



(مقاله پژوهشی)

ارزیابی آرایش بهینه پیچ سنگ به منظور پایداری توده سنگ درزه دار با روش DEM-DFN سه بعدی - مطالعه موردی: مغار کلاب ۲

نوشین سناریان اصفهانی^۱، امین ازهری^{۲*}، علیرضا باغبانان^۲، حمید هاشم الحسینی^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: بهمن ۱۴۰۰، پذیرش: خرداد ۱۴۰۱)

چکیده

پایدارسازی ساختارهای زیرزمینی در محیط های سنگی درزه دار همواره برای مهندسين علوم زمین موضوعی چالش برانگیز بوده است. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری پیدا می کند که در اثر حفاری فضاهای زیرزمینی در محیط های درزه دار به دلیل نامنظم بودن آرایش درزه ها تحلیل اندرکنش بلوک ها گاهی بسیار پیچیده شود. از جمله روش های تحلیل پایداری این گونه ساختارها، روش تلفیقی المان مجزا و شبکه ناپیوستگی های مجزا (DEM-DFN) است. در این روش به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای هندسی درزه داری منطقه، آرایش ناپیوستگی ها با استفاده از توزیع های احتمالاتی معرفی می گردند. استفاده از پیچ سنگ ها یکی از متداول ترین روش های پایدارسازی این گونه سازه های زیرزمینی است و تعیین طول پیچ سنگ ها با توجه به هندسه و ابعاد بلوک های تشکیل شده اطراف فضای زیرزمینی چالش اصلی در طراحی آرایش این سیستم نگهداری است. به این منظور در این مطالعه مغار کلاب ۲ کشور سوئد مورد بررسی قرار گرفته است. این مغار شامل شش دسته درزه با ویژگی های هندسی متفاوت است که با بهره گیری از روش کترهای شبکه ناپیوستگی های مجزا مدل هندسی شبیه سازی شده و از روش عددی المان مجزا سه بعدی به منظور تحلیل پایداری استفاده شده است. الگوهای مورد استفاده شامل پیچ سنگ هایی با طول های ۳، ۶ و ۹ متری می باشند. در تحلیل ها به منظور مقایسه بین الگوها و در نهایت تعیین مناسب ترین الگو از دو معیار فنی و اقتصادی بهره گرفته شده است. نتایج نشان می دهد در ابتدا افزایش طول پیچ سنگ موجب افزایش پایداری می شود اما پس از طول مشخصی با افزایش طول پیچ سنگ دیگر بهبود فراوانی حاصل نمی شود، بنابراین با افزایش طول پیچ سنگ لزوماً پایداری مغار افزایش نمی یابد. الگوی نهایی پیشنهادی به منظور پایداری این مغار با در نظر گرفتن معیارهای فنی و اقتصادی، با توجه به حجم بلوک های ناپایدار و میزان پیچ سنگ مصرفی، الگوی ۶ متری پیچ سنگ ها و فاصله داری ۲ متری است. نتایج نشان می دهد که استفاده از روش های متداول ارزیابی میزان نگهداری فضاهای زیرزمینی بدون در نظر گرفتن آرایش ناپیوستگی ها و اندازه و حجم بلوک های ایجاد شده به ویژه در اطراف این فضا، می تواند باعث عدم پایداری و صرفه اقتصادی پروژه شود.

کلمات کلیدی

آرایش پیچ سنگ، شبکه ناپیوستگی مجزا (DFN)، روش المان مجزا (DEM)، توده سنگ درزه دار، پایدارسازی فضاهای زیرزمینی

*عهده دار مکاتبات: aazhari@iut.ac.ir

DOI: [10.22034/ANM.2022.2694](https://doi.org/10.22034/ANM.2022.2694)

۱- مقدمه

با توجه به رشد و توسعه جوامع بشری و نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی برای کاربردهای مختلف، امروزه به‌طور گسترده‌ای از این سازه‌ها به‌ویژه با مقاطع بزرگ استفاده می‌شود. پایداری فضاها و بزرگ زیرزمینی از مسائل مهم مهندسی ژئوتکنیک است و چنانچه ملاحظات طراحی مناسبی به‌منظور پایداری این فضاها در نظر گرفته نشوند خسارات مالی و جانی بسیاری را تحمیل خواهند کرد. گاهی تونل‌ها در محیط‌هایی سنگی احداث می‌شوند که به علت ناپیوستگی‌ها و درزه‌های موجود، مقاومت توده سنگ به‌طور چشمگیری افت کرده و پایداری تونل به خطر می‌افتد و بنابراین برای پایداری تونل‌ها نیاز به روش‌ها و تجهیزات نگهداری است. در اثر حفر یک فضای زیرزمینی و نیز وجود ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ‌ها، بلوک‌هایی در اطراف فضای زیرزمینی ایجاد می‌شوند که برخی از آن‌ها پتانسیل ریزش دارند. سقوط این بلوک‌ها از مسائل بسیار مهم در طراحی فضاها و زیرزمینی است که با تحلیل دقیق پایداری می‌بایست مورد بررسی قرار گیرند. در طول سالیان دراز روش‌های متنوعی برای نگهداری فضاها و زیرزمینی نظیر تونل‌ها استفاده شده است که در میان آن‌ها استفاده از پیچ‌سنگ‌ها یکی از متداول‌ترین، مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های پایداری و نگهداری در سازه‌های عمرانی و معدنی است. تأثیر اصلی این نوع نگهداری بر روی پایداری موضعی بلوک‌های ناپایدار و بهبود توزیع تنش در ناحیه پلاستیک اطراف تونل‌ها است. اکثر مطالعات انجام‌شده بر روی ساختارهای پیوسته و مطالعات محدودی بر روی ساختارهای ناپیوسته با شبکه‌های درزه‌داری انجام گرفته است. از آنجایی که نصب و استفاده از پیچ‌سنگ‌ها هزینه‌بر است، به‌منظور بهینه‌سازی هزینه‌ها باید تعداد و طول آن‌ها به‌طور بهینه طراحی شود. بنابراین نیاز به استفاده از الگویی مناسب برای تعیین فواصل و طول پیچ‌سنگ‌ها در اطراف تونل است. محققان پیشین از طراحی پیچ‌سنگ‌ها در بازشوهای زیرزمینی به‌عنوان یک سیستم حمایتی غیرفعال استفاده کرده‌اند [۱]. بررسی مدلی بر اساس توصیف رفتار متقابل پیچ‌سنگ، دوغاب و توده سنگ و بررسی تأثیر زمان نصب برای پیچ‌سنگ‌ها در یک توده سنگ تغییر شکل داده شده و مقایسه پیش‌بینی‌های تئوری با داده‌های اندازه‌گیری شده از دیگر کارهای پژوهشگران پیشین است [۲]. در مقاله‌ای که روی پارامترهای مکانیکی پیچ‌سنگ‌ها متمرکز شده، به

مشکل تعیین توزیع مکانیکی پیچ‌سنگ‌های نصب‌شده اطراف تونل دایره‌ای حفرشده در توده سنگ با خواص الاستیک که توسط دوغاب و پیچ‌سنگ‌های دوغابی مقاوم‌سازی شده، اشاره شده است [۳]. ارائه فرمول‌بندی جدید برای تونل دایره‌ای عمیق در سنگ با در نظر گرفتن دو حالت تونل با ناحیه آسیب‌دیده حفرشده و تونل با سیستم پیچ‌سنگ و در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای و توده سنگ الاستیک از نتایج مطالعات پیشین است. همچنین در این تحقیق بر روی گسترش ناحیه شکست کار شده است [۴]. در مطالعه‌ای به بررسی مدل‌سازی توده سنگ درزه‌دار مقاوم شده توسط پیچ‌سنگ پرداخته شده است. به‌علاوه مقایسه دو نوع مقاوم‌سازی شامل شاکت‌ریت و فولاد با پیچ‌سنگ نیز در این تحقیق لحاظ شده است. این مطالعه اهمیت، برتری و لزوم مدل‌سازی و در نظر گرفتن ناپیوستگی‌ها را نسبت به توده سنگ معادل مورد ارزیابی قرار داده است حتی در محیط‌هایی با درزه‌های همگن [۵]. همچنین در تحقیقی طراحی ورودی تونل در سنگ ضعیف بررسی شده است که با استفاده از روش‌های تجربی پارامترهای ورودی به روش FEM محاسبه شده‌اند [۶]. همچنین ملاحظات به‌منظور طراحی الگوی پیچ‌سنگ گذاری در معادن و سازه‌های زیرزمینی عمرانی در محیط‌های درزه‌دار با طراحی سیستم نگهداری پیچ‌سنگ در تونل‌ها توسط روش المان مجزا و شبکه ناپیوستگی مجزا ارائه شده است [۷]. تحقیق دیگری به بررسی تأثیر زمان نصب پیچ‌سنگ‌ها و نقطه خنثی پرداخته است. بر طبق محاسبات، نقطه خنثی علاوه بر وابسته بودن به طول پیچ‌سنگ و شعاع تونل، به‌شدت به خواص مکانیکی توده سنگ وابسته است [۸]. در یک مطالعه، روندی به‌منظور پایداری نواحی بلوکی اطراف تونل به روش المان مجزا در دو بعد پیشنهاد شده است. نهایتاً در این روش الگوی مناسب پیچ‌سنگ گذاری شامل طول پیچ‌سنگ و فاصله‌داری بهینه پیچ‌سنگ‌ها پیشنهاد شده است [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، پایداری دو تونل در یک معدن عمیق زغال‌سنگ در چین با استفاده از نرم‌افزار 3DEC بررسی شده و به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از پیچ‌سنگ‌های بلندتر و پیچ‌سنگ گذاری در کف تونل، نتایج پایداری بهتری را برای توده سنگ اطراف تونل ارائه می‌دهد. در این تحقیق روی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی مثل چسبندگی، مقاومت تک‌محوری و مقاومت کششی به روش آنالیز معکوس تمرکز شده است [۱۰]. در تحقیقی که بر قانون انتقال بار در طول پیچ‌سنگ تمرکز شده، تغییر مکان درزه،

دارند، ولی اکثر این روش‌ها در محیط‌های پیوسته یا برای شرایط خاص ارائه شده‌اند [۱۸].

همان‌طور که بیان شد اکثر مطالعات انجام‌شده به‌منظور پایدارسازی فضاهای زیرزمینی توسط پیچ‌سنگ‌ها در محیط‌های پیوسته انجام گرفته‌اند و مطالعات انجام‌گرفته در محیط‌های ناپیوسته عمدتاً در شبکه‌های منظم و در دو بعد بوده‌اند و یا مشخصاً الگوهای بهینه پیچ‌سنگ گذاری در شرایط شبکه شکستگی مجزا تعیین نشده است. بنابراین ارائه روندی به‌منظور طراحی بهینه الگوی پیچ‌سنگ گذاری در محیط ناپیوسته مورد توجه مهندسين مکانیک سنگ قرار گرفته است. هدف این تحقیق به‌طور عمده ارائه روندی به‌منظور بررسی پایداری فضاهای بزرگ زیرزمینی به کمک الگوی بهینه پیچ‌سنگ در سه بعد و محیط ناپیوسته توده سنگ درزه‌دار به‌صورت نامنظم با توزیع آماری به‌وسیله روش شبکه شکستگی مجزا (DFN) است که مدل هندسی نزدیک به واقعی‌تری نسبت به مدل‌های پیوسته ساخته و روش حل المان مجزا که رفتار ماده سنگ و درزه سنگ‌ها را هم‌زمان مدل‌سازی می‌کند. در این تحقیق در چهار بخش پیش رو مشخصاً به بررسی اثر طول پیچ‌سنگ بر پایداری سازه‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن پارامترهای آماری هندسه ناپیوستگی‌ها پرداخته شده است. در بخش دوم به معرفی منطقه، پارامترهای ژئومکانیکی و مدل‌های ساخته‌شده، در بخش سوم به ارائه و مرور روابط مورد استفاده در مطالعه پرداخته و پس‌از آن در بخش چهارم نتایج مدل‌سازی بر طبق معیارهای فنی و اقتصادی ارائه شده‌اند و در نهایت خلاصه نتایج به همراه معرفی مدل بهینه در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی سه‌بعدی

برای بررسی دقیق‌تر از داده‌های ژئومکانیکی مغار کلاب ۲ (CLAB 2) در نزدیکی منطقه سیمپیوارپ واقع در جنوب شرقی کشور سوئد در محیط سنگی درزه‌دار، بهره گرفته شده است [۱۹]. این مغار در عمق ۳۰ متری سطح زمین، به طول ۱۱۵ متر و به شکل نعل اسبی با عرض ۲۱ متر و ارتفاع ۲۷ متر احداث گردیده است. با توجه به آزمایش Pillar test انجام‌شده در منطقه نسبت تنش افقی به قائم (k) ۴/۷ تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که علت انتخاب این مغار کامل بودن داده‌های مورد نیاز به‌منظور یک تحقیق و بررسی پایه است و روندی که ارائه خواهد شد می‌تواند در تعیین الگوی بهینه نگهداری پیچ‌سنگ در طراحی سازه‌ها زیرزمینی در محیط‌های

موقعیت درزه و زاویه شیب درزه به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است [۱۱]. مطالعه‌ای به‌منظور ارائه مدل تحلیلی برای پیچ‌سنگ‌های دوغابی تحت کشش بررسی‌شده و صحت سنجی نتایج بر اساس تست‌های برون‌کشی آزمایشگاهی بررسی شده است. این مدل قادر به نشان دادن توزیع تنش و کرنش پیچ‌سنگ‌ها و روابط بار جابجایی پیچ‌سنگ قبل از تسلیم است [۱۲]. همچنین اثر چگالی درزه‌داری بر طراحی سیستم نگهداری تونل دسترسی سد رودبار توسط روش عددی المان مجزا و شبکه ناپیوستگی مجزا (DEM-DFN) بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده مقاومت بیش‌تر قاب فولادی نسبت به شاتکریت در برابر تغییر شدت درزه‌داری توده سنگ دربرگیرنده تونل است. آسیب جدی به سیستم نگهداری شاتکریت با دو برابر شدن تعداد درزه‌ها اتفاق می‌افتد، درحالی‌که در مورد قاب فولادی، تخریب جدی فضا با چهار برابر شدن تعداد درزه‌ها اتفاق می‌افتد [۱۳]. مطالعه‌ای عددی (DEM) بر روی ناحیه شکست اطراف تونل با استفاده از دو هندسه دسته‌درزه‌های منظم و شبکه ناپیوستگی مجزا (DFN) در دو بعد نشان داد که ناحیه خورد شده اطراف تونل در هندسه منظم ناپیوستگی‌ها باریک و دارای هندسه مشخص است، در صورتی‌که برای شبکه ناپیوستگی مجزا این ناحیه عمیق‌تر و با هندسه نامنظم است. مقایسه این نتایج نشان از تطابق مناسب‌تر روش دوم با واقعیت دارد، که در نتیجه طراحی الگوی مناسب طول پیچ‌سنگ‌ها مستلزم در نظر گرفتن شبکه ناپیوستگی مجزا است [۱۴]. تحقیقی باهدف بررسی رفتار وجه مشترک پیچ‌سنگ‌ها و دوغاب با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی مثل تست برش و شبیه‌سازی عددی (آنالیز تغییر شکل ناپیوسته) انجام شده است [۱۵]. در مطالعه دیگری اثر زاویه پیچ‌سنگ در ساختارهای درزه‌دار با پیچ‌سنگ‌های ۵ و ۷ متری اطراف مغار بررسی شده که نتیجه اصلی این تحقیق لزوم توجه به لایه‌های افقی در طراحی پیچ‌سنگ‌ها بوده است [۱۶]. به‌منظور بررسی تأثیر طول و قطرهای متفاوت پیچ‌سنگ‌ها بر بیشینه محدوده جابجایی القایی اطراف تونل در سه نوع سیستم درزه‌دار مطالعه‌ای پارامتریک در دو بعد انجام‌شده که نشان می‌دهد لزوماً افزایش طول پیچ‌سنگ‌ها بهبود چشمگیری در پایداری اطراف تونل نخواهد داشت [۱۷]. اگرچه الگوهای تجربی پیچ‌سنگ گذاری متداولی مانند الگوی استرالیایی، کانادایی و اسکندینیایی و روش آفریقای جنوبی وجود

درزه‌دار مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات انجام شده در این منطقه با استفاده از نقشه‌های استریوگرافی، شش دسته‌درزه را در اطراف این مغار شناسایی کرده است.

جدول ۱: ویژگی‌های هندسی و آماری شش دسته‌درزه اطراف مغار [۱۹، ۲۰]

جهت شیب/شیب	ضریب توزیع فیشر (k)	درصد حضور درزه‌ها	تعداد درزه‌ها در واحد سطح (P_{20})	پارامترهای توزیع طول		
				انحراف معیار (متر)	میانگین (متر)	تابع توزیع
۸۰ / ۱۵۵	۷٫۶۳	۲۲	۰٫۰۶۲	۱٫۷	۴٫۸	لاگ‌نرمال
۸۵ / ۲۶	۹٫۸۱	۱۱٫۳	۰٫۰۳۲	۱٫۴	۴٫۵	لاگ‌نرمال
۸۰ / ۵	۹٫۸۱	۱۱٫۳	۰٫۰۳۲	۱٫۴	۴٫۵	لاگ‌نرمال
۹۰ / ۲۵	۷٫۶۳	۲۲	۰٫۰۶۲	۱٫۷	۴٫۸	لاگ‌نرمال
۳۰ / ۱۹	۷٫۶۳	۲۲	۰٫۰۶۲	۱٫۷	۴٫۸	لاگ‌نرمال
۷۰ / ۹	۹٫۸۱	۱۱٫۳	۰٫۰۳۲	۱٫۴	۴٫۵	لاگ‌نرمال

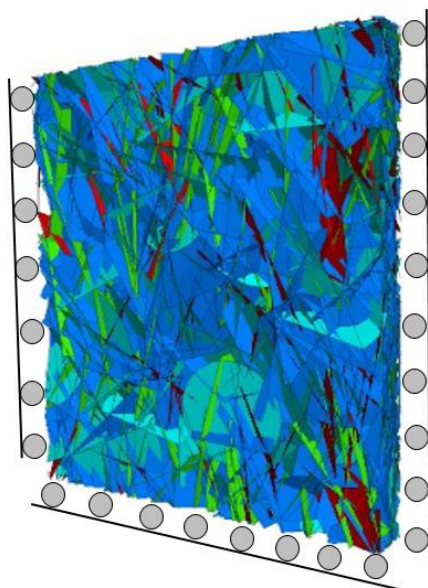
قطعیت در داده‌های هندسی ناپیوستگی‌ها و با استفاده از داده‌های آماری و توابع توزیع ارائه شده در جدول ۱ در گام اول مدل‌سازی تعداد ۱۰ تحقق برای شبکه ناپیوستگی مجزا (DFN) تولید شده است. شکل ۱ چهار نمونه از شبکه‌های ناپیوستگی مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد.

مغار مورد مطالعه دارای عرض ۲۱ متر و ارتفاع ۲۷ متر در طول ۱۱۵ متری حفر شده است که به منظور مدل‌سازی عمق مورد نظر ۷ متر در نظر گرفته شده است. نکته حائز اهمیت اینکه به دلیل ابعاد کوچک بلوک‌ها (عمدتاً کمتر از ۰٫۵ متر) تعداد بلوک‌های در ضخامت ۷ متری مدل ساخته شده بیشتر از ۱۰ عدد است. به علاوه به علت ابعاد متوسط بلوک‌ها و تراکم درزه‌ای که موجب خردشدگی زیاد در منطقه شده است، بیش از ۱۵ تا ۲۰ بلوک در ضخامت در نظر گرفته قرار دارد که جامعه آماری مناسبی نسبت به کل طول تونل است.

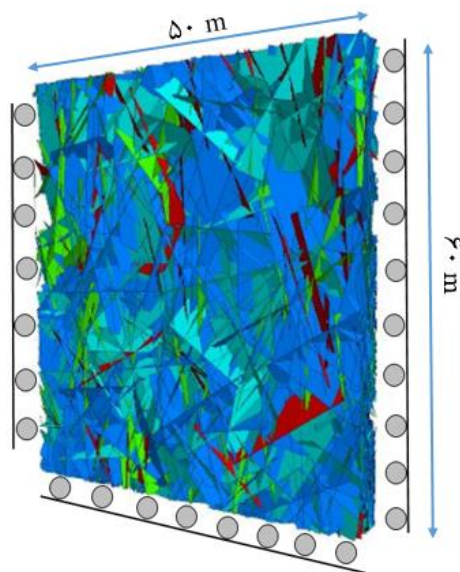
این اطلاعات شامل شیب، جهت شیب درزه‌ها، ضریب توزیع فیشر، درصد حضور درزه‌ها و شدت درزه‌داری به همراه توابع توزیع احتمال برازش شده است. همچنین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ شامل مقاومت فشاری، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته سنگ بکر و پارامترهای ناپیوستگی‌ها در جدول ۲ ارائه شده است [۱۹، ۲۰]. همان‌طور که در این جداول مشاهده می‌شود، بنابر مطالعات انجام گرفته در این منطقه تغییرات معنی‌داری در پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و دسته‌درزه‌های اطراف مغار مشاهده نشده است. بنابراین در این مطالعه آرایش درزه‌ها و در نتیجه هندسه بلوک‌ها به صورت آماری بر روی پایداری مغار و الگوی بهینه پیچ‌سنگ گذاری مورد بررسی قرار گرفته است. توابع توزیع احتمالی با توجه به اندازه‌گیری‌های صحرایی و برداشت کلاسیک خصوصیات هندسی درزه‌ها برازش شده و مدل کاملاً منطبق بر پارامترهای آماری داده‌های درزه منطقه است. این عدم

جدول ۲: پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و ناپیوستگی‌های موجود در منطقه [۱۹، ۲۰]

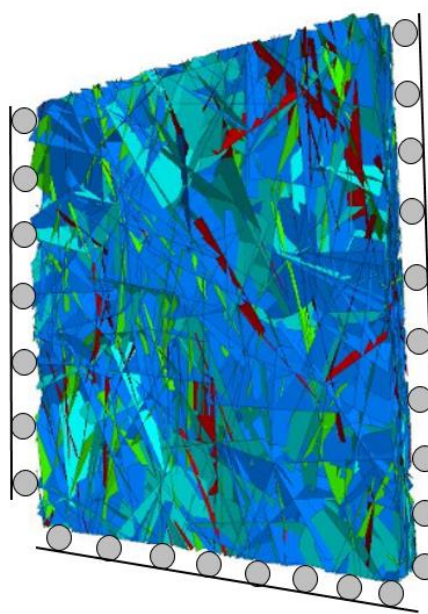
پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر										
مقاومت فشاری سنگ بکر σ_{ci} (MPa)			نسبت پواسون ν			مدول الاستیسیته E_i (GPa)				
۱۶۱			۰٫۲۷			۷۷				
پارامترهای ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها										
بازشدگی ماکزیمم A_{pmax} (μm)	بازشدگی باقیمانده A_{pr} (μm)	بازشدگی اولیه A_{pi} (μm)	جابجایی برشی نهایی (μm)	زاویه اتساع (deg)	سختی برشی JK_s (MPa/mm)	سختی نرمال JK_n (MPa/mm)	زاویه اصطکاک پایه ϕ_b (deg)	زاویه اصطکاک باقیمانده ϕ_r (deg)	JCS	JRC
۱۰۰	۱۰	۷۰	۷۷۰	۵	۲۹	۱۰۰	۲۷	۳۴	۷۹	۶



(ب) پنجمین شبکه ناپیوستگی



(الف) سومین شبکه ناپیوستگی



(پ) هفتمین شبکه ناپیوستگی

(ت) دهمین شبکه ناپیوستگی

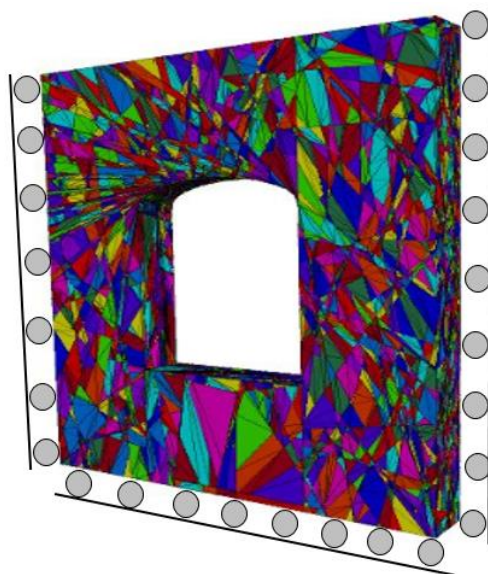
شکل ۱: نمونه‌هایی از آرایش‌های شبکه‌های ناپیوستگی مجزای مدل شده با توجه به شش دسته‌درزه موجود در منطقه

پارامترهای ژئومکانیکی ارائه شده در جدول ۲ و اعمال شرایط مرزی، به گونه‌ای که در شکل آمده است، مدل تحت نیروی ثقل تا احراز تعادل اولیه قرار گرفته است. پس از تولید شبکه‌های ناپیوستگی مختلف، در گام بعدی، حفاری مغار موردنظر در مدل انجام شده و از سیستم نگهداری شانکریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر توسط المان پوسته به همراه الگوهای مختلف پیچ سنگ گذاری با

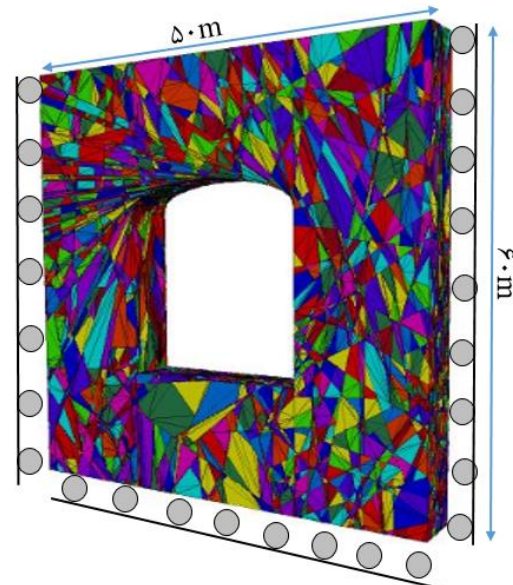
همچنین به دلیل اینکه ناپایداری‌ها در این مطالعه توسط ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود، اندرکنش بین بلوک‌های تشکیل شده و بلوک‌های مجاور حائز اهمیت است و در نتیجه نیازی به مدل‌سازی کل طول مغار نیست. همچنین به دلیل اینکه ناپایداری مغار در اثر جابجایی بلوک‌ها رخ می‌دهد، شرایط مرزی در ابتدا و انتهای مدل ثابت در نظر گرفته شده است. در نتیجه با اختصاص

عرضی ۲ متر به عنوان فاصله مرجع در روش‌های متداول نگهداری آفریقایی جنوبی، کانادایی و استرالیایی می‌باشند [۲۱].

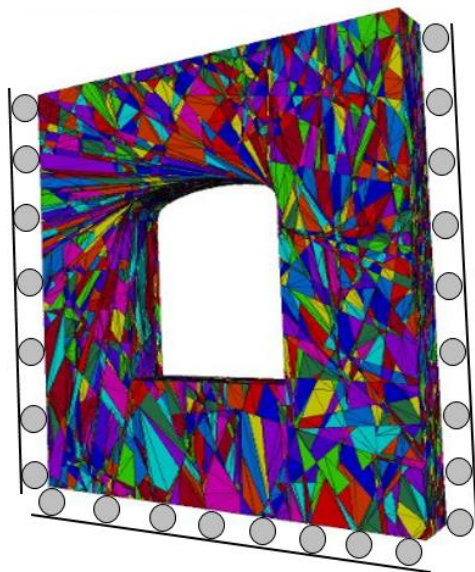
طول‌های متفاوت بهره گرفته شده است. نمونه‌هایی از مغارهای حفاری شده در شبکه‌های ناپیوستگی در شکل ۲ آمده است. پیچ سنگ‌های به کار گرفته شده در این تحقیق دارای طول‌های ۳، ۶ و ۹ متری با فاصله‌داری طولی و



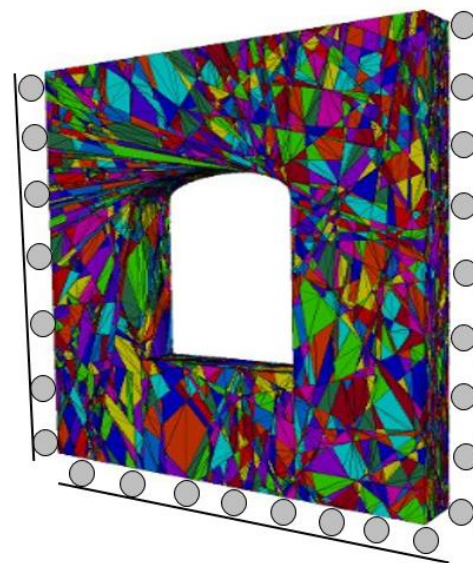
ب) پنجمین شبکه ناپیوستگی



الف) سومین شبکه ناپیوستگی



ت) دهمین شبکه ناپیوستگی



پ) هفتمین شبکه ناپیوستگی

شکل ۲: نمونه‌هایی از آرایش‌های شبکه‌های ناپیوستگی مجزای مدل شده با توجه به شش دسته‌درزه موجود در منطقه پس از حفاری مغار

جدول ۳ نمایش داده شده‌اند. همچنین الگوهای پیچ سنگ گذاری مورد استفاده به صورت شماتیک در مقاطع عرضی و طولی نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است به دلیل اینکه نتایج به صورت مقایسه‌ای تحلیل شده‌اند و مسئله راجع به بررسی عدم قطعیت در مدل و

پارامترهای هندسی و مکانیکی پیچ سنگ‌های مورد استفاده شامل، قطر، طول، فاصله‌داری، سختی آرماتور و ممان دوم سطح المان آرماتور به همراه پارامترهای دوغاب تزریق شده و بتن پاششی شامل، ضریب پوآسون، مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول برشی و مدول یانگ در

پایدارتر بودن سازه با الگوهای ترکیبی (ترکیب الگوها برای سقف و دیواره) وجود دارد ولی مطالعات گذشته نشان می‌دهد معمولاً الگوی ثابتی در کل طول تونل در نظر گرفته می‌شود مگر در شرایط ویژه. همچنین با توجه به حجم زیاد پیچ‌سنگ‌ها (زیاد بودن حجم پیچ‌سنگ‌های اجرایی در واحد سطح)، حجم عملیات نگهداری زیاد است پس جنبه اقتصادی و هزینه‌ها بسیار مهم است. از جهت دیگر نگهداری پیچ‌سنگ معمولاً در مرحله اول به‌عنوان نگهدارنده اولیه برای جلوگیری از ریزش بلوکی صورت می‌گیرد که زمین هنوز به تعادل نرسیده است، بنابراین پیچ‌سنگ‌ها بلافاصله پس از حفاری تونل نصب شده‌اند.

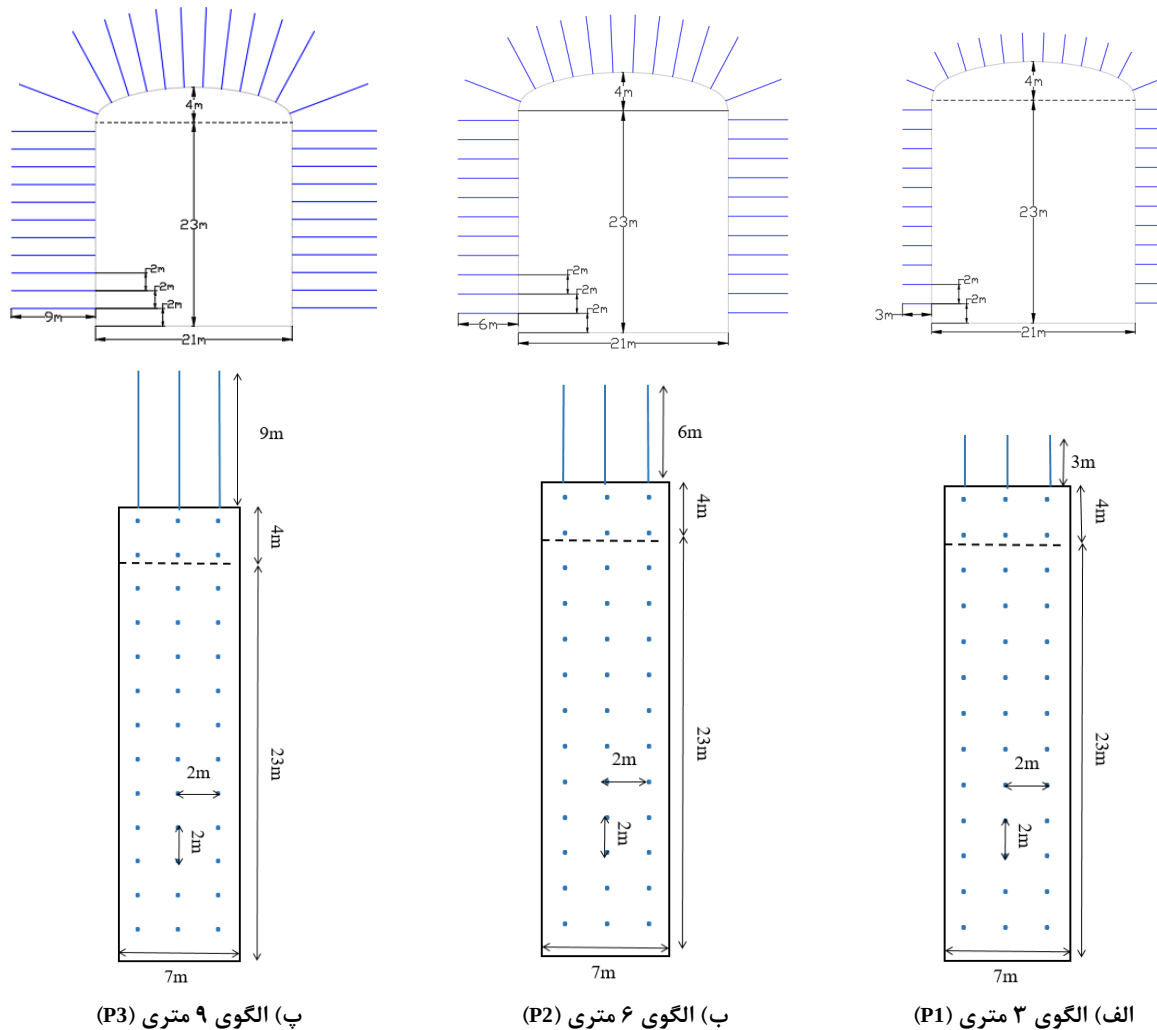
۳- اندرکنش پیچ‌سنگ و درزه

به‌منظور انجام تحلیل‌های مربوط به پیچ‌سنگ‌ها از روابط نیرو-جابجایی برای هر دو رفتار محوری و برشی در برخورد با ناپیوستگی‌ها استفاده شده است. در مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه به دلیل سختی بسیار بالای سنگ دربرگیرنده (77 GPa) و در نتیجه تغییر شکل‌های داخلی ناچیز بلوک‌ها در مقابل جابجایی ناپیوستگی‌ها، بلوک‌های تشکیل‌دهنده اطراف مغار به‌صورت صلب در نظر گرفته می‌شوند [۲۲، ۲۳].

آرایش نگهداری است نتایج نیاز به صحت سنجی با مدل واقعی ندارد چراکه به علت تصادفی بودن ساختار ناپیوستگی‌ها در مقاطع مختلف و لزوم ارائه الگویی بهینه برای کل طول تونل (۷ متر)، امکان مقایسه نتایج با شرایط واقعی وجود ندارد. علاوه بر آن در مقایسه نتایج برای یافتن آرایش بهینه پیچ‌سنگ‌ها، نتایج به‌صورت نسبی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، ضمن اینکه در این مقاله بر روی آنالیز حساسیت آرایش پیچ‌سنگ (کدام آرایش بهترین نتیجه را دارد) تمرکز شده و صرفاً برای مورد خاصی نیست، چراکه مقایسه آرایش پیچ‌سنگ‌ها در شرایط یکسان مثل خواص توده سنگ مشابه بررسی شده و از آنجاکه ابعاد مدل برای به حداقل رساندن خطای مدل‌سازی زیاد است در این مرحله نیاز به صحت سنجی نیست ولی برای اطمینان، مدل‌های تصادفی زیادی ساخته شده است. همچنین به دلیل اینکه ناپایداری در محیط‌های درزه‌دار توسط ناپیوستگی کنترل می‌شوند و مانند محیط‌های پیوسته حفاری مرحله‌ای تأثیر قابل‌توجهی بر پایداری نخواهد داشت و البته به‌منظور بررسی بحرانی‌ترین حالت تونل به‌صورت یکجا حفر شده است. به علت عدم قطعیت، هندسه ناپیوستگی‌ها از بحرانی‌ترین تا پایدارترین‌ها بررسی شده است اما در نتیجه‌گیری‌ها همه داده‌ها ارائه شده‌اند. اگرچه احتمال

جدول ۳: جزئیات سه الگوی نگهداری پیچ‌سنگ و پارامترهای مکانیکی پیچ‌سنگ‌ها و دوغاب مورد استفاده

مشخصات پیچ‌سنگ مورد استفاده						
شماره الگو	طول‌های مورد استفاده در الگو بر حسب متر (L)	فاصله‌داری پیچ‌سنگ‌ها در الگو بر حسب متر (S)	d_i (m)	E_b (Pa)	$I(m^4)$	σ_b (MPa)
P1	۳	۲	۰/۰۳۲	2×10^{11}	$5/15 \times 10^{-8}$	۶۰۰
P2	۶	۲	۰/۰۳۲	2×10^{11}	$5/15 \times 10^{-8}$	۶۰۰
P3	۹	۲	۰/۰۳۲	2×10^{11}	$5/15 \times 10^{-8}$	۶۰۰
مشخصات دوغاب مورد استفاده						
E_g (Pa)		G_g (MPa)		σ_c (MPa)		θ
$2/958 \times 10^{10}$		۱۲۸۶۱		۳۵		۰/۱۵



شکل ۳: سه الگوی پیچ‌سنگ به منظور نگهداری مغار - فاصله‌داری پیچ‌سنگ‌ها در هر دو راستای محور تونل و محیط اطراف با فاصله داری ۲ متری

که G_g مدول برشی دوغاب، E_b مدول یانگ پیچ‌سنگ و d_2 قطر چال پیچ‌سنگ است.

$$P_{ult} = 0.1 \sigma_c \pi d_2 L \quad (3)$$

که L طول گیرداری و σ_c مقاومت تک‌محوری دوغاب است.

۳-۲- رفتار برشی پیچ‌سنگ در جابجایی برشی درزه

مقاومت و سختی برشی ناپیوستگی‌ها تحت تأثیر پیچ‌سنگ‌ها قرار می‌گیرند و جابجایی برشی ناپیوستگی‌ها باعث ایجاد تنش خمشی در پیچ‌سنگ‌ها می‌شود. سختی برشی اصلاح‌شده (K_s) ناپیوستگی پس از اعمال نگهداری پیچ‌سنگ از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$K_s = E_b I \beta^3 \quad (4)$$

که در آن، I ممان دوم سطح پیچ‌سنگ و β از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

بنابراین، نیروی عمده اعمالی به پیچ‌سنگ‌ها ناشی از جابجایی بلوک‌ها در اثر وجود ناپیوستگی‌ها خواهد بود و محاسبات بر رفتار محوری و برشی پیچ‌سنگ‌های مجاور ناپیوستگی‌ها متمرکز خواهند شد.

۳-۱- رفتار محوری پیچ‌سنگ در حرکت درزه

رفتار محوری پیچ‌سنگ‌ها قبل از شکست تابعی از سختی محوری و نیروی بیرون کشی آن‌ها است، که از رابطه‌های (۱) تا (۳) به دست می‌آید [۲۴].

$$K_a = \pi \cdot k \cdot d_1 \quad (1)$$

که در آن، K_a سختی محوری پیچ‌سنگ، d_1 قطر پیچ‌سنگ و k تابعی از هندسه و پارامترهای الاستیک پیچ‌سنگ و دوغاب است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$k = \left[\frac{1}{2} G_g \frac{E_b}{d_2 - 1} \right]^{1/2} \quad (2)$$

که در آن، β از رابطه (۵) محاسبه می‌شود، l طول فعال و ρ_{max} نسبتی از انحراف پیچ سنگ است که برای پیچ سنگ‌های دوغابی معمول ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود. [۲۵].

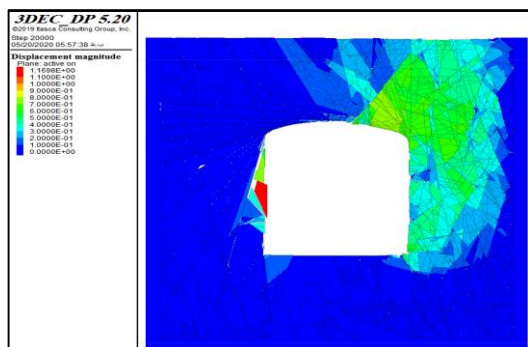
در روابط ارائه شده محدودیتی برای جابجایی برشی ارائه نشده است، که در صورت تجاوز از آن مقدار نیروی برشی برابر صفر خواهد شد. بنابراین در مطالعه حاضر به منظور تشخیص پیچ سنگ‌های تسلیم شده و در نتیجه تعیین بلوک‌های ناپایدار از معیار تجربی ارائه شده توسط لیانگ (۲۰۱۳) که توسط ما و همکارانش (۲۰۱۷) با روش تحلیل نیز تأیید شد، استفاده شده است [۲۶]. طبق این مطالعات حداکثر کرنش محوری پیچ سنگ دوغابی قبل از شکست ۰/۰۰۲ است، بنابراین، جابجایی محوری نهایی پیچ سنگ بر اساس رابطه (۱۰) محاسبه شده است.

$$D_{al} = 0.002 L \cdot B \quad (10)$$

که در آن، D_{al} جابجایی مجاز محوری پیچ سنگ، L طول پیچ سنگ و B نسبت طول گیرداری است که در این مطالعه ۰/۹ کل طول پیچ سنگ در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج مدل سازی عددی

پس از انجام مدل سازی، میان شبکه‌های ناپیوستگی قبل و بعد از نصب سیستم‌های نگهداری مقایسه‌ای انجام گرفته است که به منظور انتخاب پایدارترین و ناپایدارترین شبکه ناپیوستگی و مناسب‌ترین الگوی پیچ سنگ گذاری است. شکل ۵ نمونه‌ای از جابجایی بلوک‌های ناپایدار اطراف مغار را پس از حفاری و قبل از نصب سیستم نگهداری برای DFN شماره ۵ نشان می‌دهد.



شکل ۵: جابجایی بلوک‌های ناپایدار اطراف مغار را پس از حفاری و قبل از نصب سیستم نگهداری برای DFN#5

به همین سبب از دو معیار فنی که شامل، مجموع حجم بلوک‌های ناپایدار و حجمی که ۹۰ درصد بلوک‌های ناپایدار از آن کوچک‌تر هستند (d_{90}) بهره گرفته شده است.

$$\beta = \left[\frac{K}{4E_b l} \right]^{1/4} \quad (5)$$

$$K = 2E_g / \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right) \quad (6)$$

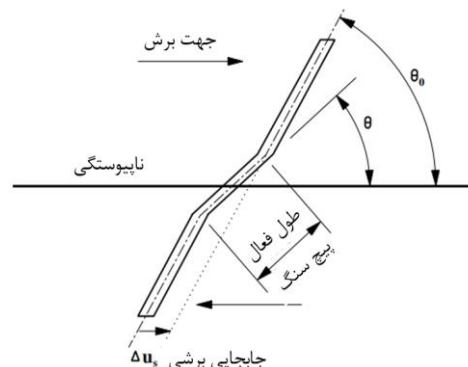
و E_g مدول یانگ دوغاب است.

در کد مورد استفاده در این مطالعه (3DEC) تغییر شکل پیچ سنگ در اثر جابجایی ناپیوستگی به صورت شکل ۴ در نظر گرفته می‌شود. در این شکل مقطعی از طول پیچ سنگ که جهت داری در آن تغییر می‌کند، طول فعال پیچ سنگ در نظر گرفته می‌شود و فرض شده است که جهت داری پیچ سنگ تنها در اثر جابجایی نرمال و برشی ناپیوستگی رخ می‌دهد. به منظور محاسبه طول فعال پیچ سنگ دو فنر در جهت عمود و موازی محور پیچ سنگ در نظر گرفته می‌شود که پس از جابجایی برشی، فنر محوری به موازات طول فعال پیچ سنگ و فنر برشی عمود بر تغییر جهت می‌دهد. بنابراین رابطه نیرو - جابجایی با توجه به سختی‌های محوری و برشی پیچ سنگ‌ها به ترتیب از رابطه‌های (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند.

$$\Delta F_a = K_a \cdot \text{abs}(\Delta u_a) \quad (7)$$

$$\Delta F_s = K_s \cdot \text{abs}(\Delta u_s) \quad (8)$$

که ΔF_s و ΔF_a به ترتیب تغییرات نیروی محوری و برشی، Δu_s و Δu_a به ترتیب تغییرات جابجایی محوری و برشی و K_s و K_a به ترتیب سختی‌های محوری و برشی می‌باشند.



شکل ۴: تغییر شکل و طول فعال پیچ سنگ در اثر جابجایی برشی ناپیوستگی [۲۵]

به منظور تعیین طول فعال پیچ سنگ از روابط ارائه شده توسط گاردین (۱۹۷۷) بهره گرفته شده است که در آن طول تسلیم به عنوان طول فعال در نظر گرفته و از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$e^{-\beta l} = \rho_{max} \quad (9)$$

نتایج حاصل از مدل‌سازی ۱۰ شبکه ناپیوستگی مجزا بدون نصب سیستم نگهداری بر اساس دو معیار فنی مجموع حجم بلوک‌های ناپایدار و حجمی که ۹۰ درصد بلوک‌های ناپایدار از آن کوچک‌تر هستند (d_{90}) در جدول ۴ آمده است.

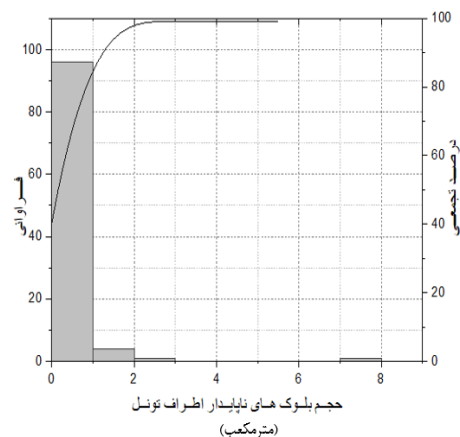
جدول ۴: نتایج مربوط به حجم بلوک‌های ناپایدار متناظر با فراوانی ۹۰ درصد در نمودارهای هیستوگرام

شماره DFN	d_{90} (مترمکعب)	مجموع حجم بلوک‌های ناپایدار (مترمکعب)
۱	۱٫۹	۵۹٫۷
۲	۱٫۳	۵۸٫۷
۳	۲٫۸	۱۳۰٫۸
۴	۱٫۸	۸۴٫۶
۵	۱٫۶	۵۶٫۵
۶	۲٫۶	۹۷٫۳
۷	۱٫۷	۵۸٫۹
۸	۲	۶۸
۹	۱٫۸	۷۶٫۷
۱۰	۳٫۶	۸۷٫۲

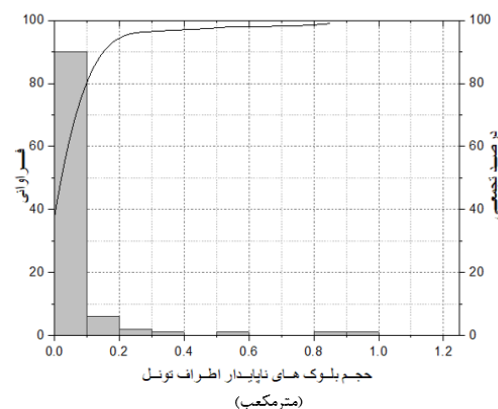
با توجه به جدول ۴، به‌طور نسبی پایدارترین وضعیت متعلق به شبکه‌های ناپیوستگی شماره ۵ و ۲ و ناپایدارترین وضعیت متعلق به شبکه‌های ناپیوستگی شماره ۳، ۶ و ۱۰ است.

این مقایسه‌ها پس از سیستم نگهداری نیز انجام شد و وضعیت هر شبکه ناپیوستگی با سه الگوی پیچ‌سنگ گذاری مورد بررسی قرار گرفت، که در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول‌های قابل‌مشاهده است ستون‌ها و ردیف‌هایی متعلق به مقادیر حداقلی و حداکثری تعیین شده‌اند که بیانگر کمینه و بیشینه حالات هستند. به‌علاوه در جدول ۵ ناپایداری‌ها بر اساس معیار لقی‌گیری (۵۰ مترمکعب) با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. با توجه به مقادیر ارائه‌شده، ناپایدارترین الگو متعلق به الگوی ۳ متری است که حداقل آرماتور استفاده‌شده بین تمام الگوها را دارد و الگوی ۹ متری با بیشترین آرماتور مصرفی بین تمامی الگوها، پایدارترین الگو است. البته این مطلب می‌بایست مورد توجه قرار گیرد که اگرچه به‌طور کلی تقویت سیستم نگهداری وضعیت پایداری سنگ را بهبود می‌بخشد لیکن معیار اقتصادی (طول پیچ‌سنگ مصرفی) نیز باید مدنظر قرار گیرد.

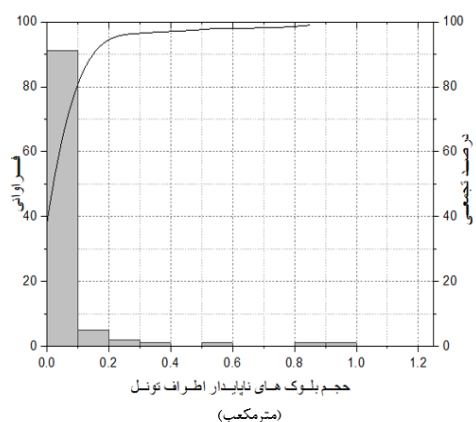
با استفاده از نمودارهای فراوانی تجمعی حجم بلوک‌های ناپایدار و همچنین معیار اقتصادی بر اساس طول پیچ‌سنگ مصرفی مشخص شده است. نمونه‌هایی از هیستوگرام‌های رسم شده برای DFN شماره ۵ در شکل ۶ ارائه شده‌اند. با توجه به شکل ۶ (الف، ب، ج)، به‌خوبی قابل‌مشاهده است که بیشتر از ۹۰ درصد حجم بلوک‌های ناپایدار از ۰٫۵ مترمکعب کوچک‌ترند.



الف) الگوی سه متری



ب) الگوی شش متری



ج) الگوی نه متری

شکل ۶: نمودار توزیع تجمعی حجم بلوک‌های ناپایدار اطراف تونل پس از نصب پیچ‌سنگ‌ها ۳، ۶ و ۹ متری در DFN#5

جدول ۵: نتایج مربوط به حجمی که ۹۰ درصد بلوک های ناپایدار از آن کوچک تر هستند (d90) بر حسب مترمکعب

شماره الگو و طول آرماتور مصرفی (متر)		شماره تحقق شبکه ناپیوستگی										حالت های بیشینه و کمینه	
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	کمینه	بیشینه
قبل از نصب	P0	۱/۹	۱/۳	۲/۸	۱/۸	۱/۶	۲/۶	۱/۷	۲	۱/۸	۳/۶	۱/۳	۳/۶
۹۱۸	P1	۰/۴۸	۰/۷۲	۰/۶۷	۰/۱۶	۰/۶۳	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۸۴	۳/۴	۰/۱۶	۳/۴
۱۸۳۶	P2	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۶	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱	۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۹	۰/۱	۰/۹
۲۷۵۴	P3	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۱	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۸۱	۰/۱	۰/۸۱
حالت های بیشینه و کمینه تنها برای حالات پیچ سنگ گذاری	کمینه	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۸۱		
	بیشینه	۰/۴۸	۰/۷۲	۰/۶۷	۰/۱۶	۰/۶۳	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۸۴	۳/۴		

جدول ۶: مجموع حجم بلوک های ناپایدار در هر شبکه ناپیوستگی پس از نصب سیستم نگهداری (مترمکعب)

شماره الگو و طول آرماتور مصرفی (متر)		شماره تحقق شبکه ناپیوستگی										حالت های بیشینه و کمینه	
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	کمینه	بیشینه
قبل از نصب	P0	۵۹/۷	۵۸/۷	۱۳۰/۸	۸۴/۶	۵۶/۵	۹۷/۳	۵۸/۹	۶۸	۷۶/۷	۸۷/۲	۵۶/۵	۱۳۰/۸
۹۱۸	P1	۱۸/۹	۲۶/۱	۲۳/۵	۱۰/۶	۲۳/۴	۱۱/۸	۱۱/۷	۱۵/۶	۵۴/۲	۷۴/۲	۱۰/۶	۷۴/۲
۱۸۳۶	P2	۸/۶	۶/۵	۲۵/۵	۷/۹	۵/۳	۹	۳/۵	۱۰/۲	۱۰/۸	۲۵/۶	۳/۵	۲۵/۶
۲۷۵۴	P3	۹	۵/۴	۱۰/۷	۷	۵	۷/۴	۳/۵	۹	۶/۹	۱۸/۶	۳/۵	۱۸/۶
حالت های بیشینه و کمینه تنها برای حالات پیچ سنگ گذاری	کمینه	۸/۶	۵/۴	۱۰/۷	۷	۵	۷/۴	۳/۵	۹	۶/۹	۱۸/۶		
	بیشینه	۱۸/۹	۲۶/۱	۲۳/۵	۱۰/۶	۲۳/۴	۱۱/۸	۱۱/۷	۱۵/۶	۵۴/۲	۷۴/۲		

بعدی که از جدول ۷ می توان نتیجه گرفت این است که نمی توان پایداری DFN ها قبل از نصب سیستم نگهداری را به پس از نصب پیچ سنگ تعمیم داد. به عنوان مثال شبکه ناپیوستگی ۲ و ۵ که قبل از نصب پایدارترین وضعیت را داشتند، با نصب پیچ سنگ جایگاهی مابین بهترین و بدترین شبکه ها داشتند.

جدول ۷: تعیین پایدارترین و ناپایدارترین شبکه های ناپیوستگی قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری

پایدارترین شبکه های ناپیوستگی مجزا	ناپایدارترین شبکه های ناپیوستگی مجزا	
۲/۵	۳/۶، ۱۰	قبل از نصب سیستم نگهداری
۴/۷	۳/۱۰	پس از نصب سیستم نگهداری

علاوه بر این، با توجه به جدول های ۵ و ۶ می توان نتیجه گرفت که برای هر شبکه ناپیوستگی کدام الگو با حداقل میزان آرماتور مصرفی قادر به پایدارسازی مغار

از حالت های بیشینه و کمینه جدول های ۴، ۵ و ۶ می توان به اطلاعات جدول ۷ دست پیدا کرد که بیانگر پایدارترین و ناپایدارترین شبکه های ناپیوستگی مجزا در دو حالت قبل و بعد از نصب سیستم پیچ سنگ گذاری است. اگرچه مطالعات نشان می دهد هیچ معیار مشخصی برای در نظر گرفتن پایداری وجود ندارد لیکن با توجه به اینکه به پایداری رساندن تمامی بلوک ها مقرون به صرفه نیست، در این مطالعه پایداری ۹۰ درصد بلوک ها به عنوان معیار مقایسه آرایش پیچ سنگ ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر آن، به دلیل اینکه معمولاً بلوک های کمتر از ۰/۵ مترمکعب توسط لق گیری رهاسازی می شوند و پایداری بلوک هایی با این ابعاد نیازمند آرایش پیچ-سنگ بسیار سنگین است، بنابراین حد بلوک های با حجم بالاتر از ۰/۵ مترمکعب در تحلیل بلوک های ناپایدار لحاظ شده است. درواقع در این سیستم بلوکی هدف پایداری بلوک های سنگین است، به این معنی که هرچه تعداد بلوک ها با حجم پایدار بیشتر، سیستم نگهداری عملکرد بهتری دارد. نکته

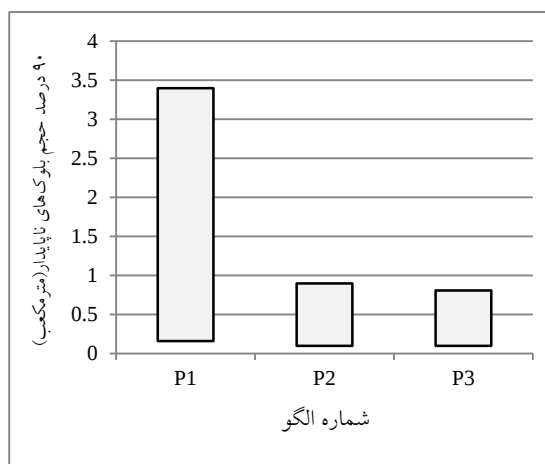
به‌منظور درک بهتر میزان پایدارسازی هر الگوی پیچ‌سنگ گذاری نمودارهای مربوط به دو معیار فنی برای الگوهای پیچ‌سنگ گذاری و تحقق‌های شبکه‌های ناپیوستگی، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. بازه تغییرات مربوط به الگوها در این دو شکل، از جدول‌های ۵ و ۶ استخراج شده‌اند.

با توجه به شکل ۷ می‌توان اظهار داشت که به‌طور کلی اگرچه الگوی سه متری در برخی تحقق‌ها باعث کاهش حجم بلوک‌های ناپایدار و کاهش d90 می‌شود، اما به دلیل نتایج نامطلوب در دیگر تحقق‌ها قابل‌اعتماد نیست. این در حالی است که الگوهای ۶ و ۹ متری با توجه به تغییرات کمتری که دارند عملکرد مطلوب و نسبتاً مشابهی از لحاظ حجم بلوک‌های ناپایدار از خود نشان می‌دهند. شکل ۸ تغییرات معیارهای فنی پایداری هر تحقق شبکه ناپیوستگی را پس از اجرای الگوهای مختلف پیچ‌سنگ نشان می‌دهد. در این شکل به‌خوبی قابل‌مشاهده است که به‌جز تحقق‌های ۹ و ۱۰، دیگر تحقق‌ها گسترش تغییرات پایداری نسبتاً کمی دارند. این نتیجه به آن معناست که برای تحقق‌های شبکه‌های ناپیوستگی ۹ و ۱۰ اختلاف قابل‌توجهی در میزان پایدارسازی بلوک‌ها نسبت به طول پیچ‌سنگ‌ها مشاهده می‌شود، در صورتی‌که تغییر الگو تأثیر بسیار کمی بر پایداری تحقق‌های ۴، ۶، ۷ و ۸ دارد، که نشان می‌دهد در برخی الگوها طول آرماتور مصرفی لزوماً بر میزان پایدارسازی سازه تأثیر نخواهد داشت.

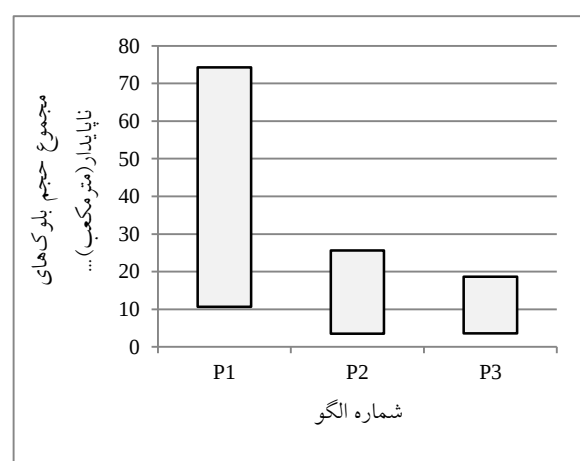
موردنظر بوده است که این امر خود در جدول ۸ آمده است. با توجه به اطلاعات جدول ۸ مشاهده می‌شود که در نیمی از تحقق‌های شبکه‌های ناپیوستگی می‌توان با کمک الگوی ۱ با حداقل میزان آرماتور مصرفی، مغار را پایدار ساخت. درحالی‌که ۸۰ درصد تحقق‌ها با الگوی ۶ متری و ۹۰ درصد تحقق‌ها با الگوی ۹ متری پایدار شده‌اند. نکته قابل‌توجه عدم پایداری تحقق شماره ۱۰ توسط الگوهای در نظر گرفته شده است.

جدول ۸: سبک‌ترین الگوهای پیچ‌سنگ پایدارکننده هر شبکه‌های ناپیوستگی

شماره الگویی که با کمترین میزان آرماتور پایداری مغار را تأمین کرده است.	شماره تحقق شبکه ناپیوستگی
P1	۱
P2	۲
P3	۳
P1	۴
P2	۵
P1	۶
P1	۷
P1	۸
P2	۹
هیچ‌کدام از الگوها قادر به پایداری مغار موردنظر در دهمین شبکه ناپیوستگی مجزا نبودند.	
	۱۰

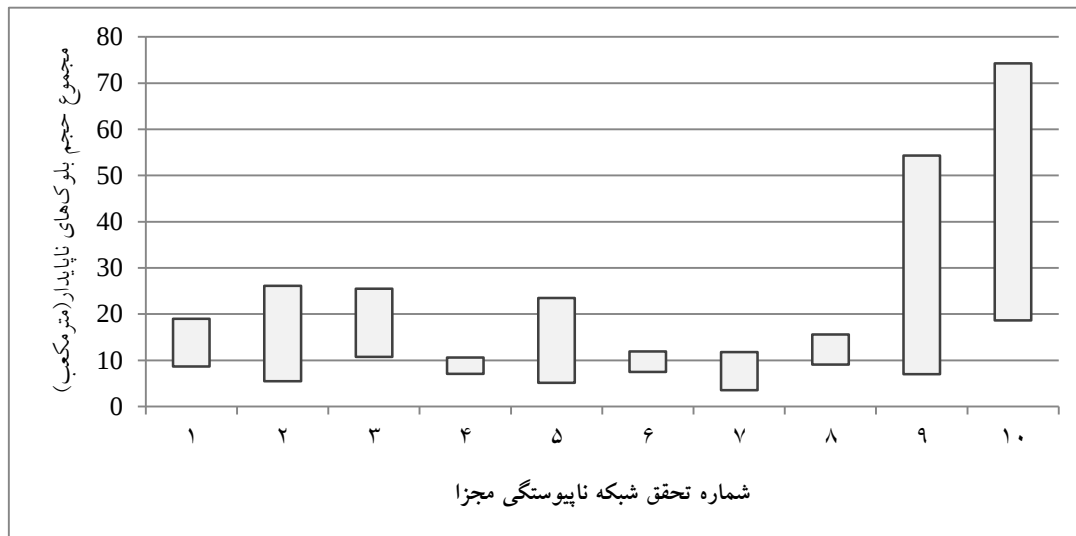


(ب) تغییرات ۹۰ درصد حجم بلوک‌های ناپایدار (d90) در تحقق‌های مختلف

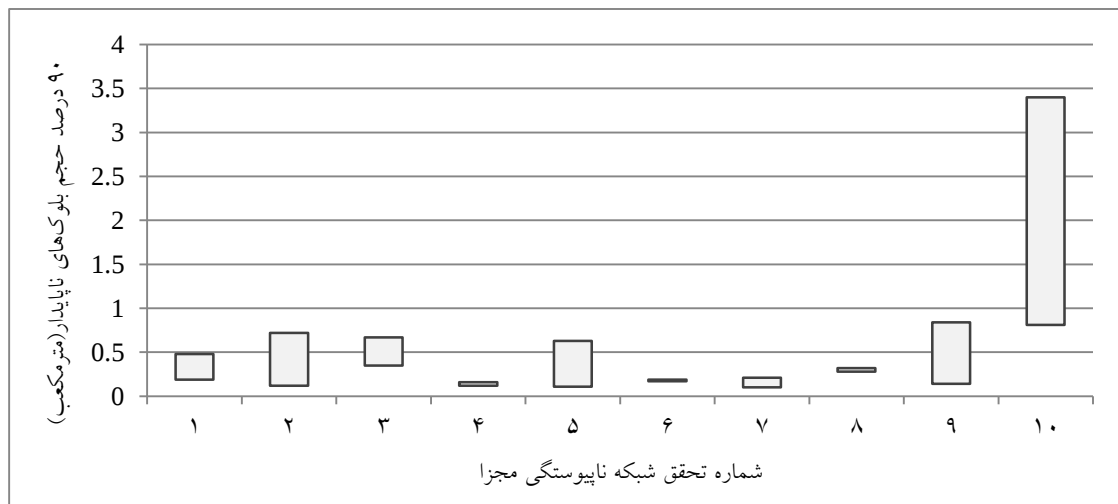


(الف) تغییرات مجموع حجم بلوک‌های ناپایدار در تحقق‌های مختلف

شکل ۷: مقایسه بیشینه و کمینه‌های معیارهای فنی برای الگوهای پیچ‌سنگ گذاری در ۱۰ تحقق شبکه ناپیوستگی مجزا P1: الگوی با طول پیچ‌سنگ ۳ متری، P2: الگوی با طول پیچ‌سنگ ۶ متری، P3: الگوی با طول پیچ‌سنگ ۹ متر



(الف) تغییرات مجموع حجم بلوک‌های ناپایدار برحسب شماره تحقق شبکه ناپیوستگی مجزا



(ب) تغییرات ۹۰ درصد حجم بلوک‌های ناپایدار برحسب شماره تحقق شبکه ناپیوستگی مجزا

شکل ۸: تغییرات معیارهای پایداری هر تحقق شبکه ناپیوستگی پس از اجرای الگوهای مختلف پیچ‌سنگ

۵- نتیجه‌گیری

تأثیر در برخی از شبکه‌های ناپیوستگی مجزا بسیار کم و در برخی زیاد است. این مطلب لزوم اعمال و بررسی سیستم‌های نگهداری بر شبکه‌های ناپیوستگی مختلف تا دستیابی به بهینه‌ترین الگو را نشان می‌دهد. در این مطالعه روند نوینی به‌منظور دستیابی به الگوی بهینه بر اساس مجموع حجم بلوک‌های ناپایدار و حجمی که ۹۰ درصد بلوک‌های ناپایدار از آن کوچک‌تر است به همراه طول پیچ‌سنگ مصرفی ارائه شده است.

در مورد مغار موردنظر، استفاده از الگوی ۳ متری پیچ‌سنگ‌ها پایداری مناسبی را نشان نمی‌دهد که با افزایش طول پیچ‌سنگ‌ها به ۶ و ۹ متر پایداری مناسبی در اکثر شبکه‌های ناپیوستگی حاصل می‌شود. این در حالی است که اختلاف معنی‌داری از نظر تعداد شبکه‌های ناپیوستگی ناپایدار و حجم بلوک ناپایدار بین دو طول پیچ‌سنگ ۶ و ۹

در این تحقیق سعی شده است الگوی بهینه و مشخصاً طول بهینه پیچ‌سنگ‌ها در سیستم نگهداری با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها در مغار کلاب ۲ ارائه شود. به این منظور از سه الگوی پیچ‌سنگ با طول پیچ‌سنگ ۳، ۶ و ۹ متری و فاصله‌داری ۲ متری به‌منظور پایداری‌سازی مغار کلاب ۲ واقع در کشور سوئد استفاده شده است. مدل‌سازی شامل اجرای ده تحقق از شبکه ناپیوستگی مجزا (DFN) به کمک این سه الگو با استفاده از روش المان مجزا سه‌بعدی (3DEC) است که نتایج حاصل از مدل‌سازی به شرح زیر است.

میزان تأثیر یک سیستم نگهداری خاص بر روی شبکه‌های ناپیوستگی مختلف، متفاوت بوده که میزان این

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41(7), pp.1055-1067.

[9] Boon, C. W.; Houlsby, G. T.; Utili, S.; 2015; "Designing tunnel support in jointed rock masses via the DEM." Rock mechanics and rock engineering, Vol. 48.2, pp. 603-632.

[10] Shreedharan, S.; Kulatilake, P.; 2016; "Discontinuum-equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method". Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 49.5: pp. 1903-1922.

[11] Liu, J.; Yang, H.; Wen, H.; and Zhou, X.; 2017; "Analytical model for the load transmission law of rock bolt subjected to open and sliding joint displacements." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 100, pp.1-9.

[12] Ma, S.; Zhao, Z.; Nie, W.; Zhu, X.; 2017; "An analytical model for fully grouted rockbolts with consideration of the pre-and post-yielding behavior." Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 50(11), pp.3019-3028.

[13] Noroozi, M.; Rafiei, R.; Bajolvand, M.; & Hojati T. A.; 2018; "Investigate the effect of rock mass joint intensity on performance of support systems in the tunnel by using DFN-DEM numerical modeling (Case study: the access tunnel of Rudbar Lorestan Dam plant)". Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, Vol. 8.16, pp. 13-27.

[14] He, Sh.; Li, Y.; Aydin, A.; 2018; "A comparative study of UDEC simulations of an unsupported rock tunnel." Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 72, pp. 242-249.

[15] Yokota, Y.; Zhao, Z.; Nie, W.; Date, K.; Iwano, K.; & Okada, Y.; 2019 "Experimental and numerical study on the interface behaviour between the rock bolt and bond material." Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 52(3), 869-879.

[16] Boon, C. W.; 2019; "Study of reinforcement support mechanisms for wide-span horse-shoe-shaped openings in horizontally layered jointed rock using the distinct element method." Rock Mechanics and Rock Engineering." Vol. 52.4, pp. 1179-1191.

[17] Das, R.; Singh, T. N.; 2020; "Effect of rock bolt support mechanism on tunnel deformation in jointed rockmass: a numerical approach." Underground Space.

[18] Li, C.; 2017; "Principles of rockbolting design." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9.3: 396-414.

[19] Nord, G.; Bagheri, M.; Baghbanan, A.; & Stille, H.; 2007; "Design consideration of large caverns by using advanced drilling equipment." Felsbau, Vol. 25.5, pp. 131-136.

[20] Bagheri, M. (2009). Model uncertainty of design tools to analyze block stability (Doctoral dissertation, KTH).

[21] Li, C.C., 2017. Principles of rockbolting design. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(3), pp.396-414.

متری مشاهده نشده است. این امر نشان می‌دهد پایداری تونل در استفاده از سیستم نگهداری پیچ‌سنگی لزوماً با افزایش طول پیچ‌سنگ افزایش نمی‌یابد. در ابتدا افزایش طول پیچ‌سنگ موجب افزایش پایداری می‌شود اما پس از طول مشخصی با افزایش طول پیچ‌سنگ دیگر بهبود قابل‌ملاحظه‌ای حاصل نمی‌شود. بنابراین، با در نظر گرفتن معیار اقتصادی، الگوی ۶ متری بهترین الگو جهت پایداری این فضای زیرزمینی است. نتایج این تحلیل به‌غیر از نتایج خاص مربوط به سازه مورد طراحی به‌طور کلی نشان می‌دهد که هندسه ناپیوستگی‌ها که در روش‌های مرسوم مدل‌سازی عددی محیط پیوسته نادیده گرفته می‌شود، در تعیین و میزان نگهدارنده لازم به‌ویژه المان‌های مونو بار نظیر پیچ‌سنگ بسیار بااهمیت است. عدم در نظر گرفتن این ملاحظات در برخی از پروژه‌های حساس با بودجه مشخص می‌تواند انجام پروژه را با چالش جدی توجیه اقتصادی مواجه نماید.

مراجع

[1] Indraratna, B. and Kaiser, P.K., A.; 1990; "Design for grouted rock bolts based on the convergence control method" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts Vol. 27, No. 4, pp. 269-281.

[2] Cai, Y.; Esaki, T.; Jiang, Y.; 2004; "A rock bolt and rock mass interaction model" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41.7: pp. 1055-1067.

[3] Carranza-Torres, C.; 2009; "Analytical and numerical study of the mechanics of rockbolt reinforcement around tunnels in rock masses". Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42.2: pp. 175-228.

[4] Bobet, A.; 2009; "Elastic solution for deep tunnels. Application to excavation damage zone and rockbolt support". Rock mechanics and rock engineering, Vol. 42.2, pp. 147-174.

[5] Sakurai, Sh.; 2010; "Modeling strategy for jointed rock masses reinforced by rock bolts in tunneling practice". Acta Geotechnica, Vol. 5.2, pp. 121-126.

[6] Kaya, A.; Bulut, F.; and Sayin A.; 2011; "Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study from Turkey". Scientific Research and Essays, Vol. 6(31), pp.6566-6583.

[7] Lorig, L. J.; Varona, P.; 2013; "Guidelines for numerical modelling of rock support for mines." Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction. Australian Centre for Geomechanics, pp. 81-105.

[8] Cai, Y., Esaki, T. and Jiang, Y., 2004. "A rock bolt and rock mass interaction model". International

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 100, 1-9.

[25] Itasca Consulting Group, Inc.; 2016; 3DEC — Three-Dimensional Distinct Element Code, Ver. 5.2. Minneapolis: Itasca.

[26] Ma, S., Zhao, Z., Nie, W., & Zhu, X.; 2017; "An analytical model for fully grouted rockbolts with consideration of the pre-and post-yielding behavior." Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 50.11, pp. 3019-3028.

[22] Merrien-Soukatchoff, V., Korini, T., & Thoraval, A. (2012). "Use of an integrated discrete fracture network code for stochastic stability analyses of fractured rock masses." Rock Mechanics and Rock Engineering, 45(2), 159-181.

[23] Priest SD (1993) *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman and Hall

[24] Liu, J., Yang, H., Wen, H., & Zhou, X. (2017). *Analytical model for the load transmission law of rock bolt subjected to open and sliding joint displacements.*

پیوست:

ممان دوم سطح پیچ سنگ	I
مقاومت کششی پیچ سنگ	σ_b
مدول الاستیسیته پیچ سنگ	E_b
قطر پیچ سنگ	d_1
فاصله داری پیچ سنگ ها	S
مدول برشی دوغاب	G_g
مدول الاستیسیته دوغاب	E_g
الگوی پیچ سنگ گذاری سه متری	$P1$
الگوی پیچ سنگ گذاری شش متری	$P2$
الگوی پیچ سنگ گذاری نه متری	$P3$
سختی محوری پیچ سنگ	K_a
نیروی بیرون کشی	P_{ult}
مقاومت تک محوری دوغاب	σ_c
تغییرات نیروی محوری	ΔF_a
تغییرات نیروی برشی	ΔF_s
تغییرات جابجایی محوری	Δu_a
تغییرات جابجایی برشی	Δu_s
طول فعال پیچ سنگ	l
نسبتی از انحراف پیچ سنگ	ρ_{max}
حداکثر جابجایی مجاز پیچ سنگ	D_{al}

شبکه ناپیوستگی مجزا	DFN
روش المان مجزا	DEM
طول پیچ سنگ	L
طول گیرداری پیچ سنگ	B
حجمی که ۹۰ درصد بلوک های ناپدار از آن کوچکترند	d_{90}
تعداد درزه ها در واحد سطح	P_{20}
ضریب توزیع فیشر	k
نسبت پواسون	ν
مدول الاستیسیته سنگ بکر	E_i
مقاومت فشاری سنگ بکر	σ_{ci}
بازشدگی اولیه درزه ها	Ap
بازشدگی باقیمانده درزه ها	Ap_r
بازشدگی ماکزیمم	Ap_{max}
جابجایی برشی نهایی	D_s
سختی برشی درزه	JK_s
سختی نرمال درزه	JK_n
زاویه اصطکاک پایه	ϕ_b
زاویه اصطکاک باقیمانده	ϕ_r
مقاومت فشاری درزه	JCS
ضریب زبری درزه	JRC