

بررسی اثر صفحه گسیختگی بر چگونگی توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها در پایداری شیب‌ها (مطالعه موردی شیب منتهی به جاده ایلام-صالح آباد)

محمد امیری^{۱*}، ساويز سام^۲

^{۱*} - استادیار گروه مهندسی عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه هرمزگان

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان

amirii@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۲/۹]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱/۱]

چکیده

پایداری شیب‌ها منتهی به جاده در مناطق کوهستانی پر شیب، یکی از مشکلات اصلی توسعه راه‌ها در سرتاسر جهان است که موجب خسارت‌های مالی و جانی فراوان در جاده‌ها می‌شود. میخکوبی خاک یک روش تسلیح درجای خاک است. رفتار یک سیستم خاک مسلح بستگی به پارامترهای مختلفی مانند هندسه سازه، مشخصات مکانیکی خاک، دانسیته مصالح تسلیح، زاویه و طول مصالح تسلیح نسبت به سطح گسیختگی دارد. مطالعات گسترده‌ای پایداری شیروانی را بررسی نموده‌اند اما مطالعات محدودی به بررسی اثر صفحه گسیختگی بر چگونگی توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها بر پایداری شیب‌ها پرداخته است. بر این اساس هدف این پژوهش بررسی اثر زاویه کوبش و طول میخ‌ها بر پایداری شیب با نگرش به نحوه توزیع کرنش برشی است. در این پژوهش به صورت موردی شیب منتهی به جاده مسیر ایلام-صالح آباد بعد از تونل راه کربلا انتخاب شده است. ابتدا برای تعیین پارامترهای مکانیکی خاک از محل شیب نمونه‌هایی تهیه و در آزمایشگاه بر اساس آیین‌نامه ASTM مشخصات خاک تعیین شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار FLAC2D که نرم‌افزاری قوی در مدل کردن سازه‌های ژئوتکنیکی است، استفاده شده است. پس از مدل‌سازی شیب منتهی به جاده نتایج نشست به دست آمده از نرم‌افزار در دو نقطه بر روی شیب شیروانی با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده و هماهنگی خوبی بین نتایج حاصل شده است. در ادامه به بررسی اثر زاویه شیب میخ‌ها با افق و طول میخ‌ها بر روی ضریب اطمینان و نحوه توزیع نیروی کششی میخ‌ها پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش شیب میخ‌ها با افق از زاویه ۰ تا ۳۰ درجه، ضریب اطمینان میخ‌ها حدود ۲۳٪ و بیشینه نیروی کششی حدود ۶٪ افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش در زاویه شیب میخ‌ها ضریب اطمینان کاهش و توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها کاهش می‌یابد. در بررسی اثر طول میخ‌ها بر پایداری شیب، مشاهده شد که بیش‌ترین راندمان زمانی حاصل می‌شود که طول میخ‌ها یک متر از اندازه گوه گسیختگی برشی در آن نقطه بیشتر باشد.

واژگان کلیدی: زاویه کوبش، ضریب اطمینان، ابزار دقیق، توزیع نیروی کششی میخ‌ها، طول میخ.

۱. مقدمه

پذیری، سهولت اجرا و اقتصادی تر بودن نسبت به دیگر سیستم‌های پایدارسازی طی سه دهه اخیر مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. همچنین این روش بیشترین کاربرد را در خاک‌های دانه‌ای یا سخت و خاک‌های رس سیلتی با پلاستیسیته پایین دارد [6].

مبدأ پیدایش میخ‌کوبی در یک سیستم نگهبان را می‌توان در حفاری‌های زیرزمینی در سنگ که به آن شیوه تونل‌زنی اتریسی اطلاق می‌شود، دانست [7]. این روش مشتمل بر نصب آرماتور فولادی مقاوم (یعنی غیر پیش‌تنیده مانند مهار در خاک) در سنگ است که با اجرای یک ردیف بتن شاتکریت مسلح همراه می‌شود. میخ‌کوبی بر پایه فعال‌سازی مقاومت کششی مسلح-کننده‌های فولادی در تغییر شکل‌های نسبتاً کوچک زمین و همچنین یکپارچگی ایجاد شده توسط شاتکریت استوار است و در صورت اجرا شدن در خاک به آن میخ‌کوبی در خاک گفته می‌شود [8]. یکی از نخستین کاربردهای میخ‌کوبی در خاک مربوط به سال ۱۹۷۲ میلادی، برای پروژه تعریض خط راه‌آهن در نزدیکی ورسایلز^۱ در فرانسه است، که در آن یک ترانشه به ارتفاع ۱۸ متر در ماسه توسط میخ‌های کوبیده شده در خاک پایدار شد [9]. از آنجا که این روش از نظر اقتصادی به صرفه بوده و عملیات اجرایی آن نسبت به دیگر روش‌های پایدارسازی سریع‌تر است، استفاده از آن در فرانسه و دیگر بخش‌های اروپا به سرعت افزایش یافت. در آلمان نیز برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ میلادی از این روش استفاده شد [10].

نخستین مطالعات اساسی بر روی دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۱ توسط دانشگاه کالسروه انجام گرفت [11-12]. در آمریکای شمالی نیز نخستین بار از دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده در کشور کانادا و مکزیک در اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰ میلادی استفاده شده است. یکی از اولین کاربردهای میخ‌کوبی در خاک در ایالات متحده آمریکا نیز مربوط به پایدارسازی گودبرداری با عمق ۱۳/۷ متری، در خاک ماسه سیلتی متراکم برای احداث بیمارستان گود ساماریشن^۲ در سال ۱۹۷۶ میلادی بود [13]. در سال ۱۹۸۴، اداره حمل‌ونقل بزرگراه‌های فدرال آمریکا (FHWA) نخستین

میخ‌کوبی یکی از روش‌های مسلح کردن خاک با استفاده از میله‌های فولادی نزدیک به هم در داخل یک شیب، همزمان با ساخت از بالا به پایین است [1-2]. این میله‌ها معمولاً میل‌گردهای مسلح‌کننده‌ای به قطر ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر است، که در گمانه‌های از پیش حفرشده (قطر تا حدود ۱۵ سانتی‌متر) همراه با تزریق ملات قرار می‌گیرند یا با استفاده از دستگاه حفاری ضربه‌ای تحت زاویه ۱۰ تا ۱۵ درجه زیر سطح افق رانده می‌شود [3]. در این روش زهکشی خاک توسط زهکش-های نواری انجام‌شده و سطح حفاری هم‌زمان با ساخت از بالا به پایین توسط بتن شاتکریت یا هیئت‌رئیس‌های بتنی پیش-ساخته محافظت می‌شود [4]. هدف از میخ‌کوبی خاک کاهش تغییر مکان و افزایش پایداری شیروانی‌ها، شیب‌ها و حفاری‌ها توسط برخورد این میخ‌ها با صفحات دارای پتانسیل گسیختگی است [3]. در پایداری یک دیوار میخ‌کوبی شده دو سازوکار وجود دارد و دیوار میخ‌کوبی شده طبق این دو سازوکار عمل می‌کند (شکل ۱) [5]:

۱. نیروهای مقاوم کششی در میخ‌ها که باید در ناحیه مقاوم خاک به واسطه اصطکاک یا چسبندگی بسیج شده، در سطح مشترک میخ و خاک انتقال یابد.
۲. نیروی مقاوم برشی که در محل تماس میخ‌ها با صفحات گسیختگی خاک در میخ‌ها به وجود می‌آیند.

شکل ۱. نیروهای کششی و برشی در میخ‌ها [5]

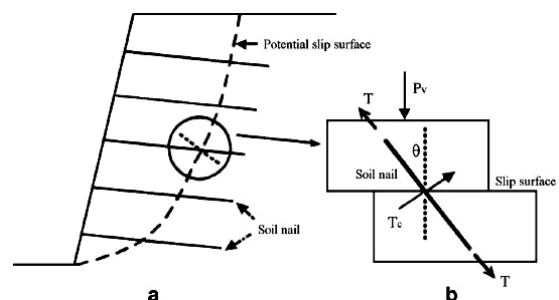


Fig. 1. Shear and tensile forces included in the nails [5]

یکی دیگر از کاربردهای میخ‌کوبی، پایدارسازی زمین لغزه‌ها است. معمولاً در این حالت میخ‌ها تقریباً عمود بر پایه لغزش نصب می‌شوند و در اثر حرکت زمین لغزش تحت اثر نیروهای برشی قرار می‌گیرند. دیوارهای میخ‌کوبی شده به دلیل انعطاف-

1 Versailles

2 Good Samaritan

که بیشینه ضریب اطمینان در زاویه کوبش ۳۰ درجه نسبت به افق به دست می‌آید [18-19].

اثر زاویه مسلح کننده‌ها روی مقدار تغییر شکل دیوار قائم توسط شفیع [20] مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل کردن مسلح کننده‌ها و شیب در برنامه‌ای بر اساس روش اجزا محدود، آن‌ها زاویه بین صفر تا ۳۰ درجه داشتند و نتایج حاکی از این موضوع بود که تغییر شکل قسمت جلویی دیوار در حالت میخ با زاویه ۳۰ درجه بیشتر از حالت دیوار با میخ‌های افقی است.

برخلاف پژوهش‌های گذشته، جونز^۶ [21] در سال ۱۹۹۰ پیشنهاد کرد که مسلح کننده‌ها در قسمت بالای شیب با زاویه کمی رو به بالا نصب شوند و با کم شدن ارتفاع، مسلح کننده‌ها رو به پایین نصب شوند. با این کار بسیج کردن نیروی کششی در مسلح کننده‌ها راحت‌تر صورت می‌گیرد و حالت بهینه به دست می‌آید. جوران^۷ و همکاران [22] با استفاده از تحلیل حدی کینماتیکی توانستند جداول و نمودارهای مختلفی برای طراحی دیوار ارائه کنند. بر اساس مطالعات پژوهشگران در صورت جاگذاری مسلح کننده‌ها با طول بیشتر در قسمت پایین شیب، مقدار مورد نیاز مسلح کننده‌ها در کل شیب کاهش خواهد یافت. همچنین آن‌ها پیشنهاد دادند که مسلح کننده‌های افقی به جزء در قسمت پایین شیب می‌توانند بهینه‌ترین حالت را برای شیب مورد نظر ایجاد کنند [23].

با توجه به مطالعات گسترده‌ای که در موضوع پایداری شیب‌ها انجام شده است، اما نگرش ویژه‌ای به تأثیر صفحه گسیختگی بر چگونگی توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها و اثر زاویه کوبش بر این توزیع ارائه نشده است. بر این اساس در این پژوهش تلاش شده است علاوه بر بیان توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها، ضرایب اطمینان برای طول‌ها و زوایای مختلف ارائه شود.

نمونه آزمایشی دیوار خاکی میخ‌کوبی شده با ارتفاع ۱۲ متر را در نزدیکی کامبرلند گپ^۳ در ایالات کنتاکی ساخت. این اداره بیش‌ترین مطالعات و پژوهش‌ها را روی این‌گونه دیوارها انجام داده است [8].

برای بررسی میزان پایداری شیب‌ها و نزدیکی آن‌ها به شکست، مهندسان از پارامتر ضریب اطمینان استفاده می‌کنند. هنگامی که ضریب اطمینان بزرگ‌تر از یک باشد، مقاومت برشی شیب بیشتر از مقاومت شکست است و شیب پایدار در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که ضریب اطمینان برابر یک است شیب در آستانه لغزش و شکست قرار دارد. هنگامی که ضریب اطمینان کوچک‌تر از یک است، شیب به زودی ریزش می‌کند [14-15]. ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها بسته به اینکه مسلح کننده در چه ارتفاعی از شیب قرار دارد و با سطح گسیختگی احتمالی چه زاویه‌ای می‌سازند و همچنین زاویه آن با صفحه برش، می‌تواند متغیر باشد [14].

اشرفی و بشارت [16] به بررسی پارامترهای مؤثر بر میخ‌کوبی خاک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش زاویه کوبش میخ‌ها از ۵ تا ۲۵ درجه، ضریب اطمینان از ۱/۵۵ تا ۱/۹۴ افزایش پیدا می‌کند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که بهترین زاویه برای کوبش میخ‌ها بین ۱۵ تا ۲۰ درجه است [16]. مهدی‌زاده و همکاران [17] نشان دادند که تغییر شکل ایجاد شده در دیوار میخ‌کوبی شده در زاویه کوبش ۰ و ۱۰ درجه میخ‌ها حدوداً با هم برابر است اما با افزایش زاویه کوبش میخ‌ها به بیش از ۱۰ درجه نسبت به افق، میزان تغییر شکل ایجاد شده در دیوار به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند [17]. اختر حسین^۸ و اسلام^۹ [18] به بررسی اثر زاویه میخ‌کوبی بر پایداری شیروانی با استفاده از نرم‌افزار Geo Slope پرداختند. آن‌ها نشان دادند که ضریب اطمینان پایداری شیب با میخ‌کوبی کردن خاک افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش در زاویه کوبش میخ‌ها، ضریب اطمینان افزایش می‌یابد تا به بیشینه مقدار خود برسد، پس از آن با افزایش در زاویه کوبش میخ‌ها ضریب اطمینان کاهش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند

۲. روش‌ها، معرفی و مدل‌سازی شیب و میخ-کوبی

۲-۱- معرفی شیب منتهی به جاده ایلام-صالح آباد

در فروردین ۱۳۹۵ در محور ایلام-صالح آباد در محدوده تونل راه کربلا کوه ریزش کرد و باعث ورود سنگ‌ها به جاده شد و بر همین اساس مسیر دسترسی ایلام به صالح آباد بسته شد. ارتفاع دامنه منتهی به جاده در این مسیر برابر ۷ متر بوده و شیب منتهی به جاده نیز ۶۰/۲۵ درجه است. برای تعیین مشخصات مکانیکی خاک از محل شیب نمونه‌گیری انجام شده و نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شده است. بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است [24]. دانسیته بر اساس استاندارد ASTM, D854 و زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بر اساس استاندارد ASTM, D3080 تعیین شده است [24]. بر اساس مطالعات صحرایی سطح آب زیرزمینی در عمق ۲ متری قرار دارد. مشخصات مصالح شیب در جدول (۱) بر اساس واحد سیستم SI نشان داده شده است.

۲-۲- مدل‌سازی شیب منتهی به جاده ایلام-صالح آباد و مقایسه

نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده

جهت مدل‌سازی شیب از مدل مش‌بندی شده نشان داده

شده در شکل (۲) استفاده شده است. شکل (۲) مربوط به

جدول ۱. مشخصات مصالح شیب منتهی به جاده ایلام-صالح آباد

Coefficient (Pa)	Friction Angle (degree)	Bulk-Modulus (Pa)	Shear Modulus (Pa)	Density (kg/m ³)
25×10^3	20	1.0×10^8	0.3×10^8	1500

Table 1 Specifications of Materials Leading to Ilam-Salehabad Road

شکل ۲. مدل مش‌بندی شده شیب منتهی به جاده ایلام-صالح آباد

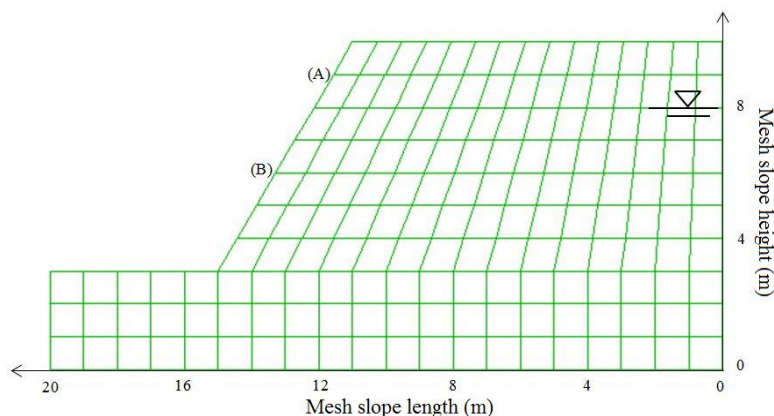


Fig. 2. Mesh model of slope leading to Ilam-Salehabad road

۳-۲- مدل سازی میخ کوبی شیروانی منتهی به جاده ایلام-صالح-آباد

پس از مدل سازی شیب منتهی به جاده و اعمال فشار آب حفره ای و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج ابزار دقیق و درستی آزمایشی نتایج، به مدل سازی میخ ها برای این شیب پرداخته شده است. با توجه به اینکه در فروردین ۱۳۹۵ در این شیب ریزش به وجود آمد و باعث مسدود شدن جاده ایلام-صالح آباد شد، در این قسمت به طراحی میخ کوبی شیب راه پرداخته شده است. به این منظور در ابتدا با توجه به گوه گسیختگی در شکل (۳) مدل میخ کوبی اولیه ارائه شده است و در ادامه کار به بررسی اثر پارامترهای هندسی میخ ها بر پاسخ شیروانی پرداخته شد. در پایان نیز بهترین زاویه و طول کوبش میخ ها با نگرش به اثر صفحه گسیختگی در انتهای کار ارائه شده است.

مدل سازی سیستم میخ کوبی شده با المان کابل و دیواره شاتکریت بتنی با استفاده از المان تیر شبیه سازی می شوند. در ابتدا ویژگی میخ ها و دیواره شاتکریت معرفی می شود. فاصله میخ ها در جهت عمود بر مقطع عرضی (مدل مش بندی شده) مقطع عرضی در شکل (۱) نشان داده شده است) برابر ۱/۳ متر در نظر گرفته شده است. قطر میخ ها ۲۰ میلی متر و قطر سوراخ ایجاد شده برای نصب میخ و اعمال دوغاب (D) ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته می شود. مدول الاستیسیته معادل سطح مقطع میخ و دوغاب با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است [25].

$$E_{eq} = E_n (A_n/A) + E_g (A_g/A) \quad (1)$$

در این رابطه E_{eq} معرف مدول الاستیسیته سیستم ترکیبی میخ و دوغاب، E_n معرف مدول الاستیسیته میخ (میلگرد فولادی)، E_g مدول الاستیسیته دوغاب، A_n سطح مقطع میلگرد مورد استفاده، A_g سطح مقطع دوغاب و A سطح مقطع کلی سیستم میخ-دوغاب است. بنابراین سطح مقطع میلگرد مورد استفاده، سطح مقطع کلی، سطح مقطع دوغاب و مدول الاستیسیته سیستم ترکیبی به شرح ذیل حاصل شده است.

$$A_n = (\pi \times 202) / 4 = 314 \text{ mm}^2$$

$$A = (\pi \times 1002) / 4 = 7850 \text{ mm}^2$$

$$A_g = A - A_n = 7536 \text{ mm}^2$$

$$E_{eq} = 200 \times (4/100) + 22 \times (96/100) = 29.1 \text{ Gpa}$$

شکل ۳. کانتورهای کرنش برشی شیب منتهی به جاده ایلام-صالح آباد

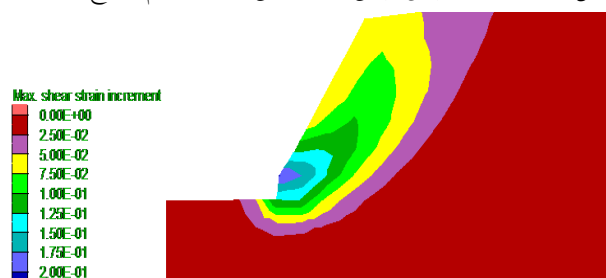


Fig. 3. Shear strain contours of slope leading to the Ilam-Salehabad road

شکل ۴. کانتورهای نشست شیروانی شیب منتهی به جاده ایلام-صالح آباد

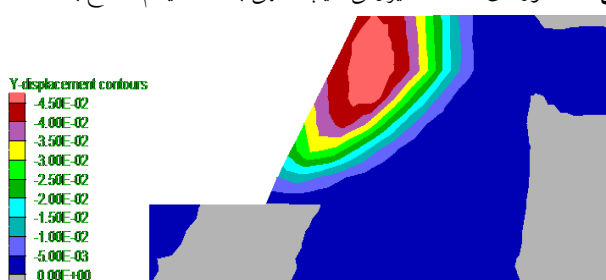


Fig. 4. Slope settlements contours of slope leading to the Ilam-Salehabad road

برای اعتبارسنجی نتایج، نشست های به دست آمده از نرم افزار با نشست اندازه گیری شده با ابزار دقیق برای این شیب، مقایسه شده است. مکان ابزار دقیق های در نظر گرفته شده روی شکل (۳ با A و B) نشان داده شده است. در نمودار شکل (۵) مقایسه ای بین نتایج ابزار دقیق و نتایج گرفته شده از نرم افزار ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود بین نتایج به دست آمده از نرم افزار و ابزار دقیق هماهنگی خوبی وجود دارد. به گونه ای که بیش ترین میزان اختلاف حدود ۳٪ است.

شکل ۵. مقایسه بین نتایج نشست به دست آمده از نرم افزار با نتایج

ابزار دقیق در دو نقطه (A) و (B)

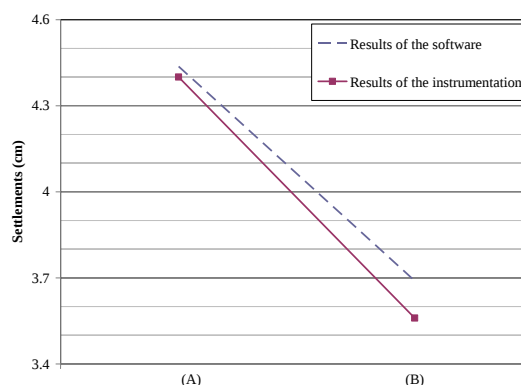


Fig. 5. Comparison between the results of the settlements obtained from the software with the results of the instrumentation at two points (A) and (B)

ویژگیهای سیستم میخ-دوغاب-خاک به صورت خلاصه در جدول (۲) ارائه شده است. ضخامت دیواره شاتکریت برابر ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته می شود. برای واحد ارتفاع دیواره مقادیر سطح مقطع و ممان اینرسی محاسبه شده است. ویژگی-های مصالح دیواره شاتکریت به صورت جدول (۳) است.

برای ارائه طول اولیه میخ ها از کانتورهای کرنش برشی و در واقع گوه گسیختگی استفاده شده است. در شکل (۳) کانتورهای کرنش برشی در انتهای مرحله اعمال فشار آب حفره ای نشان داده شده است. در این شکل گوه گسیختگی به وضوح مشخص شده است. برای اندازه طول میخ ها از این گوه استفاده شده به این ترتیب که طول میخ ها باید از گوه گسیختگی عبور کرده و بلندتر باشند. به این منظور ۶ عدد میخ به فواصل یکسان ۱ متر در ارتفاع ۷ متر شیروانی در نظر گرفته شده است. مدل میخ کوبی شده شیروانی در شکل (۷) ارائه شده است.

اندازه طول برای هر میخ بر اساس، طول گوه گسیختگی در محدوده ای که هر میخ قرار دارد مشخص شده است. همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، مکان عبور هر میخ بر روی گوه گسیختگی در این شکل با اعداد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. طول افقی نقاط مشخص شده روی شکل به ترتیب برابر ۵/۴۳، ۵/۷، ۵/۸، ۶/۲۵، ۵/۶۴ و ۴/۹ متر است. همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شد، اندازه طول چهار میل مهار اول با هم برابر و به اندازه ۶/۵ متر و دو میل مهار آخر برابر با ۵/۶۵ متر در نظر گرفته شده است. به شکلی که طول همه میل مهارها از گوه گسیختگی عبور کند.

در ادامه کار با توجه به اینکه گوه گسیختگی به صورت واضح در نتایج نرم افزار نشان داده شده است. سعی شده است با روابط ریاضی اندازه شعاع گوه گسیختگی و مرکز آن محاسبه شود. به این ترتیب که با نوشتن معادله دایره و در دست داشتن مختصات سه نقطه بر روی گوه گسیختگی، مختصات مرکز گوه گسیختگی و شعاع گوه گسیختگی محاسبه می شود. روند محاسبه این پارامترها در ادامه کار ارائه شده است. محور مختصات بر روی شکل (۷) نشان داده شده است.

نمای شماتیک سیستم میخ-دوغاب-خاک در شکل (۶) نشان داده شده است. دایره داخلی در این شکل معرف المان کابل در FLAC و سیستم توأم میخ و دوغاب به قطر D است. حلقه باریک داخلی معرف ناحیه برشی جدار دوغاب و خاک بوده و ضخامت آن t در نظر گرفته می شود.

شکل ۶. نمای شماتیک سیستم میخ-دوغاب-خاک

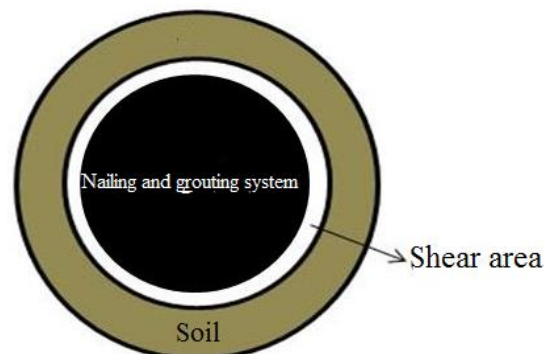


Fig. 6. Schematic view of nail-Grout-soil system

پارامتر سختی ناحیه برشی جدار دوغاب و خاک K_{bond} از رابطه (۲) قابل محاسبه است [25].

$$K_{bond} = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (2)$$

در این رابطه G مدول برشی خاک، t ضخامت ناحیه برشی و D قطر سیستم میخ-دوغاب است. در این پژوهش ضخامت ناحیه برشی دیوار ۴ میلی متر در نظر گرفته می شود. در نتیجه پارامتر سختی ناحیه برشی جدار دوغاب و خاک برابر خواهد بود با:

$$K_{bond} = 2 \times \pi \times 3.8e^7 / 10 \ln(1 + 0.008/0.1)$$

$$K_{bond} = 3.1e^8 \text{ Pa}$$

مقاومت چسبندگی جداره دوغاب به طور تقریبی از رابطه

(۳) محاسبه می شود [25].

$$S_{bond} = \pi Dc \quad (3)$$

که در آن D قطر سیستم میخ-دوغاب و c چسبندگی خاک محیطی است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$S_{bond} = \pi \times 0.1 \times 25e^3$$

$$S_{bond} = 7850 \text{ Pa}$$

زاویه اصطکاک دوغاب و خاک (S_{fric})، برابر ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است. محیط و مساحت سیستم میخ دوغاب نیز به ترتیب برابر ۰/۰۷۸ متر مربع و ۰/۳۴ متر است.

جدول ۲. پارامترهای مکانیکی سیستم میخ-دوغاب-خاک

Compressive Strength (Y_{comp}) (Pa)	Tensile Strength (Y_{Yield}) (Pa)	Nail Spacing (m)	System Perimeter (m)	Friction Angle (degree) (S_{fric})	Grout Adhesion Resistance (S_{bond}) (Pa)	Thickness of the grout area and soil (K_{bond}) (Pa)	System Area (m^2)	Modulus of Elasticity (E_{eq}) (Pa)
$0.238e^6$	$0.238e^6$	1.3	0.34	15	7850	$3.1e^8$	0.0078	$29.1e^9$

Table 2. Mechanical Parameters of Nail-Grout-Soil System

جدول ۳. پارامترهای مکانیکی دیواره شاتکریت

Cross Section Area (m^2)	Moment of Inertia (m^4)	Modulus of Elasticity (Pa)
0.15	$2.8e^{-4}$	$13.8e^9$

Table 3. The mechanical parameters of the shutter wall

مختصات گوه گسیختگی ($۱۱/۸۳$ و $۵/۰۰$) و شعاع گوه گسیختگی نیز برابر با $۷/۸۷$ متر به دست آمد.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بررسی پارامترهای هندسی میخ کوبی شیب بر میزان ضریب اطمینان شیب و نیروی کششی میخها

میخ کوبی پایداری شیبهای خاکی، دیوارهای نگه دارنده و گودبرداریها را بهبود می بخشد. این عمل در اصل با انتقال کشش در میخها صورت می پذیرد. نیروهای کششی به دلیل وجود اندر کنش و اصطکاک بین میخها و زمین محل به وجود می آیند که باعث واکنش در قسمت های رویه ی پوشش و سرمیخ می شوند. مقاومت میخ های سیستم در برابر نیروی بیرون کشیدگی توسط بخشی از میخها که در قسمت پشت گوه قرار دارند، تأمین می شود و باید طول این قسمت به اندازه کافی باشد تا از مهار میخها درون سیستم اطمینان حاصل شود و در برابر نیروهای محرک از محل خود خارج نشوند.

۳-۲- اثر زاویه کوبش میخها روی پایداری شیب

در این پژوهش برای بررسی اثر زاویه میخها بر پاسخ شیروانی، ۶ زاویه شیب مختلف برای میخها در نظر گرفته شده است. زاویه های شیب در نظر گرفته شده با افق برای میخها به ترتیب برابر با ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ درجه است.

در شکل (۷) شماره گذاری میخها نشان داده شد. در شکل های (۸-۱۲) تغییرات نیروی کششی به وجود آمده در طول میخها ردیف دوم تا ردیف ششم و برای زاویه های مختلف

شکل ۷. مدل میخ کوبی شده شیب منتهی به جاده ایلام- صالح آباد و شماره گذاری آنها و مکان عبور میخها از گوه گسیختگی

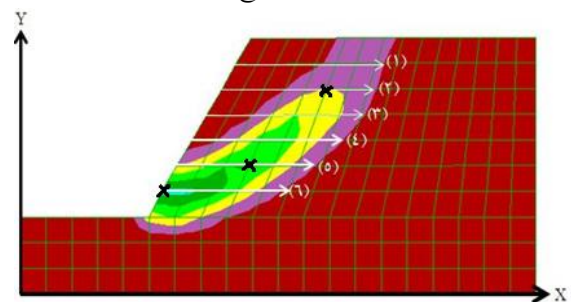


Fig. 7. Nailing model slope leading to Ilam-Salehabad road, and numbering them and the location of the nails through the wedge failure

مختصات سه نقطه تصادفی انتخاب شده بر روی گوه گسیختگی به ترتیب برابر ($۳/۹۶۶$ ، $۵/۳۴۴$ ، $۷/۹۰۲$)، ($۱۱/۸۲۰$ ، $۴/۹۴۶$)، ($۸/۱۸۱$) است و با علامت ضرب ($\times$) در روی شکل مشخص شده اند. فرض می شود که مختصات مرکز دایره گسیختگی برابر (h ، k) است و شعاع دایره گسیختگی برابر R است. به این ترتیب معادله دایره به توجه به مختصات نقاط انتخاب شده بر روی کمائی از گوه گسیختگی به صورت ذیل خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 (5.344-h)^2 + (3.966-k)^2 &= R^2 \\
 (11.820-h)^2 + (7.902-k)^2 &= R^2 \\
 (5.344-h)^2 + (3.966-k)^2 &= (11.820-h)^2 + (7.902-k)^2 \longrightarrow \\
 12.952h + 7.872k &= 157.866 \\
 (5.344-h)^2 + (3.966-k)^2 &= R^2 \\
 (8.817-h)^2 + (4.946-k)^2 &= R^2 \\
 (5.344-h)^2 + (3.966-k)^2 &= (8.817-h)^2 + (4.946-k)^2 \longrightarrow \\
 6.946h + 1.96k &= 57.915 \\
 10h + 8k &= 145 \\
 20h + 14k &= 271 \longrightarrow h = 5.00m \quad k = 11.83m
 \end{aligned}$$

با جای گذاری مقادیر h و k در هر کدام از روابط معادلات دایره، مقدار R برابر با $۷/۸۷$ متر به دست می آید. بنابراین مرکز

میخ‌ها (نشانه A زاویه شیب میخ‌ها با افق است) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود در همه حالات با افزایش زاویه شیب میخ‌ها با افق مقدار توزیع نیروی کششی میخ‌ها افزایش پیدا می‌کند. با افزایش در زاویه شیب میخ‌ها از صفر تا ۳۰ درجه میزان نیروی کششی میخ‌ها به اندازه‌ی ۱۰ کیلو نیوتن افزایش می‌یابد، اما با افزایش شیب میخ‌ها با افق از ۳۰ تا ۴۵ درجه نرخ افزایش نیروی کششی به ازای افزایش میزان زاویه کوبش میخ‌ها دارای نرخ یکسانی است. در حقیقت برای زوایای ۳۰، ۴۰ و ۴۵ درجه نیروی کششی میخ‌ها تقریباً ثابت است.

بررسی توزیع نیروی کششی در شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش طول میخ‌ها نیروی کششی در طول میخ افزایش یافته است، از سوی دیگر بیش‌ترین نیروی کششی در زاویه ۳۰ درجه حدود ۲۵ کیلو نیوتن که نسبت به زاویه صفر درجه در طول ۶/۵ متر حدود ۱ کیلو نیوتن افزایش مشاهده می‌شود. در حقیقت با افزایش زاویه کوبش بسیج کردن نیروی کششی در مسلح‌کننده‌ها راحت‌تر صورت می‌گیرد و حالت بهینه به دست می‌آید. اما از سوی دیگر در زاویه ۴۵ درجه توزیع نیروی کششی به حدود ۲۲ کیلو نیوتن کاهش یافته است، که تأثیر منفی افزایش زاویه به بیش از ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌ها در شکل (۸) نشان می‌دهد، بیش‌ترین اختلاف میان توزیع تنش کششی در فاصله ۲ تا ۴ متری اتفاق افتاده است. بررسی گوه گسیختگی در شکل (۷) و بررسی کانتورهای کرنش برشی تا حدود زیادی این مسئله را توجیه می‌کند به شکلی که در ردیف ۲ بیشینه صفر برسد.

شکل ۹. تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف سوم برای

زاویه‌های مختلف میخ‌ها

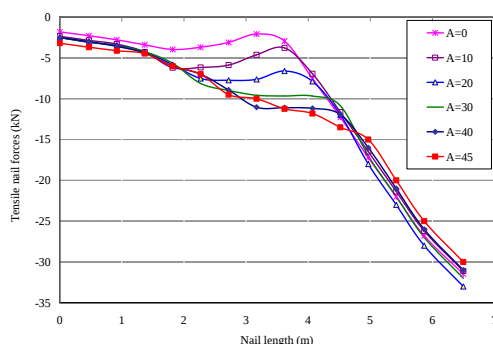


Fig. 9. Variation of tensile forces along the third row nails for different angles of the nails

شکل ۸. تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف دوم برای زاویه‌های مختلف میخ‌ها

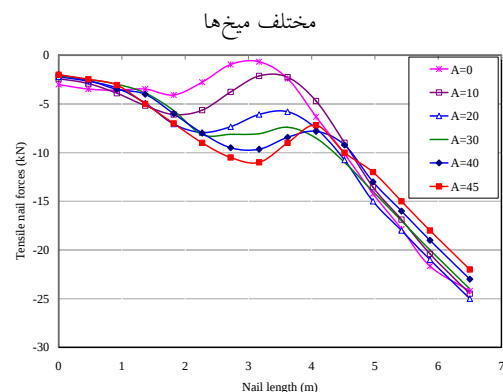


Fig. 8. Variation of tensile forces along the second row nails for different angles of the nails

شکل ۱۰. تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف چهارم برای زاویه-های مختلف میخ‌ها

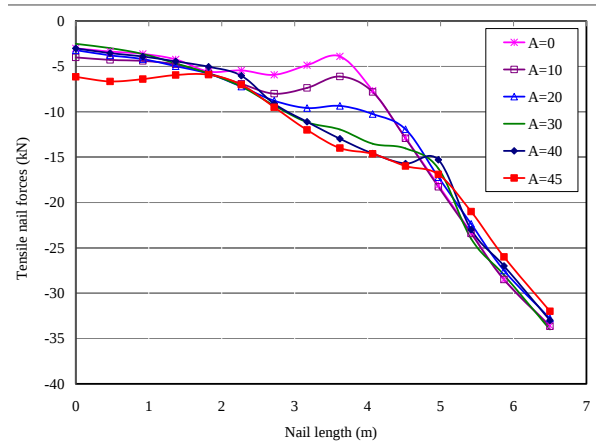


Fig. 10. Variation of tensile forces along the fourth row nails for different angles of the nails

شکل ۱۲. تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف ششم برای زاویه-های مختلف میخ‌ها

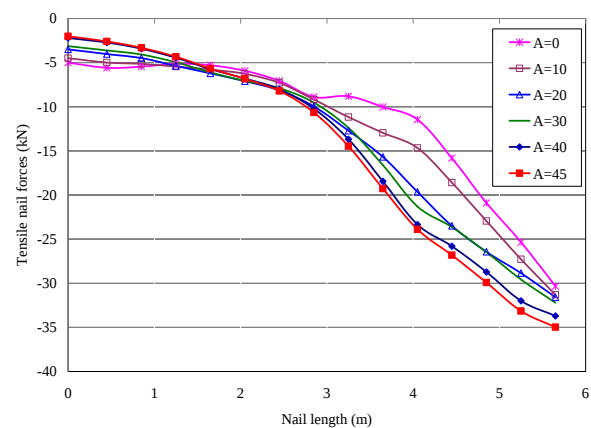


Fig. 12. Variation of tensile forces along the sixth row nails for different angles of the nails

شکل ۱۱. تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف پنجم برای زاویه‌های مختلف میخ‌ها

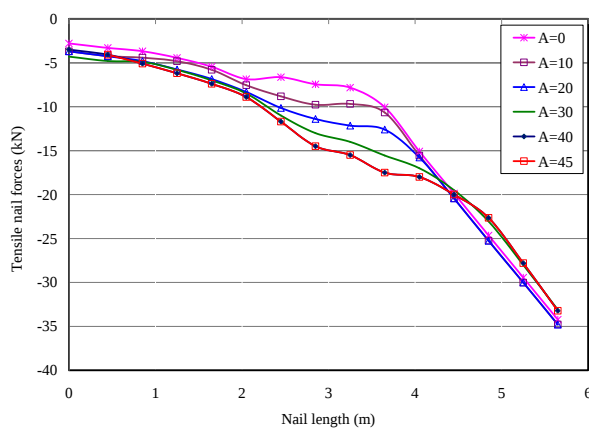


Fig. 11. Variation of tensile forces along the fifth row nails for different angles of the nails

شکل ۱۳. تغییرات کرنش برشی در طول میخ‌های تحت زاویه کوبش ۳۰ درجه

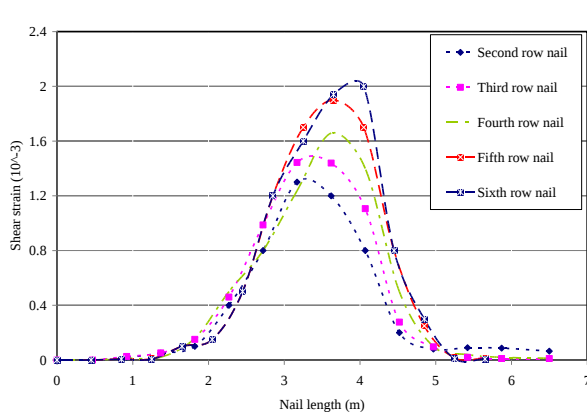


Fig. 13. Shear strain variations along the nailing angle of 30 degrees

کششی مشاهده می‌شود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که زاویه مسلح کننده با سطح لغزش، نقش بسیار مهمی در بسیج شدن نیروی کششی و برشی در مسلح کننده بازی می‌کند، که این زاویه در بسیج شدن نیروی برشی کلی گوه بسیار مؤثر خواهد بود.

در شکل (۱۴) اثر افزایش زاویه کوبش میخ‌ها روی ضریب اطمینان ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ضریب اطمینان برای زاویه‌های کوبش ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ درجه به ترتیب برابر $1/20508$ ، $1/26367$ ، $1/33789$ ، $1/50195$ ، $1/48242$ و $1/43945$ است. با افزایش زاویه شیب میخ‌ها با افق از ۰ تا ۳۰ درجه ضریب اطمینان افزایش و پس از آن با افزایش زاویه شیب میخ‌ها با افق ضریب اطمینان کاهش می‌-

برای بررسی دقیق‌تر جهش‌های ایجاد شده در توزیع نیروی کششی در شکل (۱۳) کرنش برشی در طول میخ‌های ردیف دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه کرنش برشی در طول میخ‌های ردیف دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم به ترتیب در ۳، ۳/۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵ و ۴ متری از طول میخ‌ها به وجود آمده است، بنابراین می‌توان گفت جهشی که در نمودارهای تنش‌های کششی در طول میخ‌ها رخ داده به علت بیشینه کرنش برشی در این نقطه از طول میخ و یا به عبارتی عبور گوه گسیختگی از این ناحیه است. اما نکته قابل توجه در تمام نمونه‌ها این است که در کرنش برشی بیشینه در زاویه کوبش ۴۵ درجه بیش‌ترین میزان تحمل نیروی

در حالت شیب میخ‌ها با افق برابر ۳۰ درجه بیش‌ترین ضریب اطمینان برای پایداری شیب و بیش‌ترین نیروی کششی در میخ‌ها به دست می‌آید. در شکل (۱۵) نیروی کششی میخ‌ها در ردیف‌های ۱ تا ۶ برای حالت زاویه میخ‌ها با افق برابر ۳۰ درجه نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با حرکت از میخ ردیف ۱ به میخ ردیف ۶ میزان نیروی کششی به وجود آمده در میخ‌ها به حدود ۳۵ کیلو نیوتن افزایش می‌یابد. در حقیقت بیشینه نیروی کششی از ۲۴ کیلو نیوتن در میخ یک به حدود ۳۵ کیلو نیوتن در میخ ردیف ۶ افزایش یافته است.

۳-۲- اثر طول میخ‌ها روی پایداری شیب

طول اولیه میخ‌ها با استفاده از گوه گسیختگی شکل (۳) تعیین شد و برای چهار ردیف میخ (۱، ۲، ۳ و ۴) اندازه آن ۶/۵ متر و برای دو ردیف میخ پنجم و ششم طول ۵/۶۵ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در قسمت ۳-۱ زاویه مناسب برای شیب میخ‌ها ۳۰ درجه تعیین شد و در این بخش زاویه شیب میخ‌ها با افق برابر ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است. در این قسمت با در نظر گرفتن زاویه شیب میخ‌ها با افق برابر ۳۰ درجه و با ثابت نگه‌داشتن سایر ویژگی‌های مدل، ابتدا طول میخ‌ها به اندازه ۱ متر کاهش داده شده و نتایج ارائه‌شده است. در ادامه نیز طول میخ‌ها یک بار به اندازه یک متر و بار دیگر به اندازه ۲ متر افزایش داده شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های (۱۶) - (۱۹) به صورت موردی تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌ها برای حالت‌های مختلف در ردیف ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) مشاهده می‌شود، با افزایش طول میخ‌ها توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها کاهش می‌یابد، اما در مجموع نیروی کششی کل افزایش می‌یابد. از سوی دیگر بر اساس نمودارهای ارائه‌شده کاهش یک متر در طول میخ‌ها باعث افزایش توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده با افزایش دو

یابد. در حقیقت با افزایش زاویه شیب از صفر به ۱۰ درجه میزان ضریب اطمینان از ۱/۲۰۵ به ۱/۲۶۴ افزایش یافته است، با افزایش زاویه کوبش به ۲۰ درجه ضریب اطمینان به ۱/۳۳۸ رشد کرد و نرخ رشد میزان ضریب اطمینان به ازای هر درجه به ۰/۷۴٪ رسیده است. با افزایش زاویه کوبش به ۳۰ درجه میزان نرخ رشد ضریب اطمینان به ازای هر درجه ۱/۱۶٪ است و میزان ضریب اطمینان به ۱/۵۰۹ رسیده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده با افزایش زاویه به بیش از ۴۵ درجه میزان ضریب اطمینان کاهش یافته است. با توجه به ضریب اطمینان بیشینه در زاویه ۳۰ درجه میخ‌ها با افق و با توجه به بالا بودن نیروی کششی میخ‌ها در این زاویه، برای ادامه کار زاویه شیب ۳۰ درجه با افق برای میخ‌ها در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۴. تغییرات ضریب اطمینان در برابر زاویه میخ‌ها با افق

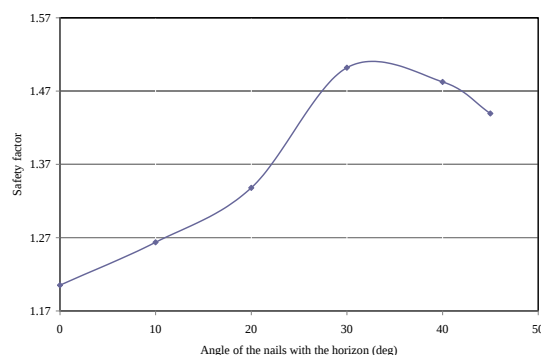


Fig. 14. Coefficient variations of safety factor against the angle of the nails with the horizon

شکل ۱۵. تغییرات توزیع نیروی کششی موجود در هر ۶ ردیف میخ برای حالت زاویه میخ‌ها با افق برابر ۳۰ درجه

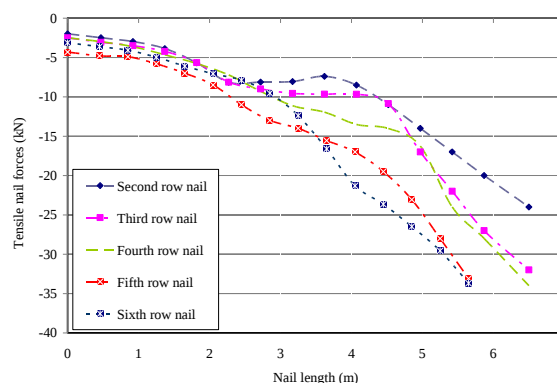


Fig. 15. The variation in the tensile strength of each six rows of nails for the angle of the nails with a horizon of 30 degrees

شکل ۱۸. تغییرات توزیع نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف پنجم
برای طول‌های مختلف آن‌ها

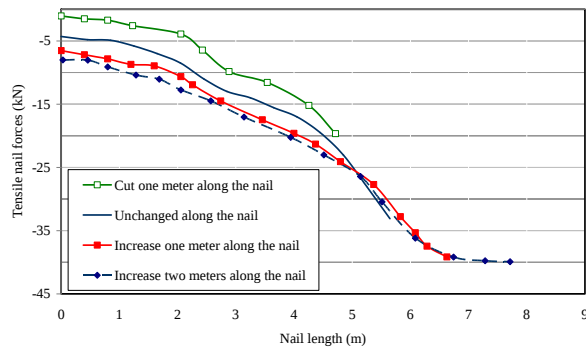


Fig. 18. The variation of the tensile force distribution along the fifth row nails for different lengths

شکل ۱۹. تغییرات توزیع نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف ششم
برای طول‌های مختلف آن‌ها

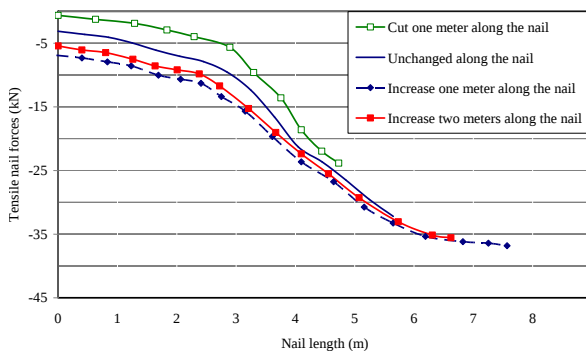


Fig. 19. The variation of the tensile force distribution along the sixth row nails for different lengths

برای اعتبار بخشی به نتایج ارائه شده و همچنین تعیین افزایش طول بهینه میخ‌ها در شکل (۲۰) ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها برای حالت کاهش یک متر، بدون تغییر طول، افزایش یک و افزایش دو متر در طول میخ‌ها نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲۰) ضریب اطمینان طول میخ‌ها در حالت بدون تغییر طول (طول حاصل شده از صفحه گسیختگی) برابر ۱/۵ است. کاهش یک متری طول میخ‌ها موجب کاهش ۸٪ ضریب اطمینان شده است و ضریب اطمینان به ۱/۳۸ کاهش یافته است. از سوی دیگر با افزایش یک و دو متر در طول میخ‌ها ضریب اطمینان به ترتیب ۱/۵۶۴ و ۱/۵۸۰ تغییر یافته است. در حقیقت افزایش یک متری طول میخ‌ها ضریب اطمینان را حدود ۴/۳٪ افزایش داده است. این در حالی است که با افزایش طول میخ‌ها به ۲ متر افزایش ضریب اطمینان کمتر از ۱٪ است. بنابراین با در نظر گرفتن

متر در طول میخ‌ها، توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها تقریباً برابر با توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها به وجود در حالت افزایش یک متری است. بر اساس نتایج ارائه شده حداکثر نیروی کششی در حالت افزایش دو متر و یک متر در طول ۵/۶۵ متری میخ‌ها برابر ۳۰ کیلو نیوتن است. بنابراین با افزایش بیشتر از یک متر در طول میخ‌ها تغییر چندانی در میزان نیروی کششی در طول میخ‌ها به وجود نمی‌آید. با دقت بیشتر در شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) می‌توان بیان نمود که افزایش اندازه طول میخ‌ها در مجموع باعث افزایش میزان نیروی کششی می‌شود، اما با افزایش بیش از یک متری در طول میخ‌ها، توزیع نیروی کششی در طول میخ‌ها چندان تغییرات قابل توجهی نمی‌کند.

شکل ۱۶. تغییرات توزیع نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف سوم برای طول‌های مختلف آن‌ها

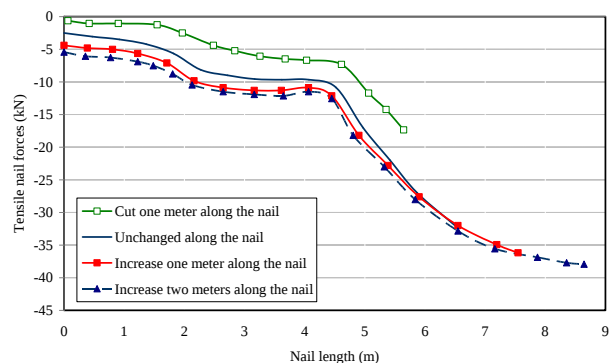


Fig. 16. The variation of the tensile force distribution along the third row nails for different lengths

شکل ۱۷: تغییرات توزیع نیروی کششی در طول میخ‌های ردیف چهارم
برای طول‌های مختلف آن‌ها

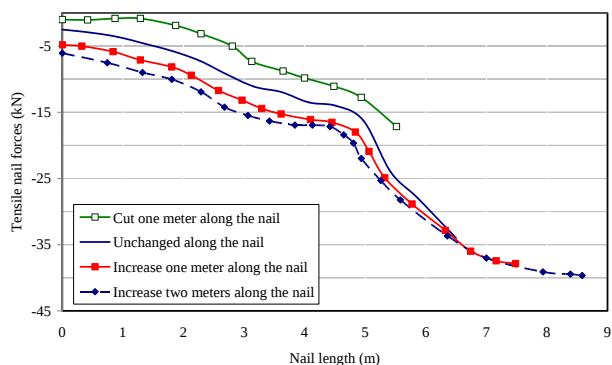


Fig. 17. The variation of the tensile force distribution along the fourth row nails for different lengths

۵. با افزایش در زاویه شیب میخ‌ها نسبت به افق بیشتر از ۳۰ درجه روند افزایش در نیروی کششی میخ‌ها کم می‌شود و می‌توان گفت برای زاویه بیشتر از ۳۰ درجه میخ‌ها نسبت به افق، نیروی کششی به وجود آمده در میخ‌ها با هم برابر است.

۶. بهترین زاویه برای شیب میخ‌ها نسبت به افق زاویه ۳۰ درجه انتخاب شد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت تا مقداری از زاویه شیب میخ‌ها نسبت به افق ضریب اطمینان و نیروی کششی روند افزایشی دارد و بیشتر از آن زاویه روند کاهش می‌دارد که این عدد وابسته به مصالح شیب است.

۷. در بررسی اثر طول میخ‌ها بر پایداری شیب، مشاهده شد که با افزایش طول میخ‌ها ضریب اطمینان افزایش می‌یابد، به شکلی که افزایش یک متری باعث افزایش ۴/۳٪ ضریب اطمینان می‌شود. اما با افزایش بیش از یک متر در طول در نظر گرفته شده برای میخ‌ها نرخ افزایش در ضریب اطمینان شیب کم شده (حدود ۱٪) از اینرو بهینه‌ترین اندازه افزایش طول به اندازه یک متر در طول میخ‌ها در نظر گرفته شد.

۸. برای مطالعه موردی انجام شده، طول میخ‌های چهار ردیف بالا ۷/۵ متر و طول میخ‌های دو ردیف پایین ۶/۶۵ متر انتخاب شد. از طرفی دیده شد که با افزایش در طول میخ‌ها تغییر قابل توجهی در میزان توزیع نیروی کششی میخ‌ها به وجود نیامد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش در طول میخ‌ها ضریب اطمینان افزایش می‌یابد و تغییر چندانی در نیروی کششی میخ‌ها به وجود نمی‌آید.

References

۵- مراجع

1. Tsiamposi, A., Zdravkovic, L. & Potts, D.M. 2017. Numerical study of the effect of soil-atmosphere interaction on the stability and serviceability of cut slopes in London clay, Canadian Geotechnical Journal, 54(3), 405-418.
2. Ebrahimi, R., Asakereh, A., 2016. "Parametric evaluation of soil nailing method in slopes stabilization". International Journal of Basic Sciences & Applied Research. 5 (2), 113-118.
3. Publication FHWA 0-IF-03-017 2003, Soil Nail Walls. Federal Highway Administration, Washington D.C.
4. Dey, R., Hawlader, B. & Phillips, R., 2016. Modeling of large-deformation behaviour of marine sensitive clays and its application to submarine slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal, 53(7). 1138-1155.

شرایط اقتصادی، افزایش طول یک متر در طول میخ‌ها شرایط بهینه را ایجاد می‌کند. بنابراین طول میخ‌های چهار ردیف اول برابر ۷/۵ و طول دو میخ ردیف آخر ۶/۶۵ در نظر گرفته می‌شود و شیب آن‌ها با افق ۳۰ درجه در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۲۰. تغییرات ضریب اطمینان در برابر تغییرات طول میخ‌ها

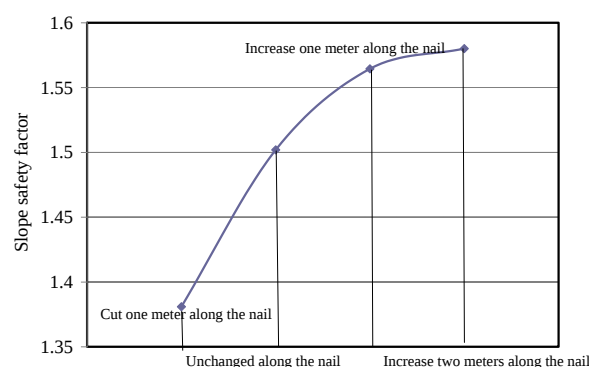


Fig. 20. Changes in the safety factor against changes in the length of the nails

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به مدل‌سازی شیب منتهی به جاده خط ایلام-صالح‌آباد بعد از تونل راه کربلا پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر به صورت خلاصه به شرح ذیل است.

۱. با مقایسه نتایج نشست‌های به دست آمده از نرم‌افزار با نشست‌های ابزار دقیق مشاهده شده که هماهنگی خوبی بین نتایج به دست آمده از نرم‌افزار و ابزار دقیق وجود دارد، به شکلی که بیش‌ترین میزان خطا حدود ۳٪ است.

۲. با افزایش زاویه کوبش میخ‌ها نسبت به افق از صفر تا ۳۰ درجه ضریب اطمینان حدود ۲۳٪ افزایش پیدا می‌کند و پس از آن با افزایش زاویه شیب میخ‌ها نسبت به افق از ۳۰ تا ۴۵ درجه، ضریب اطمینان حدود ۲/۸٪ کاهش دارد.

۳. با افزایش در زاویه شیب میخ‌ها نسبت به افق، میزان نیروی کششی در میخ‌ها افزایش می‌یابد. به نحوی که بیشینه نیروی کششی در زاویه ۳۰ درجه حدود ۶٪ افزایش یافته است.

۴. زاویه کوبش در نقاط دارای کرنش برشی بیشینه بیش‌ترین بهره‌وری را دارند، به شکلی که افزایش زاویه کوبش به ۳۰ درجه موجب افزایش بیش از ۱۰ برابری میزان نیروی کششی میخ‌ها در نقاط دارای کرنش برشی بیشینه می‌شود.

numerical modeling, the Eighth National Congress of Civil Engineering. Babylon. Noshirvani University.

17. Mahdizadeh, AH., Vazyan, H. & Fakharian K, 2014. Soil Nail systems analysis in various software and comparison of results for the optimal design. The first National Conference on Geotechnical Engineering. Ardebil. Ardebil University researcher.

18. Akhtar hossain, M. D. & Islam, A., 2016. Numerical analysis of the effects of soil nail on slope stability. International Journal of Computer Applications, **141** (8), 12-15.

19. Marchal J. 1984, Reinforcement des sols par clouage. Etude experimentale en laboratoire. In: Proceedings of International Conference In Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris; **32** (3), 275-8.

20. Shafiee S. 1986, Simulation nume'rique du comportement des sols cloue's. Interaction soil reinforcement et comportement de l'ouvrage." These de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, France.

21. Jones CPD. 1990. In-situ techniques for reinforced soil. In: Proceedings of the international reinforced soil conference, Glasgo. p. 277-82.

22. Juran I., 1990. Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structure." Journal of Geotechnical Engineering, **116** (1). 54-72

23. Sabhahit N, Basudhar PK, Madhav MR. 1995. A generalized procedure for the optimum design of nailed soil slopes. Int J Numer Anal Meth Geomech; **19**: 437-52.

24. American Society for Testing and Materials, 1992. ASTM, 1992 American Society for Testing and Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards, P.A., Philadelphia V.4, 08.

25. Itasca Consulting Group, Inc. 2001. Fast Lagrangian Analysis of Continua. FLAC Manual.

5. Louis, C. 1986. Theory and Practice in soil nailing temporary or permanent works. ASCE, Annual Conference, Boston.

6. Bryne, R. 1998, Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls: US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

7. Rabejac, S. & Toudic, P. 1974. Construction d'unmur de soutennement entre Versailles – Matelos, Revue General des chmins de Fer, **74** (3). 232-237.

8. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2003, Soil nail walls reference manual, NHI Course No. 132085,

9. Rabejac, A., Toudic, 1974, Ground Control and Improvement, New York. 92.

10. Stocker, N., 1974, Evaluation of design methodologies for soil-nailed walls", Washington, 113.

11. Gassler, G. & Gudehus, G., 1983, Soil nailing-statistical design, proc. ⁸th Eur. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., Helsinki, **2**, 491-494.

12. Schlosser, F. & Unterreiner, P., 1991, Soil nailing in france: research and practice, C. R. ⁷⁰th congress annuel TRB, Washington D.C., 72-79.

13. Carlos, A., 2011, LRFD soil-nailing design and construction, National Cooperative Highway Research Program. 63.

14. Jewell RA. 1980, Some effects of reinforcement on the mechanical behavior of soils. Doctor of Philosophy Thesis, Cambridge University.

15. Rouaiguia, A. & Dahim, M. A. 2014. Numerical Modeling of Slope Stability Analysis. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology. **2** (3), 533-542.

16. Ashrafi HR, Basharat M, 2014. The sensitivity of the system to nailing method (nailing). using

Effect of Failure Plane on Slope Stability and Tensile Force Distribution along Soil Nails

(Case Study: Slope leading to Ilam-Salehabad Road)

M. Amiri^{1*}, S. SAM²

1 Assistant Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

2 Master Student, Islamic Azad University Isfahan (Khorasgan) University, Faculty of Engineering

*amirii@chmail.ir

Abstract

Background and Purpose: Instability of slopes leading to roads in steep mountainous areas is a major problem in the development of roads worldwide, causing excessive human as well as financial losses. Soil nailing is one way of in-situ soil reinforcement. The behavior of a reinforced soil system depends on different parameters including geometry of the structure, mechanical characteristics of the soil, density of the reinforcing material, and length of the soil reinforcing material as well as the angle it makes with the failure plane. Though much research has been conducted on earth slope stability, few studies have examined the effect on slope stability of the soil nailing angle and tensile force distribution along the nail. In spite of the extensive studies conducted on slope stability, no specific insight has been obtained so far on the effect of the failure plane or soil nailing angle on the tensile force distribution along the nails. In view of these facts, this study aims to examine the effect of nail angle as well as nail length on the nail safety factor with due consideration of the effect of shear strain distribution on slope stability. Selecting the slope leading to Ilam-Salehabad Road in western Iran as our case study, we studied the stability of this slope at different nail lengths and angles.

Methodology: The slope leading to Ilam-Salehabad Road (after the Karbala Road tunnel) was selected as the case study. To determine the mechanical parameters of the soil, we provided soil samples from the slope site and tested them at the laboratory in accordance with ASTM code to obtain the required soil characteristics. The powerful geotechnical software FLAC2 was subsequently used for modeling the slope leading to the road. Upon completion of analysis, we compared the settlement obtained from the software at two points on the earth slope with similar measurements obtained from the instruments, and observed a good agreement between them, with an approximate maximum error of 3%. In the following, the effect of soil nailing angle (with the horizontal line) as well as the length of the nail on the nail safety factor and nail tensile force is discussed.

Discussion and Conclusion: Our results showed that increasing the soil nailing angle (i.e., nail driving angle defined as the angle between the soil nail and the horizontal line) from 0 to 30 degrees would increase the nail safety factor by about 23%. Thereafter, increasing the nail driving angle from 30 to 45 would cause a reduction of 2.8% in the safety factor. A further increase of nail angle (with the horizon) caused a corresponding increase in the tensile force induced in the nails, so that the maximum tensile force at 30 degrees increased by about 6%. The maximum nail driving angle efficiency was observed at the points undergoing maximum shear strain: increasing the drive angle to 30 degrees led to a 10-fold increase in the tensile force developed in the nails at points with maximum shear strains. On the other hand, increasing the nail length increased nail safety factor, so that increasing the nail length by 1 meter would increase nail safety factor by 4.3%. However, increasing the nail length beyond 1 meter reduced the rate of increase of the safety factor. Accordingly, the optimum length increase in the nails was taken as 1 meter.

Keywords: soil nail driving angle, safety factor, instrumentation, tensile force distribution in the nail, nail length.