نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست
Amirkabir Jounrnal of Science & Research Civil and Enviromental Engineering (ASJR-CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۵۱ تا ۱۵۹
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 151-159

تعیین شکل مناسب پایه‌های استوانه‌ای هذلولوی در روش استخراج کارگاه و پایه با استفاده از مدل‌سازی عددی مطالعه‌ی موردی: معدن کرومیت فاریاب**

سیدمحمد اسماعیل جلالی[۱]، نعمت‌الله عسکرنژاد[۲]، زهرا بهری[۳*]

۱- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- کارشناس ارشد طراحی شرکت مهندسی کوشا معدن
۳- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵)

چکیده

دست‌یابی به سود بیشتر در کنار بازیابی هرچه بیشتر کانسنگ در یک معدن که به روش کارگاه و پایه استخراج می‌شود، از مهم‌ترین اهداف معدنکاری است؛ از این رو، در طراحی روش‌های استخراج، مناسب است که با در نظر گرفتن شرایط فنی، بتوان مقدار بیشتری از ماده معدنی را استخراج کرد. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ و انتخاب مدل کرنش نرمی برای رفتار پایه، قطر پایه‌های طراحی شده در معدن کرومیت فاریاب بهبود داده شده است. بدین منظور، ابتدا ابعاد پایه به شکل استوانه‌ای مدل‌سازی شده و سپس با کاهش قطر استوانه در قسمت میانی پایه، شکل بهبودیافته برای پایه‌های مذکور برآورد شده است. بر این اساس، پایه‌هایی به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ۶/۸ متر و قطر بالایی و پایینی ۸/۸ متر، شکل مناسب و بهبودیافته‌ی پایه در این معدن تشخیص داده شده است.

کلمات کلیدی:

مدل‌سازی عددی، طراحی پایه، مدل کرنش نرمی، نرم‌افزار $FLAC^{3D}$، معدن کرومیت فاریاب

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات: bahri.zahra@gmail.com

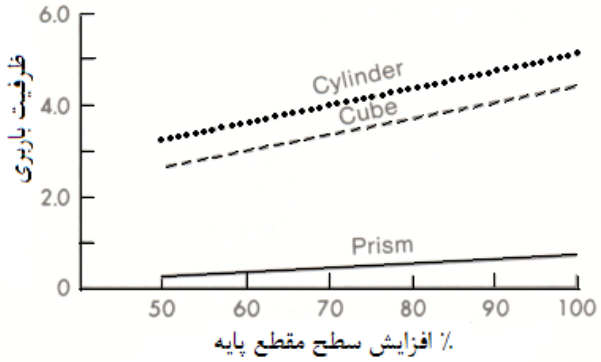
** این مقاله مستخرج از کار پژوهشی «طراحی بهینه‌ی پایه‌های معدن زیرزمینی کرومیت فاریاب» طی قرارداد شماره‌ی ۱۰۱/ پ د مورخ ۸۹/۱۱/۱۹ می‌باشد.

۱- مقدمه

روش استخراج کارگاه و پایه از معمول‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی کانسارهای غیرزغالی است .این روش، یک روش استخراج بدون نگهداری است که در آن فضاهای استخراج شده، بنا بر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ سقف و نحوه‌ی توزیع عیار در کانسار، به صورت منظم یا غیرمنظم احداث می‌شوند و برای نگهداری سقف، قسمتی از ماده‌ی معدنی به صورت پایه باقی می‌ماند. ابعاد این پایه‌ها بستگی به شدت تنش‌های موثر در منطقه، مقاومت پایه و عرض فضای استخراجی مجاور آن دارد [۱]. یکی از عوامل اصلی در طراحی معادن به روش کارگاه و پایه، طراحی صحیح شکل پایه است. طراحی صحیح و بهینه‌ی شکل پایه بر اقتصادی‌بودن طرح، حفظ ایمنی کارگاه‌ها و عملیات معدن‌کاری و بازیابی پایه‌ها اثرگذار است. بدیهی است که باقی‌گذاردن بیش از اندازه‌ی ماده‌ی معدنی، اقتصادی‌بودن طرح معدن‌کاری را زیر سؤال برده و استخراج بیش از اندازه‌ی آن نیز مشکلات نگهداری را در پی خواهد داشت [۲]. در اصل در طراحی پایه، باید بار وارد بر پایه، مقاومت پایه و ضریب ایمنی به عنوان عوامل اصلی طراحی در نظر گرفته شوند. میزان بار وارده بر پایه با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی، عددی و نیز در بعضی مواقع با انجام آزمایشهای برجا برآورد می‌شود. برای محاسبه‌ی مقاومت پایه، تاکنون روش‌های تحلیلی و تجربی زیادی ارایه شده‌اند، اما این روش‌ها در عین سادگی، دارای معایبی هستند که موجب شده امروزه 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 مساله، خصوصیات رفتاری پایه، کمربالا و کمر پایین آن، چگونگی توزیع بار وارد بر پایه را در طراحی پایه منظور نمود و سپس به تحلیل حساسیت و تحلیل پارامتری مدل پرداخت. پایه‌ها در هر مقطع افقی معمولاً به شکل‌های دایره و مربع دیده می‌شوند. طراحی پایه‌ها، از شکل آن‌ها اثرپذیر است. ارتباط بین شکل پایه و مقاومت آن توسط پژوهشگران زیادی مورد بحث قرار گرفته است که در ادامه به مواردی از آن اشاره شده است.

– نتایج پژوهش‌های صورت‌گرفته در دانشکده‌ی معدن و زمین‌شناسی توزلا[1] یوگسلاوی روی پایه‌های مربعی، مستطیلی و استوانه‌ای نشان داده است که مقاومت پایه‌ی استوانه‌ای ۱/۷ برابر پایه‌ی مکعبی و ۳/۳ برابر پایه‌ی مستطیلی‌شکل با سطح مقطع برابر است؛ از این رو، نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که پایه‌های استوانه‌ای، بیشینه‌ی مقاومت را دارند [۴].

– تاثیر هندسه‌ی پایه بر مقاومت آن در معادن زیرزمینی توسط سوجاکو[2] مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، در معدن مس جزکازگانس[3] چندین اتاق با پایه‌های استوانه‌ای، مکعبی و منشور متوازی‌السطوح با ارتفاع و سطح مقطع یکسان به ترتیب برابر با ۴ متر و ۱۶ متر مربع حفر شد. نتایج حاصل از این پژوهش، بیانگر این بود که ظرفیت باربری پایه‌ی استوانه‌ای، کمی بیشتر از پایه‌های مکعبی و خیلی بیشتر از پایه‌های منشور متوازی السطوح با ابعاد ۱۶×۱ متر مربع است. همچنین با توجه به شکل (۱)، ثابت شد که با افزایش مساحت کل پایه، ظرفیت باربری پایه‌های استوانه‌ای و مکعبی افزایش بیشتری نسبت به پایه‌های مستطیلی می‌یابد [۴].



شکل ۱: ظرفیت باربری پایه‌های معدنی با توجه به شکل هندسی پایه[۴]

– هادسون[4] و همکاران، منحنی کامل تنش – کرنش را برای شکل و اندازه‌های مختلف از نمونه‌های حفاری شده از سنگ مطالعه کردند. در انجام این آزمایش‌ها، نمونه‌های آزمایشگاهی با قطرهای ۲۰،۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر با نسبت ارتفاع به قطر ۳، ۲، ۱، ۱/۲ و ۱/۳ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که:

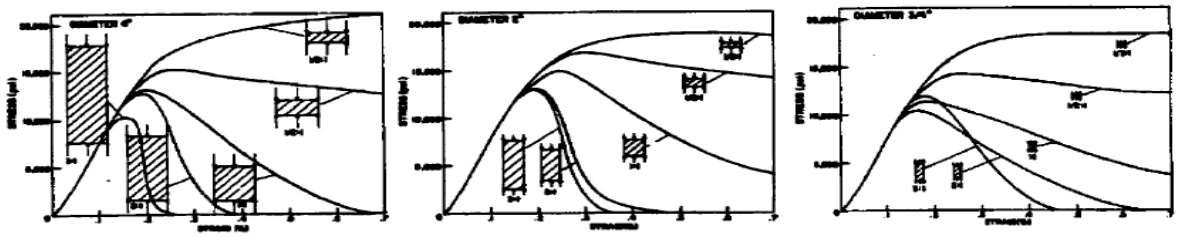
الف: نمونه‌هایی با نسبت ارتفاع به قطر یکسان اما با قطرهای مختلف، مقاومت یکسانی دارند. به عبارت دیگر مقاومت نمونه‌های با قطر ثابت و ارتفاع مختلف متفاوت است. بنابراین نسبت ارتفاع به قطر مختلف، تاثیر معنی‌دار و مهمی روی منحنی تنش کرنش و ظرفیت باربری نمونه سنگ دارد.

ب: نمونه‌های با نسبت طول به قطر کوچک‌تر، مقاومت فشاری بالاتری دارند.

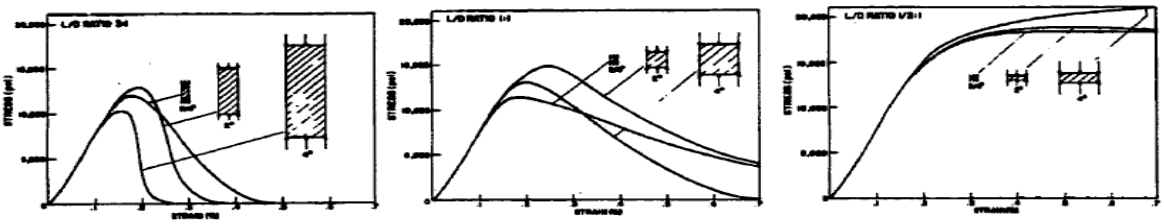
نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده توسط هادسون و همکارانش بر روی شکل و اندازه پایه به ترتیب در شکل (۲) و (۳) نشان داده شده است [۵].

با توجه به مطالب بیان‌شده در این بخش، واضح است که مقاومت پایه‌های استوانه‌ای بیشتر از مربعی و مستطیلی است و این امر توسط محققین مختلف به اثبات رسیده است. نکته‌ی قابل توجه، این است که در هیچ کدام از پژوهش‌های پیشین بر روی پایه‌های استوانه‌ای، تاثیر کاهش و افزایش قطر میانی و بالایی پایه در مقاومت آن و در نتیجه شکل بهینه‌ی پایه، مطالعاتی صورت نگرفته است. در این پژوهش، برای اولین بار با مطالعه بر روی پایه‌های معدن کرومیت فاریاب به این موضوع پرداخته شده است. از این رو، هدف از این پژوهش، تعیین شکل بهینه‌ی

[1] Tuzla
[2] Sevjakov
[3] Djezkazgans
[4] Hudson



شکل ۲: تاثیر شکل نمونه روی منحنی تنش-کرنش برای بارگذاری فشاری تک‌محوری [۵]



شکل ۳: تاثیر اندازه‌ی نمونه روی منحنی تنش-کرنش برای بارگذاری فشاری تک‌محوری [۵]

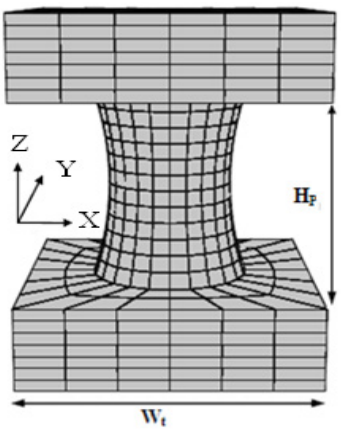
پایه در روش استخراج کارگاه و پایه است. برای این منظور، ابتدا روش کلی حل مساله تشریح شده و سپس نحوه‌ی شکست پایه با در نظر گرفتن رفتار کرنش نرمی بررسی شده است. در پایان، با بهره‌گیری از روش ارایه‌شده، شکل و ابعاد مناسب پایه‌ی معدن کرومیت فاریاب که با روش کارگاه و پایه استخراج می‌شود، تعیین شده است.

۲- روش حل مساله

در این مقاله برای تعیین شکل مناسب پایه‌های باقی‌مانده در روش استخراج کارگاه و پایه، از نرم‌افزار FLAC^{3D} بهره گرفته شده است.

۲- ۱- مدل هندسی

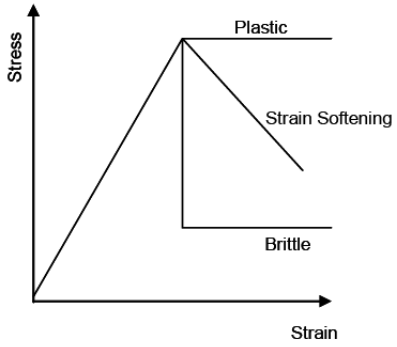
در شکل (۴)، مدل هندسی پایه و محیط اطراف آن به همراه چگونگی جزبندی مدل نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، پایه‌های مورد نظر به شکل منفرد و با مقطع گرد غیرمنشوری مدل‌سازی شده است و در هر مقطع قایم پایه، قوس دیواره‌ی پایه منطبق بر یک کمان از دایره است که با تغییر شعاع دایره مذکور مقدار انحنا آن تغییر داده می‌شود تا مناسب‌ترین حالت به دست آید. واضح است که در این شرایط، سطح مقطع پایه‌ها در نقاط مختلف ارتفاعی آن‌ها ثابت نیست.



شکل ۴: مدل هندسی پایه در نرم افزار FLAC^{3D} بارگذاری فشاری تک‌محوری [۵]

۲- ۲- مدل رفتاری

برای بررسی رفتار پایه‌ها از مدل کرنش نرمی موهر کولمب استفاده شده است، زیرا بعضی از مطالعات انجام شده نشان داده است که مدل الاستوپلاستیک کامل موهر کولمب قادر به شبیه سازی رفتار پایه‌ها نیست [۶]. رفتار کرنش نرمی در توده سنگ، ناشی از رشد و توسعه ترک‌ها و به هم پیوستگی ریز ترک‌ها و تبدیل آن‌ها به ترک‌های بزرگ است. این امر، باعث پوسته‌شدن 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 [۷]. منحنی تنش-کرنش ترسیم‌شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که مصالح بعد از نقطه‌ی بیشینه‌ی 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 تشریح کرد. در مدل رفتاری کرنش نرمی، کاهش مقاومت به ازای افزایش کرنش پلاستیک بیان می‌شود. این عمل در مقایسه با مدل‌های رفتاری دیگر به نسبت ساده و به واقعیت نزدیک‌تر است [۸]. مدل کرنش نرمی در

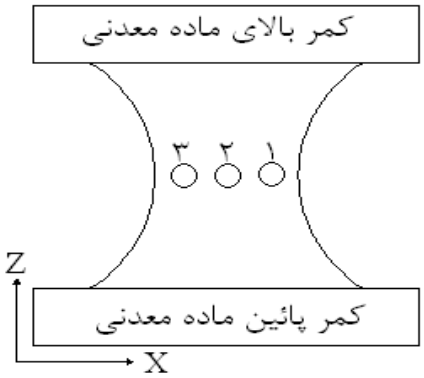


شکل ۵: رفتار پلاستیک، شکننده و کرنش نرمی

نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ از یک سری توابع کرنش که منطبق بر خواص مدل موهرکولمب)چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع) است، بهره می‌برد [۳]؛ از این رو در این پژوهش برای بررسی رفتار پایه بعد از نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت، از مدل کرنش نرمی موهرکولمب در نرم افزار $FLAC^{3D}$ استفاده شده است و به منظور بررسی بهتر رفتار پایه، فرض شده است که سقف و کف دارای رفتار الاستیک باشند.

۲- ۳- رفتار نگاری عددی پایه

به‌منظور بررسی رفتار پایه و قضاوت در مورد پایداری آن، ۳ نقطه در وسط ارتفاع پایه به عنوان نقاط بحرانی شکست پایه، در امتداد محور X در شکل (۶)، جانمایی شده و مقادیر تنش در این نقاط پایش و ثبت می‌شود. موقعیت این نقاط به طور شماتیک در شکل(۶) نشان داده شده است. نقطه‌ی شماره‌ی ۲ دقیقاً در وسط مقطع پایه و نقاط ۱ و ۳ به ترتیب



شکل ۶: نقاط محل پایش تنش در داخل پایه

در فاصله‌ی ۱ سانتی‌متری از لبه‌ی راست و چپ پایه جانمایی شده‌اند. طبیعی است که به دلیل تقارن هندسی مدل، انتظار می‌رود مقادیر تنش در نقاط ۱ و ۳ با هم برابر باشند.

۳- معدن کرومیت فاریاب

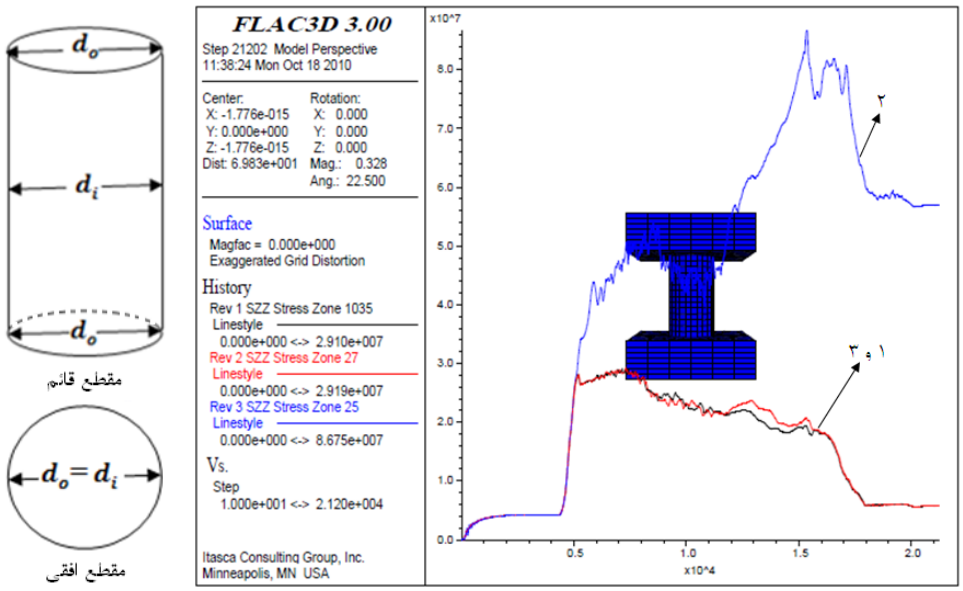
معدن کرومیت فاریاب در استان هرمزگان واقع است و بخشی از آن، به روش استخراج کارگاه و پایه با پایه‌هایی با مقطع تقریباً مربعی و آرایش تقریباً منظم استخراج می‌شود (با وجود این‌که پایه‌ها با مقطع مربعی طراحی شده‌اند، در عمل، با مقطع مربعی گردگوشه و نزدیک به مقطع گرد اجرا می‌شوند). متوسط ارتفاع پایه‌های برجای گذاشته‌شده در این معدن، حدود ۱۲ متر است؛ از این رو در تمام مدل‌های عددی ساخته‌شده، ارتفاع پایه برابر با ۱۲ متر در نظرگرفته شده است. ماده‌ی معدنی کرومیت و سنگ دربرگیرنده‌ی آن، دونیت است. استخراج به صورت نواری و به شکل کارگاه‌های اولیه به ابعاد ۵ متر با پایه‌های کرومیتی به قطر ۸ متر (کارگاه‌های ثانویه) انجام می‌شود. استخراج کارگاه‌ها در برش‌هایی با ارتفاع ۶ متر از راهروهای تولیدی و از بالا به پایین انجام می‌شود [۹]. از آن‌جا که پایه‌های واقع در این بخش از معدن، در آستانه‌ی تخریب قرار گرفته و در بخش‌هایی از آن، عمدتاً بین سال‌های ۸۶ تا ۸۸ به دلیل بیش‌طراحی، تخریب نیز اتفاق افتاده است، می‌توان دریافت که در طراحی ابعاد پایه‌ها، بیش‌برآورد انجام نشده است. به عبارت دیگر، طراحی پایه‌هایی با سطح مقطع مربعی به ابعاد حدود ۸×۸ متر و ارتفاع ۱۲ متر، یک طرح مناسب ارزیابی می‌شود. پارامترهای ژئومکانیکی پایه‌های معدن کرومیت فاریاب و سنگ در برگیرنده‌ی آن که در تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته، در جدول (۱) آورده شده است.

٤- مدل‌سازی عددی

از آن‌جا که پایه‌های معدن کرومیت فاریاب به صورت منشوری و با مقطع مربع گردگوشه طراحی شده‌اند، بنابراین به منظور بهینه‌سازی ابعاد پایه و کاهش تمرکز تنش در گوشه‌های آن در اولین مرحله، پایه به صورت استوانه‌ای در نظر گرفته شده و کم‌ترین قطر پایه به شکل استوانه که توانایی تحمل بارهای وارده را داشته باشد، تعیین شده است. سپس قطر پایه‌ی استوانه‌ای طراحی شده در مرحله‌ی قبل به‌گونه‌ای که توانایی تحمل بارهای وارده را داشته باشد، کاهش داده شده است. کاهش قطر پایه در میانه‌ی ارتفاع آن انجام می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در یک مقطع قایم از پایه، قسمت میانی آن در مقایسه با قسمت‌های بالایی و پایینی دارای قطر کمتری می‌باشد. کاهش قطر قسمت میانی پایه و حتی کاهش قطر قسمت‌های بالایی و پایینی آن در چند مرحله انجام می‌شود. این مراحل، به نحوی صورت می‌پذیرد که حجم پایه‌ی کاهش‌یافته و پایه به شکل

جدول ۱: پارامترهای ورودی در مدل‌سازی عددی [۹]

پارامتر	نماد	آحاد	پایه ها	کمربالا	کمرپایین
مدول یانگ	E	MPa	۱۶۰۰۰	۱۶۲۵۰	۳۲۰۰۰
نسبت پواسون	υ	–	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۲۲
چسبندگی	C	MPa	۴/۲۷	۴/۸۱	۶/۳۸
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	ϕ	Degree	۵۳/۴	۵۵/۵	۵۵/۴
مدول حجمی	K	GPa	۵/۹	۵/۹	۱۹/۱
مدول برشی	G	GPa	۷/۶۲	۷/۸۱	۱۴/۱۳



شکل ۷: هیستوگرام تنش وارد بر پایه‌ی استوانه‌ای با قطر ۷ متر

استوانه‌ی هذلولوی درآید. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که پایه با کم‌ترین حجم به صورت استوانه‌ی هذلولوی حاصل گردد و در تمام نقاط بارپذیر باشد. در شکل (۴)، نمای کلی یک پایه‌ی مدل‌سازی شده نشان داده شده است. در این شکل، H_p ارتفاع پایه برابر با ۱۲ متر و W_p عرض کلی مدل ساخته شده برابر با ۱۸ متر است.

۵- تحلیل عددی پایه مدل‌سازی شده

بر اساس طراحی انجام‌شده، هم‌اکنون نگهداری کارگاه‌های استخراج معدن کرومیت فاریاب با باقی‌گذاردن پایه‌هایی با سطح مقطع مربعی به ابعاد ۸×۸ متر و ارتفاع ۱۲ متر، حجمی برابر با ۷۶۸ مترمکعب انجام می‌شود. پایه‌های جدید، باید به گونه‌ای انتخاب شوند که علاوه بر توانایی تحمل بار، حجم کم‌تری نیز داشته باشند. بدین منظور، ابتدا پایه‌هایی به شکل استوانه انتخاب شده و سپس شکل آن‌ها به صورت تدریجی از استوانه به استوانه‌ی هذلولوی تغییر داده شده است. برای نمایش هندسی پایه، قطر سطح مقطع در مرکز پایه با d_i و در دو انتهای پایه در محل کمر بالا و کمر پایین با d_o نشان داده شده است. بدیهی است حالات دیگری از شکل پایه نظیر پایه هایی منشوری با سطوح مقطع مثلثی، بیضوی و دیواره‌های غیر هذلولوی را نیز می‌توان در نظر گرفت، اما تمرکز بحث در این مقاله بر روی پایه‌های استوانه‌ای هذلولوی است. بر این اساس، پایه‌هایی با مشخصات زیر مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. لازم به ذکر است در این تحقیق، برای سادگی مطلب و دست‌یابی سریع‌تر به یک نتیجه‌ی اولیه‌ی قابل قبول، ایجاد پایه‌های استوانه‌ای و استوانه‌ای هذلولوی بدون در نظر گرفتن ترتیب حفر آن‌ها انجام شده است. در ادامه، به تحلیل پایه‌های با اشکال و ابعاد مختلف، پرداخته شده است.

الف- پایه‌ی استوانه‌ای با قطر ۷ متر

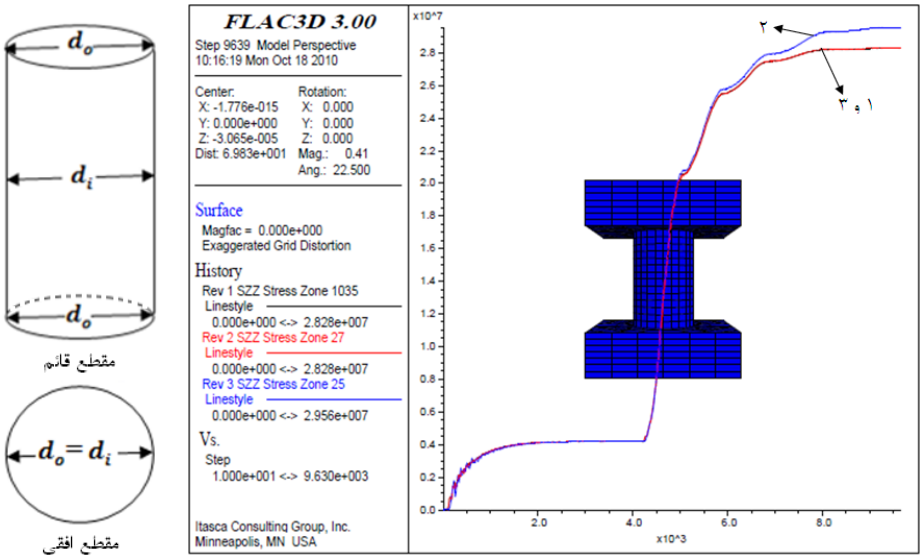
این پایه با توجه به اصول مذکور در بندهای ۲ و ۳ مدل‌سازی و تحلیل شده است. نتایج تحلیل تنش ناشی از بار واردشده بر نقاط ۱، ۲ و ۳ در این پایه، بیانگر آن است که شکست در هر دو نقطه‌ی ۱ و ۳ اتفاق می‌افتد، هر چند که نقطه‌ی ۲ هنوز توانایی تحمل بار را دارد. از این رو، پایه به شکل استوانه‌ای با قطر ۷ متر مناسب نیست و باید پایه با قطر بزرگ‌تر انتخاب شود. در شکل (۷)، هیستوگرام تنش وارد بر پایه در نقاط ۱، ۲ و ۳ به همراه مقطع قایم و افقی پایه نشان داده شده است.

ب- پایه‌ی استوانه‌ای با قطر ۸ متر

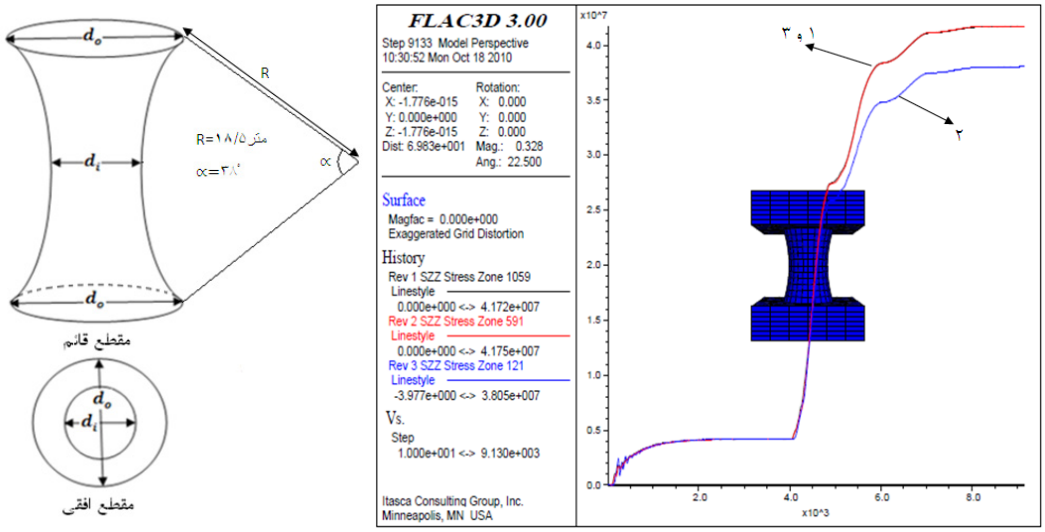
با توجه به آن‌که پایه‌ی استوانه‌ای با قطر ۷ متر، توانایی تحمل بار وارده را ندارد، بنابراین قطر پایه به ۸ متر افزایش داده شده است. نتایج تحلیل تنش وارد بر نقاط ۱، ۲ و ۳ پایه‌ی استوانه‌ای به قطر ۸ متر نشان می‌دهد که شکست در هیچ‌کدام از این نقاط اتفاق نمی‌افتد؛ از این رو، پایه‌ی استوانه‌ای با قطر ۸ متر برای اجرا مناسب‌تر است. در این مرحله حجمی از ماده معدنی که به عنوان پایه برجای گذاشته می‌شود برابر با ۶۰۳ متر مکعب است. با مقایسه‌ی حجم پایه استوانه‌ای اخیر با حجم اولیه‌ی پایه‌های مکعبی طراحی شده برای معدن کرومیت فاریاب، مشخص می‌شود که حدود ۲۲ درصد از حجم پایه‌های مکعبی بازیابی شده است. در شکل (۸) هیستوگرام خروجی برای پایه با سطح مقطع استوانه‌ای به قطر ۸ متر نشان داده شده است. لازم به ذکر است با کاهش قطر پایه به مقدار اندک، دوباره پایه در شرایط شکست قرار خواهد گرفت.

ج- پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ۷ متر و قطرهای بالایی و پایینی ۹ متر

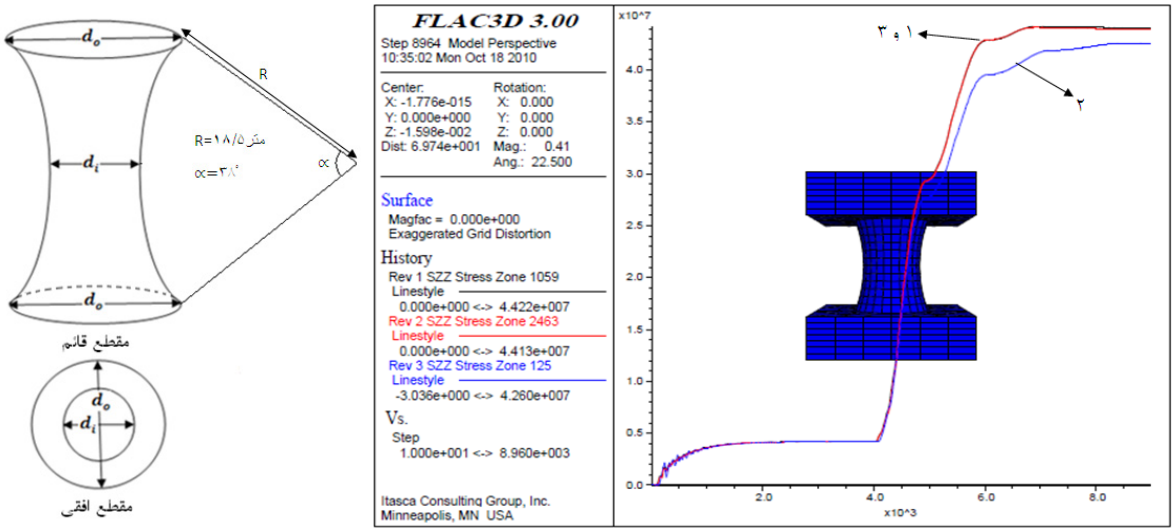
در این مرحله به منظور افزایش بازیابی، شکل استوانه‌ای مرحله قبل به‌گونه‌ای تغییر داده شده است که ضمن کاهش حجم، پایه توانایی تحمل بار خود را حفظ کند. از این رو قطر میانی پایه از ۸ متر به ۷ متر کاهش داده شده ولی قطر آن در قسمت بالایی و پایینی (کمر بالا و کمر پایین) از ۸ متر به ۹ متر افزایش داده شده است. نتایج تحلیل تنش وارد بر نقاط ۱، ۲ و ۳ این پایه نشان می‌دهد که پایه به این شکل، توانایی تحمل بار ؟؟؟؟



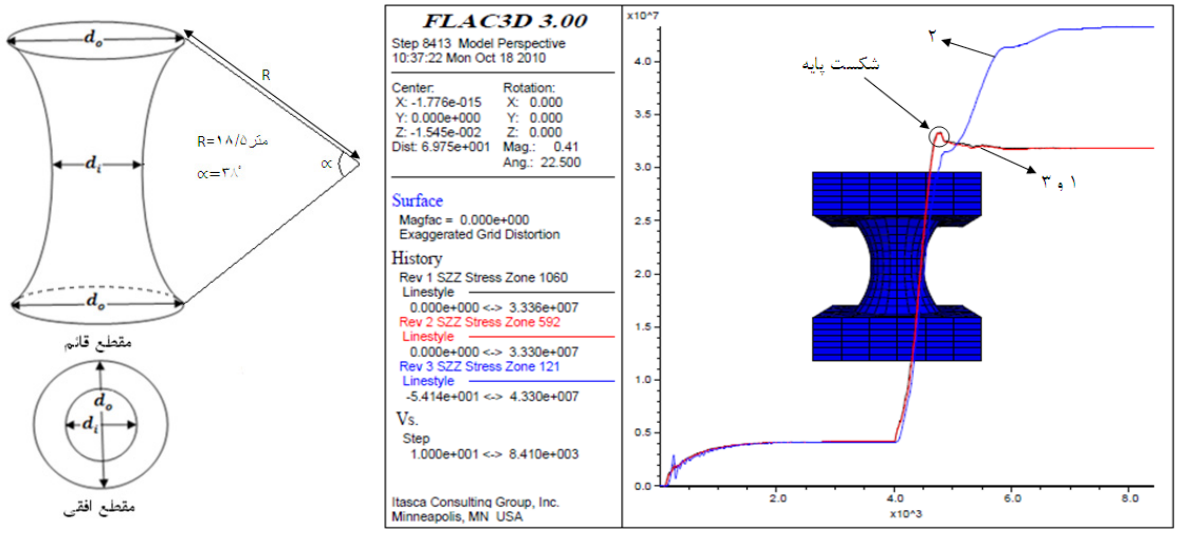
شکل ۸: هیستوگرام تنش وارد برپایه‌ی استوانه‌ای با قطر ۸ متر



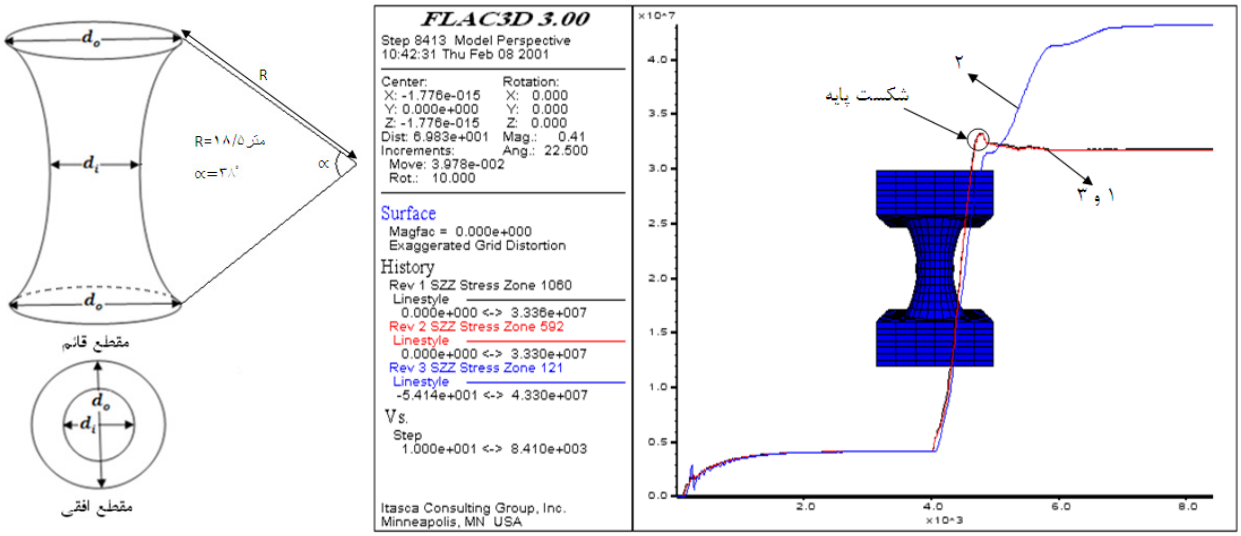
شکل ۹: هیستوگرام تنش وارد بر پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ۷ متر و قطرهای بالایی و پایینی ۹ متر



شکل ۱۰: هیستوگرام تنش وارد بر پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ۸/۶ متر و قطرهای بالایی و پایینی ۸/۸ متر



شکل ۱۱: هیستوگرام تنش وارد بر پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ۶/۶ متر و قطرهای بالایی و پایینی ۶/۸ متر



شکل ۱۲: هیستوگرام تنش وارد بر پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ۶/۶ متر و قطرهای بالایی و پایینی ۶/۸ متر

د- پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ٦/٨ متر و قطرهای بالایی و پائینی ٨/٨ متر

نتایج تحلیل عددی تنش وارد بر نقاط ۱، ۲ و ۳ پایه در شرایطی که قطر قسمت میانی آن ۶/۸ متر و قطرهای قسمت‌های بالایی و پایینی آن ۸/۸ متر باشد، نشان می‌دهد که پایه در تمام نقاط توانایی تحمل بار وارده را دارد و حجم پایه به ۵۲۸ متر مکعب کاهش می‌یابد. هیستوگرام تنش وارد بر نقاط ۱، ۲ و ۳ پایه در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

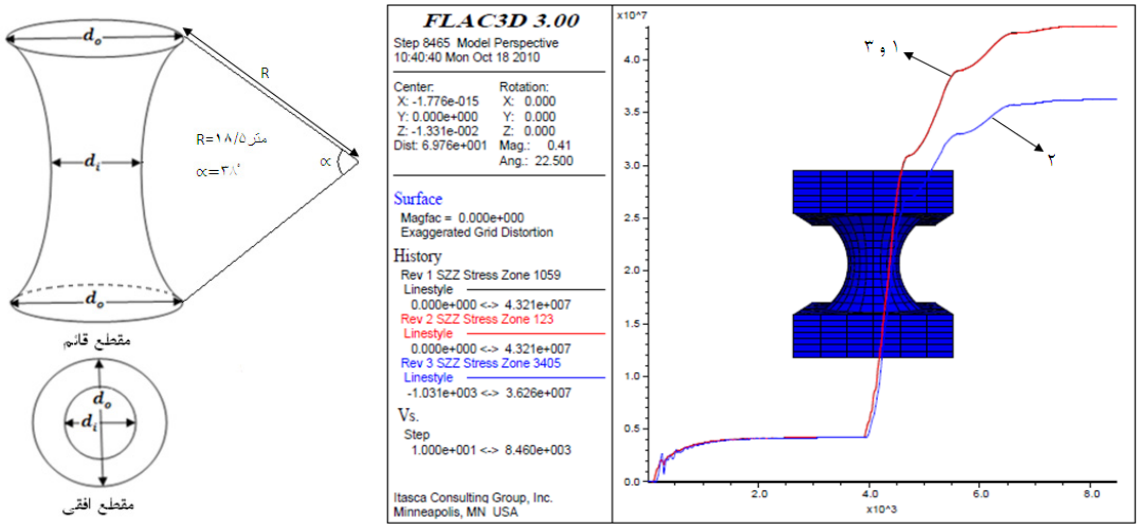
هـ - پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ٦/٦ متر و قطرهای بالایی و پایینی ٨/٦ متر

از آن‌جا که پایه‌ی طراحی شده در مراحله قبل هنوز توانایی تحمل بار را دارد، در این مرحله، قطر میانی و قطر بالایی پایه کاهش داده شده است. کاهش قطر میانی پایه از ۶/۸ به۶/۶ متر و نیز کاهش قطر بالایی از ۸/۸ به۸/۶ متر سبب می‌شودکه در نقاط ۱ و ۳ پایه شکست حاصل شود، به‌طوری‌که بعد از نقطه متناظر با بار حداکثر، کاهش سریع در مقاومت پایه در این نقاط دیده می‌شود ولی در نقطه ۲ شکست اتفاق نمی‌افتد. بر این اساس، ابعاد این پایه مناسب نبوده و لازم است سطح مقطع بالایی و پایینی پایه افزایش یابد. نحوه شکست پایه در نقاط ۱ و ۳ در هیستوگرام شکل (۱۱) نشان داده است.

و- پایه‌ی استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ٦/٦ متر و قطرهای بالایی و پایینی ١٠/٦ متر

با توجه به آن‌که پایه مورد نظر در مرحله قبل توانایی تحمل بار را نداشت، در این مرحله ضمن ثابت نگه‌داشتن قطر میانی، قطر بالایی و پایینی به ۱۰/۶ متر افزایش یافته است. به این ترتیب، شعاع انحنای دایره‌ای که منطبق بر قوس دیواره‌ی پایه در یک مقطع قایم است، کاهش داده شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهدکه در نقاط ۱ و ۳، همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، پایه دچار شکست می‌شود.

ز- پایه‌ی استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ٦/٦ متر و قطرهای



شکل ۱۳: هیستوگرام تنش وارد بر پایه به شکل استوانه هذلولوی با قطر میانی ۶/۶ متر و قطرهای بالایی و پایینی ۶/۱۲ متر

بالایی و پائینی ۱۲/٦ متر

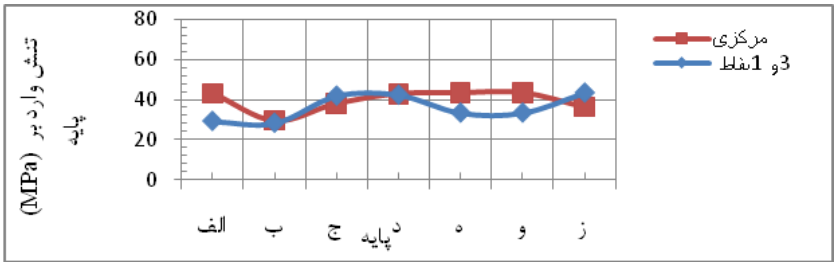
به منظور پایدارسازی پایه مرحله قبل، قطر قسمت بالایی و پایینی پایه از ۱۰/۶ متر به ۱۲/۶ متر افزایش داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی مدل مذکور، حاکی از آن است که در پایه شکست بروز نمی‌کند و پایه پایدار خواهد ماند. هیستوگرام تنش وارد بر نقاط ۱، ۲ و ۳ پایه در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این مرحله، با محاسبه میزان حجم پایه، مشخص می‌شود حجمی از ماده معدنی که برای این پایه باید برجای گذاشته می‌شود برابر با ۶۹۴ متر مکعب است. این امر بیان‌گر آن است که حجم پایه‌ی اخیر نسبت به حجم پایه طراحی شده مرحله «د» افزایش یافته است؛ از این رو پایه‌ی با شکل استوانه‌ی هذلولوی طراحی‌شده در مرحله‌ی «د» مناسب‌ترین حالت از شکل استوانه‌ی هذلولوی است.

٦- بحث و جمع‌بندی

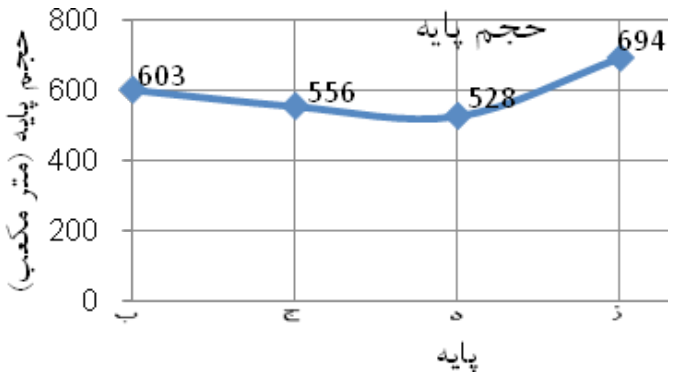
در شکل (۱۴)، بیشینه‌ی تنش وارد بر هر یک از ۷ پایه‌ی بررسی شده در این پژوهش نشان داده شده است. این منحنی با توجه به نقاط مشخص شده در قسمت‌های مختلف پایه ترسیم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در بین پایه‌های پایدار، پایه‌ی «د» دارای بهترین شرایط توزیع تنش در نقاط مورد ارزیابی می‌باشد و با توجه به شکل (۱۵)، این پایه در بین پایه‌های پایدار، دارای کمترین حجم می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت دستیابی به سود بیشینه در استخراج مواد معدنی، طراحی پایه‌های معدنی باید به گونه‌ای انجام شود که با در نظر گرفتن



شکل ۱۴: تنش وارد بر نقاط پایه با توجه به مراحل انتخاب قطر بهینه



شکل ۱۵: روند تغییر حجم پایه‌های پایدار با توجه به تغییر در قطرهای میانی، بالایی و پایینی آن‌ها

شرایط فنی، بتوان مقدار بیشتری از ماده‌ی معدنی را استخراج کرد. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ و انتخاب مدل کرنش نرمی برای رفتار پایه، شکل پایه‌های طراحی شده برای معدن کرومیت فاریاب بهبود داده شده و مناسب‌ترین پایه به شکل استوانه‌ی هذلولوی با قطر میانی ۶/۸ متر و قطر بالایی و پایینی ۸/۸ متر تعیین شده است. بر اساس طراحی انجام شده، حجم پایه‌های معدن کرومیت فاریاب از ۷۶۸ متر مکعب به ۵۲۸ متر مکعب کاهش می‌یابد که منجر به افزایش بازیابی پایه‌ها به مقدار حدود ۴۵ درصد در مرحله‌ی اول معدنکاری می‌شود و با توجه به قیمت فروش بالای کرومیت، این افزایش بازیابی بسیار با اهمیت است. هر چند باقی‌گذاردن پایه‌های استوانه‌ای و به ویژه، استوانه‌ای هذلولوی در حالت کلی در مقایسه با پایه‌هایی با مقطع چهارگوش مشکل‌تر است، اما در معدن کرومیت فاریاب به دلیل ارزش بالای ماده معدنی، بازیابی کانسنگ با دقت و ظرافت انجام می‌پذیرد و لذا شکل‌دادن پایه به صورت یک استوانه هذلولوی در این معدن از نظر اجرایی و اقتصادی پذیرفته شده و دست یافتنی می‌باشد، هرچند ممکن است پایه‌ی اجرایی با پایه‌ی طراحی‌شده به صورت خیلی دقیق، انطباق نداشته باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به سایر معادن زیرزمینی، به ویژه معادن سنگ نمک اتاق و پایه که در ایران از پراکندگی و تعداد قابل توجهی برخوردار است، تعمیم داد.

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان از آقایان دکتر مهدی نجفی به خاطر کمک در تدوین بخشی از مقاله و مرور تاریخی موضوع و از آقای افضل باقر زاده به دلیل راهنمایی های ارزنده در ساخت مدل های عددی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۹- مراجع

[۱] ارشدنژاد ش، پارسایی ح، پشتوان ح؛ "تعیین ابعاد بهینه پایه‌های سنگی بوسیله روش‌های تجربی و عددی بر اساس منحنی عکس العمل زمین- مطالعه موردی، معدن نمک زیرزمینی سلطان آباد"، (۱۳۸۵) هفتمین کنفرانس تونل ایران.

[۲] هدایت زاده، م، ابراهیم آبادی؛ "طراحی بهینه پایه در روش استخراج اتاق و پایه برای لایه C1 معدن زغالسنگ پروده طبس"، (۱۳۸۶) سومین کنفرانس مکانیک‌سنگ ایران.

[۳] شعبانی مشکول م، همتی شعبانی ع، مرتضوی ع؛ "تحلیل عددی مقاومت پایه‌های سنگی با استفاده از پارامترهای تغییر یافته معیار هوک و براون"، (۱۳۸۵) نشریه دانشکده فنی تهران، دوره: ۴۰، شماره: ۱.

[4] Jeremic M. L "Ground mechanics in hard rock mining" Latin Book of Rock mechanics Publisher A. A. Balkema 537p, 1987.

[5] Maybee G. w "Pillar design in hard brittle rocks" Thesis submitted in partial fulfillment of the requiretnent for the degree of Master of Applied

[6] Shabani-Mashkol M "Numerical analsis of rock pillar failure mechanism in underground opening" first report of MSC graduate in amirkabir university of technology, 2006 (in Persian).

[7] Zipf, R. K "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, 1996.

[8] Badr S. A, PhD Thesis "Numerical analysis of coal yield pillars at deep long wall mines", Department of Mining Engineering Colorado School of mine. 250p, 2004.

[9] Mortazavi A., Hassani F.P., Shabani M "A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings". Journal of Computers and Geotechnics 2008.