بررسی سیستم میکروپایل مشبک در پایدارسازی شیروانی‌ها و مقایسه فنی– اقتصادی با روش شمع‌های نگهبان

سارنگ صیرفیان[۱]، محمد کرمانی[۲]، نیما فتاحیان[۳]، حامد غفاری[۴]، حمیدرضا صیرفیان[۵]

1- استادیار دانشگاه زنجان
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی شریف
۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس
۵- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان

mohammad_kr@yahoo.com

خلاصه

ساخت و سازهای نوین شهری و اجرای زیر زمین‌های عمیق، بدلایلی نظیر تأمین پارکینگ، تأسیسات و غیره، سبب گردیده است که دقت و امنیت روش‌های پایدارسازی، به منظور عدم بروز هر نوع خسارت به سازه‌ها و تأسیسات مجاور ساختمان، بیش از پیش مورد توجه مهندسان عمران قرار گیرد.

اجرای شمع‌های نگهبان سابقه نسبتاً طولانی در بین روش‌های پایدارسازی گود دارد. اما اخیراً استفاده از میکروپایل‌های مشبک در پایدارسازی ترانشه‌ها رواج پیدا کرده است. در این سیستم با استفاده از تزریق سیمان، مشخصات ژئوتکنیکی خاک بهبود یافته و بین خاک و میکروپایل پیوستگی مناسبی ایجاد می‌گردد.

در این پژوهش ضمن ارائه یک مدل محاسباتی برای بررسی نمودن نحوه عملکرد میکروپایل‌ها در پایدار سازی ترانشه‌ها، روش مذکور با روش متعارف استفاده از شمع‌های نگهبان مقایسه می‌گردد.

کلمات کلیدی: پایدارسازی، میکروپایل، شمع نگهبان، مدل محاسباتی

۱. مقدمه

شمع‌ها به دو دسته کلی تقسیم می شوند: شمع‌های جابجا شونده (Displacement piles)، شمع‌های جایگزین شونده (Replacement piles) . شمع‌های جابجا شونده، شمع‌هایی هستند که بوسیله کوبش یا ارتعاش در زمین اجرا می‌شوند، بطوری که در حین عملیات نصب خاک‌های اطراف بدنه و نوک شمع جابجا می‌شوند. شمع‌های جایگزین شونده در مکان‌های از قبل حفاری شده، بصورت پیش‌ساخته یا درجا قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر در محل حفاری جایگزین خاک می‌شوند.

یک میکروپایل یک شمع جایگزین‌شونده با حفاری و تزریق دوغاب می‌باشد که معمولاً مسلح بوده و دارای قطر کوچک (معمولاً کمتر از ۳۰۰ mm) است. مراحل اجرای میکروپایل شامل حفاری یک گمانه، فرو بردن و جاسازی مسلح کننده‌ها (آرماتور) و تزریق دوغاب سیمان می‌باشد. میکروپایل‌ها می‌توانند تحت بارهای محوری و یا جانبی قرار گیرند. همچنین می‌توانند جایگزین شمع‌های معمولی شده و یا به عنوان جزیی از یک توده مرکب شمع- خاک، بسته به شیوه طراحی بکار گرفته شوند.

نصب میکروپایل‌ها بگونه‌ای است که کمترین تغییرات را در سازه‌ها، خاک و محیط اطراف خود بوجود می‌آورد. همچنین در محیط‌های با دسترسی محدود، انواع خاک‌های مختلف و شرایط گوناگون زمین قابل اجرا است. میکروپایل با تجهیزات مشابه آنچه در پروژه‌های تزریق و مهارکوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در سطح زمین، تحت هر زاویه‌ای می‌توانند نصب شود. بدلیل ایجاد کمترین سر و صدا و ارتعاش در حین نصب و عدم نیاز به فضای زیاد برای اجرا، میکروپایل‌ها اغلب برای بهسازی پی سازه‌های موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اجرای میکروپایل‌ها در شالوده‌های موجود و در دست بهره برداری، اغلب تجهیزات حفاری ویژه‌ای مورد نیاز است.

بیشتر بارهای اعمال شده بر شمع‌های درجای بتن مسلح متداول، توسط بتن تحمل می‌شوند، بطوریکه افزایش ظرفیت سازه‌ای مستلزم افزایش سطح مقطع و سطح جانبی آن است. در مقایسه، ظرفیت باربری سازه‌های میکروپایل متکی بر ظرفیت بالای المان‌های فلزی است که اکثر بارهای اعمالی را تحمل می‌کنند. این المان‌های فولادی حدوداً نصف حجم حفره میکروپایل را اشغال می‌کند. روش‌های حفاری و تزریق ویژه‌ای را می‌توان برای اجرای میکروپایل‌ها با نیروی Bond خاک-دوغاب بالا مورد استفاده قرار داد. دوغاب بار را از طریق اصطکاک در سطح جانبی ناحیه Bond میکروپایل از خاک مسلح به خاک اطراف منتقل می‌کند. با توجه به قطر کوچک میکروپایل از باربری نوک میکروپایل در برابر ظرفیت باربری جانبی آن، صرف-نظر می‌شود. مقاومت بدست آمده Bond مخلوط خاک-دوغاب در درجه اول متأثر از نوع خاک، روش تزریق بکار رفته و به خصوص فشار تزریق و دبی تزریق می‌باشد. همچنین چنانچه قطر چاه حفاری کوچک باشد، روش حفاری نیز تأثیرگذار است.

از نظر تاریخی، روش شمع نگهبان و پوشش بین آنها اولین بار در سال‌های پایانی قرن نوزدهم در آلمان ابداع شد. این روش در اروپا اغلب به روش دیوار برلین معروف است. روش اجرای آن بدین صورت است که تعدادی عضو عمودی از جنس فولاد یا بتن را معمولاً به فاصله‌ی ۶ الی ۱۰ فوت (مرکز به مرکز) در زمین کوبیده و یا در مکان‌های حفاری شده قرار داده می‌شوند. در هر مرحله، بسته به شرایط خاک قبل از اجرای پوشش‌ها ۱ تا ۵ فوت خاکبرداری می‌شود، سپس صفحات افقی موسوم به Lagging، در بین شمع‌های نگهبان از پیش اجرا شده قرار می‌گیرند.

شمع‌های نگهبان یا بوسیله تجهیزات کوبش اجرا می‌شوند، یا در گمانه‌های از پیش حفاری شده قرار داده شده و بتن‌ریزی می‌شود. متداول‌ترین مقطع، فولاد نورد شده است که معمولاً پروفیل‌های بال پهن یا شمع باربر می‌باشد. برای اجرای شمع نگهبان می‌توان از پروفیل‌های دیگر نظیر مقاطع لوله‌ای، بتن درجا و یا المان‌های پیش‌ساخته نیز استفاده کرد.

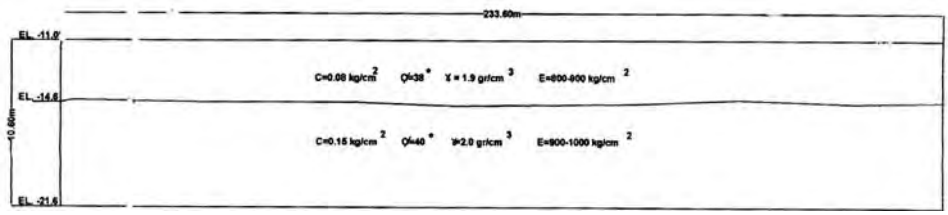
در این طرح پژوهشی، برای یک پروژه ساختمانی که در آن گود عظیمی برداشته شده است، طراحی شمع نگهبان و میکروپایل انجام گرفته است. سپس این دو طرح با هم مقایسه شده‌اند. برای دوختن مجموعه خاک و میکروپایل به توده خاک، از المان‌های Nail استفاده شده است. جزئیات طراحی‌ها در ادامه ارائه می‌گردد.

۲. مطالعه موردی: مجتمع تجاری– اداری پارس

در این پروژه گودبرداری ایمن در ضلع جنوبی مجتمع در مجاورت برج‌های ۱۴ طبقه و در مجاورت مسجد مورد نظر است. از ویژگی‌های این پروژه طول زیاد و ارتفاع قابل توجه گودبرداری و ماهیت دانه‌ای خاک محل پروژه می‌باشد. همانطور که می‌دانیم پتانسیل حرکت کردن گوه گسیختگی در دیواره‌های قائم برای خاک‌های دانه‌ای بیش از خاک‌های چسبنده است. وزن سربار ساختمان‌های مجاور قابل توجه بوده بایستی در محاسبات وارد شوند. برای این منظور وزن هرطبقه ساختمان معادل ۰/۵ متر خاک در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به ۱۴ طبقه ساختمان و ۳ طبقه زیر زمین که پایین آن‌ها در تراز بالای گود قرار دارد، در مجاورت برج‌ها معادل ۸/۵ متر خاک سربار قرار داده‌می‌شود. این تقریب در جهت ضریب اطمینان بوده از اعتبار محاسبات نمی‌کاهد.

شتاب زلزله با توجه به حساسیت پروژه و وضعیت لرزه‌خیزی تهران معادل ۰/۳g افقی و ۰/۱g قائم در نظر گرفته می‌شود. هنگامی‌که نرم‌افزار ضریب اطمینان شیروانی را محاسبه می‌کند، این شتاب در جرم هر مقطع ضرب شده به نیروی ناشی از زلزله تبدیل شده در معادلات به عنوان نیروی محرک وارد می‌گردد.

مشخصات لایه‌های خاک با توجه به مطالعات ژئوتکنیک به صورت صفحه بعد می‌باشد:



شکل ۱- مشخصات وپارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک حاصل از مطالعات ژئوتکنیک

$$UpperLayer \rightarrow \phi = 38^{O}, c = 0.08kg/cm^2, \gamma = 19KN/m^2, E = 800-900kg/cm^2$$

$$BelowLayer \rightarrow \phi = 40^{O}, c = 0.15kg/cm^2, \gamma = 20KN/m^2, E = 900-1000kg/cm^2$$

۳. طرح میکروپایل و Nail

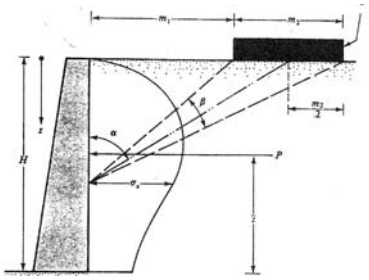
الف)طراحی سازه‌ای(بر اساس خمش):

بررسی مقاومت خشمی میکروپایل بدون در نظر گرفتن اثر تزریق دوغاب سیمان غیر منطقی می‌نماید. چرا که المان میکروپایل با در نظر گرفتن Casing و آرماتور مقاومت بسیار کمی در برابر لنگر ناشی از فشار خاک دارد. در صورتی که در عمل چنین نیست. برای مدل کردن خاک اصلاح شده و المان-های میکروپایل، خاک اصلاح شده به صورت بتن با مقاومت خیلی کم و میکروپایل‌ها به صورت مسلح‌کننده‌های قائم آن در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب یک دیوار حائل بتن مسلح خواهیم داشت و می‌توانیم آنرا برای خمش طراحی و کنترل کنیم.

اما با توجه به ارتفاع زیاد گودبرداری در این پروژه، لنگر بسیار بزرگی در پایین گود به مجموعه میکروپایل و خاک اصلاح شده وارد می-گردد. برای مقابله با این مشکل، طرحی به صورت ترکیبی از میکروپایل و Nail پیشنهاد می‌شود که جزئیات آن در ادامه ارائه می‌گردد.

مجموعه میکروپایل و تزریق دوغاب مانند یک دیوار بتنی مسلح عمل می‌کند که ترکیب دوغاب و دانه‌های خاک به عنوان بتن و مجموعه میکروپایل و انکر درونی آن به عنوان آرماتورهای مسلح کننده دیوار تلقی می‌گردد. این دیوار در سه نقطه توسط فنرهای موجود (Nails) مهار شده است (سختی این فنرها از آزمایش حاصل شده است).

نیروها و لنگر وارد شده توسط رانش خاک که با توجه به انعطاف‌پذیر بودن سیستم حائل مورد نظر، از نوع اکتیو درنظر گرفته‌شدند، توسط نرم افزار Excel به صورت زیر محاسبه گردیده است. در این جدول، Z فاصله از سطح زمین، C چسبندگی خاک در ارتفاع مورد نظر، $F\gamma = \gamma \times Ka \times h$ نیروی ناشی از وزن خاک، $F_C = -2c\sqrt{Ka}$ نیروی ناشی از چسبندگی خاک، $F_B = \frac{2q}{H}(\beta - \sin\beta\cos 2\alpha)$ نیروی ناشی از سربار(از روابط کتاب براجا ام داس فصل نهم جلد اول سال ۱۳۷۳)، α, β زوایای مورد استفاده در رابطه F_B که در شکل۲ آمده است، $F_T = F_\gamma + F_C + F_B$ نیروی کل وارد بر یک متر عرض و یک متر ارتفاع دیوار در ارتفاع مورد تظر و M لنگر ناشی از نیروهای وارد شده از طرف خاک می باشد.



شکل۲- فشار جانبی بر دیوار حائل به علت سربار نواری

در مدل‌سازی این سیستم حائل از فرضیات زیر مطابق با شکل الف استفاده گردیده است:

- ضخامت دیوار بتن مسلح 100 cm ، (بافرض در نظر گرفتن شعاع Well-Improved=0.5m)
- $Ec=2.4e5\ kg/cm^2$ در صورتی که برای بتن معمولی $Ec= 10000\ kg/cm^2$
- $f'c= 250\ kg/cm^2$ در صورتی که برای بتن معمولی $f'c= 15\ kg/cm^2$
- $K_{Nail}= 25000\ kg/cm$

و برای المان‌های میکروپایل،

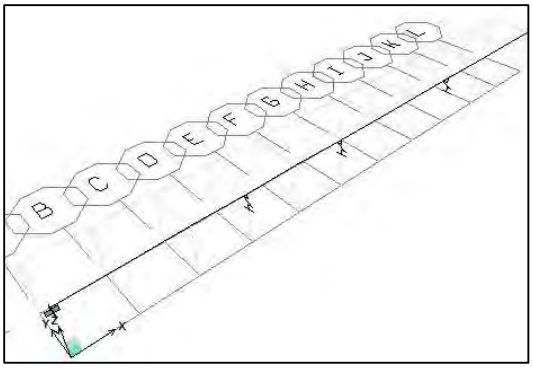
- سطح مقطع میکروپایل = $9\ cm^2$ (ST37) تقریبا معادل4.5cm2 (AIII)
- سطح مقطع آرماتور = $8.04\ cm^2$ (AIII)
- سطح مقطع کل تسلیح فولادی = $12.54\ cm^2$ (AIII)

جدول۱- محاسبه نیروی فشار خاک برای گود های پروژه

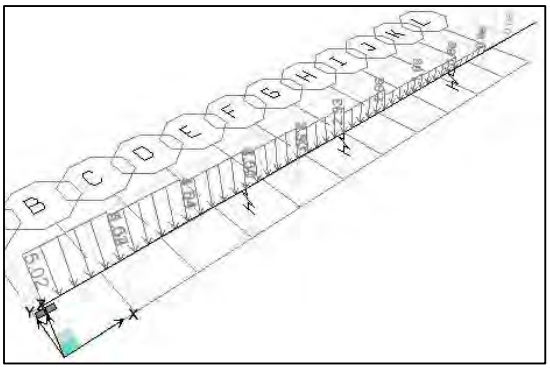
z	c	Fγ	Fc	α	β	FB	Fγ+Fc+F_B	F_T	M	Force (Kg/m)
1	0.8	0.46	-0.77	1.53	0.118	0.36	0.056649	0.0566	0.54	56.65
2	0.8	0.92	-0.77	1.49	0.231	0.71	0.857957	0.858	7.29	857.96
3	0.8	1.38	-0.77	1.45	0.334	1.01	1.619287	1.6193	12.14	1619.29
4	1.5	1.84	-1.44	1.41	0.424	1.26	1.659882	1.6599	10.79	1659.88
5	1.5	2.3	-1.44	1.37	0.502	1.46	2.320571	2.3206	12.76	2320.57
6	1.5	2.76	-1.44	1.33	0.567	1.61	2.932928	2.9329	13.20	2932.93
7	1.5	3.22	-1.44	1.29	0.62	1.72	3.502506	3.5025	12.26	3502.51
8	1.5	3.68	-1.44	1.26	0.664	1.79	4.035677	4.0357	10.09	4035.68
9	1.5	4.14	-1.44	1.22	0.699	1.84	4.538645	4.5386	6.81	4538.64
10	1.5	4.6	-1.44	1.18	0.726	1.86	5.016989	5.017	2.51	5016.99
11	1.5	5.06	-1.44	1.15	0.748	1.85	5.475535	5.4755		
								SUM	88.39	26541.09

سپس با استفاده از نرم افزار Etabs آنالیز انجام گرفته است. با توجه به فاصله ۳ متری المان‌های Nail در عرض سیستم دیوار، طول ۳ متر از دیوار در نظر گرفته شده است که در این طول در ترازهای مورد نظر یک فنر قرار داده شده است. شمای مدل‌سازی به صورت شکل۳ است. محل فنر-ها(Nailها) با توجه به تغییر شکل سیستم حائل و با در نظر گرفتن حالت بهینه که در آن نیروی Nailها حداقل می‌شود، انتخاب شده است.

ترکیب بار انتخاب شده برای آنالیز برابر $1.4Dead \times 3 = 4.2Dead$ انتخاب شده است. در عوض برای بارگذاری در هر گره دقیقاً عدد بدست آمده از جدول۱ قرار داده شده است.



شکل۳- شمای مدل‌سازی انجام گرفته در نرم افزار Etabs



شکل۴- بارگذاری وارد شده در نرم افزار Etabs

و اما میکروپایلها در ۲ ردیف و به فاصله ۱/۵ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. فاصله دو ردیف از یکدیگر ۰/۵ متر می‌باشد.بنابراین سطح مقطع فولاد در یک متر طول دیوار $As = ۱۲/۵۴ * ۴/۳ = ۵۳/۹۲ cm^2$ است.

برای محاسبه لنگر مجاز سیستم حائل مدل شده از رابطه مربوط به تیرهای بتنی استفاده گردیده این لنگر ۸۸ تن بدست می‌آید. ماکسیمم لنگر محاسبه شده توسط نرم افزار Etabs ۶۹/۸ تن می‌باشد که کمتر از لنگر مجاز است.

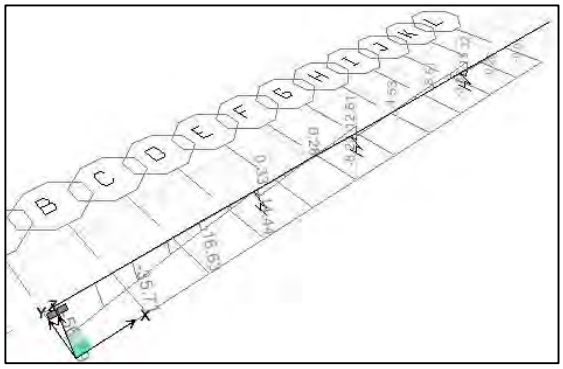
اکنون سیستم طرح شده در برابر برش کنترل می‌گردد. مقاومت برشی سیستم مورد نظر را می‌توان حاصل از فولاد و بتن دانست. این مقاومت را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$S = 3 \times 16.72 \times 4200 \times 0.4 + 0.53\sqrt{15} \times 100 \times 300 = 145850kg = 146ton$$

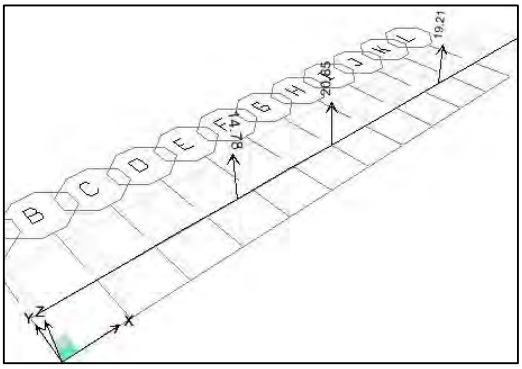
همانطور که در شکل۵ دیده می‌شود، مقاومت برشی مقطع از ماکسیمم نیروی برشی وارد شده به آن بیشتر است.

در گام نهایی نیروی ایجاد شده در Nailها با ظرفیت کششی آرماتور آن مقایسه می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که مقاومت کششی Nailها از نیروی وارد شده به آن‌ها کمتر است.

$$A\Phi 32 = 8.042cm^2$$
$$4200 \times 8.042 \times 0.6 = 20266kg = 20.3ton$$



شکل۵- دیاگرام نیروی برشی بدست آمده از نرم افزار



شکل۶- نیروی داخلی Nailها، حاصل از آنالیز نرم افزار Etabs

ب- طرح ژئوتکنیکی(کنترل پایداری شیروانی)

مدل سازی انجام شده در نرم‌افزار Slope/W به صورت زیر می‌باشد که در آن با گزیدن روش Grid and Radius ، در ناحیه ای که تصور می شود مرکز دایره لغزش قرار گیرد، شبکه ای رسم کرده‌ایم که نرم افزار نقاط روی آن را کنترل می کند و روی خاکریز و به موازات سطح آن، شبکه دیگری رسم می کنیم که دوایر گسیختگی به آن مماس می‌شوند. تعداد سطر و ستون های این شبکه ها با توجه به دقت مورد نیاز قابل تنظیم است. بدین ترتیب نرم افزار برای هر مرکز دایره، به هرکدام از خطوط مماس کرده، با توجه به نیروهای محرک و مقاوم، ضریب اطمینانی ارائه می‌دهد. لایه‌های خاک و شبکه‌های فوق‌الذکر تعریف شده است. مشخصات المان‌های Nail و Micropile مطابق با آنچه در ادامه می‌آید، در نرم افزار وارد گردیده است که در شکل‌های زیر قابل مشاهده است. فاصله بین المان‌های مسلح کننده نیز معین می گردد. با توجه به اینکه محاسبات برای واحد طول صورت می گیرد، برنامه نیروهای وارده توسط المان‌های مسلح‌کننده را به عدد وارد شده به عنوان فاصله بین آن‌ها تقسیم کرده در معادلات وارد می کند.

آنچه در روابط و معادلات نرم افزار آنالیز پایداری شیروانی وارد می گردد، ظرفیت برشی در المان‌های میکروپایل و Nail است که به صورت زیر محاسبه گردیده‌اند:

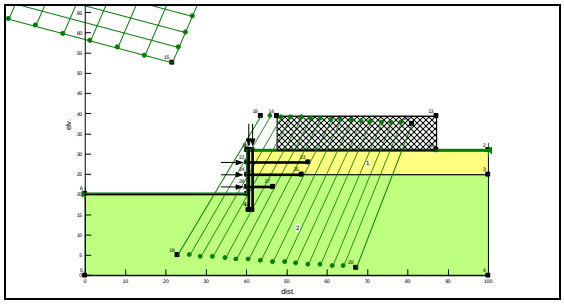
ظرفیت برشی در Nail:

$$\frac{\pi\times0.1^2}{4}\times53\sqrt{500}\times1/3+\frac{\pi\times0.032^2}{4}\times4.2\times10^5\times0.4=140KN$$

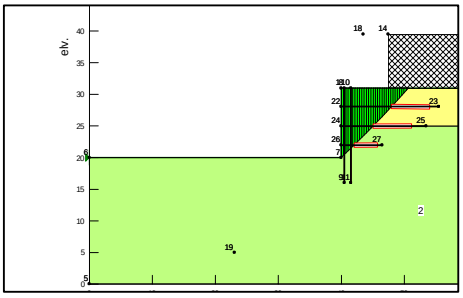
ظرفیت برشی درمیکروپایل:

$$9.04\times10^{-4}\times2.4\times10^5\times0.4+8.04\times10^{-4}\times4.2\times10^5\times0.4+2.82\times10^{-3}\times53\sqrt{500}\times1/3=220kN$$

در شکل ۸ محتمل‌ترین گوه گسیختگی همراه با ضریب اطمینان محاسبه شده برای آن نشان داده شده است. ضریب اطمینان مربوط به محتملترین گوه(کمترین ضریب اطمینان محاسبه شده)، ۱/۲۱۱می‌باشد. با توجه به اینکه برای پایداری ترانشه‌ها با در نظر گرفتن نیروی ناشی از شتاب زلزله، حداقل ضریب اطمینان ۱/۲ توصیه شده است، طرح ارائه شده مورد قبول است.



شکل۷- مدل‌سازی در نرم افزار Slope/W

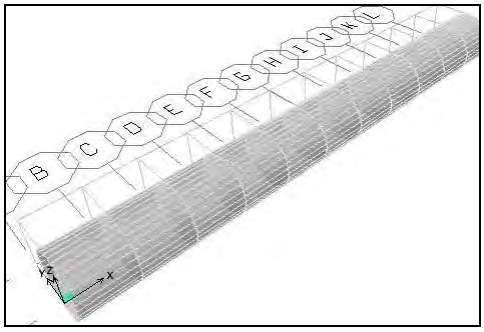


شکل۸- محتملترین گوه گسیختگی

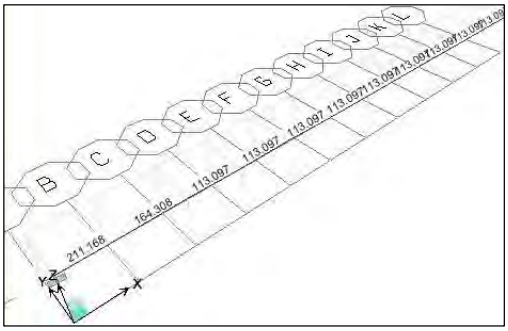
۴. طرح شمع‌های نگهبان

الف)طراحی سازه‌ای(بر اساس خمش):

در نرم افزار Etabs المان شمع به صورت تیری با تکیه گاه صلب مدل گردید که فشار اکتیو خاک به‌آن به صورت متغیر با ارتفاع وارد می‌شد. این فشارها مطابق با اعداد و ارقام جدول ارائه شده در بخش قبل و با توجه به قطر ۱/۰متری شمع بر روی تیر وارد گردید.
ترکیب بار انتخاب شده برای آنالیز برابر $1.4Dead$ انتخاب شده است. در عوض برای بارگذاری در هرگره دقیقاً عدد بدست آمده از جدول۱ قرار داده شده است. سپس در نرم افزار Etabs عضو سازه‌ای شمع مدل گردیده به عنوان یک تیر بتنی آنالیز و طراحی می‌گردد. شمع‌ها در ۱ ردیف و به فاصله ۲/۴ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. میزان فولاد بدست آمده از نرم افزار به صورت شکل ۱۰ است.



شکل۹- شمای مدل‌سازی شمع انجام گرفته در نرم افزار Etabs

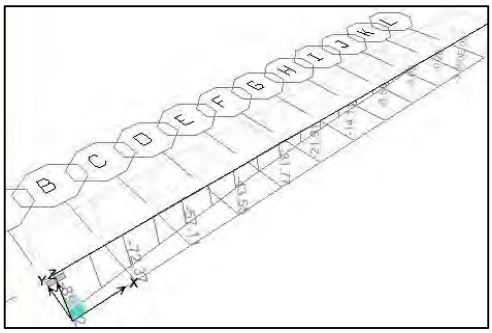


شکل۱۰- آرماتور شمع محاسبه شده در نرم افزار Etabs

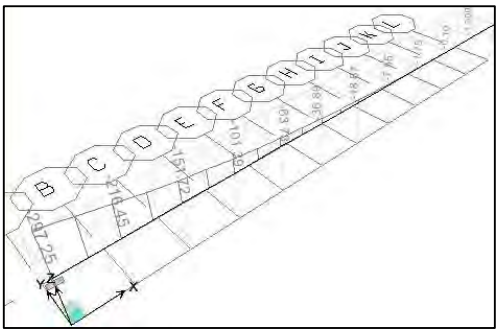
با توجه به اعداد بدست آمده برای آرماتور، ۲۶ عدد φ۳۲ برای ۶ متر پایینی و ۲۳ عدد φ۲۵ برای ۹ متر بالایی در نظر گرفته شده است.
اکنون سیستم طرح شده در برابر برش کنترل می‌گردد. برای کنترل برش، از آرماتورهای دورپیچ φ۱۲ با فاصله‌بندی ۱۵ cm در نظر گرفته شده است.
مقاوت برشی شمع را می‌توان حاصل از فولاد طولی، آرماتورهای دورپیچ و بتن دانست. این مقاومت را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$S = 0.85\times(0.53\sqrt{250}\times\pi\times50^2+2\times\pi\times0.6^2\times4200\times100/15) = 109778g = 109.8ton$$

همانطور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، مقاومت برشی مقطع از ماکسیمم نیروی برشی وارد شده به آن بیشتر است.



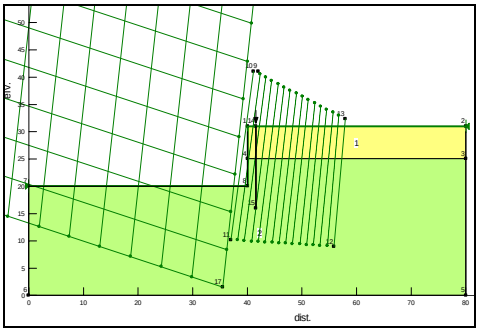
شکل۱۱- دیاگرام نیروی برشی بدست آمده از مدل نرم افزار Etabs



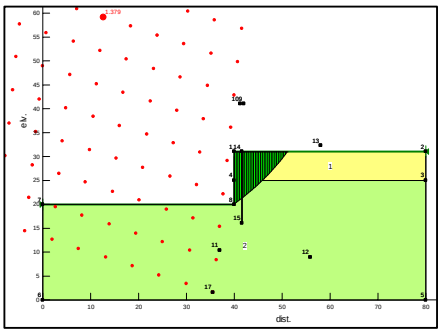
شکل۱۲- دیاگرام لنگر خمشی بدست آمده از مدل نرم افزار Etabs

ب- طرح ژئوتکنیکی(کنترل پایداری شیروانی)

بدین منظور مجدداً از نرم‌افزار Slope/W استفاده می‌گردد. در این حالت نیز تنها ظرفیت برشی شمع‌های نگهبان مورد نظر بوده نیروی برشی آن‌ها وارد معادلات تعادل می‌گردد. حداکثر نیروی برشی برای هر شمع نگهبان $1100\,kN/m^2$ در نظر گرفته شده است. این مقدار با توجه به آرماتورهای عرضی و بتن، مطابق با محاسبات بخش قبل تعیین می‌گردد. فاصله ۲/۴ متری بین شمع‌ها نیز در نرم افزار منظور می‌گردد.
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، مدل‌سازی انجام گرفته و محتملترین گوه گسیختگی قابل رؤیت است. ضریب اطمینان مربوط به محتملترین گوه (کمترین ضریب اطمینان موجود) برابر ۱/۳۸ و بزرگتر از ۱/۲ است. بنابراین گودبرداری از نظر ژئوتکنیکی پایدار است.



شکل۱۳- مدل‌سازی شمع در نرم افزار Slope/W



شکل۱۴- محتملترین گوه گسیختگی برای طرح شمع نگهبان

۵. مقایسه اقتصادی

برای آنالیز اقتصادی و مقایسه دو روش، احجام مصالح (به صورت وزنی) و نیروی کار مورد نیاز (به صورت نفر- روز) برای یک متر عرض دو سیستم حائل با یکدیگر مقایسه می گردد. این آنالیز به صورت تفکیک شده در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است.

جدول۲- آنالیز احجام مصالح و کار مورد نیاز برای طرح میکروپایل و Nail

ردیف	شرح عملیات	سیمان (کیلوگرم)	لوله (کیلوگرم)	آرماتورΦ۲۲ (کیلوگرم)	کارگر مشتمل بر تهیه و اجرا (نفر-روز)
1	تهیه و حمل لوله های میکروپایل مشبک به قطر خارجی ۷۶ میلیمتر و قطر داخلی ۶۸ میلیمتر و استقرار آنها در داخل گمانه بوسیله عملیات کوبش یا احتساب هزینه تجهیز کارگاه	0.0	7.1	6.3	1.8
2	عملیات تزریق لوله های مشبک میکروپایل یا استفاده از مجموعه کامل تزریق مشتمل بر میکسر اولیه، میکسر ثانویه و پمپ تزریق و نیز پهره گیری از پکر درون چاهی یا احتساب هزینه تجهیز کارگاه	150.0	0.0	0.0	1.5
	مجموع (به ازای یک متر میکروپایل)	**150.0**	**7.1**	**6.3**	**3.3**
	مجموع (به ازای یک متر طول پایدارسازی)	**2,993**	**141**	**125**	**66**
ردیف	شرح عملیات	سیمان (کیلوگرم)	لوله (کیلوگرم)	آرماتورΦ۲۲ (کیلوگرم)	کارگر مشتمل بر تهیه و اجرا (نفر-روز)
1	انجام عملیات Nailing مشتمل بر تجهیز کارگاه، حفاری، بازحفاری، تهیه، حمل و استقرار Nail	0.0	0.0	6.3	1.4
2	تزریق دوغاب سیمان با استفاده از مجموعه کامل تزریق مشتمل بر میکسر اولیه، میکسر ثانویه و پمپ تزریق، تهیه، حمل و نصب Nail Head و تنش دادن نهایی	150.0	0.0	0.0	1.8
	مجموع(به ازای یک متر نیلینگ)	**150.0**	**0.0**	**6.3**	**3.2**
	مجموع (به ازای یک متر طول پایدارسازی)	**1,500**	**0**	**63**	**32**
	مجموع عملیات Nailing و میکروپایل (به ازای یک متر طول پایدارسازی)	**4,493**	**141**	**188**	**98**

جدول۳- آنالیز احجام مصالح و کار مورد نیاز برای طرح شمع‌های نگهبان

ردیف	شرح عملیات	سیمان (کیلوگرم)	شن و ماسه (کیلوگرم)	آرماتور (کیلوگرم)	کارگر مشتمل بر تهیه و اجرا (نفر-روز)
1	انجام عملیات حفاری ماشینی محل شمع، با مقطع دایره ای و به قطر ۱۲۰ سانتیمتر، به طور عمودی تا عمق ۲۰ متر ، بیرون آوردن مصالح و حمل آن ها و در صورت لزوم استفاده از گل حفاری.	0.0	0.0	0.0	10
2	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میل گرد آجدار از نوع AIII برای پتن مسلح یا سیم پیچی لازم.	0.0	0.0	150.0	1
3	تهیه و اجرای پتن با شن و ماسه شسته طبیعی یا شکسته، از مصالح رودخانه ای، با ۳۰۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب پتن.	372.9	2,610.3	0.0	7
	مجموع(به ازی یک متر طول شمع به قطر ۱۲۰ سانتیمتر)	**372.9**	**2,610.3**	**150.0**	**18.0**
	مجموع (به ازای یک متر طول پایدارسازی)	**5,594**	**39,155**	**2,250**	**270**

۶. نتیجه گیری

با توجه به آنچه ذکر شد، می‌توان چنین نتیجه گیری کرد:

۱- برای مدل کردن سیستم میکروپایل مشبک به عنوان پایدار کننده شیروانی‌های خاکی می‌توان خاک محدوده تزریق شده را به عنوان بتن با مقاومت فشاری تک محوری خیلی کم و مجموعه غلاف و آرماتور میکروپایل را به عنوان المان‌های مسلح کننده در نظر گرفت. برای دوختن این مجموعه به خاک از Nail استفاده می‌شود که به صورت فنرهایی با سختی معین مدل می‌گردند.

۲- برای کنترل پایدارسازی ترانشه‌ها می‌توان المان‌های مسلح کننده شمع و میکروپایل را به عنوان المان‌هایی که تنها برش تحمل می‌کنند(Dowel) در نظر گرفت. مقاومت برشی این المان‌ها در تعادل نیروهای موجود در دیاگرام جسم آزاد قطاع مورد نظر در شیروانی خاکی وارد می‌گردد.

۳- با در نظر گرفتن عوامل هزینه، مصالح و نیروی انسانی و قرار دادن آن در کنار ایمنی و زمان اجرای عملیات و عدم ایجاد مشکل برای سایر تیم‌های مشغول در کارگاه و کم‌حجم و کم‌هزینه بودن ماشین‌آلات مورد نیاز، استفاده از سیستم میکروپایل مشبک به عنوان نگهدارنده ترانشه و پایدار کننده شیروانی در مقایسه با شمع‌های نگهبان، قابل توصیه و توجیه‌پذیر است.

۷. مراجع

1. "*MICROPILE DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDELINES-FHWA*", (2000), PUBLICATION NO. FHWA - SA - 97 - 070
2. "*Soil Nail Walls-FHWA*" ,(2003), PUBLICATION NO. FHWA0-IF-03-017

۳- براجا ام داس،(۱۳۷۳) "*اصول مهندسی ژئوتکنیک*"، جلد اول، مکانیک خاک، ترجمه شاپور طاهونی