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

مهدی نجفی\*'، میثم مطهری '، مهدی نوروزی '

۱ – استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد ۲ – دانشآموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد ۳ – اســتادیار، دانــشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانــشگاه صــنعتی شـاهرود

(دریافت: تیر ۱۳۹۴، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

#### چکیدہ

طراحی ابعاد پایه در معدنکاری زیرزمینی به دلیل مسایل ایمنی و اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار است. بـه دلیل محدودیتهای موجود در روشهای طراحی سنتی و تجربی، امروزه روشهای عددی به طور وسیعی برای طراحی پایـه بـه کـار میروند. با کاربرد این روشها امکان در نظر گرفتن بعضی از عوامل، نظیر ترتیب مراحل استخراج و اثر تنشهای محصور کننده که نمی توان آنها را در روشهای تجربی منظور نمود، وجود دارد. طراحی پایه در لایههای شیبدار متفاوت از لایـههای افقی است. پایهها در شیب به طور قابل ملاحظه ای 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 شـیبهای قارد ۴۵ و ۶۰ درجه با پایههای ۱۰ و ۱۵ متری نشان می دهد که هر چه شیب لایه و عرض پایه افزایش یابد مقدار تنشهای قاره وار یا یه کاهش می یابد. علاوه بر این با افزایش شیب لایه تنشهای برشی در پایه افزایش می ابد. در نهایت با توجه به مدلسازی بر پایه کاهش می یابد. علاوه بر این با افزایش شیب لایه تنشهای برشی در پایه افزایش می اخر در نهایت با توجه به مدلسازی عددی انجام شده می توان بیان نمود که در شیبهای زیاد باید از پایههای با عرض بزرگتری استفاده نود.

#### كليد 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 سـنگ همکـار، روشهای تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۱۱/۶)، ۲۷–۳۸.

<sup>\*</sup> عهده دار مكاتبات: mehdinajafi@yazd.ac.ir

#### ۱– مقدمه

طراحی بهینه پایه در بهینهسازی عملیات معدن کاری 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 تاثیر زیادی بر الگوی توزیع تنش در پایه دارند[۱]. بار وارده بر پایه با روشهای تحلیلی، تجربی، عددی و نیز در بعضی مواقع با انجام آزمایش های برجا برآورد می شود. مشکل اصلی برای طراحی پایه، مقاومت پایه است. تاکنون روشهای تحلیلی و تجربی زیادی برای برآورد مقاومت پایه ارایه شده است. اولین روابط تجربی برای محاسبه مقاومت پایه در سنگهای نرم و برای معادن زغالسنگ ارایه شده است. اين روابط توسط سالامون [٢]، گرينوالد [٣]، استیرت<sup>۳</sup>[۴] بیناوسکی [۵] و غیره ارایه 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 پایـه نادیـده گرفته شده است.

- ضرایب ثابت استفاده شده در این روابط، هیچ رابطه منطقی با پارامترهای توده سنگ پایه ندارند.

- این روابط برای پایه هایی با نسبت عرض به ارتفاع مشخص ارایه شده اند و برای تحلیل های خارج از آن محدوده بدون اعتبار هستند.

- در اکثر این روابط نقش تنش محصور کننده در مقاومت پایه نادیده گرفته شده است. حال آن که در هر پایه پوسته

خارجی پایه باعث بوجـود آمـدن تـنش محصـورکننده 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 می رسد. روشهای عددی امکانات مناسبی را در اختیار طراح قرار میدهد که با استفاده از آنها میتوان شرایط مرزی مساله، خصوصیات رفتاری پایه، کمربالا 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 جـدی قـرار 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 پایـه در لایـههـای شیبدار<sup>\*</sup> انجام نشده است. با این حال از تحقیقاتی که به نحوی در ارتباط با لایههای شیبدار است میتوان به موارد زير 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 جبهه کار بلند پرداختهاند. در تحقیق مذكور تنش وارد بر پايهها بررسي نشده است[١٢]. ايكسيو<sup>4</sup> و همکاران (۲۰۱۴) به تحلیل پایداری پایههای زغالی در لایه های شیب دار که به منظور جلوگیری از نفوذ آب به داخل کارگاه استخراج برجای گذاشته می شوند با استفاده از روشهای تحلیلی و عددی پرداختهاند. بررسیهای آنها نشان داده است که روش تجربی ارایه شده برای طراحی پایههای مذکور همخوانی خوبی با روشهای عددی دارد[۱۳]. ژون دی<sup>5</sup> 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 تـا ۱۰ متـر نشـان داده است که با افزایش عرض پایه احتمال شکست پایه کاهش می یابد و شکست پایه در پایههایی با عرض ۳ متر بیشتر از سایرین است. نتایج بررسیهای وی نشان داده

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

هدف از این تحقیق بررسی پایداری پایههای زغالی در شیبهای مختلف است (شیب لایه متغیر، عرض پایه متغیر). برای این منظور ۶ مدل عددی در شیبهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای پایهها با عرض ۱۰ و ۱۵ متر ایجاد شده است. در نهایت با بررسی تغیرات تنش قایم، تنش برشی و وضعیت کنتورهای پلاستیک به بررسی پایداری پایهها در یک معدن زغالسنگ فرضی پرداخته شده است.

۲- طراحی پایه در لایههای شیبدار

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

می شوند. بر این اساس بررسی اثر شیب لایه بر مقاومت پایهها در این گونه موارد از اهمیت بسزایی برخوردار است. طراحی پایه در لایههای شیبدار متفاوت از لایههای افقی است. پایهها در شیب بهطور قابل ملاحظهای تحت تأثیر تنشهای 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 موهرکلمب است که به اندازه کافی این هدف را برآورده میکند. در پایههایی که در لایههای افقی برجای گذاشته میشود، تنشهای برشی ایجاد نمی شوند [1].

از آنجا که کف پایه در لایههای شیبدار، افقی نیست، حتی در یک ناحیه قبل از استخراج، تنشهای برشی موازی شیب و تنشهای فشاری در جهت عمود بر شیب بر پایه وارد میشوند. این شرایط در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: شمایی از تنشهای فشاری و برشی وارد بر پایه در لایههای شیبدار [۱۵]

یک بررسی تفصیلی از تنشهای وارد بر پایه در لایههای شیبدار نشان میدهد که با تقریب نزدیکی، نیروی ناشی از روباره، قبل از حفاری شبیه نیروهای بعد از حفاری هستند[1۵]. بنابراین:

$$S_n A = S_p A_p$$

$$T_s A = T_p A_p$$
(1)

که در آن، *A<sub>p</sub> A* ،*T<sub>s</sub> ،S<sub>p</sub> ،S<sub>n</sub> ت*نش عمودی قبل از استخراج، متوسط تـنش عمودی بعـد از اسـتخراج، تنش برشی قبل از استخراج، متوسط تـنش برشـی بعـد از

استخراج، سطح تأثیر پایه و مساحت پایه است. این تنشها بر بالا و پایین پایه وارد میشوند.

برای محاسبه میزان تنشهای عمودی و برشی وارد بـر پایه در لایههای شیبدار، میتوان از دایـره مـوهر اسـتفاده نمود. بر این اساس:

$$S = (\sigma - \frac{S_p}{2}) = \frac{S_p}{2} \cos(2\alpha) - \frac{T_p}{2} \sin(2\alpha)$$
(7)

$$T = \left(\tau - \frac{T_p}{2}\right) = \frac{S_p}{2}\sin\left(2\alpha\right) + \frac{T_p}{2}\cos\left(2\alpha\right)$$
(7)

$$R(stress) = [(S_p)^2 + (T_p)^2]^{0.5}$$
(Y)

بر این اساس ضریب ایمنی پایه با توجه به معیـار مـوهر کلمب برابر است با:

$$FS_{p} = \frac{Pillar Strangeth}{Stress} = \frac{R(strength)}{R(stress)}$$
(A)

بنابراين:

$$FS_{p} = \frac{\{[(2C)\cos(\varphi)]/[1-\sin(\varphi-\beta)]\}}{[(S_{p})^{2}+(T_{p})^{2}]^{0.5}}$$
(9)

با توجه به رابطه ۹ میتوان بیان نمود در مورد لایههای شیبدار که تحت تنش برشی حداکثر قرار گرفتهاند، زاویـه  $\beta$  ممکن است بزرگتر از زاویه اصطکاک داخلـی  $\varphi$  باشـد که متناسب با آن مقاومت پایه کاهش مییابـد. بـهطـورکلی مقاومت پایه با افزایش  $\beta$ ، کاهش مییابد[1۵].

## ۳- روش تحقيق

معدن زغالسنگ همکار در فاصله ۵۰ کیلومتری غرب شهرستان راور و ۱۸۵ کیلومتری شمال غربی استان کرمان واقع شده است. در حال حاضر لایههای زغال سنگ این منطقه به روش جبهه کار کوتاه و کند و آکند به صورت سنتی استخراج میشود. ذخیره زغالسنگ معدن همکار از دو زونD و E بـا ذخیـره اکتشـافی ۳۴ میلیـون تـن تشکیل شده است. زون زغال سنگ خیز E دارای لایه ای قابل كار E1 ، E1 و E4 است. لايه E1 عمده ترين و اقتصادی ترین لایه این زون است[۱۹]. در این تحقیق از نرمافزار FLAC2D که از روش تفاضل محدود بهره میبرد برای مدلسازی عددی پایه در لایههای شیبدار استفاده شده است. لازم به ذکر است به دلیل این که هدف این مطالعه، بررسی اثر شیب لایه بر مقاومت پایه ای زغالی است، مدلسازی 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 کارگاههایی به عرض ۹۰ متر استخراج شود. علاوه بر این فرض شده است که عرض پایههای بین دو کارگاه ۱۰ و ۱۵ متر است.

بر اساس شرایط در نظر گرفته شده، مدل عـددی از دو بخش تشکیل شده اسـت. قسـمت اول لایـهی زغـالسـنگ

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

$$S^2 + T^2 = R^2 \tag{(a)}$$

در روابط بالا، S: تـنش عمـودی، T: تـنش برشـی،  $\alpha$ : زاویه بین متوسط تـنش عمـودی و خـط عمـود بـر سـطح شیبدار در نظر گرفته شده در داخل پایه و R: شـعاع دایـره موهر است.

دو معادله آخر نشان میدهند، شعاع دایره موهر به مرکزیت ( $S_p/2,T_p/2$ ) در صفحه تنش نرمال- برشی است. وقتی تنشهای وارد بر پایه افزایش مییابند، متناسب با آن شعاع دایره افزایش مییابد و به بیرون از مبدا، در صفحه تنش نرمال- برشی در امتداد شیب محور تنش صفحه تنش نرمال در زاویه  $\beta$ ، جایی که  $\frac{T_p/2}{S_p/2} = (\alpha)$ 

می کند. در شکل ۲ دو حالت شکست و پایداری پایه نشان داده شده است.



شکل ۲: جزییات دایره تنش (میانگین تنش عمودی و برشی) در لایههای شیبدار [۱۵]

دایره در شکست با پوش موهر کلمب برخورد میکنـد (  
+ c ( ( 
$$au = \sigma an( arphi ) + c$$
 ). در ایــن حالـت شــعاع ایــن دایــره  
بیشینه است و مقدار آن برابر است با:

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

که در آن، 
$$arphi$$
 و  $C$  به ترتیب زاویـه اصـطکاک داخلـی و  
چسبندگی است. حداکثر شعاع دایره موهر برابر است با:

است که ضخامت آن تقریباً دو متر بوده و به روش جبهه کار طولانی استخراج خواهد شد، ازایـنرو در مـدل عـددی دو کارگاه استخراج در نظر گرفته شده است که طول آنهـا ۹۰ متر بوده و توسط یک پایه زغالی از یکدیگر جدا مـیشوند. قسمت دوم نیز سنگهای اطراف لایه زغالسنگ است کـه عمدتاً از شیل، ماسهسنگ و سیلتستون تشکیل شده است. مدلسازی عددی مطابق با اطلاعـات جـدول ۱ ایجـاد شـده است.

عددى	ىھاى	اد مدا	۱: ابعا	ل ا	جدوا
------	------	--------	---------	-----	------

توضيحات	پارامتر		
۹۰ متر	طول کارگاہ استخراج		
۲ متر	ارتفاع پایه		
۱۰ و ۱۵ متر	عرض پایه		
۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه	شيب لايه		
۲۵۳ متر در جهت <i>Y</i> و ۳۶۴ متر در جهت X	ابعاد مدل عددی در شیب ۳۰ درجه		
۳۰۰ متر در جهت Y و ۳۶۴ متر در جهت X	ابعاد مدل عددی در شیب ۴۵ درجه		
۲۱۰ متر در جهت <i>۲</i> و ۴۱۰ متر در جهت X	ابعاد مدل عددی در شیب ۶۰ درجه		
مربعى	نوع مش بندی		
۶ عدد	تعداد مدلهای عددی ساخته شده		

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 ۲ ناحیه شامل دو ناحیه کمربالا 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 گونهای تعریف شده است که دیوارههای 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 تنشهای افقی به قائم (K) در مناطق مختلف متفاوت است و بستگی زیادی به تکتونیک منطقه دارد. در این تحقیق با توجه به شیبدار بودن لایهی زغالسنگ، معادل ۳۰ متر روباره که بر روی لایه زغالسنگ قرار دارد مدل شده است و ۱۰۰ متر از روباره به منظور کاهش

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 ۰/۷ در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نحوهی ساخت مدل عددی نشان داده شده است.



شکل ۳: شمایی از نحوهی ساخت مدل عددی پایه در لایههـای زغالسنگ شیبدار

## ۳-۱- نحوهی 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 اینرو، 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 کارگاههای 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 نرمافزار *FLAC* می توان از دو روش نیروهای گرهای و بروزرسانی مدول حجما 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 پایه وارد می شود به ترتیب زیر محاسبه و در مدل عددی پایه وارد می مود به ترتیب زیر محاسبه و در مدل عددی در صورتی که عرض پهنه کوچکتر از ۷۷/۰ ارتفاع روباره باشد بارهای کناری به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$L_{ss} = \left(\frac{HP}{2} - \frac{P^2}{3.1}\right)\gamma \tag{1.1}$$

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

برابر با کسری از عرض ناحیهای<sup>۷</sup> است که درآن فشارهای کناری گسترش پیدا کرده است و از رابطه زیر به دست میآید.

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

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  $\overline{W}$  9.3 است. بر این اساس با توجه به عمق متوسط ۱۱۵ متری پایهها از سطح زمین به طور متوسط مقدار ۱/۴مگاپاسکال تنش به صورت گسترده به بالای پایه با عرض ۱۰ متر و ۱/۳۷ مگاپاسکال به پایههای ۱۵ متری وارد شده است.

## ۲-۳- نحوهی ثبت نتایج تحلیل عددی

به منظ ور بررسی رفت ار پایه در هنگ ام استخراج مرحله ای کارگاهها، ۵ نقطه شاهد در وسط ارتفاع پایه و در امتداد محور X در شکل ۴ جانمایی شده و مقادیر تنش و جابه جایی 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

یکی از مهم ترین بخش ها در مدلسازی عددی، نسبت دادن خصوصیات مواد به مدل است. مدل عددی مورد بحث از سه گروه لایه زغال سنگ،گروه سقف وکف تشکیل شده است. خصوصیات فیزیک و مکانیکی سنگ دربرگیرنده پایه و لایه زغال سنگ مطابق جدول ۲ است. در مدلسازی عددی انجام شده در تمام مدل های عددی، برای لایه ی زغال سنگ مدل رفتاری موهر کلمب و برای سنگهای اطراف لایه ی زغال سنگ، 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.



. آحاد	مقادير		<b>N</b> 1.1	in a a	
	سنگ اطراف لایه	زغالسنگ	3003	حصوصيات	رديف
گیگاپاسکال	١٣	١/٧	Е	مدول الاستيك	١
-	٠ /٣	۰ /٣	V	نسبت پواسون	٢
مگاپاسکال	۰/۵	•/1	$\sigma_t$	مقاومت كششى	٣
مگاپاسکال	-	• /۵	С	چسبندگی	۴
درجه	-	٣٠	$\varphi$	زاويه اصطكاك داخلي	۵
کیلوگرم بر مترمکعب	71	18	γ	چگالی	۶
گیگاپاسکال	۱/۳۴	۱/۱۶	G	مدول برشی	٧
درجه	۱۵	۱.	$\overline{v}$	زاويه اتساع	٨

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

#### ۳–۴– نتایج مدل سازی عددی

هنگامی که بار اعمالی وارد بر پایه از مقاومت آن تجاوز کند شکست پایه حادث می شود شکست پایه از لبه های آن شروع می شود و به سمت مرکز پایه پیشروی می کند. از این رو با کاهش عرض پایه با ثابت بودن بار وارده بر پایه، تنش وارده بر پایه افزایش می یابد. با افزایش بار وارد بر

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 کنتورهای پلاستیک در اطراف پایه انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته شده است. شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است.

# در شکل ۵ کنتورهای تنش قائم بـر روی پایـه ناشـی از استخراج هر دو کارگاه نشان داده شده است. با توجه به





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 میتوان 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 كارگاه استخراج دوم در كف رسيده است. اين امر خود می تواند نشان دهنده این موضوع باشد که عرض پایه در لایههای شیبدار در مقایسه با لایههای افقی در معرض تنش بیشتری قرار دارد و باید عرض بیشتری برای آن در

۱- با توجه به شکل ۵-الف می توان دریافت کـه در اثـر استخراج کارگاه اول، بیشترین تنش به میزان ۱۷/۵ مگاپاسکال به لبههای پایه وارد می شود. حال آن که با استخراج کارگاه دوم، تنش وارد بـر پایـه افـزایش مـیيابـد. بیشترین مقدار تنش وارد شده به مرکز پایه در این حالت ۴۰ مگاپاسکال است. در این حالت به دلیل این که لبـههـای پایه دچار شکست شدهاند، تنش کمتری به لبههای پایه وارد شده است و تنش به مرکزپایه انتقال داده شده است.

نظر گرفته شود. در مورد شکل ۵–ب می توان 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- هـ مـیتوان دریافت کـه در مقایسه با شـیبهای ۳۰ و ۴۵ درجـه، مقـدار تـنش قـائم اعمالی به پایه به میزان قابل توجهی کاهشیافته است و نیز بیشینه آن دیگر بـه مرکـز پایـه وارد نمـیشـود، بلکـه بـه قسمتهایی در سقف و کف پایه وارد میشـود. کنـارههای



به دلیل این که بتوان از وضعیت پایداری یا شکست پایهها در وضعیتهای مختلف بار گذاری 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:



#### شکل۶: کنتورهای پلاستیک اطراف پایه در مدلهای عددی مختلف

عرض ۱۵ متر، در قسمتهای میانی خود حالت الاستیک خود را حفظ می کند 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 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

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 میتوان بیان نمود که پایه با عرض ۱۰ متر در شیب ۴۵ درجه مناسب نیست و دچار شکست میشود. در مورد پایه با عرض ۱۵ متر در شیب ۴۵ درجه می توان بیان نمود که پایه بیشتر به صورت پلاستیک و می توان بیان نمود که پایه بیشتر به صورت پلاستیک و فسمت هایی از مرکز حالت الاستیک خود را حفظ کرده است. در نتیجه این قسمت نسبت به قسمتهای با عرض پایه ۱۰ متر بهتر است، ولی نسبت به شیب ۳۰ درجه و عرض پایه ۱۵ متر نامطلوبتر است.

ج: در مورد پایه با عـرض ۱۰متـر در شـیب ۶۰ درجـه می توان بیان نمود که کنارههای پایه در اثر کشش گسسته شده است و قسمتهایی در گوشهها و نیز قسمتهایی که متمایل به کناره هستند در اثر برش گسسته شده است. علاوه براین 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 بخشهایی از پایه هنوز حالت الاستیک دارد که بیشتر مربوط به سقف و کف پایه است که میزان آن نسبت به شیبهای ۴۵ و ۳۰ درجه افزایشیافته 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 کنارههای یایه، اطراف و گوشهها که در اثـر کشـش و بـرش گسسـته است، دیگر قسمتهای پایه به صورت پلاستیک یا الاستیک است و محدودهای 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 قسمتهای پایه به صورت پلاستیک و خمیری است که این شرایط نیز برای کار مناسب نیست و احتمال ناپایداری کارگاه استخراج وجود دا, د.

۴- بررسی اثر شیب لایه بر تغییرات تنش قائم و برشی در پایه

برای این که بتوان یک تحلیل واقعبینانه از تاثیر شیب لایه بر مقاومت پایههای زغالی بوجود آید با انتخاب نقاطی در مرکز پایه (نقطه *D*)، سقف (نقطه *B*)، کف (نقطه *T*) و گوشههای سمت چپ (نقطه *A*) و راست (نقطه *C*) (نقاط شاهد در شکل ۴)، مقادیر تغییرات تنش قایم و تنش برشی در شیبهای مختلف و عرض پایه ۱۰ و ۱۵ متر و برای حالتی که هر دو کارگاه استخراج شدهاند با یکدیگر مقایسه شده است. مقادیر تغییرات تنش قایم در پایه با عرضهای مختلف و در شیبهای ۲۰، 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، منحنیهای 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 D چون در مجاورت کارگاه استخراج اول قرار گرفته است توان تحمل تنش آن نسبت به سایر نقاط کمتر است. این موضوع در شیبهای 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

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 می بخش ها است.

۳- با توجه به شکلهای الف و ب میتوان نتیجه گرفت که با افزایش عرض پایه مـیتـوان از تـأثیر شـیب لایـه بـر کاهش مقاومت پایه کاست.

همانطورکه پیشتر بیان شد، پایه در لایههای شـیبدار بر خلاف لایههای افقی تحت تاثیر تـنشهـای برشـی قـرار

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



توجه به شكل مذكور نكات زير قابل توجه است.



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

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

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



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

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

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

۱- با توجه به شکل ۸- الف روشن است مرکز پایه و
 کف آن (نقاط D و Z) 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 می یابد.

۲- با توجه به شکل A- ب می توان بیان نمود که با افزایش عرض پایه بیشترین مقدار تنش برشی در شیب 4درجه به اجزای پایه وارد می شود. در این حالت بر نقط ه گوشه سمت راست پایه (نقط D) 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  $(B, D \ e \ d)$  در تمام شیبها مقدار تنش برشی ثابت است و با افزایش شیب لایه، تنش برشی وارد بر این نقاط افزایش یافته است.

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 درجـه پرداختـه شـده است. بـه منظـور محاسبهی حداکثر مقاومت پایه میتـوان از معیار شکست موهر-کولمب استفاده نمود. بر این اساس مقاومت پایـه از رابطه زیر قابل محاسبه است[۱۸].

$$PS = 2 \times C \times \sqrt{\frac{1 + Sin(\varphi)}{1 - Sin(\varphi)}} + \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \times \sigma_3 \tag{17}$$

که در آن، PS، مقاومت پایه،  $\varphi$ ، زاویه اصطکاک داخلی و  $\sigma_3$  تنش محصور کننده در لبه پایدار پایه است. نتایج مدلسازی عددی نشان داده است که مقدار  $\sigma_3$  بعد از لبه شکسته شده پایه برابر با ۱۰/۷۳مگاپاسکال است. علاوه بر این با توجه به شکل ۷ مشخص است که مقدار ۲۸ مگاپاسکال تنش به پایه وارد شده است. از اینرو از تقسیم مقاومت پایه محاسبه شده بر حداکثر تنش وارد بر پایه، مقاومت پایه محاسبه می شود.  $SF = \frac{MPS}{Szz} = \frac{(2 \times 0.5 \times 1.73) + (3 \times 10.73)}{28} = \frac{33.92}{28}$ 

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

# ۶- نتیجهگیری

پارامترهایی چون، عرض و ارتفاع کارگاه، شیب لایه، طول و عرض پایه و خواص مکانیکی ماده معدنی و سنگهای 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 روشهای تحلیلی و تجربی وجود ندارد، در این تحقیق از مدلسازی عددی برای تعیین ابعاد طراحی پایه در لایههای زغالی شیبدار 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 پایـه به طور کامل شکسته می شود و نایایدار است.

- هر چـه شـیب لایـه افـزایش یابـد، افـزایش عـرض پایـه نمیتواند پایداری مناسبتری را ایفـا نمایـد. ایـن در حـالی است که در شیبهای کمتر با افزایش عرض پایه میتوان از ناپایداری پایه جلوگیری نمود.

- پایه در لایههای شیبدار تحت اثر تنشهای برشی قرار دارد. افزایش عرض پایه سبب میشود که از اثر شیب لایه بر افزایش میزان تنشهای برشی جلوگیری شود. تنش برشی در پایه بیشتر به گوشههای پایه وارد میشود و اثر چندانی بر نقاط مرکزی پایه ندارد. - با افزایش عرض پایه میتوان از اثر شیب لایه بر کاهش مقاومت پایه جلوگیری نمود.

- با توجه به کنتورهای پلاستیک در اطراف پایه، پایه با عرض ۱۰ متر، در شیبهای 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 گوشههای پایه کاهش پیدا می کند و علامت آن منفی هست ولی در مرکز پایه مقدار آن در شیبهای مختلف متفاوت است، ولی در همگی علامت آن مثبت است و میتوان 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 تحلیلهای انجامشده می توان نتیجه گرفت که برای کارگاههای استخراج با طول ۹۰ متردر لایه با شیب ۳۰ درجه در صورتی که از پایه با عرض ۱۵ متر استفاد شود دارای پایداری قابل قبولی خواهد بود. با توجه به مشخصات معدن، در صورتی که قرار است کارگاههای استخراج در شیب ۴۵ درجه جانمایی شوند بهتر است از پایههایی با عرض بیشتر از ۱۵متر استفاده شود.

به هرحال امکان استفاده از پایه هایی با عرض ۱۵ متر نیز وجود دارد ولی به نظر می سد 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 پیچسنگ است ازاین 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.

[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- Jun De

[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).

<sup>1-</sup> Salamon

<sup>2-</sup> Greenwald

<sup>3-</sup> Steart

<sup>4-</sup> Inclined Seam

<sup>5-</sup> Xu

<sup>7-</sup> Abutment Fraction