

## طراحی ابعاد بهینه پایه در معدن کرومیت فاریاب با توجه به ترتیب مراحل استخراج

سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۱\*</sup>، مهدی نجفی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود [jalalime@shahroodut.ac.ir](mailto:jalalime@shahroodut.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود [mehdinajafi1362@gmail.com](mailto:mehdinajafi1362@gmail.com)

(دریافت ۱۹ مهر ۱۳۹۰، پذیرش ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۱)

### چکیده

طراحی بهینه ابعاد پایه اهمیت زیادی در بهینه‌سازی معدن‌کاری به روش استخراج کارگاه و پایه دارد. به دلیل محدودیت‌های موجود در روش‌های طراحی سنتی و تجربی، امروزه روش‌های عددی به‌طور وسیعی برای طراحی پایه به‌کار می‌روند. در این تحقیق هدف تعیین ابعاد مناسب پایه‌ها در بخش کارگاه و پایه معدن کرومیت فاریاب با در نظر گرفتن ترتیب مراحل استخراج با استفاده از مدل‌سازی عددی است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن چهار مرحله استخراج، بیانگر آن است که پایه ۹ و ۱۲ متری در تمام مراحل استخراج پایدار می‌مانند و پایه‌های ۳ و ۶ متری در مرحله سوم استخراج شکسته می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که عرض پایه بین ۶ تا ۹ متر قرار دارد. با مدل‌سازی عددی ابعاد پایه ۷/۵ و ۸ متر مشخص شده است که در محدوده‌ای که ارتفاع کارگاه در حدود ۱۲ متر است عرض پایه ۸ متر مناسب است. نتایج این تحقیق با شرایط واقعی معدن با تقریب خوبی سازگار است چون پایه‌های معدنی که عرض آن‌ها کمتر از حدود ۸ متر بوده تخریب شده‌اند یا در آستانه تخریب قرار دارند و تنها پایه‌های با ابعاد بیش از ۸ متر تاکنون پایدار مانده‌اند. به‌منظور اعتبارسنجی روش استفاده شده، نتایج روش عددی با نتایج نظریه سطح تأثیر و رابطه پاکالنیس و لاندنر که به ترتیب در مورد تنش متوسط وارد بر پایه و تنش افقی داخل لایه هستند مقایسه شده است. مقایسه نتایج روش عددی در مورد توزیع تنش افقی در پایه‌های عریض و باریک نشان داده است که نمی‌توان در پایه‌هایی با نسبت عرض به ارتفاع خیلی کم رابطه بین تنش قائم و افقی برقرار کرد؛ در حالی که در پایه‌های عریض که در وضعیت پایدار قرار دارند توزیع تنش افقی سهمی‌گون است و مقدار تنش افقی در وسط پایه بیشینه است. برای این گونه پایه‌ها، نتایج مدل‌سازی عددی در مورد تنش افقی با توجه به مراحل استخراج با نتایج رابطه پاکالنیس و لاندنر به‌طور تقریبی یکسان است.

### کلمات کلیدی

کارگاه و پایه، روش‌های عددی، مکانیزم شکست، ابعاد بهینه، معدن کرومیت فاریاب.

## 1- مقدمه

پایه در فاز یک معدن کرومیت فاریاب که با روش کارگاه پایه استخراج می‌شود، تعیین شده است.

## 2- مروری بر روش‌های طراحی پایه‌ها

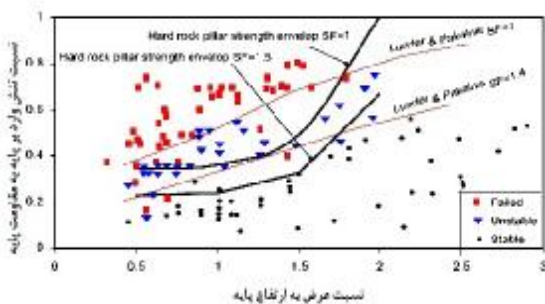
به‌طور کلی طراحی پایه با توجه به مقدار و چگونگی توزیع بار وارد بر پایه و مقاومت پایه با کمک روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی انجام می‌شود. از این‌رو ابتدا باید بار وارد بر پایه و چگونگی توزیع آن برآورد شود.

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 [1]. تاکنون نظریه‌های متعددی برای محاسبه تنش وارد بر پایه‌ها ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به نظریه‌های سطح تأثیر<sup>1</sup> و خیز پایه<sup>2</sup> اشاره کرد که با کاربرد آن‌ها تنها می‌توان تنش وارد بر پایه را برآورد کرد. در این نظریه‌ها نحوه توزیع بار در داخل پایه قابل بررسی نیست. نظریه دیگری که در این زمینه مطرح شده است نظریه خیز تیر<sup>3</sup> سنگی است. با کاربرد این نظریه می‌توان چگونگی انتقال و توزیع بار وارد بر پایه‌ها را در یک پهنه معدنی با توجه به تغییر شکل و خیز تیر سنگی سقف برآورد کرد. علاوه بر موارد بالا، نظریه ضریب پی<sup>4</sup> نیز که تلفیقی از روش‌های مذکور است، ارائه شده است. اما از آنجا که این روش بر اساس تجارب محدود ارائه شده و فقط در موارد خاصی قابل استفاده است، چندان مورد استقبال طراحان معدن قرار نگرفت. همزمان با محاسبه تنش وارد بر پایه به کمک یکی از نظریه‌های بالا، باید مقاومت پایه محاسبه شود. اولین روابط تجربی برای محاسبه مقاومت پایه در سنگ‌های نرم و برای معادن زغالسنگ ارائه شده است. این روابط توسط سالامون<sup>5</sup> [2]، گرینوالد<sup>6</sup> [3] و استیرت<sup>7</sup> [4] ارائه شده است. به دنبال ارائه روابط تجربی در سنگ‌های نرم، روابطی نیز برای برآورد مقاومت پایه در سنگ‌های سخت توسط هدلی و گرانت<sup>8</sup> با استفاده از روش آنالیز برگشتی برای پایه‌های استفاده شده در معادن اتاق و پایه واقع در منطقه معدنی الیوتلیک<sup>9</sup> کانادا ارائه شده است [5]. پس از آن یک بانک اطلاعاتی کامل درباره پایداری و ناپایداری پایه‌های متشکل از سنگ‌های سخت توسط لندر و پاکالنیس جمع‌آوری شده است. این مجموعه شامل 178 مورد مطالعاتی از معادن سنگ‌های سخت در کانادا است. در این مطالعات پایه‌ها به سه گروه اصلی تقسیم شده‌اند؛ پایه‌هایی که دارای ضریب ایمنی بیشتر از 1/4 بوده و به‌طور کلی پایدار بوده‌اند؛ پایه‌هایی که

روش استخراج کارگاه و پایه کاربرد گسترده‌ای در استخراج کانسارهای غیرفلزی و برخی کانسارهای فلزی دارد و از معمول‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی کانسارهای غیرزغالی است. این روش، یک روش استخراج بدون نگهداری است که در آن فضاها را استخراجی با الگویی منظم یا غیرمنظم حفر می‌شوند و برای نگهداری سقف، قسمتی از ماده معدنی به صورت پایه باقی می‌ماند. با استخراج ماده معدنی و افزایش ابعاد کارگاه‌های استخراج در اطراف پایه‌های باقیمانده، بار وارد بر پایه افزایش می‌یابد و این افزایش بار تا زمان رسیدن پایه به مقاومت نهایی پیش می‌رود و ممکن است در نهایت منجر به شکست پایه شود. در روش استخراج کارگاه و پایه، طراحی پایه‌های باقیمانده با توجه به مقاومت پایه، مقدار و چگونگی توزیع بار وارد بر پایه انجام می‌شود. 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 کمترین ابعاد پایه به ترتیبی است که ایمن بودن و اقتصادی بودن طرح را تأمین کند.

بار وارده بر پایه با روش‌های تحلیلی، تجربی، عددی و 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 ارائه شده است. اما این روش‌ها در عین سادگی معایبی دارند که موجب شده تمایل طراحان به استفاده از روش‌های عددی برای برآورد مقاومت پایه افزایش یابد. روش‌های عددی امکانات مناسبی را در اختیار طراح قرار می‌دهد که با استفاده از آن‌ها می‌توان شرایط مرزی مسئله، خصوصیات رفتاری پایه، کمر بالا و کمر پایین آن، چگونگی توزیع بار وارد بر پایه و ترتیب مراحل استخراج را در طراحی پایه منظور کرد.

هدف از این تحقیق، تعیین ابعاد بهینه پایه در روش استخراج کارگاه و پایه در سنگ‌های سخت با توجه به ترتیب مراحل استخراج در یک پهنه است. به این منظور با توجه به طراحی تجربی در تعیین عرض پایه‌ها در این معدن (عرض کمتر از 12 متر)، مدل‌های عددی برای نسبت‌های عرض به ارتفاع کمتر از یک تهیه شده و پس از ارائه روش کلی حل مسئله، نحوه شکست پایه با در نظر گرفتن رفتار کرنش نرمی بررسی شده است. در پایان با بهره‌گیری از روش ارائه شده، ابعاد بهینه



شکل 1: نمودارهای تجربی مقاومت پایه‌هایی از جنس سنگ‌های سخت [6]

به هر حال انجام این‌گونه مطالعات منجر به ارائه یک سری روابط تجربی برای محاسبه مقاومت پایه شده است. در جدول 1 خلاصه روابط مهم تجربی برای محاسبه مقاومت پایه در سنگ‌های سخت بیان شده است.

در این جدول،  $W_p$  و  $H_p$  به ترتیب عرض و ارتفاع پایه،  $S_p$ ، مقاومت پایه،  $S_{ci}$ ، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر،  $V_s$ ، حجم نمونه مکعبی شکل از جنس پایه با ابعاد معین برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ یکپارچه،  $V_p$ ، حجم پایه و در نهایت  $B_s$  و  $H_s$  به ترتیب عرض و ارتفاع نمونه مکعبی سنگ است.

جدول 1: خلاصه‌ای از روابط مقاومت پایه در سنگ‌های سخت

شماره	ارائه دهنده	سال ارائه	فرمول محاسبه مقاومت پایه
1	Hedley and Grant [5]	1972	$S_p = 133 \frac{W_p^{0.5}}{H_p^{0.75}}$
2	Hardy-Agapito [8]	1982	$\frac{S_{pf}}{S_{cf}} = \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^{.18} \left[ \left( \frac{B_p}{H_p} \right) / \left( \frac{B_s}{H_s} \right) \right]^{.833}$
3	Kimmelmann [9]	1984	$S_p = 0.691 S_{ci} \frac{W_p^{0.46}}{H_p^{0.66}}$
4	Krauland [10]	1987	$S_p = 0.354 S_{ci} \left( 0.778 + 0.222 \frac{H_p}{W_p} \right)$
5	Potvin [11]	1989	$S_p = 0.420 S_{ci} \frac{W_p}{H_p}$
6	Sjoberg [12]	1992	$S_p = 0.308 S_{ci} \left( 0.778 + 0.222 \frac{H_p}{W_p} \right)$
7	Lunder & Pakalnis [6]	1997	$S_p = 0.44 S_{ci} \left( 0.68 + 0.52 \frac{H_p}{W_p} \right)$

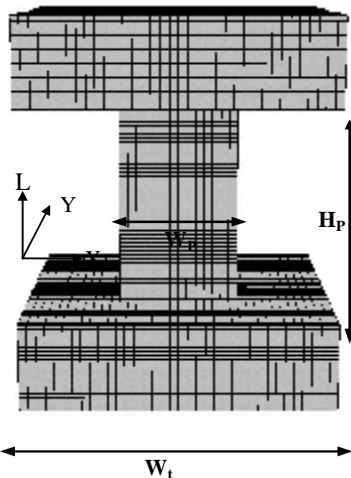
وجود مزایای ذکر شده، این روش‌ها محدودیت‌هایی به شرح زیر دارند [13].

- به‌طور عمده منحصر به یک ناحیه خاص جغرافیایی هستند و استفاده از آن‌ها برای سایر نقاط خالی از اشکال نیست.

دارای ضریب ایمنی بین 1 تا 1/4 بوده‌اند؛ این پایه‌ها ناپایدار بوده و در هنگام انجام مطالعات، شکست در آن‌ها به صورت پوسته پوسته شدن یا ورقه شدن مشاهده شده است و پایه‌هایی که دارای ضریب ایمنی کمتر از 1 بوده و در هنگام مطالعه، ناپایداری در آن‌ها دیده شده است. نتایج این تحقیق در شکل 1 نشان داده شده است [6]. با توجه به نمودارهای شکل 1 که بر حسب نسبت عرض به ارتفاع و مقاومت سنگ بکر رسم شده‌اند، بیشترین شکست در پایه‌های از جنس سنگ سخت در نسبت عرض به ارتفاع 0/5 تا 1 اتفاق افتاده است و برای پایه‌هایی با نسبت عرض به ارتفاع بیشتر از 2 شکستی رخ نداده است. در همین راستا، مارتین و مایبی مطالعاتی انجام داده‌اند، مطالعات آن‌ها نیز نشان می‌دهد که شکست در پایه‌هایی از جنس سنگ سخت تا متوسط به‌طور عمده در نسبت عرض به ارتفاع کمتر از 2 رخ می‌دهد [7].

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

- 2- تشکیل هندسه مدل و مش بندی؛
  - 3- اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه؛
  - 4- مدل سازی عملیات استخراج راهروها به منظور ایجاد پایه
  - 5- تحلیل مدل و بدست آوردن نتایج.
- ابعاد هندسی مدل در تمام مدل های عددی ساخته شده برابر با  $22 \times 18 \times 18$  متر است. یعنی سطح تأثیر برای تمام پایه ها 18 متر، ارتفاع مدل ساخته شده برابر با 22 متر (12 متر ارتفاع پایه، 5 متر روباره و 5 متر کف مدل) است. شرایط مرزی به گونه ای تعریف شده است که دیواره های قائم مدل در جهت X و Y و کف در جهت Z ثابت شده است و سقف مدل آزاد است. بار به قسمت بالایی مدل وارد می شود.



شکل 2: مدل عددی پایه در نرم افزار FLAC<sup>3D</sup> بعد از اعمال همه مراحل استخراج

### 3-1- نحوه بارگذاری پایه

در روش استخراج کارگاه و پایه با پایه های منظم، قطعه معدن ابتدا راهروهایی به تعدادی تکه های استخراجی تقسیم می شود. استخراج کارگاه ها از راهروها شروع شده و توسط میان برهایی در فاصله های معین به هم وصل می شوند. با حفر این میان برها، پایه ها تشکیل می شوند. بنابراین در این تحقیق برای شبیه سازی بار وارد بر پایه، عملیات استخراج فضای اطراف پایه بصورت مرحله ای انجام شده است و بعد از هر مرحله استخراج، مدل به تعادل رسیده است. از این رو، ابتدا کارگاه ها در جهت امتدادی (جهت Y) ایجاد شده و در مراحل بعدی با استخراج میان برها در جهت شیبی (جهت X)، پایه ها شکل گرفته اند. ترتیب مراحل استخراج فضای اطراف پایه در شکل 3 نشان داده شده است.

- در این روابط ویژگی های 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 پایه های با نسبت عرض به ارتفاع کوچک تر از 3 ارائه شده اند و برای تحلیل های خارج از این محدوده اعتبار ندارند.
- در بیشتر این روابط نقش تنش محصورکننده در مقاومت پایه نادیده گرفته شده است. حال آن که در هر پایه پوسته خارجی پایه باعث بوجود آمدن تنش محصورکننده در قسمت میانی می شود.
- با توجه به محدودیت های بیان شده در مورد روش های تجربی استفاده از روش های عددی ضروری است. در روش های عددی امکان در نظر گرفتن محدودیت های روش های تجربی وجود دارد و با استفاده از این روش ها می توان مراحل شکست پایه را به نحوه مناسبی بیان کرد.

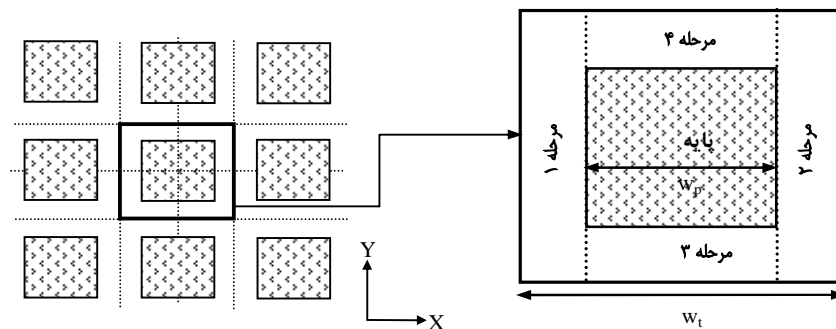
### 3- روش تحقیق

در این تحقیق از نرم افزار FLAC<sup>3D</sup> که از روش تفاضل محدود بهره می برد برای مدل سازی عددی پایه استفاده شده است. با توجه به این که از مدل های ارائه شده در این مقاله برای تحلیل پایه های باقیمانده در بخش کارگاه و پایه معدن زیرزمینی کرومیت فاریاب استفاده خواهد شد، هندسه مدل با توجه به مشخصات هندسی کارگاه و پایه های این معدن مدل سازی شده است. بر این اساس نسبت های عرض به ارتفاع متفاوت و متناسب با شرایط کاری معدن فاریاب در نرم افزار مدل سازی شده و نحوه ایجاد پایه در حین استخراج به دقت توسط نرم افزار شبیه سازی شده است. سطح تأثیر ( $W_i$ ) در تمام مدل های ساخته شده ثابت است و با کوچک تر کردن عرض پایه ( $W_p$ ) بار وارد بر پایه به صورت مرحله ای تا حد شکست پایه افزایش داده شده است. ارتفاع پایه نیز در تمام مدل ها ثابت و متناسب با ارتفاع پایه در معدن فاریاب انتخاب شده است. به طور طبیعی در این حالت با تغییر عرض پایه، نسبت عرض به ارتفاع آن تغییر می کند.

با در نظر گرفتن شرایط معدن فاریاب، فرض شده است که پایه ها در عمق 150 متری از سطح زمین قرار دارند. در شکل 2، نمای کلی یک پایه مدل سازی شده نشان داده شده است. مدل سازی عددی در نرم افزار FLAC<sup>3D</sup> در 5 مرحله به ترتیب زیر است:

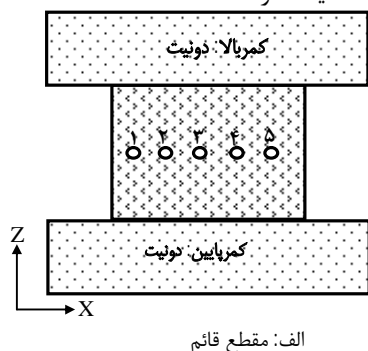
- 1- مشخص کردن مرزها و خصوصیات مواد؛

مرحله 3-2- نحوه ثبت نتایج تحلیل عددی  
 به منظور بررسی رفتار پایه در هنگام استخراج مرحله‌ای کارگاه‌ها، 5 نقطه در وسط ارتفاع پایه و در امتداد محور X در شکل 4 جانمایی شده و مقادیر تنش در این نقاط در کلیه

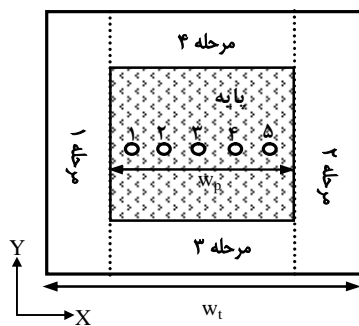


شکل 3: ترتیب مراحل استخراج

کولمب در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  استفاده شده است و به منظور بررسی بهتر رفتار پایه فرض شده است که سقف و کف رفتار الاستیک دارند.



الف: مقطع قائم



ب: مقطع افقی

شکل 4: نقاط محل ثبت تنش در داخل پایه

### 3-3- مدل رفتاری استفاده شده در تحلیل عددی

برای بررسی رفتار پایه‌ها از مدل کرنش نرمی موهر کولمب استفاده شده است، زیرا بعضی از مطالعات انجام شده نشان داده است که مدل الاستو پلاستیک کامل موهر کولمب قادر به شبیه‌سازی رفتار پایه‌ها نیست [10]. رفتار کرنش نرمی<sup>10</sup> در توده سنگ، ناشی از رشد و توسعه ترک‌ها و بهم‌پیوستگی ریز ترک‌ها و تبدیل آن‌ها به ترک‌های بزرگ است. این امر باعث پوسته پوسته شدن سنگ در مرز فضاهای زیرزمینی می‌شود. پایه‌هایی که رفتار کرنش نرمی از خود نشان می‌دهند می‌توانند یک کاهش سریع در ظرفیت باربری را تحمل کنند تا به مقاومت نهایی برسند [15]. منحنی تنش-کرنش ترسیم شده در شکل 5 نشان می‌دهد که مصالح بعد از نقطه حداکثر بارگذاری در حالت کلی سه رفتار پلاستیک، کرنش نرمی و شکننده از خود نشان می‌دهند.

مدل کرنش نرمی یکی از مدل‌هایی است که به کمک آن می‌توان تمام مراحل تغییر شکل پایه (الاستیک، تسلیم، مقاومت باقی‌مانده) را شرح داد. در مدل رفتاری کرنش نرمی کاهش مقاومت به ازای افزایش کرنش پلاستیک بیان می‌شود این عمل در مقایسه با مدل‌های رفتاری دیگر به‌طور نسبی ساده و به واقعیت نزدیک‌تر است [16]. مدل کرنش نرمی نرم-افزار  $FLAC^{3D}$  از یک سری توابع کرنش که منطبق بر خواص مدل موهر کولمب (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع) است، بهره می‌برد [17]. از این‌رو در این تحقیق برای بررسی رفتار پایه بعد از نقطه پیک از مدل کرنش نرمی موهر

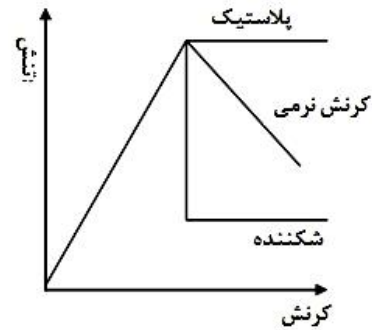
به سایر نقاط دیده می‌شوند [17,18]. از این اصل برای بیان شکست پایه در مراحل مختلف استخراج استفاده شده است. به منظور تعیین ابعاد بهینه پایه در این معدن، در مرحله اول پایه‌هایی با عرض 3، 6، 9 و 12 متر انتخاب شده است. هندسه پایه با توجه به اصول تشریح شده در قسمت‌های قبل در نرم افزار ایجاد شده است. منحنی‌های مربوط به توزیع تنش قائم در نقاط مفروض داخل پایه‌های ذکر شده در شکل 6 نشان داده شده است. با استفاده از این منحنی‌ها چگونگی شکست پایه و تعیین عرض بهینه بیان شده است.

با توجه به شکل 6 و با مطالعه بر روی هر کدام از مراحل استخراج نکات زیر قابل توجه است:

1- در مرحله اول استخراج، با گذر از ابعاد بیشتر پایه به سمت ابعاد کمتر، توزیع تنش بر روی پایه یکنواخت‌تر می‌شود به طوری که در مرحله اول استخراج کمترین مقدار تنش در سمت راست پایه در حدود 4/5 و بیشترین آن در سمت چپ پایه در حدود 6 مگاپاسکال است اما در پایه‌ای با عرض 3 متر کمترین مقدار در حدود 8/5 مگاپاسکال و بیشترین آن حدود 9/5 مگاپاسکال است.

2- با انجام مرحله دوم استخراج، توزیع تنش بر روی پایه‌ها حتی پایه‌های عریض، یکنواخت‌تر می‌شود به طوری که میانگین تنش وارد بر پایه‌ای با عرض 12 متر برابر با 6 مگاپاسکال است که به قسمت میانی پایه وارد می‌شود. این در شرایطی است که بیشترین تنش وارد بر لبه‌های پایه برابر با 6/5 مگاپاسکال است. در مورد دیگر پایه‌ها نیز توزیع تنش در قسمت‌های مختلف پایه به طور تقریبی یکنواخت است.

3- با انجام مرحله سوم استخراج، توزیع تنش بر روی پایه‌هایی با عرض 6، 9 و 12 متر حالتی مشابه مرحله دوم استخراج دارد ولی مقدار تنش وارد بر پایه در این مرحله بیشتر از مرحله دوم استخراج است. در مورد پایه با عرض 3 متر توزیع تنش قائم بر روی آن یکنواخت است اما میزان تنش که به پایه در این مرحله وارد شده است کمتر از میزان تنش است که در مرحله دوم استخراج به آن وارد شده است. به عبارت دیگر، در این مرحله اجزای پایه تحمل تنشی بیش از میزان تنش در مرحله دوم استخراج را نداشته‌اند. بنابراین تمام نقاط پایه با عرض 3 متر به تسلیم رسیده‌اند و در واقع این پایه در مرحله سوم استخراج، شکسته شده است.



شکل 5: رفتار پلاستیک، شکننده و کرنش نرمی [14]

#### 4- طراحی ابعاد پایه‌های معدن کرومیت فاریاب

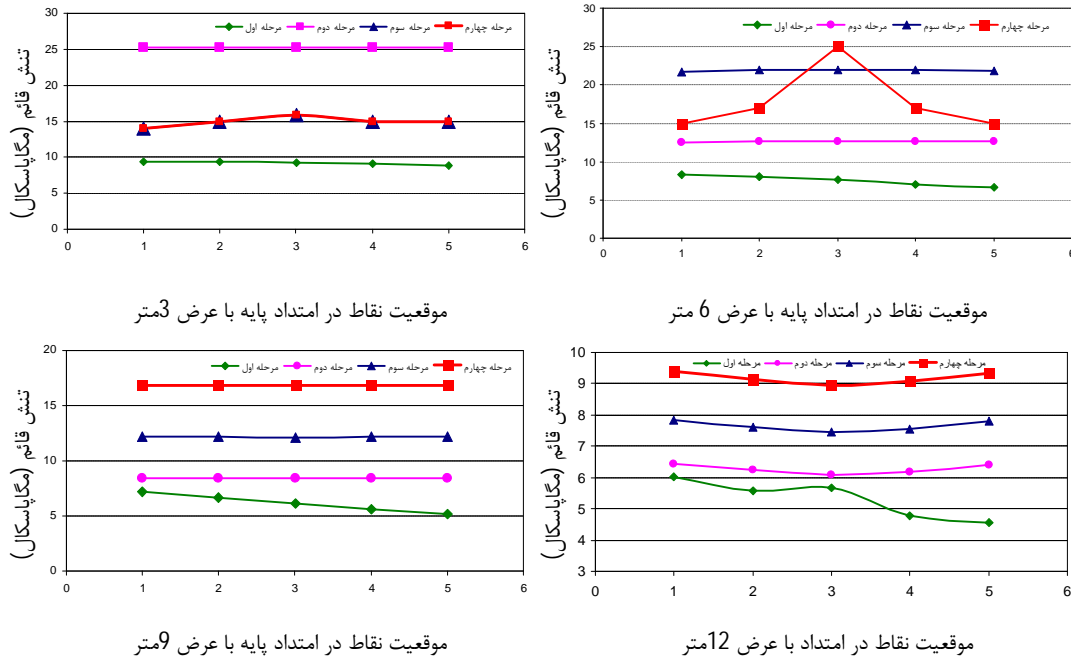
در این تحقیق با استفاده از مطالعات انجام شده روی سنگ‌های سخت و مدل‌های عددی ایجاد شده برای بهینه‌سازی، ابعاد بهینه پایه‌های باقیمانده در فاز یک معدن کرومیت فاریاب (معدن فطر) تعیین شده است. معدن کرومیت فاریاب در استان هرمزگان واقع است و بخشی از آن به روش استخراج کارگاه و پایه با پایه‌هایی با مقطع مربعی و آرایش منظم استخراج می‌شود. متوسط ارتفاع پایه‌های برجای گذاشته شده در این معدن حدود 12 متر است. به همین دلیل در تمام مدل‌های عددی ساخته شده ارتفاع پایه برابر با 12 متر در نظر گرفته شده است. جدول 2، پارامترهای ژئومکانیکی پایه‌های معدن کرومیت فاریاب و سنگ در برگیرنده آن (دونیت) را که در تحلیل عددی استفاده شده است، نشان می‌دهد.

جدول 2: پارامترهای ورودی در مدل سازی عددی

پارامتر	نماد	آحاد	کمرباين	کمربالا	پایه‌ها
مدول یانگ	$E$	$MPa$	16000	16250	32000
نسبت پواسون	$\nu$	-	0/05	0/04	0/22
چسبندگی	$C$	$MPa$	4/27	4/81	6/38
زاویه اصطکاک داخلی	$f$	$Degree$	53/4	55/5	55/4
مدول حجمی	$K$	$GPa$	5/9	5/9	19/1
مدول برشی	$G$	$GPa$	7/62	7/81	13/14

#### 4-1- نتایج مدل‌سازی عددی

هنگامی که بار اعمالی وارد بر پایه از مقاومت آن بیشتر شود شکست پایه اتفاق می‌افتد. شکست پایه از لبه‌های آن شروع می‌شود و به سمت مرکز پایه پیشروی می‌کند از این رو با کاهش عرض پایه با ثابت بودن بار وارد بر پایه، تنش وارده بر پایه افزایش می‌یابد. با افزایش بار وارد بر پایه، نقاطی از پایه که به تسلیم می‌رسند به صورت نقاطی با تنش‌های کم نسبت



شکل 6: تغییرات تنش قائم در پایه‌های کرومیت در مراحل مختلف بارگذاری

به عنوان مثال تنش متوسط وارد بر پایه با عرض 12 متر با استفاده از نظریه سطح تأثیر به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$S_p = \left(\frac{18}{12}\right)^2 \times 2800 \times 150 = 16.8 \text{ MPa}$$

از این رو با توجه به نتایج بیان شده در جدول 3، مشخص است که در مورد پایه‌هایی که در وضعیت پایدار قرار دارند، تنش وارد در پایان مرحله چهارم استخراج با نتایج نظریه سطح تأثیر برابر است.

در مورد پایه‌ها با عرض 3 و 6 متر، متفاوت بودن نتایج دو روش به این دلیل است که این پایه‌ها در شرایط تسلیم قرار دارند و با به تسلیم رسیدن این پایه‌ها توان تحمل تنش توسط آن‌ها کاهش یافته است.

جدول 3: مقایسه نتایج روش عددی و نظریه سطح تأثیر در برآورد تنش متوسط وارد بر پایه

عرض پایه (متر)				روش عددی	تنش متوسط (مگاپاسکال)
3	6	9	12		
15/9	25	16/82	9	روش عددی	تنش متوسط (مگاپاسکال)
151/2	37/8	16/8	9/45	نظریه سطح تأثیر	

4- با انجام مرحله چهارم استخراج، توزیع تنش بر روی پایه‌هایی با عرض 9 و 12 متر مشابه مرحله سوم استخراج، با افزایش تنش همراه است و بنابراین در هیچ کدام از پایه‌ها شکستی رخ نمی‌دهد. در مورد پایه‌ها با عرض 6 و 3 متر شرایط متفاوت است. در این وضعیت، در پایه با عرض 6 متر، توزیع تنش همانند مراحل قبلی استخراج یکنواخت نیست نقاط 1، 2، 4 و 5 در این پایه به تسلیم رسیده‌اند اما هنوز نقطه میانی شماره 3 به تسلیم نرسیده است و در واقع تنش آن بیشتر از مرحله قبل است. در مورد پایه با عرض 3 متر نیز شرایط مرحله سوم استخراج حکم‌فرما است و این پایه در شرایط تسلیم قرار دارد.

5- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در مورد تنش متوسط وارد بر پایه با نتایج نظریه سطح تأثیر در جدول 3 بیان شده است.

با توجه به شکل 3، از تقسیم (Wt) بر (Wp) و به توان رساندن این عبارت و سپس با ضرب در تنش قائم، میزان تنش متوسط وارد بر پایه با استفاده از تئوری سطح تأثیر محاسبه شده است.

3، واقع در مرکز پایه، برابر با 45 مگاپاسکال است. حال آن که در همین مرحله تنش وارد بر نقاط 1 و 5 که در نزدیکی لبه پایه قرار دارند، 25 مگاپاسکال است.

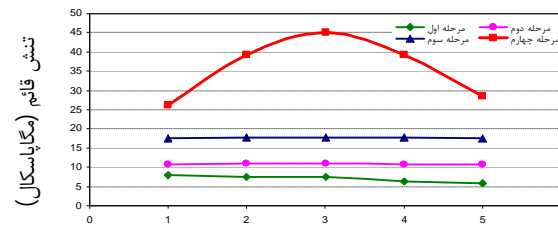
در شکل 8 هیستوگرام خروجی مربوط به توزیع تنش قائم در نرم افزار  $FLAC^{3D}$  که با توجه به آن منحنی‌های توزیع تنش شکل 7 ترسیم شده، نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در نقاط 1، 2، 4 و 5 پایه شکست حادث شده است. به طوری که بعد از نقطه متناظر با بار حداکثر، کاهش سریع در مقاومت پایه در نقاط بالا دیده می‌شود. ولی در نقطه 3 شکستی حادث نشده است. بنابراین ابعاد این پایه برای طراحی مناسب نیست.

در مرحله آخر طراحی، برای پایه‌هایی به عرض 8 متر انتخاب شده و تحلیل چگونگی توزیع بار بر روی آن‌ها انجام شده است.

در شکل 9 منحنی تغییرات تنش قائم بر روی این پایه نشان داده شده است. تغییرات تنش قائم بر روی این پایه نشان‌دهنده این است که توزیع تنش وارد بر آنها در تمام مراحل استخراج یکنواخت است. در شکل 10 هیستوگرام خروجی مربوط به تنش قائم در نرم افزار  $FLAC^{3D}$  که با توجه به آن منحنی‌های توزیع تنش قائم شکل 9 ترسیم شده، نشان داده شده است. این شکل حاکی از آن است که پایه با عرض 8 متر در تمام مراحل استخراج پایدار باقی می‌ماند. بنابراین پایه با عرض 8 متر برای اجرا مناسب است.

6- با توجه به نتایج بیان شده در بندهای 1 تا 5، پایه‌ها با عرض 9 و 12 متر در تمام چهار مرحله استخراج پایدار باقی می‌مانند اما پایه‌ها با عرض 3 و 6 متر به ترتیب در مراحل سوم و چهارم استخراج، پایداری خود را از دست می‌دهند، از این رو پایه‌ها با عرض 6 و 3 متر نمی‌توانند برای طراحی معدن مناسب باشند.

به طور کلی با استفاده از نتایج بدست آمده از شکل 6 مشخص است که عرض بهینه پایه در بازه بین 6 و 9 متر قرار دارد. از این رو در مرحله دوم طراحی، عرض 7/5 متر برای پایه‌ها انتخاب شده است. در مورد این پایه نیز مراحل چهارگانه استخراج به همان ترتیب انجام شده است. منحنی تغییرات تنش قائم بر روی این پایه در شکل 7 نشان داده شده است.

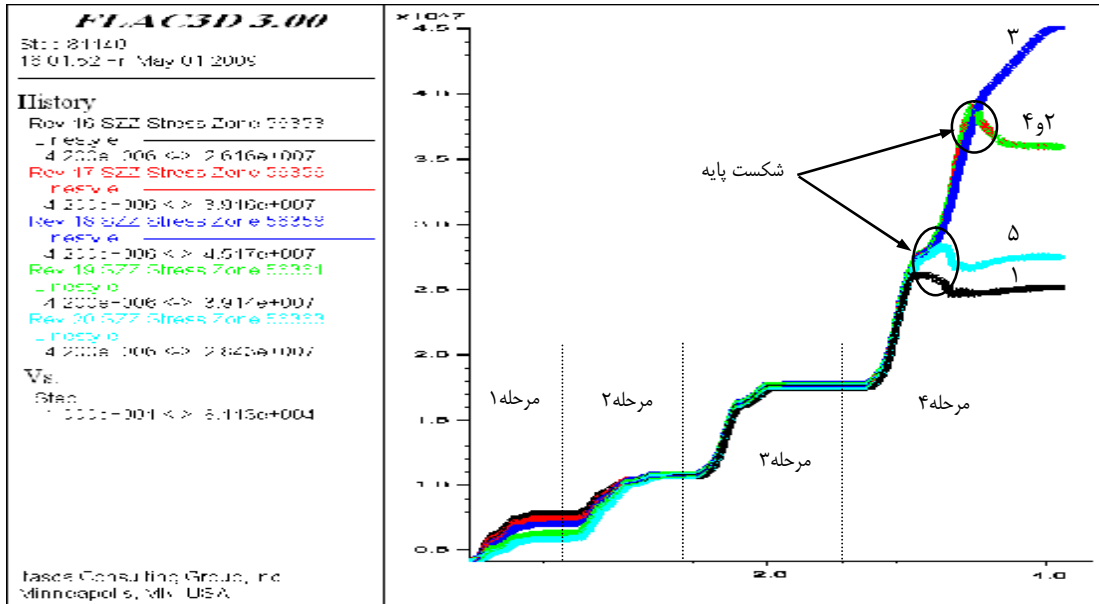


موقعیت نقاط در امتداد پایه با عرض 7/5 متر

شکل 7: تغییرات تنش قائم در پایه‌های کرومیت با عرض 7/5 متر در مراحل مختلف استخراج

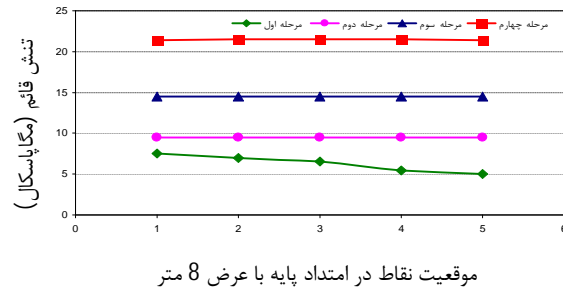
با توجه به این شکل، واضح است که توزیع تنش در مراحل اول تا سوم استخراج یکنواخت است اما در مرحله چهارم استخراج، توزیع تنش یکنواخت نیست و بر یک تابع سهمی‌گون منطبق می‌شود. در این مرحله حداکثر تنش وارد به نقطه



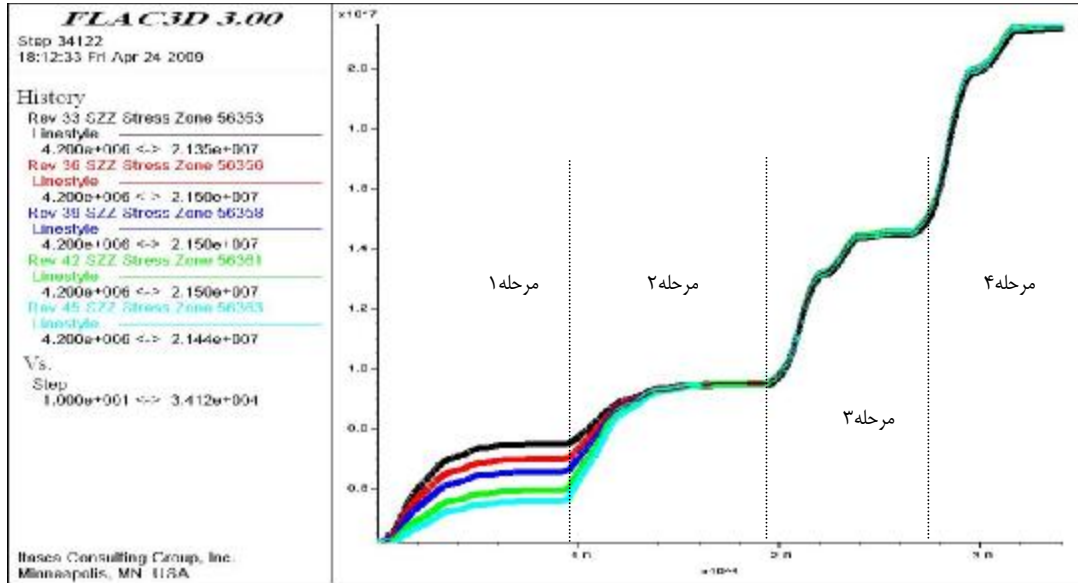


شکل 8: هیستوگرام مربوط به بار وارد بر پایه بر حسب تابعی از مراحل استخراج برای پایه با عرض 7/5 متر

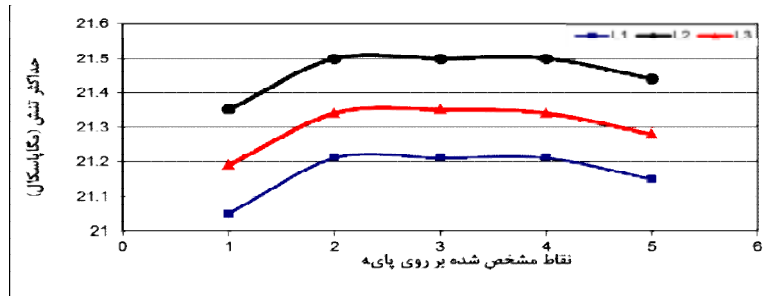
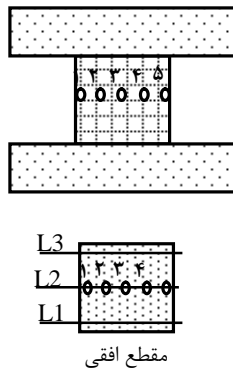
به منظور بررسی احتمال ناپایداری در لبه‌های پایه در هنگام اجرای مراحل سوم و چهارم استخراج دو امتداد برداشت دیگر به مقطع افقی پایه با عرض 8 متر اضافه شده و نتایج برآورد مقادیر تنش قائم مربوط به نقاط واقع به هر یک از این امتدادها در شکل 11 رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که در تمام نقاط اندازه‌گیری شده میزان بار وارده بر نقاط پایه در روی خط برداشت L2 (نقاط میانی پایه) بیشتر از سایر قسمت‌های آن (لبه‌های مجاور به مراحل سوم و چهارم استخراج) است.



شکل 9: تغییرات تنش قائم در پایه‌های کرومیت با عرض 8 متر در مراحل مختلف استخراج



شکل 10: هیستوگرام مربوط به بار وارد بر پایه بر حسب تابعی از مراحل استخراج برای پایه با عرض 8 متر

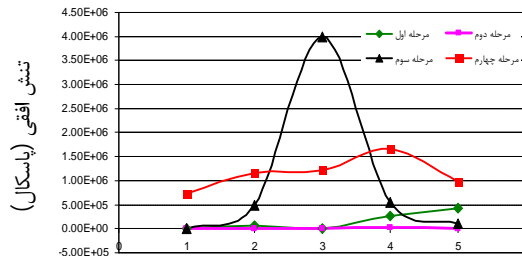


شکل 11: تغییرات تنش قائم در مقاطع افقی وسط ارتفاع پایه

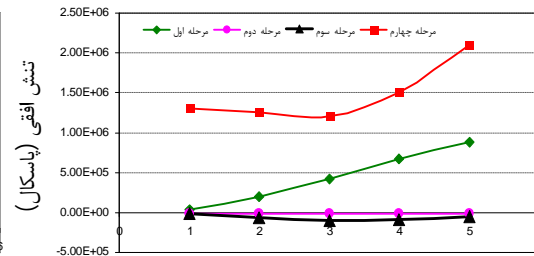
#### 1-1-4- تنش‌های افقی

تنش افقی برای نقاط تعریف شده در داخل پایه به ازای هر یک از مراحل استخراج، در شکل 12 نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های توزیع تنش افقی وارد بر پایه موارد زیر به دست می‌آید.

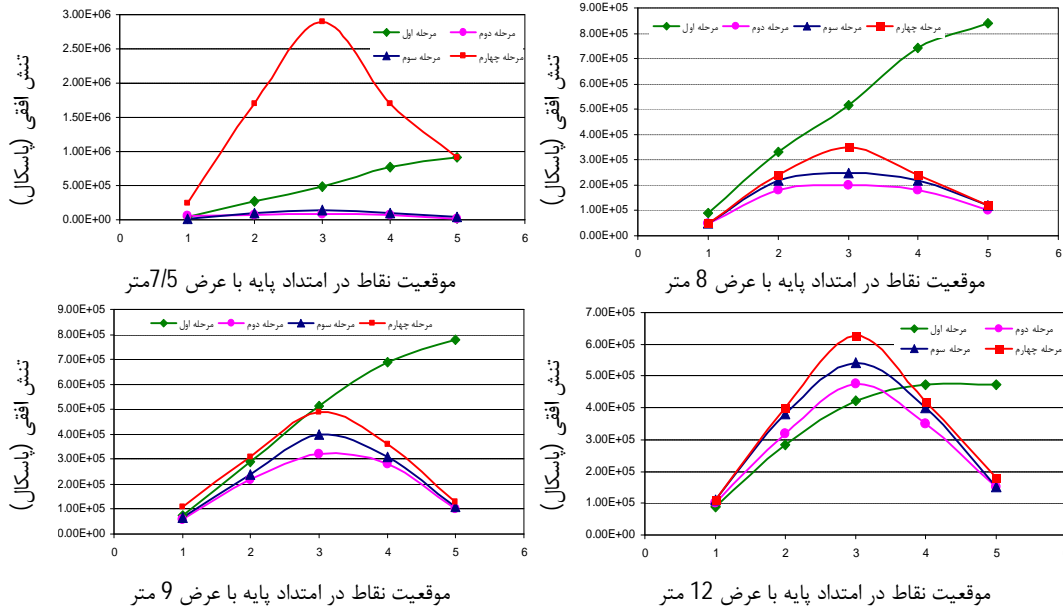
برای آگاهی یافتن از وضعیت تنش‌های افقی در داخل پایه و تغییرات آن با توجه به مراحل استخراج، مقادیر مربوط به



موقعیت نقاط در امتداد پایه با عرض 3 متر



موقعیت نقاط در امتداد پایه با عرض 6 متر



شکل 11: توزیع تنش افقی در مقطع میانی پایه با نسبت‌های ابعادی متفاوت با توجه به مراحل استخراج

در تمام نقاط واقع در پایه به صفر میل می‌کند و در بعضی حالات نیز تنش افقی به صورت کششی در پایه ایجاد می‌شود. این عامل به خاطر افزایش بیش از حد بار وارد بر پایه است که باعث می‌شود المان‌های داخل پایه در راستای افقی از هم دور شوند. در این حالت، پایه تحمل بار اضافی را ندارد از این رو پایه در قسمت وسط چاق‌تر می‌شود و توزیع تنش در اجزای پایه بر هم می‌خورد.

4- با انجام دادن مرحله چهارم استخراج توزیع تنش افقی در مورد پایه‌هایی با عرض 12، 9 و 8 متر که در وضعیت پایدار قرار داشته‌اند، مشابه مرحله سوم استخراج، همراه با افزایش مقدار تنش است. در این پایه‌ها مقدار تنش افقی در نقطه 3 بیشتر از دیگر نقاط است. در این حالت، پایه‌هایی با عرض 7/5 متر چون در مرز پایدار و ناپایدار قرار دارند، مقدار تنش افقی در وسط آن‌ها بیشتر از مقدار آن در لبه‌های این پایه‌ها است. در این مرحله وضعیت تنش افقی در مورد پایه‌های 3 و 6 متر به خاطر بر هم خوردن تعادل تنش در اطراف منطقه شکسته شده، روند مشخصی ندارد و در نقاط مختلف متفاوت است.

5- توزیع تنش الاستیک در پایه تابع شکل هندسی آن است [7]. پاکالنیس و لندر با استفاده از مدل‌سازی عددی نشان دادند که توزیع تنش الاستیک در داخل پایه‌های سخت را می‌توان با عبارت نسبت تنش افقی ( $S_3$ ) به تنش قائم داخل لنگه ( $S_1$ ) به صورت زیر بیان کرد [6].

$$\frac{S_3}{S_1} = 0.46 \left[ \text{Log} \left( \frac{w}{h} + 0.75 \right) \right]^{1.4/(w/h)}, \quad \frac{w}{h} \geq 0.5 \quad (1)$$

1- با انجام دادن مرحله اول استخراج، روند توزیع تنش‌های افقی در تمام پایه‌ها مشابه است اما در مورد پایه‌های با عرض بیشتر مقدار افزایش تنش افقی در نقاط داخلی پایه بیشتر از پایه‌ها با عرض کمتر است. در پایه‌ها با عرض بزرگ‌تر شرایط تنش دو محوره با استخراج مرحله اول تأثیر کمتری در کاهش تنش افقی سایر نقاط دارد. به‌طور طبیعی، توزیع تنش افقی به نحوی است که در قسمتی از پایه که در کنار منطقه استخراجی مرحله اول قرار گرفته کمترین و در طرف مقابل آن بیشترین است.

2- با انجام دادن مرحله دوم استخراج، روند توزیع تنش افقی در تمام پایه‌ها مشابه است و به صورت یک تابع سهمی‌گون توزیع می‌شود. در این مرحله اتاق‌های دو طرف پایه در جهت امتدادی استخراج شده است و شرایط توزیع تنش افقی متقارن است. علاوه بر این با کاهش عرض پایه مقدار تنش افقی در نقطه وسط پایه کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در مورد پایه با عرض 12 متر مقدار تنش افقی در نقطه میانی برابر با 0/45 مگاپاسکال و در مورد پایه با عرض 3 متر برابر با 0/15 مگاپاسکال است.

3- با انجام مرحله سوم استخراج، تنش افقی در مورد پایه‌هایی با عرض 12، 9، 8 و 7/5 متر، توزیع سهمی‌گون خود را حفظ می‌کند ولی مقدار تنش افقی در تمام نقاط بیشتر از مرحله دوم استخراج است. در مورد پایه‌هایی با عرض 6 و 3 متر، چون در این مرحله از استخراج به تسلیم می‌رسند مقدار تنش افقی

نتایج تحلیل عددی نشان داده است که با افزایش نسبت عرض به ارتفاع پایه، مقدار تنش افقی در بخش‌های میانی پایه افزایش می‌یابد و از این رو، مقاومت پایه افزایش خواهد یافت. هر چند که این افزایش مقاومت در سنگ‌های سخت برای نسبت‌های کمتر از یک کندتر است. در طراحی پایه با توجه به ترتیب مراحل استخراج، می‌توان توزیع بار بر روی پایه را برآورد کرد و چگونگی شکست پایه را در هر کدام از مراحل استخراج به خوبی بیان کرد. در این شرایط با وجود آن‌که بیشترین مقدار بار وارد بر پایه به قسمت میانی پایه وارد می‌شود، اما همواره شکست پایه از نقاط واقع بر لبه‌های پایه آغاز و توسعه می‌یابد.

مطالعه بر روی توزیع تنش افقی در پایه‌های عریض و باریک نشان می‌دهد که برای پایه‌هایی که به تسلیم می‌رسند به دلیل برهم خوردن تعادل تنش در اطراف منطقه شکسته شده، وضعیت تنش‌های افقی چندان مشخص نیست و از روند مشخصی پیروی نمی‌کنند و به‌طور کلی نمی‌توان در پایه‌هایی با نسبت عرض به ارتفاع خیلی کم رابطه بین تنش قائم و افقی برقرار کرد. در حالی که در پایه‌های عریض که در وضعیت پایدار قرار دارند توزیع تنش افقی سهمی‌گون است و مقدار تنش افقی در وسط پایه بیشترین است. برای این‌گونه پایه‌ها، نتایج مدل‌سازی عددی در مورد تنش افقی با توجه به مراحل استخراج با نتایج رابطه پاکالنیس و لاندنر به‌طور تقریبی یکسان است.

در نظر گرفتن مدل کرنش نرمی برای پایه‌ها با نسبت عرض به ارتفاع کوچک که خاصیت نرم شوندگی زیادی از خود نشان می‌دهند، باعث می‌شود که با مطالعه رفتار پایه بعد از نقطه حداکثر مقاومت بتوان به راحتی به نحوه شکست پایه پی برد. با مطالعه بر روی مدل‌های ساخته شده در این تحقیق مشخص شده است که در محدوده‌ای که ارتفاع کارگاه در حدود 12 متر است عرض پایه 8 متر مناسب برای طراحی پایه در معدن کرومیت فاریاب است. نتایج بدست آمده از این تحقیق با واقعیات معدن با تقریب خوبی سازگار است چرا که پایه‌های معدنی که عرض آن‌ها کمتر از حدود 9 متر بوده تخریب شده‌اند یا در آستانه تخریب قرار دارند و تنها پایه‌های با ابعاد بیش از 9 متر تاکنون پایدار باقی مانده‌اند.

که در آن  $w$  و  $h$  به ترتیب عرض و ارتفاع پایه است. مارتین و ماییبی نیز نشان دادند که نسبت محصور کنندگی پایه علاوه بر شکل هندسی به نسبت تنش‌های برجای دست نخورده هم وابسته است [7]. مقایسه نتایج نسبت تنش‌های افقی به تنش قائم در این تحقیق برای پایه‌ها با نسبت عرض به ارتفاع بیشتر از 0/5 با نتایج بدست آمده از روش پاکالنیس و لاندنر در جدول 3 نشان داده شده است. مقادیر تنش‌های  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  از هیستوگرام‌های خروجی از نرم‌افزار که در شکل‌های 6 تا 11 برای پایه با عرض‌های مختلف ترسیم شده، برداشت شده است.

با مقایسه نتایج دو روش واضح است که نتایج در مدل‌های عددی ساخته شده در این تحقیق برای پایه‌هایی که در وضعیت پایدار هستند با نتایجی که از رابطه پاکالنیس و لاندنر بدست آمده، به‌طور تقریبی یکسان است. در مورد پایه با عرض 7/5 متر که در شرایط تسلیم قرار دارند و وضعیت تعادل تنش در اطراف این پایه‌ها برهم خورده است، نتایج دو روش اختلاف قابل توجهی دارد.

جدول 3: مقایسه نتایج توزیع تنش الاستیک در سنگ‌های سخت

روش پاکالنیس و لاندنر	روش عددی استفاده شده در این تحقیق			عرض پایه (متر)
	$S_3/S_1$	$S_1$	$S_3$	
0/063	0/068	9/1	0/62	12
0/018	0/029	16/82	0/5	9
0/010	0/017	21	0/375	8
0/0054	0/088	45	4	7/5

## 5- نتیجه‌گیری

پارامترهایی چون، عرض و ارتفاع کارگاه، طول و عرض پایه و خواص مکانیکی ماده معدنی و سنگ‌های سقف و کف کارگاه تأثیر زیادی بر الگوی توزیع تنش در پایه دارند. از آنجا که امکان در نظر گرفتن اکثر این پارامترها در طراحی با استفاده از روش‌های تجربی وجود ندارد، در این تحقیق از مدل‌سازی عددی برای تعیین ابعاد بهینه طراحی پایه در سنگ‌های سخت استفاده شده است.

[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.

## مراجع

- [1] Jeremic M. L. (1985), "Strata Mechanics 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.

- [12] Sjoberg, J. (1992), 'Failure modes and pillar behaviour in the Zinkgruvan mine'. In: Proc., 33., U.S. Rock Mech. Symp., Santa Fe. A. A. Balkema Publ., Rotterdam, 491-500,
- [13] 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 .
- [14] Shabani-Mashkol M, (2006). "Numerical analysis of rock pillar failure mechanism in underground opening". first report of MSc graduate in Amirkabir university of technology; (in Persian)
- [15] Zipf, R. K. (1996), "Pillar Design To Prevent Collapse of Room-and-Pillar Mines". Ch. in Underground Mining Methods Handbook, W. Hustrulid and R. L. Bullock, eds., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, CO.
- [16] Badr S. A., , PhD Thesis, (2004), "Numerical Analysis of coal yield pillars at deep Longwall mines", Department of Mining Engineering Colorado School of mine. 250p.
- [18] 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.
- [4] Steart, F. A. (1954), "Strength and stability of pillars in coal mines". J. Chem. Metall. Min. Soc. SA, XV: 309-325.
- [5] Hedly, D. G. F. and Grant, F. (1972), "Stop-and-pillar design for Elliot lake uranium mines" Bull can Inst Min Metal, Vol. 65., PP. 37-44.
- [6] Lunder, P.J. and Pakalnis, R. (1997), "Determination of the strength of hard rock mine pillars." Bull can Inst Min Metal, Vol. 90. PP. 51-55.
- [7] Martin, C. D. and Maybee, W. G. (2000), "The strength of hard rock pillars." Int J of Rock Mech. & Mining Sci., Vol. 37, PP.1239-1246..
- [8] Hardy, P., Agapito, J. F. T. (1982), "Induced horizontal stress method of pillar design in oil shale". Oil Shale Symp. Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- [9] Kimmelman, M. R., Hyde, B., Madgwick, R. J. (1984), "The use of computer applications at BCL limited in planning pillar extraction and design of mining layouts". In: Proc., ISMR Symp. Design and Performance of Underground Excavations. Brit. Geotech. Soc., London, 53-63.:
- [10] Krauland, N., Soder, P. E. (1987), 'Determinating pillar strength from pillar failure observations". Eng. Min. J. 8, ,34 40.
- [11] Potvin, Y., Hudyma, M. R., Miller, H. D. S. (1989), "Design guidelines for open stope support". Bull. Can. Min. Metall. 82,,: 53-62.

پی‌نوشت

- <sup>1</sup> Representative Area Theory (Tributary Area Theory)
- <sup>2</sup> Pillar deflection concept
- <sup>3</sup> Beam deflection concept
- <sup>4</sup> Concept of foundation coefficient
- <sup>5</sup> Salamon
- <sup>6</sup> Greenwald
- <sup>7</sup> Steart
- <sup>8</sup> Hedley and Grant
- <sup>9</sup> Elliot Lake
- <sup>10</sup> Strain Softening