

مدلسازی عددی پایه‌های زغالی در لایه‌های زغالی شیب‌دار - مطالعه موردی معدن زغال سنگ همکار

مهدی نجفی^{۱*}، میثم مطهری^۲، مهدی نوروزی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: تیر ۱۳۹۴، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

چکیده

طراحی ابعاد پایه در معدنکاری زیرزمینی به دلیل مسایل ایمنی و اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار است. به دلیل محدودیت‌های موجود در روش‌های طراحی سنتی و تجربی، امروزه روش‌های عددی به طور وسیعی برای طراحی پایه به کار می‌روند. با کاربرد این روش‌ها امکان در نظر گرفتن بعضی از عوامل، نظیر ترتیب مراحل استخراج و اثر تنش‌های محصورکننده که نمی‌توان آنها را در روش‌های تجربی منظور نمود، وجود دارد. طراحی پایه در لایه‌های شیب‌دار متفاوت از لایه‌های افقی است. پایه‌ها در شیب به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر تنش‌های فشاری و برشی هستند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار عددی *FLAC2D*، با استفاده از مدل‌های عددی مختلف (شیب متغیر لایه و عرض متفاوت پایه) به بررسی توزیع تنش‌های وارد بر روی پایه‌های بین دو کارگاه استخراج پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحلیل بر روی مدل‌های عددی در شیب‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با پایه‌های ۱۰ و ۱۵ متری نشان می‌دهد که هر چه شیب لایه و عرض پایه افزایش یابد مقدار تنش‌های قائم وارد بر پایه کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش شیب لایه تنش‌های برشی در پایه افزایش می‌یابد. در نهایت با توجه به مدلسازی عددی انجام شده می‌توان بیان نمود که در شیب‌های زیاد باید از پایه‌های با عرض بزرگتری استفاده نمود.

کلید واژه‌ها

پایه زغالی، لایه‌های شیب‌دار، مدلسازی عددی، نرم‌افزار *FLAC2D*

ارجاع به این مقاله:

نجفی، م.، مطهری، م.، نوروزی، م.، (۱۳۹۵)، مدلسازی عددی پایه‌های زغالی در لایه‌های زغالی شیب‌دار- مطالعه موردی معدن زغال سنگ همکار، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، (۱۱)۶، ۲۷-۳۸.

۱- مقدمه

خارجی پایه باعث بوجود آمدن تنش محصورکننده در قسمت میانی می‌شود.

- تاثیر شیب لایه در نظر گرفته نشده است.

با توجه به محدودیت‌های بیان شده در مورد روش‌های تجربی، استفاده از روش‌های عددی ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های عددی امکانات مناسبی را در اختیار طراح قرار می‌دهد که با استفاده از آنها می‌توان شرایط مرزی مساله، خصوصیات رفتاری پایه، کمر بالا و کمر پایین آن، چگونگی توزیع بار وارد بر پایه و نیز ترتیب مراحل استخراج را در طراحی پایه منظور نمود [۷]. نکته قابل توجه دیگر این است که به دلیل پیچیدگی روابط تحلیلی و تجربی و عدم در نظر گرفتن تأثیر شیب لایه، در مورد پایه‌های شیب‌دار بهتر است مدلسازی عددی این پایه مورد توجه جدی قرار گیرد. تاکنون بیشتر مطالعات انجام شده در مورد مدلسازی عددی پایه‌ها در لایه‌های افقی بوده است [۶-۱۱] و مطالعات زیادی بر روی مدلسازی عددی پایه در لایه‌های شیب‌دار^۴ انجام نشده است. با این حال از تحقیقاتی که به نحوی در ارتباط با لایه‌های شیب‌دار است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

دباغ و همکاران با استفاده از روش ناپیوستگی جابه‌جایی مرتبه بالا و روش تفاضل محدود به بررسی میزان نشست زمین و کرنش‌های متناظر در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار به روش جبهه‌کار بلند پرداخته‌اند. در تحقیق مذکور تنش وارد بر پایه‌ها بررسی نشده است [۱۲]. ایکسیو^۵ و همکاران (۲۰۱۴) به تحلیل پایداری پایه‌های زغالی در لایه‌های شیب‌دار که به منظور جلوگیری از نفوذ آب به داخل کارگاه استخراج برجای گذاشته می‌شوند با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی پرداخته‌اند. بررسی‌های آنها نشان داده است که روش تجربی آرایه شده برای طراحی پایه‌های مذکور همخوانی خوبی با روش‌های عددی دارد [۱۳]. ژون دی^۶ و همکاران (۲۰۱۴) به مدلسازی عددی ابعاد بهینه پایه برجای گذاشته شده در لایه زغال‌سنگ با شیب ۱۷ درجه پرداخته است. نتایج بررسی‌های انجام شده توسط جندی و همکاران بر روی ۶ مدل عددی بر روی پایه‌هایی با عرض ۳ تا ۱۰ متر نشان داده است که با افزایش عرض پایه احتمال شکست پایه کاهش می‌یابد و شکست پایه در پایه‌هایی با عرض ۳ متر بیشتر از سایرین است. نتایج بررسی‌های وی نشان داده

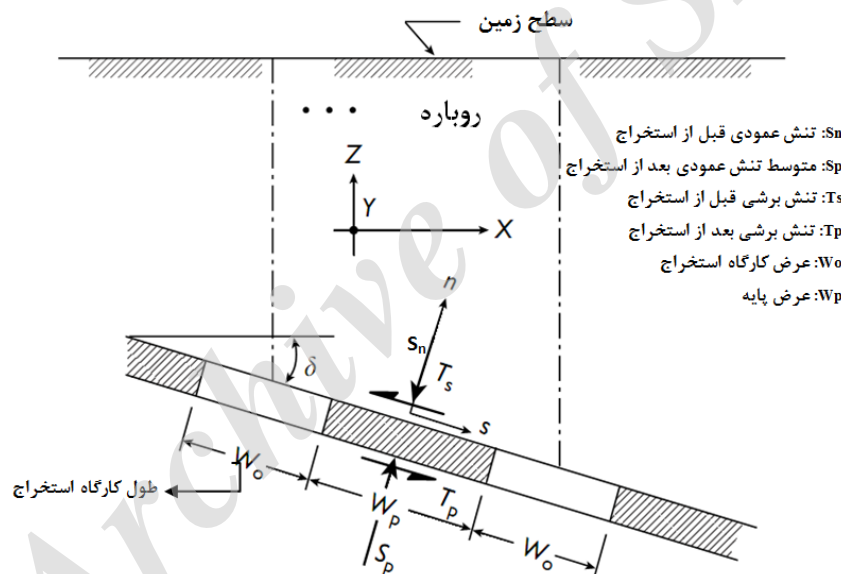
طراحی بهینه پایه در بهینه‌سازی عملیات معدن‌کاری مهم است و برای رسیدن به یک طرح ایمن و اقتصادی باید مطالعات دقیق رفتار سنگ و تحلیل پایداری فضای استخراجی انجام شود. در مبحث طراحی بهینه ابعاد پایه، هدف نهایی تعیین حداقل ابعاد پایه به ترتیبی است که ایمن بودن و اقتصادی بودن طرح را تامین کند. پارامترهایی چون ضخامت و وزن مخصوص روباره، عرض اتاق یا کارگاه، ارتفاع کارگاه، طول پایه، عرض پایه و خواص مکانیکی ماده معدنی و سنگ‌های سقف و کف کارگاه تأثیر زیادی بر الگوی توزیع تنش در پایه دارند [۱]. بار وارد بر پایه با روش‌های تحلیلی، تجربی، عددی و نیز در بعضی مواقع با انجام آزمایش‌های برجا برآورد می‌شود. مشکل اصلی برای طراحی پایه، مقاومت پایه است. تاکنون روش‌های تحلیلی و تجربی زیادی برای برآورد مقاومت پایه آرایه شده است. اولین روابط تجربی برای محاسبه مقاومت پایه در سنگ‌های نرم و برای معادن زغال‌سنگ آرایه شده است. این روابط توسط سالامون^۱ [۲]، گرینوالد^۲ [۳]، استیرت^۳ [۴] بیناوسکی [۵] و غیره آرایه شده است.

استفاده از روابط تجربی تعیین مقاومت پایه برای طراحی پایه‌ها در معادن دارای برتری‌ها و محدودیت‌هایی است. این روابط بر اساس تجربه‌های میدانی و آنالیز آماری داده‌های واقعی تدوین شده‌اند و پارامترهای ورودی پرشماری ندارند. با وجود مزایای مذکور، این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی به شرح زیر هستند [۶]:

- عمدتاً منحصر به یک ناحیه خاص جغرافیایی هستند و استفاده از آنها برای سایر نقاط خالی از اشکال نیست.
- در این روابط ویژگی‌های توده سنگ اطراف پایه نادیده گرفته شده است.
- ضرایب ثابت استفاده شده در این روابط، هیچ رابطه منطقی با پارامترهای توده سنگ پایه ندارند.
- این روابط برای پایه‌هایی با نسبت عرض به ارتفاع مشخص آرایه شده‌اند و برای تحلیل‌های خارج از آن محدوده بدون اعتبار هستند.
- در اکثر این روابط نقش تنش محصورکننده در مقاومت پایه نادیده گرفته شده است. حال آن‌که در هر پایه پوسته

می شوند. بر این اساس بررسی اثر شیب لایه بر مقاومت پایه ها در این گونه موارد از اهمیت بسزایی برخوردار است. طراحی پایه در لایه های شیب دار متفاوت از لایه های افقی است. پایه ها در شیب به طور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر تنش های فشاری و برشی هستند. بنابراین در تحلیل پایداری آنها باید معیار شکستی در نظر گرفته شود که هر دو عامل فشار و برش را در نظر بگیرد. یکی از این معیارها، معیار موهر کلمب است که به اندازه کافی این هدف را برآورده می کند. در پایه هایی که در لایه های افقی برجای گذاشته می شود، تنش های برشی ایجاد نمی شوند [۱۵].

از آنجا که کف پایه در لایه های شیب دار، افقی نیست، حتی در یک ناحیه قبل از استخراج، تنش های برشی موازی شیب و تنش های فشاری در جهت عمود بر شیب بر پایه وارد می شوند. این شرایط در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: شمایی از تنش های فشاری و برشی وارد بر پایه در لایه های شیب دار [۱۵]

استخراج، سطح تأثیر پایه و مساحت پایه است. این تنش ها بر بالا و پایین پایه وارد می شوند. برای محاسبه میزان تنش های عمودی و برشی وارد بر پایه در لایه های شیب دار، می توان از دایره موهر استفاده نمود. بر این اساس:

$$S = (\sigma - \frac{S_p}{2}) = \frac{S_p}{2} \cos(2\alpha) - \frac{T_p}{2} \sin(2\alpha) \quad (2)$$

$$T = (\tau - \frac{T_p}{2}) = \frac{S_p}{2} \sin(2\alpha) + \frac{T_p}{2} \cos(2\alpha) \quad (3)$$

است که پایه با عرض ۵ متر برای طراحی مناسب است [۱۴].

هدف از این تحقیق بررسی پایداری پایه های زغالی در شیب های مختلف است (شیب لایه متغیر، عرض پایه متغیر). برای این منظور ۶ مدل عددی در شیب های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای پایه ها با عرض ۱۰ و ۱۵ متر ایجاد شده است. در نهایت با بررسی تغییرات تنش قائم، تنش برشی و وضعیت کنتورهای پلاستیک به بررسی پایداری پایه ها در یک معدن زغال سنگ فرضی پرداخته شده است.

۲- طراحی پایه در لایه های شیب دار

در بعضی از روش های معدنکاری زیرزمینی همانند روش استخراج اتاق و پایه و جبهه کار بلند طراحی معدن به صورتی انجام می شود که پایه ها در شیب بر جای گذاشته

یک بررسی تفصیلی از تنش های وارد بر پایه در لایه های شیب دار نشان می دهد که با تقریب نزدیکی، نیروی ناشی از روباره، قبل از حفاری شبیه نیروهای بعد از حفاری هستند [۱۵]. بنابراین:

$$\begin{aligned} S_n A &= S_p A_p \\ T_s A &= T_p A_p \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن، S_n ، S_p ، T_s ، T_p ، A ، A_p به ترتیب تنش عمودی قبل از استخراج، متوسط تنش عمودی بعد از استخراج، تنش برشی قبل از استخراج، متوسط تنش برشی بعد از

$$R(\text{stress}) = [(S_p)^2 + (T_p)^2]^{0.5} \quad (7)$$

بر این اساس ضریب ایمنی پایه با توجه به معیار موهر کلمب برابر است با:

$$FS_p = \frac{\text{Pillar Strangeth}}{\text{Stress}} = \frac{R(\text{strength})}{R(\text{stress})} \quad (8)$$

بنابراین:

$$FS_p = \frac{\{[(2C) \cos(\varphi)]/[1 - \sin(\varphi - \beta)]\}}{[(S_p)^2 + (T_p)^2]^{0.5}} \quad (9)$$

با توجه به رابطه ۹ می توان بیان نمود در مورد لایه های شیب دار که تحت تنش برشی حداکثر قرار گرفته اند، زاویه β ممکن است بزرگ تر از زاویه اصطکاک داخلی φ باشد که متناسب با آن مقاومت پایه کاهش می یابد. به طور کلی مقاومت پایه با افزایش β ، کاهش می یابد [۱۵].

۳- روش تحقیق

معدن زغال سنگ همکار در فاصله ۵۰ کیلومتری غرب شهرستان راور و ۱۸۵ کیلومتری شمال غربی استان کرمان واقع شده است. در حال حاضر لایه های زغال سنگ این منطقه به روش جبهه کار کوتاه و کند و آکند به صورت سنتی استخراج می شود. ذخیره زغال سنگ معدن همکار از دو زون D و E با ذخیره اکتشافی ۳۴ میلیون تن تشکیل شده است. زون زغال سنگ خیز E دارای لایه های قابل کار $E1$ ، $E2$ و $E4$ است. لایه $E1$ عمده ترین و اقتصادی ترین لایه این زون است [۱۹]. در این تحقیق از نرم افزار $FLAC2D$ که از روش تفاضل محدود بهره می برد برای مدل سازی عددی پایه در لایه های شیب دار استفاده شده است. لازم به ذکر است به دلیل این که هدف این مطالعه، بررسی اثر شیب لایه بر مقاومت پایه های زغالی است، مدل سازی عددی برای شیب ۳۰ درجه تا ۶۰ درجه یک لایه زغالی انجام شده است. در این تحقیق فرض شده است که لایه زغالی به روش جبهه کار طولانی با کارگاه هایی به عرض ۹۰ متر استخراج شود. علاوه بر این فرض شده است که عرض پایه های بین دو کارگاه ۱۰ و ۱۵ متر است.

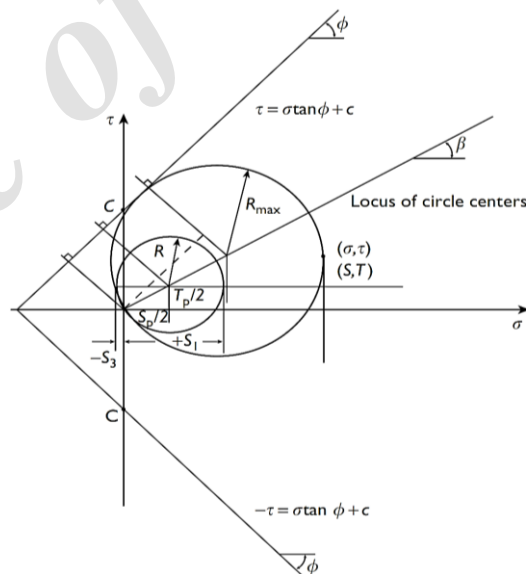
بر اساس شرایط در نظر گرفته شده، مدل عددی از دو بخش تشکیل شده است. قسمت اول لایه ی زغال سنگ

$$\left(\sigma - \frac{S_p}{2}\right)^2 + \left(\tau - \frac{T_p}{2}\right)^2 = \left[\left(\frac{S_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{T_p}{2}\right)^2\right] \quad (4)$$

$$S^2 + T^2 = R^2 \quad (5)$$

در روابط بالا، S : تنش عمودی، T : تنش برشی، α : زاویه بین متوسط تنش عمودی و خط عمود بر سطح شیب دار در نظر گرفته شده در داخل پایه و R : شعاع دایره موهر است.

دو معادله آخر نشان می دهند، شعاع دایره موهر به مرکزیت $(S_p/2, T_p/2)$ در صفحه تنش نرمال- برشی است. وقتی تنش های وارد بر پایه افزایش می یابند، متناسب با آن شعاع دایره افزایش می یابد و به بیرون از مبدأ، در صفحه تنش نرمال- برشی در امتداد شیب محور تنش نرمال در زاویه β ، جایی که $\tan(\beta) = \frac{T_p/2}{S_p/2}$ حرکت می کند. در شکل ۲ دو حالت شکست و پایداری پایه نشان داده شده است.



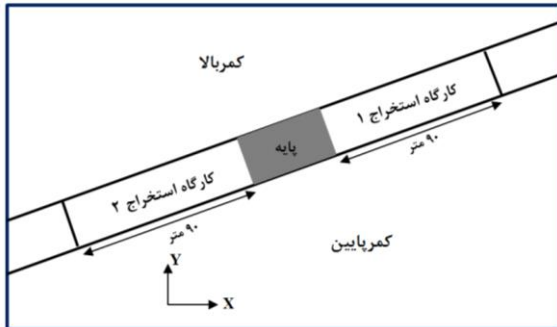
شکل ۲: جزئیات دایره تنش (میانگین تنش عمودی و برشی) در لایه های شیب دار [۱۵]

دایره در شکست با پوش موهر کلمب برخورد می کند ($\tau = \sigma \tan(\varphi) + c$). در این حالت شعاع این دایره بیشینه است و مقدار آن برابر است با:

$$R(\text{strength}) = \frac{[(C) \cos(\varphi)]}{[1 - \sin(\varphi - \beta)]} \quad (6)$$

که در آن، φ و C به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی است. حداکثر شعاع دایره موهر برابر است با:

محاسبات با توجه به چگالی منطقه به صورت تنش به مرزهای بالایی مدل وارد شده است. بر این اساس در این تحقیق نسبت تنش افقی به قائم (K) برابر با 0.7 در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نحوه ی ساخت مدل عددی نشان داده شده است.



شکل ۳: شمایی از نحوه ی ساخت مدل عددی پایه در لایه های زغال سنگ شیب دار

۳-۱- نحوه ی بارگذاری پایه

در این تحقیق برای شبیه سازی بار وارد بر پایه، عملیات استخراج فضای اطراف پایه به صورت مرحله ای انجام شده است و بعد از هر مرحله استخراج، مدل به تعادل رسیده است. از این رو، ابتدا کارگاه شماره ۱ استخراج می شود و سپس مدل به تعادل می رسد. در مرحله بعد کارگاه شماره ۲ استخراج شده و مدل به تعادل می رسد.

از آنجا که فرض شده است کارگاه های استخراج به روش جبهه کار طولانی استخراج می شوند، لازم است که اثر تخریب سقف بر پایداری بر روی پایه نیز در نظر گرفته شود. در این حالت بارهای کناری بر پایه وارد می شوند. برای مدلسازی تخریب سقف در نرم افزار $FLAC$ می توان از دو روش نیروهای گرهی و برورسانی مدول حجمی استفاده نمود. از آنجا که مدت زمان حل مدل با این مدل ها وقت گیر است و تعداد مدل ها زیاد است، در این تحقیق با توجه به روش $ALPS$ مقدار درصد بارهای کناری که به پایه ها وارد می شود به ترتیب زیر محاسبه و در مدل عددی بر روی پایه وارد شده است. بر اساس روش $ALPS$ در صورتی که عرض پهنه کوچک تر از $0.77H$ ارتفاع روباره باشد بارهای کناری به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$L_{ss} = \left(\frac{HP}{2} - \frac{P^2}{3.1} \right) \gamma \quad (10)$$

در این رابطه P برابر با عرض پهنه و H ارتفاع روباره است. درصدی از بارهای کناری که بر پایه ها وارد می شود

است که ضخامت آن تقریباً دو متر بوده و به روش جبهه کار طولانی استخراج خواهد شد، از این رو در مدل عددی دو کارگاه استخراج در نظر گرفته شده است که طول آنها ۹۰ متر بوده و توسط یک پایه زغالی از یکدیگر جدا می شوند. قسمت دوم نیز سنگ های اطراف لایه زغال سنگ است که عمدتاً از شیل، ماسه سنگ و سیلتستون تشکیل شده است. مدلسازی عددی مطابق با اطلاعات جدول ۱ ایجاد شده است.

جدول ۱: ابعاد مدل های عددی

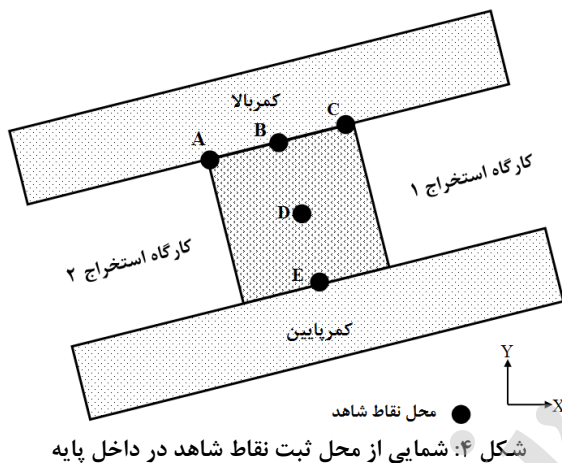
توضیحات	پارامتر
طول کارگاه استخراج	۹۰ متر
ارتفاع پایه	۲ متر
عرض پایه	۱۰ و ۱۵ متر
شیب لایه	۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه
ابعاد مدل عددی در شیب ۳۰ درجه	۲۵۳ متر در جهت Y و ۳۶۴ متر در جهت X
ابعاد مدل عددی در شیب ۴۵ درجه	۳۰۰ متر در جهت Y و ۳۶۴ متر در جهت X
ابعاد مدل عددی در شیب ۶۰ درجه	۲۱۰ متر در جهت Y و ۴۱۰ متر در جهت X
نوع مش بندی	مربعی
تعداد مدل های عددی ساخته شده	۶ عدد

به منظور تحلیل دقیق تر نتایج، در قسمت مربوط به پایه زغال سنگ، تراکم مش بندی بیشتری نسبت به سایر ناحیه های مدل در نظر گرفته شده است. بر این اساس می توان بیان نمود که کل مدل از ۷ ناحیه شامل دو ناحیه کمر بالا و پایین لایه ی زغال سنگ، دو ناحیه کارگاه های استخراج، یک ناحیه پایه زغال سنگ و دو ناحیه دیگر نیز ادامه لایه زغال سنگ تشکیل شده است.

شرایط مرزی به گونه ای تعریف شده است که دیواره های قائم مدل در جهت Y و کف در جهت X ثابت شده است و سقف مدل آزاد است. بار به قسمت بالایی مدل وارد می شود. به عبارتی دیگر جابه جایی فقط در جهت قائم مجاز است.

نسبت تنش های افقی به قائم (K) در مناطق مختلف متفاوت است و بستگی زیادی به تکتونیک منطقه دارد. در این تحقیق با توجه به شیب دار بودن لایه ی زغال سنگ، معادل ۳۰ متر روباره که بر روی لایه زغال سنگ قرار دارد مدل شده است و ۱۰۰ متر از روباره به منظور کاهش

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در مدلسازی عددی، نسبت دادن خصوصیات مواد به مدل است. مدل عددی مورد بحث از سه گروه لایه زغال‌سنگ، گروه سقف و کف تشکیل شده است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ دربرگیرنده پایه و لایه زغال‌سنگ مطابق جدول ۲ است. در مدلسازی عددی انجام‌شده در تمام مدل‌های عددی، برای لایه‌ی زغال‌سنگ مدل رفتاری موهرکلمب و برای سنگ‌های اطراف لایه‌ی زغال‌سنگ، مدل رفتاری الاستیک در نظر گرفته شده است. انتخاب مدل عددی الاستیک برای سقف و کف به این خاطر است تا بتوان رفتار پایه را با دقت بیشتری برآورد نمود.



جدول ۲: پارامترهای فیزیکی و مکانیکی لایه زغال‌سنگ و سنگ اطراف آن [۱۶، ۱۷]

ردیف	خصوصیات	نماد	مقادیر	
			سنگ اطراف لایه	زغال‌سنگ
۱	مدول الاستیک	E	۱۳	۱/۷
۲	نسبت پواسون	ν	۰/۳	۰/۳
۳	مقاومت کششی	σ_t	۰/۵	۰/۱
۴	چسبندگی	C	-	۰/۵
۵	زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	-	۳۰
۶	چگالی	γ	۲۱۰۰	۱۳۰۰
۷	مدول برشی	G	۱/۳۴	۱/۱۶
۸	زاویه اتساع	$\bar{\nu}$	۱۵	۱۰

پایه، نقاطی از پایه که به تسلیم می‌رسند به صورت نقاطی با تنش‌های کم نسبت به سایر نقاط دیده می‌شوند [۱۰، ۱۱]. در این پژوهش، تحلیل نتایج مدلسازی عددی بر روی تنش‌های قائم وارد بر پایه، تنش‌های برشی و وضعیت کنترهای پلاستیک در اطراف پایه انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

برابر با کسری از عرض ناحیه‌ای^۷ است که در آن فشارهای کناری گسترش پیدا کرده است و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R = 1 - \left(\frac{D - W_t}{D}\right)^3 \quad (11)$$

که در آن، W_t : عرض کلی سیستم پایه‌ها (۱۰ و ۱۵ متر) و D عرض ناحیه‌ای است که در آن فشارهای کناری گسترش پیدا کرده است و معادل با $9.3\sqrt{H}$ است. بر این اساس با توجه به عمق متوسط ۱۱۵ متری پایه‌ها از سطح زمین به طور متوسط مقدار ۱/۴ مگاپاسکال تنش به صورت گسترده به بالای پایه با عرض ۱۰ متر و ۱/۳۷ مگاپاسکال به پایه‌های ۱۵ متری وارد شده است.

۳-۲- نحوه‌ی ثبت نتایج تحلیل عددی

به منظور بررسی رفتار پایه در هنگام استخراج مرحله‌ای کارگاه‌ها، ۵ نقطه شاهد در وسط ارتفاع پایه و در امتداد محور X در شکل ۴ جانمایی شده و مقادیر تنش و جابه‌جایی در این نقاط در کلیه مراحل استخراج ثبت شده است. موقعیت این نقاط شاهد به طور شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.

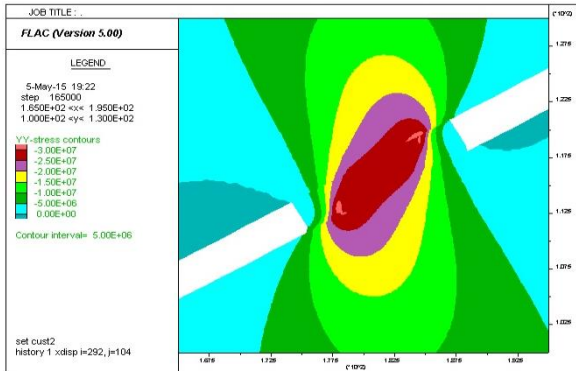
۳-۳- مدل رفتاری مورد استفاده در تحلیل عددی

۳-۴- نتایج مدل سازی عددی

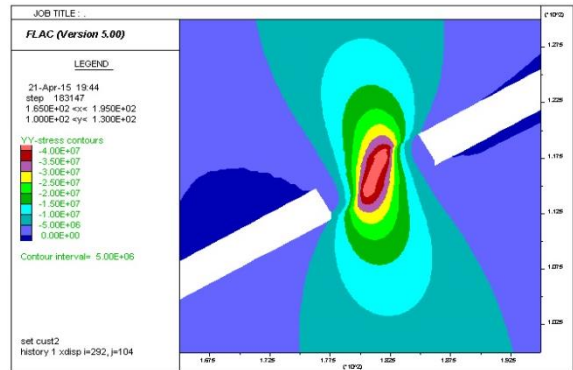
هنگامی که بار اعمالی وارد بر پایه از مقاومت آن تجاوز کند شکست پایه حادث می‌شود شکست پایه از لبه‌های آن شروع می‌شود و به سمت مرکز پایه پیشروی می‌کند. از این‌رو با کاهش عرض پایه با ثابت بودن بار وارده بر پایه، تنش وارده بر پایه افزایش می‌یابد. با افزایش بار وارد بر

شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است.

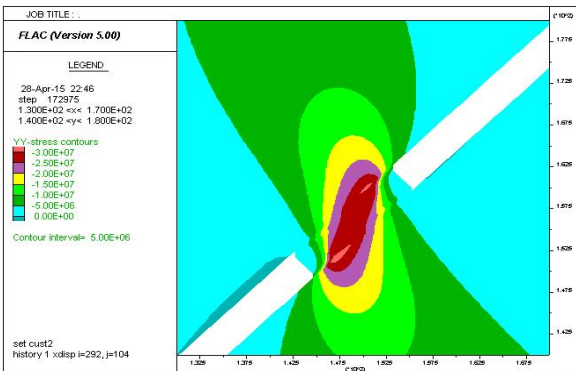
در شکل ۵ کنتورهای تنش قائم بر روی پایه ناشی از استخراج هر دو کارگاه نشان داده شده است. با توجه به



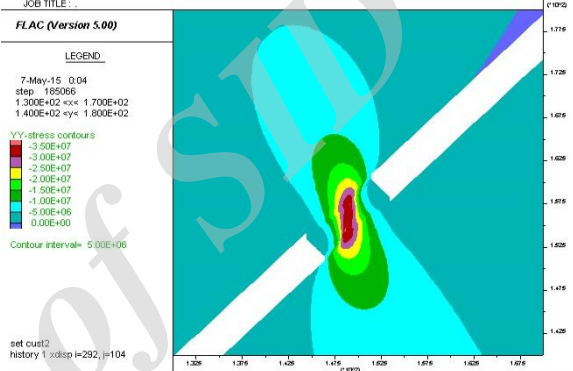
ب: شیب لایه ۳۰ درجه و عرض پایه ۱۵ متر



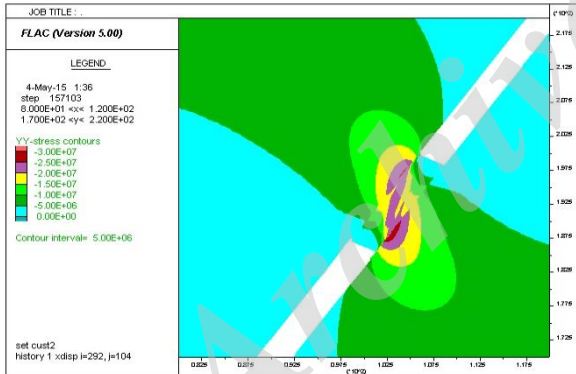
الف: شیب لایه ۳۰ درجه و عرض پایه ۱۰ متر



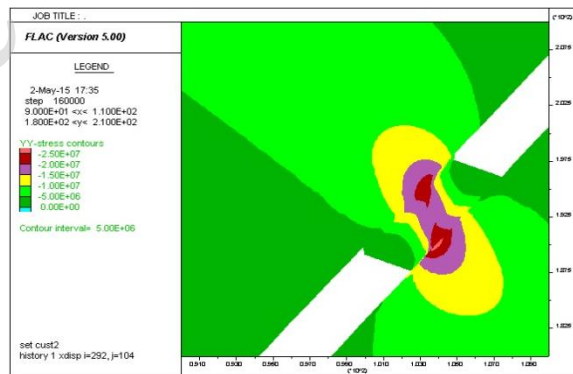
د: شیب لایه ۴۵ درجه و عرض پایه ۱۵ متر



ج: شیب لایه ۴۵ درجه و عرض پایه ۱۰ متر



و: شیب لایه ۶۰ درجه و عرض پایه ۱۵ متر



ه: شیب لایه ۶۰ درجه و عرض پایه ۱۰ متر

شکل ۵: کنتورهای تنش قائم بعد از استخراج هر دو کارگاه

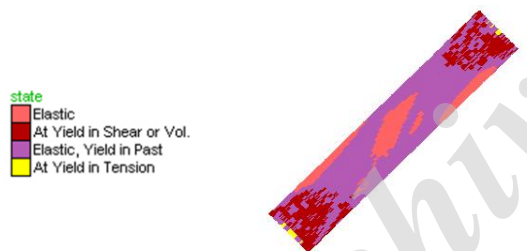
نکته قابل توجه دیگر که از شکل مذکور می توان دریافت نمود این است که کنتورهای تنش در جهت قائم در امتداد عرض پایه متقارن نیستند یا به عبارتی دیگر حداکثر تنش از لبه مجاور کارگاه استخراج اول در سقف شروع شده و به لبه مجاور کارگاه استخراج دوم در کف رسیده است. این امر خود می تواند نشان دهنده این موضوع باشد که عرض پایه در لایه های شیب دار در مقایسه با لایه های افقی در معرض تنش بیشتری قرار دارد و باید عرض بیشتری برای آن در

۱- با توجه به شکل ۵-الف می توان دریافت که در اثر استخراج کارگاه اول، بیشترین تنش به میزان ۱۷/۵ مگاپاسکال به لبه های پایه وارد می شود. حال آن که با استخراج کارگاه دوم، تنش وارد بر پایه افزایش می یابد. بیشترین مقدار تنش وارد شده به مرکز پایه در این حالت ۴۰ مگاپاسکال است. در این حالت به دلیل این که لبه های پایه دچار شکست شده اند، تنش کمتری به لبه های پایه وارد شده است و تنش به مرکز پایه انتقال داده شده است.

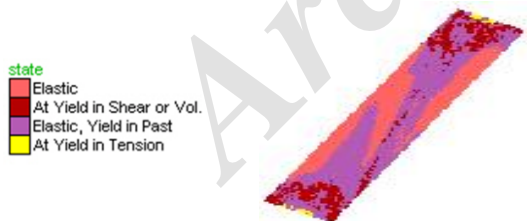
پایه نیز به دلیل این‌که در مقابل تنش وارد شده به تسلیم رسیده‌اند، تنش کمتری به آن وارد شده است. نکته قابل توجه دیگر برابر بودن مقادیر تنش قائم در هر سه شیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ برای حالتی است که فقط یک کارگاه استخراج شده است. علاوه بر این با افزایش عرض پایه به ۱۵ متر، مقدار تنش قائم تقریباً تغییری نکرده است ولی محدوده بیشترین تنش قائم وارد بر پایه کاهش یافته است. به دلیل این‌که بتوان از وضعیت پایداری یا شکست پایه‌ها در وضعیت‌های مختلف بارگذاری آگاهی حاصل شود، کنتورهای کرنش پلاستیک در هر کدام از پایه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است:



ب: شیب ۳۰ درجه - پایه ۱۵ متر



د: شیب ۴۵ درجه - پایه ۱۵ متر



و: شیب ۶۰ درجه - پایه ۱۵ متر

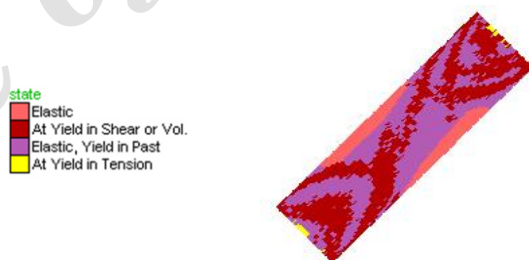
نظر گرفته شود. در مورد شکل ۵-ب می‌توان بیان نمود که به پایه با عرض ۱۵ متر در مقایسه با عرض ۱۰ متر، تنش کمتری وارد شده است.

۲- مقایسه شکل ۵-ج و ۵-الف نشان می‌دهد که با افزایش عرض پایه، مقدار تنش قائم وارد بر پایه کاهش یافته است و محدوده حداکثر تنش وارد شده نیز کمتر است. در این حالت، تنش وارد بر پایه به میزان ۵ مگاپاسکال کاهش یافته است.

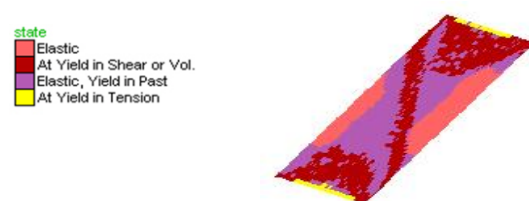
۳- با توجه به شکل ۵-ه می‌توان دریافت که در مقایسه با شیب‌های ۳۰ و ۴۵ درجه، مقدار تنش قائم اعمالی به پایه به میزان قابل توجهی کاهش یافته است و نیز بیشینه آن دیگر به مرکز پایه وارد نمی‌شود، بلکه به قسمت‌هایی در سقف و کف پایه وارد می‌شود. کناره‌های



الف: شیب ۳۰ درجه - پایه ۱۰ متر



ج: شیب ۴۵ درجه - پایه ۱۰ متر



ه: شیب ۶۰ درجه - پایه ۱۰ متر

شکل ۶: کنتورهای پلاستیک اطراف پایه در مدل‌های عددی مختلف

عرض ۱۵ متر، در قسمت‌های میانی خود حالت الاستیک خود را حفظ می‌کند و فقط بخشی از آن در اثر تنش‌های برشی به شکست می‌رسد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که پایه با عرض ۱۵ متر در شیب ۳۰ درجه پایدار است.

ب: کناره‌های پایه با عرض ۱۰ متر در شیب ۴۵ درجه در اثر کشش گسسته شده است. پایه در شیب ۴۵ درجه در

الف: اکثر بخش‌های پایه با عرض ۱۰ متر در شیب ۳۰ درجه تحت تنش برشی شکسته شده است و فقط قسمت کوچکی از پایه که شامل مرکز سقف و کف پایه است حالت الاستیک خود را حفظ کرده است. بخش الاستیک پایه به نحوی نیست که یکپارچه باشد و بتواند به‌عنوان یک ستون واحد عمل کند و ناپایدار است. این در حالی است که پایه با

برای این که بتوان یک تحلیل واقع بینانه از تاثیر شیب لایه بر مقاومت پایه های زغالی بوجود آید با انتخاب نقاطی در مرکز پایه (نقطه D)، سقف (نقطه B)، کف (نقطه E) و گوشه های سمت چپ (نقطه A) و راست (نقطه C) (نقاط شاهد در شکل ۴)، مقادیر تغییرات تنش قائم و تنش برشی در شیب های مختلف و عرض پایه ۱۰ و ۱۵ متر و برای حالتی که هر دو کارگاه استخراج شده اند با یکدیگر مقایسه شده است. مقادیر تغییرات تنش قائم در پایه با عرض های مختلف و در شیب های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است.

۱- با توجه به شکل ۷-الف می توان بیان نمود با افزایش شیب لایه، منحنی های تنش قائم در کلیه نقاط پایه حالت نزولی دارد. این موضوع نشان دهنده این است که تنش وارد بر پایه افزایش یافته است و سبب شده است که توان تحمل تنش اجزای پایه کاهش یابد. در شیب ۳۰ درجه، مرکز پایه (نقطه D) نسبت به سایر نقاط توان تحمل تنش بالاتری دارد و برعکس نقطه C چون در مجاورت کارگاه استخراج اول قرار گرفته است توان تحمل تنش آن نسبت به سایر نقاط کمتر است. این موضوع در شیب های ۴۵ و ۶۰ درجه به همین ترتیب است. نکته قابل توجه دیگر این است که با افزایش شیب لایه تنش وارد بر مرکز پایه نسبت به سقف و کف آن بیشتر می شود. این موضوع بیانگر آن است که با افزایش شیب لایه احتمال شکست پایه از بخش مرکز آن بیشتر است.

۲- با توجه به شکل ۷-ب می توان بیان نمود با افزایش عرض پایه به ۱۵ متر، تنش وارد بر هر کدام از اجزای پایه کاهش یافته است. در این حالت افزایش شیب لایه تا شیب ۴۵ درجه تاثیر چندانی بر تنش وارد بر اجرای پایه ندارد (منحنی تقریباً افقی) ولی با افزایش شیب لایه به ۶۰ درجه، از توان تحمل اجزای پایه کاسته شده و مقدار تنش کمتری را تحمل می کنند. در این حالت نیز، توان تحمل اجزای مرکزی پایه بیشتر از سایر بخش ها است.

۳- با توجه به شکل های الف و ب می توان نتیجه گرفت که با افزایش عرض پایه می توان از تأثیر شیب لایه بر کاهش مقاومت پایه کاست.

همان طور که پیشتر بیان شد، پایه در لایه های شیب دار بر خلاف لایه های افقی تحت تاثیر تنش های برشی قرار

مقایسه با شیب ۳۰ درجه، تحت محدوده ی تنش برشی بیشتر است و قسمت بیشتری از آن در اثر کشش گسسته است. در مورد قسمت الاستیک پایه تقریباً با شیب ۳۰ درجه و عرض پایه ۱۰ متر یکسان است. بر این اساس با توجه به شکل ۶-ج می توان بیان نمود که پایه با عرض ۱۰ متر در شیب ۴۵ درجه مناسب نیست و دچار شکست می شود. در مورد پایه با عرض ۱۵ متر در شیب ۴۵ درجه می توان بیان نمود که پایه بیشتر به صورت پلاستیک و خمیری است و فقط قسمت کمی از آن در سقف، کف و قسمت هایی از مرکز حالت الاستیک خود را حفظ کرده است. در نتیجه این قسمت نسبت به قسمت های با عرض پایه ۱۰ متر بهتر است، ولی نسبت به شیب ۳۰ درجه و عرض پایه ۱۵ متر نامطلوب تر است.

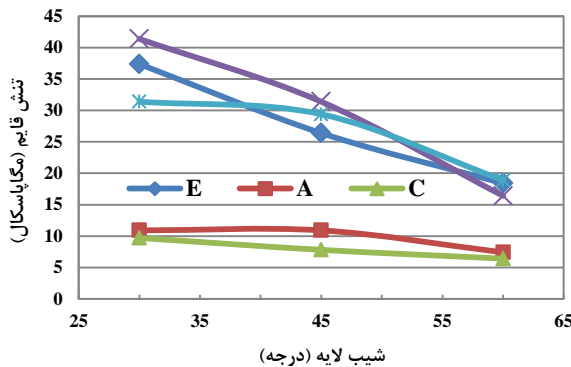
ج: در مورد پایه با عرض ۱۰ متر در شیب ۶۰ درجه می توان بیان نمود که کناره های پایه در اثر کشش گسسته شده است و قسمت هایی در گوشه ها و نیز قسمت هایی که متمایل به کناره هستند در اثر برش گسسته شده است. علاوه بر این یک قسمت نیز که به صورت خط مایل مرکز و کف پایه را به هم متصل می کند، در اثر برش گسسته شده است که دلالت بر شکست پایه دارد. به هر حال می توان بیان نمود که بخش هایی از پایه هنوز حالت الاستیک دارد که بیشتر مربوط به سقف و کف پایه است که میزان آن نسبت به شیب های ۴۵ و ۳۰ درجه افزایش یافته است. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که اکثر محدوده پایه نیز به صورت پلاستیک و خمیری شکل است و از پایداری مناسب برخوردار نیست. در این حالت در مورد پایه با عرض ۱۵ متر می توان بیان نمود که به غیر از بخشی از کناره های پایه، اطراف و گوشه ها که در اثر کشش و برش گسسته است، دیگر قسمت های پایه به صورت پلاستیک یا الاستیک است و محدوده ای از پایه که هنوز حالت الاستیک خود را حفظ کرده است، در مقایسه با حالت قبل افزایش یافته است. این در حالی است که اکثر قسمت های پایه به صورت پلاستیک و خمیری است که این شرایط نیز برای کار مناسب نیست و احتمال ناپایداری کارگاه استخراج وجود دارد.

۴- بررسی اثر شیب لایه بر تغییرات تنش قائم و

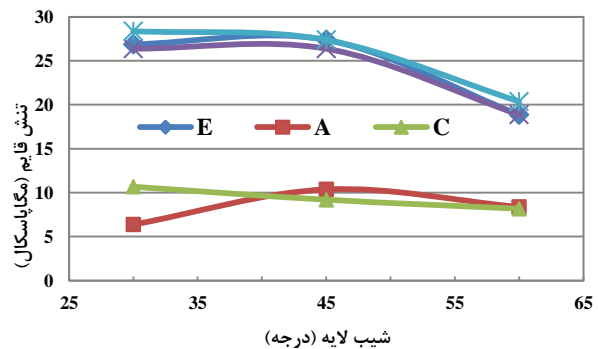
برشی در پایه

توجه به شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است.

دارد. در شکل ۸ تاثیر شیب لایه بر تغییرات تنش برشی در پایه با عرض‌های ۱۰ و ۱۵ متر نشان داده شده است.

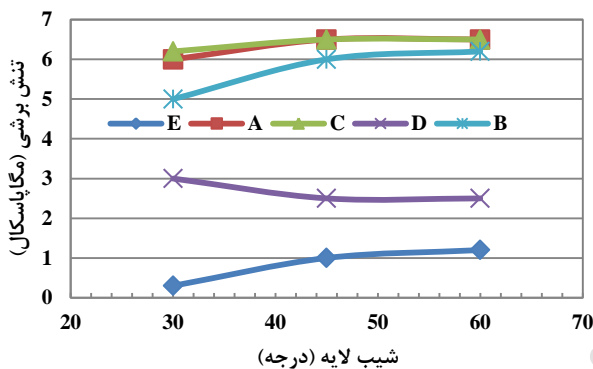


الف: تغییرات تنش قائم در نقاط مختلف پایه با عرض ۱۰ متر

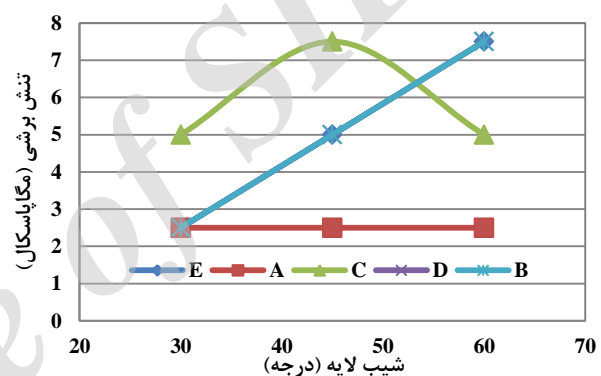


ب: تغییرات تنش قائم در نقاط مختلف پایه با عرض ۱۵ متر

شکل ۷: اثر شیب لایه بر تغییرات تنش قائم در پایه با عرض‌های ۱۰ و ۱۵ متر



الف: تغییرات تنش برشی در نقاط مختلف پایه با عرض ۱۰ متر



ب: تغییرات تنش برشی در نقاط مختلف پایه با عرض ۱۵ متر

شکل ۸: اثر شیب لایه بر تغییرات تنش برشی در پایه با عرض‌های ۱۰ و ۱۵ متر

۳- با مقایسه شکل‌های ۸- الف و ب می‌توان دریافت که تنش‌های برشی وارد بر پایه با عرض ۱۰ متر مقدار بیشتری است و افزایش عرض پایه سبب می‌شود که تنش‌های برشی در شیب‌های مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته باشند.

۵- تحلیل پایداری پایه

در این بخش به محاسبه ضریب ایمنی پایه با عرض ۱۵ متر در شیب ۳۰ درجه پرداخته شده است. به منظور محاسبه‌ی حداکثر مقاومت پایه می‌توان از معیار شکست موهر-کولمب استفاده نمود. بر این اساس مقاومت پایه از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۸].

$$PS = 2 \times C \times \sqrt{\frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}} + \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \times \sigma_3 \quad (12)$$

۱- با توجه به شکل ۸- الف روشن است مرکز پایه و کف آن (نقاط E و D) نسبت به سایر نقاط پایه در معرض کمتر تنش‌های برشی هستند و افزایش شیب لایه تاثیر زیادی بر میزان تنش برشی این نقاط ندارد. علاوه بر این می‌توان دریافت که با افزایش شیب لایه، تنش‌های برشی در گوشه‌ها و سقف پایه با شیب ملایم افزایش می‌یابد.

۲- با توجه به شکل ۸- ب می‌توان بیان نمود که با افزایش عرض پایه بیشترین مقدار تنش برشی در شیب ۴۵ درجه به اجزای پایه وارد می‌شود. در این حالت بر نقطه گوشه سمت راست پایه (نقطه C) بیشترین مقدار تنش برشی وارد شده است. علاوه بر این با افزایش شیب لایه، تنش وارد بر گوشه سمت چپ پایه مقدار ثابتی است و در نقاط قرار گرفته در خط مرکزی پایه (E و D, B) در تمام شیب‌ها مقدار تنش برشی ثابت است و با افزایش شیب لایه، تنش برشی وارد بر این نقاط افزایش یافته است.

- با توجه به کنتورهای پلاستیک در اطراف پایه، پایه با عرض ۱۰ متر، در شیب های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ناپایدار است. این در حالی است که با افزایش عرض پایه به میزان ۱۵ متر، پایه حالت پایدار به خود می گیرد.

- مقدار تنش برشی نیز با افزایش شیب، در گوشه های پایه کاهش پیدا می کند و علامت آن منفی هست ولی در مرکز پایه مقدار آن در شیب های مختلف متفاوت است، ولی در همگی علامت آن مثبت است و می توان گفت که در شیب ۴۵ درجه بیشترین مقدار تنش برشی به پایه وارد می شود.

بر این اساس با توجه به مدلسازی عددی صورت گرفته و تحلیل های انجام شده می توان نتیجه گرفت که برای کارگاه های استخراج با طول ۹۰ متر در لایه با شیب ۳۰ درجه در صورتی که از پایه با عرض ۱۵ متر استفاده شود دارای پایداری قابل قبولی خواهد بود. با توجه به مشخصات معدن، در صورتی که قرار است کارگاه های استخراج در شیب ۴۵ درجه جانمایی شوند بهتر است از پایه هایی با عرض بیشتر از ۱۵ متر استفاده شود.

به هر حال امکان استفاده از پایه هایی با عرض ۱۵ متر نیز وجود دارد ولی به نظر می رسد بهترین راه برای کاهش جابجایی جانبی و افزایش مقاومت پایه ها، استفاده از سیستم نگهداری ترکیبی توری فلزی و شاتکریت باشد که هم موثرتر و ارزان تر از سیستم پیچ سنگ است از این رو پیشنهاد می شود این موضوع توسط محققان در کارهای پژوهشی در آینده مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] Jeremic M. L. (1985). Strata Mechanic in Coal Mining. A.A balkema Publication.
- [2] Salamon, M. D. G., Munro, A. H. (1967), "A study of the strength of coal pillars". J. S. Afr. Inst. Min. Metall.: 67, 56-67.
- [3] Greenwald, H. P., Howarth, H. C., Hartmann, I. (1941). Progress Report: Experiments on strength of small pillars of coal in the Pittsburgh bed. USBM, R. I. 3575.
- [4] Steart, F. A. (1954). Strength and stability of pillars in coal mines. J. Chem. Metall. Min. Soc. SA, XV: 309-325.
- [5] Bieniawski ZT (1968). The effect of specimen size on compressive strength of coal. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 5, 325-335.

که در آن، PS ، مقاومت پایه، φ ، زاویه اصطکاک داخلی و σ_3 تنش محصورکننده در لبه پایدار پایه است. نتایج مدلسازی عددی نشان داده است که مقدار σ_3 بعد از لبه شکسته شده پایه برابر با $10/73$ مگاپاسکال است. علاوه بر این با توجه به شکل ۷ مشخص است که مقدار ۲۸ مگاپاسکال تنش به پایه وارد شده است. از این رو از تقسیم مقاومت پایه محاسبه شده بر حداکثر تنش وارد بر پایه، ضریب اطمینان محاسبه می شود.

$$SF = \frac{MPS}{S_{zz}} = \frac{(2 \times 0.5 \times 1.73) + (3 \times 10.73)}{28} = \frac{33.92}{28} = 1.21$$

با توجه به ضریب اطمینان محاسبه شده، پایه در حین عملیات استخراجی پایدار است.

۶- نتیجه گیری

پارامترهایی چون، عرض و ارتفاع کارگاه، شیب لایه، طول و عرض پایه و خواص مکانیکی ماده معدنی و سنگ های سقف و کف کارگاه تاثیر زیادی بر الگوی توزیع تنش در پایه دارند. از آنجا که امکان در نظر گرفتن اکثر این پارامترها در طراحی با استفاده از روش های تحلیلی و تجربی وجود ندارد، در این تحقیق از مدلسازی عددی برای تعیین ابعاد طراحی پایه در لایه های زغالی شیب دار استفاده شده است. به طور کلی مهم ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است.

- هنگامی که عرض پایه ۱۰ متر است در هر سه شیب پایه به طور کامل شکسته می شود و ناپایدار است.

- هر چه شیب لایه افزایش یابد، افزایش عرض پایه نمی تواند پایداری مناسب تری را ایفا نماید. این در حالی است که در شیب های کمتر با افزایش عرض پایه می توان از ناپایداری پایه جلوگیری نمود.

- پایه در لایه های شیب دار تحت اثر تنش های برشی قرار دارد. افزایش عرض پایه سبب می شود که از اثر شیب لایه بر افزایش میزان تنش های برشی جلوگیری شود. تنش برشی در پایه بیشتر به گوشه های پایه وارد می شود و اثر چندانی بر نقاط مرکزی پایه ندارد.

- با افزایش عرض پایه می توان از اثر شیب لایه بر کاهش مقاومت پایه جلوگیری نمود.

- [17] Saeedi, Gh.R., Adib, A.; Mahmood, N., (2012). "Numerical Modeling Angle of Rock Shift in Mining of Contiguous Beds in Hamkar Coal mine". 1st Iranian coal Congress, Shahrood University of Technology (In Persian).
- [18] Najafi, M., Jalali, S.E., Kakaei, R., (2014). Thermal-Mechanical Numerical Analysis of Stress Distribution in the vicinity of Underground Coal Gasification (UCG) Panels. *International Journal of Coal Geology* 134, 1-16.
- [19] Shamsoddin, Saeed., Moarefvand, P., (2012). A comparison of numerical methods and analytical methods in drawing the Ground Reaction curve. Case of Tunnel No. 12 of Hamkar coal mine of Kerman. 1st Iranian coal congress, Shahrood university of Technology.
- [6] Mrugala M. G., Sheorey P.R. and Kushwaha A. (2001). Numerical estimation of pillar strength in coal mines. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38 , pp 1185–1192 .
- [7] Najafi M., Jalali, S. E. Sereshki, F., Yarahmadi-Bafghi, A. R. (2009). Evaluation of Pillar Strength in Tabas coal mine using Numerical Modeling" *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2009, Bulgaria.*
- [8] Jalali, S.E., Najafi, M., (2012). "Optimization of Pillar Size in Faryab Chromite Mine Considering Extraction Sequences". *Iranian Journal of Mining Engineering, Volume 7, Issue 15, Page 35-47*(In Persian).
- [9] Najafi, M., Jalali, S.E., F. Sereshki, A. R. Yarahmadi-Bafghi, (2010). "Estimation of the Load Distribution on the Chain Pillars of the Mechanize Longwall Panels in Tabas Coal Mine Using Numerical Method". *Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME), Vol. 5, No. 9, pp.47-58* (In Persian).
- [10] Shabani-Mashkol M, Mortazavi A, Hemati-Shabani A. (2007), " Numerical Analysis of rock Pillars strength using Hoek and Brown variation parameter criteria, university of Tehran, journal of faculty of engineering 40. pp 79-91(In Persian).
- [11] Mortazavi A., Hassani F.P., Shabani M.(2008), A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings. *Journal of Computers and Geotechnics. Volume 36, Issue 5, June 2009, Pages 691-697.*
- [12] Dabagh , A ., Fatehi Marji, M., Forghani, H., (2009). "Simulation of Subsidence with a Higher Order Displacement Discontinuity Method". *International Journal of Mining Engineering, Volume 4, Issue 7, Page 53-6* (In Persian).
- [13] Xu, B., Yin, S., Zhang, X., & Wu, J. (2014). Research on the Stability of Waterproof Coal Pillar in Steep Seam under Aquifers. *An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges - Sui, Sun & Wang ,China University of Mining and Technology Press, Xuzhou, ISBN 978-7-5646-2437-8*
- [14] Jun De, Q. I., Jing, C. H. A. I., & ZHANG, J. (2014). Numerical Design of Pillar Width in the Inclined Coal Seam. *Advanced Materials Research, 977.*
- [15] Pariseau, W. G. (2011). Design analysis in rock mechanics. CRC Press.
- [16] Shamsoddin, M. Saeed, Moarefvand, P., (2012). "A comparison of numerical methods and analytical methods in drawing the Ground Reaction curve. Case of Tunnel No. 12 of Hamkar coal mine of Kerman". 1st Iranian coal Congress, Shahrood University of Technology (In Persian).

-
- 1- Salamon
 - 2- Greenwald
 - 3- Steart
 - 4- Inclined Seam
 - 5- Xu
 - 6- Jun De
 - 7- Abutment Fraction