

پایدارسازی شیروانی های تحت حفاری با استفاده از بار تعادلی

در معدن زغالسنگ ماء-موه تایلند

محمدحسین خسروی^{*۱}

*۱-دکتری تخصصی انستیتو فناوری توکیو، استادیار گرایش مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

(دریافت ۶ مرداد ۱۳۹۳، پذیرش ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

چکیده

هدف این تحقیق ارزیابی کارایی بار تعادلی در پایدارسازی شیروانی های تحت حفاری با پتانسیل لغزش صفحه ای در معادن روباز است. برای این منظور ابتدا پدیده قوس زدگی در مواد ژئوتکنیکی به طور اجمالی معرفی شده و امکان شکل گیری آن در شیروانی های تحت حفاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطابق این پدیده با انجام حفاری در قسمت جلویی یک شیروانی، بار ناشی از وزن شیروانی به اطراف ناحیه حفاری شده منتقل شده و در نتیجه منجر به تمرکز تنش در آن نواحی می شود. بنابراین با تقویت نواحی تمرکز تنش می توان به پایدارسازی شیروانی تحت حفاری کمک کرد. با وجود در دسترس بودن حجم بالایی از سنگ باطله در معادن روباز که می تواند به عنوان بار تعادلی استفاده شود، در این تحقیق بار تعادلی به عنوان تکنیکی مناسب در تقویت نواحی تمرکز تنش شیروانی ها و در نتیجه افزایش پایداری آنها پیشنهاد شده است. از مزایای اصلی این تکنیک می توان علاوه بر کمک به پایدارسازی شیروانی های تحت حفاری، به کاهش هزینه معدنکاری به دلیل کاهش حجم باطله برداری و همچنین کاهش هزینه های باربری سنگ باطله اشاره کرد. به عنوان یک مطالعه موردی در این تحقیق، دیواره ناپایدار شمال شرقی کاواک معدن زغالسنگ ماء-موه در شمال کشور تایلند مورد مطالعه قرار گرفت. وجود یک لایه نازک رس در این دیواره منجر به وقوع یک سری لغزش صفحه ای طی سالهای ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۶ شد تا اینکه در سال ۱۹۹۸ با وقوع یک لغزش خیلی بزرگ، عملیات استخراج در این دیواره منجر به وقوع یک سری لغزش صفحه ای طی سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ با موفقیت در پایدارسازی دیواره ناپایدار به کار گرفته شد. یک از روشهای معمول پایدارسازی از جمله مهاربندی یا تزریق از نظر اقتصادی توجیه پذیر نبود. بالاخره با ارائه تکنیک بار تعادلی در سال ۲۰۱۰ میلادی، این تکنیک مورد استقبال مسئولین معدن قرار گرفت و طی سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ با موفقیت در پایدارسازی دیواره ناپایدار به کار گرفته شد.

واژه های کلیدی

معدنکاری روباز، پدیده قوس زدگی، پایدارسازی شیروانی های تحت حفاری، بار تعادلی

۱-مقدمه

پدیده قوس زدگی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های رایج در محیط‌های خاکی و سنگی می‌باشد. در حالت کلی، این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که به دلیل آشفستگی در حالت اولیه توزیع تنش، صلبیت دو ناحیه مجاور در محیط متفاوت باشد. در این حالت فرآیند توزیع مجدد تنش رخ داده بطوریکه تنش بیشتر به ناحیه با صلبیت بیشتر و تنش کمتر به ناحیه با صلبیت کمتر وارد می‌شود [۳].

برای روشن تر شدن موضوع حالتی در نظر گرفته می‌شود که در داخل یک محیط خاکی سازه ای اجرا شود و در حالت کلی صلبیت سازه اجرا شده و خاک اطراف آن متفاوت باشد. اگر صلبیت سازه اجرا شده بیشتر از خاک اطراف آن باشد، مانند شمع کوبی در محیط خاکی، خطوط تنش از خاک به سمت سازه متمایل شده و فشار بالایی از خاک بر سازه وارد می‌شود. از طرف دیگر اگر صلبیت سازه کمتر از خاک اطراف آن باشد، مثل حفر یک تونل با نگهداری انعطاف پذیر، خطوط تنش از سازه دور شده و فشار کمتری از خاک بر سازه وارد خواهد شد.

برای اولین بار شکل‌گیری پدیده قوس زدگی توسط جانسن^۱ (۱۸۹۵) در سیلوهای مواد دانه ای مطرح شد [۴]. وی مشاهده کرد که بر خلاف باور رایج تا آن زمان، فشار جانبی وارد بر دیواره سیلو با افزایش عمق بطور خطی افزایش نمی‌یابد. بلکه با افزایش عمق از نرخ افزایش فشار کاسته شده تا آنکه در یک عمق مشخص در یک مقدار ثابت باقی می‌ماند. جانسن بر اساس مشاهدات خود تئوری قوس زدگی در مواد دانه ای را پایه گذاری کرد.

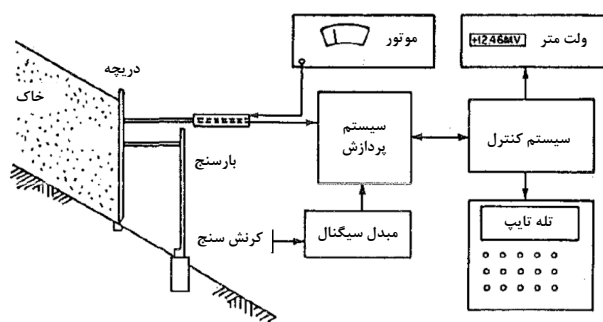
در سال ۱۹۳۶ ترزاقی^۲ با ارائه مقاله‌ای در اولین کنفرانس جهانی مکانیک خاک و مهندسی پی شکل‌گیری پدیده قوس زدگی در مواد ژئوتکنیکی را مطرح کرد [۵]. وی با انجام یک سری مدلسازی فیزیکی نشان داد که چگونه پدیده قوس زدگی در خاک اتفاق می‌افتد. ترزاقی در مدل خود جعبه بزرگی که دارای یک پانل متحرک در قسمت مرکزی سطح زیرینش بود را از خاک دانه‌ای پر کرده و سپس پانل متحرک را به آرامی به سمت پایین حرکت داد. در ابتدا و قبل از هرگونه جابجایی در

در معدنکاری روباز، موضوع پایدارسازی دیواره‌های کاواک و جلوگیری از ریزش دیواره‌ها همواره یکی از موضوعات بسیار مهم بوده است. با پیشرفت تکنولوژی استخراج و افزایش ظرفیت ماشین آلات، امروزه منابع بیشتری از ماده معدنی به عنوان ذخیره قابل استخراج محسوب شده و در نتیجه عمق کاواکها روز به روز در حال افزایش می‌باشد. به موازات این پیشرفت‌ها علم ژئوتکنیک باید قادر به توسعه روشها و تکنیکهایی برای پاسخگویی به نیاز بخش استخراج معدن باشد. روشهای استخراج ذخایر لایه‌ای مواد معدنی از جمله زغالسنگ شدیداً وابسته به شرایط لایه‌ها بوده و هندسه دیواره‌های کاواک در استخراج به روش روباز متأثر از عمق و شیب لایه‌بندی خواهد بود. در صورت وجود لایه‌هایی با شیب ملایم و عمق کمتر از ۱۵ متر جای هیچگونه نگرانی در مورد ناپایداری دیواره‌های کاواک نیست ولی در استخراج لایه‌هایی با شیب تند و عمق بیش از ۳۰ متر، موضوع ناپایداری دیواره‌ها باید در طراحی مورد توجه ویژه قرار گیرد [۱].

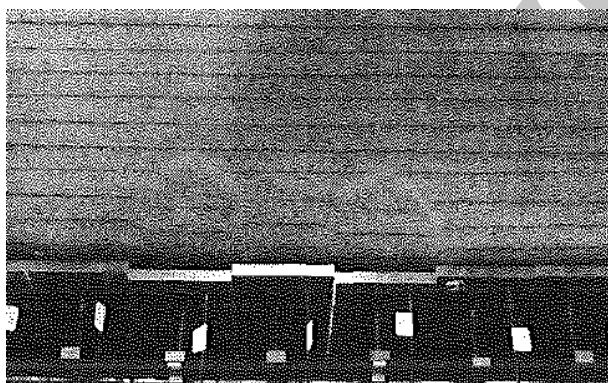
در صورت وجود سطوح ناپیوستگی با پتانسیل لغزش صفحه‌ای در دیواره تحت حفاری کاواک معدن، پایداری آن دیواره از کاواک با ادامه حفاری و استخراج تهدید خواهد شد. برای جلوگیری از لغزش دیواره و انجام معدنکاری ایمن در چنین شرایطی دو روش مرسوم وجود دارد که عبارتند از برداشت جزئی یا کلی توده خاک و سنگ ناپایدار و یا تقویت آن گرچه در برخی موارد که گستردگی سطح ناپیوستگی و به تبعیت آن توده ناپایدار خیلی زیاد باشد، ممکن است هیچکدام از این دو روش از نظر اقتصادی قابل توجیه نباشد. در این صورت با داشتن درک درستی از پدیده قوس زدگی و چگونگی شکل‌گیری آن در دیواره تحت حفاری می‌توان با تقویت کردن تنها نواحی تمرکز تنش یعنی بخشهایی از دیواره که در آنها تمرکز تنش اتفاق افتاده و متحمل بار بیشتر می‌شوند، از تخریب دیواره جلوگیری کرد [۲].

این انتقال فشار از بخش‌های جابجا شده خاک به بخش‌های ساکن مجاور آن را قوس زدگی در خاک نامید.

پس از معرفی این پدیده در خاکهای دانه ای توسط ترزاقی، تحقیقات بسیاری برای بررسی تأثیر این پدیده در مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک از جمله سازه‌های حائل، تونل‌ها و حفرات زیرزمینی و تحلیل پایداری شروانی‌ها انجام شد. بوسچر^۳ و گری^۴ در سال ۱۹۸۶ با انجام یک سری مدلسازی فیزیکی شکل گیری پدیده قوس زدگی را در شروانی های خاکی مورد مطالعه قرار دادند [7]. مدل فیزیکی بوسچر و گری در شکل ۲ نشان داده شده است.



الف) تصویر شماتیک از مدل فیزیکی و سیستم ابزار دقیق آن

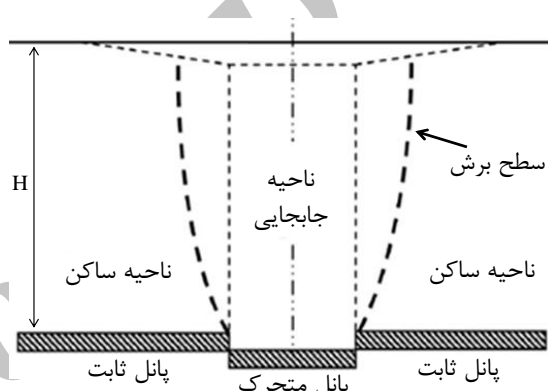


ب) الگوی ناحیه تسلیم در پشت گیت جابجا شده

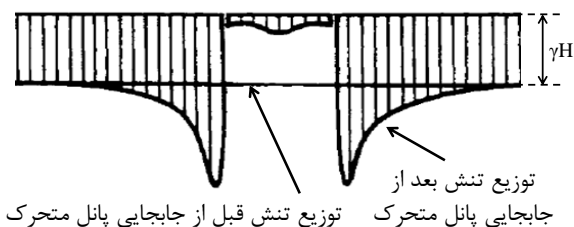
شکل ۲: مدلسازی فیزیکی بوسچر و گری در سال ۱۹۸۶ برای مطالعه پدیده قوس زدگی در شروانی‌های خاکی [۷]

همانطور که در شکل ۲-الف دیده می‌شود، در مدل بوسچر و گری خاک دانه‌ای با یک زاویه شیب مشخص توسط گیت‌های حائل قائم نگهداشته داشته شد. سپس بعضی از گیت‌ها حول

پانل متحرک، فشار قائم وارد بر سطح زیرین جعبه در همه جا یکسان و برابر با حاصل ضرب عمق لایه خاک در وزن مخصوص آن (γH) اندازه گیری شد ولی پس از جابجایی پانل متحرک، فشار قائم وارد بر آن کاهش یافته و در مقابل فشار قائم وارد بر پانلهای ثابت در اطراف پانل متحرک افزایش یافت. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، با جابجایی پانل خاک روی آن نیز تمایل به حرکت رو به پایین داشته که منجر به ایجاد کرنش برشی بین ناحیه خاک روی پانل و نواحی ساکن اطراف آن شده و یک سطح برش در مرز بین این دو ناحیه ایجاد می‌شود.



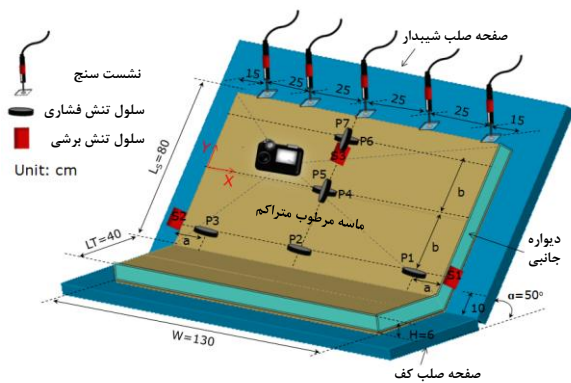
الف) تصویر شماتیک مدل



ب) توزیع تنش قائم بر روی سطح زیرین خاک

شکل ۱: مدل فیزیکی ترزاقی برای توضیح پدیده قوس زدگی در خاکهای دانه ای [۶]

مقاومت برشی خاک در راستای سطح برش تمایل به مقابله با حرکت نسبی دو ناحیه داشته و منجر به کاهش فشار در ناحیه متحرک و افزایش فشار در نواحی ساکن مجاور می‌گردد. بنابراین فشار قائم روی پانل به اندازه مؤلفه قائم مقاومت برشی اعمال شده بر روی سطح برش کاهش یافته و از طرف دیگر به همین اندازه بر فشار قائم وارد بر پانلهای ثابت افزوده خواهد شد. ترزاقی



(ب) تصویر شماتیک مدل ابزاربندی شده

شکل ۳: مدل فیزیکی برای مطالعه پدیده قوس زدگی در شیروانی‌های تحت حفاری [۸]

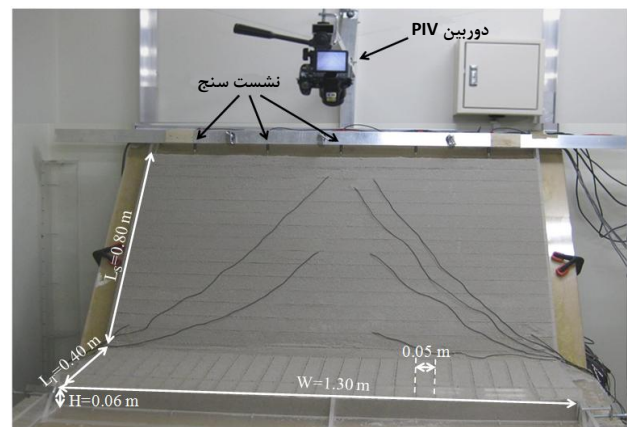
یکی از بحرانی‌ترین حالات شیروانی تحت حفاری حالتی است که یک سطح مستعد لغزش صفحه‌ای در داخل شیروانی موجود باشد بطوریکه با انجام حفاری در بخش جلویی شیروانی، سطح مستعد لغزش تحریک شده و لغزش آغاز شود. این امر می‌تواند منجر به لغزشی با خسارات مالی و جانی قابل توجه شود. خسروی و همکارانش در سالهای ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ میلادی با انجام یک سری مدلسازی فیزیکی موضوع قوس‌زدگی در شیروانی‌های تحت حفاری را مورد مطالعه قرار دادند [۹-۸]. طرحی شماتیک و تصویری از مدل فیزیکی ایشان در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای ساخت این مدل از ماسه سیلیکای شماره ۶ با منحنی توزیع دانه بندی نشان داده شده در شکل ۴ و خصوصیات لیست شده در جدول ۱ استفاده شده است.

محور افقی پایین اندکی به عقب چرخانده شده و تغییرات فشار خاک وارد بر آنها توسط فشارسنج اندازه‌گیری شد. الگوی ناحیه تسلیم در پشت گیت جابجا شده در شکل ۲-ب نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که جابجایی خاک پشت گیت تا بالای شیب ادامه پیدا نکرده بلکه تا فاصله مشخصی گسترش پیدا کرده و متوقف شده است. قابل توجه آنکه مرز بین ناحیه تسلیم و ناحیه ساکن خاک شکل قوسی به خود گرفته که مبین شکل‌گیری پدیده قوس‌زدگی در پشت شیب است. اندازه‌گیری تغییرات فشار خاک وارد بر گیتها نیز نشان دهنده افزایش تدریجی فشار بر روی گیت‌های متحرک و کاهش تدریجی فشار بر روی گیت‌های ثابت بود که باز هم مبین پدیده قوس‌زدگی در شیروانی بوده و با نتایج ترزاقی ۱۹۳۶ کاملاً همخوانی داشت.

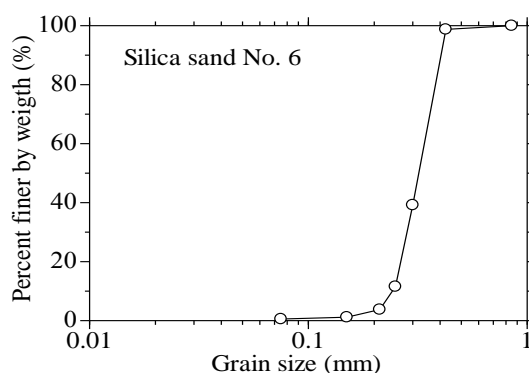
۳- قوس زدگی در شیروانی تحت حفاری

عبارت "شیروانی تحت حفاری" به آن دسته از شیروانی‌هایی اشاره دارد که عملیات حفاری در بخش جلویی آنها در حال انجام است. این نوع شیروانی‌ها بخصوص در معادن روباز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و مستلزم ارزیابی هستند.

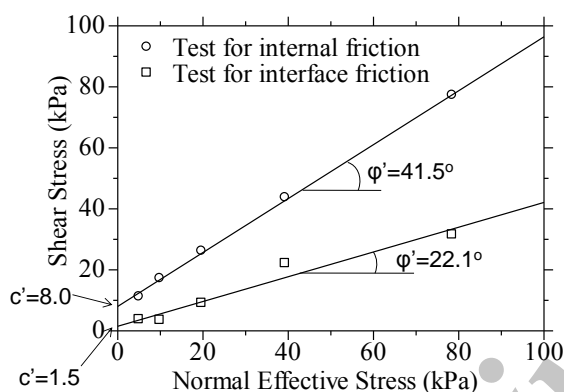


(الف) تصویر مدل ابزاربندی شده قبل از انجام حفاری

به داخل ناحیه حفاری شده داشته و از خود مقداری کرنش نشان می‌دهد. از طرف دیگر چون نواحی اطراف ناحیه کرنش یافته میل به سکون دارند، کرنش برشی بین این نواحی ایجاد می‌شود. در نتیجه این اتفاقات قسمتی از نیروی رانش از قسمت کرنش یافته مرکزی شروانی به نواحی ساکن اطراف منتقل شده و بدین ترتیب پدیده قوس‌زدگی شکل می‌گیرد (شکل ۶-ب). در نتیجه این پدیده مسیره‌های تنش طوری توزیع مجدد می‌یابد که بیشتر بار رانشی به نواحی مقاومتر در طرفین شروانی منتقل شده و در حالت کلی بر پایداری شروانی افزوده می‌شود.



شکل ۴: منحنی توزیع دانه بندی ماسه سیلیکای شماره ۶ استفاده شده در مدلسازی فیزیکی



شکل ۵: پارامترهای مقاومت برشی ماسه سیلیکای شماره ۶ و مقاومت برشی بین ماسه و صفحه صلب در مدلسازی فیزیکی [۸]

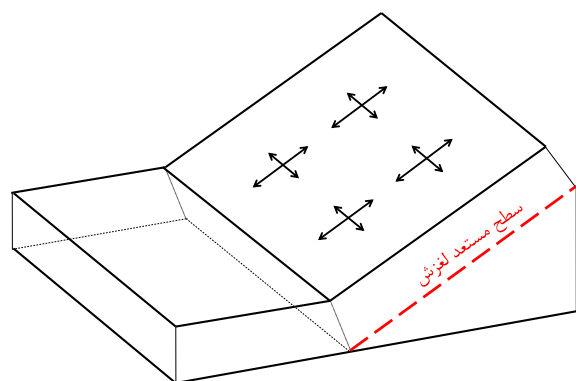
نکته قابل توجه آنکه بر اثر انتقال بار از ناحیه مرکزی شروانی به طرفین آن نواحی تمرکز تنش بوجود می‌آید که در نوع شکست شروانی نقش مهمی را ایفا خواهند کرد. ادامه حفاری در جلوی شروانی و بزرگتر شدن ناحیه حفاری شده، نهایتاً می‌تواند منجر به شکست شروانی شود. برای این نوع شروانی‌ها دو نوع شکست می‌توان انتظار داشت که در شکل ۷ به صورت تصاویری از مدل‌های فیزیکی نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات ماسه سیلیکای شماره ۶ استفاده شده در مدلسازی فیزیکی [۸]

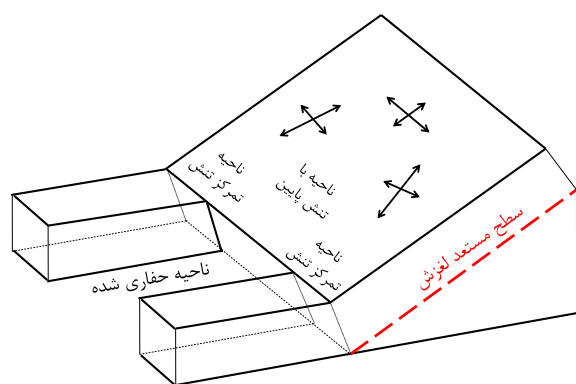
1388 kg/m^3	چگالی ^۵ (ρ)
0.33 mm	قطر متوسط دانه ها ^۶ (D_{50})
$1/42$	ضریب یکنواختی ^۷ (Cu)
$2/65$	وزن مخصوص ^۸ (G_s)
$1/132$	نسبت پوکی ^۹ حداکثر (e_{max})
$0/711$	نسبت پوکی حداقل (e_{min})

برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی ماسه مذکور و همچنین مقاومت برشی بین ماسه و صفحه صلب زیرین در مدل، یک سری آزمون برش مستقیم انجام شده است که نتایج آن در شکل ۵ قابل مشاهده است.

در شکل ۶ یک شروانی با سطح ناپیوستگی مستعد لغزش صفحه‌ای به صورت شماتیک نشان داده شده است. با انجام عملیات حفاری و خاکبرداری در جلوی شروانی، آن قسمت از شروانی که بالای ناحیه حفاری شده واقع است میل به حرکت



الف) قبل از انجام حفاری



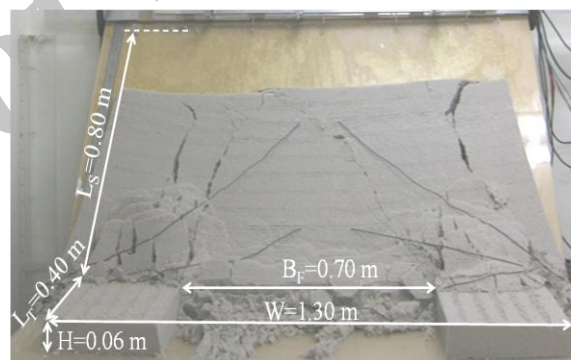
ب) بعد از حفاری و شکل‌گیری پدیده قوس زدگی

شکل ۶: تصویر شماتیک از شیروانی تحت حفاری

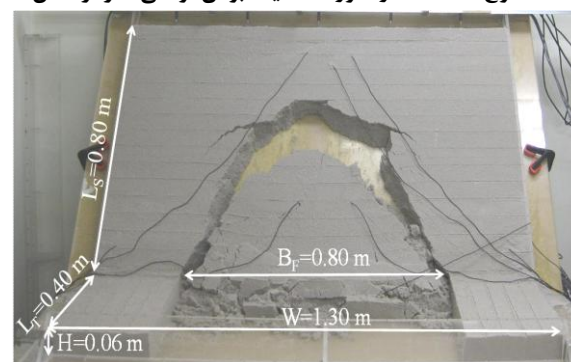
سانتریفیوژ ژئوتکنیکی^{۱۰} انجام شد [۱۱]. نتایج آن تحقیق نشان می‌دهد که وقوع پدیده قوس زدگی در شیروانی تحت حفاری مستقل از مقیاس مدل خواهد بود. با این وجود حداکثر دهانه پایدار ناحیه حفاری شده به پارامترهای مختلفی از جمله پارامترهای مقاومتی مواد تشکیل دهنده شیروانی و سطح مستعد لغزش و هندسه شیروانی بستگی خواهد داشت.

اندازه حداکثر دهانه پایدار ناحیه حفاری شده در شیروانی تحت حفاری توسط نویسنده در سال ۲۰۱۲ میلادی به صورت رابطه زیر ارائه شده است [۱۰].

مطابق شکل ۷-الف در صورتی که نواحی تمرکز تنش در طرفین ناحیه حفاری شده قادر به تحمل بار تحمیل شده نباشند، شکست در این نواحی اتفاق افتاده و منجر به شکست کل شیروانی خواهد شد. ولی همانگونه که در شکل ۷-ب نشان داده شده است، اگر نواحی تمرکز تنش به اندازه کافی مقاوم باشند، شیروانی تا دامنه حفاری بیشتری نسبت به حالت قبل پایدار خواهد ماند و نهایتاً شکستی قوسی شکل در بخش مرکزی شیروانی اتفاق افتاده و شیروانی دچار شکست کلی نخواهد شد. بنابراین مقاوم سازی نواحی تمرکز تنش در شیروانی‌های تحت حفاری نه تنها امکان حفاری ایمن تا دامنه‌ای وسیع تر را فراهم می‌سازد، بلکه نوع شکست نهایی در شیروانی را نیز از شکست کلی شیب به شکستی کوچکتر و محلی تغییر می‌دهد. از این مزایا در بخش بعدی استفاده شده است تا تکنیکی برای افزایش پایداری دیواره‌های تحت حفاری معادن روباز ارائه شود.



الف) نوع شکست در صورت ضعیف بودن نواحی تمرکز تنش

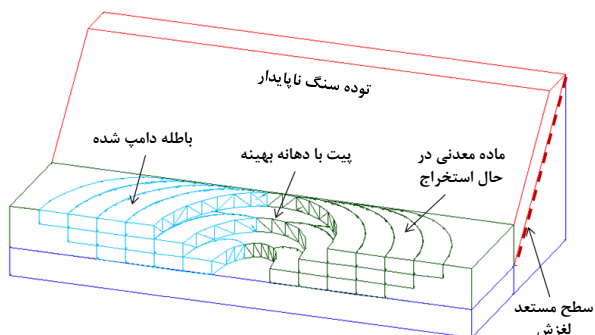


ب) نوع شکست در صورت مقاوم بودن نواحی تمرکز تنش

شکل ۷: تصویر انواع شکست ممکن در شیروانی تحت حفاری [۸]

به منظور بررسی اثر مقیاس در وقوع پدیده قوس زدگی در شیروانی تحت حفاری، یک سری مدلسازی فیزیکی با استفاده از

مسیر باربری سنگ باطله می تواند کاهش قابل توجهی در هزینه معدنکاری را به همراه داشته باشد.

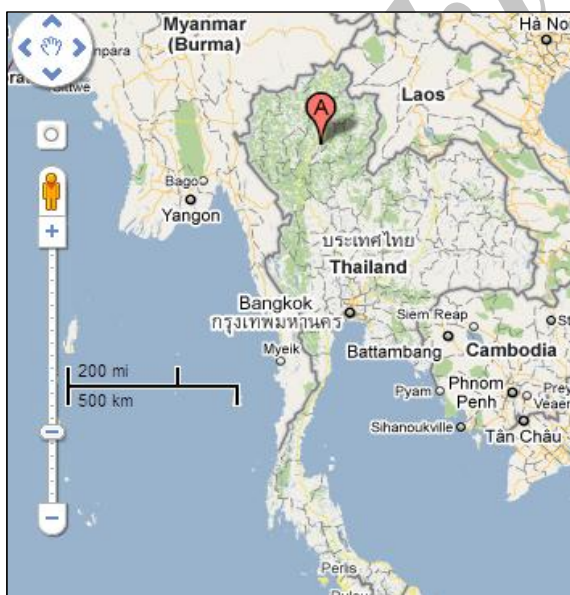


شکل ۸: تکنیک بار تعادلی به عنوان روشی جدید و اقتصادی برای پایداری سازی شیروانی تحت حفاری

۵- مطالعه موردی

۵-۱- معدن زغالسنگ ماء-موه

معدن زغالسنگ ماء-موه در استان لامپانگ تایلند و در فاصله ۶۳۰ کیلومتری شمال شهر بانکوک واقع است (شکل ۹). این معدن با وسعت حدود ۳۸ کیلومتر مربع بزرگترین معدن روباز زغالسنگ ناحیه جنوب شرق آسیا به حساب می آید [۲].



شکل ۹: موقعیت معدن زغالسنگ ماء-موه در کشور تایلند (گرفته شده از سایت <https://maps.google.com>)

$$B_f = \frac{k\sigma_c}{(\gamma + \gamma_w) \sin \alpha_f - (\gamma - \gamma_w) \tan \phi_i \cos \alpha_f - \frac{c_i}{T}} \quad (1)$$

بطوریکه:

B_f : حداکثر دهانه پایدار (متر)

k : ضریب قوس زدگی (برای حالت شکست کلی $k=4/\pi$ (شکل ۷-الف)، برای حالت شکست قوسی $k=\cos(\phi_r)$ (شکل ۷-ب))

α_f : زاویه سطح مستعد لغزش (درجه)

ϕ_i : زاویه اصطکاک داخلی سطح مستعد لغزش (درجه)

c_i : چسبندگی سطح مستعد لغزش (نیوتن بر متر مربع)

γ : وزن مخصوص توده سنگ (نیوتن بر متر مکعب)

ϕ_r : زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ (درجه)

T : ضخامت متوسط توده سنگ روی سطح مستعد لغزش (متر)

σ_c : مقاومت فشاری یک محوره توده سنگ (نیوتن بر متر مربع)

۴- بار تعادلی در پایداری سازی شیروانی های تحت حفاری

با مشخص بودن خصوصیات مقاومتی مواد تشکیل دهنده و هندسه شیروانی می توان با استفاده از رابطه ۱، حداکثر دهانه پایدار ناحیه حفاری در جلوی شیروانی را تخمین زده و با اعمال یک فاکتور ایمنی مناسب، دهانه بهینه حفاری را تعیین کرد. در زمان اجرا باید همواره دهانه حفاری کمتر یا مساوی مقدار بهینه محاسبه شده نگه داشته شود. بدین ترتیب همانگونه که در شکل ۸ به صورت شماتیک نشان داده شده است، پس از رسیدن به دهانه بهینه، همزمان با استخراج ماده معدنی و گسترش دهانه از یک طرف، ناحیه مقابل با بار تعادلی پر شود تا تنش انتقالی ناشی از قوس زدگی در دیواره همواره تکیه گاهی مقاوم داشته باشد.

فرایند حفاری و دامپ تا استخراج کامل ماده معدنی ادامه پیدا می کند. از آنجاییکه در معادن روباز همیشه حجم بالایی از مواد در حال جابجایی را سنگ باطله تشکیل می دهد، سنگ باطله می تواند بهترین گزینه به عنوان بار تعادلی باشد. بنابراین بکارگیری این تکنیک در معادن روباز نه تنها به پایداری سازی شیروانی مستعد لغزش کمک می کند، بلکه با کوتاه تر کردن

دیواره شمال شرقی شده است که تصویری از آن در شکل ۱۲ دیده می‌شود. توده سنگ لغزش یافته در این شکل که با خط چین مشخص شده است طولی در حدود ۶۰۰ متر از دیواره کاواک را در بر گرفته و عملیات استخراج در این دیواره را با مشکل مواجه کرده است [۱۳]. به دنبال این اتفاق عملیات استخراج در دیواره شمال شرقی معدن به حالت تعلیق درآمده و مسؤلین را به فکر راه حلی برای رفع مشکل ناپایداری در این دیواره انداخت. با توجه به وسعت دیواره ناپایدار، برداشت کل توده سنگ ناپایدار و یا تقویت آن از نظر اقتصادی قابل توجیه نبود و بنابراین عملیات استخراج این دیواره به مدت حدود ۱۲ سال متوقف ماند.

۳-۵- مطالعه علت ناپایداری دیواره شمال شرقی

در شکل ۱۳ یک مقطع قائم از دیواره شمال شرقی کاواک معدن نشان داده شده است. شیب متوسط دیواره ۱۸ درجه به سمت داخل کاواک بوده و لایه های Q و K نشان داده شده در شکل مشخص کننده لایه های زغالسنگ است که باید استخراج شود.

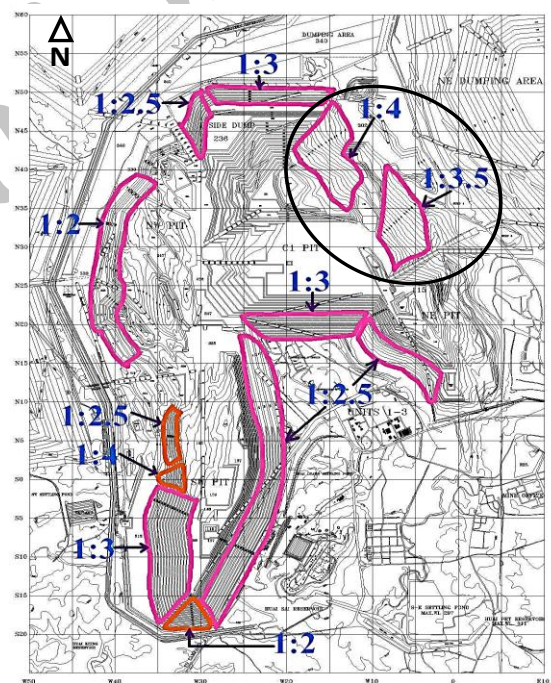


شکل ۱۱: نقشه لغزش در بخشی از دیواره شمال شرقی در سال ۱۹۹۶ میلادی [۱۲]

این معدن با تولید حدود ۱۷ میلیون تن زغالسنگ در سال، بیش از ۸۰ درصد تولید زغالسنگ کل کشور تایلند را در بر می‌گیرد. با توجه به اینکه زغالسنگ ارزانتترین نوع انرژی در این کشور است و بر اساس آمار سال ۲۰۰۸ میلادی حدود ۲۲ درصد برق مصرفی کل کشور از نیروگاه های حرارتی وابسته به این معدن تأمین می‌شود، می‌توان به اهمیت ادامه عملیات معدنکاری در این معدن پی برد [۲، ۱۲].

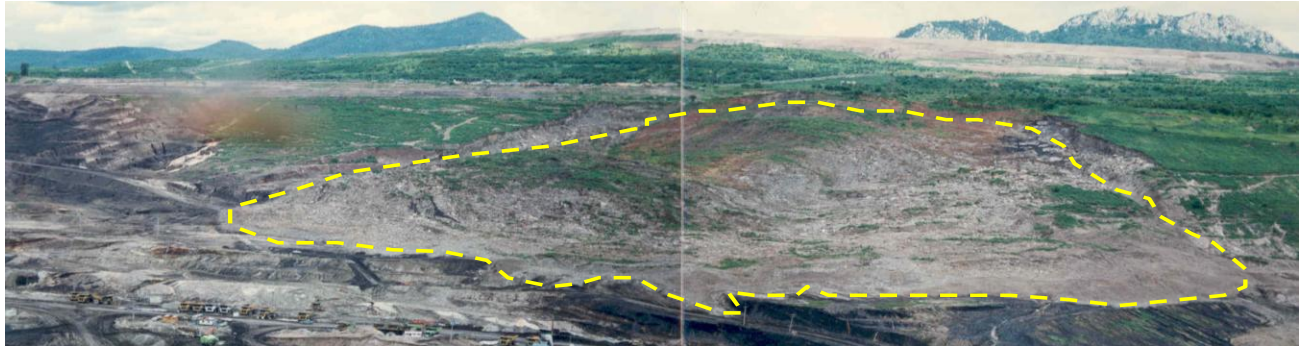
۵-۲- ناپایداری دیواره شمال شرقی

در شکل ۱۰ نمای بالایی از کاواک معدن زغالسنگ ماء-موه با نسبت شیب دیواره های کاواک نشان داده شده است که در آن دیواره ناپایدار شمال شرقی مشخص شده است. اعداد نشان داده شده در این شکل مبین نسبت شیب دیواره های کاواک است.

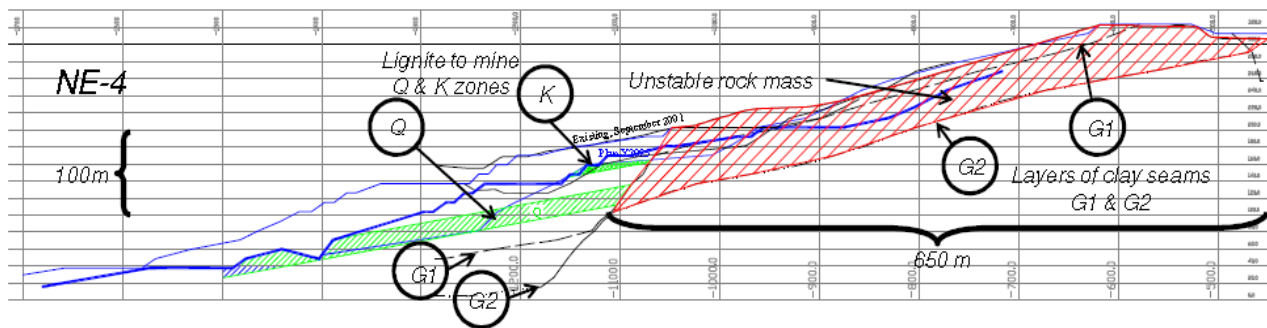


شکل ۱۰: کاواک معدن زغالسنگ ماء-موه که در آن دیواره ناپایدار شمال شرقی مشخص شده است [۱۲]

از سال ۱۹۹۰ میلادی لغزشهایی در این دیواره به وقوع پیوسته است که نقشه مربوط به یکی از بزرگترین آنها، لغزش سال ۱۹۹۶ میلادی، در شکل ۱۱ نشان داده شده است [۱۲]. دو سال پس از وقوع این لغزش، توده سنگ جابجا شده مجدداً به سمت داخل کاواک حرکت کرده و منجر به لغزش ناحیه وسیع تری از



شکل ۱۲: لغزش در سال ۱۹۹۸ میلادی در بخشی از دیواره شمال شرقی



شکل ۱۳: توده سنگ ناپایدار دیواره شمال شرقی معدن زغالسنگ ماء-سوه [۱۳]

وجود لایه نازک رس (G2) به عنوان سطح مستعد لغزش در دیواره باعث ناپایداری بخش عظیمی از توده سنگ (ناحیه هاشور خورده روی G2) شده است. به دنبال بازدیدهای مکرر از معدن و جمع آوری نمونه های لازم خصوصیات مقاومتی سطح مستعد لغزش و توده سنگ تشکیل دهنده دیواره تعیین شد که در ادامه آورده شده است.

به کمک ابزار نمونه گیری مخصوص نشان داده شده در شکل ۱۴ از یک رخنمون لایه رس G2 تعداد متعددی نمونه های دست نخورده برداشت شده و تحت آزمون برش مستقیم قرار گرفت.

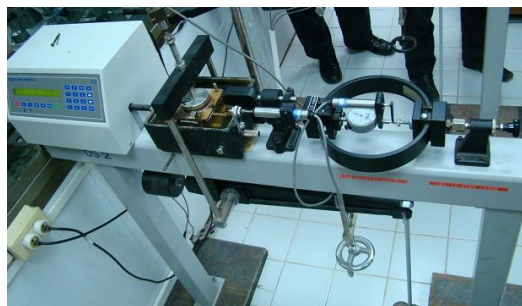


الف) ابزار مخصوص برداشت نمونه دست نخورده

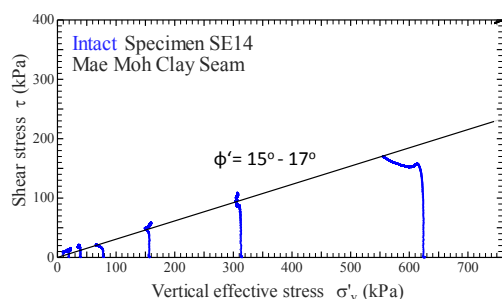


ب) محل نمونه برداشت شده

شکل ۱۴: برداشت نمونه های رس دست نخورده به کمک ابزار نمونه گیری مخصوص

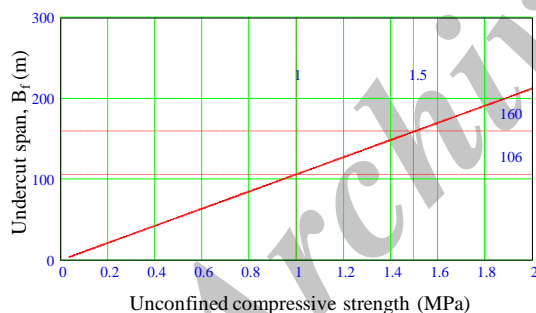


الف) دستگاه آزمایش برش مستقیم مربوط به آزمایشگاه ژئومکانیک معدن زغالسنگ ماء-موه



ب) نتایج آزمونهای برش مستقیم

شکل ۱۵: آزمایش برش مستقیم روی نمونه های رس برداشت شده از دیواره ناپایدار شمال شرقی



شکل ۱۶: حداکثر دهانه پایدار استخراج به عنوان تابعی از مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ مستعد لغزش

برای این منظور از دستگاه آزمایش برش مستقیم مربوط به آزمایشگاه ژئومکانیک معدن زغالسنگ ماء-موه نشان داده شده در شکل ۱۵-الف استفاده شد. با توجه به شرایط قرارگیری لایه نازک رس در میان لایه های سنگ می توان تغییر حجم لایه رس را در حین جابجایی و برش ناچیز فرض کرد و از طرفی به دلیل بارندگی زیاد در ناحیه مورد مطالعه، نمونه ها تحت شرایط حجم ثابت و کاملاً اشباع مورد برش قرار گرفتند. نتایج آزمونهای برش مستقیم در شکل ۱۵-ب در محورهای مختصات تنش برشی - تنش نرمال قائم نشان داده شده است.

ملاحظه می شود که رس مورد مطالعه دارای زاویه اصطکاک داخلی متوسط ۱۵ تا ۱۷ درجه و چسبندگی تقریباً صفر است.

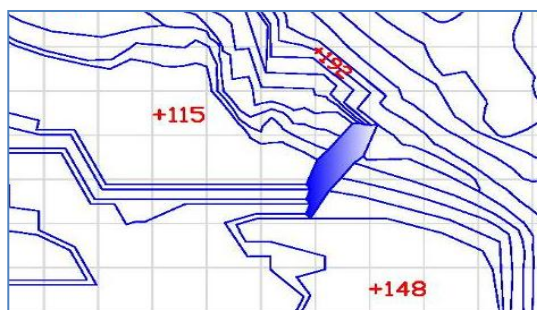
۴-۵- بکارگیری تکنیک بار تعادلی و طراحی مراحل استخراج

با انجام یک سری آزمونهای آزمایشگاهی یک محوره، سه محوره و برش مستقیم روی نمونه های شیل، پارامترهای مقاومتی آن تعیین شد که در جدول ۲ خلاصه شده است.

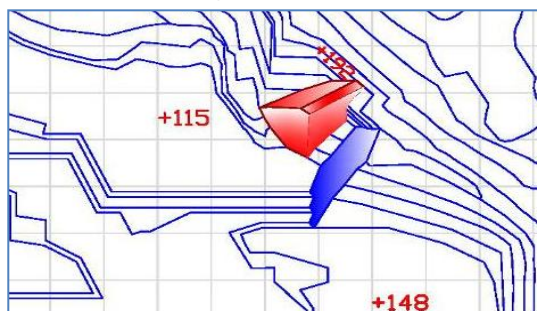
با استفاده از رابطه (۱)، حداکثر دهانه پایدار استخراج به عنوان تابعی از مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ مستعد لغزش در شکل ۱۶ رسم شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می شود که در صورت تضمین مقاومت فشاری تک محوری ۱ MPa و 1.5 MPa برای توده سنگ، می توان دهانه استخراج را به ترتیب تا ۱۰۶ متر و ۱۶۰ متر گسترش داد.

جدول ۲- پارامترهای مقاومتی شیل در دیواره شمال شرقی معدن زغالسنگ ماء-موه

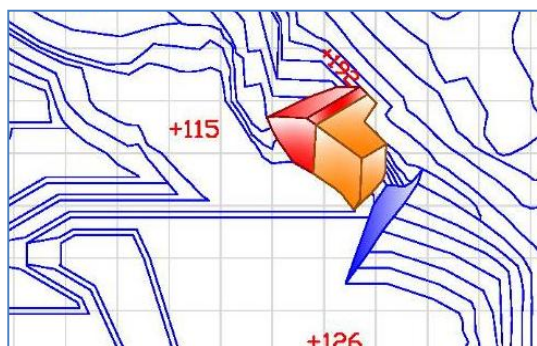
وزن مخصوص (γ)	۱۹/۱۲ kN/m ³
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	۴۵°
چسبندگی (c)	۹۳۲ kPa
مقاومت فشاری یک محوری حداکثر (σ_{cp})	۴/۵ MPa
مقاومت فشاری یک محوری باقیمانده (σ_{cr})	۰/۳۳ MPa



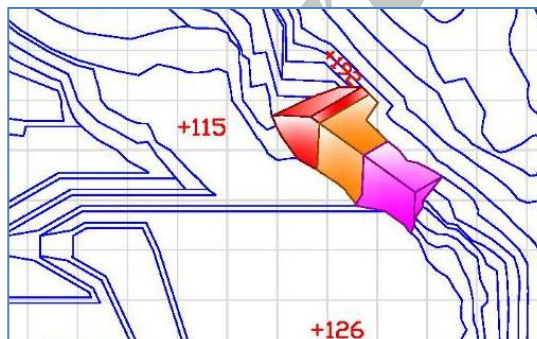
الف) مرحله اول استخراج زغالسنگ



ب) مرحله اول دامپ باطله



ج) مرحله دوم استخراج و دامپ همزمان



د) مرحله سوم استخراج و دامپ همزمان

شکل ۱۸: فرایند استخراج زغالسنگ و دامپ سنگ باطله به عنوان بار تعادلی

ناحیه ای به عرض ۳۰۰ متر برای اعمال آزمایشی روش پیشنهادی انتخاب شده و پس از بررسیها و ملاحظات لازم از دیدگاه عملیاتی و با توجه به خصوصیات مقاومتی توده سنگ، دهانه استخراج ۱۰۰ متر برای این ناحیه از معدن مناسب تشخیص داده شد. همانگونه که در شکل ۱۷ نشان داده شده



شکل ۱۷: ناحیه انتخاب شده برای اعمال تکنیک بار تعادلی طی مراحل استخراج

است، ناحیه مورد نظر به سه بخش، هر کدام به عرض ۱۰۰ متر، تقسیم بندی شد. فرایند استخراج زغالسنگ و دامپ سنگ باطله (بار تعادلی) به ترتیب از بخش ۱ تا بخش ۳ در شکل ۱۸ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

شکل ۱۹ تصویری از انجام عملیات استخراج در ناحیه آزمایشی دیواره شمال شرقی معدن ماء-موه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: تصویری از انجام عملیات استخراج زغالسنگ در دیواره شمال شرقی با اعمال تکنیک بار تعادلی به منظور حفظ پایداری دیواره

تشکیل دهنده این دیواره و در واقع سنگ باطله اصلی این معدن شیل بوده که به عنوان بار تعادلی مورد استفاد قرار شد. یک ناحیه ناپایدار به طول حدود ۳۰۰ متر از دیواره شمال شرقی به عنوان ناحیه آزمایشی انتخاب شده و پس از بررسیها و مطالعات انجام گرفته در محل و آزمایشگاه، دهانه استخراج ۱۰۰ متر برای انجام عملیات استخراج در این ناحیه مناسب تشخیص داده شد. موفقیت آمیز بودن عملیات استخراج بر مبنای تکنیک ارائه شده نشان داد که این تکنیک می تواند روشی اقتصادی و ایمن برای پایدارسازی دیواره های مستعد لغزش در حین معدنکاری روباز باشد.

۷- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی انستیتو فناوری توکیو^{۱۱} کشور ژاپن و وزارت نیروی کشور تایلند انجام شده است که از مدیران این سازمانها کمال تشکر را دارد. همچنین نویسنده بر خود لازم می داند از اساتید بزرگوار دپارتمان مهندسی عمران انستیتو فناوری توکیو، بویژه آقایان دکتر جیرو تاکمورا^{۱۲} و دکتر تیراپانگ پیپانگسا^{۱۳} تشکر و قدردانی نماید.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

پس از معرفی اجمالی پدیده قوس زدگی در مواد ژئوتکنیکی، چگونگی شکل گیری قوس فشار در شیروانی های تحت حفاری مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. نشان داده شد که با تقویت نواحی تمرکز تنش در یک شیروانی تحت حفاری یا دیواره معدن می توان دیواره مورد نظر را تا یک دهانه مشخص حفاری پایدار نگه داشت. در ادامه بر این اساس تکنیک استفاده از بار تعادلی برای پایدارسازی دیواره های تحت حفاری در معادن روباز پیشنهاد شد. با توجه در دسترس بودن حجم بالای سنگ باطله در معادن روباز، استفاده از سنگ باطله به عنوان بار تعادلی پیشنهاد شد. از مزایای اصلی این تکنیک می توان علاوه بر کمک به پایدارسازی دیواره های تحت حفاری، به کاهش هزینه معدنکاری به دلیل کاهش حجم برداری و همچنین کاهش هزینه های باربری سنگ باطله اشاره کرد.

به عنوان یک مطالعه موردی، تکنیک بار تعادلی در معدن زغالسنگ ماء-موه واقع در شمال کشور تایلند به کار گرفته شد. وجود یک زون برشی در دیواره شمال شرقی این معدن منجر بر بروز برخی مشکلات در پایداری این دیواره شده بود. سنگ اصلی

۸- منابع و مراجع

1. Hustrulid, W. A., McCarter, M. K., and Van Zyl, Dirk J.A.; 2000; "Slope stability in surface mining", Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Ins. (SME).
2. Pipatpongsa T., Khosravi M. H., Doncommul P. and Mavong N.; 2009; "Excavation problems in Mae Moh lignite open-pit mine of Thailand", Japanese Geotechnical Society, Proceedings of Geo-Kanto, pp. 459-464.
3. Handy, R. L.; 1985; "The arch in soil arching", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 3, pp. 302-318.
4. Janssen, H. A.; 1895; *Versuche uber getreidedruck in silozellen*. Z. Ver. deut. Ingr. 39, p. 1045 (partial

- Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 193-205.
10. Khosravi, M. H.; 2012; "Arching effect in geomaterials with applications to retaining walls and undercut slopes", Department of International Development Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, PhD Dissertation.
 11. Khosravi, M. H., Takemura, J. and Pipatpongsa, T.; 2013, "Centrifugal Modeling of Undercut Slopes Subjected to Pseudo-Static Loading", 10th Int. Conference on Urban Earthquake Engineering (CUEE), Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.
 12. EGAT; 1985; "Thailand-Australia Lignite Mines Development Project", Geotechnical Report, Mae Moh Mine, Thailand.
 13. Heng, S.; 2011; "Stability of Slopes Lying along Clay Seams and Load Transfer Mechanisms in Counterweight Embankment", Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, PhD Dissertation.
5. Terzaghi, K.; 1936; "Stress distribution in dry and saturated sand above a yielding trap-door", The First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard University, Cambridge, pp. 307-311.
 6. Terzaghi, K.; 1943; "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley and Sons, Inc., New York.
 7. Bosscher, P.J. and Gray, D. H.; 1986; "Soil Arching in Sandy Slopes", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 6, pp. 626-645.
 8. Khosravi, M.H., Pipatpongsa, T., Takahashi, A., and Takemura, J.; 2011; "Arch action over an excavated pit on a stable scarp investigated by physical model tests", Soils and Foundations, Vol. 51, No. 4, pp. 723-735.
 9. Khosravi, M.H., Tang L., Pipatpongsa T., Takemura J. and Doncommul, P.; 2012; "Performance of counterweight balance on stability of undercut slope evaluated by physical modeling", International

¹ Janssen² Terzaghi³ Bosscher⁴ Gray⁵ Density⁶ Average particle diameter⁷ Uniformity coefficient⁸ Specific gravity⁹ Void ratio¹⁰ Geotechnical centrifuge¹¹ Tokyo Institute of Technology¹² Dr. Jiro Takemura¹³ Dr. Thirapong Pipatpongsa