

بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر و لایه‌یی

محمد شمسی (کارشناس ارشد)

سید ناصر مقدس تفرشی* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران تفرشی، (بهار ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۱۱۱-۱۲۲

در نوشتار حاضر، اثر ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با دو نوع تسلیح لایه‌یی و دورگیر در بهبود باربری بستر سست ماسه‌یی رس‌دار با انجام ۱۲ آزمایش سه محوری مستقل همراه با تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از ستون سنگی غیرمسلح و مسلح می‌تواند ضمن کنترل نشست بستر، باربری آن را به میزان قابل ملاحظه‌یی افزایش دهد. همچنین برای رسیدن به یک ظرفیت باربری مشخص، استفاده از لایه‌های ژئوتکستایل (در تعداد مورد نیاز) در مقایسه با ژئوتکستایل دورگیر از نقطه نظر اقتصادی (میزان ژئوتکستایل مصرفی) و اجرایی مفیدتر است. تحلیل عددی روی نمونه‌های سه محوری در حالات مختلف، ضمن ارائه دقت قابل قبول در شبیه‌سازی نتایج آزمایش، مبین کفایت استفاده از فقط ۶٪ تسلیح دورگیر در طول ستون سنگی جهت رسیدن به مقاومت نهایی یکسان با ۴ لایه تسلیح است. در این حالت مقدار ژئوتکستایل مصرفی برای تسلیح دورگیر، ۳ برابر تسلیح لایه‌یی است.

واژگان کلیدی: ستون سنگی، خاک سست، تسلیح، مطالعات آزمایشگاهی، تحلیل عددی.

mshamsi@mail.kntu.ac.ir
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

و افزایش سرعت نشست تحکیمی خاک‌های ریزدانه از جمله کاربردهای موفق روش بهسازی ذکر شده است.^[۴] با وجود مزایای ستون سنگی در بهبود رفتار بستر، اجرای آن در خاک‌های خیلی سست، مشکلاتی دارد؛ چرا که در روش مذکور، پس از اجرای ستون سنگی و بارگذاری به علت فقدان فشار محدودکننده کافی برای ستون سنگی و در نتیجه بروز انبساط و گسترش جانبی ستون، کارایی آن کاهش می‌یابد. از این رو تأمین فشار محدودکننده در اطراف ستون سنگی با استفاده از تسلیح ستون سنگی با انواع ژئوستتیک‌ها^۱ (ژئوتکستایل،^۲ ژئوگرید^۳) قابل انجام است.^[۲]

علی‌رغم انجام مطالعات و پژوهش‌های نسبتاً زیاد در خصوص ستون سنگی مسلح در بستر رسی اشباع،^[۵-۸] در خصوص ستون سنگی مسلح در بستر دانه‌یی با مقاومت کم، فقط تعداد بسیار محدودی مطالعه‌ی آزمایشگاهی،^[۹] صورت گرفته است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۴،^[۵] با استفاده از دستگاه سه محوری، رفتار نمونه‌های رسی با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر حاوی مغزه‌های ماسه‌یی (با قطر ۳۲ میلی‌متر) مسلح با ژئوگرید دورگیر در مرکز نمونه بررسی شده و نتایج مبین باربری بیشتر نمونه‌های حاوی ستون سنگی نسبت به نمونه‌های بدون ستون سنگی بوده است. همچنین با تسلیح دورگیر ستون‌های سنگی، افزایش بیشتری در باربری نمونه گزارش شده است.

در آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته‌ی زهکشی نشده‌ی (CU) در تحقیق

ظرفیت باربری کم و نشست‌های زیاد از جمله معایب خاک‌های سست هستند. به منظور افزایش باربری خاک‌های سست، روش‌های مختلفی از قبیل: تسلیح خاک با ژئوستتیک‌ها، تثبیت، تراکم دینامیکی، اجرای ستون سنگی و ... مدنظر مهندسان ژئوتکنیک است. در این میان اجرای ستون سنگی به عنوان یک روش ساده‌ی بهسازی خاک‌های سست مطرح است. در واقع در روش مذکور با حفر چاه‌هایی با عمق، قطر و فواصل معین و پر کردن آن‌ها با سنگریزه یا خاک دانه‌یی و متراکم کردن آن، درصدی از حجم خاک نامرغوب با خاک مناسب جایگزین می‌شود. با روش مذکور، در نقاط معلوم از خاک بستر و در یک شبکه‌ی منظم، ستون‌های متراکمی از خاک با باربری مناسب جهت اصلاح خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بستر، جایگزین خاک سست می‌شوند.^[۱]

امروزه از ستون‌های سنگی برای بهسازی خاک‌های رسی نرم، لای و ماسه‌ی سست استفاده می‌شود. قابلیت اجرای سریع، آسان و ارزان آن‌ها از یک سو و بهبود بخشی خواص فیزیکی - مکانیکی توده‌ی خاک از سوی دیگر، باعث افزایش روزافزون استقبال عمومی جامعه‌ی مهندسی به روش مذکور شده است.^[۱۰]

افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر پی‌ها، کاهش پتانسیل روان‌گرایی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۵، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1341

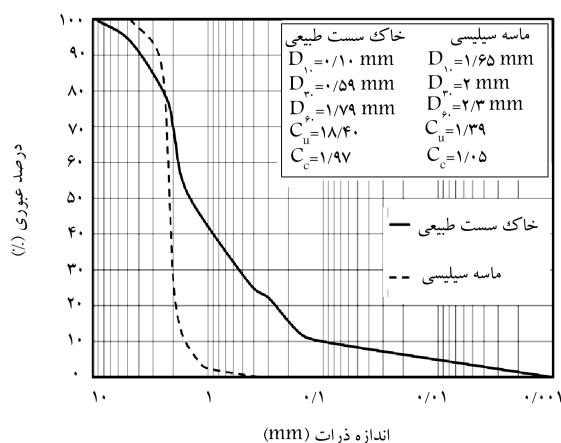


(الف)



(ب)

شکل ۱. تصویری از (الف) خاک طبیعی جهت شبیه سازی بستر سست، (ب) ماسه سیلیسی به عنوان مصالح ستون سنگی.



شکل ۲. منحنی دانه بندی دو نوع خاک مورد آزمایش.

باربری به علت وجود ستون سنگی وجود خواهد داشت. در مطالعاتی (۲۰۰۵) نیز بر روی ستون سنگی از دانه بندی گسترده برای شبیه سازی بستر ماسه ای سست استفاده شده است.^[۹]

لازم به ذکر است که با انجام آزمایش های حدود اتر برگ برای قسمت ریزدانه ی خاک بستر نرم، حد خمیری آن و شاخص خمیری به ترتیب ۲۱/۶۸ و ۹/۸۱ به دست آمده است.

مقادیر توده ی ویژه بر اساس استاندارد (ASTM D ۲۱۶۷ - ۱۵)،^[۱۲] برای خاک بستر نرم و ماسه ی سیلیسی به ترتیب ۲/۵۵ و ۲/۶۳ به دست آمدند. وزن مخصوص خشک کمینه و بیشینه ی ماسه ی سیلیسی بر اساس استاندارد (ASTM D ۴۲۵۴ - ۱۴ و ASTM D ۴۲۵۳ - ۱۴)،^[۱۳] به ترتیب ۱۴/۸ و ۱۷/۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب (میانگین ۳ بار اندازه گیری) هستند.

همچنین با انجام آزمایش تراکم اصلاح شده روی خاک طبیعی بر اساس استاندارد

دیگری (۲۰۱۰)، بر نمونه ی رس حاوی ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با ژئوتکستایل، افزایش مقاومت نمونه با افزایش طول ستون سنگی و تسلیح دورگیر گزارش شده است. همچنین در سال ۲۰۱۴، اثر تسلیح دورگیر و لایه یی (با فواصل و طول های مختلف تسلیح) در رفتار ستون سنگی به روش اجزاء محدود و تئوری سلول واحد بررسی و نشان داده شده است که حالت بهینه ی فواصل تسلیح لایه یی برای رسیدن به عملکرد مقاومتی شبیه به تسلیح دورگیر، بستگی به سختی ژئوستتیک و طول تسلیح دارد.^[۱۰]

مرور کارهای پژوهشگران مختلف نشان می دهد که در زمینه ی اجرای ستون سنگی غیرمسلح و ستون سنگی مسلح (در بستر دانه یی سست) با ژئوتکستایل لایه یی در مقایسه با تسلیح دورگیر و به ویژه تأثیر طول و محل قرارگیری تسلیح دورگیر در ستون سنگی (در پژوهشی در سال ۲۰۱۴، فقط با استفاده از روش اجزاء محدود و بدون انجام مطالعات آزمایشگاهی، اثر تسلیح دورگیر در باربری ستون سنگی در کل طول آن با تسلیح لایه یی بدون در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی بررسی شده است)^[۱۰] و اثر آن در شکم دادگی ستون به خصوص در مطالعات آزمایشگاهی، پژوهش های قابل توجهی انجام نشده است. از این رو در پژوهش حاضر، جهت توسعه و شناخت بیشتر رفتار بستر دانه یی سست (ماسه ی رس دار) حاوی ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با ژئوتکستایل لایه یی و دورگیر، بررسی های آزمایشگاهی با استفاده از آزمایش سه محوری تحکیم یافته ی زهکشی نشده (CU) روی نمونه هایی به قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر و همچنین شبیه سازی عددی به منظور بررسی اثر عوامل زیر مدنظر است:

- اثر ستون سنگی در بستر سست ماسه یی رس دار،
- اثر تعداد لایه های تسلیح با ژئوتکستایل،
- اثر تسلیح دورگیر و مقایسه ی آن با تسلیح لایه یی از نقطه نظر عملکرد، اجرا و اقتصاد طرح،
- اثر طول و محل قرارگیری تسلیح دورگیر در بخشی از ارتفاع ستون سنگی (بالا و وسط ستون) و مقایسه ی عملکرد آن با تسلیح لایه یی،
- بررسی میزان شکم دادگی ستون در حالات مختلف از قرارگیری تسلیح دورگیر.

۲. مصالح مصرفی

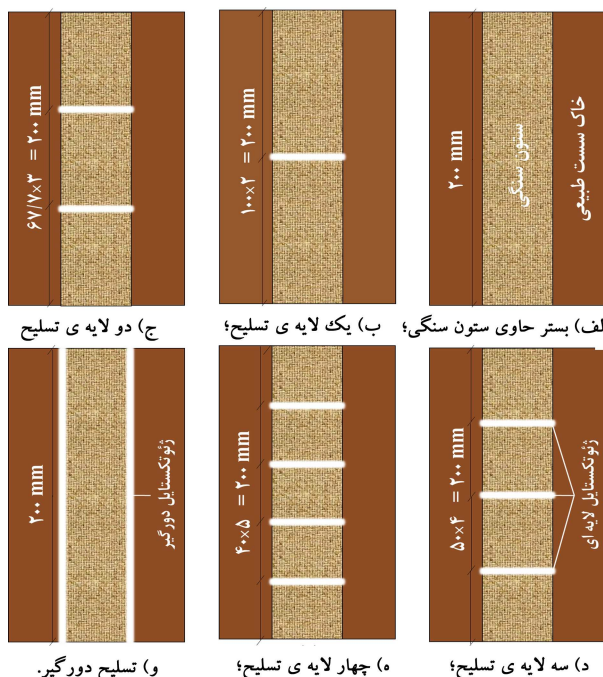
۱.۲. خاک ها

به منظور انجام پژوهش حاضر، از دو نوع خاک شامل یک نوع خاک طبیعی از عمق ۲ متری واقع در محدوده ی شمالی شهر تهران (عبوری خاک مذکور از الک ۱۰ میلی متر به عنوان خاک طبیعی بستر سست) و یک نوع ماسه ی سیلیسی معدن فیروزکوه محصول شرکت تأمین ماسه ی ریخته گری (به عنوان مصالح ستون سنگی) استفاده شده است. شکل ۱، تصویری از دو نوع خاک مورد نظر را نشان می دهد. توزیع اندازه ی ذرات خاک مورد نظر جهت شبیه سازی بستر نرم و ماسه ی سیلیسی مطابق شکل ۲ هستند.

بر اساس سیستم طبقه بندی متحد (ASTM D ۲۴۸۷ - ۱۱)،^[۱۱] خاک بستر نرم و ماسه ی سیلیسی به ترتیب در رده ی ماسه ی خوب دانه بندی شده ی رس دار (SW-SC) و ماسه ی بد دانه بندی شده (SP) قرار می گیرند. اگر چه خاک طبیعی مورد نظر، به عنوان بستر غیرمسلح با دانه بندی گسترده است، اما با توجه به درصد تراکم پایین آن و درصد تراکم مناسب مصالح ستون سنگی، انتظار افزایش مناسب



شکل ۳. وضعیت ظاهری ژئوتکستایل مصرفی.



شکل ۴. محل قرارگیری ستون سنگی لایه‌های ژئوتکستایل و تسلیح دورگیر.

۴. نحوه‌ی انجام آزمایش سه محوری (ساخت نمونه و بارگذاری آن)

آزمایش‌های سه محوری بر روی نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام شده‌اند. بنابر استاندارد آزمایش (ASTMD ۲۸۵۰ - ۰۳) [۱۸] بزرگ‌ترین اندازه‌ی دانه‌ها نباید از یک ششم قطر نمونه تجاوز کند، که با توجه به منحنی دانه‌بندی و نوع مصالح (شکل ۲)، شرط مذکور برقرار است. برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا با توجه به وزن مخصوص و حجم مورد نظر برای دو نوع خاک، مقدار مشخصی از آن خاک با میزان مورد نظر آب به خوبی مخلوط می‌شود تا درصد رطوبت در تمامی آزمایش‌ها یکنواخت و ثابت نگه داشته شود.

در آزمایش حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر پس از پیچاندن ژئوتکستایل دورگیر به طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۴۰ میلی‌متر دور لوله‌ی PVC^۵ و چسباندن محل هم‌پوشانی ژئوتکستایل، هر دو در مرکز قالب قرار می‌گیرند. سپس خاک طبیعی در ۳ لایه‌ی مساوی اطراف تسلیح دورگیر و لوله‌ی PVC (بدون

(ASTMD ۱۵۵۷) [۱۵] مقدار بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه‌ی آن به ترتیب برابر ۱۷/۴ کیلو نیوتن بر مترمکعب و ۱۶/۸٪ و وزن مخصوص خشک کمینه‌ی آن براساس استاندارد (ASTMD ۴۲۵۳ - ۱۴) [۱۴] برابر ۱۲/۱ کیلو نیوتن بر مترمکعب به دست آمد.

به منظور شبیه‌سازی بستر سست، خاک طبیعی با درصد تراکم ۷۸ رطوبت ۱۰٪ (به عنوان خاک اطراف ستون سنگی) و ماسه‌ی سیلیسی با درصد تراکم ۹۶ و رطوبت ۴٪ (به عنوان مصالح ستون سنگی) در نظر گرفته شدند. براساس طبقه‌بندی بودو (۲۰۰۸) [۱۶] خاک طبیعی مورد نظر با درصد تراکم ۷۸ (چگالی نسبی ۰/۳۷)، خاک سست و ماسه‌ی سیلیسی با درصد تراکم ۹۶ (چگالی نسبی ۰/۷۷)، خاک متراکم محسوب می‌شوند. علت در نظر گرفتن مقادیر درصد تراکم فوق برای مصالح این است که برای عملکرد مناسب ستون سنگی باید خاک اصلی (خاک طبیعی اطراف ستون سنگی) سست و مصالح ستون سنگی متراکم باشند. [۹-۷]

۲.۲. ژئوتکستایل

از یک نوع ژئوتکستایل بافته نشده، محصول شرکت دوپونت [۱۷] با مشخصاتی مطابق جدول ۱ و وضعیت ظاهری مطابق شکل ۳، به عنوان مسلح‌کننده‌ی ستون سنگی استفاده شده است.

۳. برنامه‌ی آزمایش‌ها

به منظور بررسی اثر ستون سنگی و عوامل مؤثر در رفتار آن، ۱۷ آزمایش سه محوری (۱۲ آزمایش مستقل و ۵ آزمایش برای بررسی تکرارپذیری نتایج) مطابق جدول ۲ انجام شده است. آزمایش‌های سری ۱ و ۲ به ترتیب روی مصالح ستون سنگی و مصالح طبیعی (ماسه‌ی رس‌دار) در ۳ فشار همه جانبه انجام شده‌اند. انجام آزمایش‌های مذکور از یک طرف به منظور شناخت رفتار این دو مصالح و از طرف دیگر جهت انجام تحلیل عددی ضروری هستند. در آزمایش‌های سری ۳ الی ۵، به ترتیب نمونه‌ی حاوی ستون سنگی غیرمسلح، مسلح با ژئوتکستایل لایه‌ی و مسلح با ژئوتکستایل دورگیر مورد نظر هستند. شکل ۴، محل قرارگیری ستون سنگی لایه‌های ژئوتکستایل و تسلیح دورگیر را نشان می‌دهد. در کلیه‌ی آزمایش‌ها، ستون سنگی به قطر ۴۰ میلی‌متر در مرکز نمونه‌ی سه محوری به قطر ۱۰۰ میلی‌متر (نسبت قطر ستون سنگی به قطر نمونه‌ی سه محوری برابر با ۰/۴) قرار گرفته است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ [۶] با بررسی نمونه‌هایی با نسبت قطر ستون سنگی به قطر نمونه‌ی سه محوری (نسبت قطری) در حدود ۰/۳ و ۰/۴ نتیجه گرفته شده است که نمونه‌های با نسبت قطری حدود ۰/۴، عملکرد مناسب‌تری در مقایسه با نمونه‌های با نسبت قطری حدود ۰/۳ در افزایش باربری نمونه‌ها دارند.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و هندسی ژئوتکستایل مصرفی. [۱۷]

ژئوتکستایل	پارامترها
۱۹۰	وزن واحد سطح (gr/m^2)
۰/۵	ضخامت (mm)
۱۳/۱	مقاومت کشش نهایی (kN/m)
۵۲	کرنش شکست (%)
۵/۷	مقاومت کششی در کرنش ۵٪ (kN/m)

جدول ۲. خلاصه‌ی برنامه‌ی آزمایش‌ها.

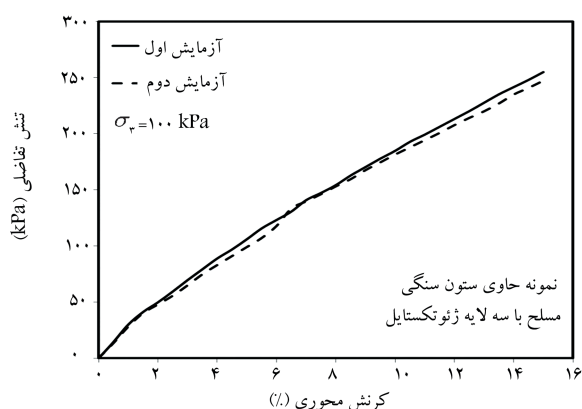
سری آزمایش	نوع آزمایش	تعداد لایه‌های ژئوتکستایل برای تسلیح ستون سنگی (N)	فشار همه جانبه (kPa)
۱	مصلح فقط ستون سنگی	۰	۲۰۰، ۱۰۰*، ۵۰
۲	فقط خاک طبیعی	۰	۲۰۰، ۱۰۰*، ۵۰
۳	حاوی ستون سنگی غیر مسلح	۰	۱۰۰
۴	حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل لایه‌ی	۴، ۳*، ۲*، ۱	
۵	حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر	۰*	

* آزمایش‌های تکرار شده

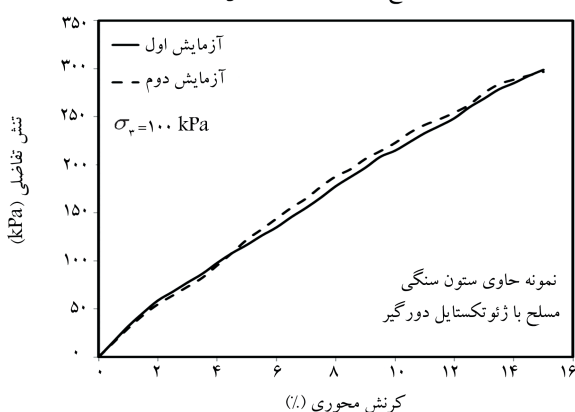
۵. نتایج حاصل از آزمایش

۱.۵. تکرارپذیری نتایج

تکرارپذیری نتایج از جمله مسائل مهم در حصول اطمینان از نتایج حاصل در مطالعات آزمایشگاهی است. شکل ۶، نتایج حاصل از تکرار آزمایش‌ها را برای نمونه‌های حاوی ستون سنگی در حالت مسلح با ۳ لایه‌ی ژئوتکستایل و مسلح با ژئوتکستایل دورگیر نشان می‌دهد. نزدیکی نتایج دو آزمایش یکسان، نمایانگر دقت مناسب در آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام درست روند آزمایش و دقت در اندازه‌گیری‌هاست.



الف) مسلح با ۳ لایه‌ی ژئوتکستایل؛



ب) مسلح با ژئوتکستایل دورگیر.

شکل ۶. تکرارپذیری تغییرات تنش - کرنش نمونه‌های حاوی ستون سنگی مسلح تحت فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa.

تکان خوردن آن دو) برای رسیدن به درصد تراکم ۷۸، متراکم و لوله‌ی PVC، به آرامی از درون قالب بیرون کشیده می‌شود (شکل ۵). لازم به ذکر است که با بیرون کشیدن لوله‌ی PVC از نمونه، خاک اطراف ستون سنگی به علت داشتن مقداری چسبندگی فرو نمی‌ریزد. در این مرحله، مصلح ستون سنگی در ۳ لایه‌ی مساوی و با احتیاط در فضای خالی استوانه‌ی مورد نظر متراکم می‌شود. در آزمایش‌های حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل لایه‌ی با توجه به تعداد لایه‌های ژئوتکستایل، لایه‌ی اول ماسه درون حفره ریخته و بعد از قرار دادن یک لایه‌ی ژئوتکستایل به قطر ۴۰ میلی‌متر روی آن، لایه‌های دیگر ماسه با ارتفاع‌های یکسان تا پر شدن کامل ستون خالی کوبیده می‌شوند. همچنین مشابه مطالعات دب و همکاران،^[۷] با توجه به وزن مخصوص مصلح ستون سنگی در تراکم ۹۶٪ و حجم اسمی ستون خالی ایجاد شده در نمونه، وزن کل مصلح ستون سنگی (که باید ستون خالی را پر کند)، محاسبه شده است. لازم به ذکر است که به علت نفوذ دانه‌های ماسه به درون خاک سست طبیعی، درصد تراکم دقیقاً ۹۶٪ نخواهد بود، اما با توجه به وجود این خطای محتمل و تقریباً یکسان در تمام آزمایش‌ها، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.^[۷]

پس از آماده کردن نمونه‌ی سه محوری، فشار همه جانبه‌ی مورد نظر بر نمونه اعمال می‌شود. سپس آزمایش با اعمال بار قائم با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه و تا رسیدن کرنش محوری به ۱۵٪ ادامه می‌یابد. توجه به این نکته ضروری است که اگر چه استفاده از ستون‌های سنگی، کاربردهای متفاوتی نظیر: زهکشی، افزایش سرعت تحکیم و جلوگیری از ازدیاد فشار آب حفره‌ی اضافی در بستر دارد، اما هدف اصلی نوشتار حاضر بررسی عملکرد ستون سنگی در افزایش ظرفیت باربری بستر است. لذا آزمایش‌های سه محوری روی نمونه‌های مورد نظر (غیر اشباع و با درصد رطوبت نسبتاً کم) بدون اندازه‌گیری فشار حفره‌ی انجام شده‌اند.

ژئوتکستایل دورگیر



شکل ۵. تصویری از مراحل آماده‌سازی نمونه در قالب.

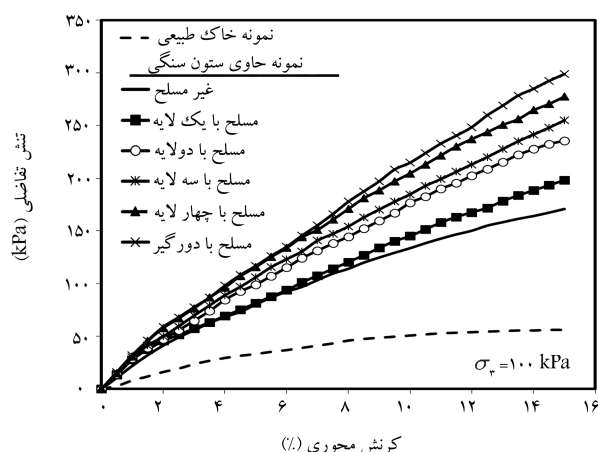
خاک اطراف (حدود ۵ برابر) انتظار می‌رود که اجرای ستون سنگی (غیرمسلح و مسلح) اثر قابل توجهی در بهبود خواص مقاومتی نمونه داشته باشد. بنابراین با توجه به تراکم پایین خاک طبیعی (بر اساس طبقه‌بندی بودو،^[۱۶] برای خاک با درصد تراکم ۷۸ (چگالی نسبی ۰/۳۷) و نتایج آزمایش سه محوری روی آن (شکل ۷-الف)، انتظار دست‌یابی به مقاومت و زاویه اصطکاک داخلی بالا برای خاک مذکور وجود ندارد و می‌توان آن را نماینده‌ی بستر سست دانست.

۳.۵. بررسی تأثیر ستون سنگی و تسلیح آن با ژئوتکستایل لایه‌ی و دورگیر در مقاومت نمونه

شکل ۸، تغییرات تنش - کرنش نمونه‌های بدون ستون سنگی و نمونه‌های حاوی ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با ژئوتکستایل لایه‌ی و دورگیر، تحت فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، در صورتی که منحنی تنش - کرنش خاک، نقطه‌ی بیشینه‌ی تنش مشخص نداشته باشد، مقدار مقاومت در کرنش ۱۵٪ به عنوان مقاومت نهایی لحاظ می‌شود.^[۱۹] این شکل نشان می‌دهد که وجود ستون سنگی صرف‌نظر از تسلیح یا عدم تسلیح آن، به علت عملکرد مرکب و وقوع نشست یکسان ستون سنگی و خاک اطراف آن، سبب افزایش قابل ملاحظه در مقاومت نمونه می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد؛ که این امر به علت محصور شدن مصالح ستون سنگی بین لایه‌های ژئوتکستایل و جلوگیری از حرکت جانبی آن‌ها در مقایسه با نمونه‌ی حاوی ستون سنگی غیرمسلح است.

لازم به ذکر است که در ترازهای پایین کرنش، تفاوت چندانی بین رفتار نمونه‌های حاوی ستون سنگی غیرمسلح و مسلح ملاحظه نمی‌شود. افزایش مقاومت در نمونه‌های مذکور بعد از یک میزان کرنش اولیه (حدود ۱ تا ۵٪) و با به کار افتادن لایه‌های تسلیح قابل مشاهده است. این نتیجه در خصوص تسلیح در برخی مطالعات نمونه‌های سه محوری،^[۶،۵] و مدل‌سازی پی بر روی بستر مسلح،^[۸] و حتی در شبیه‌سازی عددی در ابعاد واقعی،^[۱۰] نیز ارائه شده است.

فشار همه جانبه‌ی وارد بر نمونه (σ_3) و ژئوتکستایل دورگیر، از طریق ایجاد محدود کننده‌ی خارجی و ژئوتکستایل لایه‌ی از طریق محدود کننده‌ی داخلی سبب افزایش باربری نمونه می‌شوند. فشار همه جانبه‌ی خارجی (σ_3) به طور بالفعل از ابتدا



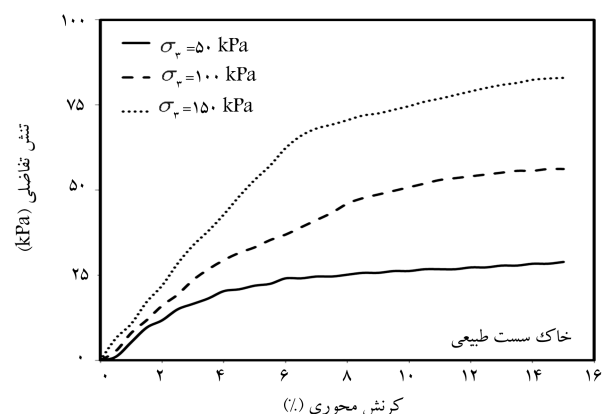
شکل ۸. تغییرات تنش - کرنش نمونه‌های بدون ستون سنگی و با ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با ۱ تا ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل و ژئوتکستایل دورگیر، تحت فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ kPa.

در آزمایش‌های تکراری، بیشترین خطا مربوط به نمونه‌ی حاوی ستون سنگی مسلح با ۲ لایه‌ی ژئوتکستایل و در حدود ۷/۷٪ است، که در محدوده‌ی مطالعات آزمایشگاهی قابل قبول است. خطاهای قابل مشاهده در منحنی تنش - کرنش نمونه‌ها را می‌توان به خطا در قرائت، خطا در توزین مصالح و عدم یکنواختی کامل ذرات خاک اطراف ستون سنگی نسبت داد.

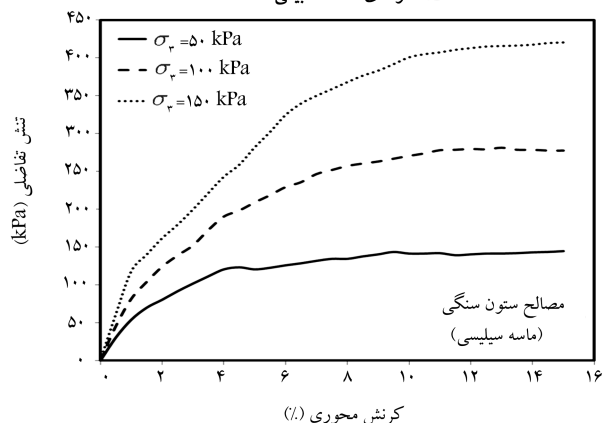
۲.۵. بررسی رفتار خاک طبیعی و مصالح ستون سنگی

به منظور بررسی رفتار دو نوع خاک مورد نظر، منحنی تنش - کرنش خاک اطراف ستون سنگی (خاک طبیعی) و همچنین مصالح ستون سنگی (ماسه‌ی سیلیسی) در فشارهای همه جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۷ ارائه شده است. برای عملکرد مناسب ستون سنگی، باید مقاومت مصالح ستون سنگی چندین برابر مصالح بستر اولیه باشد.^[۱] برای مثال در آزمایش‌هایی در سال ۲۰۱۰،^[۶] نسبت مقاومت مصالح ستون سنگی به مقاومت خاک اطراف آن در کرنش ۱۰٪، تحت ۳ فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر ۹/۱۰، ۹/۳۰ و ۸/۵۵ بوده است.

در پژوهش حاضر، با توجه به شکل ۷، نسبت مقاومت مذکور تحت فشارهای همه جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر ۵/۳۲، ۵/۴۰ و ۵/۳۷ بوده است. از این رو با توجه به مقاومت بالای مصالح ستون سنگی در مقایسه با مصالح

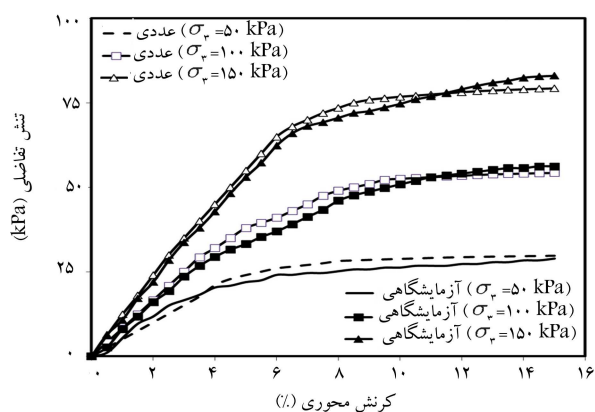


الف) نمونه‌ی خاک طبیعی؛

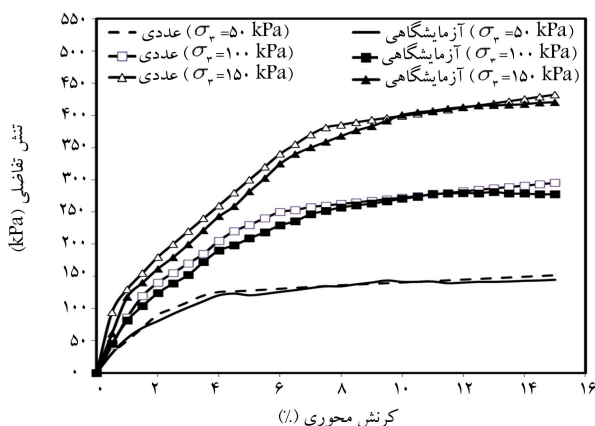


ب) مصالح ستون سنگی.

شکل ۷. تغییرات تنش - کرنش نمونه‌ها تحت فشار همه جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.



الف) نمونه ی خاک طبیعی؛



ب) مصالح ستون سنگی.

شکل ۹. مقایسه ی تغییرات تنش نفاذی - کرنش نمونه ها حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی تحت ۳ فشار همه جانبه ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.

از نظر اجرایی به منظور انتخاب مدل رفتاری مناسب برای هر دو نوع مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن (خاک طبیعی سست)، دو مدل رفتاری دراکر - پراگر سخت شونده و موهر - کولمب موجود در نرم افزار، استفاده و نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش ها مقایسه شده اند. مطابق شکل ۹، برای مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن (خاک طبیعی سست)، به ترتیب از مدل های رفتاری دراکر - پراگر سخت شونده و موهر - کولمب (به دلیل تطبیق بهتر با نتایج آزمایش ها) و برای ژئوتکستایل از مدل کشسان استفاده شده است.

با توجه به مقاومت کششی ژئوتکستایل در کرنش ۵٪ (جدول ۱)، سختی متوسط

برکل نمونه وارد می شود و نیاز به بروز کرنش اولیه در نمونه ندارد، اما برای ایجاد محدود کنندگی خارجی برای مصالح ستون سنگی توسط ژئوتکستایل دورگیر و ایجاد محدود کنندگی داخلی توسط ژئوتکستایل لایه یی، نیاز به وقوع مقداری کرنش در نمونه است. با مقایسه ی بهبود باربری نمونه در تسلیح با ۴ لایه ی ژئوتکستایل و تسلیح دورگیر می توان دریافت که در شرایط یکسان، استفاده از تسلیح لایه یی با ۴ لایه ی ژئوتکستایل از لحاظ میزان بهبود مقاومت می تواند به طور تقریبی با تسلیح دورگیر از همان جنس برابری کند. باربری نهایی (در کرنش ۱۵٪) نمونه های حاوی ستون سنگی مسلح با ۴ لایه ی ژئوتکستایل نسبت به تسلیح دورگیر فقط ۷٪ کمتر است، اما ژئوتکستایل مورد نیاز برای تسلیح دورگیر ستون سنگی در تمام طول ستون حدود ۵ برابر ژئوتکستایل مورد نیاز برای تسلیح با ۴ لایه است. لذا به نظر می رسد که تسلیح دورگیر (با توجه به عدم افزایش قابل توجه مقاومت نمونه نسبت به حالت تسلیح صفحه یی) اقتصادی نیست.

نیز در یک پروژه ی واقعی، با توجه به صاف نبودن محیط درونی چاه حفر شده توسط حفار، عدم امکان تماس کامل و درگیری مناسب ژئوتکستایل دورگیر با دیواره های چاه انتظار کاهش عملکرد تسلیح می رود. به هر حال به منظور بررسی دقیق تر موضوع عنوان شده در بخش تحلیل عددی، مطالعات کاملی درخصوص تأثیر طول تسلیح دورگیر و مقایسه ی آن با تسلیح لایه یی انجام شده است.

۶. شبیه سازی عددی

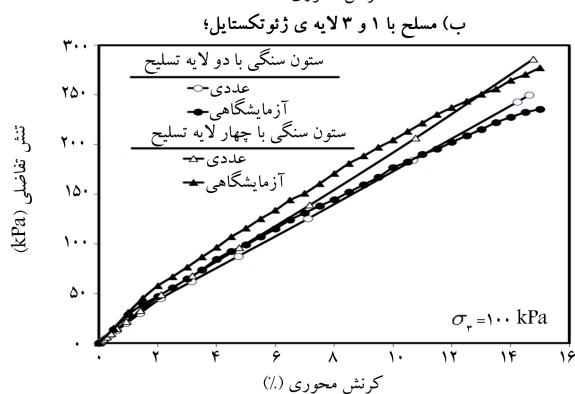
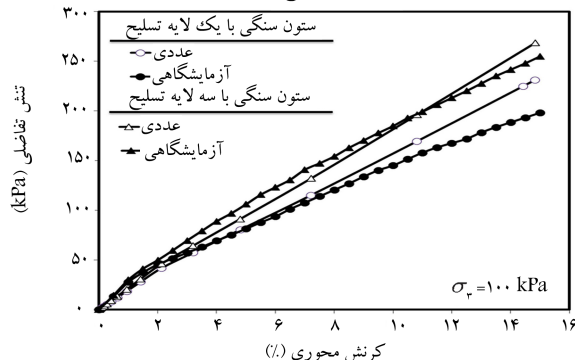
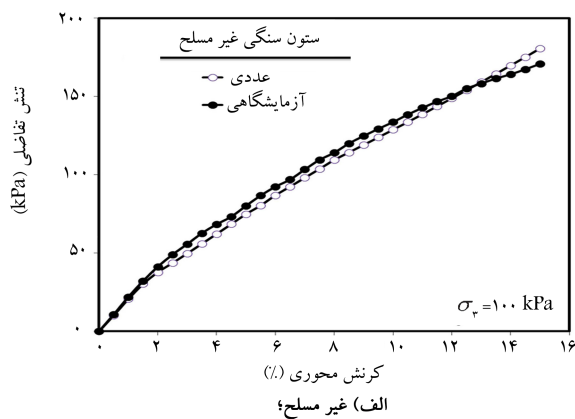
در بخش حاضر، با توجه به محدودیت انجام آزمایش های بیشتر در آزمایشگاه، با انجام تحلیل عددی ضمن شبیه سازی و تأیید صحت نتایج آزمایشگاهی به جنبه های جدیدی از مطالعات، از قبیل: مقایسه ی عملکرد تسلیح لایه یی و دورگیر به ویژه تأثیر طول و محل قرارگیری تسلیح دورگیر در باربری ستون سنگی (با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی که کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده است) و اثر آن در شکم دادگی ستون پرداخته شده است.

۱.۶. مشخصات مصالح، شبکه بندی و نوع مدل رفتاری

برای شبیه سازی عددی رفتار نمونه های مورد آزمایش (نمونه های بدون و با ستون سنگی در حالت غیرمسلح و مسلح) نمونه ی استوانه یی آزمایش سه محوری به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس نسخه ی ۶/۱۴ مدل شده است. جدول ۳، مشخصات مصالح مختلف مورد استفاده برای مدل سازی عددی را نشان می دهد.

جدول ۳. مشخصات مصالح مورد استفاده برای مدل سازی.

مصالح	مدل رفتاری	وزن مخصوص (KN/m ³)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kPa)	زاویه اتساع (درجه)	مدول کشسانی اولیه در فشار همه جانبه ی ۱۰۰ kPa (MPa)	ضریب پواسون	نسبت تخلخل اولیه	ضریب فشار جانبی (حالت سکون)	نسبت تنش جریان
خاک سست	موهر - کولمب	۱۵/۱۲	۱۲	۱/۹	۰/۱	۱	۰/۳۵	۰/۸۴۷	۰/۷۴۲	-
مصالح ستون سنگی	دراکر - پراگر سخت شونده	۱۷/۴۷	۳۶/۱۰	۰	۶/۱۰	۱۵	۰/۳	۰/۵۶۵	۰/۴۱	۰/۷۸۸
ژئوتکستایل	کشسان خطی	۳/۸	-	-	-	۲۲۸	۰/۳	-	-	-



شکل ۱۰. مقایسه‌ی تغییرات تنش - کرنش نمونه با ستون سنگی حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی تحت فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ kPa.

کرد. همچنین با توجه به منحنی‌های مذکور می‌توان نتیجه گرفت که شکم‌دادگی ستون سنگی غیرمسلح، نسبت به ستون سنگی مسلح بیشتر است و با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح، شکم‌دادگی ستون کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش تعداد لایه‌ها، تمرکز تنش کششی (با علامت مثبت) در آن‌ها بیشتر می‌شود. این امر مبین عملکرد لایه‌های تسلیح در ایجاد محدودکنندگی داخلی و افزایش باربری بستر نسبت به حالت وجود ستون سنگی غیرمسلح است.

۴.۶. تحلیل نمونه‌های حاوی ستون سنگی با تسلیح دورگیر

شکل ۱۲، تغییرات تنش - کرنش نمونه‌ی حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر تحت فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ kPa، حاصل از آزمایش و تحلیل عددی و همچنین منحنی هم تراز تنش اصلی بیشینه‌ی آن را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج

آن (j) در کرنش ۵٪ برابر ۱۱۴ kN/m و مقدار مدول کشسان ژئوتکستایل (E) از رابطه‌ی ۱ و با توجه به ضخامت (t) برابر ۰/۵ میلی‌متر برای ژئوتکستایل، برابر ۲۲۸ مگاپاسکال به دست می‌آید:

$$j = E.t \quad (۱)$$

لازم به ذکر است که مدول کشسانی اولیه‌ی خاک سست طبیعی در فشارهای همه‌جانبه‌ی ۵۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۰/۶ و ۱/۵ مگاپاسکال و برای مصالح ستون سنگی به ترتیب ۸ و ۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقادیر مدول کشسانی مصالح خاک طبیعی (ماسه‌ی رس‌دار) و مصالح ستون سنگی (جدول ۳) و به خصوص نسبت آن دو با مقادیر مورد نظر در برخی مطالعات، [۲۰-۲۳] تطبیق قابل قبولی دارد.

برای شبکه‌بندی مدل از شبکه‌ی مکعبی (بهترین گزینه برای نمونه‌ی استوانه‌یی) با شیوه‌ی Sweep و از الگوریتم Medial Axis استفاده شده است. اندازه‌ی عمومی المان‌ها به ترتیب برای ستون سنگی و خاک اطراف آن ۷ و ۱۰ میلی‌متر و تابع درون‌یابی المان‌ها، درجه‌ی ۲ و نوع آن‌ها، المان‌های ۲۰ گره‌یی محیط پیوسته با درجه آزادی و نقاط گوسی کاهش‌یافته (C3D20R) است. با توجه به تحلیل به صورت تنش مؤثر توسط نرم‌افزار آباکوس و کم بودن رطوبت نمونه‌های سه محوری و عدم ایجاد فشار آب حفریه‌ی قابل ملاحظه، تحلیل به صورت تک‌فاز (در نظر نگرفتن آب) و در یک مرحله‌ی بارگذاری انجام شده است.

المان‌های اندرکنش ژئوتکستایل با خاک‌ها بدون کاهش مقاومت در نظر گرفته شده‌اند. زیرا از یک طرف نصب ستون سنگی باعث ایجاد مرزی زبر در مصالح می‌شود و از طرف دیگر، رطوبت اندک مصالح موجب جلوگیری از وقوع لغزش بین ژئوتکستایل و خاک می‌شود. لذا ژئوتکستایل به صورت یک عضو مدفون^۹ در خاک و بدون نیاز به تعریف المان مشخص اندرکنش مدل می‌شود. [۲۴]

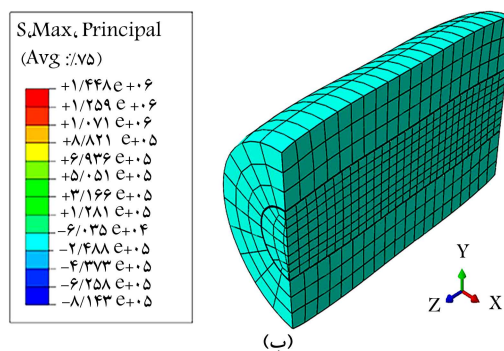
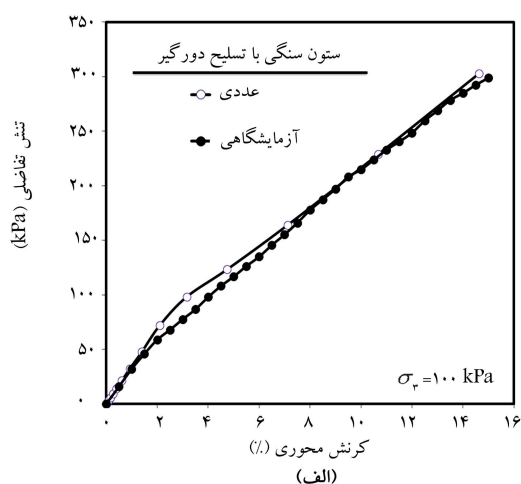
۲.۶. تحلیل نمونه‌های خاک طبیعی و مصالح ستون سنگی

شکل ۹، نمودار تنش انحرافی - کرنش نمونه‌ی خاک طبیعی و مصالح ستون سنگی، حاصل از آزمایش و تحلیل عددی را تحت ۳ فشار همه جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال مقایسه می‌کند. به طور کلی ملاحظه می‌شود که تحلیل عددی با تقریب مناسبی قادر به شبیه‌سازی نتایج آزمایشگاهی است، به طوری که در بیشتر سطوح کرنش، اختلافی کمتر از ۱۵٪ بین نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد.

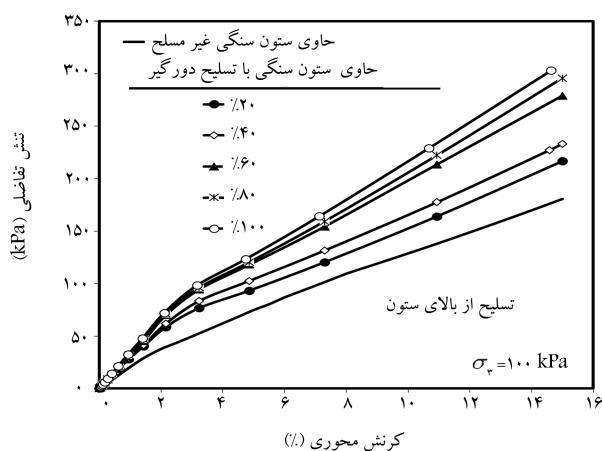
۳.۶. تحلیل نمونه‌های حاوی ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با

ژئوتکستایل لایه‌یی

شکل ۱۰، تغییرات تنش - کرنش نمونه‌های حاوی ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با لایه‌های ژئوتکستایل، حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ kPa را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی نمودارهای ذکر شده، نزدیکی خوب و قابل قبولی بین نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل عددی را صرف‌نظر از تعداد لایه‌ی تسلیح نشان می‌دهد. بیشینه‌ی اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی کمتر از ۱۵٪ است. همچنین منحنی‌های هم‌تراز تنش اصلی بیشینه در مقطع تغییرشکل یافته‌ی نمونه‌های حاوی ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با ۲ و ۴ لایه‌ی ژئوتکستایل را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده کرد. در منحنی هم‌تراز تنش مربوط به نمونه‌های حاوی ستون سنگی می‌توان تمرکز تنش در قاعده‌ی بالایی نمونه‌ی ستون سنگی را به علت تفاوت مدول کشسانی خاک‌ها (خاک ستون سنگی و خاک اطراف) مشاهده



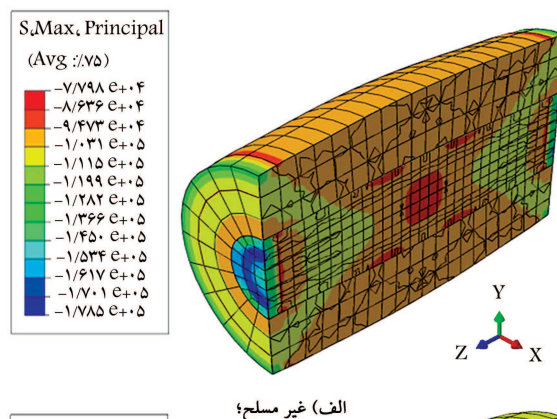
شکل ۱۲. الف) مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل عددی، ب) منحنی هم تراز تنش، برای نمونه حاوی ستون سنگی مسلح.



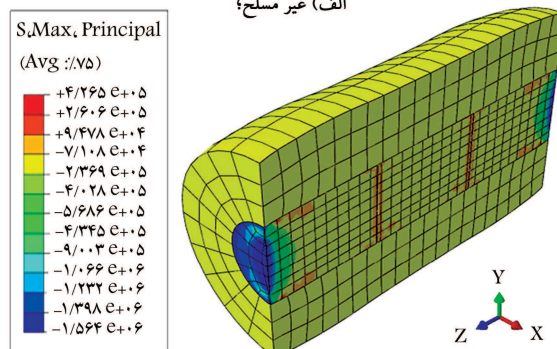
شکل ۱۳. تغییرات تنش - کرنش محوری نمونه‌های حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر با نسبت‌های تسلیح ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد طول ستون سنگی (از بالای ستون) حاصل از تحلیل عددی تحت فشار همه جانبه $\sigma_p = 100$ kPa.

سنگی (در ۲ حالت تسلیح بالای ستون و تسلیح وسط ستون) مدل‌سازی و تحلیل شده است.

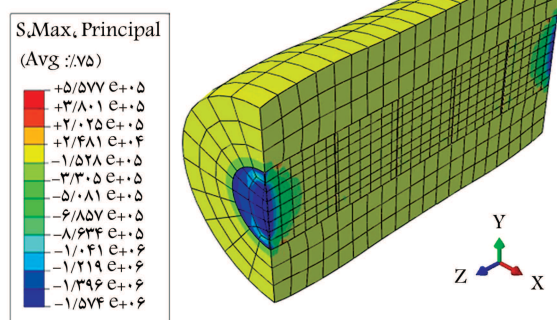
شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب تغییرات تنش - کرنش محوری نمونه‌های حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر در بخش بالایی و بخش میانی ستون، با نسبت‌های تسلیح طولی مختلف حاصل از تحلیل عددی تحت فشار همه



الف) غیر مسلح؛



ب) مسلح با ۲ لایه ی ژئوتکستایل؛



ج) مسلح با ۴ لایه ی ژئوتکستایل، تحت فشار همه جانبه ی ۱۰۰ kPa.

شکل ۱۱. منحنی هم‌تراز تنش اصلی بیشینه در مقطع تغییرشکل یافته‌ی نمونه‌ی حاوی ستون سنگی.

آزمایش و تحلیل عددی در شکل ۱۲ - الف مبین عملکرد مناسب تحلیل عددی مورد نظر در تخمین نتایج آزمایشگاهی است. همچنین تمرکز تنش کششی با علامت مثبت در ژئوتکستایل دورگیر (شکل ۱۲ - ب) مبین عملکرد مناسب تسلیح دورگیر در افزایش محصورکنندگی جانبی مصالح ستون سنگی و در نتیجه افزایش باربری بستر است.

۵.۶. بررسی تأثیر طول تسلیح دورگیر

همان‌طور که در بخش ۳.۵ بیان شد، استفاده از تسلیح لایه‌یی (مثلاً ۴ لایه) نسبت به تسلیح دورگیر در کل طول ستون سنگی (با پوشش کامل ستون سنگی) برای رسیدن به یک مقاومت یکسان از نظر اقتصادی و اجرایی می‌تواند عملکرد بهتری ارائه دهد. لذا به منظور بررسی دقیق‌تر، تأثیر تسلیح دورگیر در بخشی از طول ستون

جدول ۴. ضریب بهبود رفتار (IF) حاصل از تحلیل عددی.

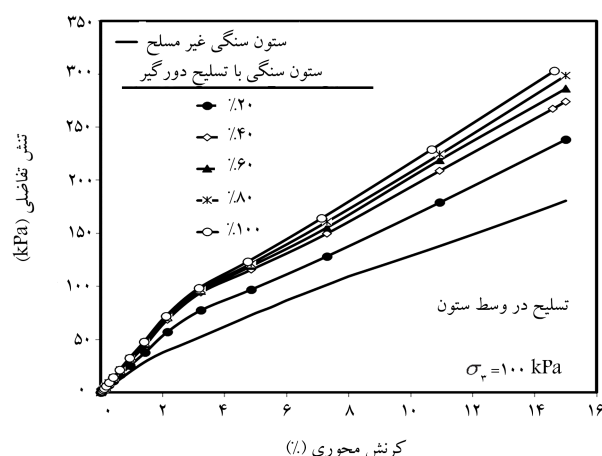
تسلیم	درصد تسلیم طولی دورگیر ستون										تعداد لایه‌های تسلیم				
	سنگی در وسط ستون					سنگی از بالای ستون					۱	۲	۳	۴	۲۰
	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۸۰	۶۰					
کامل	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۸۰	۶۰	۱	۲	۳	۴	۲۰
IF	۱/۶۷	۱/۶۵	۱/۵۸	۱/۴۷	۱/۳۲	۱/۶۳	۱/۵۴	۱/۲۵	۱/۲۰	۱/۵۸	۱/۴۸	۱/۳۸	۱/۲۸	۱/۲۸	۱/۲۸
A_g (cm^2)	۲۵۱/۳۳	۲۰۱/۰۶	۱۵۰/۸۰	۱۰۰/۵۳	۵۰/۲۶	۲۰۱/۰۶	۱۵۰/۸۰	۱۰۰/۵۳	۵۰/۲۶	۵۰/۲۶	۳۷/۷۰	۲۵/۱۳	۱۲/۵۶	۱۲/۵۶	۱۲/۵۶

موضوعی بیشینه به لایه‌های پایین‌تر و احتمالاً سخت‌تر زمین، باربری بستر را افزایش داد.

با افزایش طول تسلیم به بیش از نصف طول نمونه، شکم‌دادگی ستون سنگی به پایین‌تر از مرکز نمونه انتقال می‌یابد. لذا در تسلیم بخش بالایی به میزان ۶۰٪ از طول ستون سنگی، افزایش مقاومت قابل توجهی در نمونه ایجاد می‌شود. شکم‌دادگی نمونه‌های با طول تسلیم ۸۰ و به خصوص ۱۰۰٪، نسبت به سایر نمونه‌ها کاهش چشم‌گیری دارد. در نمونه‌ی با طول تسلیم کامل (نسبت به نمونه‌ی غیرمسلح) ضمن کنترل بیشتر شکم‌دادگی وسط ستون، بیشترین مقدار شکم‌دادگی در عمقی معادل قطر ستون سنگی (D) در بالا و پایین نمونه (با توجه به تقارن نمونه) رخ می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۱۶، با تسلیم دورگیر در وسط نمونه به میزان ۲۰٪ طول ستون سنگی، ضمن کنترل شکم‌دادگی وسط ستون سنگی نسبت به حالت غیرمسلح، مقاومت نمونه به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که میزان افزایش مقاومت در این حالت (شکل ۱۴)، از تسلیم دورگیر در ۲۰٪ از بالای ستون بیشتر است (شکل ۱۳).

همچنین در این حالت بیشینه‌ی شکم‌دادگی از وسط ستون سنگی به عمقی معادل $D/5$ (در بالا و پایین ستون) انتقال می‌یابد. با افزایش طول تسلیم به ۴۰٪ و ۶۰٪ طول ستون سنگی در وسط آن، میزان شکم‌دادگی نسبت به حالت تسلیم دورگیر از بالای ستون سنگی (شکل ۱۵) کاهش قابل توجهی دارد. تسلیم ۸۰٪ ستون سنگی به صورت دورگیر محل وقوع شکم‌دادگی بیشینه را از عمق حدود $D/5$ به عمق D انتقال می‌دهد. این حالت از نظر مقاومتی تفاوت زیادی با حالت تسلیم ۸۰ درصدی از بالای ستون سنگی ندارد. به منظور درک بهتر از تسلیم دورگیر ستون سنگی در بخشی از طول آن، جدول ۴ عملکرد مقاومتی نمونه‌های مسلح با ژئوتکستایل لایه‌یی (در تعداد لایه‌های مختلف) و دورگیر (با طول‌های مختلف) را برای نمونه‌های حاوی ستون سنگی همراه با میزان ژئوتکستایل مصرفی (A_g) نشان می‌دهد. در جدول مذکور، IF نسبت مقاومت نهایی نمونه با ستون سنگی مسلح به مقاومت نهایی نمونه با ستون سنگی غیرمسلح (در کرنش ۱۵٪) حاصل از تحلیل عددی است.

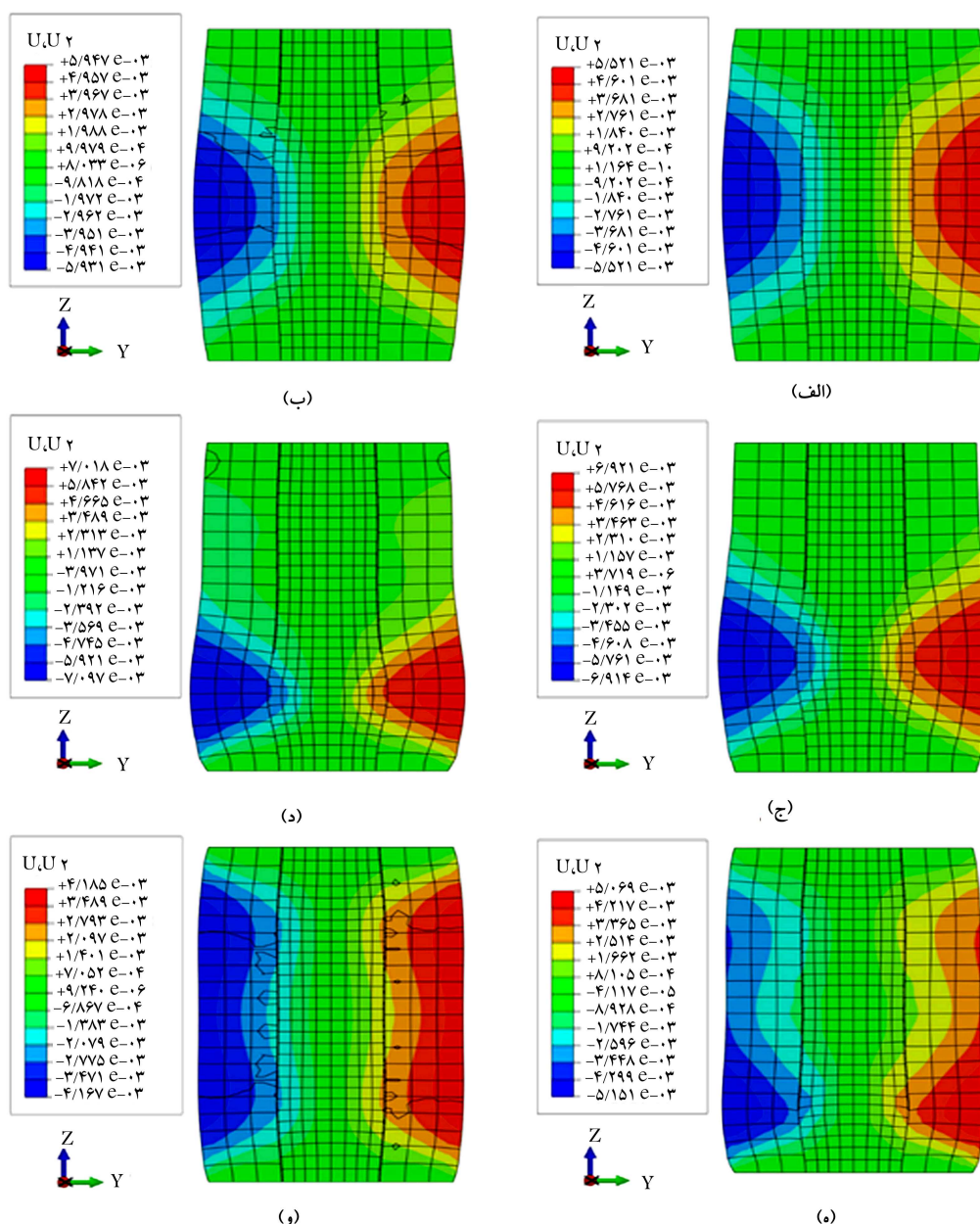
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاومت نهایی نمونه‌ی حاوی ستون سنگی با ۴ لایه‌ی تسلیم با مقاومت نهایی نمونه‌ی حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر با نسبت تسلیم طولی ۶۰٪ (صرف‌نظر از محل قرارگیری آن) تقریباً برابری می‌کند، در حالی که در این حالت مساحت ژئوتکستایل مورد نیاز در تسلیم دورگیر، ۳ برابر حالت تسلیم صفحه‌یی است. بنابراین می‌توان گفت با توجه به ملاحظات اقتصادی و همچنین اجرایی، استفاده از تسلیم لایه‌یی نسبت به تسلیم دورگیر اولویت دارد.



شکل ۱۴. تغییرات تنش - کرنش محوری نمونه‌های حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر با نسبت‌های تسلیم ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد طول ستون سنگی (واقع در وسط ستون) حاصل از تحلیل عددی تحت فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰ kPa.

جانبه‌ی ۱۰۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهند. در شکل‌های مذکور ملاحظه می‌شود که اگرچه با افزایش طول تسلیم در ارتفاع ستون سنگی (صرف‌نظر از تسلیم در بخش بالایی یا میانی) باربری نمونه در یک میزان مشخص کرنش افزایش می‌یابد، اما تسلیم بیش از حدود ۶۰٪ طول ستون سنگی به خصوص برای ترازهای کرنش کمتر از ۵٪ (ترازهای مورد نظر در طراحی‌های واقعی) تأثیر قابل توجهی در باربری ندارد.

همچنین شکل‌های ۱۵ و ۱۶، به ترتیب منحنی‌های هم‌تراز تغییر مکان (بر حسب متر) در راستای Y را برای نمونه‌های حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر در بالا و وسط ستون با نسبت‌های تسلیم طولی مختلف حاصل از تحلیل عددی و تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ kPa نشان می‌دهند. مطابق شکل ۱۵ - الف، بیشینه‌ی شکم‌دادگی نمونه‌های حاوی ستون سنگی غیرمسلح در وسط طول ستون ایجاد می‌شود. با تسلیم دورگیر در ۲۰٪ طول ستون (تسلیم از بالا ستون) محل و نحوه‌ی شکم‌دادگی تغییر چندانی ندارد، اما با افزایش طول تسلیم (حالات ۴۰٪ و ۶۰٪ طول ستون سنگی)، ضمن کاهش میزان شکم‌دادگی، محل آن از وسط ستون سنگی به بعد از بخش انتهایی تسلیم دورگیر انتقال می‌یابد (وقوع شکست در قسمت پایینی نمونه). این نتیجه به طور کیفی با نتایج مطالعاتی در سال ۲۰۰۹^[۲۵] مشابهت دارد. لذا در یک پروژه‌ی واقعی می‌توان با تسلیم دورگیر بخشی از بالای ستون سنگی و انتقال شکم‌دادگی



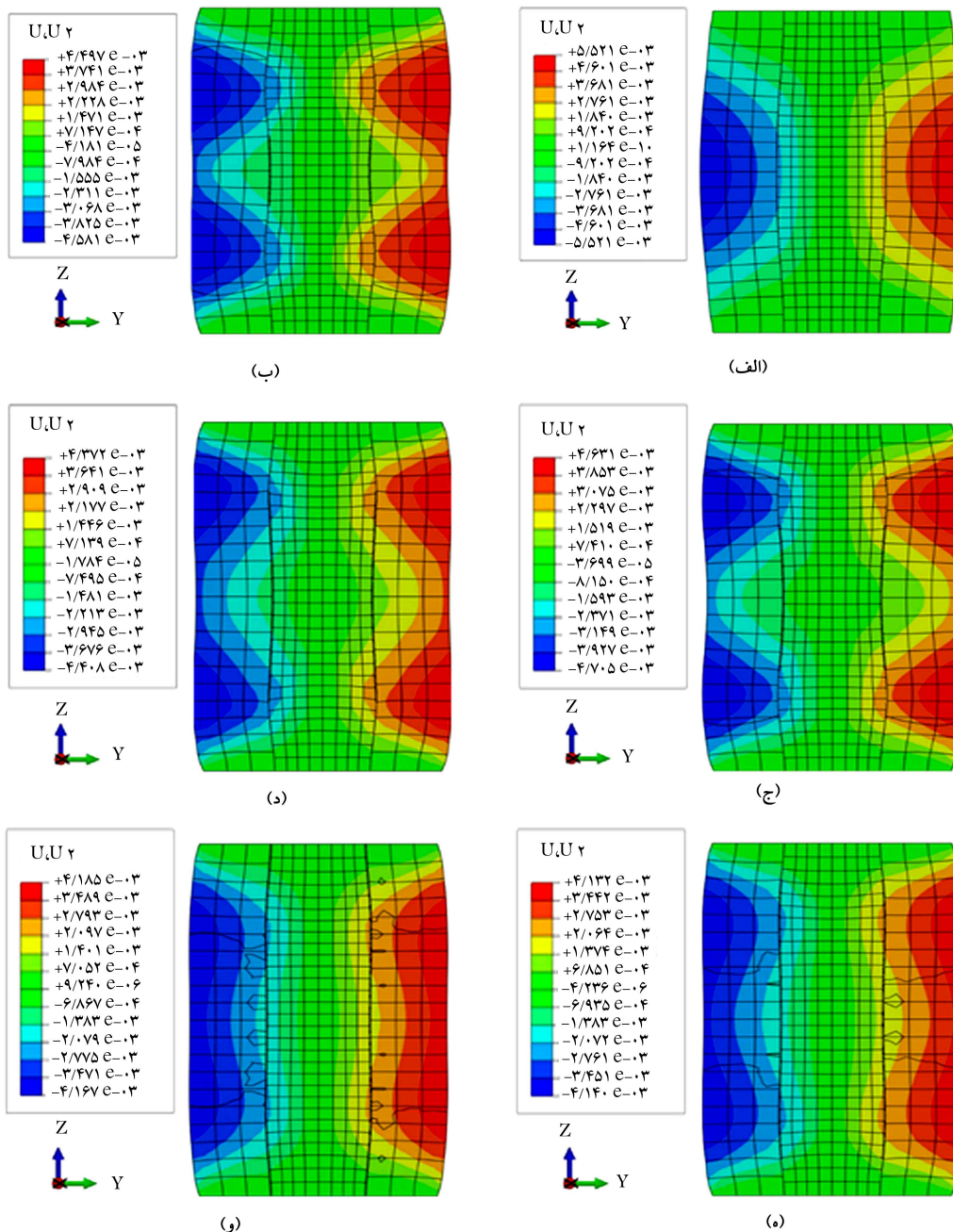
شکل ۱۵. منحنی هم‌تراز تغییر مکان در راستای y برای نمونه‌های حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر (از بالای ستون) با نسبت‌های تسلیح، الف) ۰، ب) ۲۰، ج) ۴۰، د) ۶۰، ه) ۸۰ و ۱۰۰ درصد طول ستون سنگی حاصل از تحلیل عددی تحت فشار همه جانبه 100 kPa .

کرنش اولیه (حدود ۱ تا ۱/۵) و با به کار افتادن لایه‌های تسلیح قابل مشاهده است.

- به طور کلی تحلیل عددی با تقریب مناسبی قادر به شبیه‌سازی نتایج آزمایشگاهی است، به طوری که در تمامی تحلیل‌ها و در بیشتر سطوح مختلف کرنش، اختلافی کمتر از ۱۵٪ بین نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد.
- با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح در ستون سنگی، شکم‌دادگی ستون کاهش می‌یابد. بیشترین تمرکز تنش‌های کششی در مرکز لایه‌های تسلیح رخ می‌دهد. همچنین با افزایش طول تسلیح دورگیر در ستون سنگی، شکم‌دادگی ستون کنترل می‌شود.
- مقاومت نمونه‌ی حاوی ستون سنگی با ۴ لایه‌ی تسلیح با مقاومت نهایی نمونه‌ی

۷. نتیجه‌گیری

- با توجه به آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی در خصوص تأثیر ستون سنگی غیرمسلح و مسلح در رفتار خاک سست ماسه‌یی رس‌دار، این نتایج بیان شده است:
- بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی مبین تأثیر مناسب ستون سنگی (در حالت مسلح و غیرمسلح) در افزایش باربری بستر است.
- تسلیح ستون سنگی با ژئوتکستایل لایه‌یی دورگیر موجب افزایش انعطاف پذیری نمونه‌ها در مقایسه با حالت غیرمسلح و همچنین افزایش باربری آن‌ها به ازاء یک کرنش مشخص می‌شود. افزایش مقاومت در نمونه‌های مذکور بعد از یک میزان



شکل ۱۶. منحنی هم‌تراز تغییر مکان در راستای y برای نمونه‌های حاوی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل دورگیر (واقع در وسط ستون) با نسبت‌های تسلیح (الف) ۰، (ب) ۲۰، (ج) ۴۰، (د) ۶۰، (ه) ۸۰ و (و) ۱۰۰ درصد طول ستون سنگی حاصل از تحلیل عددی تحت فشار همه جانبه 100 kPa .

عملکرد تسلیح (در مقایسه با شرایط آزمایشگاهی) وجود دارد. لذا استفاده از لایه‌های ژئوتکستایل (در تعداد مورد نیاز) به جای ژئوتکستایل دورگیر می‌تواند از نقطه نظر اجرا و همچنین از نقطه نظر اقتصادی مفید باشد.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر، فقط برای یک نوع ژئوتکستایل و یک نوع خاک با دانه بندی مشخص حاصل شده است. لذا در صورت تغییر خصوصیات هر یک از مصالح (ژئوتکستایل، مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن)، اگرچه می‌توان انتظار داشت نتایج روند کلی مشابهی داشته باشند، اما باید آزمایش‌های جانبی با مصالح مورد نظر انجام داد.

حاوی ستون سنگی مسلح به ژئوتکستایل دورگیر با نسبت تسلیح طولی ۶۰٪ (صرف نظر از محل قرارگیری آن) تقریباً برابری می‌کند. اما در این حالت مساحت ژئوتکستایل مورد نیاز در تسلیح دورگیر ۳ برابر حالت تسلیح صفحه‌بی است. بنابراین می‌توان گفت برای رسیدن به یک ظرفیت باربری مشخص، میزان ژئوتکستایل لایه‌بی مورد نیاز در یک ستون سنگی از مقدار ژئوتکستایل دورگیر مصرفی در ستون مشابه بسیار کمتر است. همچنین از نظر اجرایی نیز در یک پروژه واقعی، با توجه به صاف نبودن محیط درونی چاه حفر شده توسط حفار، عدم امکان تماس کامل و درگیری مناسب ژئوتکستایل دورگیر با دیواره‌های چاه، انتظار کاهش

پانوشتها

1. geosynthetics
2. geotextile
3. geogrid
4. dupontTM typar[®]
5. Poly Vinyl Chloride
6. embeded

منابع (References)

1. FHWA, "Design and construction of stone columns", Volume Report No. FHWA/Rd-83/026 (1983)
2. Almeida, S.S. and Marques, M., *Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils*, Taylor and Francis, London, UK, 199 p. (2013).
3. Bergado, D. T., Alfaro, M. C. and Chai, J. C. "The granular pile: its present state and future prospects for improvement of soft Bangkok clay", *Geotechnical Engineering*, **22**, pp. 143-175 (1991).
4. Castro, J., Karstunen, M. and Sivasithamparam, N. "Influence of stone column installation on settlement reduction", *Computers and Geotechnics*, **59**, pp.87-97 (2014).
5. Sivakumar, V., McKelvey, D., Graham, J. and Hughes, D. "Triaxial tests on model sand columns in clay", *Canadian Geotechnical Journal*, **41**(2), pp. 299-312 (2004).
6. Najjar, S. S., Sadek, S. and Maakaroun, T. "Effect of sand columns on the undrained load response of soft clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**(9), pp. 1263-1277 (2010).
7. Deb, K., Samadhiya, N.K. and Namdeo, J.B. "Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, **29**(2), pp. 190-196 (2011).
8. Ghazavi, M. and Nazari Afshar, J. "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, **38**, pp. 26-36 (2013).
9. Ayadat, T. and Hanna, A.M. "Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil", *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, **9**(4), pp.137-147 (2005).
10. Hosseinpour, I., Riccio, M. and Almeida, M. S. "Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**(4), pp. 363-373 (2014).
11. ASTM D2487-11, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", American Society for Testing and Materials (2011).
12. ASTM D2167-15, "Standard test method for density and unit weight of soil in place by the rubber balloon method", American Society for Testing and Materials (2015).
13. ASTM D4254-14, "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", American Society for Testing and Materials (2014).
14. ASTM D4253-14, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", American Society for Testing and Materials (2014).
15. ASTM D1557-07, "Standard test method for laboratory compaction characteristic of soil using modified effort (56000ft-lbf/ft³ (2700 KN.m/m³))", American Society for Testing and Materials (2007).
16. Budhu, M., *Soil Mechanics and Foundations*, (With CD), John Wiley & Sons (2008).
17. www.typargeo.com
18. ASTM D2850- 03 "Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test", American Society for Testing and Materials (2003).
19. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., *Soil Mechanics*, Wiley Eastern Limited, New Delhi (1979).
20. Keykhosropur, L., Soroush, A. and Imam, R. "3D Numerical analyses of geosynthetic encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, **35**, pp. 61-68 (2012).
21. Guetif, Z., Bouassida, M. and Debats, J.M. "Improved soft clay characteristics due to stone column installation", *Computers and Geotechnics*, **34**(2), pp.104-111 (2007).
22. Han, J., Oztoprak, S., Parsons, R.L. and Huang, J. "Numerical analysis of foundation columns to support widening of embankments", *Computers and Geotechnics*, **34**(6), pp.435-448 (2007).
23. Hassen, G., De Buhan, P. and Abdelkrim, M. "Finite element implementation of a homogenized constitutive law for stone column-reinforced foundation soils, with application to the design of structures", *Computers and Geotechnics*, **37**(1), pp.40-49 (2010).
24. Lo, S.R., Zhang, R. and Mak, J. "Geosynthetic-encased stone columns in soft clay: a numerical study", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(3), pp. 292-302 (2010).
25. Gniel, J. and Bouazza, A. "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(3), pp.167-175 (2009).