو لایه‌ی ستونی از کیسه‌ی خاک بدون فاصله از هم در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، کرنش قائم لوله برابر ۳٪ بوده است، که با نزدیک شدن کیسه‌ی خاک به لوله (حالت ستونی با فاصله از هم) کرنش قائم لوله در این فشار به حدود ۱٪ کاهش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اگرچه استفاده از دو لایه‌ی ستونی از کیسه‌ی خاک با فاصله از هم در مقایسه با یک لایه کیسه‌ی خاک، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در کاهش نشست بستر ندارد، لیکن تأثیر زیادی در کاهش تغییرشکل لوله دارد. علت این امر، عملکرد کیسه‌ی نزدیک به لوله در توزیع بار در سطح گسترده‌تر و در نتیجه کاهش تراز تنش وارد بر تاج لوله است.

در شکل ۱۶، تغییرات فشار روی تاج لوله با فشار وارد بر سطح برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D در ترانسه‌های غیرمسلح و مسلح با یک و دو لایه کیسه‌ی خاک (پلکانی و ستونی) مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش تعداد لایه‌های

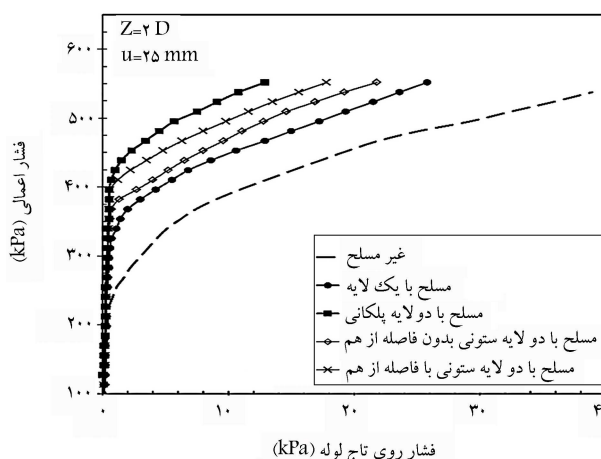
۵۲ و ۳۰ کیلوپاسکال محاسبه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر فشار اندازه‌گیری شده از آزمایش به ترتیب برای سه عمق مدفون D، ۱/۵D و ۲D برابر ۰/۷۲، ۰/۶۵ و ۰/۳۶ فشار حاصل از رابطه‌ی بوسینسک بوده است. کاهش فشار روی لوله در مقایسه با فشار حاصل از رابطه‌ی بوسینسک با افزایش عمق مدفون لوله را می‌توان به وجود لوله، وقوع پدیده‌ی قوس زدگی به علت تغییرشکل لوله و نشست توده‌ی خاک روی آن و رفتار خمیری خاک تحت بارهای وارده (برخلاف فرض رفتار کشسان در روش بوسینسک) نسبت داد.

در حالت وجود یک لایه کیسه‌ی خاک، فشار وارد بر لوله به میزان قابل توجهی نسبت به حالت غیرمسلح کاهش می‌یابد. در فشار وارد بر سطح ۴۰۰ کیلوپاسکال، برای لوله‌ی واقع در عمق D، ۱/۵D و ۲D، این میزان کاهش به ترتیب حدود ۴۶، ۱۴ و ۷ کیلوپاسکال نسبت به حالت غیرمسلح بوده است. علت این میزان کاهش، عملکرد محدودکنندگی خاک توسط کیسه و توزیع بار در سطح وسیع‌تر بوده است. این امر نشان می‌دهد که با افزایش عمق مدفون لوله، اگرچه همچنان کیسه‌ی خاک تأثیر قابل توجهی در رفتار لوله دارد، اما به هر حال از نرخ تأثیر آن در کاهش فشار کاسته شده است.

۴.۵. اثر تعداد لایه و چینش کیسه‌ی خاک در رفتار لوله‌ی مدفون

در بخش‌های قبل، اثر فقط یک کیسه‌ی خاک در رفتار لوله و نشست سطح بستر بررسی شده و نتایج نشان داده است که قرار گرفتن فقط یک کیسه‌ی خاک در عمق ۲۵ میلی‌متری (میلی‌متر ۲۵) موجب بروز کمترین نشست در سطح بارگذاری و قرار گرفتن یک کیسه‌ی خاک در عمق ۱۶۰ میلی‌متری (میلی‌متر ۱۶۰)، موجب وقوع کمترین تغییرشکل در لوله شده است. از این رو در بخش حاضر، اثر تعداد لایه و نحوه‌ی چینش کیسه‌های خاک روی یکدیگر به صورت ستونی و پلکانی بررسی شده است (شکل‌های ۵ - ج و ۵ - د) در خصوص دو لایه کیسه‌ی خاک ستونی با فاصله از هم، یک کیسه‌ی خاک در عمق ۲۵ میلی‌متری (میلی‌متر ۲۵) و یک کیسه‌ی خاک دیگر در عمق ۱۶۰ میلی‌متری (میلی‌متر ۱۶۰) قرار گرفتند. در شکل ۱۴، تغییرات نشست سطح در مقابل فشار وارد بر سطح برای لوله‌ی مدفون در عمق ۲D واقع در ترانسه‌های غیرمسلح و مسلح با یک لایه و دو لایه کیسه‌ی خاک با چینش ستونی با فاصله و بدون فاصله‌ی قائم و چینش پلکانی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، استفاده از دو لایه کیسه‌ی خاک با چینش ستونی و بدون فاصله از هم در مقایسه با چینش ستونی با فاصله از هم و همچنین یک لایه کیسه‌ی خاک، عملکرد بهتری در کاهش نشست سطح داشته است. همچنین، استفاده از چینش پلکانی دو لایه در مقایسه با چینش دو لایه‌ی ستونی با فاصله و بدون فاصله، عملکرد مناسب‌تری در کاهش نشست داشته است. به طوری که نشست در سه حالت اخیر در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۴/۶، ۵/۶ و ۵/۷ میلی‌متر (۱۹ و ۲۹ درصد کاهش) بوده است.

در شکل ۱۵، تغییرات کرنش قطر قائم لوله در مقابل فشار وارد بر سطح برای لوله‌ی واقع در عمق ۲D در ترانسه‌های غیرمسلح و مسلح با یک و دو لایه کیسه‌ی خاک (پلکانی و ستونی) مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش تعداد لایه‌های کیسه‌ی خاک به دو لایه، مقادیر کرنش قطر قائم لوله کاهش چشمگیری یافته است. همچنین استفاده از دو لایه‌ی پلکانی از کیسه‌ی خاک سبب کاهش تغییرشکل لوله به میزان قابل ملاحظه‌ی شده است. به عنوان مثال، برای دو لایه‌ی پلکانی از کیسه‌ی خاک در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، کرنش قائم لوله در حدود ۰٪ بوده است، که با افزایش فشار حتی به ۵۵۰ کیلوپاسکال، کرنش قائم لوله به حدود ۰/۷٪ رسیده



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

کیسه‌ی خاک، فشار در عمق و روی لوله به میزان اندکی منتقل شده است. در حالت استفاده از دو لایه‌ی پلکانی از کیسه‌ی خاک، در فشار ۴۰ کیلوپاسکال فشار به روی لوله منتقل نشده است. این حالت سبب بهبود عملکرد کیسه‌های خاک در کاهش نشست سطح و تغییرشکل لوله نسبت به حالت قرار گرفتن کیسه‌های خاک به صورت ستونی بدون فاصله و با فاصله از هم شده است. چینش پلکانی کیسه‌های خاک به دلیل فرورفتن ۱۶ کیسه‌ی فوقانی در کیسه‌های تحتانی سبب ایجاد مقاومت اصطکاکی بین لایه‌های تسلیج و در نتیجه افزایش باربری سیستم و کاهش تغییرشکل آن می‌شود. این عملکرد در مطالعات لیو و همکاران (۲۰۲۰) [۲۱] در خصوص استفاده از کیسه‌ی خاک جهت تسلیج بستر راه نیز گزارش شده است. همچنین با توجه به شکل مذکور، استفاده از دو لایه به صورت ستونی با فاصله از هم سبب کاهش فشار وارد بر تاج لوله نسبت به حالت قرارگیری دو لایه‌ی ستونی بدون فاصله از هم می‌شود. 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 ۳ و ۲ عدد است. لذا با توجه به عدم تفاوت قابل توجه بین خروجی دو چینش و تأمین ایمنی مناسب لوله، استفاده از چینش ستونی با یا بدون فاصله نیز می‌تواند مناسب باشد، در حالی که مصرف کیسه‌ی خاک، ۳۳٪ کمتر است.

۶. اثر مقیاس

معمولاً به علت وجود اثر مقیاس، رفتار مدل آزمایشگاهی کاملاً 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. [۳۸، ۳۹] وقتی آزمایش روی یک مدل در مقیاس کوچک (کاهش یافته) انجام می‌شود، لازم است تأثیر مقیاس با توجه به ضریب مقیاس مدل (λ)، به درستی روی پارامترهای مصالح (در مطالعه‌ی حاضر مدول برشی خاک، سختی لوله و سختی ژئوسنتتیک) و ابعاد هندسی (در مطالعه‌ی حاضر ابعاد صفحه‌ی بارگذاری، قطر لوله، کیسه‌ی خاک و ...) بررسی و اعمال شود. پژوهشگران مختلف اثر مقیاس روی مدل‌های آزمایشگاهی را جهت

تبدیل پارامترهای طراحی از مدل کوچک مقیاس به پارامترهای طراحی در مدل واقعی بررسی کرده‌اند. [۴۰، ۴۱]

در مطالعه‌ی حاضر، پارامترهای اصلی تأثیرگذار در رفتار مدل، شامل پارامترهای: $B, D, Z, b, d, h, u, S, \Delta, \gamma, G, K_p, K_g, q$ و ϕ هستند، که d و b به ترتیب عرض و ضخامت کیسه‌ی خاک، S و Δ به ترتیب نشست صفحه‌ی بارگذاری و تغییرشکل قطر قائم لوله، G مدول برشی خاک، K_p و K_g به ترتیب سختی ژئوسنتتیک (استفاده شده در تولید کیسه) و سختی لوله γ وزن مخصوص خاک، ϕ زاویه‌ی اصطکاک خاک و q فشار وارد بر صفحه‌ی بارگذاری هستند (سایر پارامترها در بخش‌های پیشین تعریف شده‌اند). از این رو، تابع f حاکم بر سیستم متغیرهای مذکور مطابق رابطه‌ی ۱ تعیین می‌شود:

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

علی‌رغم وجود تعداد ۱۵ متغیر در رابطه‌ی اخیر، مدل فقط شامل دو بُعد اولیه از نیرو (F) و طول (L) است. مطابق رابطه‌ی ۲، سیستم حاضر می‌تواند توسط ۱۳ پارامتر مستقل بی‌بعد بیان شود، که در آن، π_1 تا π_{13} نسبت باکینگهام برای ۱۳ پارامتر مستقل هستند.

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

که در آن، g تابع حاکم بر سیستم است. اگر نسبت بُعد صفحه‌ی بارگذاری در مدل واقعی (B_p) به مدل آزمایشگاهی (B_m) مطابق رابطه‌ی ۳ برابر با λ (ضریب مقیاس و اندیس‌های p و m به ترتیب مربوط به مدل واقعی و آزمایشگاهی هستند). فرض شود:

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

برای تضمین تشابه، باید نسبت‌های باکینگهام (π) در رابطه‌ی ۲ در مدل آزمایشگاهی واقعی یکسان باشند $((\pi_i)_p = (\pi_i)_m)$ بنابراین برای $i = 1$ تا ۸ می‌توان رابطه‌ی ۴ را 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 چگالی خاک در هر دو مدل و در نظر گرفتن $(\pi_9)_p = (\pi_9)_m$ و رابطه‌ی ۳، نسبت مدول برشی خاک (G) در مدل‌های واقعی و آزمایشگاهی مطابق رابطه ۵ خواهد شد:

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

به‌طور 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 مصالح ژئوسنتتیک در مدل واقعی باید λ^2 برابر مقادیر متناظر در مدل آزمایشگاهی باشند.

در نهایت برای $i = ۱۲$ و در نظر گرفتن $(\pi_{۱۲})_p = (\pi_{۱۲})_m$ مقدار تنش وارد بر سطح بارگذاری (تنش ناشی از بار چرخ و سائط نقلیه) در مدل واقعی خواهد شد:

$$\frac{(q)_p}{(q)_m} = \lambda \quad (۸)$$

در مدل آزمایشگاهی حاضر، رفتار لوله‌ی مدفون به قطر ۱۶۰ میلی‌متر با کاربرد زهکشی و دفع فاضلاب در ترانشه‌های غیرمسلح و مسلح با کیسه‌ی خاک بررسی شده است. از آنجا که قطر لوله‌های متداول برای کاربرد زهکشی و فاضلاب از حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر متغیر است، لذا بیشینه‌ی قطر لوله‌ی موردکاربرد در مقیاس واقعی D_p (در حیطه‌ی بررسی شده در پژوهش حاضر) می‌تواند ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب شود. همچنین همان‌طور که قبلاً بیان شد، در مطالعات حاضر بررسی رفتار سیستم تحت بار چرخ و سائط نقلیه مدنظر است، لذا از آنجا که بار ترافیک و سائط نقلیه‌ی سنگین وارد بر سطح ترانشه، ۸۰۰ کیلوپاسکال (کیلوپاسکال $q_p = ۸۰۰$) و قطر صفحه‌ی موردنظر به‌عنوان نماینده‌ی سطح تماس چرخ با سطح ترانشه ۳۰۰ میلی‌متر است،^[۲۱] لذا با توجه به بُعد صفحه‌ی بارگذاری، قطر لوله و تنش موردنظر در مطالعه‌ی آزمایشگاهی $\frac{B_p}{B_m} = \frac{D_p}{D_m} = \frac{q_p}{q_m} = ۲$ است. لذا، در محدوده‌ی مطالعات موردنظر و با توجه به قطر لوله، ابعاد صفحه‌ی بارگذاری و تنش وارد بر آن در مدل آزمایشگاهی، درخصوص مدل واقعی می‌توان گفت:

- در محدوده‌ی کاربرد برای لوله‌های زهکشی و دفع فاضلاب، قطر لوله در مدل واقعی حدود ۲ برابر مدل آزمایشگاهی یعنی ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب شود؛
- صفحه‌ی بارگذاری به‌عنوان نماینده‌ی سطح تماس چرخ و سائط نقلیه‌ی سنگین با سطح بستر ۳۰۰ میلی‌متر است؛
- عرض و ضخامت کیسه‌ی خاک برای صفحه‌ی بارگذاری به قطر ۳۰۰ میلی‌متر، به ترتیب ۶۰۰ و ۱۶۰ میلی‌متر هستند. در صورت لزوم می‌توان با قضاوت مهندسی به جای استفاده از یک کیسه‌ی خاک به عرض ۶۰۰ میلی‌متر، از دو کیسه‌ی خاک به عرض ۳۰۰ میلی‌متر در کنار یکدیگر و بدون فاصله استفاده کرد؛
- سختی لوله و سختی مصالح ژئوستنتیک (یا مقاومت کششی آن) در مدل واقعی نیز ۴ برابر مدل آزمایشگاهی انتخاب شوند؛
- لازم به ذکر است که علی‌رغم $\lambda = ۲$ برابر شدن مقادیر نشست سطح بارگذاری (S) و تغییر قطر قائم لوله (Δ) در مدل واقعی نسبت به مدل آزمایشگاهی، $\frac{(\Delta)_p}{(D)_p}$ ، $\frac{(S)_p}{(B)_p}$ نسبت و ثابت خواهند ماند.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از یک مدل فیزیکی، رفتار لوله‌ی مدفون در ترانشه‌های غیرمسلح و مسلح با کیسه‌ی خاک تحت بارگذاری استاتیکی با انجام آزمایش‌های مختلف بررسی شده و در آنها، تأثیر عمق مدفون لوله، اثر کیسه‌ی خاک به‌عنوان لایه‌ی تسلیح، عمق مدفون آن و اثر تعداد و چینش لایه‌ی تسلیح در ترانشه‌ی حاوی لوله‌ی مدفون در نشست سطح بارگذاری و رفتار لوله مدنظر بوده است. درخصوص نتایج به‌طور خلاصه می‌توان گفت:

- در ترانشه‌ی غیرمسلح تحت فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال وارد بر سطح ترانشه، با افزایش عمق مدفون لوله از D به ۲D، نشست سطح بارگذاری و میزان کرنش

قطر قائم لوله به ترتیب ۶۱ و ۷۵ درصد کاهش یافته‌اند؛ که به‌دلیل دور شدن لوله از محدوده‌ی تأثیر بار و کاهش میزان تنش منتقل شده به تاج لوله است. همچنین تغییرشکل لوله تا رسیدن میزان فشار وارد بر سطح ترانشه به یک مقدار کمینه (رسیدن تنش روی لوله به یک مقدار کمینه) رخ نمی‌دهد. این مقدار کمینه وابسته به عمق مدفون لوله و سختی خاک و لوله است؛

- استفاده از کیسه‌ی خاک در ترانشه‌ی حاوی لوله‌ی مدفون در عمق ۲D، موجب کاهش نشست سطح بارگذاری به میزان ۴۷٪ در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال شده است. سختی بالای کیسه‌ی خاک از تأثیر وجود لوله و نشست بستر به‌علت تغییرشکل لوله کاهش یافته است. همچنین افزایش عمق مدفون لوله در بستر مسلح با کیسه‌ی خاک، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در کاهش نشست سطح بارگذاری نداشته است؛
 - کیسه‌ی خاک با توزیع بار در سطح گسترده‌تر، موجب کاهش فشار روی لوله و در نتیجه تغییرشکل آن شده است؛ به‌طوری‌که کرنش قطر قائم لوله‌ی مدفون در عمق ۲D در ترانشه‌ی مسلح با یک لایه کیسه‌ی خاک در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، ۷٪/۰ بوده است. این مقدار از ۲٪/۰ کرنش موردنظر در آیین‌نامه لوله‌های PVC،^[۲۶] برای عدم بروز هرگونه آسیب در بدنه‌ی لوله کمتر بوده است. بنابراین، با افزایش توأم عمق مدفون لوله و تسلیح ترانشه‌ی حاوی لوله با کیسه‌ی خاک می‌توان از عملکرد مناسب لوله در هنگام بهره‌برداری اطمینان حاصل کرد؛
 - افزایش عمق قرارگیری کیسه‌ی خاک سبب افزایش نشست سطح بستر به‌علت کاهش سختی ناحیه‌ی زیر سطح بارگذاری شده است. بنابراین جهت کنترل نشست سطح بستر، لازم است کیسه‌ی خاک تا حد امکان زیر سطح بارگذاری قرار گیرد. استفاده از لایه‌ی نازک خاک به ضخامت ۲۵ میلی‌متر روی کیسه‌ی خاک می‌تواند نقش محافظ کیسه را ایفا کند؛
 - در تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال، افزایش عمق مدفون کیسه‌ی خاک از ۲۵ میلی‌متر به ۱۶۰ میلی‌متر سبب کاهش تغییرشکل و فشار وارد بر تاج لوله به ترتیب به میزان ۴۷ و ۵۳ درصد شده است. این امر می‌تواند به‌علت توزیع بار در اعماق پایین‌تر توسط کیسه‌ی خاک و در نتیجه کاهش فشار روی لوله باشد. بنابراین قرارگرفتن کیسه‌ی خاک در اعماق مدفون بیشتر و نزدیک به لوله‌ی مدفون می‌تواند سبب کنترل تغییرشکل لوله و در نتیجه کاهش صدمه و آسیب به آن شود. لیکن قرارگیری آن روی لوله سبب اعمال فشار به لوله توسط کیسه و در نتیجه افزایش تغییرشکل لوله می‌شود؛
 - چینش ستونی دو لایه کیسه‌ی خاک با فاصله، عملکرد بهتری در بهبود رفتار لوله در مقایسه با چینش دو لایه‌ی ستونی بدون فاصله (کاهش ۸۰ درصدی تغییرشکل لوله در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال) دارد؛
 - استفاده از دو لایه کیسه‌ی خاک با چینش پلکانی سبب کاهش نشست سطح، فشار وارد بر لوله و تغییرشکل آن در مقایسه با چینش دو لایه کیسه‌ی خاک ستونی شده است. به‌طوری‌که در این حالت در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، فشار وارد بر تاج لوله و تغییرشکل آن تقریباً صفر بوده است. اما با توجه به عدم تفاوت محسوس بین رفتار دو چینش پلکانی و ستونی (با یا بدون فاصله)، استفاده از سیستم ستونی با ۳۳٪ صرفه‌جویی در کیسه‌ی خاک توصیه می‌شود.
- این تذکر لازم است که اگرچه می‌توان با اعمال اثر مقیاس، نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر را با احتیاط و قضاوت مهندسی در مقیاس واقعی (بار ترافیک و سائط نقلیه‌ی سنگین، بُعد صفحه‌ی بارگذاری به قطر ۳۰۰ میلی‌متر و لوله به

قطر ۳۰۰ میلی‌متر با کاربرد زهکشی و فاضلاب استفاده کرد، اما مشابه هر مطالعه‌ی آزمایشگاهی، محدودیت‌هایی دارد. در آزمایش‌های مذکور، فقط یک نوع خاک، یک جنس و قطر لوله، یک اندازه (عرض و ارتفاع) و یک جنس از کیسه استفاده شده است، لذا نتایج حاصل محدود به شرایط اخیر است و انجام مطالعات آتی روی انواع خاک، لوله و کیسه‌ی خاک و نوع بارگذاری تکراری مفید خواهد بود.

علائم اختصاری

D : قطر خارجی لوله؛

Z : عمق مدفون لوله؛

B : عرض صفحه‌ی بارگذاری؛

u : عمق مدفون کیسه‌ی خاک؛
 h : فاصله‌ی دو لایه کیسه‌ی خاک؛
 b : عرض کیسه‌ی خاک؛
 d : ضخامت کیسه‌ی خاک؛
 S : نشست سطح بارگذاری؛
 Δ : تغییر شکل لوله؛
 γ : وزن مخصوص خاک؛
 G : مدول برشی خاک؛
 K_g : سختی ژئوسنتتیک؛
 K_P : سختی لوله؛
 ϕ : زاویه‌ی اصطکاک خاک؛
 q : فشار وارد بر صفحه‌ی بارگذاری؛
 λ : ضریب مقیاس.

پانوشته‌ها

1. Arching
2. Hegde & Sitharam
3. Soilbags
4. Matsuoka & Liu
5. Zhang
6. Wang
7. Liu
8. Castiglia
9. Unified Classification System
10. Well-Graded Sand
11. Unplasticised Poly Vinyl Chloride
12. Polypropylene
13. Brito
14. Hsieh & Mao
15. Boussinesq
16. Insertion

منابع (References)

1. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Khalaj, O., 2008. Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated-load. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(2), pp.145-163. doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.06.002.
2. El Naggar, H., Turan, A. and Valsangkar, A., 2015. Earth pressure reduction system using geogrid-reinforced platform bridging for buried utilities. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(6), 04015024. doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001307.
3. Azizian, M., Moghaddas Tafreshi, S.N. and Joz Darabi, N., 2020. Experimental evaluation of an expanded polystyrene (EPS) block-geogrid system to protect buried pipes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129, 105965. doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105965.
4. Babagiray, G., Akbas, S.O. and Anil, O., 2023. Full-Scale field impact load experiments on buried pipes in geosynthetic-reinforced soils. *Transportation Geotechnics*, 38, 100927. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100927.
5. Bildik, S. and Laman, M., 2020. Effect of geogrid reinforcement on soil-structure-pipe interaction in terms of bearing capacity, settlement and stress distribution. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(6), pp.844-853. https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2020.07.004.
6. Pires, A.C. and Palmeira, E.M., 2021. The influence of geosynthetic reinforcement on the mechanical behaviour of soil-pipe systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), pp. 1117-1128. doi.org/10.1016/j.geotextmem.2021.03.006.
7. Tavakoli Mehrjardi, G.H., 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*, 34, pp.116-130. doi.org/10.1016/j.geotextmem.2012.05.004.
8. Moghaddas Tafreshi, S.N., Darabi, N.J. and Dawson, A.R., 2020. Combining EPS geofoam with geocell to reduce buried pipe loads and trench surface rutting. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(3), pp.400-418. doi.org/10.1016/j.geotextmem.2019.12.011.
9. Hegde, A.M. and Sitharam, T.G., 2015. Experimental and numerical studies on protection of buried

- pipelines and underground utilities using geocells. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), pp.372-381. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.010.
10. Wang, Y.Q., Li, Y.L., Liu, K., Li, X. and Yang, F., 2022. Slope displacement and soil pressure of soilbag-retaining wall influenced by arrangement. *Geosynthetics International*, 30(3), pp.247-258. doi.org/10.1680/jgein.21.00041a.
11. Liu, S., Gao, C., Fan, K., Zhang, C., Wang, Z., Shen, C. and Han, Z., 2022. Repairing expansive soil channel slope with soilbags. *Geosynthetics International*, pp.1-10. doi.org/10.1680/jgein.22.00254.
12. Lai, Z., Jiang, E., Fan, K., Liu, S. H., and Wang, Y., 2023. Full-scale tests on soilbag-constructed retaining walls with a panel. *Geosynthetics International*, 30(2), pp.129-136. doi.org/10.1680/jgein.21.00093.
13. Xu, Y., Huang, J., Du, Y. and Sun, D. A., 2008. Earth reinforcement using soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), pp.279-289. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.10.003.
14. Ye, B., Muramatsu, D., Ye, G.L. and Zhang, F., 2011. Numerical assessment of vibration damping effect of soilbags. *Geosynthetics International*, 18(4), pp.159-168. doi.org/10.1680/jgein.2011.18.4.159.
15. Liu, S.H., Gao, J.J., Wang, Y.Q. and Weng, L.P., 2014. Experimental study on vibration reduction by using soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(1), pp.52-62. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.007.
16. Ding, G., Wu, J., Wang, J. and Hu, X., 2017. Effect of sand bags on vibration reduction in road subgrade. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, pp. 529-537. doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.007.
17. Wang, Y.Q., Li, X., Liu, K. and Liu, G., 2019. Experiments and DEM analysis on vibration reduction of soilbags. *Geosynthetics International*, 26(5), pp.551-562. doi.org/10.1680/jgein.19.00045.
18. Matsuoka, H. and Liu, S., 2003. New earth reinforcement method by soilbags ("donow"). *Soils and Foundations*, 43(6), pp.173-188. doi.org/10.3208/sandf.43.6.173.
19. Zhang, C., Liao, J., Zhang, Y. and Wang, L., 2023. Plate load tests of sSoft foundations reinforced by soilbags with solid wastes for wind farms. *Materials*, 16(11), p.4173. doi.org/10.3390/ma16114173.
20. Wang, L., Liu, S., Liao, J. and Fan, K., 2019. Field load tests and modelling of soft foundation reinforced by soilbags. *Geosynthetics International*, 26(6), pp.580-591. doi.org/10.1680/jgein.19.00036.
21. Liu, S.H., Liao, J., Bong, T.T. and Fan, K.W., 2021. Repeated loading of soilbag-reinforced road subgrade. *Geosynthetics International*, 28(2), pp.113-124. doi.org/10.1680/jgein.20.00030.
22. Castiglia, M., de Magistris, F.S., Onori, F. and Koseki, J., 2021. Mitigation systems for the uplift of buried pipelines in liquefiable soils under repeated shaking through model tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 148, 106850. doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106850.
23. American Society for Testing and Materials (ASTM)., 2011. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D2487-11. DOI: 10.1520/D2487-11.
24. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014. Standard practice for underground installation of thermoplastic pipe for sewers and other gravity-flow applications. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D2321-14. DOI: 10.1520/D2321-14.
25. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D1557-12. DOI: 10.1520/D1557-12.
26. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D854-14. DOI:10.1520/D0854-14.
27. Institute of standard and Institute of Research of Iran. 2010. Plastic-Unplasticized Poly (Vinyle Choride) (PVC-U), Fittings and Piping systems for non Pressure Underground Drainage and Swerage Specifcaton. ISIRI-9118. [In Persian].
28. Tavakoli Mehrjardi, G.H., Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R., 2015. Numerical analysis on Buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture. *International Journal of Civil Engineering*, 13(2), doi.org/10.22068/IJCE.13.2.90.
29. British Standard Institution (BSI)., 1980. Plastics pipework (thermoplastics materials)- Code of practice for the installation of unplasticized PVC pipework for gravity drains and sewers. BS 5955.
30. American Association of State Highway and Transpoertation officials (AASHTO), 2010. Bridge Construction specifications. Washington DC, USA.
31. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Tavakoli Mehrjardi, G.H., 2008. 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*, 21(6), pp.883-894. doi.org/10.1016/j.engappai.2007.09.001.
32. Brito, L.A.T., Dawson, A.R. and Kolisoja, P.J., 2009. 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.187-196.
33. American Society for Testing and Materials (ASTM)., 2021. 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 D1195M-21. DOI: 10.1520/D1195_D1195M-21.
34. American Society for Testing and Materials (ASTM)., 2021. 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 pavements¹. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D1196M-21. DOI: 10.1520/D1196_D1196M-21.
35. Hsieh, C. and Mao, H.L., 2005. A Bench-scale performance test for evaluation the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses. *Geosynthetics Research and Development*, pp.1-11, doi.org/10.1061/40782(161)9.
36. Association, Uni-Bell PVC Pipe., 2013. *Handbook of PVC Pipe Design and Construction*, Industrial Press.
37. Boussinesq, J., 1885. Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Paris, Gauthier-Villars. Reprinted, 1969 with an introduction by A Caquot, Paris, Albert Blanchard, p.721.
38. Love, J.P., 1984. Model testing of geogrids in unpaved roads. PhD Thesis, Oxford University, Oxford, UK.
39. Fakher, A. and Jones, C.J., 1996. Discussion: Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4), pp.326-327. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(326).
40. El-Emam, M. and Bathurst, R.J., 2004. Experimental design, instrumentation and interpretation of reinforced soil wall response using a shaking table. *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, 4(4), pp.13-32. doi.org/10.1680/ijpmg.2004.040402.
41. Sireesh, S., Sitharam, T.G. and Dash, S.K., 2009. Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), pp. 89-98. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.09.005.