

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

محمدجواد شعبانی رمندی* (کارشناس ارشد)

محمدعلی روشن ضمیر (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Plaxis، پایداری شیروانی ماسه‌یی ساخته شده روی رس نرم مسلح به ستون سنگی به دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل بررسی شده است. با انجام تحلیل‌های عددی اثر پارامترهایی نظیر: قطر، زاویه‌ی اصطکاک و فاصله‌ی بین ستون سنگی، چسبندگی خاک رسی، ارتفاع و زاویه‌ی اصطکاک خاکریز در ضریب اطمینان شیروانی ماسه‌یی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل نشان داده است که از بین پارامترهای مورد بررسی، مقاومت ستون سنگی و رس نرم در ضریب اطمینان پایداری تأثیر بیشتری دارند. همچنین بر مبنای نتایج عددی و با توجه به متداول بودن روش طراحی ناحیه‌ی معادل نسبت به نوار معادل و برای تعدیل تفاوت موجود بین نتایج حاصل از روش‌های مذکور، یک ضریب کاهش پیشنهاد شده است که برای کل پارامترهای بررسی شده در محدوده‌ی ۷۴٪ تا ۹۹٪ قرار گرفته است. توصیه می‌شود که ضریب اطمینان حاصل از روش ناحیه‌ی معادل با ضریب کاهش ذکر شده تعدیل یابد.

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

۱. مقدمه

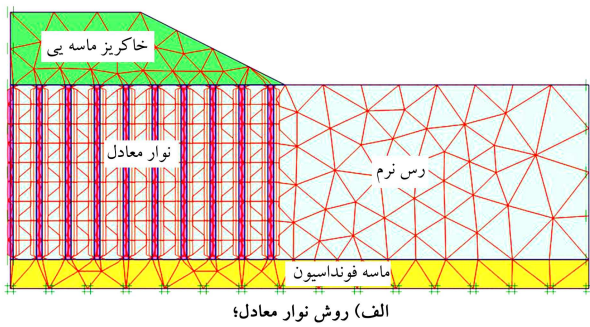
صدها سال است که خاک‌ها جهت بهبود خواص مهندسی‌شان به روش‌های مختلف مورد اصلاح واقع شده‌اند. اما در ۷۵ سال اخیر، ارتقاء دانش بشر در زمینه‌ی رفتار خاک و مخاطرات ژئوتکنیکی موجب بروز روش‌های بدیع و جدیدی در خصوص اصلاح خواص خاک‌ها شده است. یکی از مناسب‌ترین شیوه‌های اصلاح زمین، اجرای ستون‌های سنگی است. استفاده از ستون‌های سنگی در پروژه‌های ژئوتکنیکی به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک، کنترل نشست خاک، پایداری شیروانی‌ها، کاهش قابلیت روانگرایی خاک و افزایش مقاومت جانبی پی‌ها، کاربرد فراوان داشته است. اجرای خاکریزهای مهندسی بر روی بسترهای نرم ممکن است مشکلاتی نظیر ناپایداری شیروانی مواجه شود.^[۱] تحلیل پایداری شیروانی‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های تعادل حدی، تحلیل حدی، المان محدود، و تفاضل محدود انجام داد.^[۲] ناپایداری شیروانی خاکریز ممکن است به صورت موضعی، سطحی، کلی، و عمقی توسعه یابد. گسیختگی موضعی و سطحی در عمق کم به علت تنش پایین ناشی از سربار، چگالی کم، مقاومت کم، و نیروی زه ناشی از اشباع شدن خاکریز بعد از بارندگی است. به طور کلی گسیختگی در خاکریزهای ماسه‌یی از نوع گسیختگی پنجه شیروانی است. در حالی که گسیختگی عمیق شیروانی به صورت گسیختگی سراسری به علت قرارگرفتن بستر ضعیف در زیر خاکریز اتفاق می‌افتد.^[۱]

* نویسنده مسئول

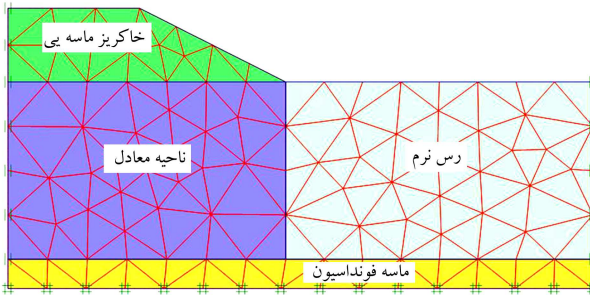
تاریخ: دریافت ۱۴/۱۳۹۳، اصلاحیه ۲۶/۱۱/۱۳۹۳، پذیرش ۱۶/۱۲/۱۳۹۳.

سازوکار بهسازی خاک عمدتاً بستگی به نوع خاک دارد. مقاومت خاک‌های رسی را می‌توان با استفاده از ستون سنگی بهبود داد. همچنین ممکن است از ستون‌های سنگی در نهشته‌های ماسه‌یی استفاده شود، اما کاربرد ویژه آن‌ها در خاک‌های نرم، غیرآلی، و چسبنده است. نحوه‌ی ساخت ستون سنگی به یکی از دو روش جایگزینی و جابه‌جایی است. در روش جایگزینی، که به روش خیس هم معروف است، خاک محل در یک الگوی خاص با ستون سنگی جایگزین می‌شود، که برای این کار باید گودال‌هایی را با استفاده از یک میله‌ی ارتعاشی همراه با جت آب حفر کرد. در روش جابه‌جایی، که به روش خشک هم معروف است، خاک محل توسط یک میله‌ی ارتعاشی همراه با هوای فشرده به صورت جانبی جابه‌جا می‌شود. زمانی که میله به عمق موردنظر رسید، مصالح سنگی داخل گودال ریخته و با میله‌ی ارتعاشی متراکم می‌شود. روش جابه‌جایی برای زمین‌هایی که سطح آب زیرزمینی پایین است و خاک سفت دارند، مناسب است.^[۳]

چندین شیوه‌ی بهسازی برای جلوگیری از گسیختگی عمیق شیروانی واقع بر بستر نرم از قبیل: ستون‌های ماسه‌یی 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 بستر نرم پیشنهاد شده‌اند.^[۴-۵] مطالعات بسیاری به منظور حل نظری برآورد ظرفیت باربری و نشست بسترهای اصلاح شده با استفاده از ستون سنگی انجام شده است.^[۶-۹] در سال‌های اخیر، روش‌های عددی به‌طور گسترده برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها به منظور

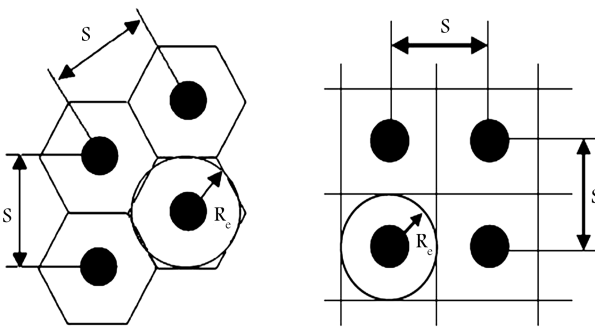


الف) روش نوار معادل؛



ب) روش ناحیه معادل.

شکل ۱. مدل هندسی.



ب) آرایش مثلثی.

آرایش مربعی؛

شکل ۲. آرایش قرارگیری ستون‌های سنگی.

رابطه (S) ، رابطه $Re = c.S$ وجود دارد، که c مقدار ثابت است و برای آرایش مثلثی و مربعی به ترتیب برابر 0.525 و 0.564 است. [۱۸، ۱۹] 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 تعریف کرد (رابطه ۱). برای ناحیه‌ی جایگزینی کمتر از 10% ، بهبود قابل ملاحظه‌ی در خواص خاک به وجود نمی‌آید. [۲۰] در این پژوهش، درصد ناحیه‌ی جایگزینی بین 10% تا 30% درصد، که در اجرا استفاده می‌شود، به کار برده شده است. آرایش ستون‌ها به طور کلی به صورت سه‌بعدی بوده است. برای مدل‌سازی ستون‌ها در حالت کرنش مسطح، لازم است که از نوار معادل (ستون معادل) استفاده شود. [۱۸] با توجه به شکل ۳، ضخامت نوار معادل محاسبه شده است (رابطه ۲).

$$\rho = \frac{d^t}{(1.13S)^2} \times 100 \quad (1)$$

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

تعیین ضریب اطمینان (FS) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۱۶-۱۷] ارتباط بین فاصله‌ی ستون‌ها و تغییر در حالت تنش خاک به صورت نسبت تنش افقی به تنش قائم به علت اجرای ستون در یک مطالعه‌ی موردی تحت بررسی قرار گرفته است. [۱۷] همچنین پایداری شیروانی اجراشده بر روی ستون سنگی با استفاده از روش تعادل حدی با سطح لغزش دایره‌ی و با در نظر گرفتن ستون‌های سنگی مجزا و ناحیه‌ی معادل مورد تحلیل قرار گرفته است. [۷] نتایج حاصل نشان داده است که ضریب اطمینان با استفاده از روش ستون‌های مجزا بزرگ‌تر از روش ناحیه‌ی معادل است. در مطالعه‌ی دیگر نشست خاک رس نرم مسلح شده به ستون سنگی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis ۲D 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 و واقع بر بستر نرم مسلح به ستون سنگی در حالت گسیختگی عمیق گزارش شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Plaxis ۲D پارامترهای نظیر: 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 نرم‌افزار Plaxis مورد استفاده، قابلیت به‌کارگیری المان‌های ۶ و ۱۵ گره‌ی موجود است، اما به منظور افزایش دقت 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 ساخته‌شده جهت مسئله‌ی مورد تحلیل از مش‌بندی متوسط استفاده شده است.

۲.۱. مدل‌سازی هندسی

مدل‌سازی در یک محیط دوبعدی (شرایط کرنش مسطح) انجام شده است. شکل ۱، مدل هندسی خاکریز قرارگرفته 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 قرارگرفته روی یک لایه ماسه به ضخامت 2 متر است. به علت تقارن، فقط نیمی از هندسه در مدل‌سازی استفاده شده است. ابعاد مربوط به ستون سنگی، خاکریز و فونداسیون بر مبنای ملاحظات کاربردی انتخاب شده‌اند. هندسه‌ی اجزاء مدل مینا 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 پهنای تاج برابر 19 متر و زاویه‌ی شیب شیروانی 2 (افقی) 1 (قائم). در این پژوهش سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده 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 مربوط استفاده شده است. برای بررسی ناحیه‌ی معادل از پارامترهای مربوط 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

و رس نرم استفاده شده و با استفاده از روابط ۳ الی ۸ به دست آمده است: [۲۴-۲۱]

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

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

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

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

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

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

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

برای مدل‌هایی با ستون سنگی معادل، از المان سطح مشترک 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 ملاحظه‌یی در سطح مشترک ستون سنگی و خاک رس به وجود می‌آید. [۱۸] مشخصات مقاومت سطح مشترک وابسته به مشخصات مقاومت لایه‌های خاکی است. مشخصه‌های مقاومتی سطح مشترک با اعمال ضریب کاهش مناسب به داده‌های مقاومتی خاک تعیین شده‌اند. مقدار ضریب کاهش مقاومت برای رس ۰/۷ در نظر گرفته شده است. [۱۸، ۲۱] برای خاک‌های با مقاومت بالا از ضریب کاهش بزرگ‌تری استفاده می‌شود، لذا مقدار این ضریب برای سطوح مشترک ستون سنگی ۰/۹ در نظر گرفته شده است. [۲۵، ۱۸]

۴.۲. تجزیه و تحلیل ضریب اطمینان با استفاده از روش کاهش

مقاومت (Phi-c)

در کاهش Phi-c پارامترهای مقاومت، $\tan \varphi$ و c خاک پی در پی تا وقتی که گسیختگی سازه اتفاق می‌افتد، کاهش داده می‌شود. [۲۵] مقاومت سطح مشترک در صورت منظورکردن، به همین‌گونه کاهش داده می‌شود. مقاومت اجزاء سازه‌یی 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:

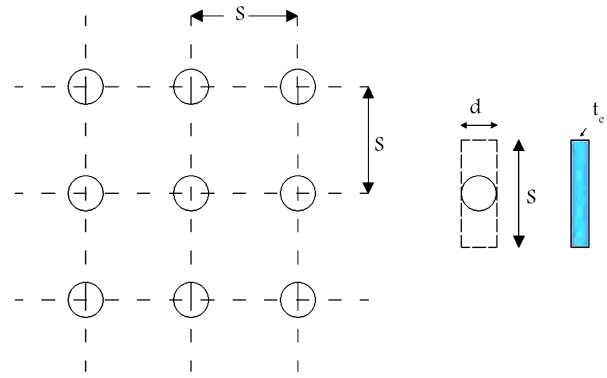
$$\sum Msf = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}} \quad (9)$$

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 ۱۰ به دست می‌آید:

$$SF = \frac{\text{مقاومت قابل حصول}}{\text{مقاومت گسیختگی}} = \sum Msf \text{ در گسیختگی} \quad (10)$$

۳. تحلیل صحت‌سنجی

به منظور بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار، در ابتدا مقایسه‌یی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی یک نمونه‌ی آزمایشگاهی در مطالعات انجام شده، [۲۶] و شبیه‌سازی عددی



شکل ۳. معادل‌سازی ستون‌های سنگی در شرایط کرنش مسطح.

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

پارامتر	ماسه‌ی خاکریز	رس نرم	ستون سنگی	ماسه	ناحیه‌ی معادل
γ_{unsat} (kN/m ³)	۱۹	۱۶	۱۷	۱۸	۱۶/۱۲۵
E (kN/m ²)	۳۰۰۰۰	۱۵۰۰	۳۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۵۶۸۷/۵
v	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳	۰/۳۴۴
c (kN/m ²)	۰	۱۵	۰	۰	۱۳/۱۲۵
φ (°)	۳۷	۰	۳۷	۳۰	۵/۳۸
ψ (°)	۵	۰	۶	۰	۰/۷۵

۲.۲. شرایط مرزی

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.

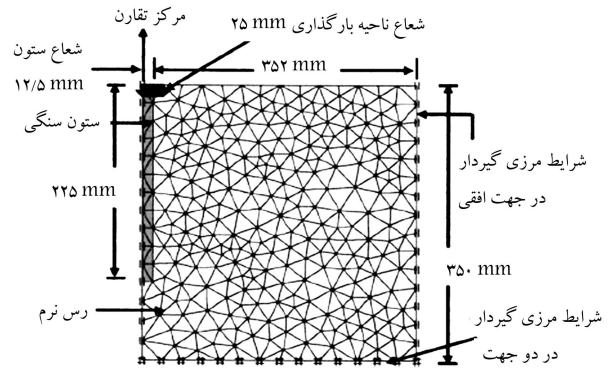
۳.۲. مدل‌سازی و مشخصات مصالح

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 سطوح مختلف پیچیدگی مسئله، قابل مدل‌کردن 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 کشسان‌خمیری کامل به ۵ پارامتر اساسی شامل: مدول کشسانی (E)، نسبت پواسون (ν)، 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 بلافاصله بعد از اجرا، خاک رسی نرم در شرایط بحرانی زهکشی نشده عمل می‌کند. از این رو، 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. ارائه‌ی نتایج

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

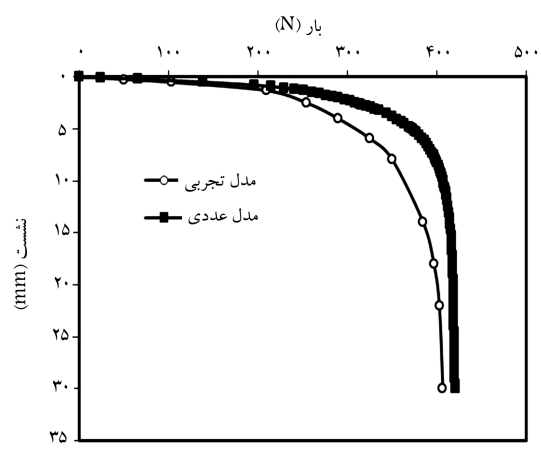


شکل ۴. تصویری از شبیه‌سازی المان محدود مدل آزمایشگاهی

۱.۴. تأثیر قطر ستون سنگی

برای بررسی تأثیر قطر ستون سنگی در FS، ۳ قطر ۱، ۰/۸ و ۱/۲ متر، که معادل ۱۲/۵، ۱۹/۶ و ۲۸/۲ درصد ناحیه‌ی جایگزینی هستند، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نمودار شکل ۶، تأثیر تغییر قطر ستون سنگی در FS برای روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش قطر ستون سنگی مقدار FS خاکریز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از روش ناحیه‌ی معادل، روند مشابهی با روش ستون معادل نشان می‌دهد. با این حال مقادیر FS محاسبه‌شده از روش ناحیه‌ی معادل بزرگ‌تر از روش ستون معادل است. با افزایش قطر ستون سنگی به میزان ۱/۲ متر، FS برای روش‌های ستون معادل و ناحیه‌ی معادل نسبت به مدل مبنا به ترتیب ۱۷٪ و ۱۰٪ افزایش یافته است. همچنین اختلاف مقدار FS مشاهده‌شده برای مدل مبنا در روش‌های تحلیلی مذکور ۱۶/۸٪ است. نتایج مشابهی در تفاوت به وجود آمده در مقادیر FS دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل در مطالعات گذشته ارائه شده است.^[۸] شایان ذکر است که نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی انجام‌گرفته با نتایج به دست‌آمده از روش تعادل حدی در مطالعات پیشین مغایرت دارد.^[۴] به طوری که در پژوهش حاضر، روش ناحیه‌ی معادل ضریب اطمینان بیشتری را نسبت به روش نوار معادل نشان می‌دهد، در حالی که در روش تعادل حدی برعکس است.^[۷] اختلاف نتایج مشاهده‌شده ممکن است به علت اتخاذ سطح لغزش دایره‌ی در تحلیل‌های تعادل حدی در مطالعات انجام‌شده باشد.

شکل ۷، بردار سرعت تغییرشکل شیروانی قرارگرفته روی رس بهسازی‌شده با ستون سنگی را نشان می‌دهد، که مطابق آن و با توجه به مطالب ذکرشده در قسمت‌های قبل، سطح لغزش بحرانی به صورت گسیختگی عمیق روی می‌دهد.

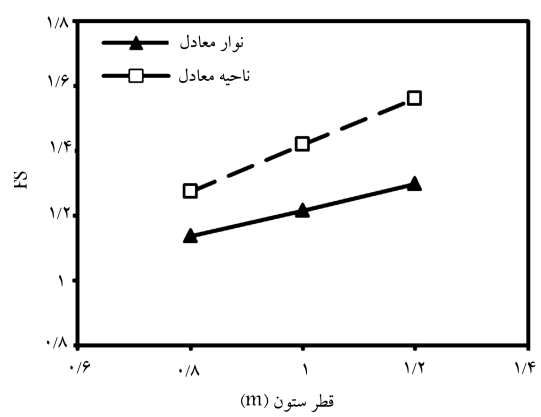


شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی.

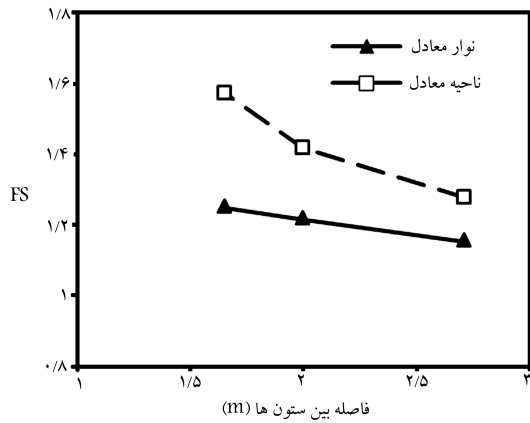
جدول ۲. مشخصات مصالح برای صحت‌سنجی.

پارامتر	رس	ستون سنگی
γ_{unsat} (kN/m ³)	۱۷	۱۹
E (kN/m ²)	۴۰۰۰	۴۵۰۰۰
ν	۰/۴۵	۰/۳
c (kN/m ²)	۲۰	۰
φ (°)	۰	۳۸

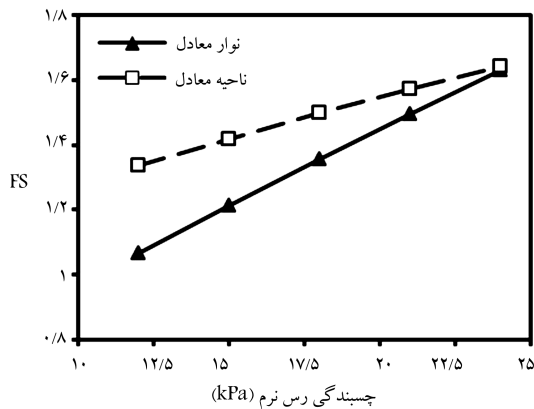
صورت گرفته است. مدل آزمایشگاهی در یک محفظه‌ی استوانه‌یی با قطر ۶۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۵۰ میلی‌متر برای بستر رسی ساخته شده است. ستون سنگی در مرکز بستر رسی با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متر ساخته شده و با استفاده از یک صفحه‌ی صلب با قطری معادل دو برابر قطر ستون سنگی بارگذاری شده است. تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis در شرایط تقارن محوری و با مش‌بندی ریز انجام شده است. همچنین برای مدل‌سازی مصالح از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. شکل ۴، شماتیکی از مدل را نشان می‌دهد. در جدول ۲، مشخصات مدل ارائه شده است. شکل ۵، منحنی بار-نشست مربوط به تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از تحلیل‌های تجربی و عددی تا حد زیادی بر هم منطبق هستند، که این موضوع بیانگر توانایی نرم‌افزار برای شبیه‌سازی مدل رفتاری خاک مسلح به ستون سنگی است.



شکل ۶. تأثیر قطر ستون سنگی در FS.



شکل ۹. تأثیر فاصله بین ستون سنگی در FS.



شکل ۱۰. تأثیر چسبندگی رس نرم در FS.

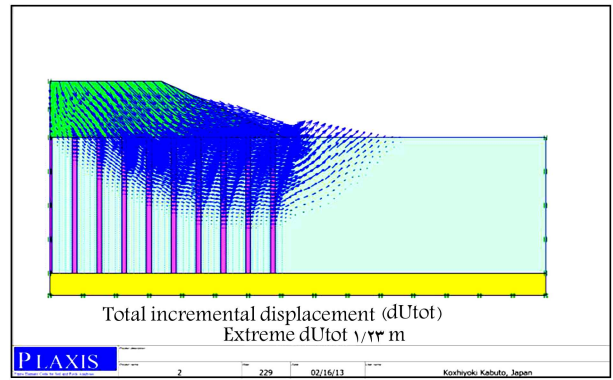
روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب به میزان ۱۲/۸٪ و ۱۷/۹٪ افزایش یافته است.

۳.۴. تأثیر فاصله بین ستون‌های سنگی

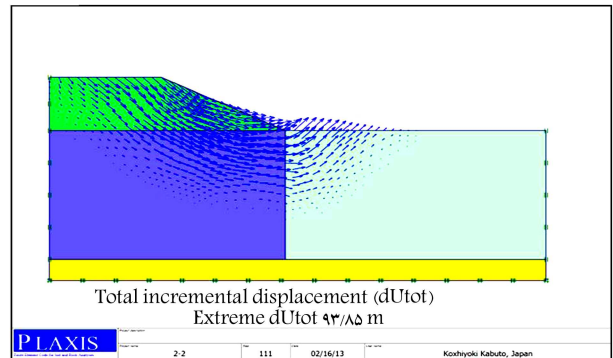
در این بررسی از فواصل ۱٫۶۵، ۲ و ۲٫۷۱ متر بین ستون‌های سنگی که به ترتیب معادل ۱۰/۶۵٪، ۱۹/۶٪ و ۲۸/۸٪ ناحیه‌ی جابه‌جایی است، استفاده شده است. شکل ۹، تأثیر فاصله بین ستون‌ها در مقادیر FS خاکریز قرارگرفته روی رس نرم مسلح را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور با افزایش فاصله بین ستون‌ها، میزان ضریب اطمینان خاکریز کاهش می‌یابد. این نتایج هم در روش نوار معادل و هم در محیط معادل به دست 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 بستر بهسازی شده با ستون سنگی در مطالعات پیشین ارائه شده است. [۲۴] 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، شیب نمودار ملایم‌تر می‌شود.

۴.۴. تأثیر چسبندگی رس نرم

تأثیر چسبندگی زهکشی نشده بستر رس در FS خاکریز در شکل ۱۰ نشان

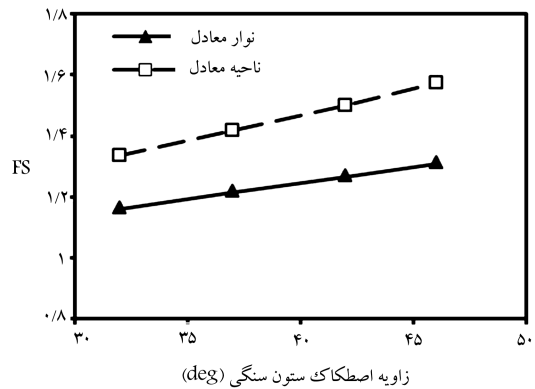


الف) نوار معادل؛



ب) ناحیه معادل.

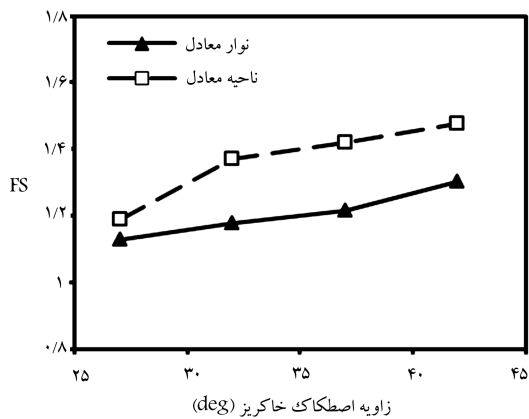
شکل ۷. بردار سرعت تغییر شکل در خاکریز و بستر.



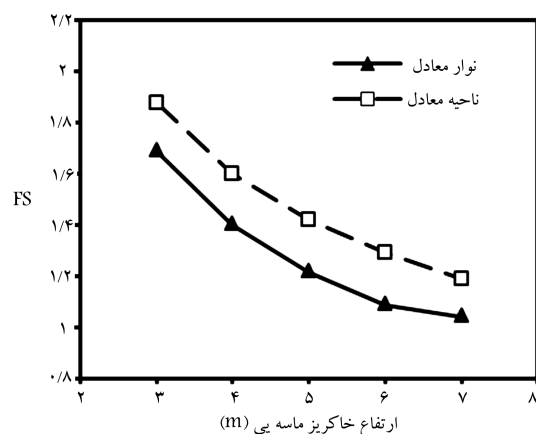
شکل ۸. تأثیر زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی در FS.

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 ۳۲، ۳۷، ۴۲ و ۴۶ درجه مورد استفاده قرار گرفته 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 ذکرشده (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 زاویه‌ی اصطکاک خاکریز ماسه‌یی در FS.



شکل ۱۱. تأثیر ارتفاع خاکریز ماسه‌یی در FS.

۷.۴. 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 متداول‌تر است. همان‌طور که از نتایج ارائه‌شده 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 از یک 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_{ea}) تعریف 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:

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

۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار به بررسی پایداری شیروانی روی رس نرم مسلح به ستون سنگی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis با دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل پرداخته شده است. در روش نوار معادل، ستون‌های سنگی با آرایش مربعی به صورت نوار در محیط دو بُعدی مدل‌سازی شده‌اند. همچنین در روش ناحیه‌ی معادل، براساس درصد ناحیه‌ی جایگزین، یک محیط همگنی با استفاده از روابط ارائه‌شده برای ستون سنگی و رس نرم مدل‌سازی انجام شده است، و تأثیر پارامترهایی نظیر: قطر ستون سنگی، زاویه‌ی اصطکاک ستون سنگی، فاصله‌ی بین ستون سنگی، چسبندگی خاک رسی، ارتفاع خاکریز، و زاویه‌ی اصطکاک در ضریب اطمینان خاکریز تحلیل و بررسی شده‌اند. در اینجا نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی انجام‌شده به طور خلاصه ارائه شده است:

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

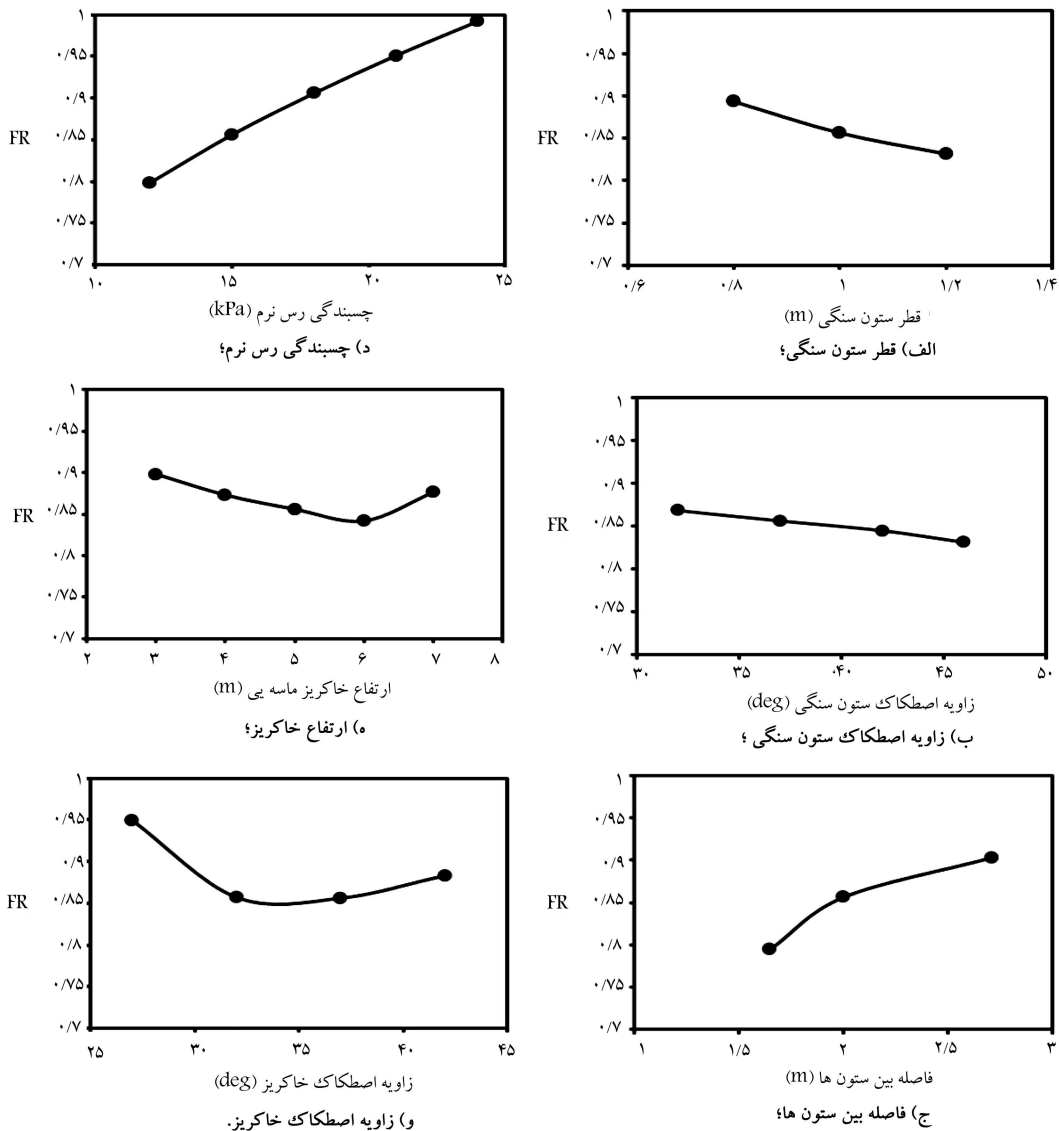
داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش چسبندگی خاک رسی نرم، مقدار FS خاکریز قرارگرفته بر ستون سنگی افزایش می‌یابد. مقادیر FS برای ناحیه‌ی معادل بیشتر از نوار معادل است. به طوری که با افزایش چسبندگی رس نرم از ۱۲ kPa به ۲۴ kPa، مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب ۵۲٫۸٪ و ۲۳٪ افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در تحقیقات هان و همکاران در سال ۲۰۰۴^[۲۷] 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، نزدیک شدن سطح گسیختگی مربوط به دو روش به یکدیگر است، به طوری که سطح لغزش به تراز سطح بستر مسلح به ستون سنگی نزدیک می‌شود.

۵.۴. تأثیر ارتفاع خاکریز ماسه‌یی

شکل ۱۱، تأثیر ارتفاع خاکریز ماسه‌یی قرارگرفته روی رس نرم مسلح به ستون سنگی برای دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل را نشان می‌دهد. برای این بررسی از خاکریز ماسه‌یی با ارتفاع‌های ۳ تا ۷ متر استفاده شده است. با توجه به شکل مذکور، با افزایش ارتفاع خاکریز ماسه‌یی مقدار FS کاهش یافته است. این روند برای هر دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به دست آمده 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 مبنا، مقدار FS برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب ۱۴٫۲٪ و ۱۶٫۱٪ کاهش می‌یابد.

۶.۴. تأثیر زاویه‌ی اصطکاک خاکریز ماسه‌یی

تأثیر زاویه‌ی اصطکاک خاکریز ماسه‌یی بدون چسبندگی قرارگرفته روی رس نرم مسلح به ستون سنگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاکریز ماسه یا بهبود کیفیت خاکریز ماسه‌یی، 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 زاویه‌ی اصطکاک خاکریز ماسه‌یی 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 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.

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 رسی به میزان ۲۴ kPa، FS نسبت به مدل مینا برای روش‌های نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به ترتیب به میزان ۳۴٫۲ و ۱۵٫۸ درصد افزایش یافته است.

۵. با توجه به اینکه نتایج حاصل از ناحیه‌ی معادل بیشتر از نوار معادل است، از این رو یک ضریب کاهش معرفی شده است. ضریب کاهش برای کل پارامترهای بررسی شده در محدوده‌ی ۰٫۷۴ تا ۰٫۹۹ قرار گرفته است. از آنجایی که برای طراحی، روش ناحیه‌ی معادل نسبت به نوار معادل متداول تر است، از این رو توصیه می‌شود مقدار ضریب اطمینان با استفاده از روش ناحیه‌ی معادل با ضریب کاهش معرفی شده تعدیل یابد.

ستون‌ها مقدار ضریب اطمینان کاهش یافته است. به طوری که 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 یافته است.

۲. با افزایش چسبندگی زهکشی نشده‌ی خاک رسی نرم فونداسیون، ضریب اطمینان افزایش یافته است؛ که این بهبود ضریب اطمینان برای هر دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به دست آمده است. همچنین با افزایش چسبندگی، ضریب اطمینان به دست آمده از دو روش نوار معادل و ناحیه‌ی معادل به یکدیگر نزدیک تر شده است. از جمله دلایل این نتیجه، نزدیک شدن سطح گسیختگی 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 ماسه‌بی قرارگرفته روی رس نرم مسلح به ستون سنگی، ضریب اطمینان کاهش یافته است. با افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاکریز ماسه‌بی، ضریب اطمینان شیروانی افزایش یافته است. از این رو با افزایش زاویه‌ی اصطکاک

پانوشت

1. load advancement number of steps

(References) منابع

1. 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).
2. Cheng, Y.M. and Lau, C.K., *Slope Stability Analysis and Stabilization*, New Method sand Insight, Routledge, UK (2008).
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. Christoulas, S., Giannaros, C. and Tsiambaos, G. "Stabilization of embankment foundations by using stone columns", *Geotechnical and Geological Engineering*, **15**(3), pp. 247-258 (1997).
8. 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).
9. Priebe, H.J. "The design of vibro replacement", *Ground Engineering*, **28**, pp. 31-37 (1995).
10. Poorooshasb, H.B. and Meyerhof, G.G. "Analysis of behavior of stone columns and lime columns", *Comput. Geotech.*, **20**(1), pp. 47-70 (1996).
11. 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).
12. 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).
13. 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).
14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. 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).
18. 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).
19. 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).
20. 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).
21. 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).
22. Christoulas, S.T., Bouckovalas, G. and Giannaros, C.H. "An experimental study on model stone columns", *Soil Found*, **40**(6), pp. 11-22 (2000).
23. 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).
24. Choobbasti, 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).
25. Brinkgreve, R.B. and Vermeer, P.A., *Plaxis-Finite Element Code for Soil and Rocks Analysis*, Version 8, Rotterdam Brookfield: AA. Balkema (1998).
26. 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).
27. 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).