مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۶۱-۷۰

Original Article

بررسی آزمایشگاهی اثر بلوک ژئوفوم در رفتار لوله‌های مدفون تحت اثر بارگذاری تکراری

مهران عزیزیان (کارشناس ارشد)
سید ناصر مقدس تفرشی* (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

در نوشتار حاضر، امکان استفاده از بلوک ژئوفوم در بهبود رفتار لوله‌های انعطاف‌پذیر، با انجام مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی لوله با قطر ۱۶۰ میلی‌متر در حالت ترانشه‌ی غیرمسلح و مسلح با لایه‌ی ژئوگرید و بلوک ژئوفوم تحت بارگذاری تکراری وسائط نقلیه‌ی نیمه‌سنگین بررسی شده است. تأثیر ضخامت بلوک ژئوفوم، عرض آن، لایه‌ی ژئوگرید و عمق مدفون لوله‌ی بر کرنش قطر قائم، کرنش محیطی تاج لوله و میزان فشار وارد بر تاج و کناره‌ی لوله بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که علی‌رغم افزایش قابل توجه کرنش قطر قائم لوله و کرنش تاج آن در سیکل‌های اولیه‌ی بارگذاری، نرخ آن‌ها با افزایش تعداد سیکل بار کاهش می‌یابد. در حالت ترانشه‌ی مسلح با فقط ژئوگرید، میزان کرنش قطر قائم لوله در حدود ۱۹ و ۲۰ درصد نسبت به ترانشه‌ی غیرمسلح کاهش داشته است. بهترین حالت در کاهش میزان کرنش قطر قائم لوله و کرنش تاج آن در حالت وجود بلوک ژئوفوم با چگالی ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب همراه با لایه‌ی ژئوگرید، به ترتیب برابر ۰٫۲۶ و ۰٫۳ حالت مسلح با لایه‌ی فقط ژئوگرید است.

واژگان کلیدی: بارگذاری تکراری، لوله‌ی مدفون، ژئوسنتتیک، بلوک ژئوفوم.

m.azizian@mail.kntu.ac.ir
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به خواص بلوک ژئوفوم (EPS)[۱]، نظیر: وزن کم، قابلیت فشردگی، میرایی و یکپارچگی، استفاده از آن در مسائل مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک، مانند: اجرای خاکریز جاده، تعریض راه، خاکریز دیوارهای حائل و محافظت لوله‌های مدفون در حال توسعه است.[۱-۶] در صورت امکان استفاده از بلوک ژئوفوم در بهبود رفتار لوله‌ی مدفون تحت بارهای استاتیکی، مطالعات مختلفی انجام شده است،[۷-۱۲] که در تمام آن‌ها بهبود نسبی رفتار لوله‌ی مدفون با استفاده از بلوک ژئوفوم با ابعاد و خصوصیات مناسب گزارش شده است.

کیم و همکاران (۲۰۱۰)،[۷] در بررسی میزان فشار وارد بر تاج لوله‌ی مدفون تحت اثر بار استاتیکی، در حالت استفاده از بلوک ژئوفوم بر روی لوله‌ی مدفون نتیجه گرفتند که عملکرد بلوک ژئوفوم با افزایش عرض آن تا حدود ۱٫۵ برابر عرض لوله مثبت بوده است. همچنین آنیل و همکاران (۲۰۱۵)،[۸] در مطالعات خود بر روی رفتار لوله‌های مدفون در بستر حاوی بلوک ژئوفوم روی لوله تحت اثر بارهای ضربه‌یی نتیجه گرفتند که افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوفوم درکاهش میزان شتاب وارد بر لوله‌ی مدفون تأثیر مناسبی داشته است. در سال ۲۰۱۵،[۹] نیز رفتار لوله‌های مدفون انعطاف‌پذیر تحت اثر جابه‌جایی قائم ناشی از حرکت زمین بررسی شد و نتایج به‌دست آمده بیان‌گر کاهش قابل ملاحظه‌ی تنش وارد بر لوله‌ی مدفون در هنگام استفاده از بلوک ژئوفوم در ترانشه در مقایسه با ترانشه‌ی غیرمسلح بوده است.

بجو و مندل (۲۰۱۷)،[۱۰] میزان تنش انتقال‌یافته به لوله‌ی مدفون و کرنش محیطی تاج آن را در خاک مسلح با لایه‌های ژئوتکستایل و بلوک‌های ژئوفوم تحت بار استاتیکی بررسی کردند و نتایج آن‌ها بیان‌گر کاهش قابل ملاحظه‌ی تنش وارد بر لوله‌ی مدفون و در نتیجه کاهش تغییرشکل لوله به علت عملکرد بلوک ژئوفوم و لایه‌ی ژئوتکستایل در بالای آن بوده است. همچنین نتایج آن‌ها مبین رابطه‌ی مستقیم کاهش تنش بر لوله‌ی مدفون با افزایش چگالی و عرض بلوک ژئوفوم و همچنین تعداد لایه‌های ژئوتکستایل است. در این خصوص، مگوئید و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۱] نیز در بررسی آزمایشگاهی میزان تنش وارد بر جعبه‌ی صلب مدفون در خاک احاطه شده توسط بلوک‌های ژئوفوم به شکل U در اطراف و بالای آن نتیجه گرفتند که میزان فشار وارده بر دیواره‌های سازه‌ی مدفون به علت وجود بلوک‌های ژئوفوم کاهش قابل ملاحظه‌یی داشته است، به طوری که در بهترین حالت میزان فشار وارده به سازه در حدود ۶۴٪ کاهش داشته است. نتایج مشابه در این خصوص با انجام آنالیز عددی توسط برخی پژوهشگرانی در سال ۲۰۱۷،[۱۲] نیز ارائه شده است.

همچنین درخصوص استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در بهبود رفتار لوله‌های مدفون،

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۶/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۸/۲۷، پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۶.
DOI:10.24200/J30.2017.5063.2197

آزمایش‌هایی روی لوله‌های مدفون در خاک مسلح با ژئوگرید تحت بارگذاری تکراری توسط مقدس تفرشی و خلج (۲۰۰۸)،[۱۳] و در خاک مسلح با ژئوسل و ژئوگرید تحت بارگذاری استاتیکی توسط هدج و سیتهرام (۲۰۱۵)،[۱۴] انجام شده است. نتایج آن‌ها مبین کاهش تغییرشکل لوله و تنش وارد بر آن در صورت تسلیح خاکریز روی لوله است.

با توجه به عدم پژوهش در مورد تأثیر بلوک ژئوفوم در خاکریز روی لوله‌ی مدفون تحت بارهای تکراری، نظیر بار ترافیک در مطالعات پیشین، در پژوهش حاضر با استفاده از یک مدل فیزیکی، رفتار لوله‌ی مدفون در شرایط خاکریز غیرمسلح و مسلح با بلوک ژئوفوم و لایه‌ی ژئوگرید تحت بارگذاری تکراری بررسی شده است. در آزمایش‌های موردنظر، تأثیر ضخامت، چگالی و عرض بلوک ژئوفوم واقع بر روی لوله‌ی مدفون در ترانشه، همراه با یک لایه‌ی ژئوگرید بر کرنش قطر قائم لوله، کرنش محیطی تاج لوله و همچنین فشار وارد بر تاج لوله مدنظر است.

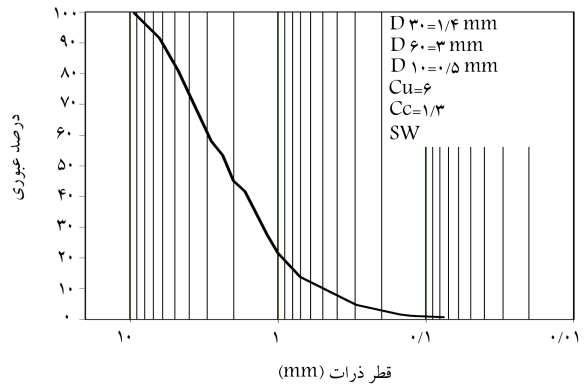
۲. مشخصات مصالح

۱.۲. خاک

توزیع اندازه‌ی ذرات خاک مورد استفاده در داخل ترانشه (در اطراف و بالای لوله) در شکل ۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های خاک ۹٫۵ میلی‌متر، متوسط اندازه‌ی ذرات آن ۲٫۲ میلی‌متر، و مطابق سیستم طبقه‌بندی یکنواخت ASTM D۲۴۸۷-۱۱،[۱۵] ماسه با دانه‌بندی خوب (SW) رایج در پروژه‌های عمرانی کشور است. لازم به ذکر است که دلیل انتخاب خاک مذکور، تأمین معیار موردنظر در ASTM D۲۳۲۱-۰۸،[۱۶] مبنی بر محدود ساختن اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ی خاک بر روی لوله به قطر ۳۸ میلی‌متر است. همچنین با توجه به نتایج آزمایش تراکم استاندارد براساس استاندارد ASTM D ۱۵۵۷-۱۲[۱۷]، چگالی مرطوب بیشینه‌ی خاک استفاده شده، ۲۱٫۵ کیلونیوتن بر مترمکعب با رطوبت بهینه‌ی ۹٫۵٪ است.

۲.۲. لوله

لوله‌ی مورد مطالعه در آزمایش‌ها از جنس پلی وینل کلرید[۲]، با کاربرد فراوان در انتقال ثقلی آب و فاضلاب است. آیین‌نامه‌ی ISIRI-۹۱۱۸،[۱۸] لوله از جنس پلی وینل کلرید را در محدوده‌ی قطر ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر و با نسبت قطر لوله به ضخامت دیواره برابر ۵۰، جهت استفاده در پروژه‌های انتقال فاضلاب توصیه می‌کند. لذا در پژوهش حاضر، با توجه به ابعاد مدل فیزیکی در دسترس، از لوله به قطر خارجی ۱۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۳٫۲ میلی‌متر با رعایت نسبت قطر به ضخامت دیواره‌ی لوله با قابلیت استفاده در انتقال آب و فاضلاب استفاده شده است.



شکل ۱. توزیع اندازه‌ی ذرات خاک استفاده شده در داخل ترانشه.

۳.۲. ژئوگرید

به منظور تسلیح لایه‌ی فوقانی خاک ترانشه از یک نوع ژئوگرید ساخت شرکت مشیران با مشخصات موردنظر در جدول ۱ استفاده شده است. لازم به ذکر است که سختی لایه‌ی ژئوگرید و ابعاد چشمه‌های آن به گونه‌یی انتخاب شد تا تحت اثر تنش‌های وارد بر سطح ترانشه، کرنش و نیروی کششی لازم جهت عملکرد غشایی آن و عملکرد مناسب در بهبود رفتار لوله ایجاد شود.

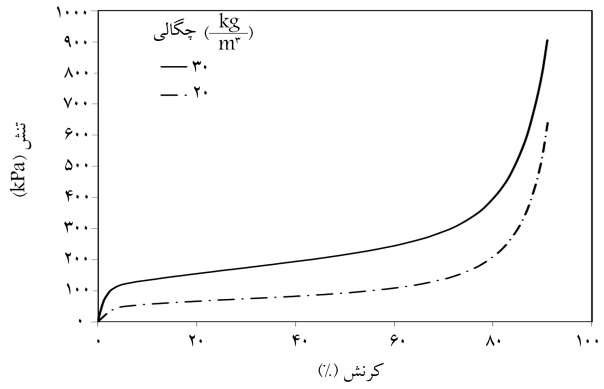
۴.۲. ژئوفوم

به منظور استفاده از خواصی نظیر وزن کم و همچنین جذب انرژی مصالح ژئوفوم (EPS)، از بلوک ژئوفوم با مقطع مستطیلی در دو چگالی ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب به منظور بررسی امکان کاهش تغییرشکل لوله‌ی مدفون استفاده شد. جهت بررسی نحوه‌ی رفتار بلوک‌های ذکر شده و خصوصیات تنش ـ کرنش آن‌ها، تعدادی آزمایش تک‌محوری بر روی بلوک‌های ژئوفوم به ابعاد ۵ × ۵ × ۵ سانتی‌متر انجام شد که در شکل ۲، نتایج آن‌ها در شرایط کنترل کرنش با سرعت ۱٫۲ میلی‌متر بر دقیقه روی بلوک ژئوفوم نشان داده شده است.

با توجه به نتایج آزمایش‌های تک‌محوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها در کرنش ۱۰٪ (مطابق استاندارد ASTM C۵۷۸-۹۵،[۱۹]) در دو چگالی ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب برابر با ۵۷٫۱ و ۱۳۴٫۳ کیلوپاسکال است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش چگالی بلوک ژئوفوم، مقاومت فشاری به طور غیرخطی افزایش می‌یابد که این امر با استاندارد ASTM C۵۷۸-۹۵،[۱۹] مطابقت دارد. طبق نتایج مطالعات اسا و رما (۲۰۰۹)،[۲۰] با افزایش تراز کرنش وارد بر نمونه، رفتار سخت‌شونده رخ می‌دهد که این رفتار نیز در شکل ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱. مشخصات ژئوگرید استفاده شده در آزمایش‌ها.

پارامتر	ژئوگرید
شکل چشمه	۶ ضلعی منتظم
مقاومت کششی (kN/m)	۵٫۸
وزن واحد سطح (gr/m^2)	۶۹۵
ابعاد چشمه‌ها (mm)	۲۷ × ۲۷
ضخامت (mm)	۵٫۲



شکل ۲. رفتار تنش ـ کرنش بلوک ژئوفوم در آزمایش تک‌محوری.

۳.مدل آزمایشگاهی لوله مدفون

۱.۳. دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش، شامل سه قسمت اصلی: جعبه‌ی آزمایش (ترانشه)، سیستم بارگذاری، و سیستم ثبت و قرائت اطلاعات است. ترانشه‌ی آزمایش به عرض ۶۰ سانتی‌متر، طول ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع متغیر با توجه به عمق مدفون لوله است. توکلی مهرجردی و همکاران (۲۰۱۵)،[۲۱] در مطالعات‌شان روی رفتار لوله‌های مدفون نشان دادند که محدوده‌ی تأثیر تنش در امتداد لوله برابر عرض لوله به علاوه‌ی ۱/۵ برابر عمق مدفون لوله است. لذا برای بیشینه‌ی عمق مدفون مورد مطالعه در برنامه‌ی آزمایش‌ها، معادل ۲ برابر قطر لوله، صفحه‌ی بارگذاری به قطر ۱۵ سانتی‌متر و لوله به قطر ۱۶ سانتی‌متر، محدوده‌ی تأثیر تنش کمتر از ۶۵ سانتی‌متر خواهد بود. این امر از یک طرف مبین کفایت طول لوله و بلوک ژئوفوم برابر ۱ متر، عملکرد مناسب رفتار کمانشی لوله در طول خود و در نتیجه رفتار بلوک است؛ و از طرف دیگر، مبین عدم تأثیر شرایط انتهایی و طول لوله بر فشارها و کرنش‌های جانبی است.

ترانشه‌ی آزمایش در یک جعبه با اسکلت فولادی با ۳ وجه جانبی سبک (جهت سهولت در جابه‌جایی جعبه) از صفحات چوبی متحرک با ضخامت ۳۰ میلی‌متر آماده شده است. وجه دیگر جعبه‌ی آزمایش، عمود بر محور طولی لوله، به منظور مشاهده‌ی حسگر اندازه‌گیری تغییرشکل لوله، از جنس پلکسی‌گلاس[۳] به ضخامت ۲۰ میلی‌متر بوده است. سیستم بارگذاری، شامل: یک سیلندر هیدرولیک، مخزن روغن و بخش کنترل‌کننده با قابلیت اعمال بار تا حدود ۱۰ کیلونیوتن بود.

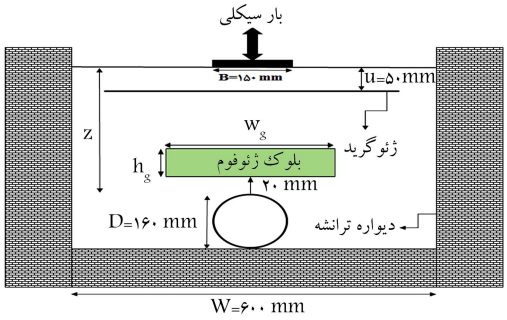
سیستم قرائت و ثبت اطلاعات با استفاده از یک واحد قرائت و ثبت داده‌ها و قابل کنترل به وسیله‌ی یک پردازش‌گر داخلی، جریان‌های خروجی از حسگرهای مختلف (حسگرهای اندازه‌گیری تغییرمکان تاج لوله، کرنش محیطی تاج لوله، فشار قائم در کناره و تاج لوله، و شدت بار وارده بر سطح بارگذاری) را دریافت می‌کند. میزان کرنش قطر قائم لوله توسط حسگر اندازه‌گیری نشست (حسگر با ظرفیت ۵۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱٪ بیشینه‌ی ظرفیت خود)؛ میزان بار قائم وارد بر صفحه‌ی بارگذاری، به وسیله‌ی یک سلول اندازه‌گیری بار (سلول بار با ظرفیت ۱۰ کیلونیوتن و دقت ۰/۰۱٪ بیشینه‌ی ظرفیت خود)؛ کرنش محیطی دیواره‌ی خارجی تاج لوله توسط یک کرنش‌سنج با نام تجاری KFG-5-120-C1-16 و فشار قائم وارد بر تاج و کناره‌ی لوله در تعدادی از آزمایش‌ها با استفاده از دو فشارسنج (فشارسنج‌ها با ظرفیت ۱ مگاپاسکال و دقت اندازه‌گیری تا ۰/۱ کیلوپاسکال) مستقیماً اندازه‌گیری شده‌اند.

بنابر توصیه‌ی دستورالعمل ASTM D2321-08،[۱۶] عرض ترانشه باید دست‌کم برابر با $(W = 1/25D + 300)$ میلی‌متر باشد. همچنین براساس آیین‌نامه‌ی اشتو[۴] (۲۰۱۰)،[۲۲] کمینه‌ی عرض ترانشه باید بیشتر از مقادیر حاصل از روابط ۱ و ۲ باشد.

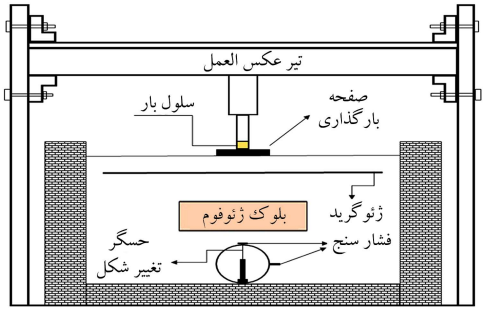
$$W = 1/5D + 305 \quad (1)$$

$$W = D + 406 \quad (2)$$

که در آن‌ها، W کمینه‌ی عرض ترانشه (میلی‌متر) و D قطر خارجی لوله (میلی‌متر) هستند. از این رو با توجه به قطر لوله معادل ۱۶۰ میلی‌متر و به منظور ارضاء کمینه‌ی عرض موردنظر آیین‌نامه‌های مذکور، عرض ترانشه برابر با ۶۰۰ میلی‌متر مناسب است. شکل‌های ۳الف و ۳ب، تصویر شماتیک دستگاه آزمایش و پارامترهای مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.



الف) ترانشه به همراه پارامترها و مصالح مورد نظر؛



ب) دستگاه آزمایش.

شکل ۳. تصویر شماتیک.

۲.۳. آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها

چگالی مرطوب خاک ترانشه در کلیه‌ی آزمایش‌ها، ۱۸/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب با رطوبت حدوداً ۶٪ بوده است. جهت آماده‌سازی ترانشه بعد از قرار دادن حسگر تغییرمکان‌سنج در داخل لوله و قرار دادن لوله در کف ترانشه و ثابت کردن آن، خاک با احتیاط در اطراف و بالای لوله به طور یکنواخت ریخته شد. با توجه به دانه‌بندی خوب و توزیع گسترده‌ی ذرات خاک، آماده‌سازی ترانشه در لایه‌های به ضخامت ۲ سانتی‌متر و با توجه به میزان چگالی موردنظر، تراکم هر لایه به وسیله‌ی کوبش با یک کوبه‌ی ۵/۵ پوندی به‌صورت ضربه‌یی و یکنواخت بر روی یک صفحه‌ی فلزی به ابعاد ۱۰ × ۳۰ سانتی‌متر در طول ترانشه انجام شده است. میزان چگالی لایه‌ی خاک تا حد امکان به وسیله‌ی توزین مقدار خاک موردنیاز و حجم لایه با نصب خط‌کش مدرج بر روی دیواره‌ی ترانشه کنترل شده است. لازم به ذکر است که میزان چگالی و رطوبت موردنظر برای لایه‌های خاک در ترانشه‌ی حاوی لوله‌ی مدفون (چگالی خشک حدود ۸۹٪ چگالی خشک بیشینه در آزمایش تراکم)، شرایط تراکم موردنظر در استاندارد ASTM D2321-08،[۱۶] در خصوص کمینه‌ی درصد تراکم به میزان ۸۵٪ برای خاک اطراف و روی لوله را ارضاء می‌کند. در آزمایش‌های حاوی بلوک ژئوفوم، بعد از رسیدن تراز خاکریزی به تاج لوله و قراردادن فشارسنج بر روی تاج آن، با اجرای لایه‌ی ۲ سانتی‌متری خاک روی لوله، بلوک ژئوفوم با عرض و ضخامت موردنظر بر سطح خاک نصب شد (شکل ۴).

برای آزمایش‌های حاوی لایه‌ی ژئوگرید، خاکریزی و اجرای لایه‌ها تا فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر از سطح ترانشه انجام و سپس با قرار دادن ژئوگرید و ثابت کردن آن، خاکریزی لایه‌ها با تراکم موردنظر تا سطح ترانشه ادامه یافته است. لازم به ذکر است که عمق مدفون قرارگیری لایه‌ی ژئوگرید (u) براساس مطالعات مقدس تفرشی و خلج (۲۰۰۸)،[۱۳] معادل ۰/۳۳ قطر صفحه‌ی بارگذاری (D) انتخاب شده است.

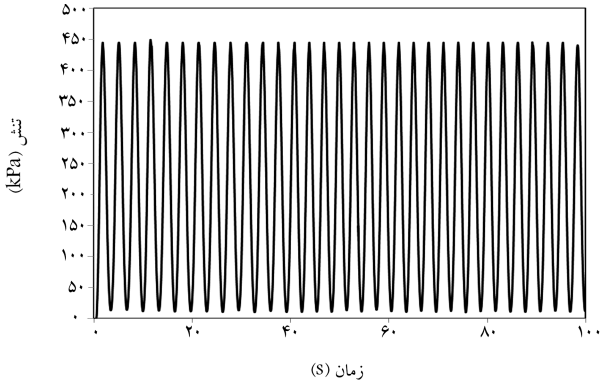
پس از تکمیل ترانشه و قراردادن صفحه‌ی بارگذاری صلب به قطر ۱۵ سانتی‌متر و

جدول ۲. برنامه و مشخصات آزمایش‌های تحت بار تکراری.

تعداد آزمایش	بلوک ژئوفوم			نسبت عمق مدفون لوله	آزمایش		هدف
	ضخامت h_g (mm)	عرض w_g (mm)	چگالی (kg/m^3)	(Z) به قطر آن (D)	نوع	سری	
۳+۳*	-	-	-	۰/۲ ۱/۵ ۱/۲	غیرمسلح (فقط خاک)	۱	به عنوان آزمایش مرجع
۲+۳*	-	-	-	۱/۵ ۱/۲	مسلح با ژئوگرید	۲	جهت بررسی اثر تسلیح با ژئوگرید
۱۲+۴*	۱۰۰ ۶۰ ۳۰	۲۴۰ ۱۶۰	۲۰ ۳۰	۱/۲ ۱/۵	بلوک ژئوفوم روی لوله و لایه‌ی ژئوگرید زیر سطح بار	۳	جهت بررسی اثر بلوک ژئوفوم در حالت بستر مسلح با ژئوگرید

* آزمایش‌های تکراری

شکل ۴. تصویری از بلوک ژئوفوم واقع بر روی لوله‌ی مدفون در داخل ترانشه.



شکل ۵. تغییرات تنش وارد بر سطح بارگذاری با زمان با بسامد ۰/۳۳ هرتز.

ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر بر مرکز بستر و نصب حسگرهای موردنظر، سیستم آماده‌ی بارگذاری شد. الگوی بارگذاری تکراری به منظور شبیه‌سازی حرکت خودروهای عبوری مطابق شکل ۵ است. براساس مطالعات و توصیه‌های برخی پژوهشگران پیشین، دامنه‌ی تنش وارد بر سطح بارگذاری جهت شبیه‌سازی بار چرخ وسائط نقلیه‌ی نیمه‌سنگین برابر ۴۵۰ کیلوپاسکال انتخاب شده است.[۲۳] همچنین با توجه به محدویت اعمال بار با بسامد بالا توسط سیستم بارگذاری اشاره شده، تنش موردنظر با بسامد ۰/۳۳ هرتز اعمال شده‌است. علی‌رغم میزان کم بسامد ذکر شده در مقایسه با سرعت حرکت وسائط نقلیه، به هرحال میزان بسامد اعمال شده، ضمن تمایز بارگذاری نسبت به حالت استاتیکی، شرایط بارگذاری تکراری مشابه حرکت چرخ وسائط نقلیه از یک نقطه را به میزان قابل توجهی تأمین می‌کند.

همچنین سیه و مائو (۲۰۵)،[۲۴] به منظور بررسی اثر میزان سطح تماس چرخ ماشین با بستر زیر خود، آزمایش‌هایی با دو صفحه‌ی دایروی به قطرهای ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر را ارزیابی کردند و با بارگذاری بر روی خاک با دانه‌بندی مختلف دریافتند که صفحه‌ی بارگذاری با اندازه‌ی بزرگ‌تر از ۱۵ برابر اندازه‌ی متوسط دانه‌های خاک (D_{50})، تأثیر چندانی در نشست صفحه ندارد. لذا سیستم آزمایش با توجه به قطر صفحه‌ی بارگذاری و اندازه‌ی ذرات خاک در پژوهش حاضر، $(D_{50} = ۲/۲)$ مناسب است.

۳.۳. برنامه و مشخصات آزمایش‌ها

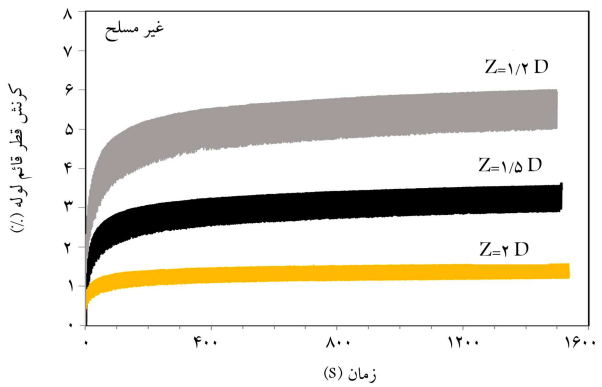
در جدول ۲، برنامه و شرایط آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود. آزمایش‌های سری اول: ترانشه با خاک غیرمسلح؛ سری دوم: ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید و سری سوم: ترانشه حاوی بلوک ژئوفوم به همراه ژئوگرید بوده‌اند. از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرارپذیری نتایج به منظور حصول اطمینان از عملکرد سیستم و دقت در اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای ورودی (تنش وارد بر صفحه‌ی بارگذاری) و خروجی (فشار در ترانشه، تغییرشکل و کرنش تاج لوله) بوده است. بدین منظور، ۱۷ آزمایش مستقل و ۱۳ آزمایش تکراری، جهت کنترل صحت آزمایش‌ها و تکرارپذیری آن‌ها انجام شده است. نتایج آزمایش‌های تکرارشده در مقایسه با یکدیگر اختلافی کمتر از ۸٪ را نشان می‌دادند، که این مقدار در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی مورد قبول است.[۱۳]

۴. نتایج و بحث

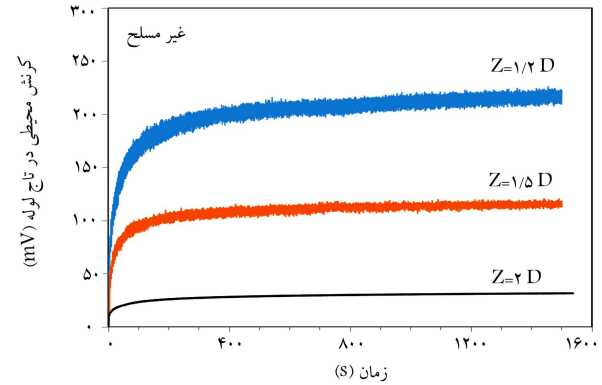
به منظور بررسی دقیق و مقایسه‌ی صحیح بین نتایج آزمایش‌ها و درک بهتر از اثر عوامل مختلف، از قبیل: عمق مدفون لوله، عرض بلوک ژئوفوم، چگالی بلوک ژئوفوم، ضخامت بلوک ژئوفوم و وجود لایه‌ی ژئوگرید بر روی رفتار سیستم مرکب خاک ـ لوله، در ادامه، نتایج به‌دست آمده ارائه و تحلیل شده‌اند. از آنجا که معیار اصلی در ایمنی لوله‌های انعطاف‌پذیر، کنترل میزان تغییرشکل آن‌هاست (موزر و فولکمن (۲۰۰۱))[۲۵]؛ میزان کرنش قطر لوله به‌عنوان معیار اصلی از رفتار سیستم مدنظر بوده است. آیین‌نامه‌ی اشتو (۲۰۱۰)،[۲۲] میزان مجاز کرنش قطر قائم لوله‌های انعطاف‌پذیر را جهت جلوگیری از ایجاد پدیده‌ی کمانش در آن‌ها به ۵٪ و آیین‌نامه‌ی لوله‌های PVC،[۲۶] برای عدم بروز هرگونه آسیب در بدنه‌ی لوله، میزان آن را به ۲٪ محدود کرده است.

۱.۴. لوله‌ی مدفون در ترانشه‌ی غیرمسلح

اثر عمق مدفون لوله در رفتار آن در شرایط ترانشه‌ی غیرمسلح در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در آن تغییرات کرنش قطر قائم لوله (VDS)[۵] : نسبت تغییرات قطر قائم لوله به قطر اولیه‌ی آن با زمان برای لوله‌ی مدفون در سه عمق مدفون مختلف



شکل ۶. تغییرات کرنش قطر قائم لوله با زمان برای ترانشه‌ی غیرمسلح در سه عمق مدفون مختلف.



شکل ۷. تغییرات کرنش در تاج لوله با زمان برای ترانشه‌ی غیرمسلح در سه عمق مدفون مختلف.

نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌های بار، صرف‌نظر از عمق مدفون لوله، نرخ افزایش در مقدار VDS کاهش یافته است. همچنین مطابق شکل ۶، با افزایش عمق مدفون، میزان VDS صرف‌نظر از تعداد سیکل بارگذاری به نحو چشمگیری کاهش یافته است، به طوری‌که مقدار آن در سیکل آخر بارگذاری، از حدود ۶٪ در عمق مدفون D ۱٫۲ به ۱٫۵۷٪ در عمق مدفون $2D$ (۷۳٫۸٪ کاهش) رسیده است. علت این امر را می‌توان به عملکرد بهتر قوسی خاک با افزایش عمق مدفون و کاهش تنش انتقالی به تاج لوله نسبت داد.

در شکل ۷، تغییرات کرنش محیطی با زمان (متناظر با خروجی کرنش‌سنج[۶] بر حسب میلی‌ولت) در تاج لوله برای اعماق مدفون مختلف مشاهده می‌شود. روند تغییرات کرنش در تاج لوله نیز مشابه با تغییرشکل قطر قائم آن است؛ به‌طوری که با افزایش عمق مدفون لوله از $1{,}2D$ به $2D$، کرنش تاج لوله در انتهای بارگذاری حدود ۸۴٪ کاهش نشان داده است. همچنین با افزایش عمق مدفون از میزان دامنه‌ی رفت و برگشت آن نیز به میزان چشمگیری کاسته شده است. دلیل این امر را می‌توان به وجود لایه‌ی خاک با ضخامت بیشتر (جذب انرژی بیشتر) و همچنین عملکرد بهتر قوس‌زدگی در اثر افزایش عمق مدفون لوله و در نتیجه کاهش تنش انتقال یافته به تاج لوله نسبت داد.

۲.۴. لوله‌ی مدفون در ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید

نتایج آزمایش روی لوله‌ی مدفون در ترانشه‌ی غیرمسلح نشان می‌دهد که به منظور محدودساختن کرنش قطر قائم لوله به میزان ۲٪،[۲۶] باید کمینه‌ی عمق مدفون لوله، معادل ۲ برابر قطر آن ($2D$) انتخاب شود. یکی از راه‌های کاهش عمق مدفون لوله و در نتیجه کاهش میزان خاک‌برداری، میزان مصالح خاکی مناسب و خاکریزی مجدد ترانشه‌ی حاوی لوله‌ی مدفون، استفاده از تسلیح خاک با ژئوسنتتیک‌ها نظیر: ژئوگرید، ژئوتکستایل، یا ژئوسل است.[۱۳و۱۴] به این منظور دو آزمایش روی ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید در عمق دو مدفون $1{,}2D$ و $1{,}5D$ با قرار دادن لایه‌ی ژئوگرید در عمق مدفون بهینه (۰٫۳۳ قطر صفحه‌ی بارگذاری)[۱۳] انجام شد. در شکل‌های ۸ و ۹، به ترتیب تغییرات کرنش قطر قائم لوله و کرنش تاج لوله با زمان در دو عمق مدفون $1{,}2D$ و $1{,}5D$ واقع در دو ترانشه‌ی مسلح و غیرمسلح مشاهده می‌شود.

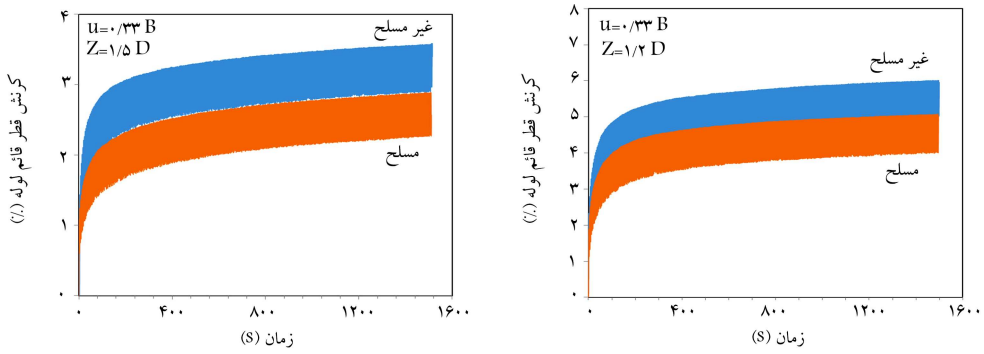
مطابق شکل ۸، استفاده از لایه‌ی ژئوگرید موجب کاهش کرنش قطر قائم لوله در سیکل آخر بارگذاری نسبت به حالت غیرمسلح در حدود ۱۵٫۵٪ و ۱۹٫۵٪ به ترتیب در دو عمق مدفون $1{,}2D$ و $1{,}5D$ شده است. کاهش کرنش قطر قائم لوله‌ی مدفون در ترانشه‌ی مسلح، به سبب عملکرد غشایی لایه‌ی ژئوگرید و در نتیجه کاهش تنش انتقالی به روی لوله است. نتایج به‌دست آمده از نظر کیفی و بیان عملکرد تسلیح، تطابق مناسبی با نتایج مطالعات پیشین دارد که به طور میانگین درصد بهبود حاصل درکرنش قطر قائم لوله با استفاده از یک لایه‌ی ژئوگرید مقداری کمتر از ۲۰٪ دارد.[۱۳و۱۴] تغییرات کرنش لوله در تاج آن (شکل ۹)، در حالت ترانشه‌ی مسلح و غیرمسلح مشابه تغییرات کرنش قطر قائم لوله است، به نحوی که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، ضمن کاهش در نرخ افزایش کرنش، میزان آن در سیکل‌های انتهایی تقریباً ثابت می‌شود. میزان کاهش درکرنش تاج لوله در سیکل آخر بارگذاری به علت وجود لایه‌ی تسلیح صرف‌نظر از عمق مدفون لوله حدوداً ۲۰٪ است که علت آن عملکرد غشایی لایه‌ی ژئوگرید و در نتیجه کاهش تنش انتقالی به روی لوله است.

۳.۴. بررسی اثر توأم بلوک ژئوفوم و لایه‌ی ژئوگرید

نتایج آزمایش‌ها روی لوله‌ی مدفون با دو عمق مدفون $1{,}2D$ و $1{,}5D$ در ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید در شکل ۸ نشان می‌دهد که میزان کرنش قطر قائم لوله همچنان بیش از ۲٪ برابر (۲٫۸۸٪ و ۵٫۰۷٪ به ترتیب در دو عمق مدفون $1{,}5D$ و $1{,}2D$) است. با توجه به سبکی قابل توجه، انعطاف‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بلوک ژئوفوم در مقایسه با خاک، امکان کاهش تنش انتقالی به تاج لوله و در نتیجه کاهش تغییرشکل لوله با استفاده از بلوک ژئوفوم روی لوله وجود دارد.[۸و۷] از طرف دیگر، به علت تغییرشکل و حرکت بلوک ژئوفوم واقع بر روی لوله تحت بارهای وارده، تنش برشی رو به بالا در دیواره‌ی بین بلوک ژئوفوم و خاک اطراف رخ می‌دهد که این امر می‌تواند سبب کاهش بیشتر تنش وارده بر لوله‌ی مدفون شود. لذا در بخش حاضر، استفاده از بلوک ژئوفوم (EPS) علاوه بر لایه‌ی ژئوگرید، جهت بررسی امکان کاهش تغییرشکل لوله‌ی موردنظر است. در ادامه، اثر بلوک ژئوفوم در رفتار سیستم در دو عمق مدفون $1{,}2D$ و $1{,}5D$ بررسی شده است.

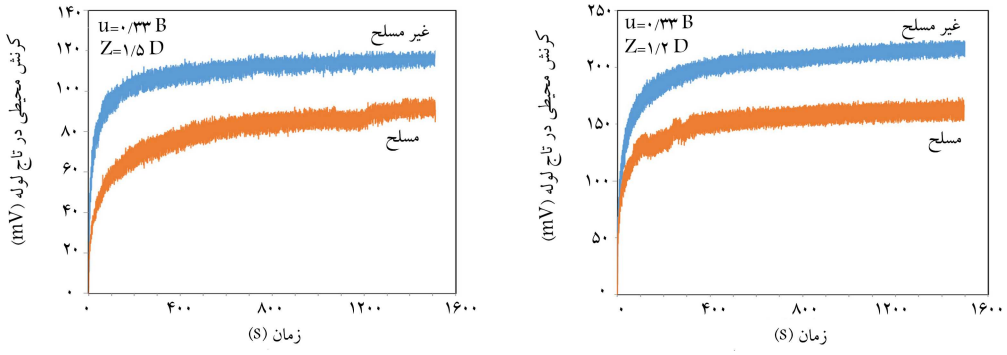
۱.۳.۴. بررسی در عمق مدفون $1{,}2D$

در این سری از آزمایش‌ها، بلوک‌های ژئوفوم در دو عرض ۱۶۰ میلی‌متر ($1D$) و ۲۴۰ میلی‌متر ($1{,}5D$)، در سه ضخامت ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و چگالی ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب همراه با لایه‌ی ژئوگرید استفاده شدند. شکل‌های ۱۰الف و ۱۰ب، تغییرات بیشینه‌ی کرنش قطر قائم لوله را در ۵۰۰ سیکل بارگذاری در شرایط مختلف از وضعیت ترانشه نشان می‌دهد. اگرچه با افزایش میزان ضخامت و عرض بلوک ژئوفوم، انتظار افزایش میزان جذب بیشتر انرژی (مساحت زیر نمودار تنش ـ کرنش) وجود دارد، اما در این خصوص میزان عمق مدفون بلوک ژئوفوم (ضخامت خاک



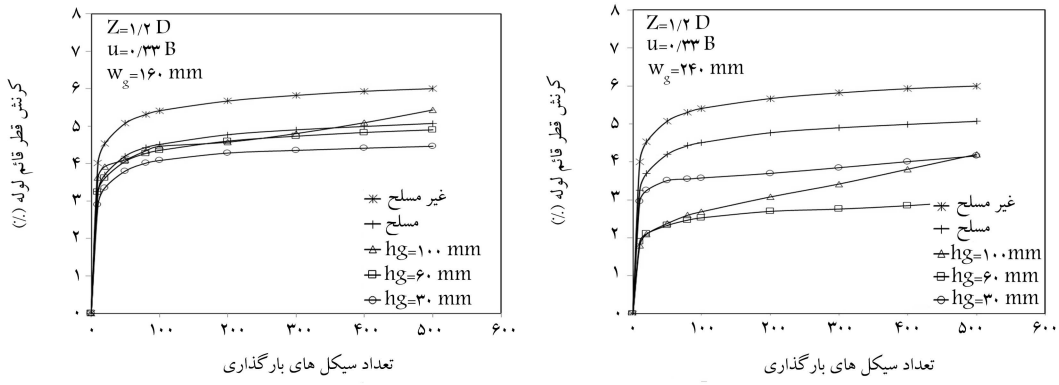
الف) D ۱/۲؛ ب) D ۱/۵.

شکل ۸. تغییرات کرنش قطر قائم لوله با زمان در شرایط ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید و ترانشه‌ی غیرمسلح برای عمق مدفون.



الف) D ۱/۲؛ ب) D ۱/۵.

شکل ۹. تغییرات کرنش تاج لوله با زمان در شرایط ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید و ترانشه‌ی غیرمسلح برای عمق مدفون.



الف) ۲۴۰ mm؛ ب) ۱۶۰ mm.

شکل ۱۰. تغییرات کرنش بیشینه‌ی قطر قائم لوله با تعداد سیکل بار برای ترانشه‌ی غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید و ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید حاوی بلوک ژئوفوم با ضخامت‌های مختلف و عرض بلوک.

روی آن و در نتیجه میزان تنش انتقالی به بلوک ژئوفوم) و چگالی بلوک ژئوفوم اهمیت زیادی دارند. با توجه به رفتار تنش ـ کرنش بلوک ژئوفوم (شکل ۲)، بعد از مقدار معینی کرنش، بلوک ژئوفوم وارد مرحله‌ی سخت‌شوندگی می‌شود. لذا برای لوله با عمق مدفون کم و در نتیجه بلوک ژئوفوم با پوشش کم خاک، به خصوص برای چگالی پایین بلوک، پدیده‌ی سخت‌شوندگی می‌تواند با وقوع پدیده‌ی سخت‌شوندگی افزایش ناگهانی در کرنش قطر قائم و کرنش تاج لوله‌ی مدفون قابل انتظار است.

با کاهش عرض بلوک ژئوفوم به دلیل کاهش عملکرد بلوک در تغییرشکل همه‌جانبه، در بلوک ژئوفوم به نوعی تمرکز تنش و در نتیجه افزایش کرنش قائم در لوله رخ می‌دهد. از طرف دیگر، با افزایش ضخامت بلوک در عمق مدفون پایین لوله، سخت‌شدگی ناشی از کرنش‌های بالا در آن رخ می‌دهد. بر این اساس در بلوک‌های با عرض ۲۴۰ و ۱۶۰ میلی‌متر، به ترتیب ضخامت ۶۰ و ۳۰ میلی‌متر عملکرد بهتری از بلوک‌ها با ضخامت‌های بالاتر داشته‌اند. همچنین بررسی اثر عرض بلوک ژئوفوم در دو شکل اخیر (برای ضخامت‌های یکسان از بلوک) نشان می‌دهد که بلوک با عرض ۲۴۰ میلی‌متر ($1/5D$) در تمام ضخامت‌ها، عملکرد بهتری نسبت به بلوک با عرض ۱۶۰ میلی‌متر ($1D$) داشته است. از این رو مطابق شکل ۱۰، کمترین کرنش قطر قائم لوله در صورت استفاده از بلوک به عرض ۲۴۰ میلی‌متر ($1/5D$) و ضخامت

۶۰ میلی‌متر رخ می‌دهد. در پژوهشی در سال ۲۰۱۰،[۷] نیز در بررسی اثر بلوک ژئوفوم در رفتار لوله‌ی مدفون تحت اثر بار استاتیکی (بدون وجود لایه‌ی ژئوگرید)، عرض بلوک معادل ۱٫۵ برابر قطر لوله به‌عنوان عرض مناسب گزارش شده است.

در شکل ۱۱، نیز تغییرات کرنش در تاج لوله در مقابل تعداد سیکل بارگذاری در حالت‌های مختلف با عرض و ضخامت مختلف بلوک ژئوفوم مشاهده می‌شود، که مطابق آن روند تغییرات در کرنش لوله و تأثیر عرض و ضخامت بلوک در آن مشابه با روند تغییرات در کرنش قطر قائم لوله است، به طوری که استفاده از بلوک به عرض ۲۴۰ میلی‌متر ($1/5D$) و ضخامت ۶۰ میلی‌متر کمترین میزان کرنش در لوله را نتیجه می‌دهد.

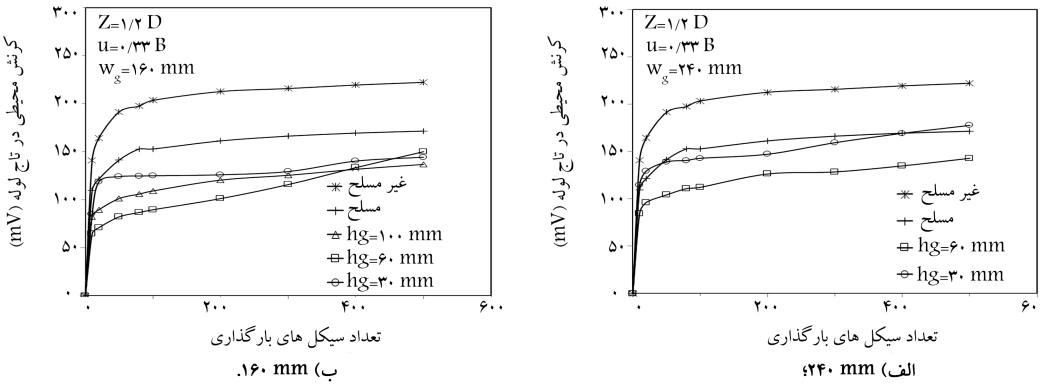
۲.۳.۴. بررسی در عمق مدفون $1/5D$

در این سری از آزمایش‌ها نیز بلوک‌های ژئوفوم در دو عرض ۱۶۰ میلی‌متر ($1D$) و ۲۴۰ میلی‌متر ($1/5D$)، در ۳ ضخامت ۳۰ ، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و چگالی ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب همراه با لایه‌ی ژئوگرید استفاده شدند. در شکل ۱۲، تغییرات کرنش قطر قائم لوله در مقابل تعداد سیکل بارگذاری و همچنین در جدول ۳، درصد بهبود کرنش قطر قائم لوله برای حالت‌های مختلف از عرض و ضخامت بلوک ژئوفوم توأم با ژئوگرید نسبت به حالت استفاده از فقط ژئوگرید در سیکل آخر بارگذاری مشاهده می‌شود. شکل ۱۲الف، بیانگر عملکرد بلوک ژئوفوم با عرض ۲۴۰ میلی‌متر در ضخامت‌های مختلف است. ملاحظه می‌شود که بهترین عملکرد در این عرض مربوط به بلوک ژئوفوم با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر است. این امر نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر پدیده‌ی قوس‌زدگی در عرض و ضخامت مذکور است.

نتایج حاصل از کرنش قطر قائم لوله در حالت وجود بلوک ژئوفوم با عرض ۱۶۰ میلی‌متر و ضخامت‌های مختلف در شکل ۱۲ب نیز مبین آن است که تفاوت زیادی بین نتایج در ضخامت‌های مختلف بلوک وجود ندارد. به عبارتی، به دلیل عرض کم بلوک (معادل قطر لوله)، نوعی تمرکز تنش روی بلوک ژئوفوم در زیر مرکز بارگذاری به وجود می‌آید که این امر موجب حرکت بلوک دقیقاً در عرضی معادل قطر لوله می‌شود و در نتیجه از عملکرد مناسب بلوک جلوگیری می‌کند. علی‌رغم عدم تغییر زیاد در کرنش قطر قائم لوله با تغییر در ضخامت بلوک، با این حال در عرض ۱۶۰ میلی‌متر نیز بلوک با ضخامت بالاتر، نتیجه‌ی بهتری را در بهبود رفتار لوله ارائه داده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که با استفاده از بلوک ژئوفوم با عمق مدفون مناسب، روند بهبود رفتار لوله با افزایش ضخامت و عرض بلوک ژئوفوم افزایش یافته است؛ به نحوی که در بهترین حالت (ضخامت بلوک ۱۰۰ میلی‌متر و عرض آن ۲۴۰

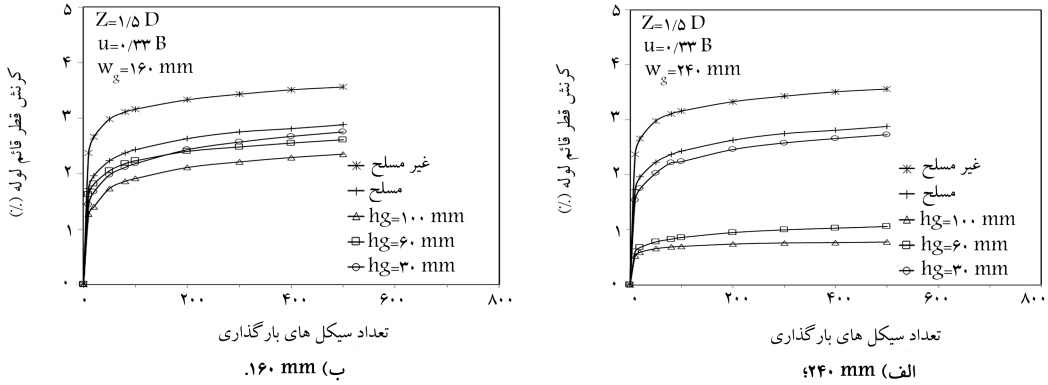
جدول ۳. درصد بهبود کرنش قطر قائم لوله در حالت‌های استفاده از بلوک ژئوفوم توأم با ژئوگرید نسبت به فقط ژئوگرید برای سیکل آخر بارگذاری.

ضخامت بلوک ژئوفوم (mm)	عرض بلوک ژئوفوم (mm)	
	۲۴۰	۱۶۰
۳۰	٪۵	٪۴٫۵
۶۰	٪۶۳٫۱۹	٪۹٫۳۷
۱۰۰	٪۷۳	٪۱۸٫۴



الف) ۲۴۰ mm؛ ب) ۱۶۰ mm.

شکل ۱۱. تغییرات کرنش بیشینه‌ی تاج لوله با تعداد سیکل بار برای ترانشه‌ی غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید و ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید حاوی بلوک ژئوفوم با ضخامت‌های مختلف و عرض بلوک.

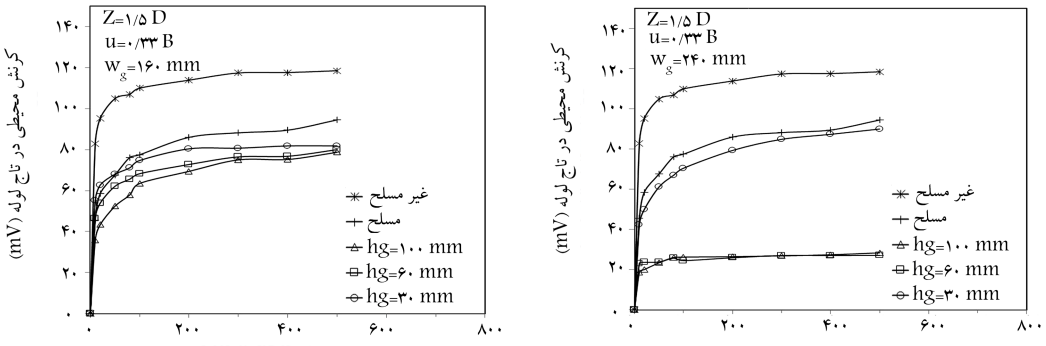


الف) ۲۴۰ mm؛ ب) ۱۶۰ mm.

شکل ۱۲. تغییرات کرنش بیشینه‌ی قطر قائم لوله با تعداد سیکل بار برای ترانشه‌ی غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید و ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید حاوی بلوک ژئوفوم با ضخامت‌های مختلف و عرض بلوک.

جدول ۴. مقادیر فشار در تاج و کناره‌ی لوله در برابر بیشینه‌ی تنش اعمالی (۴۵۰ کیلوپاسکال) در سیکل آخر بارگذاری ($Z = ۱/۵D$).

شرایط آزمایش	مقادیر فشار لوله (KPa)	
	تاج	کناره
Unreinforced	۴۵	۲۰
Reinforced	۳۵	۱۷
$Reinforced + EPS, u = ۰/۳۳B\ w_g = ۲۴۰mm,\ h_g = ۱۰۰mm$	۸	۴
$Reinforced + EPS, u = ۰/۳۳B\ w_g = ۱۶۰mm,\ h_g = ۱۰۰mm$	-	۳۲/۵
$Reinforced + EPS, u = ۰/۳۳B\ w_g = ۲۴۰mm,\ h_g = ۳۰mm$	۲۷	۲۰/۵



الف) ۲۴۰ mm؛ ب) ۱۶۰ mm.

شکل ۱۳. تغییرات کرنش بیشینه‌ی تاج لوله با تعداد سیکل بار برای ترانشه‌ی غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید و ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید حاوی بلوک ژئوفوم با ضخامت‌های مختلف و عرض بلوک.

میلی‌متر)، در حدود ۷۳٪ نسبت به ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید بهبود حاصل شده است.

در مجموع، نتایج شکل ۱۲ و جدول ۳، مبین حالت بهینه‌ی بلوک ژئوفوم با عرض ۲۴۰ میلی‌متر ($۱/۵D$) است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، در این حالت مقدار کرنش قطر قائم لوله در انتهای بارگذاری برای حالت استفاده از بلوک ژئوفوم به ضخامت‌های ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، کمتر از ۲٪ به ترتیب (۱/۰۶٪ و ۰/۷۷٪) است و ملزومات موردنظر جهت جلوگیری از ایجاد هرگونه آسیب به بدنه‌ی لوله،[۲۶] فراهم شده است. لازم به ذکر است که اگرچه برای لوله در اعماق مدفون $۱/۲D$ و $۱/۵D$ به ترتیب بلوک با ضخامت‌های ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، حالت بهینه در کاهش کرنش قطر قائم لوله هستند؛ اما در هر دو حالت، ضخامت خاک روی بلوک تقریباً یکسان است.

همچنین در جدول ۴، مقادیر فشار اندازه‌گیری شده در تاج و کناره‌ی لوله برای شرایط مختلف از ترانشه برای قرارگیری لوله در عمق مدفون $۱/۵D$ ارائه شده است. با استفاده از رابطه‌ی بوسینسک،[۲۷] برای ترانشه‌ی غیرمسلح، مقدار فشار در تاج و کناره‌ی لوله در حالت عدم وجود لوله‌ی مدفون به ترتیب برابر با ۵۸/۹ و ۳۴/۸ کیلوپاسکال به دست آمده است، در حالی که دو فشارسنج موجود در تاج و کناره‌ی لوله، مقادیر ذکر شده را به ترتیب ۴۵ و ۲۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهند. دلیل این اختلاف و کاهش در مقادیر فشار نسبت به رابطه‌ی بوسینسک را می‌توان به وجود لوله، تغییرشکل لوله و وقوع پدیده‌ی قوس‌زدگی به علت تغییرشکل لوله نسبت داد. در صورت استفاده از لایه‌ی ژئوگرید، میزان فشار در تاج و کناره‌ی لوله به ترتیب ۲۲ و ۱۵ درصد نسبت به حالت وجود ترانشه‌ی غیرمسلح بهبود داشته است. در حالت وجود بلوک ژئوفوم و لایه‌ی ژئوگرید، میزان کاهش فشار وارد بر تاج لوله صرف‌نظر از ابعاد بلوک ژئوفوم کاهش قابل ملاحظه‌یی داشته است. همچنین در آزمایش با بلوک به عرض ۲۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر نسبت به حالت فقط ژئوگرید، مقادیر بهبود در تاج و کناره‌ی لوله در حدود ۷۶٪ بوده است. در حالت وجود بلوک ژئوفوم با عرض ۱۶۰ میلی‌متر (برابر با قطر لوله)، تنش قائم در کناره‌ی لوله افزایش داشته است که این امر را می‌توان به پدیده‌ی قوس‌زدگی و اعمال تنش برشی بر روی کناره‌ی لوله و گیرافتادگی خاک در ناحیه‌ی بین کناره‌ی لوله و دیواره‌ی ترانشه نسبت داد. در شکل ۱۳، تغییرات کرنش تاج لوله با سیکل بار مشاهده می‌شود که مطابق آن روند نتایج، تطبیق مناسبی با روند نتایج کرنش قطری لوله دارد. بررسی مقادیر کرنش محیطی تاج لوله در شکل ۱۳، مبین عملکرد مناسب بلوک ژئوفوم با عرض ۲۴۰ میلی‌متر ($۱/۵D$) و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از یک مدل فیزیکی، رفتار لوله‌ی مدفون در ترانشه‌ی غیرمسلح، مسلح با ژئوگرید و ترانشه‌ی مسلح با بلوک ژئوفوم و لایه‌ی ژئوگرید تحت بارگذاری تکراری بررسی شده است. در آزمایش‌های موردنظر، تأثیر ضخامت و عرض بلوک ژئوفوم واقع بر روی لوله‌ی مدفون در ترانشه، همراه با یک لایه‌ی ژئوگرید در رفتار لوله مدنظر قرار گرفته است. در خصوص نتایج به طور خلاصه می‌توان گفت:

- در تمام آزمایش‌ها، میزان کرنش قطر قائم لوله (VDS) و کرنش تاج لوله با افزایش تعداد سیکل بارگذاری افزایش می‌یابند. اما از یک تعداد سیکل مشخص به بعد با رسیدن به یک حالت پایدار، تفاوت در مقادیر آن‌ها بسیار اندک و قابل اغماض است.
- در تمام آزمایش‌ها، روند تغییر در کرنش تاج لوله مشابه با روند تغییرشکل قطر

قائم آن است. به طوری که با افزایش تعداد سیکل‌های بار، نرخ افزایش در آن کاهش می‌یابد.

- برای ترانشه‌ی غیرمسلح با افزایش عمق مدفون لوله، میزان تغییرشکل قطر قائم لوله (VDS) کاهش می‌یابد. مقدار VDS با افزایش عمق مدفون از $1/2D$ به $1/5D$، در حدود ۴۰٪ و با افزایش عمق مدفون لوله از $1/2D$ به $2D$، در حدود ۷۴٪ کاهش داشته است. همچنین با افزایش عمق مدفون لوله از نرخ کاهش در تغییرشکل قطر قائم لوله کاسته می‌شود.
- در صورت تسلیح ترانشه با لایه‌ی ژئوگرید، به سبب عملکرد غشایی و کاهش تنش وارد بر لوله‌ی مدفون، در عمق مدفون $1/5D$ و $1/2D$ نسبت به حالت غیرمسلح به ترتیب ۱۹/۵ و ۱۵/۵ درصد کاهش در قطر قائم لوله حاصل شده است.
- استفاده از لایه‌ی ژئوگرید، موجب بهبود در میزان فشار قائم در تاج و کناره‌ی لوله به ترتیب ۲۲ و ۱۵ درصد به نسبت ترانشه‌ی غیرمسلح شده است.
- مقایسه‌ی نتایج آزمایش روی لوله‌ی مدفون در حالت وجود بلوک ژئوفوم در دو عمق مدفون لوله برابر $1/2D$ و $1/5D$ نشان می‌دهد که در هر دو عمق مدفون علی‌رغم چگالی متفاوت بلوک‌ها، بلوک ژئوفوم با عرض ۲۴۰ میلی‌متر (معادل $1/5D$)، عملکرد بهتری در مقایسه با عملکرد بلوک ژئوفوم با عرض بلوک ۱۶۰ میلی‌متر ($1/0D$) داشته است. اما ضخامت مناسب بلوک در عمق مدفون $1/2D$ و $1/5D$ متفاوت و به ترتیب برابر ۶۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر بوده است. لازم به ذکر است که در عمق مدفون $1/5D$ برای لوله، در حالت استفاده از بلوک به عرض ۲۴۰ میلی‌متر ($1/5D$)، تفاوت چشمگیری در کرنش قطر قائم لوله برای بلوک با ضخامت ۶۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر وجود ندارد و در هر دو ضخامت ذکرشده‌ی بلوک، کرنش قطر قائم لوله کمتر از ۲٪ بوده است (جهت جلوگیری از هرگونه آسیب به لوله‌ی مدفون.[۲۶])
- از جمله پارامترهای بسیار مؤثر در میزان تأثیرگذاری بلوک ژئوفوم، چگالی آن است. با به کاربردن بلوک ژئوفوم با چگالی ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و در عمق مدفون پایین لوله ($1/2D$)، با کاهش عرض بلوک ژئوفوم و در نتیجه کاهش عملکرد مؤثر آن، بلوک ژئوفوم با ضخامت اندک، نتیجه‌ی بهتری به نسبت ضخامت‌های بالاتر داشته است. به نحوی که در بلوک ژئوفوم با عرض ۲۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر، ۱۷٪ کاهش در کرنش قطر قائم لوله نسبت به ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید رخ داده است. این مقدار در بلوک با عرض ۲۴۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر مقداری در حدود ۴۱٪ بوده است.
- در صورت استفاده از بلوک ژئوفوم با چگالی مناسب و لایه‌ی ژئوگرید (افزایش ظرفیت جذب انرژی و جلوگیری از ایجاد سخت‌شدگی در بلوک ژئوفوم) ملاحظه می‌شود که با کاهش عرض و ضخامت بلوک ژئوفوم از میزان بهبود رفتار لوله کاسته می‌شود.
- برای لوله‌ی مدفون در عمق $1/5D$ با استفاده از بلوک ژئوفوم به عرض ۲۴۰ میلی‌متر همراه با لایه‌ی ژئوگرید، میزان کرنش تاج لوله در حدود ۶۳ و ۷۳ درصد به ترتیب برای بلوک ژئوفوم با ضخامت ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر نسبت به ترانشه‌ی مسلح با ژئوگرید کاهش داشته است.
- از آنجا که قطر لوله‌ی مورد مطالعه برابر ۱۶۰ میلی‌متر، در محدوده‌ی قطر ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر برای لوله‌های انتقال آب و فاضلاب براساس توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی ISIRI-۹۱۱۸،[۱۸] قرار دارد و همچنین خاک با اندازه‌ی موردنظر براساس استاندارد ASTM D۲۳۲۱-۰۸،[۱۶] انتخاب شده است، لذا مدل فیزیکی استفاده شده در مقیاس واقعی از لوله‌های با قطر کوچک محسوب می‌شود. بنابراین نیاز به مقیاس کردن سختی لوله، سختی خاک، سختی ژئوگرید و میزان تنش وارد بر سطح بارگذاری نخواهد بود. به هر حال لازم به ذکر است که آزمایش‌ها برای فقط یک نوع خاک، یک قطر لوله، یک جنس از لوله و یک چگالی از بلوک ژئوفوم (EPS) انجام شده‌اند و به منظور توسعه‌ی هر چه بهتر نتایج، انجام آزمایش برای قطرهای بزرگ‌تر از لوله و در شرایط مختلف از مصالح، مناسب و راهگشا خواهد بود.

علائم اختصاری

D: قطر خارجی لوله؛
Z: عمق مدفون لوله؛
B: عرض صفحه‌ی بارگذاری؛
w_g: عرض بلوک ژئوفوم؛
h_g: ضخامت بلوک ژئوفوم؛
u: عمق مدفون لایه‌ی ژئوگرید؛
W: عرض ترانشه.

پانوشت‌ها

1. expanded polystyrene
2. UPVC
3. plexiglas
4. Aashto
5. vertical diametric strain (VDS)
6. strain gage

منابع (References)

1. Horvath, J.S. "Lite products come of age; new developments in geosynthetics", *Standardization News*, **20**(9), pp. 50-53 (1992).
2. Horvath, J.S. "The compressible inclusion function of EPS geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, **15**(1-3), pp. 77-120 (1997).

3. Elragi, A.F. "Selected engineering properties and applications of EPS geofoam", Ph.D. Thesis, State University of New York, Syracuse, NY (2000).
4. Duskov, M. "EPS as a light weight sub-base material in pavement structures", DELFT University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 7-94-211-6 (1994).
5. Gao, H., Hu, Y., Wang, Z. and et al. "Shaking table tests on the seismic performance of a flexible wall retaining EPS composite soil", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**(12), pp. 5481-5510 (2017).
6. Wu, Y.D., Zeng, C.C., Liu, J. and et al. "Measured settlement of highways improved by lightweight backfilling without road closure", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**(10), pp. 3889-3896 (2016).
7. Kim, H., Choi B. and Kim J. "Reduction of earth pressure on buried pipes by EPS geofoam inclusions", *Geotechnical Testing Journal*, **33**(4), pp. 304-313 (2010).
8. Anil, O, Erdem R.T. and Kantar E. "Improving the impact behavior of pipes using geofoam layer for protection", *International Journal of Pressure Vessels and and Piping*, **132-133**, pp. 52-64 (2015).
9. Bartlett, S.F., Lingwall, B.N. and Vaslestad, J. "Methods of protecting buried Pipelines and culverts in Transportation infrastructure using EPS geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, **43**(5), pp. 450-461 (2015).
10. Beju, Y.Z. and Mandal, J.N. "Combined use of jute geotextile-EPS geofoam to protect flexible buried pipes: Experimental and numerical studies", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **3**(4), pp. 3-32 (2017).
11. Meguid, M.A., Ahmed, M.R., Hussein, M.G. and et al. "Earth pressure distribution on a rigid box covered with U-shaped geofoam wrap", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **3**(11), pp. 1-14 (2017).
12. Meguid, M.A. and Hussein, M.G. "A numerical procedure for the assessment of contact pressures on buried structures overlain by EPS geofoam inclusion", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **3**(11), pp. 1-14 (2017).
13. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Khalaj, O. "Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated load", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(2), pp. 145-163 (2008).
14. Hegde, A.M. and Sitharam, T.G. "Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells", *Geotextiles and Geomembranes*, **43**(5), pp. 372-381 (2015).
15. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)", ASTM D2487 (2011).
16. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard practice for underground installation of thermoplastic pipe for sewers and other gravity-flow applications", ASTM D2321 (2008).
17. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort", ASTM D1557 (2012).
18. ISIRI-9118, Institue of standard and institue of research of Iran, "Plastic unplasticized poly (Vinyle Choride) (PVC-U), fittings and piping systems for non Pressure underground drainage and swerage Specificaton", (2010).
19. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation", ASTM C578 (1995).
20. Ossa, A. and Romo, M.P. "Micro-and macro-mechanical study of compressive behavior of expanded polystyrene geofoam", *Geosynthetics International*, **16**(5), pp. 327-338 (2009).
21. Tavakoli Mehrjardi, G.H., Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Numerical analysis on Buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture", *International Journal of Civil Engineering*, **13**(2), pp. 90-104 (2015).
22. AASHTO, "Bridge construction specifications, american association of state highway and transpoertation officials", washington, DC. (2010).
23. Brito, L.A.T., Dawson, A.R. and Kolisoja, P.J. "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 (2009).
24. Hsieh, C. and Mao, H.L. "A Bench-scale performance test for evaluation the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses", Geosynthetics Research and Development, pp. 1-11 (2005).
25. Moser A.P. and Folkman, S.L. "Buried pipe design", New York, McGraw-Hill (2001).
26. Association, Uni-Bell PVC Pipe., *Handbook of PVC Pipe Design and Construction*, Industrial Press (2013).
27. Boussinesq, J. "Application des potentiels a letude de de lequilibre et du mouvement des solides elastiques, Paris, gauthier-villars reprinted 1969 with an introduction by a caquot", Paris, Albert Blanchard, 4, pp. 721 (1885).