



اثر وجود لنز ضعیف بر رفتار ستون‌های سنگی غیر مسلح و مسلح واقع در بستر ماسه‌ای اشباع

نیوشا بزازادگان^۱، نوید گنجیان^{۱*}، جواد نظری افشار^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی عمران- واحد شهرقدس- دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

کلمات کلیدی:

ستون سنگی
لنز ضعیف
ظرفیت باربری
شکم دادگی
ژئوتکتستایل

خلاصه: به کارگیری ستون سنگی برای بهبود رفتار بستر حاوی لنز ضعیف، از روش‌های موثر اصلاح رفتار زمین‌های مسئله‌دار می‌باشد. با پیشرفت فناوری مواد، کاربرد مصالح ژئوسنتتیکی به عنوان مسلح کننده در روش‌های بهسازی افزایش یافته است. استفاده همزمان از ستون سنگی و مسلح کننده دور آن موجب افزایش کارایی این روش بهسازی خاک به ویژه در شرایط وجود لنز ضعیف در نزدیکی سطح زمین و در نتیجه وقوع پدیده شکم دادگی می‌باشد. در این تحقیق اثر استفاده از ستون سنگی واقع در بستر ماسه‌ای اشباع حاوی لنز ضعیف از نظر ظرفیت باربری نهایی و مود گسیختگی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین کارایی مسلح‌سازی ستون سنگی در شرایط وجود لنز ضعیف با ضخامت و تراز قرارگیری متفاوت بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس که با استفاده از نتایج مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس در شرایط تنش واقعی صحت‌سنجی شده‌اند، نشان می‌دهند که در شرایط وجود لنز ضعیف، تغییر طول ستون سنگی غیرمسلح تأثیر چندانی بر وقوع مود گسیختگی شکم دادگی و باربری آن نداشته و کاهش عمق قرارگیری لنز ضعیف اثرات شکم دادگی ستون را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، گرچه مسلح‌سازی ستون سنگی موجب افزایش قابل توجه کارایی آن شده است، اما افزایش ضخامت لنز ضعیف موجب کاهش ظرفیت باربری ستون سنگی در هر دو حالت غیرمسلح و مسلح می‌گردد. وجود لنز ضعیف در بستر ماسه‌ای نسبتاً سست، سبب می‌شود که پدیده شکم دادگی در محدوده قرارگیری لنز ضعیف و تا اعماق حدود ۴ برابر قطر ستون غیرمسلح اتفاق بی‌افتد، در حالی که در صورت استفاده از مسلح کننده، گسیختگی دیگر از نوع شکم دادگی نبوده است.

۱- مقدمه

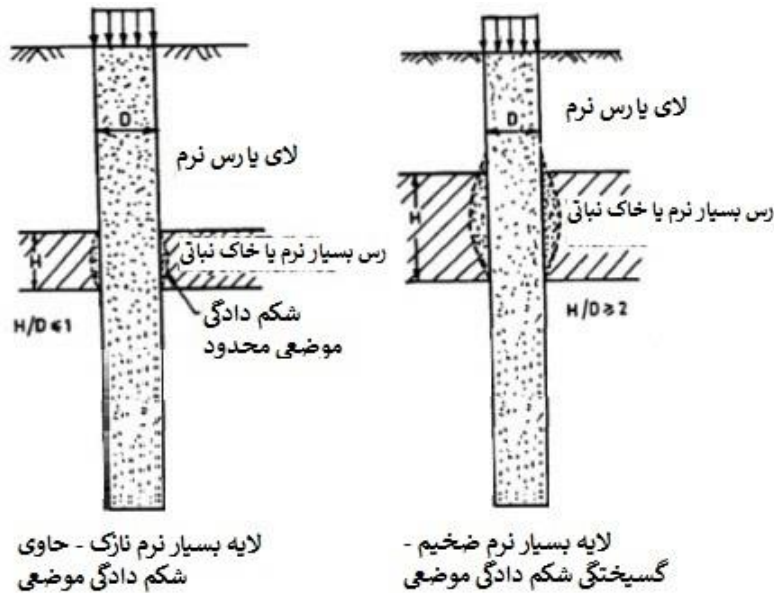
سنگریزه‌ای که درون چاهی به قطر و عمق مشخص ریخته می‌شوند، ظرفیت باربری زمین افزایش یافته و نشست آن کاهش می‌یابد [۱]. در مناطق ساحلی نظیر شهرهای نوار ساحلی شمالی کشور که سطح آب زیرزمینی بالا است، بررسی بهبود رفتار خاک (افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌پذیری) مسلح شده با ستون سنگی در حالت اشباع اهمیت دو چندان داشته و بررسی تاثیر اشباع بودن خاک بر روی پارامترهای مذکور ضروری است. همچنین وجود یک لنز ضعیف ریزدانه در بستر ماسه‌ای نسبتاً سست می‌تواند پیش‌بینی رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی (مثل ستون سنگی) را دشوار سازد. رفتار و مکانیزم گسیختگی ستون سنگی در بستر خاکی شامل لنز ضعیف یا خیلی نرم، بسته به ضخامت (نازک یا ضخیم بودن) لنز، متفاوت می‌باشد [۱]. به عبارت دیگر، وجود لنز ریزدانه نرم در بستر خاکی، ضخامت و نیز عمق قرارگیری آن، اثر به سزایی روی مکانیزم گسیختگی و رفتار ستون سنگی داشته و بررسی رفتار ستون سنگی در بستر خاکی شامل لنز ریزدانه (نرم) اهمیت ویژه‌ای دارد. شکل

در بعضی مواقع مواجهه با بستر سست متشکل از مصالح نرم و تراکم‌پذیر برای احداث سازه‌های مهندسی (شامل ساختمان‌ها، خاکریز راه‌ها و غیره) امری اجتناب‌ناپذیر است. در این شرایط، همواره دو چالش عدم تأمین ظرفیت باربری و همچنین نشست‌های ایجاد شده بیش از حد مجاز وجود داشته و بهسازی مصالح خاکی سست و در نتیجه بهبود ظرفیت باربری و کاهش مقدار نشست‌پذیری بستر امری ضروری خواهد بود. اجرای ستون سنگی^۱ یکی از راه‌های بهبود شاخص‌های مقاومتی و نشست‌پذیری بسترهای سست یا ضعیف می‌باشد. این روش جزو روش‌های تسلیح خاک در زیر مجموعه روش‌های بهسازی خاک است که تا عمق حدود ۲۰ متری کارایی دارد. در این روش با جایگزینی ۱۵ تا ۳۵ درصد حجم خاک سست با مصالح شن و ماسه و یا

1 Stone Column

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: n.ganjan@srbiau.ac.ir





شکل ۱. شماتیک مکانیزم گسیختگی ستون سنگی واقع در بستر حاوی لنز ضعیف با ضخامت‌های متفاوت

Fig. 1. Schematic of stone column failure mechanism embedded in a bed contained soft lens with different thicknesses

رسی نرم دریافتند که افزایش قطر ستون و زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگریزه‌ای باعث افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی می‌گردد. همچنین پیرا و همکاران [۱۶] با تحلیل عددی خاکریز ضعیف بهسازی شده با ستون سنگی به وسیله نرم‌افزار پلکسیس و اسلاید به این نتیجه رسیدند که مدل رفتاری موهر کولمب، جابه‌جایی‌های قائم را نسبت به مدل رفتاری کم-کلی بهتر پیش‌بینی می‌کند. ساکسنا و روی [۱۷] اثر استفاده از دو نوع مصالح سنگریزه‌ای متفاوت در ساخت ستون سنگی بر رفتار ستون را با نرم‌افزار پلکسیس تحلیل کرده و پارامترهای نشست و نسبت طول به قطر ستون سنگی را در هر دو حالت با یکدیگر مقایسه کرده‌اند.

با توجه به بررسی انجام شده در زمینه پیشینه تحقیقات مرتبط با ستون‌های سنگی، هنوز اثر وجود لنز ضعیف بر مود گسیختگی ستون سنگی بررسی نشده است. لذا در تحقیق حاضر، اثر ضخامت و عمق قرارگیری لنز بر رفتار ستون سنگی مستقر در بستر حاوی لنز ضعیف به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. البته جهت اطمینان از صحت نتایج عددی، ابتدا نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از آزمایشات مدل فیزیکی کوچک مقیاس انجام شده در شرایط تنش واقعی (در دستگاه FCV) مقایسه گردیده است. قابل ذکر است که این مدل‌های فیزیکی، برای اولین بار با استفاده از دستگاه محفظه فشار مخروطی شکل، در قالب بخشی از تحقیق حاضر صورت گرفته است.

۱ شماتیک مکانیزم‌های گسیختگی ستون سنگی در شرایط وجود لنز ضعیف با ضخامت‌های متفاوت در بستر طبیعی را نشان می‌دهد.

گرینوود [۲]، هیوج و ویتز [۳] و مک‌کنا و همکاران [۴] تحقیقات ابتدایی بر روی رفتار ستون سنگی و بهبود ظرفیت باربری و نشست خاک به واسطه اجرای آن داشته و در ادامه این تحقیقات، مطالعات وسیعی در زمینه رفتار ستون‌های سنگی انجام شده است. دمیر و همکاران [۵]، تاندل و همکاران [۶] و لون و همکاران [۷] با بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با هندسه‌های متفاوت و مشخصات مختلف مسلح کننده ژئوسنتتیک دریافتند که ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح در حالت اتکایی و یا شناور افزایش می‌یابد. بر اساس اکثر تحقیقات انجام شده، شکم دادگی ستون غیرمسلح واقع در بستر بسیار سست در عمق 0 الی $2/5 D$ (قطر ستون سنگی) از سطح بالایی ستون سنگی اتفاق می‌افتد [۸-۱۰]. مطالعه رفتار ستون سنگی با قطرهای مختلف بدون مسلح کننده و با روکش ژئوتکستایل در خاک لایه‌ای نشان داده است که خاک بهسازی شده با ستون سنگی بار بیشتری نسبت به خاک بهسازی نشده تحمل می‌کند [۱۱-۱۳]. موهانتی و سامانتا [۱۴] به مطالعه آزمایشگاهی و عددی رفتار ستون سنگی در خاک لایه‌ای پرداخته‌اند. در این مطالعه، دو نوع سیستم لایه‌بندی، یعنی رس نرم بر روی رس سفت و برعکس، برای مطالعه در نظر گرفته شده است. دنیش و همکاران [۱۵] با بررسی عددی عملکرد ستون سنگی در خاک

جدول ۱. مشخصات مصالح بستر ماسه‌ای، لنز رسی و ستون سنگی

Table 1. Properties of sandy bed, clay lens and stone column material

ستون سنگی	رس	ماسه	واحد	پارامتر
۲۰	۱۵	۱۸/۴	کیلونیوتن بر متر مکعب	وزن مخصوص (دانسیته) (γ_d)
۹۰۰۰۰	۵۵۰۰	۲۰۰۰۰	کیلوپاسکال	مدول الاستیسیته (E)
۰/۳	۰/۳	۰/۳	-	نسبت پواسون (ν)
۳۵	-	۲۹	درجه	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)
۵	-	-	درجه	زاویه اتساع (ψ)
۲	۱۵	۲	کیلوپاسکال	چسبندگی (C)

جدول ۲. مشخصات مصالح مسلح کننده ژئوتکستایل

Table 2. Properties of geotextile

مقدار	واحد	پارامتر
۳۰۰	گرم بر متر مربع	جرم واحد سطح
۳/۶	میلی‌متر	ضخامت
۱	کیلونیوتن بر متر مکعب	وزن مخصوص (دانسیته) (γ_d)
۲۰۰۰۰۰	کیلوپاسکال	مدول الاستیسیته (E)
۰/۳	-	نسبت پواسون (ν)

۲- مشخصات مدل عددی

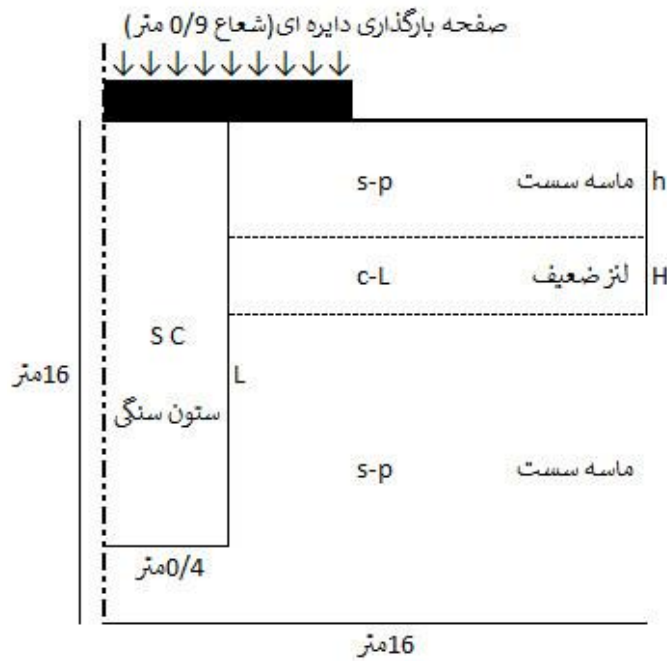
در تحقیق حاضر بررسی رفتار ستون سنگی غیرمسلح و مسلح در شرایط وجود لنز ضعیف رسی واقع در بستر سست ماسه‌ای اشباع با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس صورت گرفته است. ابعاد مدل بر مبنای ابعاد معمول ستون سنگی قابل اجرا در بستر حاوی لنز سست و مشخصات ماسه تشکیل دهنده بستر نیز مطابق با ماسه سواحل بندر انزلی انتخاب شده است. با توجه به شرایط هندسی مسئله، از مدل‌سازی تقارن محوری استفاده شده است. رفتار مصالح ماسه، رس و ستون سنگی بر اساس مدل گسیختگی الاستو پلاستیک موهر-کولمب به عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در تحلیل‌های ژئوتکنیکی و قانون جریان نیز به صورت غیروابسته فرض شده است. همچنین تراز آب زیرزمینی هم سطح زمین طبیعی و برای مصالح ژئوتکستایل رفتار الاستیک خطی در نظر گرفته شده است [۸ و ۱۰].

۲-۱- مشخصات مصالح

در این تحقیق بستر سست از ماسه بد دانه‌بندی شده SP، لنز ضعیف از رس CL، و مصالح ستون سنگی از شن GP تشکیل شده که مشخصات این مصالح در جدول ۱ و مشخصات مصالح ژئوتکستایل در جدول ۲ ارائه گردیده است.

۲-۲- هندسه مدل و شرایط مرزی

مشخصات هندسی مدل متقارن محوری در شکل ۲ نشان داده شده است. جابه‌جایی قائم به صورت یکنواخت به صفحه صلب اعمال شده و در تمام مدل‌های تحلیل شده ملاک گسیختگی ستون سنگی رسیدن به نشست (جابه‌جایی قائم) ۴۵ سانتی‌متر فرض شده است. مقدار یاد شده برابر ۰/۲۵ قطر صفحه بارگذاری می‌باشد که در برخی مراجع به عنوان حد نهایی گسیختگی در نظر گرفته شده است [۸]. در مسائل مرتبط با تحلیل



شکل ۲. شماتیک مشخصات کلی مدل

Fig. 2. Schematic of model characteristics

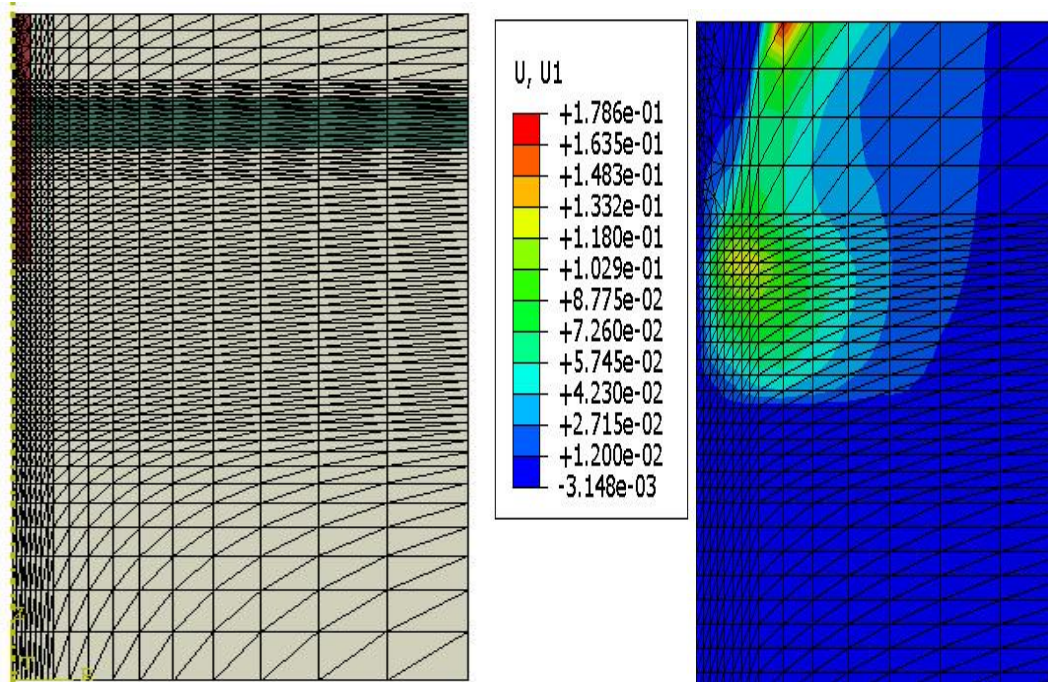
۲-۳- مدل سازی ستون سنگی

برای تعیین ابعاد بهینه المان‌ها در مدل‌های تحلیل شده، آنالیز حساسیت صورت گرفته است. قابل ذکر است که به دلیل حساسیت نواحی مجاور ستون سنگی و لنز ضعیف، تعداد المان‌ها در این محدوده‌ها بیشتر و با فاصله گرفتن از ستون سنگی و لنز ضعیف ابعاد المان‌ها کاهش یافته است. شکل ۳ نمونه‌ای از مش بندی مدل در نرم افزار و همچنین کنتورهای جابه جایی افقی در محدوده ستون سنگی را نشان می‌دهد.

ستون سنگی در دو حالت غیر مسلح و مسلح به شکل استوانه‌ای با شعاع ۴۰ سانتی متر مدل سازی شده و برای جلوگیری از اثر مرزها در مدل سازی و اجتناب از برخورد و تداخل تنش‌ها و تغییر شکل‌های به وجود آمده در مدل با مرزها، فاصله مرکز ستون سنگی از جداره کناری بیش از ۵ برابر شعاع ستون و فاصله کف مدل با انتهای ستون بیش از قطر ستون سنگی در نظر گرفته شده است. در حالات ستون مسلح یک غلاف ژئوتکستایل دور تا دور ستون از تراز ۵۰- سانتی متری تا انتهای آن مدل گردیده است و مشخصات مصالح مسلح کننده به آن اختصاص یافته است.

ستون‌های سنگی با توجه به نحوه رفتار و مکانیزم گسیختگی مرتبط، معمولاً نیازی به در نظر گرفتن اندرکنش یا سطح مشترک بین ستون سنگی با خاک و خاک با ژئوتکستایل نمی‌باشد [۱۰]. به عبارت دیگر، از آنجا که حرکت مصالح ستون سنگی عمدتاً عمود بر راستای ستون سنگی بوده و لغزش نسبی در امتداد جداره آن اتفاق نمی‌افتد، تنش برشی قابل توجهی در جداره ستون سنگی بسیج نخواهد شد.

در مدل‌های مورد بررسی، متغیرهای هندسی مد نظر شامل طول ستون سنگی (L)، نسبت‌های تراز قرارگیری لنز ضعیف به قطر ستون سنگی (h/D) و ضخامت لنز ریزدانه به قطر ستون سنگی (H/D) و نوع ستون نیز به صورت مسلح (ESC) و غیرمسلح (OSC) بوده است. در نام گذاری هر مدل به ترتیب از سمت چپ، حرف انگلیسی معرف غیرمسلح (O) یا مسلح بودن (E) ستون سنگی، عدد اول بیانگر تراز قرارگیری لنز ضعیف و عدد دوم نشانگر ضخامت آن (لنز) می‌باشد. صرفاً در بخش بررسی اثر طول ستون سنگی، در نام گذاری مدل‌ها از ۳ عدد استفاده شده که عدد میانی بیانگر طول ستون سنگی می‌باشد و در مابقی مدل‌ها طول ستون سنگی برابر با ۸۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. مش بندی مدل در نرم افزار و کنتورهای جابه جایی افقی ستون سنگی

Fig. 3. Meshing of the model in the software and obtained horizontal displacement contours

۲-۴- مدل های عددی مورد بررسی

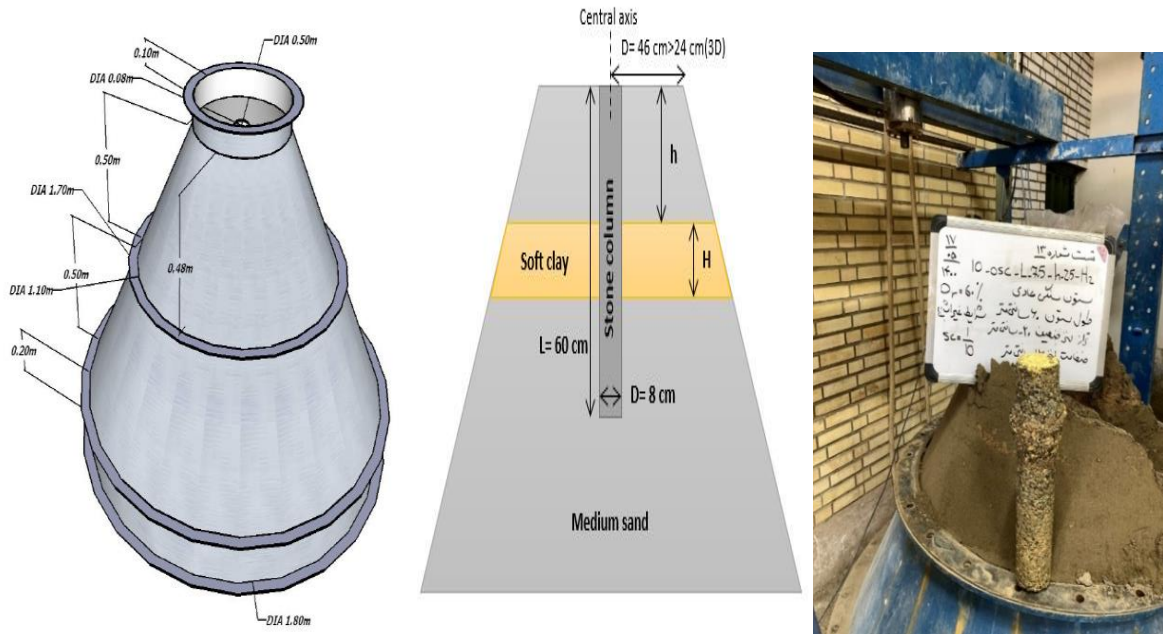
در مجموع تعداد ۷۲ مدل عددی تحلیل گردیده که از این تعداد، ۳۶ حالت غیرمسلح و ۳۶ حالت نیز مسلح بوده است. در این مدل ها ستون سنگی با سه طول ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ سانتی متر و لنز ضعیف در چهار تراز ۱۶۰، ۲۰۰، ۲۴۰ و ۲۸۰ سانتی متر و با سه ضخامت ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی متری در نظر گرفته شده است. مدل های تحلیل شده از دو منظر مود گسیختگی (وقوع شکم دادگی) و ظرفیت باربری ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام این حالات تغییرات شعاعی جداره ستون سنگی در راستای طول ستون سنگی و مقدار نیروی اعمالی به صفحه بارگذاری تحلیل و در قالب نمودارهای مربوطه نشان داده شده است.

۳- صحت سنجی مدل عددی

در جریان این تحقیق دو مدل فیزیکی مطابق با شرایط مسئله مورد بررسی و با مقیاس ۱/۱۰ در محفظه فشار مخروطی شکل (FCV) [۱۸] ساخته شده و نتایج برای اعتبارسنجی و کالیبراسیون نتایج مدل های عددی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۱- معرفی دستگاه محفظه فشار مخروطی شکل (FCV)

انجام آزمایش فیزیکی در مقیاس واقعی موجب حصول نتایج حقیقی و واقعی می گردد. اما هزینه بالای این تست ها و عدم امکان تکرار آن ها در شرایط کاملا یکسان، موجب تمایل بیشتر به استفاده از مدل های فیزیکی کوچک مقیاس و فراگیر شدن این دسته از مدل ها شده است. در مدل های فیزیکی کوچک مقیاس رایج شامل مدل های سانتریفوژ^۱ و مدل های معمولی (۱g) محدودیت هایی از لحاظ شرایط تنش و خطاهای احتمالی وجود دارد. مثلا سطح تنش در مدل های فیزیکی کوچک مقیاس (۱g) خیلی کمتر از تنش های واقعی است و یا اینکه کوچک بودن ابعاد نمونه در مدل های سانتریفوژ موجب ایجاد مشکل در نصب ابزار اندازه گیری و در نتیجه تغییر رفتار خاک خواهد شد. اما مدل سازی با دستگاه FCV، مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس (۱g) ولی با قابلیت اعمال تنش های واقعی می باشد [۱۸]. دستگاه محفظه فشار مخروطی شکل دارای مخزنی به شکل مخروط ناقص است که مدل خاک ماسه ای (مصالح خاک سست بستر) و لنز ریزدانه، داخل آن به روش تراکم (کوبیدن لایه به لایه خاک) آماده می شود. در این تحقیق،



شکل ۴. مشخصات FCV و مدل‌سازی فیزیکی به همراه ستون سنگی دچار گسیختگی شکم دادگی

Fig. 4. Characteristics of FCV and physical modeling of a stone column with bulging failure

خاک، افزایش می‌یابد. بنا به این دلیل، محیط دستگاه FCV شرایط مشابه به شرایط واقعی ستون سنگی داشته که مزیت قابل توجهی نسبت به سایر دستگاه‌های مدل فیزیکی دارد.

۳-۲- مقایسه نتایج تست‌های مدل‌های فیزیکی و عددی

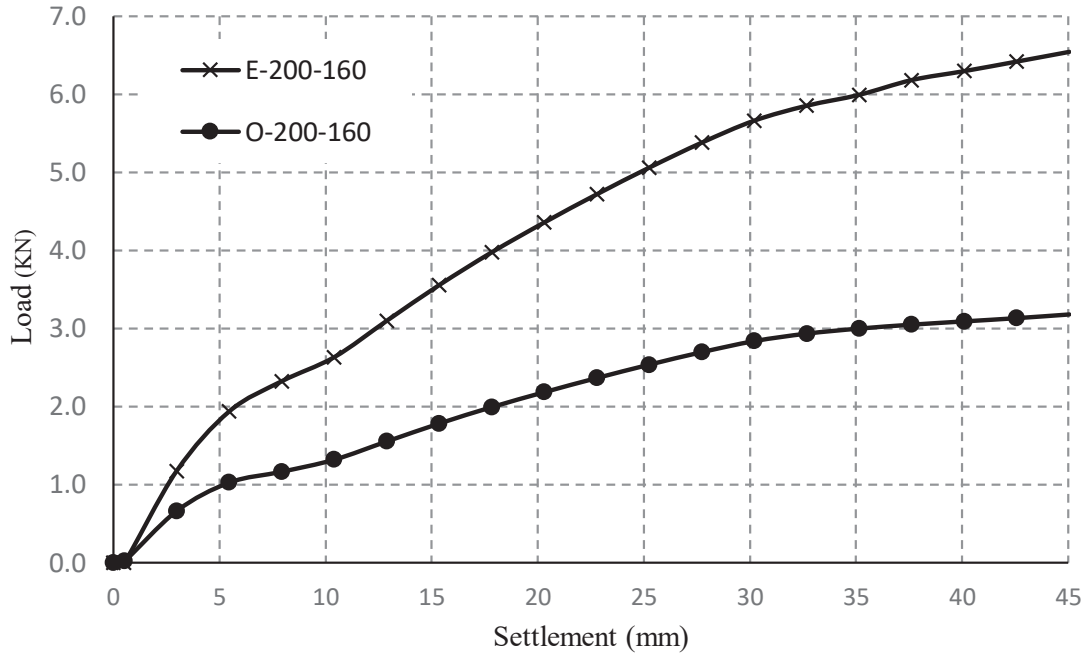
نمودارهای بار - نشست برای ستون سنگی غیرمسلح و مسلح شده با ژئوتکستایل با طول یکسان ۶۰۰ میلی‌متر، در تراز قرارگیری لنز ۲۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر حاصل از مدل‌های فیزیکی FCV در شکل ۵ نمایش داده شده است.

نتایج دو مدل فیزیکی ساخته شده برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی و با در نظر گرفتن اثر مقیاس مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مشخصات مصالح تعریف شده در مدل صحت‌سنجی، متفاوت با مشخصات مصالح تعریف شده در مدل‌های عددی بوده است. شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب منحنی بار-نشست حاصل از مدل‌های فیزیکی و عددی را با شرایط مشابه نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از هر دو مدل‌سازی دارای همخوانی و نزدیکی قابل قبول بوده و این امر حاکی از صحت عملکرد نرم‌افزار مدل‌سازی عددی می‌باشد.

از دستگاه FCV به قطر قاعده بالایی ۵۰ سانتی‌متر، قطر قاعده پایینی ۱۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر به عنوان مخزن اصلی استفاده گردیده است.

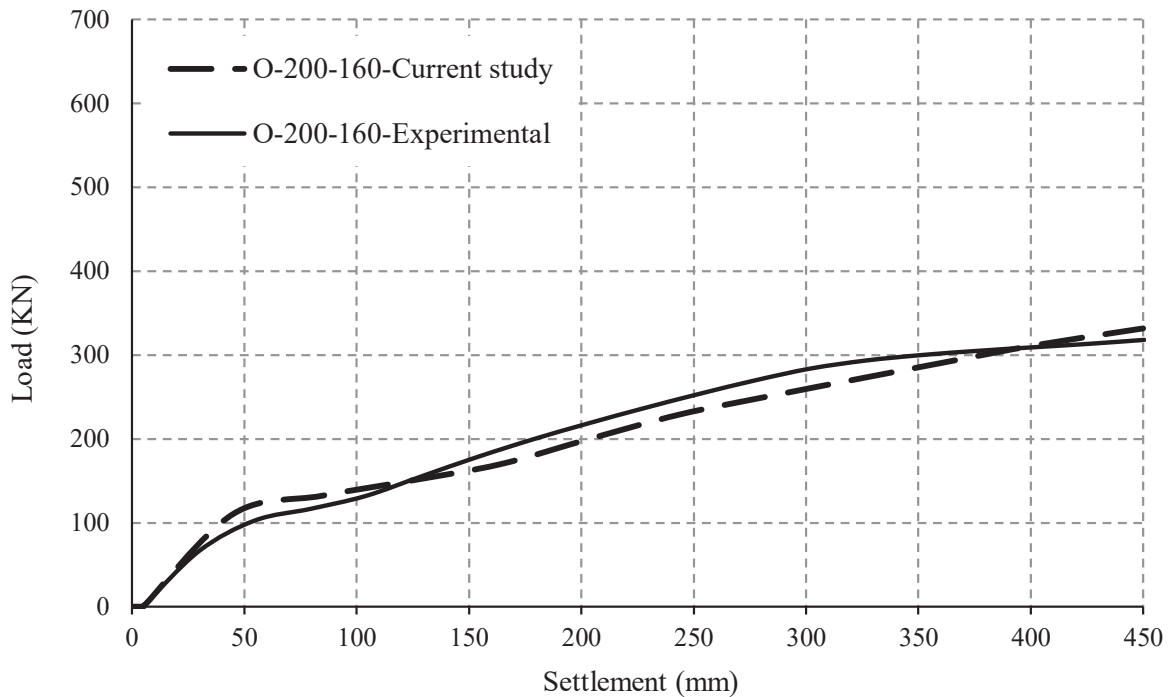
فشار هیدرولیکی از قسمت پایینی دستگاه آزمایش به واسطه یک غشای انعطاف‌پذیر لاستیکی به خاک منتقل می‌شود. برای این منظور یک کمپرسور، هوای فشرده شده را به مخزن آب-هوا انتقال داده و موجب می‌شود آب با فشار وارد غشای منعطف لاستیکی مابین کف دستگاه و خاک شده و نتیجتاً فشار آب از قسمت پایینی دستگاه به خاک منتقل گردد. در شکل شماره ۴، شماتیک سه بعدی دستگاه آزمایش مدل فیزیکی FCV به همراه ابعاد و اندازه‌های قطعات تشکیل دهنده آن و تصویر ستون سنگی دچار گسیختگی شکم دادگی نشان داده شده است.

به دلیل شکل خاص هندسه مخزن دستگاه، همراه با اعمال فشار قائم رو به بالا متناسب با شرایط واقعی از قسمت پایینی مخروط ناقص، تنش افقی با افزایش عمق در طول محور دستگاه، افزایش می‌یابد. بدین ترتیب در دستگاه FCV، تنش در بالای سطح خاک (سطح تماس با فضای آزاد) صفر بوده و با افزایش عمق (افزایش وزن خاک)، افزایش می‌یابد. همان‌طور که ذکر شد به دلیل شکل هندسی دستگاه، تنش جانبی خاک که ضریبی از تنش قائم و تابعی از خواص ژئومکانیکی خاک می‌باشد، نیز با افزایش عمق



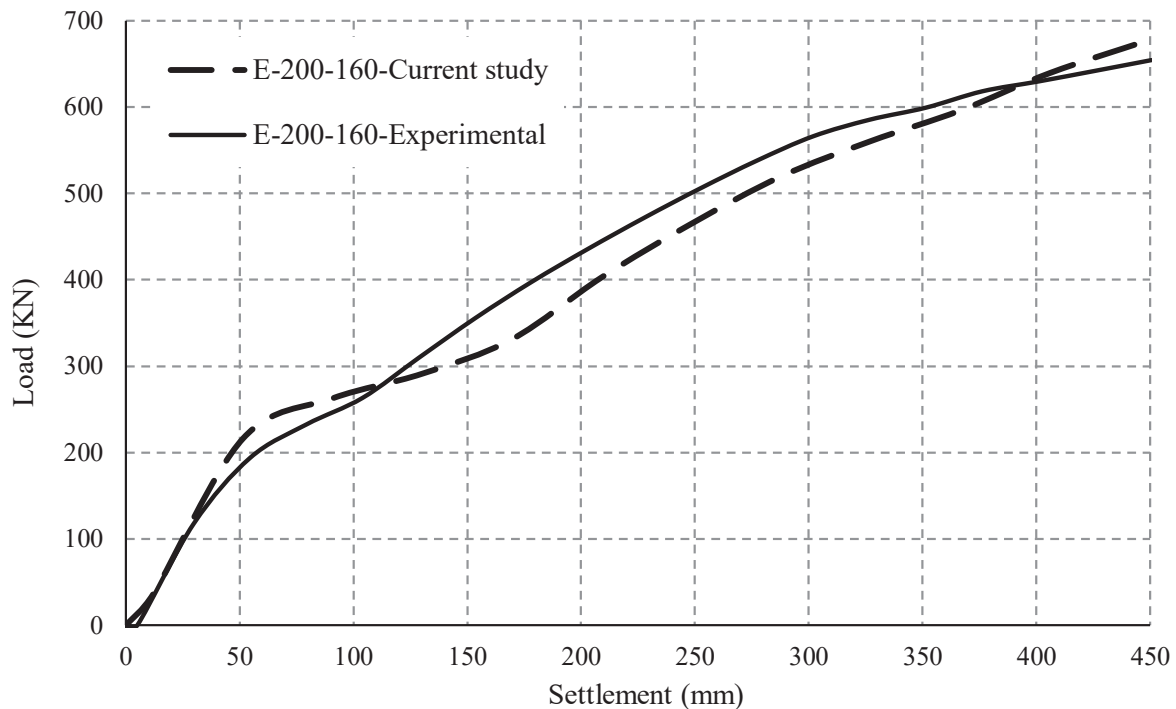
شکل ۵. تغییرات بار-نشست ستون سنگی مسلح و غیرمسلح حاوی لنز به ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر واقع در تراز -۲۰۰ میلی‌متری

Fig. 5. Load-settlement of reinforced and ordinary stone column with a 160 mm thickness embedded lens at -200 mm level



شکل ۶. مقایسه منحنی بار-نشست ستون سنگی غیرمسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز -۲۰۰ با ضخامت ۱۶۰ سانتی‌متر

Fig. 6. Load-settlement of ordinary stone column with a 160 cm thickness embedded lens at -200 cm level



شکل ۷. مقایسه منحنی بار-نشست ستون سنگی مسلح واقع در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز ۲۰۰- با ضخامت ۱۶۰ سانتی‌متر

Fig. 7. Load-settlement of reinforced stone column with a 160 cm thickness embedded lens at -200 cm level

در حالت‌های متغیر تراز قرارگیری و ضخامت لنز ضعیف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که تغییر طول ستون اثر چندانی بر حداکثر جابه‌جایی شعاعی (شکم دادگی) و حالت گسیختگی ستون سنگی نداشته و ستون سنگی با طول‌های متفاوت دچار گسیختگی شکم دادگی در محدوده قرارگیری لنز ضعیف می‌گردد. البته تسلیح ستون سنگی با ژئوتکستایل موجب کاهش ۶۰ درصدی حداکثر شکم دادگی ستون سنگی شده است.

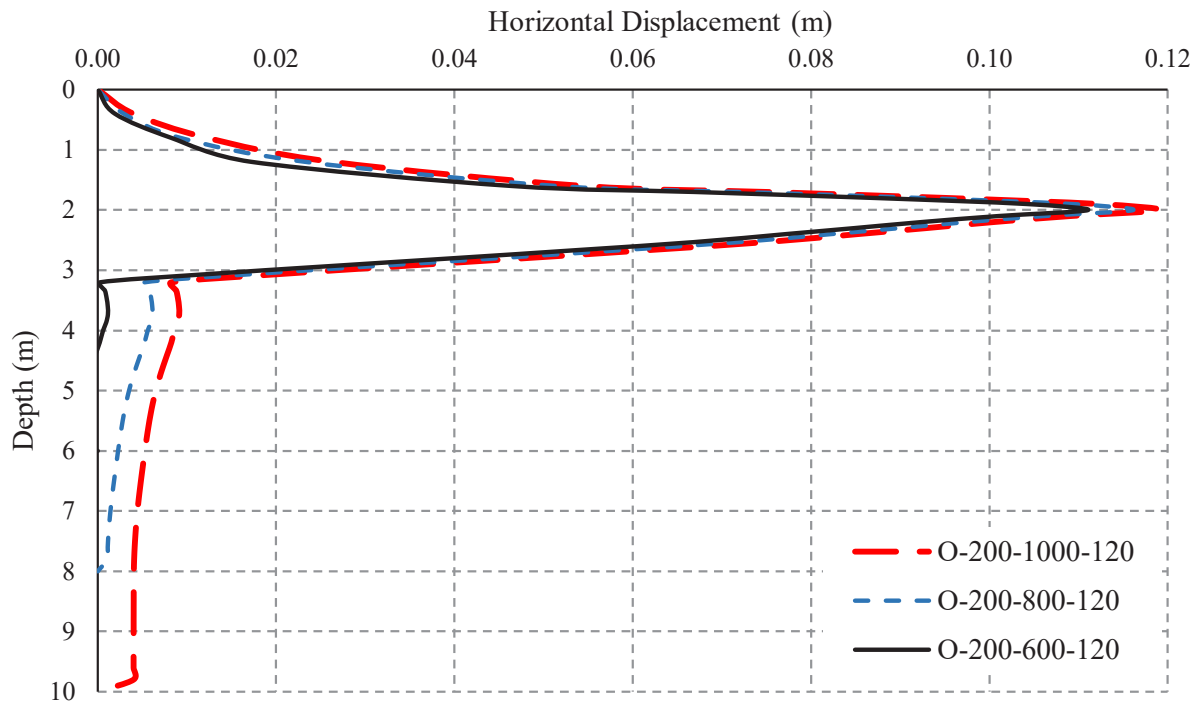
همچنین بر اساس شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌شود که با توجه به وقوع حالت گسیختگی شکم دادگی، تغییر طول ستون اثری بر ظرفیت باربری آن نداشته است و ازدیاد طول ستون سنگی باعث افزایش باربری آن نشده است. البته تسلیح ستون سنگی با ژئوتکستایل موجب افزایش ۳۲ درصدی ظرفیت باربری ستون سنگی می‌شود.

۴- بررسی نتایج تحلیل‌های عددی

در این تحقیق تحلیل‌های عددی به روش اجزای محدود در حالت تقارن محوری برای بررسی عددی اثر وجود لنز ضعیف بر رفتار ستون‌های سنگی غیرمسلح و مسلح واقع در بستر نسبتاً سست ماسه‌ای اشباع انجام شده است. اجرای ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل به دلیل ایجاد ساختار یکپارچه نسبت به ستون سنگی غیرمسلح که عضو باربر گسسته و مستعد شکم دادگی است، موجب افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی و کاهش شکم دادگی آن می‌شود. در این تحقیق پارامترهای متفاوت شامل طول ستون سنگی، تراز قرارگیری لنز ضعیف، ضخامت لنز ضعیف و اثر مسلح کننده مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه اثر هر یک از این پارامترها تشریح می‌گردد.

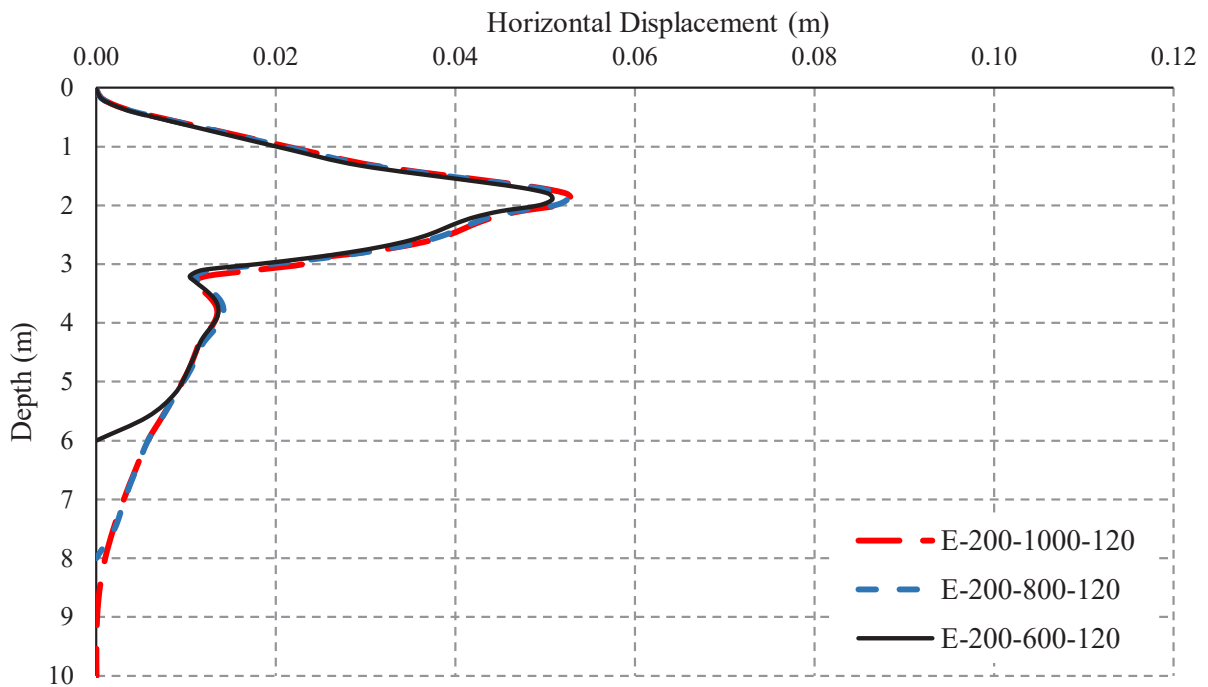
۴-۱- اثر طول ستون سنگی

در این تحقیق سه طول متفاوت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ سانتی‌متر برای ستون سنگی فرض شده و رفتار ستون غیرمسلح و مسلح با ژئوتکستایل



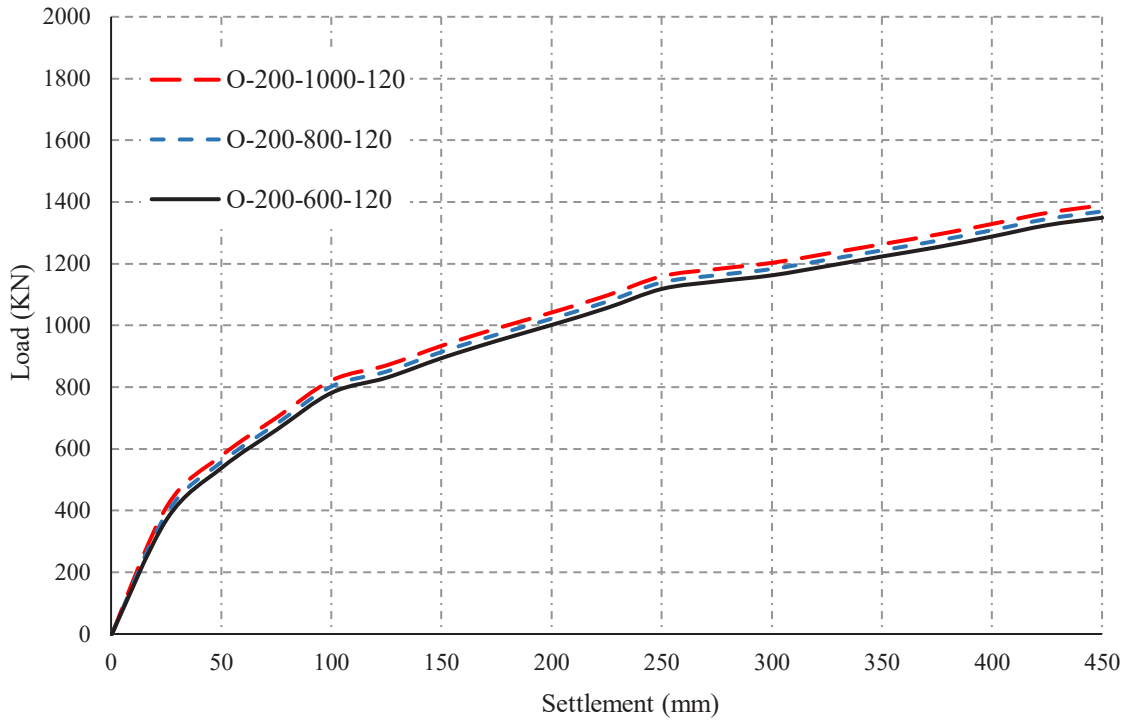
شکل ۸. تغییر شکل جانبی در طول ستون سنگی غیر مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز +۲۰۰- و ضخامت ۱۲۰ سانتی‌متر

Fig. 8. Lateral displacement along ordinary stone column with a thickness of 120 cm embedded lens at -200 cm level



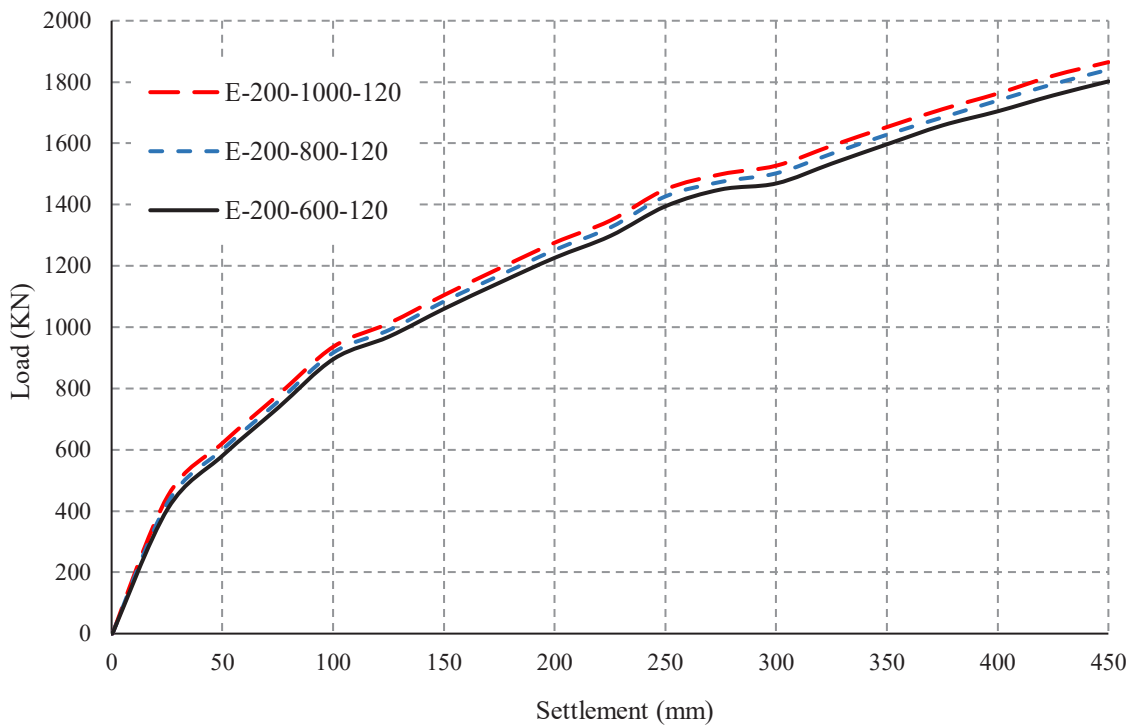
شکل ۹. تغییر شکل جانبی در طول ستون سنگی مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز +۲۰۰- و ضخامت ۱۲۰ سانتی‌متر

Fig. 9. Lateral displacement along reinforced stone column with a thickness of 120 cm embedded lens at -200 cm level



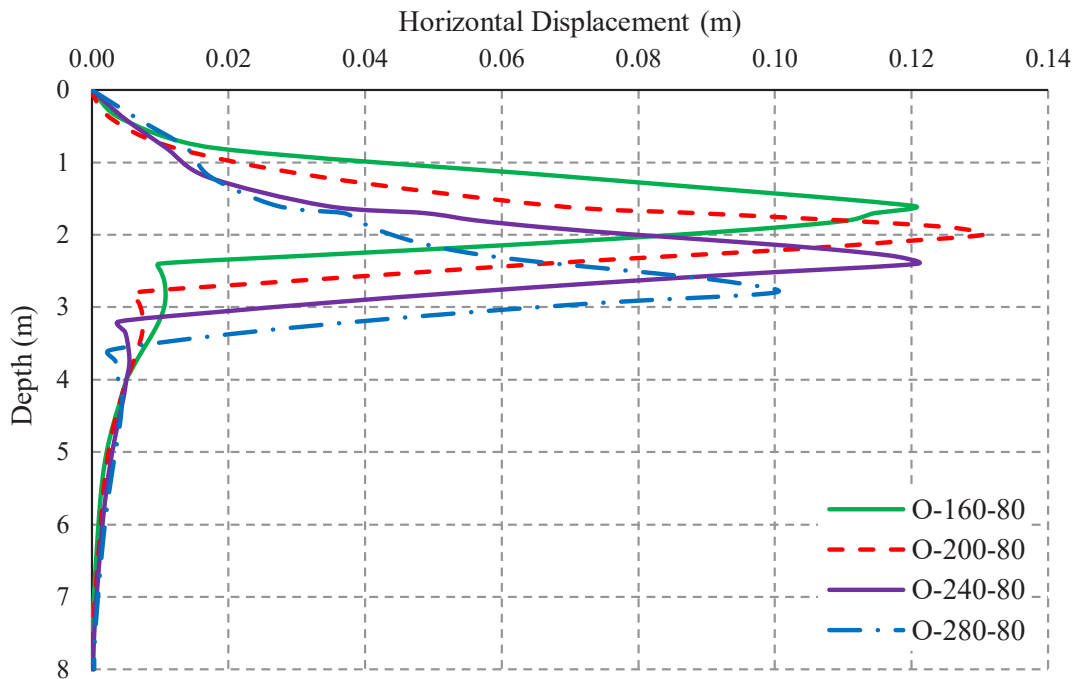
شکل ۱۰. منحنی‌های بار-نشست ستون سنگی غیر مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز -۲۰۰ با ضخامت ۱۲۰ سانتی‌متر

Fig. 10. Load-settlement of ordinary stone column with a thickness of 120 cm embedded lens at -200 cm level



شکل ۱۱. منحنی‌های بار-نشست ستون سنگی مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز -۲۰۰ با ضخامت ۱۲۰ سانتی‌متر

Fig. 11. Load-settlement of reinforced stone column with a thickness of 120 cm embedded lens at -200 cm level



شکل ۱۲. منحنی‌های تغییر شکل جانبی در طول ستون غیرمسلح در بستر حاوی لنز ضعیف به ضخامت ۸۰ سانتی‌متر

Fig. 12. Lateral displacement along ordinary stone column with a thickness of 80 cm embedded lens

حدود ۳۵ درصد بیش از حالت ستون سنگی غیرمسلح بوده است.

۴-۳- اثر ضخامت لنز ضعیف

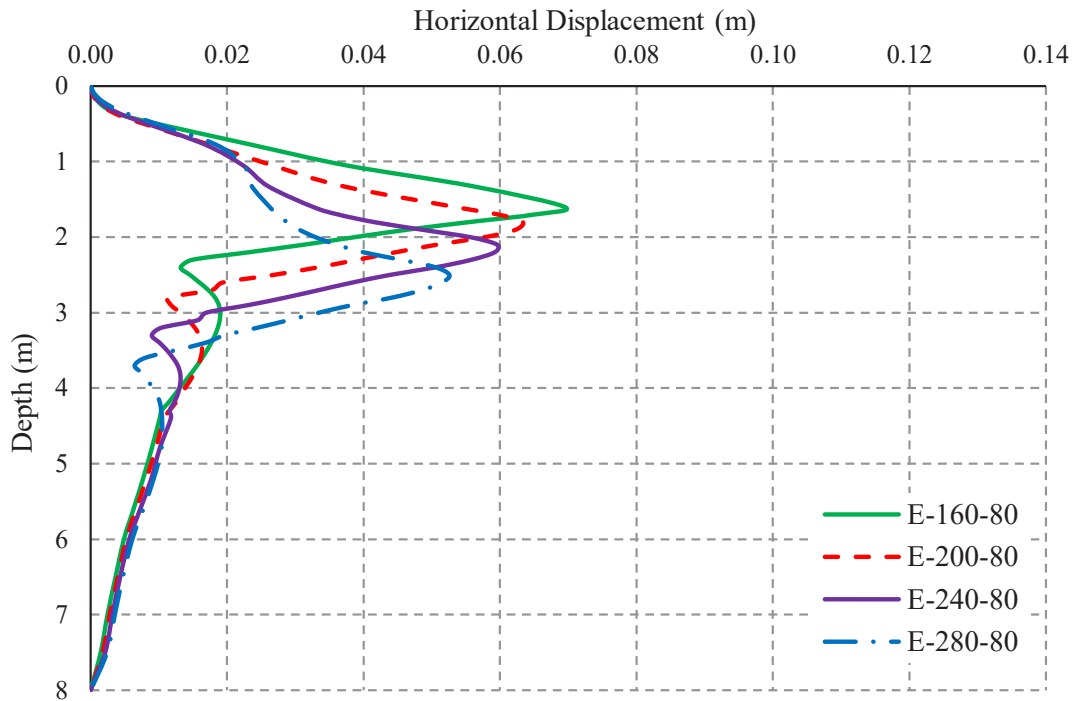
در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ می‌توان مشاهده نمود که در هر دو حالت ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با افزایش ضخامت لنز ضعیف، حداکثر جابه‌جایی افقی ستون به تناسب کاهش می‌یابد. با این توضیح که در مقادیر نشست یکسان (یا تغییر حجم یکسان)، جابه‌جایی جانبی لنز با ضخامت بیشتر، کاهش یافته است. البته در صورت ادامه روند بارگذاری و متعاقب آن در نشست‌های بیشتری، افزایش ضخامت لنز می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های جانبی بیشتری در محدوده لنز گردد. هم‌چنین حداکثر جابه‌جایی شعاعی ستون سنگی در حالت غیرمسلح دو برابر حالت مسلح بوده است.

با توجه به شکل‌های ۱۸ و ۱۹ می‌توان دریافت که با افزایش ضخامت لنز ضعیف ظرفیت باربری ستون سنگی در هر دو حالت غیرمسلح و مسلح کاهش می‌یابد و این کاهش ظرفیت باربری در حالت ستون سنگی غیرمسلح حدود ۳۵ درصد بیش از حالت ستون سنگی مسلح می‌باشد.

۴-۲- اثر تراز قرارگیری لنز ضعیف

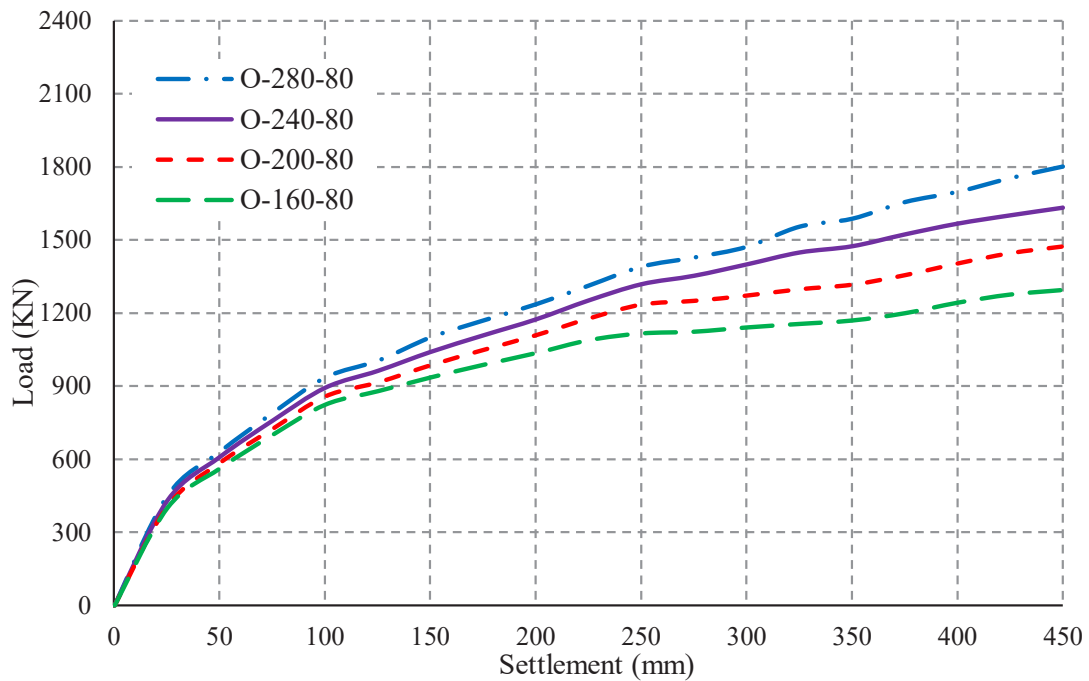
در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ملاحظه می‌شود که در حالات ستون سنگی غیرمسلح با کاهش عمق قرارگیری لنز ضعیف، عمق وقوع شکم دادگی متناسباً کاهش یافته و هم‌چنین حداکثر جابه‌جایی شعاعی ستون سنگی نیز غالباً با افزایش عمق قرارگیری لنز کاهش می‌یابد. وجود لنز ضعیف در بستر ماسه‌ای، سبب می‌شود که پدیده شکم دادگی در تراز قرارگیری لنز و تا اعماق حدود ۴ برابر قطر ستون غیرمسلح هم اتفاق بیفتد، در حالی که در زمین‌های همگن سست، شکم دادگی نهایتاً تا عمق ۲/۵ برابر قطر ستون گزارش شده است. هم‌چنین در حالات ستون سنگی مسلح، با افزایش عمق قرارگیری لنز ضعیف، حداکثر جابه‌جایی شعاعی ستون سنگی نیز کاهش می‌یابد. تسلیح ستون سنگی با ژئوتکستایل موجب کاهش ۵۰ درصدی حداکثر شکم دادگی ستون سنگی می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ملاحظه می‌شود که با کاهش تراز قرارگیری لنز، ظرفیت باربری ستون سنگی در هر دو حالت غیرمسلح و مسلح افزایش می‌یابد و این افزایش ظرفیت باربری در حالت ستون سنگی مسلح



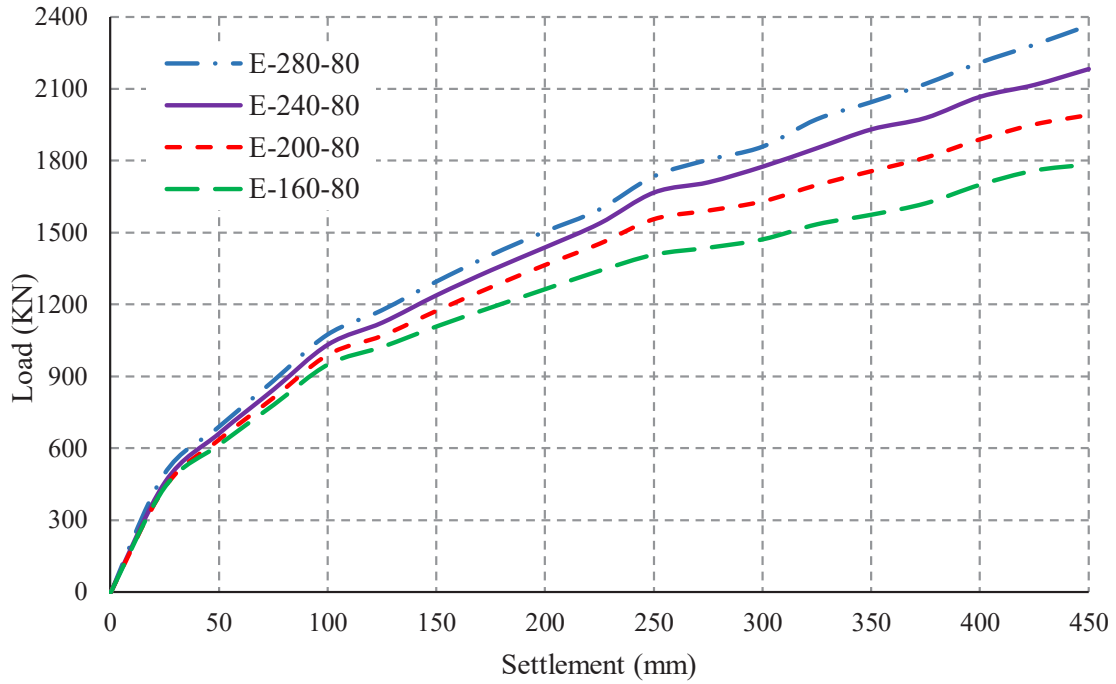
شکل ۱۳. منحنی‌های تغییر شکل جانبی در طول ستون مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف به ضخامت ۸۰ سانتی‌متر

Fig. 13. Lateral displacement along reinforced stone column with a thickness of 80 cm embedded lens



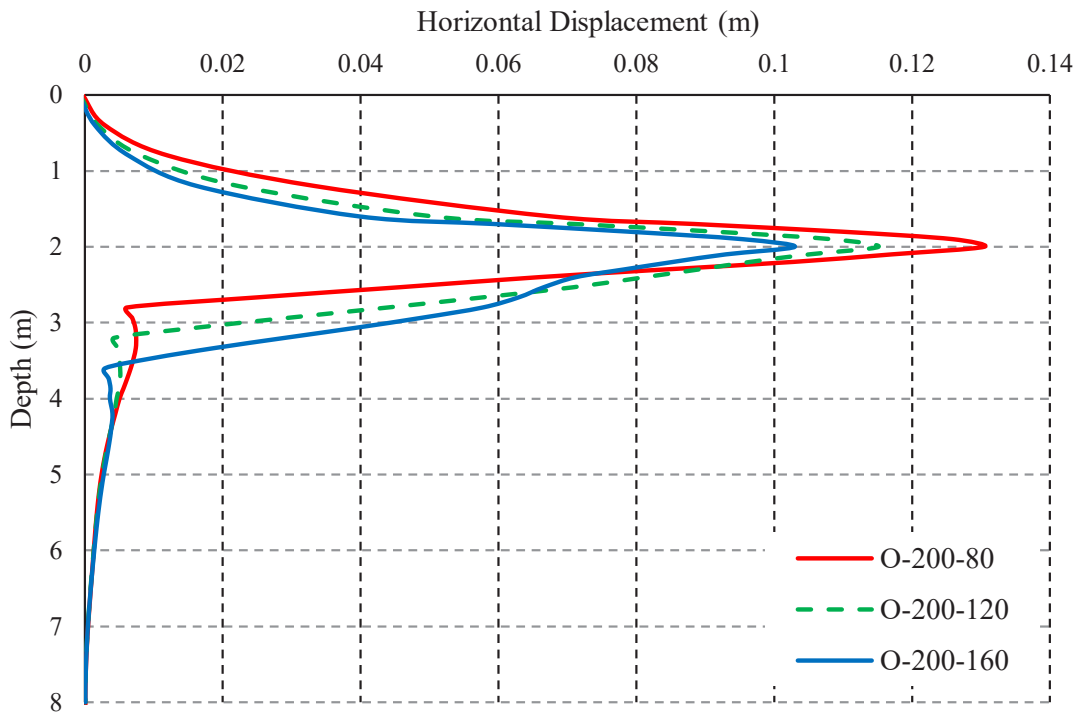
شکل ۱۴. منحنی‌های بار-نشست ستون سنگی غیرمسلح در بستر حاوی لنز ضعیف به ضخامت ۸۰ سانتی‌متر

Fig. 14. Load-settlement of ordinary stone column with a thickness of 80 cm embedded lens



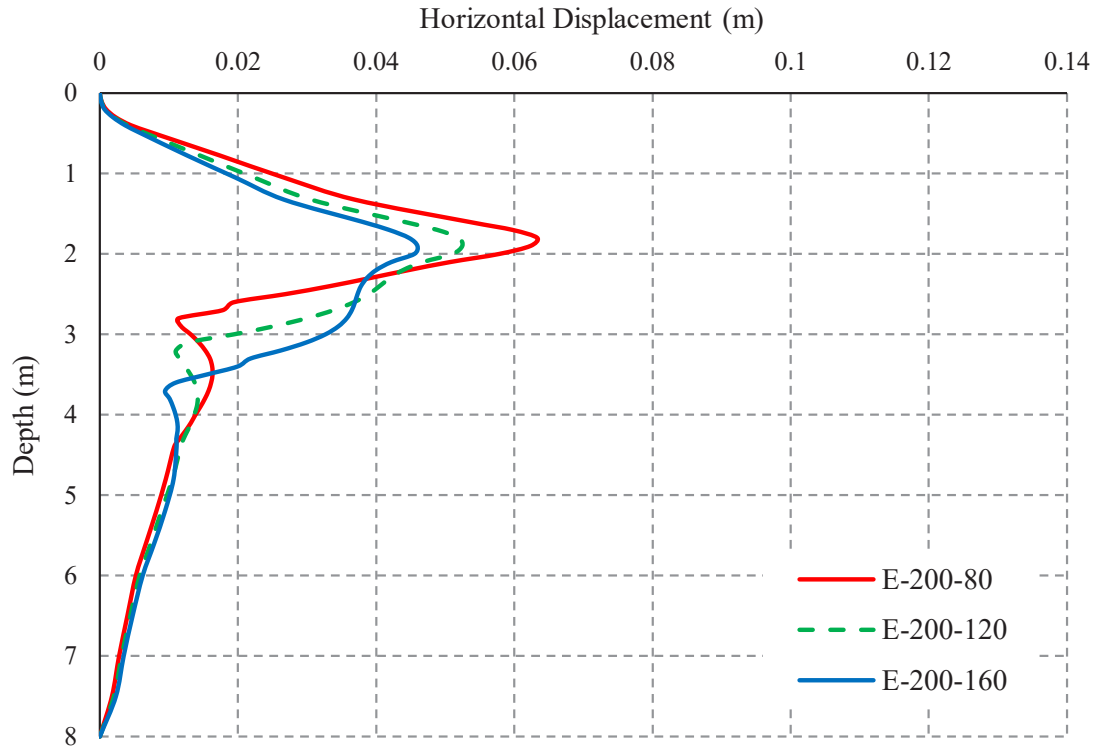
شکل ۱۵. منحنی‌های بار-نشست ستون سنگی مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف به ضخامت ۸۰ سانتی‌متر

Fig. 15. Load-settlement of reinforced stone column with a thickness of 80 cm embedded lens



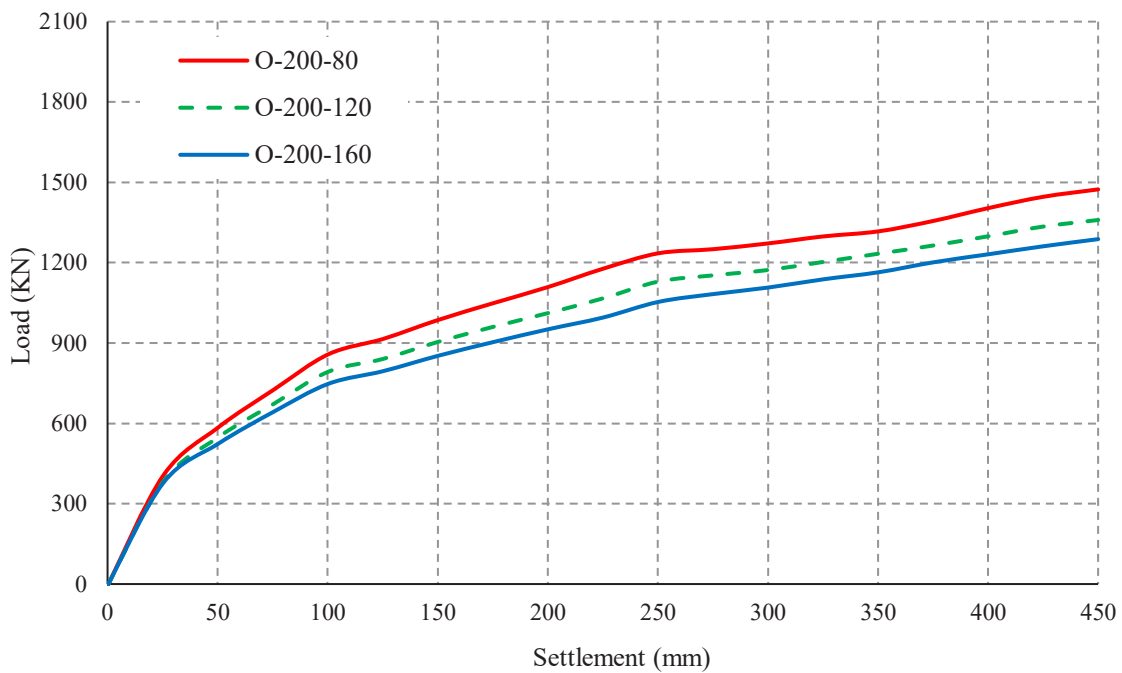
شکل ۱۶. منحنی‌های تغییر شکل جانبی در طول ستون سنگی غیرمسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز ۲۰۰- سانتی‌متر

Fig. 16. Lateral displacement along ordinary stone column with a lens embedded at -200 cm level



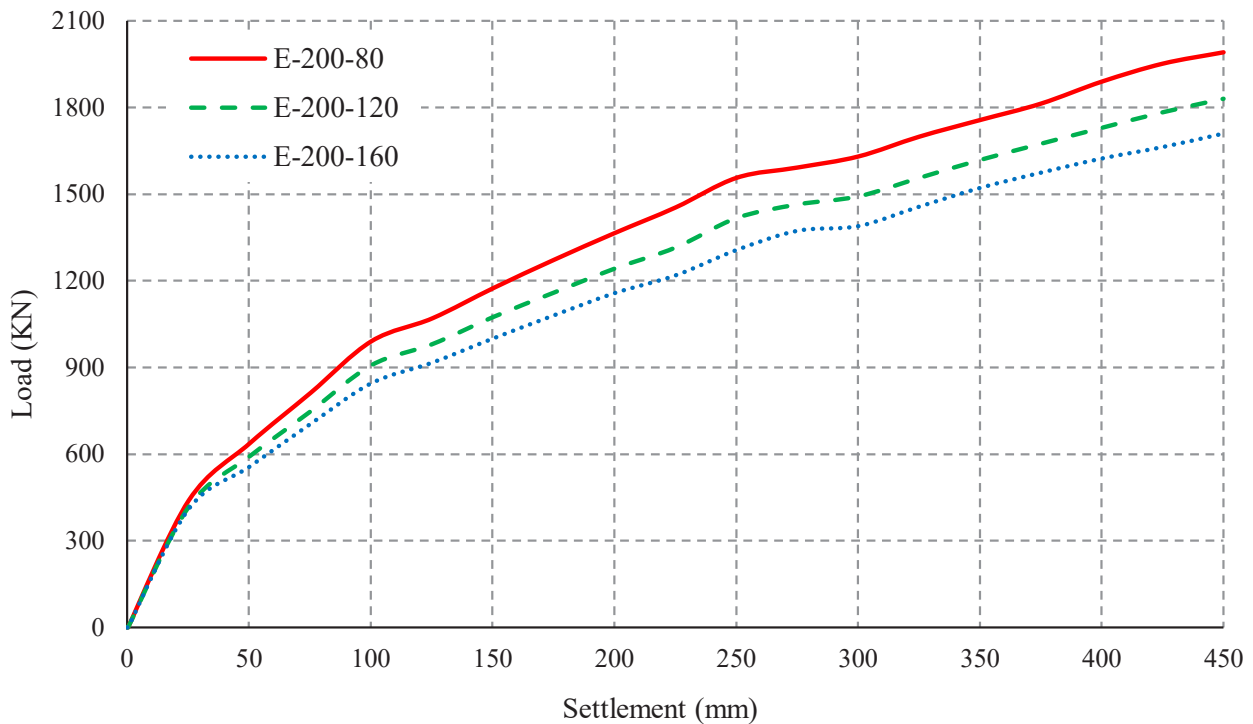
شکل ۱۷. منحنی‌های تغییر شکل جانبی در طول ستون سنگی مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز -۲۰۰ سانتی‌متر

Fig. 17. Lateral displacement along reinforced stone column with a lens embedded at -200 cm level



شکل ۱۸. منحنی‌های بار-نشست ستون سنگی غیرمسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز -۲۰۰ سانتی‌متر

18. Load-settlement of ordinary stone column with a lens embedded at -200 cm level



شکل ۱۹. منحنی‌های بار-نشست ستون سنگی مسلح در بستر حاوی لنز ضعیف در تراز +۲۰۰- سانتی‌متر

Fig. 19. Load-settlement of reinforced stone column with a lens embedded at -200 cm level

۵- نتیجه‌گیری

مسلح نیز با کاهش تراز قرارگیری لنز ضعیف، حداکثر جابه‌جایی شعاعی ستون سنگی کاهش می‌یابد.

- با کاهش تراز قرارگیری لنز ضعیف، ظرفیت باربری ستون سنگی در هر دو حالت غیرمسلح و مسلح افزایش می‌یابد و این افزایش ظرفیت باربری در حالت ستون سنگی مسلح حدود ۳۵ درصد بیش از حالت ستون سنگی غیرمسلح می‌باشد.

- وجود لنز ضعیف در بستر ماسه‌ای نسبتاً سست، سبب می‌شود که پدیده شکم دادگی در تراز قرارگیری لنز و تا اعماق حدود ۴ برابر قطر ستون غیرمسلح اتفاق بیفتد، در حالی که در زمین‌های همگن سست، شکم دادگی در نهایت تا عمق ۲ برابر قطر ستون گزارش شده است.

- با افزایش ضخامت لنز ضعیف ظرفیت باربری ستون سنگی در هر دو حالت غیرمسلح و مسلح کاهش می‌یابد و این کاهش ظرفیت باربری در حالت ستون سنگی غیرمسلح حدود ۳۵ درصد بیشتر از حالت ستون سنگی مسلح می‌باشد.

منابع

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی صورت گرفته که در قالب نمودارهای بار-نشست و تغییر شکل جانبی- عمق در بخش پیشین بیان شد، نتایج ذیل را می‌توان جمع‌بندی نمود:

- افزایش طول ستون سنگی در شرایط وجود لنز ضعیف، اثری در کاهش حداکثر جابه‌جایی شعاعی و مود گسیختگی آن نداشته است و در ستون سنگی با طول‌های مختلف، در شرایطی که لنز ضعیف وجود داشته باشد، گسیختگی شکم دادگی اتفاق افتاده است.

- در شرایط وجود لنز ضعیف، افزایش طول ستون سنگی اثری بر افزایش ظرفیت باربری آن نداشته است و ازدیاد طول ستون سنگی باعث افزایش باربری آن نمی‌گردد. صرفاً تسلیح ستون سنگی با ژئوتکستایل موجب افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی خواهد شد.

- در حالات ستون‌های سنگی غیرمسلح با کاهش تراز قرارگیری لنز ضعیف، تراز وقوع گسیختگی شکم دادگی متناسباً کاهش یافته و همچنین حداکثر جابه‌جایی شعاعی ستون سنگی نیز کاهش می‌یابد. در حالات ستون

- bearing capacity of geosynthetic reinforced stone columns, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(3) (2014) 1559-1571.
- [11] P. Das, S.K. Pal, A study of the behavior of stone column in local soft and loose layered soil, *EJGE*, 18 (2013) 1777-17786.
- [12] S.S.G. Prasad, C. Vasavi, K.P. Sai, BEHAVIOUR OF STO LAYERED SOILS USIN REINFORCE, *International Journal of Civil Engineering*, 8(8) (2017).
- [13] S. Sandhya Rani, Suresh Praveen Kumar, P., A Study on Behaviour of stone column in layered soil, *Journal of Research in Materials and Metallurgical Engineering*, 1(3) (2016) pp.11-28.
- [14] P. Mohanty, M. Samanta, Experimental and numerical studies on response of the stone column in layered soil, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(3) (2015) 1-14.
- [15] A. Danish, S.N.L. bt Taib, T. Ayadat, A. Hasan, Numerical investigation on the performance of stone columns under raft foundation in soft clayey soils, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, pp. 012015.
- [16] P.G.d.S. Pereira, M.P. Pacheco, B.T. Lima, Numerical analysis of soft soil improved with stone column technique, *REM-International Engineering Journal*, 74 (2021) 319-327.
- [17] S. Saxena, L.B. Roy, Suitability Analysis of Stone Column Materials with PLAXIS, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(2) (2022) 8421-8425.
- [18] G. Sedran, *Experimental and analytical study of a frustum confining vessel*, 1999.
- [1] R.D. Barksdale, R.C. Bachus, R. Barksdale, *Design and construction of stone columns*, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1983.
- [2] D. Greenwood, *Mechanical improvement of soils below ground surface*, in: *Inst Civil Engineers Proc, London/UK/*, 1970.
- [3] J. Hugher, N. Withers, Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns, *Ground engineering*, 7(3) (1974).
- [4] J. McKenna, W. Eyre, D. Wolstenholme, Performance of an embankment supported by stone columns in soft ground, *Geotechnique*, 25(1) (1975) 51-59.
- [5] A. Demir, T. Sarici, M. Laman, B. Bagriacik, B. Ok, An experimental study on behaviour of geosynthetic reinforced stone columns, in: *2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering*, 2013.
- [6] Y. Tandel, C. Solanki, A. Desai, Laboratory experimental analysis on encapsulated stone column, *Archives of Civil Engineering*, (2013) 359-379-359-379.
- [7] U.R. Lone, M.H. Dar, M.Y. Ahanger, Effect of L/B Ratio of Stone Column on Bearing Capacity and Relative Settlement of Sandy Soil (An Experimental Study), *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 6(1) (2015).
- [8] M. Ghazavi, J.N. Afshar, Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns, *Geotextiles and Geomembranes*, 38 (2013) 26-36.
- [9] N. Mehrannia, J. Nazariafshar, F. Kalantary, Experimental investigation on the bearing capacity of stone columns with granular blankets, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1) (2018) 209-222.
- [10] J.N. Afshar, M. Ghazavi, *Experimental studies on*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Bazazzadegan , N. Ganjian , J. Nazariafshar , *Effect of Soft Lens on the Behavior of Ordinary and Reinforced Stone Columns Located in Saturated Sandy Bed*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(2) (2023) 455-470.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21390.7711

