

تحلیل استاتیکی و شبه دینامیکی تاثیر ستون های سنگی در پایداری شیب خاکی واقع بر خاک رسی نرم

محمد حاجی عزیزی^۱ و محمود رحمانی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: ستون های سنگی، ضریب اطمینان خاکریز، تقویت خاک رس نرم، روش تفاضل محدود، روش تعادل حدی.</p>	<p>در این مقاله روش های تفاضل محدود و تعادل حدی جهت تعیین ضریب اطمینان یک خاکریز واقع بر خاک رس نرم مورد استفاده قرار گرفته است به طوری که خاک رس نرم توسط ستون های سنگی تقویت شده است. افزایش ظرفیت باربری خاک رس همراه با تقویت آن توسط ستون های سنگی، بدیهی است اما تاثیر آن بر ضریب اطمینان خاکریز واقع بر آن موضوع جدیدی است که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. در واقع با اصلاح خاک رسی نرم توسط ستون های سنگی نه تنها ظرفیت باربری آن بهبود پیدا می کند بلکه می توان خاکریزی بر روی آن احداث کرد که ضریب اطمینان آن در مقابل لغزش های عمیق افزایش می یابد. در این مقاله تغییرات تعداد ستون های سنگی، ضخامت ستون های سنگی و فاصله ی ستون های سنگی از یکدیگر در حالت های استاتیکی و شبه دینامیکی در نظر گرفته شده است. نتایج هر یک از حالت ها در نمودار های مجزایی ترسیم شده است که می تواند برای پروژه های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. خاک رس، اشباع در نظر گرفته شده است و طراحی ستون های سنگی در خاک رس، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری خاک رس، موجب بهبود ضریب اطمینان در خاکریز واقع بر آن می شود. تقویت خاک رس نرم با استفاده از ستون سنگی و به دنبال آن افزایش ضریب اطمینان خاکریز واقع بر آن، از راههای مطمئن و اقتصادی است که نتایج حاصل از تحلیل انجام شده، تایید کننده ی آن است. نتایج حاصل شده از دو روش تفاضل محدود و تعادل حدی، نتایج قابل قبولی می دهند که تایید کننده ی یکدیگر نیز هستند.</p>

۱- مقدمه

توان با استفاده از روش های تعادل حدی، تحلیل حدی، اجزای محدود و تفاضل محدود انجام داد [۱-۲] در یک دهه ی گذشته روش تفاضل محدود به طور وسیعی در تحلیل پایداری شیب ها به منظور محاسبه ی ضریب اطمینان مورد استفاده قرار گرفته است [۳-۱۷].

بررسی پایداری شیب های خاکی از مسائل مهم و روزمره ی مهندسیین ژئوتکنیک است. تحلیل پایداری شیب ها را می

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m_rahmani_sem797@yahoo.com

۱. عضو هیات علمی دانشگاه رازی، دانشکده مهندسی، گروه عمران

۲. عضو هیات علمی دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی عمران

بحرانی، در نزدیکی پای شیروانی اتفاق می افتد [۱۰] اما باید این واقیت را نیز متذکر شد که امکان ایجاد سطح لغزش بحرانی در غیر پای شیروانی نیز وجود دارد که می تواند قبل از پای شیروانی و یا بعد از پای شیروانی باشد که به ترتیب به آن ها سطح لغزش مقطعی و سطح لغزش عمیق می گوئیم. به منظور جلوگیری از ایجاد سطح لغزش عمیق، روش های متعددی پیشنهاد شده است از قبیل، شمع های متراکم شده ی ماسه ای، ستون های سنگی و ستون های ترکیبی عمیق [۲۰]. معمولا از روش ستون های سنگی برای جلوگیری از لغزش های عمیق استفاده می شود [۲۱-۲۹]. در اوایل سال ۱۹۶۰، روش ستون سنگی در کشور های اروپایی استفاده گردید و پس از آن نیز در دیگر کشور ها به منظور افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و افزایش سرعت تحکیم متداول شد [۳۰-۳۱]. در واقع ستون سنگی با افزایش سختی و مقاومت برشی توده ی خاک موجب تقویت زمین می شود.

که توسط محققین مختلف مورد توجه قرار گرفته است [۳۲-۳۶]. همچنین ستون سنگی دارای مقاومت بیشتری نسبت به شمع های متراکم شده ی ماسه ای است، علت آن نیز به تفاوت بین شن و ماسه بر می گردد [۲۰]. تحلیل پایداری خاکریز واقع بر ستونهای ترکیبی عمیق توسط هان و همکارانش [۱۳] مورد توجه قرار گرفته است. آمبیلی و گاندهی [۳۷] با توجه به سختی ستون سنگی و انتقال بارگذاری بین ستون سنگی و خاک اطراف آن بحرانی ترین سطح لغزش را برای خاکریز واقع بر آن به دست آوردند. کریستولاس و همکارانش [۲۸] پایداری یک خاکریز واقع بر ستون سنگی را با استفاده از روش تعادل حدی و سطح لغزش دایره ای بررسی کردند. همچنین هان و همکارانش [۱۳] سطح لغزش بحرانی غیر دایره ای را برای شالوده ی واقع بر ستون های ترکیبی عمیق مورد تحلیل و بررسی قرار دادند.

داوسون و همکارانش [۱۸] نشان دادند که مقادیر ضریب اطمینان برای یک شیب خاکی غیر مسلح با استفاده از روش تفاضل محدود و روش تعادل حدی برای سطح لغزش اسپیرال لگاریتمی، تطابق خوبی با یکدیگر دارند. هان و همکارانش [۵] نیز روش تفاضل محدود را جهت محاسبه ی ضریب اطمینان برای شیب های غیر مسلح و مسلح (با ژئوسنتتیک) به کار بردند. هان و لشچینسکی [۹] نیز نتایج مشابهی برای تحلیل پایداری دیوار خاکی با استفاده از روش تفاضل محدود به دست آوردند.

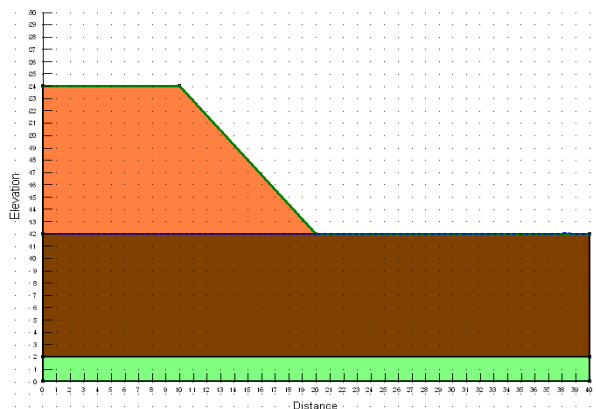
روش تفاضل محدود یکی از قدیمی ترین روش های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل است. در روش تفاضل محدود هر جمله ی مشتق در معادله ی دیفرانسیل به یک عبارت جبری با همان متغیر در معادله ی دیفرانسیل، تبدیل می شود. بعضی از محاسن روش تفاضل محدود صریح^۱ عبارتند از [۱۹]: (۱) تلاش محاسباتی کم در هر گام زمانی، (۲) عدم تکرار برای دنبال کردن قانون مشخصه ی غیرخطی، (۳) دنبال کردن مسیر واقعی فیزیکی در فرایند محاسبات غیر خطی، (۴) عدم تشکیل ماتریس سختی کل و در نتیجه نیاز به حافظه ی کمتر، (۵) ارزیابی تغییرمکان ها و کرنش های بزرگ با تلاش محاسباتی نه چندان زیاد. روش تفاضل محدود نسبت به روش تعادل حدی دارای مزایایی است که می توان به ترتیب زیر بر شمرد [۴ و ۱۸]: (۱) عدم نیاز به آزمون و خطا برای یافتن بحرانی ترین سطح لغزش، (۲) عدم نیاز به فرضیات مختلف در یک قطعه از سطح لغزش برای کاستن تعداد مجهولات نسبت به تعداد معادلات، (۳) شبیه سازی بهتر مسلح کننده ها در شیب خاکی، از قبیل انکر^۲، نیل^۳ و ژئوگرید^۴ و (۴) ایجاد سطح لغزش نزدیک به چه که در واقعیت اتفاق می افتد. اغلب سطوح لغزش

¹. Explicit Finite Difference

². Anchor

³. Nail

⁴. Geogrid



شکل ۱- خاکریز واقع بر خاک رس نرم

۲-۲- شبکه بندی و شرایط مرزی

در شکل ۲ شبکه بندی تفاضل محدود برای سه لایه ی خاکریز، رس و ماسه مشاهده می گردد که المان ها به شکل چهار ضلعی انتخاب شده است. المان چهار ضلعی از چهار گره تشکیل شده است که برای حل مجهولات از روش تفاضل محدود صریح استفاده شده است. بر خلاف روش اجزای محدود که تابع شکل برای هر المان تشکیل می دهد، در روش تفاضل محدود صریح تابع شکل تشکیل نمی گردد بلکه بر اساس رابطه ی تیلور یک رابطه ی تقریبی برای هر مرتبه ی معادلات دیفرانسیل که مربوط به گره های المان هاست، در نظر گرفته می شود. با تشکیل معادلات که تعداد آن برابر با تعداد مجهولات است، مجهول مورد نظر برای هر گره از المان چهار ضلعی بدست می آید.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاکریز، رس، ماسه و ستون سنگی

ستون سنگی	لایه ماسه	لایه ی رس	خاکریز	
۱۷	۱۸	۱۷	۱۸	وزن مخصوص kN/m ³
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	پوکی
۰	۰	۲۰	۰	چسبندگی kPa
۳۸	۳۰	۰	۳۲	زاویه اصطکاک(درجه)

در این مقاله با استفاده از دو روش تفاضل محدود (نرم افزار (FLAC/Slope V.5) و تعادل حدی (SLOPE/W 2007) مقدار ضریب اطمینان برای خاکریز واقع بر خاک رس نرم در حالت استاتیک و شبه دینامیک بررسی می گردد. سپس خاک رس نرم به کمک ستون سنگی تقویت می شود و ضریب اطمینان جدید خاکریز نیز حاصل می گردد که بیشتر از حالت تقویت نشده ی خاک رس است. ستون های سنگی، دارای تعداد، فاصله و ضخامت های مختلفی هستند. تمام موارد فوق در دو حالت استاتیکی و شبه دینامیکی مورد تحلیل قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج تحلیل های مختلف در تعدادی نمودار، برای موارد فوق ترسیم شده است که می تواند برای پروژه های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به دست آمده از دو روش تفاضل محدود و تعادل حدی قابل قبول و تایید کننده ی یکدیگر هستند. هر چند مقادیر ضریب اطمینان به دست در روش تفاضل محدود بیشتر از روش تعادل حدی است.

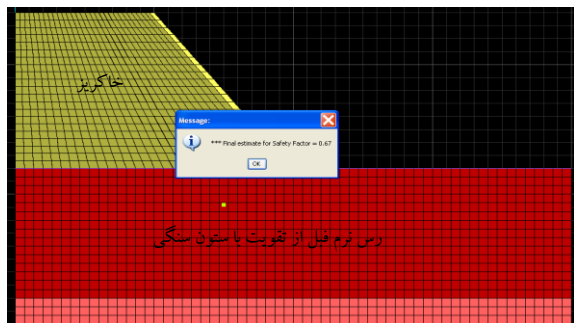
۲- روش تفاضل محدود برای تحلیل پایداری خاکریز

۲-۱- معرفی مساله

شکل ۱ یک خاکریز به ارتفاع ۱۲ متر را نشان می دهد که بر روی یک لایه ی رس نرم به ضخامت ۱۰ متر واقع شده است. لایه ی رسی نیز بر روی یک لایه ی ماسه ای به ضخامت ۲ متر قرار گرفته است. تراز آب زیر زمینی، لایه های رس و ماسه را در بر گرفته است، در نتیجه خاک رس اشباع است. با توجه به متقارن بودن خاکریز و لایه های رس و ماسه، نیمی از مساله در شکل ۱ مشاهده می گردد. مشخصات فیزیکی خاک ها در جدول ۱ آمده است.

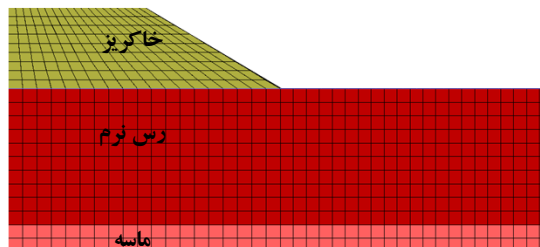
۲-۴- محاسبه ی ضریب اطمینان در حالت استاتیک

در این بخش، مقدار ضریب اطمینان برای خاکریز در شرایط مختلف ستون سنگی برای حالت استاتیکی به کمک برنامه ی FLAC/Slope نگارش پنجم، محاسبه می گردد که یک برنامه ی تفاضل محدود با استفاده از روش لاگرانژین است. شکل ۳ شبکه ی تفاضل محدود خاکریز و خاک رسی را قبل از تقویت با ستون سنگی نشان می دهد. این تحلیل در حالت استاتیکی ضریب اطمینان برابر با ۰/۶۷ می دهد. در نظر گرفتن ستون سنگی در لایه ی رسی موجب افزایش ضریب اطمینان می گردد که در ادامه، نتایج حاصل از این تحلیل خواهد آمد. شکل ۴ میدان بردار سرعت در المان های خاکریز و رس را نشان می دهد. این شکل نتیجه ی حاصل از تحلیل پایداری شبکه ی شکل ۳ است که ضریب اطمینان ۰/۶۷ را بدست آورده است. شکل ۵ خاکریز واقع بر خاک رسی را نشان میدهد که با ۵ ستون سنگی به ضخامت ۴۰ سانتی متر و با فواصل ۴ متر از یکدیگر مسلح شده است. شکل ۶ نیز میدان بردار سرعت را نشان می دهد که در آن ضریب اطمینان معادل با ۰/۷۹ بدست آمده است.



شکل ۳- تحلیل استاتیکی خاکریز واقع بر خاک رسی قبل از تقویت با ستون سنگی (FS=۰/۶۷)

جابجایی مرزهای قائم در طرف راست و چپ شکل، تنها در جهت محور X بسته شده است و در جهت محور Y آزاد هستند. جابجایی مرز افقی پایین، در هر دو جهت X و Y بسته شده است تا مدل در نظر گرفته شده در شکل ۲ شبیه به مدل واقعی در طبیعت باشد.



شکل ۲- شبکه بندی تفاضل محدود به شکل چهار ضلعی برای خاکریز، رس و ماسه

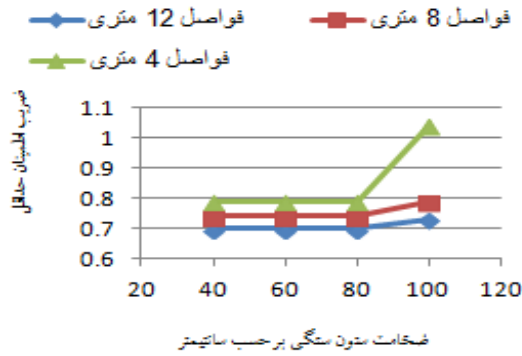
۲-۳- تحلیل شبه دینامیک

در تحلیل استاتیکی هیچ نیروی افقی به توده ی خاک اعمال نمی شود بلکه تنها نیروی جاذبه ی زمین است که به توده ی خاک اعمال می گردد. اما در تحلیل شبه دینامیک علاوه بر نیروی جاذبه ی زمین، یک نیروی افقی نیز به توده ی خاک اعمال می گردد. مقدار نیروی افقی بر حسب ضریبی از وزن توده ی خاک در نظر گرفته می شود (kW) که مقدار k به منطقه ی مورد مطالعه بستگی دارد و معمولا بین ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ است.

به منظور تحلیل شبه دینامیکی خاکریز در روش تفاضل محدود، شتاب افقی ۰/۲g در نظر گرفته شده است. اعمال این شتاب افقی در برنامه ی FLAC/Slope با دادن زاویه ی ۱۱/۳۱ درجه و مقدار $g/1.04$ به تنظیمات مربوط به شتاب قفل امکان پذیر است. در روابط (۱) و (۲) چگونگی محاسبه ی مقادیر زاویه و شتاب آمده است.

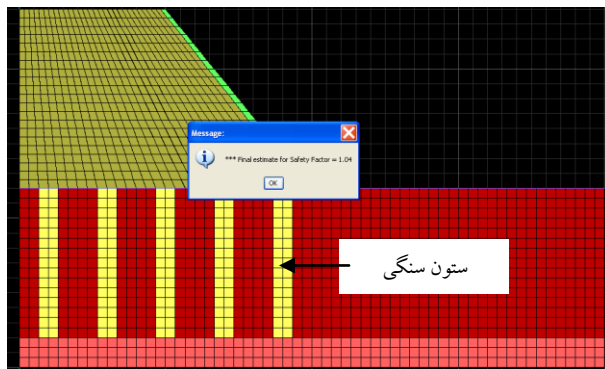
$$R = \sqrt{g^2 + 0.2g^2} = 1.04g \quad (1)$$

$$\tan \alpha = \frac{0.2g}{g} \rightarrow \alpha = 11.31^\circ \quad (2)$$



شکل ۷- مقادیر ضریب اطمینان برای خاکریز واقع بر رس تقویت شده با ستون سنگی به ضخامت و فواصل مختلف

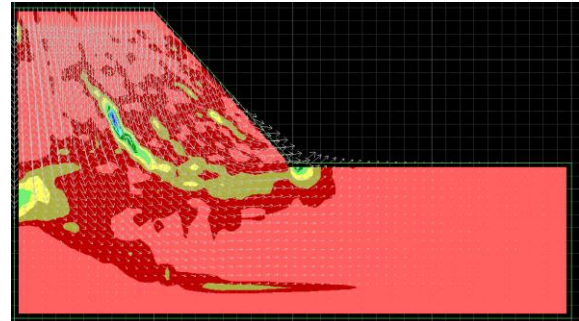
شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ستون‌های سنگی مقدار ضریب اطمینان نیز افزایش می‌یابد به طوری که برای ستون‌های سنگی به ضخامت ۱ متر، ضریب اطمینان خاکریز به $1/0.4$ افزایش می‌یابد. این شبکه و ستون‌های سنگی در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۸ پنج ستون سنگی به ضخامت یک متر و به فواصل ۴ متر را نشان می‌دهد که ضریب اطمینان حاصل از این تحلیل برابر با $1/0.4$ بدست آمده است.



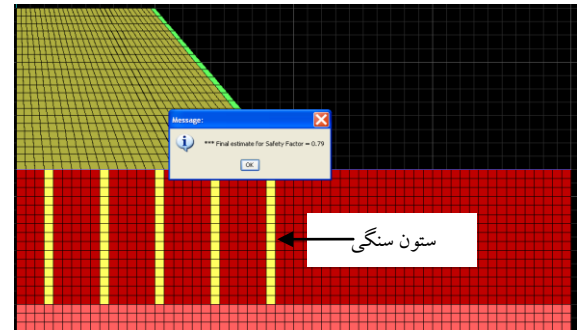
شکل ۸- تحلیل استاتیکی خاکریز واقع بر رس تقویت شده با ۵ ستون سنگی به ضخامت ۱ متر ($FS=1/0.4$)

۵-۲- محاسبه ی ضریب اطمینان در حالت شبه دینامیک

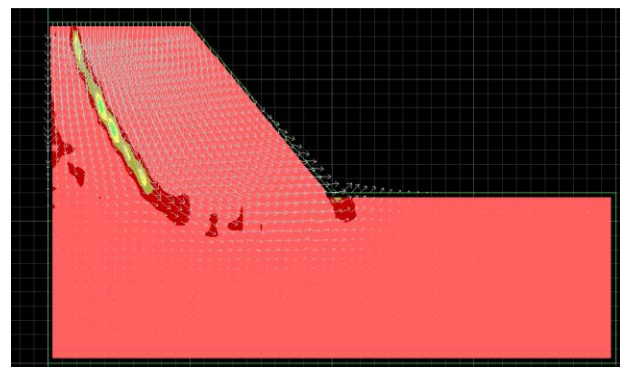
شکل ۹ تغییرات ضریب اطمینان در مقابل تغییرات ضخامت ستون سنگی در حالت شبه دینامیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- میدان بردار سرعت ناشی از تحلیل پایداری شیب



شکل ۵- تحلیل استاتیکی خاکریز واقع بر رس تقویت شده با ۵ ستون سنگی ($FS=0.79$)



شکل ۶- میدان بردار سرعت برای خاکریز و رس تقویت شده با ۵ ستون سنگی به فواصل ۴ متر و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر

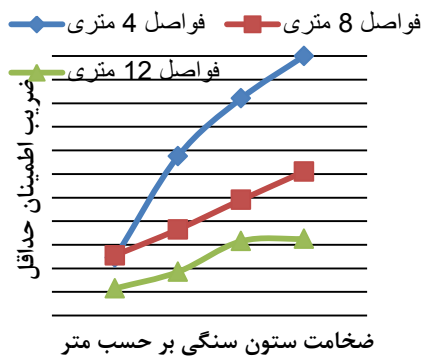
این تحلیل برای ستون‌های سنگی به ضخامت و فواصل مختلف نیز انجام شده است که نتایج آن در شکل ۷ مشاهده می‌گردد.

جدول ۲- در نظر گرفتن نوع تعادل در روش های مختلف تعادل

حدی		
روش	ارضای تعادل	ارضای تعادل
فلنیوس	لنگر	نیرو
پیشاپ ساده شده	آری	خیر
یانبو ساده شده	آری	خیر
اسپنسر	آری	آری
مورگنشترن-پرایس	آری	آری
گروه مهندسين ارتش آمریکا ۱	خیر	آری
گروه مهندسين ارتش آمریکا ۲	خیر	آری
یانبو تعمیم داده شده	آری	آری
سارما (قطعات قائم)	آری	آری

در بین روش های موجود، روش اسپنسر از روش هایی است که هر دو شرایط تعادل لنگر و نیرو در آن ارضا شده است. بنابراین در این مقاله از روش اسپنسر جهت محاسبه ی ضریب اطمینان استفاده می شود.

برای ستون های سنگی ضخامت های ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است و نتایج حاصل از تحلیل پایداری به روش تعادل حدی در شکل ۱۰ آمده است. شکل ۱۰ نشان می دهد که با افزایش ضخامت ستون های سنگی، مقدار ضریب اطمینان افزایش می یابد. بیشترین مقدار ضریب اطمینان برای ستون های سنگی به ضخامت ۱۰۰ سانت حاصل شده است که فواصل مرکز به مرکز آن ها ۴ متر است.

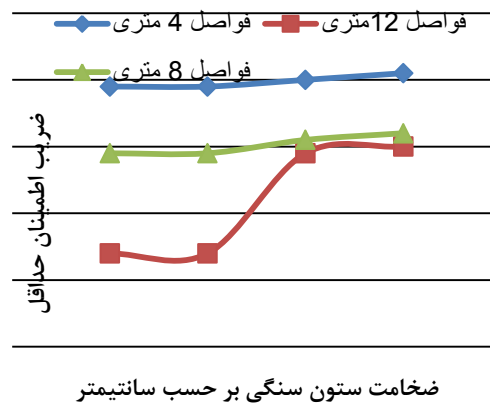


شکل ۱۰- مقادیر ضریب اطمینان برای خاکریز واقع بر رس تقویت شده با ستون سنگی با ضخامت های مختلف

فواصل ستون های سنگی از مرکز به مرکز ستون برابر با ۴ و ۸ و ۱۲ متر در نظر گرفته شده است. بیشترین مقدار ضریب اطمینان برای ستون سنگی به ضخامت ۱۰۰ سانتیمتر و فواصل ۴ متری بدست آمده است که برابر با ۰/۵۱ است.

۳- روش تعادل حدی برای تحلیل پایداری خاکریز

جهت محاسبه ی ضریب اطمینان با استفاده از روش تعادل حدی، حتی المقدور باید از روابطی استفاده نماییم که علاوه بر در نظر گرفتن تعادل نیرو، تعادل لنگر را نیز در نظر بگیرد. جدول ۲ وضعیت در نظر گرفتن نوع تعادل، جهت محاسبه ی ضریب اطمینان به کمک روش های مختلف تعادل حدی را نشان می دهد.



شکل ۹- مقادیر ضریب اطمینان برای خاکریز واقع بر رس تقویت شده با ستون سنگی به ضخامت و فواصل مختلف در حالت شبه دینامیکی

۴- تحلیل نتایج

۴-۲- ضخامت ستون های سنگی

افزایش ضخامت ستون های سنگی علاوه بر افزایش ظرفیت باربری خاک رسی، تاثیر قابل توجهی در افزایش مقدار ضریب اطمینان خاکریز دارد. کلیه ی نمودار های حاصل شده نشان می دهند که با افزایش ضخامت ستون سنگی به اندازه ی ۲۰ سانتیمتر در هر مرحله از تحلیل، مقدار ضریب اطمینان بهتر

شده است (شکل ۱۱). به عنوان مثال در تحلیل تفاضل محدود با ستون های سنگی به ضخامت ۸۰ سانت و فواصل ۴ متری مقدار ضریب اطمینان برابر ۰/۸۱ است که نشانه ی ناپایداری خاکریز است و اگر این ضخامت به ۱۰۰ سانت افزایش یابد مقدار ضریب اطمینان به ۱/۰۴ افزایش می یابد که کمی بیش از حالت بحرانی عدد ۱ است. مقایسه ی روش تفاضل محدود و تعادل حدی نشان می دهد که در شرایط مساوی از ضخامت ستون های سنگی، مقادیر ضریب اطمینان در روش تفاضل محدود بیشتر از روش تعادل حدی است.

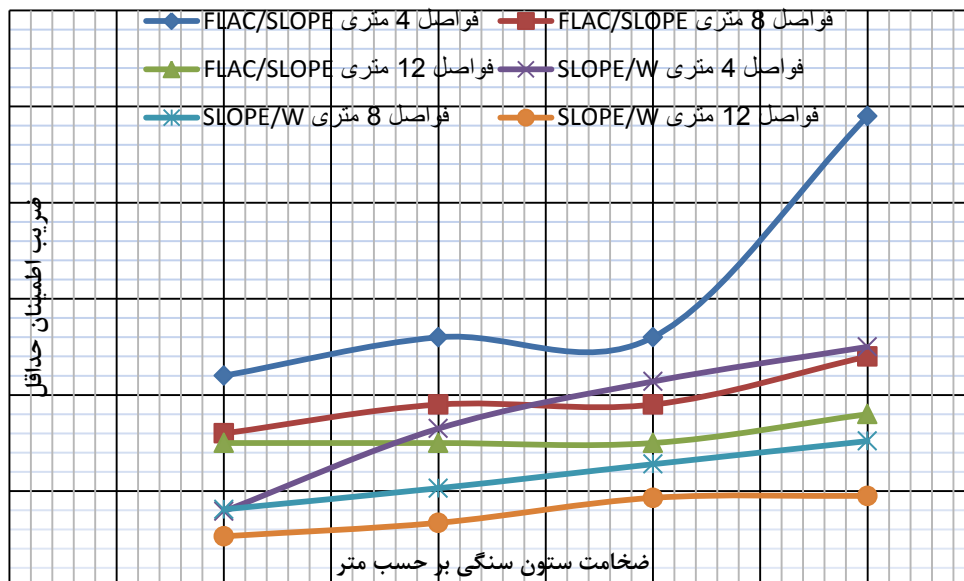
۴-۳- فواصل ستون ها ی سنگی

کاهش فواصل ستون های سنگی علاوه بر افزایش ظرفیت باربری خاک رسی، تاثیر قابل توجهی در افزایش مقدار ضریب اطمینان خاکریز دارد. این موضوع به وضوح در شکل ۱۱ مشاهده می گردد. نمودارهایی که فواصل ستون ها ی سنگی آن ها کمتر است در تراز بالاتری از ضریب اطمینان قرار می گیرند. مقایسه ی روش تفاضل محدود و تعادل حدی نشان می دهد که در شرایط مساوی از فواصل ستون های سنگی، مقادیر ضریب اطمینان در روش تفاضل محدود بیشتر از روش تعادل حدی است.

در این مقاله یک خاکریز که بر روی رس نرم واقع شده است، مورد تحلیل و آنالیز پایداری قرار گرفته است. خاک رس نرم در مقابل بار ناشی از خاکریز، علاوه بر این که دارای ظرفیت باربری کمی است، می تواند موجب ناپایداری شیب نیز گردد. یکی از راههای موثر جهت افزایش باربری خاک رس نرم و افزایش ضریب اطمینان خاکریز، استفاده از ستون سنگی در خاک رس نرم است. ستون های سنگی با ضخامت ها و فواصل مرکز به مرکز مختلف در خاک رس مورد استفاده قرار گرفته اند که هر یک موجب افزایش ظرفیت باربری در خاک رسی و ضریب اطمینان در خاکریز گردیده است.

۴-۱- سطح لغزش بحرانی

منظور از سطح لغزش بحرانی، سطح لغزشی است که کمترین ضریب اطمینان را دارد. همان گونه که در شکل ۳ مشاهده گردید بحرانی ترین سطح لغزش برای حالت بدون ستون سنگی دارای ضریب اطمینانی معادل با ۰/۶۷ است. استفاده از ستون سنگی در خاک رس موجب گردید که مقدار ضریب اطمینان افزایش یابد و علاوه بر آن، مکان سطح لغزش بحرانی نیز مقداری جابجا گردد. در تحلیل حاصل از تعادل حدی، شکل سطح لغزش لزوما دایره ای است هر چند که سطح لغزش دایره ای نمی تواند سطح لغزش مناسبی برای تمامی خاکریزها باشد. اما در تحلیل حاصل از تفاضل محدود، شکل سطح لغزش لزوما دایره ای نیست. بنابراین تحلیل پایداری شیب ها توسط برنامه هایی که سطح لغزش در نظر گرفته شده در آن ها غیر دایره ای است، اولویت دارد.



شکل ۱۱- مقایسه‌ی مقادیر ضریب اطمینان برای فواصل و ضخامت های مختلف ستون سنگی با روش های تفاضل محدود و تعادل حدی اسپنسر

۵- نتیجه گیری

افزایش ظرفیت باربری خاک های رسی نرم که توسط ستون- های سنگی، تقویت شده اند امری بدیهی است، اما بهبود ضریب اطمینان شیب خاکی واقع بر خاک رسی نرم از موضوعات جدیدی است که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل را می توان به ترتیب زیر دسته بندی نمود:

- ۱- با افزایش ضخامت ستون ها مقدار ضریب اطمینان خاکریز افزایش می یابد.
- ۲- مدل سازی ریپ ریپ در خاکریز موجب افزایش مقدار ضریب اطمینان می گردد.
- ۳- افزایش فاصله مرکز به مرکز ستونها باعث می شود که ضخامت ستون ها تاثیر چندانی روی ضریب اطمینان خاکریز نداشته باشد.
- ۴- نتایج نشان می دهند که تاثیر فاصله ستونهای سنگی از یکدیگر به مراتب بیشتر از ضخامت ستونهای شنی در مقدار ضریب اطمینان است.
- ۵- واضح است که مقدار ضریب اطمینان در حالت استاتیکی پیش از حالت شبه دینامیکی است و این نتیجه در نمودارهای حاصل نیز مشاهده گردیده است.

- ۶- در روش تفاضل محدود، تعداد المان های موجود در خاکریز و لاسه ی رس تاثیر مستقیم روی نتایج دارد و باعث افزایش و یا کاهش ضریب اطمینان می شود.
- ۷- نتایج نشان می دهند که مقدار ضریب اطمینان خاکریز در اثر تقویت خاک رس به کمک ستون های شنی افزایش می یابد و این مقدار برای فواصل کمتر ستون های شنی چشمگیر تر است.
- ۸- نتایج نشان می دهند که با کاهش فاصله ی ستونهای شنی مقدار ضریب اطمینان افزایش می یابد به طوری که این مقدار در ستون های شنی با فواصل ۴ متر تا ۵۵٪ افزایش می یابد.
- ۹- مقادیر ضریب اطمینان حاصل از روش تعادل حدی کمتر از روش تفاضل محدود است. این نتیجه را می توان به دلیل در نظر گرفتن تعادل نقطه ای در روش تفاضل محدود و حل معادلات به کمک روش های دقیق تر دانست.
- ۱۰- نتایج حاصل از این تحقیق تنها قابل کاربرد در مسایل دویبعدی است. بمنظور بررسی در حالت سه بعدی تحقیقات بیشتری باید صورت گیرد.

۶- مراجع

- [1] Han, J., Leshchinsky, D. (2006). "Stability analyses of geosynthetic-reinforced earth structures using limit equilibrium and numerical methods". Proceedings of the 8th International Geosynthetics Conference, 18–22 September, Yokohama, Japan, pp. 1347–1350.
- [2] Cheng, Y.M., Lau, C.K. (2008). "Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight". Routledge, UK.
- [3] Dawson, E.M., Roth, W.H., Drescher, A. (1999). "Slope stability analysis by strength reduction". *Geotechnique*, 49 (6), pp. 835–840.
- [4] Cala, M., Flisiak, J. (2001). "Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods". In: Bilaux, Rachez, Detournay, Hart (Eds.), *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics*, A.A. Balkema Publishers, pp. 111–114.
- [5] Han, J., Leshchinsky, D., Shao, Y. (2002). "Influence of tensile stiffness of geosynthetic reinforcements on performance of reinforced slopes". In: Delmas, Gourc, Girard (Eds.), *Proceedings of Geosynthetics – 7th ICG*. Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 197–200.
- [6] Cala, M., Flisiak, J. (2003a). Complex geology slope stability analysis by shear strength reduction. In: Brummer, Andrieux, Detournay, Hart (Eds.), *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics*. A.A. Balkema Publishers, pp. 99–102.
- [7] Cala, M., Flisiak, J. (2003b). "Slope stability analysis with numerical and limit equilibrium methods". In: Burczynski, Fedelinski, Majchrzak (Eds.), *Computer Methods in Mechanics*. CMM-2003.
- [8] Shukha, R., Baker, R. (2003). "Mesh geometry effects on slope stability calculation by FLAC strength reduction method – linear and non-linear failure criteria". In: Brummer, Andrieux, Detournay, Hart (Eds.), *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics*. A.A. Balkema Publishers, pp. 109–116.
- [9] Han, J., Leshchinsky, D. (2004). "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, June 13–16.
- [10] Han, J., Sheth, A.R., Porbaha, A., Shen, S.L. (2004). "Numerical analysis of embankment stability over deep mixed foundations". ASCE Geotechnical Special Publication No. 126: *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, GeoTrans 2004, ASCE, Los Angeles, California, USA, July 26–31, pp. 1385–1394.
- [11] Richards, K.S., Reddy, K.R. (2005). Slope failure of embankment dam under extreme flooding conditions: comparison of limit equilibrium and continuum models. Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Conference, ASCE, Austin, Texas.
- [12] Apuani, T., Corazzatob, C., Cancelli, A., Tibaldi, A. (2005). "Stability of a collapsing volcano (Stromboli, Italy): limit equilibrium analysis and numerical modeling". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144 (1–4), pp. 191–210.
- [13] Han, J., Parsons, R.J., Sheth, A.R., Huang, J. (2005). "Factors of safety against deep-seated failure of embankments over deep mixed columns". Proceedings of Deep Mixing 2005 Conference, Sweden, Vol. 1.2, pp. 231–236. May 23–25.
- [14] Won, J., You, K., Jeong, S., Kim, S. (2005). "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems". *Computers and Geotechnics* 32 (4), pp. 304–315.
- [15] Han, J., Hong, Z.S., Shen, S.L. (2008). "Stability of levees over soft soil improved by deep mixing technology. GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation". ASCE, pp. 716–723.
- [16] Sun, J., Tian, X., Guan, X., Yu, Y., Yang, X. (2008). "Stability analysis for loosened rock slope of Jinyang Grand Buddha in Taiyuan, China". *Earth Science Frontiers*, 15 (4), 227–238.
- [17] Srivastava, A., Sivakumar Babu, G.L. (2009). "Effect of soil variability on the bearing capacity of clay and in slope stability problems". *Engineering Geology* 108 (1–2), pp. 142–152.

- [18] Dawson, E.M., Roth, W.H. (1999). "Slope Stability Analysis with FLAC, In *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*". In: Detournay, C., Hart, R. (Eds.), *Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*, Minneapolis, Minnesota, September 1999, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 3–9.
- [19] Itasca Consulting Group, Inc. (2006). *FLAC/Slope User's Guide*, Version 5.0. 84p.
- [20] Abusharar, S.W., Han, J. (2011). "Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay", *Engineering Geology*, 120, pp.103-110.
- [21] Hughes, J.M.O., Withers, N.J., Greenwood, D.A. (1975). "A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil. *Geotechnique*". 25 (1), pp. 31–44.
- [22] McKenna, J.M., Eyre, W.A., Wolstenholme, D.R. (1975). "Performance of an embankment supported by stone columns in soft ground". *Geotechnique*, 25 (1), pp. 51–59.
- [23] Rathgeb, E., Kutzner, C. (1975). "Some applications of the vibro-replacement process". *Geotechnique*, 25 (1), pp. 45–50.
- [24] Aboshi, H., Ichimoto, E., Harada, Y., Enoki, M. (1979). "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.
- [25] Datye, K.R., Nagaraju, S.S. (1981). "Design approach and field control for stone columns". *Proc. of 10th Int. Conf. on SMFE*, Stockholm, 3, pp. 637–640.
- [26] Bergado, D.T., Panichayatum, B., Sampaco, C.L., Miura, N. (1988). "Reinforcement of soft Bangkok clay using granular piles". *Int. Geotech. Symp. on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Kyushu, Japan, pp. 179–184.
- [27] Bergado, D.T., Singh, N., Sim, S.H., Panichayatum, B., Sampaco, C.L., Balasubramaniam, A.S. (1990). "Improvement of soft Bangkok clay using vertical geotextile band drains compared with granular piles". *Geotextiles and Geomembranes*, 9 (3), pp. 203–231.
- [28] Christoulas, S., Giannaros, C., Tsiambaos, G. (1997). "Stabilization of embankment foundations by using stone columns". *Geotechnical and Geological Engineering*, 15 (3), pp. 247–258.
- [29] Cooper, M.R., Rose, A.N. (1999). "Stone column support for an embankment on deep alluvial soils". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 37 (1), 15–25.
- [30] Priebe, H.J. (1995). "The design of vibro replacement". *Ground Engineering*, 28 (12), pp. 31–37.
- [31] Han, J., Ye, S.L. (2001). "A simplified method for computing consolidation rate of stone column reinforced foundations". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127 (7), pp. 597–603.
- [32] Zhang, Z., Han, J., Ye, G. (2014). "Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of stone column-supported embankments over soft clay". *Engineering Geology*, V. 168, pp. 104-113.
- [33] Sari, W., Abusharar, J.H. (2011). "Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay". *Engineering Geology*, V, 120, Issues 1–4, pp. 103-110.
- [34] Hassen, G., Gueguin, M., Buhan, P. (2013). "A homogenization approach for assessing the yield strength properties of stone column reinforced soils". *European Journal of Mechanics - A/Solids*, V. 37, pp. 266-280.
- [35] Deb, K., Dhar, A. (2011). "Optimum design of stone column-improved soft soil using multiobjective optimization technique". *Computers and Geotechnics*, 38(1), pp. 50-57.
- [36] Deb, K., Mohapatra, S.R. (2013) "Analysis of stone column-supported geosynthetic-reinforced embankments". *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), pp. 2943-2960.
- [37] Ambily, A.P., Gandhi, S.R. (2007). "Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (4), pp. 405–415.