

بررسی عددی پایداری شیروانی ماسه‌بی روی رس نرم بهسازی شده با ستون سنگی

Research Note

محمدجواد شعبانی رستمی * (کارشناس ارشد)

محمدعلی روش‌ضمیر (دانشیور)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Plaxis، پایداری شیروانی ماسه‌بی ساخته شده، روی رس نرم مسلح به ستون سنگی به در روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل بررسی شد، است. با انجام تحلیلهای عددی اثر پارامترهای نظری: قطر، زاویه اصطکاک و فاصله بین ستون سنگی، چستنگی خاک رسی، ارتفاع و زاویه اصطکاک خاکریز در ضربه اطمینان شیروانی ماسه‌بی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل نشان داده است که از بین پارامترهای مورد بررسی، مقاومت ستون سنگی و رس نرم در ضربه اطمینان پایداری تأثیر بیشتری دارند. همچنین بر مبنای نتایج عددی و با توجه به متناول بودن روش طراحی ناحیه‌ی معادل نسبت به نوار معادل و برای تعديل تفاوت موجود بین نتایج حاصل از روش‌های مذکور یک ضربه کاوش پیشنهاد شده است که برای کل پارامترهای بررسی شده در محدوده ۷۴٪ تا ۹۹٪ قرار گرفته است. توصیه می‌شود که ضربه اطمینان حاصل از روش ناحیه‌ی معادل با ضربه کاوش ذکر شده تعديل یابد.

mj.shabani@cv.iut.ac.ir
mohamali@cc.iut.ac.ir

واژگان کلیدی: پایداری شیروانی، رس نرم، ستون سنگی، نوار معادل، ناحیه‌ی معادل، Plaxis.

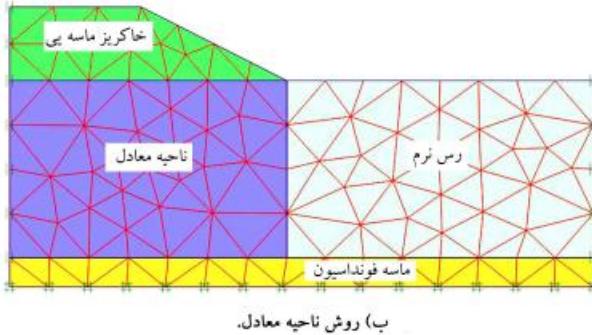
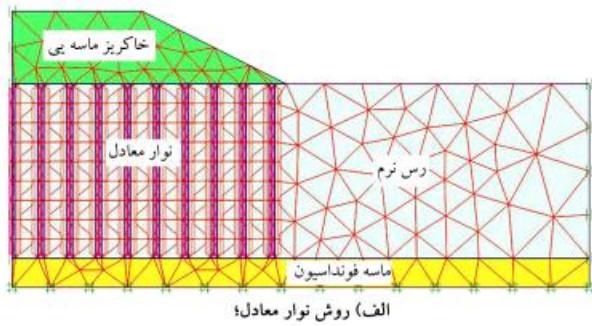
۱. مقدمه

سازوکار بهسازی خاک عمده‌استگی به نوع خاک دارد. مقاومت خاک‌های رسی را می‌توان با استفاده از ستون سنگی بهبود داد. همچنین ممکن است از ستون‌های سنگی در نهشته‌های ماسه‌بی استفاده شود، اما کاربرد ویژه‌ی آن‌ها در خاک‌های نرم، غیرآلی، و چسبنده است. نحوه ساخت ستون سنگی به یکی از دو روش جاییگزینی و جایه‌جایی است. در روش جاییگزینی، که به روش خیس هم معروف است، خاک محل در یک الگوی خاص با ستون سنگی جاییگزین می‌شود، که برای این کار باید گودال‌هایی را با استفاده از یک میله‌ای ارتعاشی همراه با چت‌آب حفر کرد، در روش جایه‌جایی، که به روش خشک هم معروف است، خاک محل توسط یک میله‌ای ارتعاشی همراه با هوا فشرده به صورت جانی جایه‌جا می‌شود. زمانی که میله به عمق مردنظر رسید، مصالح سنگی داخل گودال ریخته و با میله‌ای ارتعاشی متراکم می‌شود. روش جایه‌جایی برای زمین‌هایی که سطح آب زیرزمینی باشند است و خاک سفت دارند، مناسب است.^[۱, ۲]

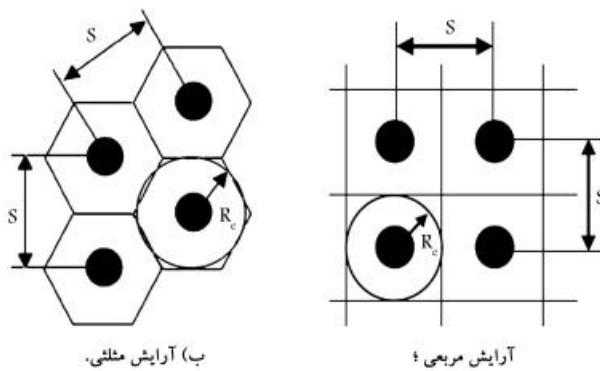
چندین شیوه‌ی بهسازی رای جلوگیری از گسیختگی عمیق شیروانی واقع بر پسترن از قبیل: ستون‌های ماسه‌بی متراکم شده، ستون‌های سنگی، و ستون‌های ترکیبی به طور موفقیت‌آمیز استفاده شده‌اند. در اغلب موارد، ستون‌های سنگی به عنوان راه حل مناسب برای حل مشکلات پایداری شیروانی واقع بر پسترن پیشنهاد شده‌اند.^[۳, ۴] مطالعات بسیاری به منظور حل نظری برآورد ظرفیت باربری و نشست پسترهای اصلاح شده با استفاده از ستون سنگی انجام شده است.^[۵] در سال‌های اخیر، روش‌های عددی به طور گسترده برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها به منظور

صدها سال است که خاک‌ها جهت بهبود خواص مهندسی‌شان به روش‌های مختلف مورد اصلاح واقع شده‌اند. اما در ۷۵ سال اخیر، ارتقاء داشت شر در زمینه‌ی رفتار خاک و مخاطرات ژوتکنیکی موجب بروز روش‌های بدیع و جدیدی درخصوص اصلاح خواص خاک‌ها شده است. یکی از مناسبترین شیوه‌های اصلاح زمین، اجرای ستون‌های سنگی است. استفاده از ستون‌های سنگی در پروژه‌های ژوتکنیکی به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک، کترل نشست خاک، پایدارسازی شیروانی‌ها، کاوش قابلیت روانگرایی خاک و افزایش مقاومت جانی پی‌ها، کاربرد فراوان داشته است. اجرای خاکریزهای مهندسی بر روی پسترهای نرم ممکن است مشکلاتی نظری ناپایداری شیروانی مواجه شود.^[۶] تحلیل پایداری شیروانی‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های تعادل حدی، تحلیل حدی، المان محدود، و تقاضل محدود انجام داد.^[۷] ناپایداری شیروانی خاکریز ممکن است به صورت موضعی، سطحی، کلی، و عمیق توسعه یابد. گسیختگی موضعی و سطحی در عمق کم به علت تش پارین ناشی از سربار، چگالای کم، مقاومت کم، و نیروی زه ناشی از اشباع شدن خاکریز بعد از بارندگی است. به طور کلی گسیختگی در خاکریزهای ماسه‌بی از نوع گسیختگی پنجه شیروانی است. در حالی که گسیختگی عمیق شیروانی به صورت گسیختگی سراسری به علت قرارگرفتن پسترهای ضعیف در زیر خاکریز اتفاق می‌افتد.^[۸]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴، ۱۳۹۳/۰۸/۱۴، اصلاحیه ۱۱، ۱۳۹۳/۱۱/۲۶، پذیرش ۱۳۹۳/۱۲/۱۶.



شکل ۱. مدل هندسی.



شکل ۲. آرایش قرارگیری ستون‌های سنگی.

(S)، رابطه‌ی $Re = c \cdot S$ وجود دارد، که c مقدار ثابت است و برای آرایش مثلثی و مربعی به ترتیب برابر 0.525 و 0.564 است.^[۱۶, ۱۷] در پژوهش حاضر از آرایش مربعی استفاده شده است (شکل ۲(الف)). همچنین با توجه به شکل ۲ می‌توان درصد ناحیه‌ی جایگزینی (ρ) را برابر با نسبت کل مساحت مقاطع ستون سنگی به کل مساحت ناحیه‌ی غیرمسلح تعريف کرد (رابطه‌ی ۱). برای ناحیه‌ی جایگزینی کمتر از 10% بیهوده قابل ملاحظه‌ی در خواص خاک به وجود نمی‌آید.^[۱۰] در این پژوهش، درصد ناحیه‌ی جایگزینی بین 10 تا 30 درصد، که در اجرا استفاده می‌شود، به‌کار بردۀ شده است. آرایش ستون‌ها به طور کلی به صورت سه‌بعدی بوده است، برای مدل‌سازی ستون‌ها در حالت کرشن مسطح، لازم است که از نوار معادل (ستون معادل) استفاده شود.^[۱۸] با توجه به شکل ۳، ضخامت نوار معادل محاسبه شده است (رابطه‌ی ۲).

$$(1) \quad \rho = \frac{d^3}{(1/13S)^3} \times 100$$

$$(2) \quad \frac{\pi d^3}{4} = t_e \times S$$

تعیین ضریب اطمینان (FS) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.^[۱۶-۱۷] ارتباط بین فاصله‌ی ستون‌ها و تغییر در حالت تشخیص خاک به صورت نسبت تشخیص به تنفس قاتم به عمل اجرای ستون در یک مطالعه‌ی موردنی تحت بررسی قرار گرفته است.^[۱۷] همچنین پایداری شیروانی اجرای شده بر روی ستون سنگی با استفاده از روش تعادل حدی با سطح لغزش دائمی و با درنظر گرفتن ستون‌های سنگی مجرماً و ناحیه‌ی معادل مورد تحلیل قرار گرفته است.^[۷] نتایج حاصل نشان داده است که ضریب اطمینان با استفاده از روش ستون‌های مجرماً بزرگ‌تر از روش ناحیه‌ی معادل است در مطالعه‌ی دیگر نشست خاک رس نرم مسلح شده به ستون سنگی با استفاده از نرم افزار Plaxis 2D و به‌کارگیری روش نوار معادل جهت مدل‌سازی ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۸]

در این نوشتار نتایج تحلیل‌های عددی انجام شده برای ارزیابی ضریب اطمینان خاکریز دانه‌ی واقع بر پسترن مسلح به ستون سنگی در حالت گسیختگی عمیق گزارش شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Plaxis پارامترهایی نظری: قطر ستون سنگی، زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی، فاصله‌ی بین ستون سنگی، چسبندگی خاک رسی، ارتفاع خاکریز و زاویه‌ی اصطکاک بر ضریب اطمینان خاکریز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این بررسی به صورت نمودارهایی برای کاربردهای مهندسی ارائه شده است. همچنین بر مبنای نتایج عددی و برای توافق بیشتر بین نتایج حاصل از روش نوار معادل و روش ناحیه‌ی معادل، یک عامل کاهش مقاومت ارائه شده است.

۲. مدل‌سازی عددی

اگرچه در نرم افزار Plaxis مورد استفاده، قابلیت به‌کارگیری المان‌های ۶ و ۱۵ گره‌ی موجود است، اما به منظور افزایش دقیقت نتایج در این پژوهش از المان ۱۵ گره‌ی استفاده شده است. المان ۱۵ گره‌ی المان بسیار دقیقی است که نتایج بهتری را برای مسائل مشکل به دست می‌دهد. در مدل‌های ساخته شده جهت مسئله‌ی مورد تحلیل از مشین‌بندی متوسط استفاده شده است.

۲.۱. مدل‌سازی هندسی

مدل‌سازی در یک محیط دو بعدی (شوابط کرنش سطح) انجام شده است. شکل ۱، مدل هندسی خاکریز قرار گرفته روی ستون سنگی در خاک رسی نرم را برای دو حالت نوار معادل و ناحیه‌ی معادل نشان می‌دهد. فونداسیون خاک شامل خاک رسی نرم با ضخامت 10 متر قرار گرفته روی یک لایه ماسه به ضخامت 2 متر است. به‌عملت تقارن، فقط نیمی از هندسه در مدل‌سازی استفاده شده است. ابعاد مریوط به ستون سنگی، خاکریز و فونداسیون بر مبنای ملاحظات کاربردی انتخاب شده‌اند. هندسه‌ی اجزاء مدل مبنای بدین صورت است: قطر ستون برابر 0.8 متر، طول ستون برابر 10 متر، فاصله‌ی بین ستون‌ها برابر 2 متر، ارتفاع خاکریز برابر 5 متر، نیمی از پهنه‌ی تاج برابر 19 متر و زاویه‌ی شبیه شیروانی 2 (قائم). در این پژوهش سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. همچنین برای جلوگیری از گسیختگی موضعی و سطحی در سازه‌ی خاکریز و متناظر با واقعیت اجرای آن، از مشخصه‌های مقاومتی و تغییرشکل مناسب برای مصالح مریوط استفاده شده است. برای بررسی ناحیه‌ی معادل از پارامترهای مریوط به مصالح همگن استفاده شده است.

با توجه به شکل ۲، برای هر ستون سنگی با توجه به نوع آرایش یک شعاع تأثیر در نظر گرفته می‌شود. بین شعاع مؤثر ستون سنگی و فاصله‌ی بین مرکز تا مرکز آن‌ها

رس نرم استفاده شده و با استفاده از روابط ۳ الی ۸ به دست آمده است:

$$\gamma_{eq} = \gamma_s \rho + \gamma_c (1 - \rho) \quad (3)$$

$$E_{eq} = E_s \rho + E_c (1 - \rho) \quad (4)$$

$$v_{eq} = v_s \rho + v_c (1 - \rho) \quad (5)$$

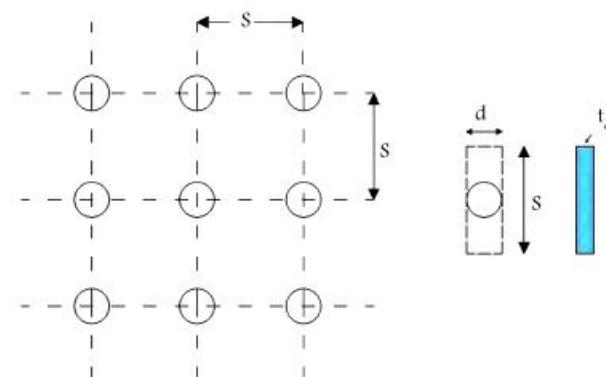
$$c_{eq} = c_s \rho + c_c (1 - \rho) \quad (6)$$

$$\varphi_{eq} = \tan^{-1} (\rho \tan \varphi_s + (1 - \rho) \tan \varphi_c) \quad (7)$$

$$\psi_{eq} = \psi_s \rho + \psi_c (1 - \rho) \quad (8)$$

که در آن‌ها، اندیس eq معرف پارامتر معادل، اندیس s معرف مشخصات مصالح سтон سنگی، و c معرف مشخصات مصالح رس نرم است.

برای مدل‌هایی با ستون سنگی معادل، از المان سطح مشارک بین ستون سنگی و خاک رس استفاده شده است. دلیل استفاده از این المان آن است که گسیختگی گروه ستون سنگی، از نوع برشی است و به همین دلیل تنش برشی قابل ملاحظه‌ی در سطح مشارک ستون سنگی و خاک رس به وجود می‌آید.^[۲۶] مشخصات مقاومت سطح مشارک وابسته به مشخصات مقاومت لایه‌های خاکی است. مشخصه‌های مقاومتی سطح مشارک با اعمال ضریب کاهش مناسب به داده‌های مقاومتی خاک تعیین شده‌اند. مقدار ضریب کاهش مقاومت برای رس 7° در نظر گرفته شده است.^[۲۷] برای خاک‌های با مقاومت بالا از ضریب کاهش بزرگ‌تری استفاده می‌شود، لذا مقدار این ضریب برای سطوح مشارک ستون سنگی 9° در نظر گرفته شده است.^[۲۸]



شکل ۳. معادل‌سازی ستون‌های سنگی در شرایط کرنش مسطح.

جدول ۱. مشخصات مصالح خاکریز، ستون سنگی، فونداسیون، و ناحیه‌ی معادل.

پارامتر	خاکریز (kN/m ³)	رس نرم	ستون سنگی	ماسه	ناحیه‌ی معادل
γ_{unsat} (kN/m ³)	۱۶,۱۲۵	۱۸	۱۷	۱۶	۱۹
E (kN/m ³)	۵۶۸۷,۵	۲۵۰۰۰	۳۵۰۰۰	۱۵۰۰	۳۰۰۰۰
v	۰,۳۴۴	۰,۳	۰,۳	۰,۳۵	۰,۳
c (kN/m ³)	۱۳,۱۲۵	۰	۰	۱۵	۰
φ (°)	۵,۳۸	۳۰	۳۷	۰	۳۷
ψ (°)	۰,۷۵	۰	۶	۰	۵

۴.۲. تجزیه و تحلیل ضریب اطمینان با استفاده از روش کاهش مقاومت (Phi-c)

در کاهش Phi-c پارامترهای مقاومت φ و c خاک پی در پی تا وقتی که گسیختگی سازه اتفاق می‌افتد، کاهش داده می‌شود.^[۲۹] مقاومت سطح مشارک در صورت منظورکردن، به همین‌گونه کاهش داده می‌شود. مقاومت اجزاء سازه‌ی همانند صفحات و مهارها تحت تأثیر کاهش Phi-c قرار ندارند. برای تعریف ضریب اطمینان کل ($\sum Msf$) از مقدار پارامترهای کاهش یافته‌ی مقاومت خاک در مراحل مختلف تحلیل استفاده می‌شود:

$$\sum Msf = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}} \quad (9)$$

به طوری‌که پارامترهای مقاومت با زیرنویس $input$ اشاره به مشخصات ورودی داشته و پارامترهای با زیرنویس $reduced$ معرف مقادیر کاهش یافته‌ی مقاومت است. محاسبه‌ی کاهش Phi-c با استفاده از تعداد مراحل افزایش بار^۱ انجام می‌شود. پارامترهای مقاومتی پی در پی به طور خودکار تا وقتی که تمام مراحل اضافی اجرا شود، کاهش داده می‌شود. در این حالت ضریب اطمینان به صورت رابطه‌ی 10° به دست می‌آید:

$$SF = \frac{\text{مقادیر } Msf}{\text{مقادیر گسیختگی}} = \frac{\text{مقاومت قبل حصول}}{\text{مقادیر گسیختگی}} \quad (10)$$

۳. تحلیل صحبت‌سنگی

به منظور بررسی صحبت عملکرد نرم افزار در ابتدا مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی یک نمونه‌ی آزمایشگاهی در مطالعات انجام شده،^[۲۶] و شبیه‌سازی عددی

با فرض اینکه لایه‌ی ماسه‌ی فونداسیون بر روی یک بستر سخت قرار دارد، از تغییرشکل قائم در این مرز افقی جلوگیری شده است. همچنین از تغییرشکل افقی در دو مرز قائم جلوگیری و فقط اجازه‌ی تغییرشکل در راستای قائم به آن‌ها داده شده است.

۳.۲. مدل‌سازی و مشخصات مصالح به منظور شبیه‌سازی رفتار خاک، باید یک مدل مناسب از خاک و پارامترهای متناسب با مصالح به هندسه‌ی سازه تخصیص داده شود. رفتار غیرخطی تنش - کرنش خاک در سطح مختلف پیچیدگی مسئله، قابل مدل کردن است. تعداد پارامترهای مدل با سطح گسیختگی مسئله افزایش می‌یابد. به منظور شبیه‌سازی دقیق، نیاز به پارامترهای مناسب مصالح است. برای مدل‌سازی مصالح خاکریز، ستون سنگی و فونداسیون از مدل موهر - کولمب استفاده شده است. این مدل کشسان خیری کامل به ۵ پارامتر اساسی شامل: مدول کشسانی (E), نسبت پواسون (v), زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (φ), چسبندگی خاک (c), و زاویه‌ی اتساع خاک (ψ) نیاز دارد. مشخصات مصالح در جدول ۱ ارائه شده است. بستر رسی در حالت نزدیک به اشباع بدون سطح آب آزاد معین در نظر گرفته شده است. از آنجایی که خاک رس نرم اساساً در حالت تحکیم نیافته یا تحکیم عادی یافته است، بنابراین تحت بار خاکریز در حین اجرا و بالاگذره بعد از اجرا خاک رسی نرم در شرایط بحرانی زهکشی نشده عمل می‌کند. از این‌رو، در این پژوهش از چسبندگی زهکشی نشده برای منظورکردن مقاومت خاک رسی نرم استفاده شده است.

مشخصات ناحیه‌ی معادل از میانگین مساحت اشغال شده توسط ستون سنگی

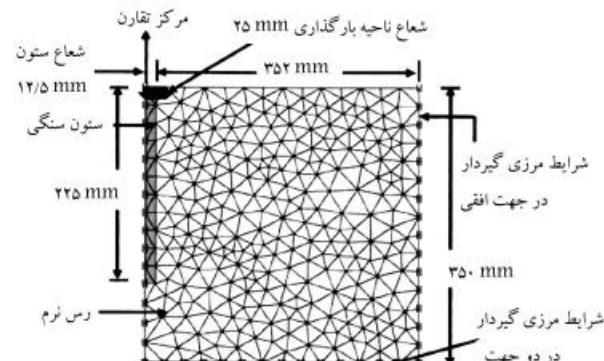
۴. ارائه نتایج

در این پژوهش، چندین پارامتر تأثیرگذار در ضربی اطمینان (FS) متاثر با گسیختگی عمیق خاکریز قرار گرفته روی رس نرم مسلح به سтон سنگی برسی شده است. این پارامترها شامل: قطر ستون سنگی، زاویه اصطکاک ستون سنگی، فاصله بین ستون سنگی، چسبندگی خاک رسی، ارتفاع خاکریز و زاویه اصطکاک هستند. تأثیر هر کدام از این عوامل در ضربی اطمینان به صورت نمودار برای روش ستون سنگی معادل و ناحیه ای معادل ارائه شده است.

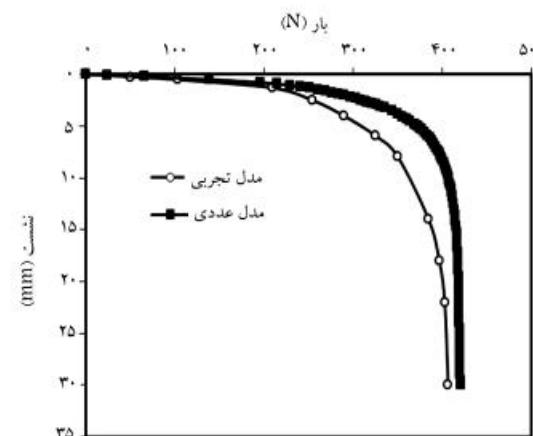
۱.۴. تأثیر قطر ستون سنگی

برای برسی تأثیر قطر ستون سنگی در FS، ۳ قطر $10/8$ و $1/2$ متر، که معادل $12/5$ ، $19/6$ و $28/2$ درصد ناحیه جایگزینی هستند، مورد تحلیل قرار گرفته اند. نمودار شکل ۶، تأثیر تغییر قطر ستون سنگی در FS برای روش نوار معادل و ناحیه ای معادل نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، با افزایش قطر ستون سنگی مقدار FS خاکریز افزایش می یابد. همچنین نتایج حاصل از روش ناحیه ای معادل، روند مشابهی با روش ستون معادل نشان می دهد. با این حال مقادیر FS محاسبه شده از روش ناحیه ای معادل بزرگتر از روش ستون معادل است. با افزایش قطر ستون سنگی به میزان $1/2$ متر، FS برای روش های ستون معادل و ناحیه ای معادل نسبت به مدل مبنا به ترتیب 17% و 10% افزایش یافته است. همچنین اختلاف مقادیر FS مشاهده شده برای مدل مبنا در روش های تحلیلی مذکور $16/8\%$ است. نتایج مشابهی در تفاوت به وجود آمده در مقادیر FS در روش نوار معادل و ناحیه ای معادل در مطالعات گذشته ارائه شده است.^[۸] شایان ذکر است که نتایج حاصل از تحلیل های عددی انجام گرفته با نتایج به دست آمده از روش تعادل حدی در مطالعات پیشین مغایرت دارد.^[۷] به طوری که در پژوهش حاضر روش ناحیه ای معادل ضربی اطمینان بیشتری را نسبت به روش نوار معادل نشان می دهد، در حالی که در روش تعادل حدی بر عکس است.^[۷] اختلاف نتایج مشاهده شده ممکن است به علت اتخاذ سطح لغزش دایری در تحلیل های تعادل حدی در مطالعات انجام شده باشد.

شکل ۷، بردار سرعت تغییر شکل شیروانی قرار گرفته روی رس به سازی شده با ستون سنگی را نشان می دهد، که مطابق آن و با توجه به مطالعات ذکر شده در قسمت های قبل، سطح لغزش بحرانی به صورت گسیختگی عمیق روی می دهد.



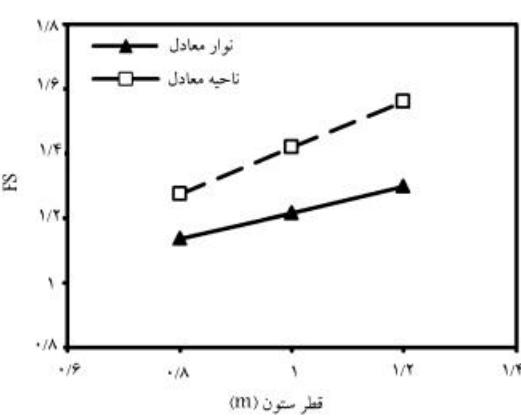
شکل ۴. تصویری از شبیه سازی المان محدود مدل آزمایشگاهی



شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی.

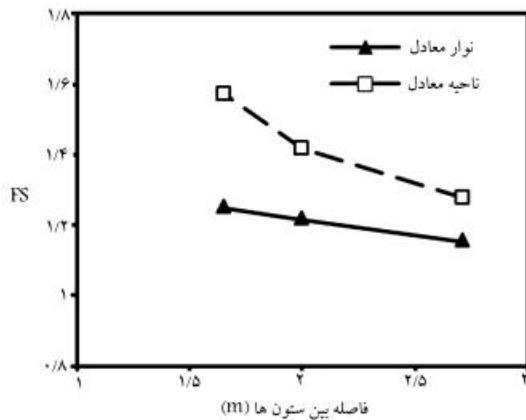
جدول ۲. مشخصات مصالح برای صحبت سنجی.

پارامتر	ستون سنگی	رس	γ_{unsat} (kN/m³)
	19	27	
	45000	4000	E (kN/m²)
	$0/3$	$0/45$	v
	0	20	c (kN/m²)
	38	0	φ (°)

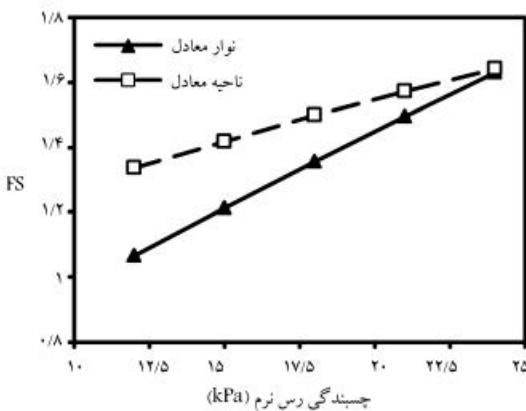


شکل ۶. تأثیر قطر ستون سنگی در FS.

صورت گرفته است. مدل آزمایشگاهی در یک محفظه استوانه ای با قطر 650 میلی متر و ارتفاع 350 میلی متر برای بستر رسانی ساخته شده است. ستون سنگی در مرکز بستر رسی با قطر 25 میلی متر و ارتفاع 225 میلی متر ساخته شده و با استفاده از یک صفحه ای صلب با قطری معادل دو برابر قطر ستون سنگی بارگذاری شده است. تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار Plaxis در شرایط تقارن محوری و با مشبندی ریز انجام شده است. همچنین برای مدل سازی مصالح از مدل رفتاری موهر - کولمب استفاده شده است. شکل ۴، شماتیکی از مدل را نشان می دهد. در جدول ۲، مشخصات مدل ارائه شده است. شکل ۵، منحنی بار - نشست مربوط به تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، نتایج حاصل از تحلیل های تجربی و عددی تا حد زیادی بر هم منطبق هستند، که این موضوع بیان گر توانایی نرم افزار برای شبیه سازی مدل رفتاری خاک مسلح به ستون سنگی است.



شکل ۹. تأثیر فاصله بین ستون سنگی در FS.



شکل ۱۰. تأثیر چسبندگی رس نرم در FS.

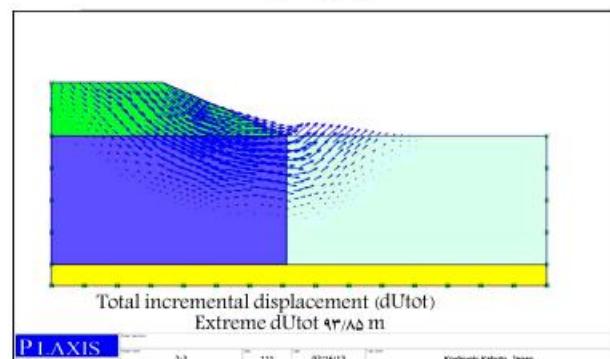
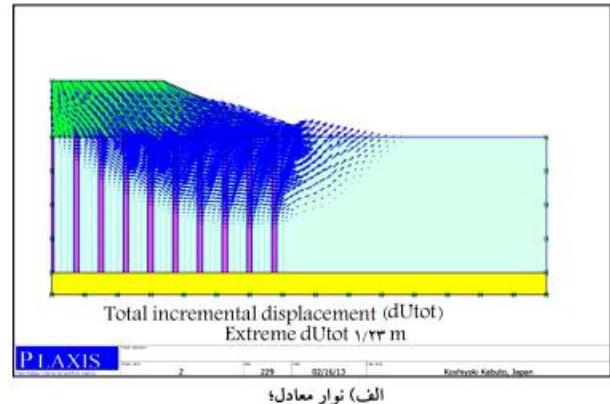
روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب به میزان ۱۲/۸٪ و ۱۷/۹٪ افزایش یافته است.

۳.۴. تأثیر فاصله بین ستون‌های سنگی

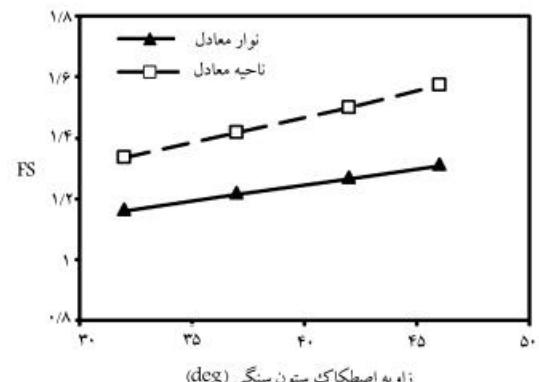
در این بررسی از فواصل ۲/۱۶۵ و ۲/۷۱ متر بین ستون‌های سنگی که به ترتیب معادل ۱۰/۶۵٪ و ۱۹/۶٪ ناحیه‌ی جابه‌جایی است، استفاده شده است. شکل ۹، تأثیر فاصله بین ستون‌ها در مقادیر FS خاکریز قرارگرفته روی رس نرم مسلح را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور با افزایش فاصله بین ستون‌ها، میزان ضریب اطمینان خاکریز کاهش می‌یابد. این نتایج هم در روش نوار معادل و هم در محیط معادل بدست آمده است. از این رو با افزایش فاصله بین ستون‌های سنگی از ۱/۶۵ متر تا ۲/۷۱ متر، مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب به میزان ۸/۴٪ و ۲۳٪ کاهش را نشان می‌دهد. نتایج مشابهی در بهبود نشست پست بهسازی شده با ستون سنگی در مطالعات پیشین ارائه شده است.^[۲۷] همچنین با توجه به شکل مذکور مشاهده می‌شود که منحنی نتایج مربوط به روش ناحیه‌ی معادل دو خطی است و برای ستون‌های سنگی با فاصله‌ی بیش از ۲ متر، شبیه نمودار ملاجمتر می‌شود.

۴.۴. تأثیر چسبندگی رس نرم

تأثیر چسبندگی زهکشی‌نشده بستر رس نرم در FS خاکریز در شکل ۱۰ نشان



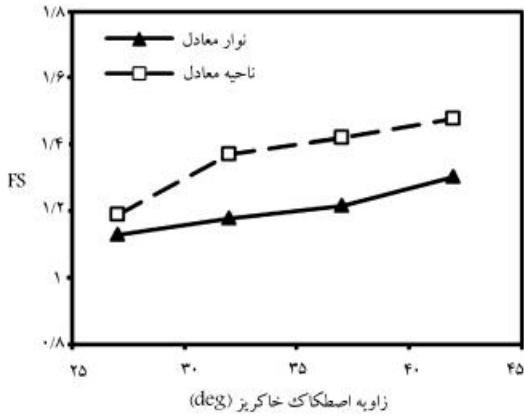
شکل ۷. بردار سرعت تغییرشکل در خاکریز و بستر.



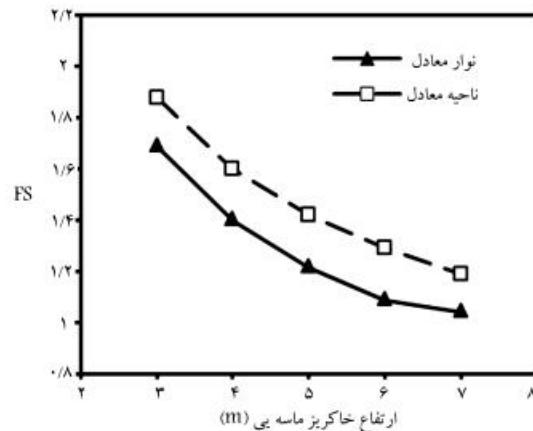
شکل ۸. تأثیر زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی در FS.

۲.۴. تأثیر زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی

به منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی در مقدار FS خاکریز، ۴ مقدار زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی ۴۲، ۳۲، ۳۷ و ۴۶ درجه مورد استفاده قرارگرفته است. نتایج حاصل از تأثیر زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی در مقدار FS در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی، مقدار ضریب اطمینان خاکریز افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش مقاومت ستون سنگی باعث افزایش ضریب اطمینان خاکریز می‌شود. همچنین مطابق شکل مذکور، هر دو روش ذکر شده (نوار معادل و ناحیه‌ی معادل)، روند مشابهی با افزایش زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی ارائه می‌دهند. به طوری که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی از ۳۲ تا ۴۶ درجه، مقدار FS برای



شکل ۱۲. تأثیر زاویه اصطکاک خاکریز ماسه‌بی در FS.



شکل ۱۱. تأثیر ارتفاع خاکریز ماسه‌بی در FS.

۴.۳. ضریب کاهش برای ضریب اطمینان

استفاده از روش نوار معادل در طراحی، مخصوصاً وقتی که تعداد ردیف ستون‌های سنگی افزایش می‌یابد، مشکل بوده است. بر این اساس، کاربرد روش ناحیه‌ی معادل نسبت به نوار معادل متداول است. همان‌طورکه از نتایج ارائه شده ملاحظه می‌شود، مقدار ضریب اطمینان با استفاده از روش ناحیه‌ی معادل بزرگ‌تر از روش نوار معادل است. بنابراین به منظور مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش نوار معادل و روش ناحیه‌ی معادل ازیک ضریب کاهش (FR) استفاده شده است. این ضریب کاهش به صورت نسبت ضریب اطمینان به دست‌آمده از روش نوار معادل (FS_{es}) به ضریب اطمینان به دست‌آمده از روش ناحیه‌ی معادل (FS_{eq}) تعريف شده است.

شکل ۱۳، نتایج حاصل از بررسی ضریب کاهش را برای پارامترهای مختلف نشان می‌دهد. برای کل پارامترها ضریب کاهش بین محدوده‌ی ۰/۷۹ تا ۰/۹۹ قرار گرفته است. بنابراین رابطه‌ی ۱۱ را باید برای اصلاح ضریب اطمینان به دست‌آمده از روش ناحیه‌ی معادل استفاده کرده و با استفاده از آن، ضریب اطمینان به دست‌آمده کاهش داده شود:

$$FR = \frac{FS_{es}}{FS_{eq}} \quad (11)$$

۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار به بررسی پایداری شیروانی روی رس نرم مسلح به ستون سنگی با استفاده از نرم افزار Plaxis با دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل پرداخته شده است. در روش نوار معادل، ستون‌های سنگی با آریش مرتعی به صورت نوار در محیط دو بعدی مدل سازی شده‌اند. همچنین در روش ناحیه‌ی معادل، براساس درصد ناحیه‌ی جایگزین، یک محیط همگنی با استفاده از روابط ارائه شده برای ستون سنگی و رس نرم مدل سازی انجام شده است، و تأثیر پارامترهای نظری قطر ستون سنگی، زاویه اصطکاک ستون سنگی، فاصله‌ی بین ستون سنگی، چسبندگی خاک رسی، ارتفاع خاکریز و زاویه اصطکاک در ضریب اطمینان خاکریز تحلیل و بررسی شده‌اند. در اینجا نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی انجام شده به طور خلاصه ارائه شده است:

۱. با بهبود خصوصیات مصالح ستون سنگی از جمله: قطر و زاویه اصطکاک، ضریب اطمینان خاکریز افزایش یافته است. همچنین با افزایش فاصله بین

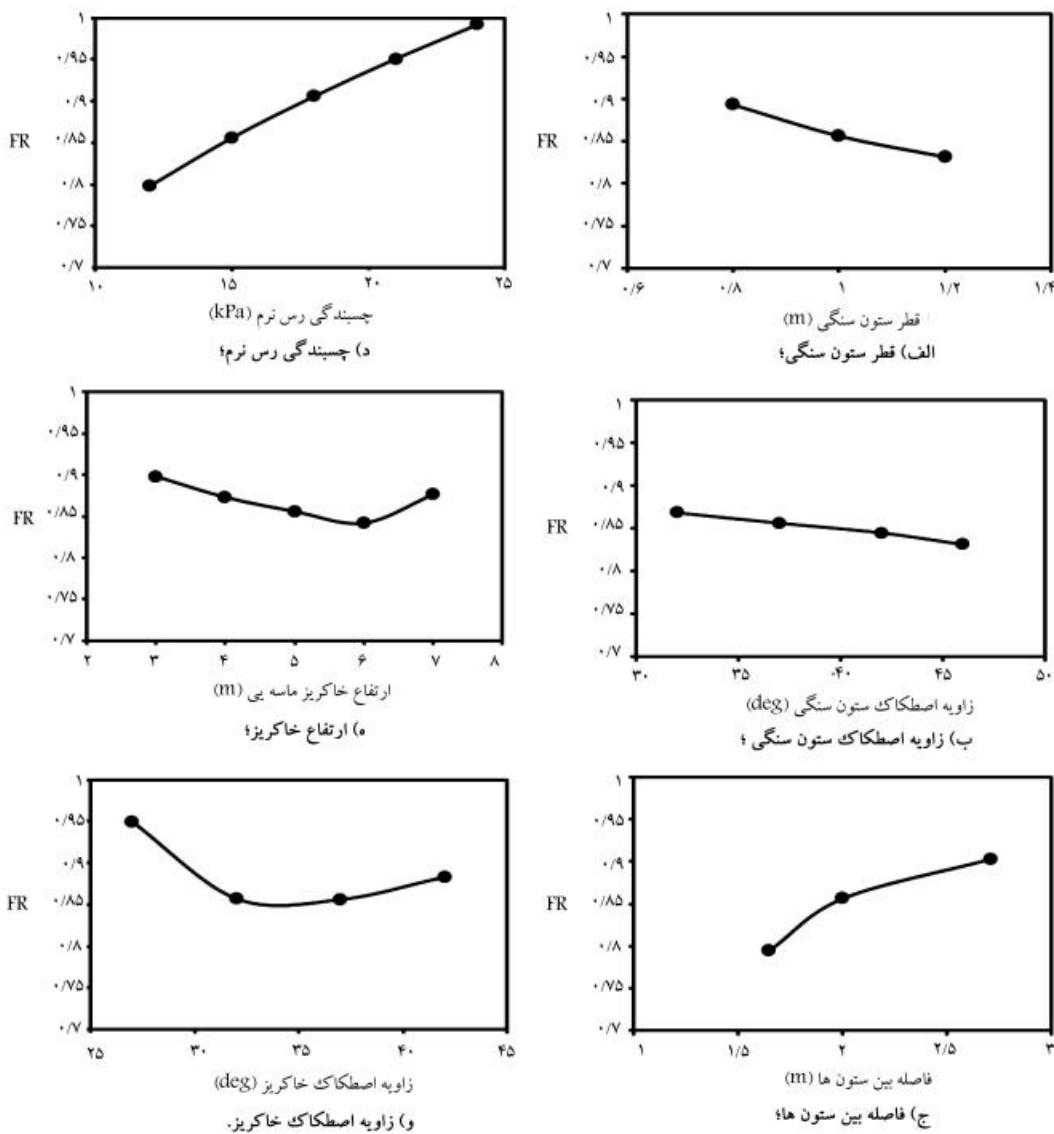
داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش چسبندگی خاک رسی نرم، مقدار FS خاکریز قرارگرفته بر ستون سنگی افزایش می‌یابد. مقادیر FS برای ناحیه‌ی معادل بیشتر از نوار معادل است. به طوری که با افزایش چسبندگی رس نرم از ۱۲ kPa به ۲۴ kPa، مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب ۵۲/۸٪ و ۲۲٪ افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در تحقیقات هان و همکاران در سال ۲۰۰۴^[۷] ارائه شده است. همچنین با افزایش چسبندگی، مقادیر FS برای دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به یکدیگر نزدیکتر می‌شود. از جمله دلایل این نتیجه، تزدیک‌شدن سطح گسیختگی مربوط به دوروش به یکدیگر است. به طوری که سطح لغزش به تراز سطح پستر مسلح به ستون سنگی نزدیک می‌شود.

۴.۴. تأثیر ارتفاع خاکریز ماسه‌بی

شکل ۱۱، تأثیر ارتفاع خاکریز ماسه‌بی قرارگرفته روی رس نرم مسلح به ستون سنگی برای دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل را نشان می‌دهد. برای این بررسی از خاکریز ماسه‌بی با ارتفاع‌های ۳ تا ۷ متر استفاده شده است. با توجه به شکل مذکور با افزایش ارتفاع خاکریز ماسه‌بی مقدار FS کاهش یافته است. این روند برای هر دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به دست‌آمده است. روش ناحیه‌ی معادل مقدار FS بزرگ‌تری را در مقایسه با روش نوار معادل نشان داده است. از این رو با افزایش ارتفاع خاکریز تا ۷ متر نسبت به مدل مبدأ مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب ۱۶/۱٪ و ۱۴/۲٪ کاهش می‌یابد.

۴.۵. تأثیر زاویه اصطکاک خاکریز ماسه‌بی

تأثیر زاویه اصطکاک خاکریز ماسه‌بی بدون چسبندگی قرارگرفته روی رس نرم به ستون سنگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز ماسه یا بهبود کیفیت خاکریز ماسه‌بی، ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل روند مشابهی با یکدیگر داشته و مقادیر مربوط به روش ناحیه‌ی معادل بزرگ‌تر از روش نوار معادل بوده است. بنابراین با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز ماسه‌بی از ۲۷ درجه به ۴۲ درجه، مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب به میزان ۱۵/۴٪ و ۲۴٪ افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. تأثیر پارامترهای مورد بررسی در ضریب کاهش.

خاکریز ماسه‌یی از ۲۷ درجه به ۴۲ درجه، مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌یی معادل بهتریب به میزان $15/4\%$ و 24% افزایش را نشان می‌دهد.

۴. در بین پارامترهای مورد بررسی، افزایش چسبندگی خاک رس بیشترین تأثیر را در پایداری شیروانی قرارگرفته روی بستر نرم بهسازی شده با ستون سنگی نشان داده است. به طوری که با افزایش چسبندگی بستر نرمی به میزان 24 kPa ، $24/2\%$ افزایش نسبت به مدل مبنای برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌یی معادل بهتریب به میزان $34/2\%$ و $15/8\%$ درصد افزایش یافته است.

۵. با توجه به اینکه تابع حاصل از ناحیه‌یی معادل بیشتر از نوار معادل است، از این رویک رضیب کاهش معرفی شده است. ضریب کاهش برای کل پارامترهای بررسی شده در محدوده $74/0$ تا $99/0$ قرارگرفته است، از آنجایی که برای طراحی، روش ناحیه‌یی معادل نسبت به نوار معادل متداول‌تر است، از این رو توصیه می‌شود مقدار ضریب اطمینان با استفاده از روش ناحیه‌یی معادل با ضریب کاهش معرفی شده تعديل یابد.

ستون‌ها مقدار ضریب اطمینان کاهش یافته است. به طوری که با افزایش فاصله بین ستون‌های سنگی از $1/65$ متر تا $2/71$ متر، مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌یی معادل بهتریب به میزان $8/4\%$ و 23% کاهش یافته است.

۲. با افزایش چسبندگی زهکشی نشده‌ی خاک رسی نرم فونداسیون، ضریب اطمینان افزایش یافته است؛ که این بهبود ضریب اطمینان را برای هر دو روش نوار معادل و ناحیه‌یی معادل به دست آمده است. همچنین با افزایش چسبندگی، ضریب اطمینان به دست آمده از دوروش نوار معادل و ناحیه‌یی معادل به یکدیگر نزدیک‌تر شده است. از جمله دلایل این نتیجه، نزدیک‌شدن سطح گیختگی مربوط به دو روش به یکدیگر است، به طوری که سطح لغزش به تراز سطح بستر مسلح به ستون سنگی نزدیک می‌شود.

۳. با افزایش ارتفاع خاکریز ماسه‌یی قرارگرفته روی رس نرم مسلح به ستون سنگی، ضریب اطمینان کاهش یافته است. با افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاکریز ماسه‌یی، ضریب اطمینان شیروانی افزایش یافته است، از این روابا افزایش زاویه‌ی اصطکاک

پانوشت

- load advancement number of steps

(References) مراجع

- Han, J., Sheth, A.R., Porbaha, A. and Shen, S.L. "Numerical analysis of embankment stability over deep mixed foundations", *ASCE, Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, **126**, pp. 1385-1394 (26-31 July 2004).
- Cheng, Y.M. and Lau, C.K., *Slope Stability Analysis and Stabilization*, New Method sand Insight, Routledge, UK (2008).
- Lee, J.S. and Pande, G.N. "Analysis of stone column reinforced foundations", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, **22**(12), pp. 1001-1020 (1998).
- Mokhtari, M. and Kalantari, B. "Soft soil stabilization using stone column - A Review", *Bund J., EJGE*, Department of Civil Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, **17**, pp. 1459-1466 (2012).
- Aboshi, H., Ichimoto, E., Harada, Y. and Enoki, M. "The compozer, a method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns", *Proc. of 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement*, Paris, **1**, pp. 211-216 (1979).
- Bergado, D.T., Panichayatum, B., Sampaco, C.L. and Miura, N. "Reinforcement of soft bangkok clay using granular piles", *Proc. Int. Geotech. Symp. on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Kyushu, Japan, pp.179-184 (1988).
- Christoulas, S., Giannaras, C. and Tsiambaos, G. "Stabilization of embankment foundations by using stone columns", *Geotechnical and Geological Engineering*, **15**(3), pp. 247-258 (1997).
- Abusharar, S.W. and Han, J. "Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay", *Engineering Geology*, **120**(1-4), pp. 103-110 (2011).
- Priebe, H.J. "The design of vibro replacement", *Ground Engineering*, **28**, pp. 31-37 (1995).
- Poorooshasp, H.B. and Meyerhof, G.G. "Analysis of behavior of stone columns and lime columns", *Comput. Geotech.*, **20**(1), pp. 47-70 (1996).
- Gueguin, M., Hassen, G. and de Buhan, P. "Stability analysis of homogenized stone column reinforced foundations using a numerical yield design approach", *Computers and Geotechnics*, **64**, pp. 10-19 (2015).
- Han, J. and Leshchinsky, D. "Limit equilibrium and continuum mechanics-based numerical methods for analyzing stability of MSE walls", *Proceedings of the 17th Engineering Mechanics Conference*, ASCE, University of Delaware, Newark, Delaware, USA (13-16 June 2004).
- Cheng, Y.M., Lansivaara, T. and Wei, W.B. "Two-dimensional slope-stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods", *Computers and Geotechnics*, **34**(3), pp. 137-50 (2007).
- Sun, J., Tian, X., Guan, X., Yu, Y. and Yang, X. "Stability analysis for loosened rock slope of Jinyang Grand Buddha in Taiyuan", *China. Earth Science Frontiers*, **15**(4), pp. 227-238 (2008).
- Wei, W.B. and Cheng, Y.M. "Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles", *Computers and Geotechnics*, **36**(7), pp. 1176-1185 (2009).
- Zhen, Z., Jie, H. and Guanbao, Y. "Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of stone column-supported embankments over soft clay", *Engineering Geology*, **168**, pp. 104-113 (2014).
- Elshazly, H., Elkasabgy, M. and Elleboudy, A. "Effect of inter-column spacing on soil stresses due to vibro-installed stone columns: Interesting findings", *Geotech. Geol. Eng.*, **26**, pp. 225-236 (2008).
- Zahmatkesh, A. and Asskar, J.Ch. "Settlement evaluation of soft clay reinforced with stone columns using the equivalent secant modulus", *Arab. J. Geosci.*, **5**(1), pp. 103-109 (2012).
- Balaam, N.P. and Booker, J.R. "Analysis of rigid rafts supported by granular piles", *Int. J. Num. Anal. Methods Geomech.*, **5**(4), pp. 379-403 (1981).
- Hu, W., Wood, D.M. and Steward, W. "Ground improvement using stone column foundation: Results of model tests", *Proc. Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, Macau, pp. 247-256 (1977).
- Cooper, M.R. and Rose, A.N. "Stone column support for an embankment on deep alluvial soils", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **137**(1), pp. 15-25 (1999).
- Christoulas, S.T., Bouckovalas, G. and Giannaras, C.H. "An experimental study on model stone columns", *Soil Found.*, **40**(6), pp. 11-22 (2000).
- Han, J., Oztoprak, S., Parsons, R.L. and Huang, J. "Numerical analysis of foundation columns to support widening of embankments", *Computers and Geotechnics*, **34**, pp. 435-448 (2007).
- Choobasti, A.J., Zahmatkesh, A. and Noorzad, R. "Performance of stone columns in soft clay: Numerical evaluation", *Geotech. Geol. Eng.*, **29**(5), pp. 675-684 (2011).
- Brinkgreve, R.B. and Vermeer, P.A., *Plaxis-Finite Element Code for Soil and Rocks Analysis*, Version 8, Rotterdam Brookfield: AA. Balkema (1998).
- Narasimha Rao, S., Madhiyan, M. and Prasad, Y.V.S.N. "Influence of bearing area on the behavior of stone columns", *Proc., Indian Geotech. Conf.*, Calcutta, India, pp. 235-237 (1992).
- Han, J., Chai, J.C., Leshchinsky, D. and Shen, S.L. "Evaluation of deep-seated slope stability of embankments over deep mixed foundations", *Proceedings of Geo-Support Conference: Innovation and Cooperation in the Geo-Industry*, pp. 29-31 (Jan. 2004).