

## تحلیل پایداری شیبهای خاکی مهار شده با میخکوبی

نادر هاتف

دانشیار بخش مهندسی راه و ساختمان - دانشکده مهندسی - دانشگاه شیراز

میر جلال کمبری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی - بخش مهندسی راه و ساختمان - دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت ۸۲/۶/۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۱۲/۱۹، تاریخ تصویب ۸۴/۲/۲۴)

### چکیده

میخکوبی خاک<sup>۱</sup> یک روش تسلیح در جای خاک است که در دو دهه اخیر برای حفظ دیواره های حفاری و ایستایی شیب ها به صورت روز افزون به کار می رود. روش های طراحی که مورد استفاده قرار گرفته در اروپا عمدتاً روش آلمانی و روش فرانسوی و در امریکا روش Davis می باشد. در حالت کلی این روشها پدیده از جا درآمدگی<sup>۲</sup> میخ و پایداری کلی دیوار را کنترل می کنند. در این مقاله یک روش تحلیل برای رسیدن به تغییر شکل ها و نیروها در میخ ها و در نهایت طراحی آنها ارائه شده است. برای ارزیابی این تغییر شکلها و نیروها یک برنامه تحلیلی و طراحی رایانه ای بنام (Soiln.) با استفاده از نرم افزار (Visual Basic) با کاربری بسیار آسان تدوین گردیده است. مثال هایی از کاربرد این برنامه ارائه شده و با نتایج روشهای دیگر مقایسه گردیده است.

**واژه های کلیدی:** شیب خاکی، میخکوبی خاک، خاک مسلح، تحلیل پایداری شیب

### مقدمه

کوله پلها و خطوط راه آهن استفاده شده است. اساس سیستم خاک مسلح بر مبنای استفاده از مصالحی است که توانایی تحمل تنش های کششی بالایی را دارند بگونه ای که توده خاک مسلح شده پایدار باشد.

در راستای استفاده مؤثر از خاک مسلح، استفاده از روشهای جدیدتری نظیر مهاربندی خاک<sup>۳</sup> و میخ کوبی خاک معمول شده است. سیستم های مهاربندی و میخ کوبی خاک جهت پایداری و نگهداری سازه های خاکی طراحی می شوند، تا توسط المانهای کششی، تغییر مکانهای سازه را محدود نمایند. اساس طراحی این عناصر بر مبنای انتقال بار از طریق اصطکاک یا چسبندگی در ناحیه فصل مشترک خاک و مصالح تسلیح می باشد. از مزایای اجرای این سیستم ها، امکان پایداری سازه های دیوارهای خاکی بزرگ، در زمان کوتاه و با مراحل اجرایی کمتر نسبت به سایر روشها و با مصرف کمترین هزینه می باشد. استفاده از این سیستم ها در سازه های خاکی که شرایط اجرای این سیستم ها را دارند، مستلزم یک تخمین دقیق از دوام و پایداری اجزای سازه در

با پیشرفتهای بوجود آمده در راه سازی و راه آهن و عبور اینگونه راهها از مناطق کوهستانی، مشکلات اجرایی زیادی برای مهندسان بوجود آمده، که از جمله آنها، پایداری سازه های شیب ها و ساخت دیوارهای نگهدارنده در شرایط سخت محیطی است. از طرفی حفاری در خاک های نرم برای اجرای زیرزمین ها و سازه های مدفون مستلزم پایداری نگهداشتن دیواره حفاری است که این خود نیز مشکلات ویژه ای دارد. هزینه های بالای اجرای دیوارهای حایل صلب و بطور کلی معایب روشهای معمول، مهندسان طراح را به سمت استفاده از روشهای دیگر پایداری سازه سوق داد بطوریکه به تدریج، سیستم های انعطاف پذیر با نشست پذیری نسبی بیشتر، جایگزین سازه های معمول نگهدارنده شده اند. سیستم های خاک مسلح از جمله این روشها می باشند. برای اولین بار، در سال ۱۹۶۳ میلادی یک مهندس فرانسوی بنام Vidal روش تسلیح خاک را ارائه کرد که این روش به سرعت مراحل پیشرفت را طی کرد و فراگیر شد و در ۲۵ سال اخیر از این روش در ساختن دیوارهای حایل،

کاهش مقدار حفاری و کارهای بتنی در پی سازی، حذف خاکریز پشت دیوارها، امکان اجرای سریع میخ کوبی در داخل خاک با توجه به اینکه میخ ها، پیش کشیده نیستند و امکان اجرای سریع و ارزان دیوار نما که معمولاً بتن پاشی<sup>۵</sup> می شود، استفاده از مصالح ارزانتر، انعطاف پذیری و اجرایی بودن اشاره نمود. سازه های میخ کوبی شده دارای انعطاف پذیری سازه ای بیشتری نسبت به سایر روشهای تسلیح و دیوارهای بتنی مسلح می باشند. این سازه ها دارای امکان نشست پذیری نهایی و نسبی بیشتری می باشن بنابراین در مناطق فعال از نظر زلزله، مناسب تر می باشند.

از معایب و محدودیتهای عمده میخ کوبی می توان به مشکل بودن ساخت سیستم های زهکشی مناسب در خاک های ریزدانه، نقش خزش در رسهای پلاستیک در پایداری دراز مدت سازه و تغییر مکانهای جانبی عدم بسیج ظرفیت از جا درآمدگی مصالح تسلیح بطور کامل در خاک های چسبنده نرم، امکان خوردگی مصالح در محیط های مخرب اشاره نمود.

همچنین این نکته قابل ذکر است که برای اینکه یک سیستم میخ کوبی شده بطور کامل کار کند، بایستی خاک تغییر مکان جانبی داشته باشد تا در میخ ها نیروی کششی بوجود آید، لذا در مناطق شهری، بایستی فاصله مورد نیاز بین توده میخ کوبی شده و سازه مجاور آن حفظ شود تا از بوجود آمدن بارهای اضافه بر سازه مجاور جلوگیری شود.

### رفتار سیستم خاک مسلح و خاک میخکوبی شده

رفتار یک سیستم خاک مسلح بستگی به پارامترهای مختلفی نظیر هندسه سازه، مراحل اجرا، دانسیته و مشخصات مکانیکی خاک، دانسیته مصالح تسلیح، تغییر شکل طولی آنها، سختی خمشی مصالح تسلیح، زاویه مصالح تسلیح نسبت به سطح گسیختگی و... دارد. در مکانیزم اندرکنش بین خاک و مصالح تسلیح، چه در خاک مسلح و چه در سیستم میخ کوبی، تنش اصطکاکی بسیج شده در طول مصالح تسلیح، از تغییر شکل جانبی سازه جلوگیری می کند. نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی مدل‌های حقیقی خاک مسلح و خاک میخ کوبی شده نشان می دهند

دراز مدت می باشد. این امر خود بستگی به نوع مصالح تسلیح، سیستم محافظ در برابر خوردگی و نحوه قرار دادن مصالح تسلیح دارد.

### ویژگی های خاک میخکوبی شده

میخ کوبی خاک یک روش در جای تسلیح خاک می باشد که در دو دهه اخیر در کشورهای مختلف جهت پایدارسازی گودبرداریهای عمیق و همچنین پایدارسازی شیبهای طبیعی، کاربرد وسیعی پیدا کرده است. همچنین آئین نامه تونل اتریش این روش را جهت تسلیح تونلها، بعنوان یک نگهدارنده انعطاف پذیر در حفاریهای زیرزمینی پیشنهاد داده است. از این روش در جهت پایدارسازی ترانشه های راه آهن و بزرگراه ها، لغزش زمین، مدخل تونلها جهت پایدارسازی خاک های لایه ای ضعیف و ناپایدار و دیگر پروژه های عمرانی، استفاده شده است [۱۳، ۱۲، ۹، ۷، ۴، ۲].

اساس این سیستم بر مبنای کاربرد مصالح تسلیح کششی در ناحیه مقاوم خاک<sup>۴</sup> می باشد که در فاصله کمی نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند. سیستم های میخ کوبی شده قابلیت تحمل بارهای قائم استاتیکی و دینامیکی را دارا می باشند. از اینرو می توان از این سیستم جهت ساخت کوله پلها استفاده نمود. همچنین می توان از این سیستم جهت پایدارسازی و تعمیر سازه های خاکی موجود نیز بهره برد. در سیستم های میخ کوبی شده، مصالح تسلیح عموماً از میلگردهای فولادی که قابلیت تحمل نیروهای کشش و تا اندازه ای برشی را دارند تشکیل شده است. این مصالح را می توان در داخل سوراخهای از قبل حفاری شده قرار داد و سپس عملیات تزریق را در اطراف آنها انجام داد. یا اینکه میخ ها، بدون عملیات حفاری، در زمین کوبیده شوند. میخ ها از نوع پیش کشیده شده نیستند اما دارای فاصله کمی نسبت به یکدیگر می باشند. سطح سازه میخ کوبی شده از نظر باربری نقش عمده ای ندارد اما می تواند به عنوان یک محافظ در برابر فرسایش و خوردگی عمل نماید. این سطح عموماً از یک لایه بتن تشکیل شده است که این بتن بر روی یک شبکه توری فلزی پاشیده می شود. از جمله مزایای روش های مهار و میخکوبی خاک، می توان به امکان ایجاد یک پایدارسازی اولیه و موقت در حین عملیات خاکبرداری،

۱- روش Davis [۱۲]

۲- روش آلمانی [۱۳]

۳- روش فرانسوی [۱۰]

۴- روش آنالیز سینماتیک حدی [۶]

شرح کاملی از هریک از این روشها و مقایسه آنها توسط کمری [۱] ارائه شده است و از ارائه آن در اینجا خودداری می‌گردد و فقط به شرح اجمالی روش Luo و همکاران که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است پرداخته می‌شود.

### روش Luo و همکاران

در این روش که اساس آن تعادل نیروها میباشد سطح گسیختگی حفاری بصورت یک سطح شیب دار مانند  $OB$  با زاویه  $\theta$  در نظر گرفته میشود، شکل (۱). ضریب اطمینان در مقابل لغزش ( $FS$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$FS = \frac{(N + T_t - p_w)tg\phi' + T_s + T_c + cL}{P} \quad (1)$$

در این رابطه نیروی لغزاننده  $P$  مؤلفه رانشی وزن خاک و سربار در راستای صفحه لغزش، نیروی  $N$  مؤلفه نرمال بر سطح لغزش وزن خاک،  $p_w$  نیروی فشار آب عمود بر سطح لغزش،  $T_c$  برآیند نیروی مقاومت برشی میخ‌ها در متر طول دیوار و  $T_s$  و  $T_t$  مؤلفه‌های موازی و عمود بر سطح لغزش نیروی کل کششی میخ‌ها ( $T$ )،  $\phi'$  و  $c'$  مشخصات مکانیکی خاک و  $L$  طول سطح لغزش می‌باشند. بر اساس روابط هندسی نشان داده شده در شکل (۱) برای رسیدن به روابط عملی تر داریم:

$$p = \left( \frac{1}{2} \gamma H + q \right) H \cos \theta \quad (2)$$

$$P_w = \frac{\gamma_w H_w^2}{2 \sin \theta} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_s &= T \cos(\alpha + \theta) \\ T_t &= T \sin(\alpha + \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

که این دو سیستم از نظر موقعیت حداکثر نیروی کششی بوجود آمده در مصالح تسلیح، قابل مقایسه می‌باشند [۶،۲]. گسیختگی در یک توده مسلح می‌تواند بر اثر گسیختگی مصالح تسلیح، از جا درآمدگی مصالح تسلیح از داخل خاک رخ دهد.

تحقیقات انجام شده بر روی مدل‌های حقیقی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تغییر مکان نسبی جانبی لازم جهت بسیج شدن نیروهای کششی در داخل مصالح تسلیح در هر دو سیستم خاک مسلح و میخ کوبی خاک، در حد میلیمتر می‌باشند. این تحقیقات نشان می‌دهند که حداکثر این تغییر مکانها در حدود ۰/۳٪ ارتفاع دیوار می‌باشند [۴،۲].

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که در خاک‌های دانه ای کوبیده شده اصطکاک خاک- مصالح تسلیح بستگی کامل به رفتار اتساعی خاک دارد. تحت تنش‌های برشی بسیج شده در ناحیه فصل مشترک، خاک دانه ای که در نزدیکی ناحیه تسلیح قرار دارد، تمایل به اتساع خواهد داشت. اما این اتساع توسط توده خاک اطراف و بالای آن محدود می‌شود. این اثر محدود کننده بعلت تمرکز تنش‌های قائم وارد بر ناحیه تسلیح می‌باشد که تابعی از تنش‌های قائم بکار رفته است و نه فقط وزن خاک بالای خاک مسلح [۱۱].

### روشهای طراحی

یکی از عمده ترین مسائل در طراحی میخ‌ها در سیستم خاک میخکوبی شده تعیین نیروی بوجود آمده در میخ‌ها می‌باشد. روشهای مختلفی جهت تعیین این نیرو وجود دارد. بطور کلی این روشها را می‌توان به ۵ دسته کلی زیر طبقه بندی کرد:

۱- استفاده از نمودارهای تجربی فشار جانبی خاک

۲- روش نیرو-جابجایی ( $p-y$ )

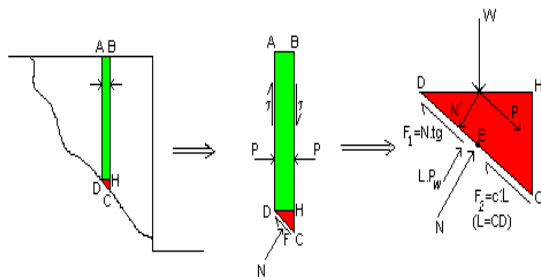
۳- تحلیل المان‌های محدود

۴- روش‌های معادلات حدی

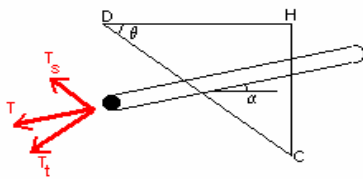
۵- روش Luo و همکاران [۸]

روشهای معادلات حدی خود، به ۴ روش تقسیم می‌شود:





شکل ۲: آنالیز نیروها در یک المان از خاک.



شکل ۳: تجزیه نیروی کششی میخ در جهت سطح گسیختگی و عمود بر آن.

حالا میخکوبی را وارد مسئله می‌کنیم در آن صورت نیروهای ناشی از وجود میخ در شکل (۳) نشان داده شده اند. مطابق شکل (۳) اگر نیروی کشش میخ T باشد، مولفه های این نیرو عبارتند از:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{زاویه میخ با افق} \\ T_t &= T \sin(\alpha + \theta) \end{aligned} \quad (16)$$

$$T_s = T \cos(\alpha + \theta) \quad (17)$$

بنابراین در این حالت رابطه FS به شکل زیر در می آید:

$$\begin{aligned} F_s &= \left\{ \left[ \frac{C}{\cos\theta} + (\gamma h \cos\theta - \frac{P_w}{\cos\theta}) \tan\phi \right] dx + \right. \\ &\left. T \sin(\alpha + \theta) \tan\phi + T \cos(\alpha + \theta) \right\} / (\gamma h \sin\theta dx) \end{aligned} \quad (18)$$

توجه به این نکته ضروری است که جمله TCos(a+θ) در حالت α+θ > 90 منفی شده و کارایی میخ را منفی می‌سازد (شکل (۴)).

۲- ارائه برنامه رایانه ای مناسب برای انجام محاسبات لازم.  
۳- امکان سنجی استفاده از لوله های فلزی مشبک پر شده از مواد نفوذ پذیر در پایداری شیبه‌های خاکی اشباع، با توجه به اینکه یکی از مشکلات دیوارهای میخکوبی شده زهکشی آنها می باشد.

بر این مبنا برای تحلیل مسائل یک عنصر از خاک را در یک حفاری به صورت عنصر ABCD در نظر می گیریم شکل (۲). نیروهای وارد به این عنصر در شکل نشان داده شده اند. باتوجه به اینکه مجموع گشتاورها در نقطه E صفر است، بنابراین تنش های برشی در نظر گرفته نمی شوند و از طرفی کلیه نیروها در واحد طول عمود بر صفحه محاسبه گردیده است. برای محاسبه این نیروها با توجه به شکل مزبور داریم:

- نیروی رانش:

$$\begin{aligned} \theta &= \text{زاویه } CDH \\ p &= \gamma h \sin \theta dx \end{aligned} \quad (11)$$

- نرمال وزن خاک:

$$N' = \gamma h \cos \theta dx \quad (12)$$

- مقاومت خاک در اثر اصطکاک داخلی:

$$F_1 = N' \tan \phi - P_w \times \tan \phi \quad (13)$$

$$F_2 = CL = C \sqrt{1 + \tan^2 \theta} dx = \frac{C}{\cos \theta} dx \quad (14)$$

بنابراین با توجه به تعریف ضریب اطمینان وقتی که میخکوبی وجود ندارد ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی (FS) برای یک سطح بحرانی عبارتست از:

$$\begin{aligned} F_s &= \frac{\sum (F_1 + F_2)}{\sum p} = \\ &= \frac{\sum \left( \frac{C}{\cos\theta} + \gamma h \cos\theta \tan\phi - \frac{P_w}{\cos\theta} \tan\phi \right) dx}{\sum \gamma h \sin\theta dx} \end{aligned} \quad (15)$$

طول آن،  $l_p$  طول تزریق شده،  $l'$  طول قسمتی از میخ است که بین منحنی  $C$  و سطح خاکبرداری میباشد. بنابراین نیروی کل ناشی از چسبندگی برابر است با:

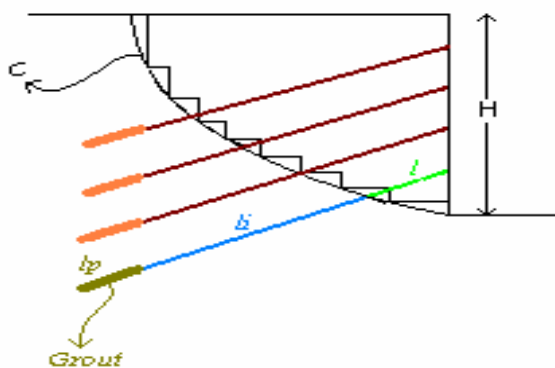
$$T = T_p + T_i = \pi D \tau_p l_p + \pi D \tau (l - l_p - l') \quad (22)$$

برای تعیین نیروی کل ناشی از میخ ها در واحد طول دیوار اگر  $Sh$  فاصله افقی میخ ها باشد خواهیم داشت:

$$\sum T = \sum \pi D [\tau_p l_p + \tau (l - l_p - l')] / S_h \quad (23)$$

بنابراین برای محاسبه  $F_s$  برای سطح  $C$  از رابطه (۲۴) استفاده می کنیم.

$$F_s = \left\{ \sum [C' / \cos \theta + (\lambda h \cos \theta - P_w / \cos \theta) \operatorname{tg} \theta] \Delta x + \sum \pi D [\tau_p l_p + \tau (l - l_p - l')] [\sin(\alpha + \theta) \operatorname{tg} \phi + \cos(\alpha + \theta)] / S_h \right\} / \sum \alpha h \sin \theta \Delta x \quad (24)$$



شکل ۵: نیروهای مؤثر در طول میخ نسبت به سطح گسیختگی.

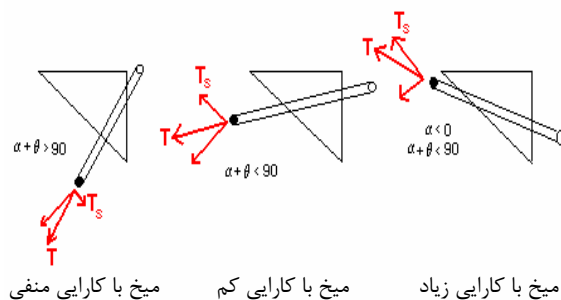
### برنامه رایانه ای

بر اساس آنچه در قسمت قبل ذکر گردید یک برنامه رایانه ای برای محاسبه نیروهای وارد به میخها در سیستم خاک میخکوبی شده که بتواند سطوح شکست غیرصفحه ای را نیز در نظر گیرد در محیط (Visual Basic) نوشته شد. در این برنامه مراحل زیر اعمال گردیده است:

- با توجه به شکل (۶)، ابتدا فرض میکنیم که سطح شکست صفحه است به عبارت دیگر منحنی  $C$  خط راست است. اول

حال با توجه به شکل (۵) اگر  $C$  سطح بحرانی لغزش باشد نیروی کششی که در میخ بوجود می آید ناشی از دو عمل است:

- نیروی چسبندگی بین میخ و تزریق در طول  $l_p$
- نیروی چسبندگی بین میخ و ذرات خاک در طول  $l_i$



شکل ۴: تاثیر زاویه میخکوبی در مهار خاک.

نیروی چسبندگی بین میخ و ذرات خاک در طول  $l$  برای طراحی شیب و میخکوبی در نظر گرفته نمیشود. ولی اگر طراحی میخ مد نظر باشد باید در محاسبات بجای  $l_i$  مقدار  $l + l_i$  در نظر گرفته شود.

برای محاسبه نیروی چسبندگی بین میخ و تزریق در طول  $l_p$ ، اگر  $D$  قطر میخ و  $\tau_p$  تنش چسبندگی بین میخ و تزریق و  $l_p$  طول تزریق شده باشد داریم:

$$T_p = \pi D \tau_p l_p \quad (19)$$

اگر تنش چسبندگی تزریق و ذرات خاک را  $\tau'_p$  و قطر تزریق را  $D'$  و طول تزریق را  $l'_p$  فرض کنیم باید داشته باشیم:

$$\pi D' \tau'_p l'_p > \pi D \tau_p l_p \quad (20)$$

در صورتی که رابطه اخیر ارضا نشود باید بجای  $T_p$  مقدار  $\pi D' \tau'_p l'_p$  را در محاسبات در نظر گرفت.

برای محاسبه نیروی چسبندگی بین یک میخ و ذرات خاک،  $T_i$ ، با توجه به شکل (۵) داریم:

$$T_i = D \tau l_i = \pi D \tau (l - l_p - l') \quad (21)$$

در این رابطه  $\tau$  چسبندگی بین ذرات خاک و میخ،  $l$

و  $\Delta F_s/\Delta x_j$  ،  $\Delta y_j$  و  $\Delta x_j$  مقادیر کوچک دلخواه انتخاب می‌شوند.

۲- با فرض  $S_i = -G_i$  جهت حرکت برای هر مرحله تعیین می‌گردد.

$$S_i = -G_i + S_{(i-1)} * G_i * G_i / (G_{(i-1)} * G_{(i-1)}) \quad (28)$$

$i > 1$

۳- بهترین مختصات گره‌ها در جهت خلاف گرادین پیدا می‌شود.

$$Z_{i+1} = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n) \quad (29)$$

حال کنترل می‌شود که آیا تابع به محل بهینه رسیده است یا نه؟

$$|F_s(Z_{i+1}) - F_s(Z_i)| < \varepsilon, \varepsilon = 1e-5 \quad (30)$$

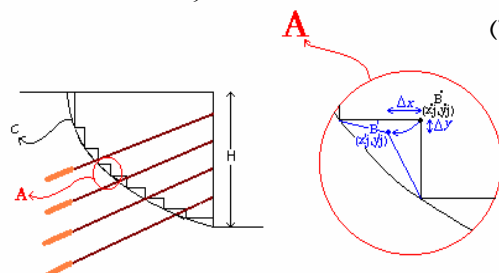
در صورت مثبت نبودن جواب، عملیات دوباره تکرار می‌شود. در شکل (۷) فلو چارت و مراحل کار برنامه رایانه ای دیده می‌شود.

## کاربرد برنامه و مقایسه با نتایج روش سینماتیک حدی

برای نشان دادن کارایی برنامه نوشته شده، به عنوان مثال طراحی، دیواره یک حفاری قائم به ارتفاع ۱۲ متر با بالادست افقی را در نظر می‌گیریم، شکل (۸). مثال حاضر قبلاً با روش سینماتیک حدی حل شده و هدف مقایسه نتایج روش ارائه شده در این مقاله با روش سینماتیک حدی بعنوان کاملترین روش در میان روش‌های موجود طراحی قبلی می‌باشد. در همین مثال با تغییر زاویه میخکوبی سعی شده تاثیر این مسئله در ضریب اطمینان، نیروهای داخلی میخ و تغییر شکلهای بوجود آمده در دیواره سازه مشخص گردد. فواصل افقی و قائم میخها ۳۵/۱ متر، زاویه میخکوبی ۱۰ درجه، تعداد آنها ۷ میخ در ارتفاع حفاری، با قطر ۲۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. طول میخها برابر ۱۰ متر و به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده تا دچار پدیده ازجدارآمدگی نشوند. بعد از محاسبات ( $l_{min}$ ) که توسط برنامه ارائه می‌گردد، میتواند بعنوان حداقل طول مورد نیاز برای میخ مورد استفاده قرار گیرد.

یک خط با  $\theta$  های مختلف ( $\theta$ : زاویه خط بافق) امتحان میکنیم و  $F_s$  را پیدا میکنیم.  $F_s$  مینیم را محاسبه کرده و خط مربوط به آنرا  $C$  می‌نامیم.  $C$  در واقع آغاز حرکت ما خواهد بود. سپس خط  $C$  را به قطعات کوچک تقسیم میکنیم. عمل تقسیم به وسیله گره‌ها انجام میشود. گره‌ها مثل مفصل عمل میکنند. مفصلها به خط  $C$  خاصیت زنجیر بودن میدهند برای هر گره مانند  $j$  داریم ( $j$  شماره گره و  $i$  شماره تکرار می‌باشد):

$$\nabla F_{s_{ij}} = \left\{ \frac{\partial F_s}{\partial x_j}, \frac{\partial F_s}{\partial y_j} \right\} \quad (25)$$



شکل ۶: نحوه حرکت یک گره اختیاری مانند B

$\nabla F_{s_{ij}}$  گرادین محلی در نقطه  $y_j$  و  $x_j$  میباشد. بهترین مکان برای انتقال گره  $j$  در جهت خلاف گرادین محلی است ولی برای گره‌های مرزی چون نقاط مذکور الزاما باید روی مرز حرکت کنند گره‌ها را به اندازه  $d$  روی مرز امتحان میکنیم هر حرکتی که به  $F_s$  کمترین مقدار را بدهد در آن جهت حرکت میکنیم. (در حالی که داریم  $d < B_n - I_{B_n}$  و  $d < B_1 B_2$  و طول زنجیر اول  $B_n - I_{B_n}$  و طول زنجیر آخر میباشد).

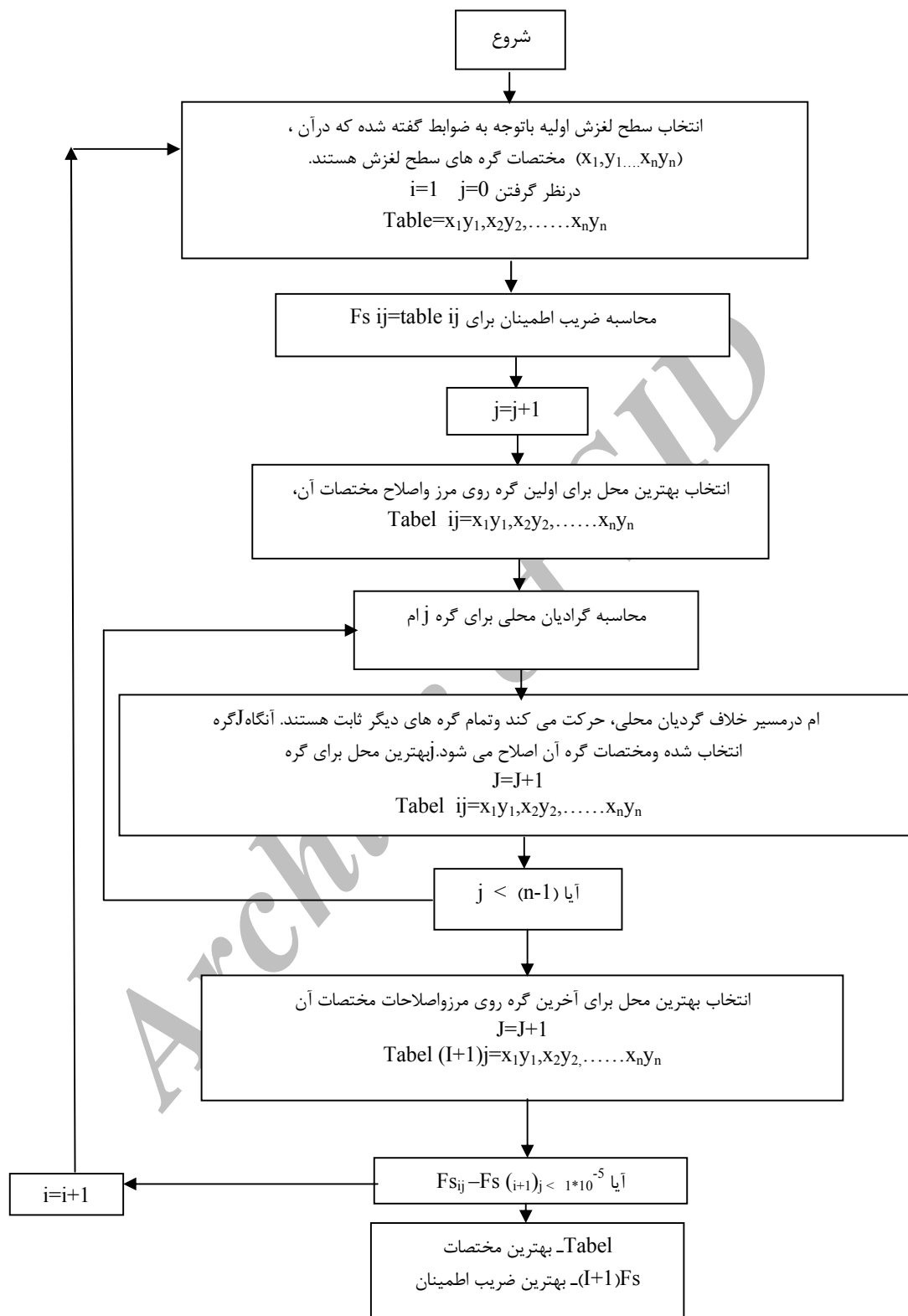
۱- سطح لغزش اولیه، با توجه به ضوابط گفته شده انتخاب می‌شود.

$$Z_1 = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n) \quad (26)$$

گرادین تابع حساب می‌شود.

$$G_i = \{ \Delta F_s / \Delta x_1, \Delta F_s / \Delta y_1, \Delta F_s / \Delta x_2, \Delta F_s / \Delta y_2, \dots, \Delta F_s / \Delta x_n, \Delta F_s / \Delta y_n \} \quad (27)$$

با توجه به شکل (۶)  $\Delta F_s$  برابر است با اختلاف  $F_s$  منحنی  $C$  با حضور نقطه  $B'$  با  $F_s$  منحنی  $C$  با حضور نقطه  $B$ . برای پیدا کردن مقدار  $\Delta F_s / \Delta y_j$



شکل ۷: فلوچارت برنامه رایانه ای.



(3.96 m) توسط برنامه محاسبه میشود. علاوه بر این میزان افزایش طول میخها ( $\delta$ ) نیز توسط برنامه محاسبه می‌گردد که می‌تواند برای کنترل تغییر شکل دیواره مورد استفاده قرار گیرد.

مثال فوق الذکر با استفاده از روش سینماتیک حدی حل شده و ضریب اطمینان برابر ۲، نیروی کششی ماکزیمم (4.31kN) و حداقل طول مجاز میخ (3.9m) به دست آمده است (کمری، ۱۳۸۰). مقایسه نتایج نشان میدهد که روش سینماتیک حدی و روش ارائه شده در این تحقیق جوابهای تقریباً مشابهی می‌دهند.

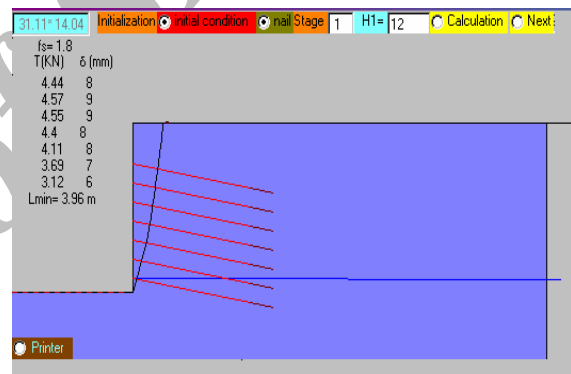
در این مرحله برای اینکه تاثیر زاویه میخکوبی را بررسی کنیم همین مسئله را با زاویه منفی حل میکنیم. زاویه  $\alpha = -10$  درجه انتخاب شده ولی بقیه مشخصات تغییر نیافته است. نتایج در شکل (۹) ملاحظه می‌گردد. مطابق این شکل ضریب اطمینان ۱۶٪ افزایش یافته و نیروهای داخلی میخها نیز ۱۵٪ بیشتر شده اند و طول مینیمم میخ تغییر قابل توجهی نیافته است. با توجه به اینکه تنش کششی میخ فاصله زیادی با تنش مجاز میخ دارد بنابراین افزایش نیروی داخلی میخ تاثیر چندانی در طراحی ندارد ولی افزایش ۱۶٪ ضریب اطمینان قابل توجه میباشد. از سوی دیگر میخکوبی با زاویه منفی این مزیت را دارد که امکان زهکشی خاک بوسیله میخهای مخصوص تو خالی فراهم شده و عملاً مشکل آب حذف میگردد. میزان تغییر طول میخها نیز مترادفاً کاهش یافته است.

### جمع آوری نتایج از مثالهای حل شده

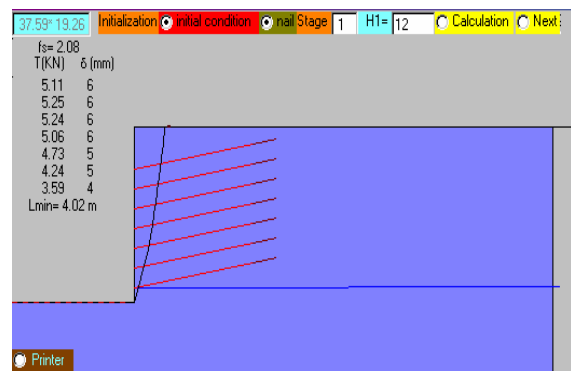
برای نشان دادن تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار میخها، نمودارهایی با استفاده از حدود ۷۰۰ مثال حل شده توسط رایانه بدست آمده است و تاثیر پارامترهای زیر بررسی گردیده است.

با مراجعه به شکل (۱۰) دیده می‌شود که با افزایش زاویه اصطکاک خاک،  $\phi$  و چسبندگی،  $C$  در دو حالت خاک خشک و خاک اشباع چگونه نیروی کششی بیشینه ایجاد شده در میخها کاهش می‌یابد. همچنین همین اثر روی ضریب اطمینان برای ارتفاع  $H=10$  متر ملاحظه می‌شود، شکل (۱۱). در شکلهای (۱۲) الی (۱۴) نیز تاثیر

طول تزریق ۲ متر و قطر آن ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب میشود. سطح آب زیر زمینی در ارتفاع یک متری از پای حفاری در نظر گرفته میشود. زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر ۳۵ درجه، چسبندگی ۱۲ ( $\text{kN/m}^2$ )، وزن حجمی برابر ۲۰ ( $\text{kN/m}^3$ ) به برنامه داده شده است. با اجرای برنامه نیروهای به وجود آمده در میخها ارائه می‌گردند، شکل (۸). بطوریکه ملاحظه میشود نیروی کششی ایجاد شده در میخهایی که در وسط سازه از نظر ارتفاع قرار دارند بیشتر از دیگر میخها است. بنابر این در طراحی سازه‌های میخکوبی شده به میخهایی که در حدود  $0.3H$  الی  $0.75H$  توجه بیشتری مبذول کرده و سعی می‌شود میخها در این قسمت متمرکز گردند.



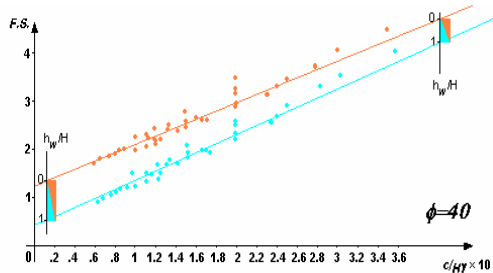
شکل ۸: خروجی برنامه رایانه ای.



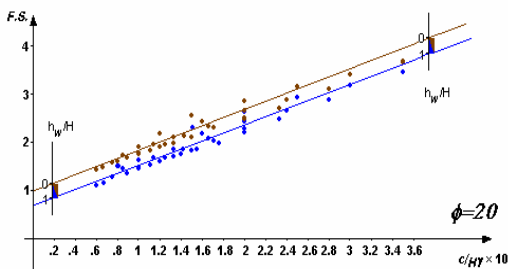
شکل ۹: نتایج میخکوبی با زاویه منفی.

ضریب اطمینان گسیختگی خاک ( $f_s=1.8$ )، نیروی کششی ماکزیمم (4.57 kN) و حداقل طول مجاز میخ

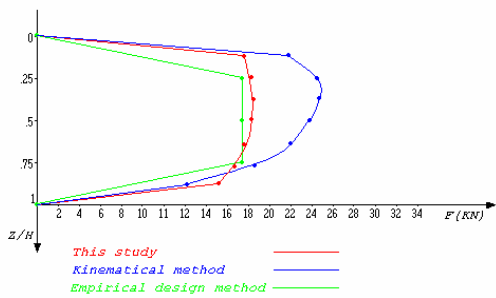
پارامترهای ارتفاع و اشباع بودن خاک روی ضریب اطمینان نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد افزایش ارتفاع باعث کاهش ضریب اطمینان و افزایش پارامترهای مقاومتی خاک باعث افزایش آن می‌گردد.



شکل ۱۳: تاثیر  $C/H\gamma$  روی ضریب اطمینان برای  $\phi=40$  در دو حالت خشک و اشباع.



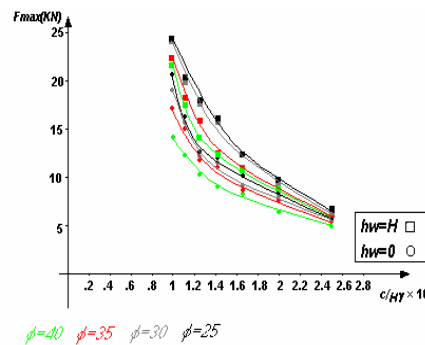
شکل ۱۴: تاثیر  $C/H\gamma$  روی ضریب اطمینان برای  $\phi=20$  در دو حالت خشک و اشباع.



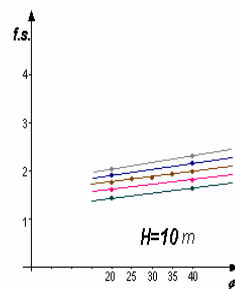
شکل ۱۵: مقایسه نیروی کششی داخلی میخ بین روش حاضر، روش سینماتیک حدی و روش طراحی تجربی.

در شکل (۱۵) نیروی کششی میخ با توجه به عمق هر میخ ( $Z/H$ ) نشان داده شده است. در اینجا هم بوضوح مشخص است که در میخکوبی یک دیواره میخهای میانی از اهمیت بیشتری برخوردارند.

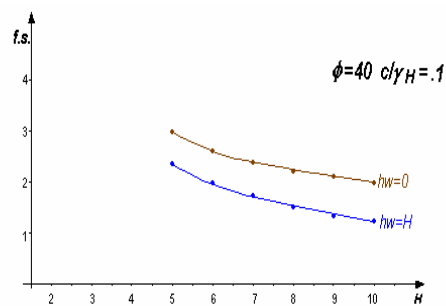
علاوه بر این جهت بررسی نتایج ارائه شده توسط برنامه



شکل ۱۰: تاثیر  $\phi$  و  $C/H\gamma$  روی حداکثر نیروی کششی ایجاد شده در میخ.



شکل ۱۱: تاثیر  $\phi$  و  $C/H\gamma$  روی ضریب اطمینان برای  $H=10 m$



شکل ۱۲: تاثیر  $H$  روی ضریب اطمینان برای  $\phi=40$  و  $C/H\gamma=0.1$

توجه به این نیروها طول لازم جهت هرمیخ در هر سطح بگونه ای بدست می آید تا پایداری موضعی میخ تامین شود. محاسبات نشان می دهند که حتی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان پایداری موضعی برابر یک، ضریب اطمینان کلی سازه بالاتر از ۲ خواهد بود و این مسئله اهمیت تامین پایداری موضعی سازه میخ کوبی شده را نشان می دهد [۱۱].

همانطور که ذکر شد این برنامه قادر به تعیین اثر پارامترهایی نظیر سر بار و لایه بندی خاک بر روی نیروهای بوجود آمده درمیخ ها می باشد بامقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل های عددی باین نتایج مشاهده شده درمدلهای حقیقی و آزمایشگاهی میتوان نتایج زیررا استخراج نمود.

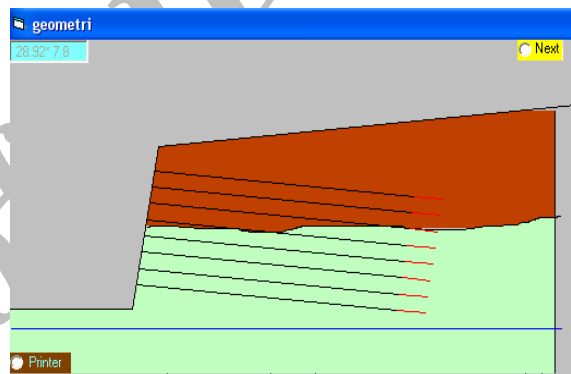
۱- در طراحی سازه های خاکی میخکوبی شده بایستی همواره توجه به قسمت میانی دیواره منعطف گردد.

۲- سازه خاکی را با زاویه منفی برای میخکوبی می توان طراحی نمود تا اولاً از تعدادی از میخها بعنوان زهکش استفاده کرد و سطح ایستایی آب را پایین برد و ثانیاً کارایی میخ را بالا برد. بنابراین زمینه برای استفاده از سیستم میخکوبی در خاکهای ریزدانه اشباع بیشتر فراهم می گردد. هرچند بکاربردن سیستمهای میخ کوبی و مهار بندی خاک در خاک های ریزدانه چسبنده توصیه نشده است، اما انجام تحقیقات بعدی بر روی سیستم گسیختگی خاک و همچنین بررسی اندرکنش اینگونه خاک ها با مصالح ضروری بنظر می رسد.

۳- این تحقیق نشان می دهد که روش حاضر قابلیت بررسی اثر پارامترهای مختلف نظیر پارامترهای مکانیکی و زاویه مصالح تسلیح را بر رفتار سیستم و قابلیت طرح بهینه سازه های خاکی با چند لایه خاک دارا می باشد.

رایانه ای نوشته شده این نتایج با نتایج روشهای تجربی بدست آمده از مدل‌های حقیقی و آزمایشگاهی در شکل (۱۵) مقایسه شده است [۱]. این بررسی نشان می دهد که نتایج برنامه تا حد قابل قبولی با نتایج بدست آمده از این روشها همخوانی دارد.

برنامه علاوه بر تحلیل شیب های همگن توانایی تحلیل خاک های میخکوبی شده لایه ای یا لنزدار را با امکاناتی که در برنامه تعبیه شده است دارد، شکل (۱۶). نتایج اینگونه تحلیل توسط کمری [۱] ارائه شده و به لحاظ تخلیص در این مقاله آورده نشده است.



شکل ۱۶: تحلیل شیب میخکوبی شده در خاک غیر همگن.

## نتیجه گیری

روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است می تواند به عنوان روش جدید طراحی سیستمهای میخکوبی در نظر گرفته شود. این روش امکان بررسی پارامترهای مختلف نظیر زاویه و شیب شیروانی، اثر سطح ایستایی آب، اثر سر بار، تغییرات پارامترهای مکانیکی خاک و اثر لایه بندی خاک را بر موقعیت و مقدار حداکثر نیروهای کششی و برشی بوجود آمده در میخ ها و پایداری توده میخ کوبی شده فراهم می کند.

تفاوت اساسی این روش و روشهای معمول طراحی در بررسی پایداری موضعی میخ ها و تغییر شکلها می باشد. روشهای معمول طراحی تقریباً "همگی پایداری کلی توده میخ کوبی شده را در نظر می گیرند در حالیکه در این روش ابتدا نیروهای بوجود آمده در میخ ها بدست آمده و سپس با

## مراجع

- ۱ - کمری م. "بررسی شیبهای خاکی مهار شده با میخکوبی." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، (۱۳۸۰).
- 2 - Cartier, G. and Gigan, I. P. (1983). "Experiments and observation on soil nailing structures." *Proceeding of the VIII Conference of E.C.S.M.F.E*, Helsinki.
- 3 - Elias, V. and Juran, I. (1988). "Draft Manual of Practice for soil nailing." *Prepared for us Departement of Transportation, FHWA*, Contract DTFH-61-85-c-00142
- 4 - Guilloux, A. and Notte, and Gonin, (1983). *Experince on a retaining structure by nailing proceeding of VIII conference of I.C.S.M.F.E*. Stockholm.
- 5 - Guilloux, A. and Schlosser, F. (1984). "Soil nailing practical applications." *Proceeding of the Symposium on Soil and Rock Improvement Technique*.
- 6 - Juran, I. (1985). "Reinforced soil systems – application in retaining structures." *Geotechnical Engineering*, Vol. 16.
- 7 - Louis, C. (1986). "Theory and Practice in soil nailing temporary or permanent works." *ASCE, Annual Conference*, Boston.
- 8 - Luo. S. Q., Ho, C. E., TAN, S. A. and Yong, K. Y. (1998). *Stabilization of Basement Excavation With Soil Nail and Ground Anchors* On 2nd International Conference On Ground Improvement Techniques, 7-9 October. Singapor, PP. 327-336.
- 9 - Rabejac, S. and Toudic, P. (1974). *Construction d'un mur de soutennement entre Versailles – Matelos*, Revue General des chmins de Fer, PP. 232-237.
- 10 - Schlosser, F. (1983). "Analogies et difference dans le comportement et le cacul des ouvrages de soutennement en terra armee et par clouge dusol." *Annals de l'Institut Technique du Batiment et des TrauauX*, Publics, No. 418.
- 11 - Schlosser, F., Juran, I. and Jacobsen, H. M. (1983). "Soil reinforcement." *General Report VIII E.C.S.M.F.E.*, Helsinki.
- 12 - Shen, C. K., Herrmann, L. R., Romstand, K. M., Bang, S., Kim, Y. S. and Denatole. (1981). *In situ Earth reinforcement lateral support system*. Report to Department of civil engineering, university of California, Davis.
- 13 - Stocker, M. F., Korber, G. W., Gassler, G. and Gudehus, G. (1979). "Soil nailing." *C.R. Coll. Int Reinforcement Des Sols*, PP. 469-474.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Soil nailing
- 2 - Pull out
- 3 - Ground Anchor
- 4 - Passive inclusion
- 5 - Shotcrete