



نشریه روش های تحلیلی و عددی



در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: <http://anm.yazd.ac.ir/>

(مقاله پژوهشی)

مدلسازی عددی تعیین الگوی بهینه کابل کششی در تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی

چکیده

نگهداری فضاهای زیرزمینی یکی از مهم ترین مقوله های مهندسی معدن و عمران است که کابل های کششی به عنوان یکی از رایج ترین ابزارهای نگهداری در این فضاها به کار می روند. در این پژوهش، در محیطی پیوسته، با استفاده از نرم افزار FLAC3D، الگوهای مختلف کابل کششی شامل آرایش های مرسوم، کوتاه-بلند، و پیچشی در شرایط توده سنگ بسیار ضعیف مدل سازی شده تا اثر آن ها بر پایداری تونل بررسی شود. هدف این مطالعه، تعیین الگوی بهینه کابل کششی برای کاهش مصرف مصالح و دستیابی به حداکثر پایداری است. نتایج نشان داد که الگوی کوتاه-بلند با طول های ۵ و ۷/۵ متر و فاصله گذاری ۱/۵ × ۲/۲ متر، جابجایی تونل را از ۷ سانتی متر (حد مجاز ساکورایی) به ۵/۵ سانتی متر کاهش می دهد. همچنین، این الگو مصرف کابل کششی را تا ۱۰ درصد (معادل ۱۷۵ متر در ۲۸ متر طول تونل) نسبت به الگوی مرسوم کاهش داد. الگوی پیچشی با طول ۷/۵ متر نیز کمترین جابجایی (۳/۵ سانتی متر) را به همراه داشت، اما الگوی کوتاه-بلند به دلیل سهولت اجرا و صرفه جویی اقتصادی به عنوان الگوی بهینه پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی

کابل کششی، الگوی کابل کششی، تحلیل پایداری، بهینه سازی، تونل، فضاهای زیرزمینی

۱- مقدمه

زمانی که یک فضا حفر می‌شود، توده سنگ حول آن تمایل دارد که به داخل فضا حرکت کند [۲۱]. حرکت و پتانسیل شکست یا ریزش توده سنگ حول فضای حفر شده تابعی از میدان تنش، خصوصیات سنگ، ساختار زمین شناسی، روش حفر، زمان خود پایداری، هندسه و ابعاد فضای حفر شده است [۴ و ۳]. معمول ترین روش برای پایدار نگهداشتن فضای حفر شده، نصب نگهداری است. انواع نگهداری های اکتیو و پیچ‌سنگ‌هایی (Rock Bolt) که در این دسته قرار می‌گیرند به عنوان مقاوم سازی توده سنگ در نظر گرفته می‌شوند [۵-۸]. براساس آمار، استفاده از پیچ‌سنگ یکی از روشهای عمده نگهداری در معدنکاری و کارهای عمرانی به شمار میرود که قابلیت به کارگیری در شرایط مختلف زمین شناسی را داراست [۹ و ۱۰]. علاوه بر این، استفاده از پیچ‌سنگ نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است بلکه در شرایط مختلف نیز قابل نصب است. این ابزار را میتوان در کنار سایر نگهداری ها مانند شاتکریت (Shotcrete) و پوشش بتنی (Concrete Lining) و تیرهای فولادی حائل (Steel Props) به کاربرد تا ساختاری سازگارتر با محیط ایجاد کرد. پیچ‌سنگ ها با سهولت و سرعت بالا و به روش کاملاً مکانیزه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰-۱۴]. پیچ‌سنگ‌ها تاریخچه ای بالغ بر صد سال دارند و به عنوان یک تکنولوژی کلیدی برای نگهداری سازه‌های زیرزمینی و عمرانی شناخته می‌شوند. در ادبیات مهندسی سنگ، پیچ‌سنگ و کابل‌های کششی (Cable Bolt) هر دو به‌عنوان سیستم‌های نگهداری شناخته می‌شوند. در بسیاری از منابع، واژه پیچ‌سنگ به‌طور کلی برای اشاره به این دو سیستم به کار رفته است [۱۵]، هرچند کابل کششی به دلیل طول بیشتر و انعطاف‌پذیری، برای شرایط پیچیده‌تر و مقیاس‌های بزرگ‌تر ترجیح داده می‌شود. در این مطالعه، منظور از سیستم نگهداری، کابل کششی است، اما جهت حفظ پیوستگی با مطالعات پیشین، مرور منابعی که تحت عنوان پیچ‌سنگ ارائه شده‌اند نیز مدنظر قرار گرفته است.

کواری در سال ۲۰۰۴ [۱۶] تاریخچه استفاده از پیچ‌سنگ را به تفصیل مرور کرده است که در ادامه به بیان مختصری از این تاریخچه پرداخته شده است. در سال ۱۹۱۳ روش پیچ‌سنگ‌گذاری در آلمان اختراع و حق انحصاری آن اخذ شده است. در بازه زمانی از ۱۹۴۳ تا ۱۹۵۰ استفاده از

پیچ‌سنگ برای معادن زغال‌سنگ آمریکای شمالی و اروپا از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده است. پیچ‌سنگ ها به میزان زیادی جایگزین سیستم های نگهداری فولادی شدند. زغال در سال ۱۹۵۹ اولین سیستم کپسولی رزینی در آلمان معرفی گردید. در سال بعد، نصب پیچ‌سنگ‌های فولادی مکانیزه در روش NATM مورد استفاده واقع شده است. در سال ۱۹۶۳ رابسون یک روش جدید برای تونل‌زنی که در آن پیچ‌سنگ و شاتکریت مهمترین اجزاء نگهداری بودند را ابداع نمود. با توسعه تئوری های تحلیلی متعدد، روش‌های جدیدی مانند روش آلمان محدود، آلمان مرزی، آلمان مجزا و روشهای احتمالاتی و آماری در طراحی پیچ‌سنگ توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته اند. روش های طراحی مورد استفاده در عمل، از منطقه ای به منطقه دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر کرده اند که دلیل آن تغییرات در شرایط زمین شناسی و ساختگاه های زیرزمینی است [۱۷]. پانک در سال ۱۹۶۴ [۱۸] به بررسی طراحی شبکه پیچ سنگ‌های عمودی در سقف معادن دارای لایه بندی افقی پرداخت. کوتس و کوچران در ۱۹۷۰ [۱۹] توسعه خصیصه‌های طراحی شبکه پیچ‌سنگ را با توجه به مطالعاتی که در معادن موجود در کانادا انجام شده بود، مورد ارزیابی قرار دادند. لانگ در ۱۹۷۲ [۲۰] اصول نگهداری فضاهای سنگی با استفاده از پیچ‌سنگ را مورد بررسی قرار داد. طبقه بندی مهندسی توده سنگ برای طراحی نگهداری تونل در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن و همکاران [۲۱] انجام گرفت و در این مطالعه نتایج حاصل از ثبت تغییرات ۲۰۰ تونل نشان داد که، بین مقدار و نوع نگهداری دائمی تونل و کیفیت توده سنگ Q رابطه ای برقرار است. شاج و همکاران در ۱۹۷۹ [۲۲] رساله‌ای مرجع و کاربردی برای اصول طراحی پیچ‌سنگ منتشر کردند. فارمر و شلتون در ۱۹۸۰ [۲۳] در به بررسی فاکتورهایی که طراحی سیستم نگهداری با استفاده از پیچ‌سنگ در فضاهای زیرزمینی را تحت تاثیر قرار می دهد، پرداختند. در ۱۹۸۵ کرافورد [۲۴] فاصله داری و طول پیچ‌سنگ‌ها در فضاهای زیرزمینی در سنگ درزه دار را مورد مطالعه قرار داد. استیلبرگ در ۱۹۹۴ [۲۵] کتابچه‌ای تخصصی در زمینه طراحی نگهداری با استفاده از پیچ‌سنگ تألیف نمود. از آن زمان، این روش نقش مهمی به عنوان یکی از نگهداری های اولیه در مهندسی سنگ ایفا می کند. این روش، به طور گسترده ای در معادن زغالسنگ و معدنکاری در سنگ سخت، طرح های برق آبی زیرزمینی، تونل سازی و سایر ساخت های

سنگی در مهندسی عمرانمورد استفاده قرار گرفته است. شوپرت در ۲۰۰۱ [۲۶] و در ادامه لی در ۲۰۱۲ [۲۷] چنین عنوان کردند که روش های نصب پیچسنگ در نگهداری سنگ در تونل های عمرانی به گونه ای است که پیچسنگ های سخت، کاملاً محصور شده^۱ در سنگ نصب می شوند و شاتکریت یا پوشش بتنی پیش ساخته بر روی سطح سنگ قرار می گیرد. تحقیقاتی توسط زیپینگ در سال ۲۰۰۱ [۲۸] بر روی پایداری سقف مغارهای سنگی انجام گرفت. نویسنده از کدهای عددی برای شبیه سازی پیچسنگ و کابل های کششی استفاده کرد. نتایج بدست آمده کارایی سیستم نگهداری در ایجاد قوس های سقفی، کاهش جابجایی سقف و بهبود تحکیم توده سنگ را تأیید کرد. ان جی و لی در ۲۰۰۲ [۲۹] استفاده از پیچسنگ برای پایداری جبهه کار تونل را به صورت پارامتری تحلیل کردند. فلین و همکاران در ۲۰۱۰ [۳۰] پارامترهای مؤثر بر پایداری جبهه کار تونل را به صورت مدل آزمایشگاهی تحلیل کردند. ساکورائی در ۲۰۱۰ [۳۱] در مطالعه ای به بررسی مدل سازی توده سنگ درزه دار مقاوم شده توسط پیچسنگ پرداخته است. در این بررسی به مقایسه دو نوع مقاوم سازی شامل شاتکریت و فولاد با پیچسنگ پرداخته شده است. این مطالعه اهمیت، برتری و لزوم مدل سازی و در نظر گرفتن ناپیوستگی ها را نسبت به توده سنگ معادل در محیط هایی با درزه های همگن مورد ارزیابی قرارداد است. کایا و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۳۲] در تحقیقی به طراحی ورودی تونل در سنگ ضعیف پرداخته است که با استفاده از روش های تجربی پارامترهای ورودی به روش FEM محاسبه شده اند. همچنین ملاحظات به منظور طراحی الگوی پیچسنگ گذاری در معادن و سازه های زیرزمینی عمرانی در محیط های درزه دار با طراحی سیستم نگهداری پیچسنگ در تونل ها به وسیله روش المان مجزا و شبکه ناپیوستگی مجزا در سال ۲۰۱۳ توسط لورینگ و ورونا [۳۳] ارائه شده است. مارک در سال ۲۰۱۵ [۳۴] به بیان کلیات روش های طراحی پیچسنگ های سقفی پرداخت. بن و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۳۵] در مطالعه ای، روندی را به منظور پایداری سازی نواحی بلوکی اطراف تونل به روش المان

مجزا در دو بعد پیشنهاد کرده اند. نهایتاً در این روش الگوی مناسب پیچسنگ گذاری شامل طول پیچسنگ و فاصله گذاری بهینه پیچسنگ ها پیشنهاد شده است. شردهاران و کولاتیلاک در سال ۲۰۱۶ [۳۶] در مطالعه ای دیگر، پایداری دو تونل در یک معدن عمیق زغال سنگ در چین با استفاده از نرم افزار 3DEC بررسی نموده اند و دریافتند که استفاده از پیچسنگ های 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 تک محوری و مقاومت کششی به روش آنالیز معکوس تمرکز شده است. لی در سال ۲۰۱۷ [۱۵] در مطالعه ای، اصول کلی طراحی پیچسنگ در فضاهای زیرزمینی و انواع روش ها و قواعد مورد استفاده در طراحی شبکه پیچسنگ مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. مدل های عددی نشان می دهند که طراحی الگو پیچسنگ نقش کلیدی در پایداری سازی فضاهای زیر زمینی دارند [۳۷]. سرفرازی و همکاران ۲۰۲۱ [۳۸] به بررسی آزمایشگاهی و عددی تعامل پیچسنگ و پل سنگی تحت بارگذاری کششی پرداختند. آن ها با توسعه یک دستگاه آزمایش جدید، مقاومت کششی پل سنگی را در نمونه های دارای درزه ناپیوسته اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که وجود و زاویه ترک اولیه تأثیر قابل توجهی بر کاهش تنش شکست کششی دارد، به طوری که کمترین مقاومت در زاویه صفر درجه (موازی با بارگذاری) مشاهده شد. همچنین، کاهش نرخ بارگذاری باعث کاهش زاویه انتشار ترک نسبت به جهت بار گردید. این نتایج اهمیت پارامترهای مؤثر بر تعامل پیچسنگ-پل سنگی را در بهینه سازی الگوی نگهداری در توده سنگ های درزه دار برجسته می سازد. سناریان اصفهانی و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی ابعاد متفاوت پیچسنگ در مغار کلاب پرداخت و دریافت که با افزایش طول پیچسنگ تا میزانی بهینه پایداری سیستم نگهداری افزایش میابد و پس از آن افزایش طول پیچسنگ تأثیری بر پایداری سیستم نگهداری حفریه زیرزمینی نخواهد داشت [۲]. فو و همکاران (۲۰۲۴) [۳۹] به بررسی آزمایشگاهی و عددی مکانیزم های شکست

^۱ Encapsulated

با وجود مطالعات گسترده‌ای که در زمینه طراحی و به‌کارگیری پیچ‌سنگ‌ها و پیچ‌های کابلی در نگهداری فضاهای زیرزمینی انجام شده، در بسیاری از مطالعات پیشین، الگوی آرایش پیچ‌سنگ‌ها به صورت تجربی و یا با استفاده از روش‌های طراحی مبتنی بر طبقه‌بندی‌های توده‌سنگ پیشنهاد شده است، بدون آنکه تأثیر مستقیم نحوه آرایش و طول پیچ‌سنگ‌ها در شرایط توده‌سنگ‌های بسیار سست، به صورت عددی و سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، تحلیل‌های گذشته عمدتاً بر روی مدل‌های دوبعدی یا شرایط نسبتاً پایدار متمرکز بوده و کمتر به تحلیل سه‌بعدی رفتار پیچ‌سنگ‌ها پرداخته است.

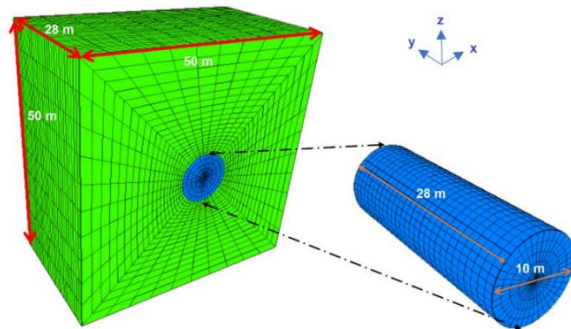
در این پژوهش با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D، عملکرد سیستم نگهداری کابلی در شرایط توده‌سنگ بسیار سست به صورت عددی مدل‌سازی شده و تأثیر آرایش‌های مختلف کابل‌ها (منظم، معمول، کوتاه و بلند) در چهار سری ابعاد متفاوت، به‌طور جامع بررسی گردیده است. این پژوهش با هدف تعیین الگوی بهینه نصب کابل، نه تنها به شناسایی ترکیب بهینه‌ای از طول و فاصله آنها پرداخته، بلکه با تحلیل کمی نتایج مدل‌سازی، معیاری برای انتخاب مناسب‌ترین پیکربندی نگهداری در شرایط مشابه ارائه می‌دهد. با این حال، بدیهی است که در طراحی اجرایی، می‌توان سیستم نگهداری ترکیبی شامل پیچ‌سنگ، کابل کششی، شاتکریت یا سایر عناصر نگهدارنده را انتخاب و بهینه‌سازی کرد، با این حال، در تحقیقات آینده می‌توان از نتایج این پژوهش به‌عنوان مبنای طراحی پایه‌ای استفاده کرد و سپس در ترکیب با سایر سیستم‌های نگهداری مانند شاتکریت یا قاب، به تحلیل ترکیبی و جامع‌تری دست یافت.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، فضای زیرزمینی حفر شده در یک محیط سنگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. محیط سنگی به صورت معادل پیوسته فرض شده و پارامترهای توده سنگ معادل به کل مدل تخصیص داده می‌شوند. توده سنگ همگن و پیوسته در نظر گرفته شده و پارامترهای آن در همه‌جا یکسان است. با فرض همسانگردی، مقاومت و تغییر شکل توده سنگ در جهات اصلی یکسان فرض می‌شود. در مدل‌سازی مقطع فضای زیرزمینی، ابتدا پایداری توده سنگ اطراف حفاری تحلیل شده و سپس تأثیر الگوهای مختلف اجرای شبکه پیچ‌سنگ/کابل کششی بر پایداری و تشکیل

برشی پیچ‌سنگ در توده‌سنگ لایه‌دار پرداختند. نمونه‌های ساخته شده شامل لایه‌هایی از دوغاب و گچ با نسبت‌های ضخامت مختلف و یک پیچ‌سنگ تزریقی در مرکز بودند. نتایج نشان داد که نوع و ضخامت ماده پرکننده اطراف پیچ‌سنگ تأثیر قابل توجهی بر نیروی محوری نهایی دارد و استفاده از دوغاب، به‌ویژه در ضخامت‌های بیشتر، باعث افزایش مقاومت محوری و بهبود عملکرد نگهداری می‌شود. شبیه‌سازی عددی با روش PFC2D نیز تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت. گوو و همکاران (۲۰۲۴) [۴۰] نوع جدیدی از بولت طراحی کردند که قادر به تحمل پیش‌تنش بالا و کنترل تغییر شکل‌های بزرگ در تونل‌های عمیق معدن سنگ فسفات است. آن‌ها با انجام آزمایش‌های میدانی نشان دادند که استفاده از این بولت‌ها باعث کاهش حدود ۷۰٪ در تغییر شکل نهایی سنگ‌های اطراف تونل می‌شود. همچنین، شبیه‌سازی عددی با مدل ترکیبی PFC3D-FLAC3D مکانیزم جبران تنش تونل را تحلیل کرد و نشان داد که این روش می‌تواند پایداری تونل و ستون‌ها را بهبود بخشد. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت طراحی بولت‌های مقاوم در برابر تغییر شکل‌های بزرگ و توسعه فناوری‌های نوین نگهداری تونل در معادن عمیق تأکید می‌کند. دو و همکاران (۲۰۲۵) [۴۱] مدل جدیدی برای بولت‌های سنگی در شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی FDEM ارائه کردند تا تأثیر بولت‌ها بر تغییر شکل و ترک‌خوردگی سنگ‌های اطراف تونل بررسی شود. آن‌ها با بهینه‌سازی الگوریتم و ارائه معادلات ماده جدید، نشان دادند که استفاده از بولت‌ها می‌تواند جابه‌جایی عمودی سنگ‌ها را کاهش دهد و فرآیند رشد ترک‌ها را کند کند. همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کاهش فاصله بین ردیف‌های بولت یا افزایش طول آن‌ها منجر به کاهش تعداد ترک‌ها و جابه‌جایی سنگ‌های اطراف می‌شود. سرفرازی و همکاران (۲۰۲۵) [۴۲] با استفاده از روش المان گسسته، اثر شکل و تعداد فرورفتگی‌های کابل کششی را بر رفتار مکانیکی سطح اتصال بتن-کابل بررسی کردند. نتایج نشان داد که شکست غالب از نوع کششی بوده و هندسه و تعداد فرورفتگی‌ها اثر قابل توجهی بر مقاومت برشی و مکانیزم گسیختگی دارد. این یافته‌ها بیانگر اهمیت طراحی هندسی کابل کششی برای بهبود انتقال بار و افزایش دوام سیستم نگهداری در سازه‌های زیرزمینی است.

صرف نظر باشد. بر اساس روابط کرش^۱ ۴ تا ۵ برابر شعاع مقطع حفاری میتواند به عنوان مرز مدل با توجه به شرایط ذکر شده در نظر گرفته شود [۴۲]. برای دستیابی به دقت مناسب در اطراف تونلها ابعاد مش ها ریز تر در نظر گرفته شده اند. در شکل ۱ می توان ابعاد تونل و هندسه مدل را مشاهده نمود. ابعاد مدل مشابه با مدل مقاله کرمی ۱۳۹۱ در نظر گرفته شده است [۴۳].



شکل ۱ - نمایش ابعاد تونل و هندسه مدل عددی

که در آن قطر و طول تونل به ترتیب ۱۰ و ۲۸ متر بوده و همچنین هندسه مدل یک مربع ۵۰ در ۵۰ متر با ضخامت ۲۸ متر می باشد. همانطور که پیش تر بیان گردیده بود با استفاده از مدل رفتاری موهر کولمب مدلسازی صورت گرفته است.

برای مدل تونل ساخته شده در محیط نرم افزار FLAC3D از داده های ژئومکانیکی توده سنگ موجود در مقاله کرمی ۱۳۹۱ استفاده شده است که در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد [۴۳]. در مدلسازی، مرزهای کناری مدل در برابر جابجایی افقی مقید شده اند، در حالی که جابجایی قائم برای آنها مجاز در نظر گرفته شده است. همچنین، مرز پایین مدل به صورت کاملاً مقید تعریف شده و در هر دو راستای افقی و قائم بدون حرکت فرض شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ [۴۳]

مقدار	مشخصات
۰/۳۸۵	مدول برشی (GPa)

زون پلاستیک اطراف فضا بررسی می شود تا الگوی بهینه برای پایداری پیشنهاد گردد.

در این پژوهش، از نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D و مدل رفتاری موهر کولمب برای تحلیل عددی استفاده گردیده است. این نرم افزار بر پایه فرض محیط پیوسته (Continuum) توسعه یافته و در آن، توده سنگ اطراف تونل به صورت پیوسته مدلسازی می شود. از این رو، برای لحاظ کردن اثر ناپیوستگی های موجود در توده سنگ (نظیر درزه های ناممتد و گسستگی های موضعی)، مدلسازی سه بعدی به روش محیط پیوسته معادل انجام شده است. مدل عددی شامل تونل و روباره آن و سیستم نگهداری شامل کابل کشی می باشد. در این مطالعه، به منظور ارزیابی مستقل اثر آرایش کابل های کششی، سایر سیستم های نگهداری نظیر شاتکریت و قاب فولادی در مدل عددی لحاظ نشده اند. این رویکرد امکان تحلیل خالص اثر کابل های کششی و مقایسه مستقیم بین آرایش های مختلف را فراهم می سازد. بدیهی است که در شرایط واقعی و در طراحی اجرایی، سیستم نگهداری ترکیبی شامل کابل کششی به همراه سایر عناصر نگهدارنده مورد استفاده قرار می گیرد که انتخاب و بهینه سازی آن می تواند بر اساس نتایج این پژوهش انجام شود. همچنین، در راستای اقتصادی تر شدن طرح، بهینه سازی در تعداد و آرایش کابل های کششی مورد توجه قرار گرفته است.

۱-۲- ساخت مدل

از پارامترهای موثر در ساخت مدل، شکل هندسی و ابعاد مقطع تونل می باشد، که در این پژوهش تونلی با مقطع دایره ای با شعاع ۵ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل عددی به گونه ای برگزیده شد تا رفتار مرزهای مدل کمترین تاثیر را در نتایج داشته باشند به همین علت مرزهای جانبی مدل بایستی به اندازه ای از منطقه اعمال بار فاصله داشته باشند تا تغییر محسوسی از نظر تنش و کرنش در المانهای مرزی به وجود نیاید و تغییر شکل ها در این المان ها قابل

شده در تونل (به ویژه سقف) از جابجایی مجاز کمتر باشد. میزان کرنش و جابجایی مجاز بر اساس معیار ساکورائی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- میزان کرنش و جابجایی مجاز بر اساس معیار ساکورائی

معدل الاستیسیته ($\frac{Kgf}{cm^2}$)	کرنش مجاز سطح یک (ϵ_c)	حداکثر میزان جابجایی (cm)
۱۰۲۰۰/۵۳	۰/۰۱۴	۷

۲-۲- نصب سیستم نگهداری

برای نگهداری فضای حفر شده در این پژوهش همانطور که پیش تر ذکر شده است از پیچسنگ با الگوهای متفاوت به عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است. مشخصات مربوط به پیچسنگ در جدول ۴ آورده شده است. برای بررسی پایداری مدل های انتخابی، از الگوهای مرسوم نصب پیچسنگ استفاده شده، تا میزان جابجایی ها، از میزان جابجایی بحرانی به دست آمده از رابطه ساکورایی کمتر شده و تونل به پایداری اولیه برسد. سپس با بکار گیری الگوهای پیشنهادی پیچسنگ های پیچشی- الگوی پیچسنگ های کوتاه و بلند- الگوی ترکیبی (پیچشی- کوتاه و بلند) به بررسی تاثیر این الگوها در کاهش میزان مصرف پیچسنگ با افزایش گام نصب پیچسنگ نسبت به روش معمول که در مرحله اولیه مدلسازی شده پرداخته شده است. برای این مهم از دو عامل جابجایی مجاز ساکورایی و میزان تنش مجاز در پیچسنگ، برای بررسی تاثیر این الگوها استفاده شده است. در شکل ۲ الگوی مرسوم نصب کابل که در آن المان های نگهداری فاصله منظم و یکسانی را دارند مشاهده می گردد.

جدول ۴- مشخصات کابل تزریقی مورد استفاده

مشخصات	مقدار
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۰
مساحت مقطع (mm^2)	۸۰۴/۳
مقاومت تسلیم (MPa)	۴۰۰
ظرفیت کششی دوغاب (MPa)	۲/۳۲۲
سختی دوغاب (MPa)	۵۶۰
مقاومت دوغاب (MPa)	۱

مدول بالک (GPa)	۰/۸۳
زاویه ی اصطکاک داخلی (درجه)	۲۷
چسبندگی (MPa)	۰/۱
RMR	۱۰

تنش های اولیه عمودی و افقی بر اساس وزن مخصوص و عمق ۱۰۰ متری حفر تونل نسبت به سطح زمین مطابق جدول ۲ اعمال شده است.

جدول ۲- مقادیر تنش های اعمالی اولیه بر مدل

تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	تنش وارده بر مرکز مدل (MPa)
۱/۸۳۷۵	۱/۸۳۷۵	۲/۶۲۵

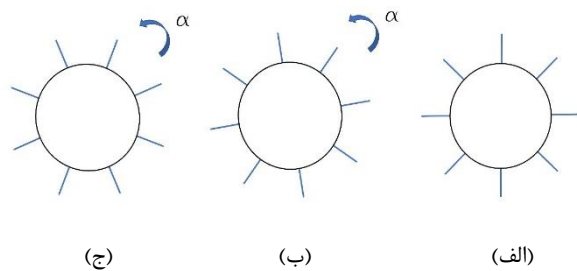
برای کنترل پایداری از روش کرنش مجاز استفاده می گردد. ساکورائی در سال ۱۹۸۶ روشی را برای ارزیابی پایداری سازه های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایش های فشاری تک محوره بر روی سنگهای مختلف تعریف می شود. این روش اغلب به عنوان روشی متداول برای محاسبه همگرایی (جابجایی نسبی دیواره های تونل) استفاده می شود که در طی بررسی تونل های مختلف به دست آمده است. ساکورائی و همکاران علاوه بر روابطی که بین مقاومت تک محوره و کرنش بحرانی برای توده سنگ های مختلف بیان کرده اند. روابط ۱ تا ۳ را نیز بر مبنای مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی ارائه کرده اند. همانطور که مشاهده می شود، روابط ۱ تا ۳ نشان دهنده حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی است. رابطه ۲ نیز مقدار لگاریتمی متوسط روابط ۱ تا ۳ است.

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (1)$$

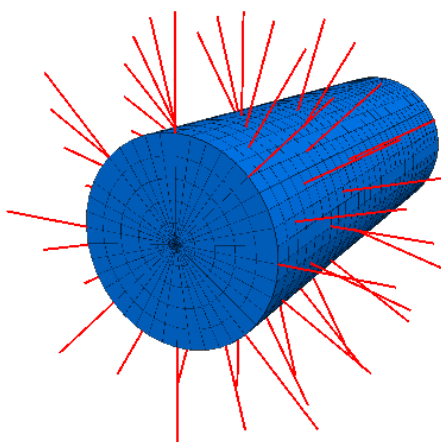
$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (2)$$

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (3)$$

رابطه ۱ تراز هشدار خطر اول، رابطه ۲ تراز هشدار خطر دوم و رابطه ۳ تراز هشدار سوم می باشد. در این روابط ϵ_c کرنش بحرانی و E مدول الاستیسیته بر حسب $\frac{Kgf}{cm^2}$ است. ساکورائی و همکاران، تراز هشدار دوم را به عنوان مبنا برای طراحی سیستم های نگهداری تونل های مهندسی پیشنهاد نموده اند. شرط پایداری فضای حفاری این است که جابجایی ایجاد



شکل ۴ - نحوه نصب کابل در آرایش پیچشی با زاویه گردش α در جهت پادساعتگرد (الف) مرحله اول کابل گذاری (ب) گام دوم کابل گذاری، (ج) گام سوم کابل گذاری

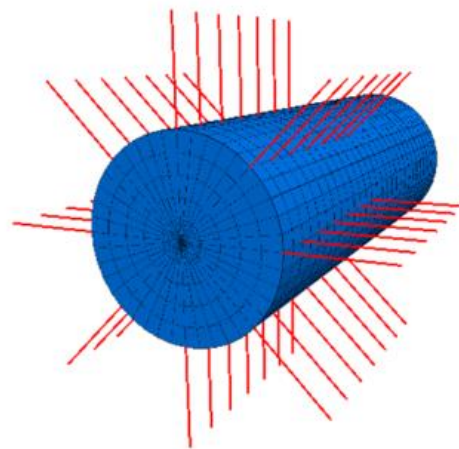


شکل ۵ - الگوی پیچشی پیاده سازی کابل

الگوی نصب کابل با آرایش ترکیبی که خود ترکیبی از روش‌های قبل بوده، ضمن اینکه کابل‌های کوتاه و بلند انتخاب شده، الگو با توجه به زاویه نصب کابل‌ها، با زاویه‌ای خاص گردش می‌کند در شکل ۶ این الگو نمایش داده شده است.

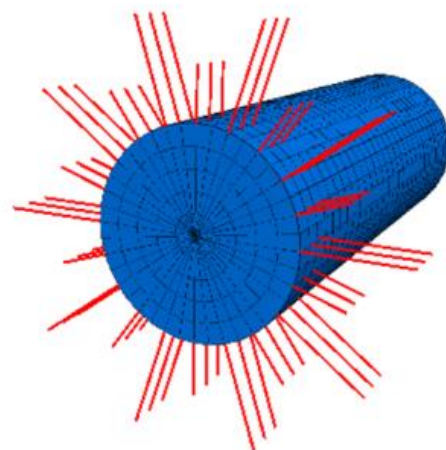
به طور کلی هرچه مقاومت پیچ‌سنگ بیشتر باشد پیچ‌سنگ قویتر است ولی مقاومت خیلی زیاد هم از سویی مناسب نیست، زیرا اگر پیچ‌سنگ تحت کشش فوق العاده زیاد بشکند، با سرعت زیادی از چال به بیرون پرتاب می‌شود و ممکن است خطراتی را به همراه داشته باشد، بنابراین توصیه می‌شود که نیروی کششی وارد بر پیچ‌سنگ بیش از ۶۰ درصد بار تسلیم پیچ‌سنگ نباشد [۴۴]. از این رو در این پژوهش نیز تنش مجاز ۶۰ درصد تنش تسلیم در نظر گرفته شده است.

پیش کشش در کابل (MPa) ۱۰



شکل ۲ - الگوی مرسوم پیاده سازی کابل

همچنین در شکل ۳ الگوی کابل‌های کوتاه و بلند که به صورت یکی در میان به اندازه درصدی از نسبت کابل بلندتر انتخاب و نصب می‌گردند، قابل مشاهده است. در طرح الگوی کابل‌های پیچشی در هر گام از نصب شبکه کابل، کابل‌ها به جای نصب در یک شبکه منظم با زاویه‌ای مشخص نسبت به کابل قبلی، نصب می‌شود (شکل ۴). در شکل ۵ الگوی پیچشی نصب کابل به صورت سه بعدی بر روی دیواره تونل به نمایش در آمده است.



شکل ۳ - الگو کوتاه و بلند پیاده سازی کابل

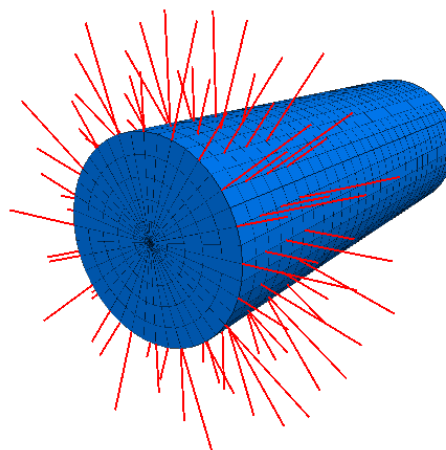
۱-۳- مدل منظم و متداول کابل کششی

همانطور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل ساخته شده را بدون نصب هرگونه نگهداری نشان می‌دهد. بیشینه جابجایی در این مدل برابر با ۱۵/۵ سانتی متر بوده و زون تاثیر و ناحیه پلاستیک حول تونل در قسمت ب ارائه شده است. با توجه به معیار ساکورایی و گسترش زیاد زون پلاستیک ناپایداری تونل مشهود است.

همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل شبیه سازی شده مربوط به سناریوی شماره ۴ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۱×۱ که چگال ترین الگوی انتخابی بوده را، نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵/۵ سانتیمتر به ۳/۱۶ سانتیمتر کاهش داده که مقدار قابل توجهی بوده که کمتر از تراز دوم هشدار ساکورایی است، همچنین ناحیه تاثیر اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه ای (به طور تقریبی ۸۷ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). میزان ضریب ایمنی در این مدل برابر با ۲/۴۸ می‌باشد.

همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۷ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۱,۵×۱,۵ را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵/۵ سانتی متر به ۶/۱۲ سانتی متر کاهش یافته که این مقدار کمتر از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورایی در این مدل می‌باشد. ناحیه تاثیر اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه ای نسبت به مدل بدون نگهداری (به طور تقریبی ۷۷/۷ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). ضریب ایمنی به دست آمده برای این مدل برابر با ۲/۷۱ می‌باشد.

در نهایت شکل ۱۰ قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۱۳ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۲,۵×۲,۵ که غیرچگال ترین شبکه است را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵/۵ سانتیمتر به ۹/۳۷ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورایی در این مدل عبور کرده است. اگر چه ناحیه تاثیر اطراف تونل نسبت به مدل اولیه کاهش یافته است ولی وسعت آن از دو مدل قبلی که با نگهداریهای چگال‌تری نصب شده‌اند بیشتر می‌باشد (قسمت ب).



شکل ۶- الگوی ترکیبی پیاده سازی پیچ سنگ های پیچشی و یکی در میان کوتاه و بلند بر روی دیواره تونل

در این مطالعه به منظور بررسی اثر طول پیچ‌سنگ، دو طول (l) ۵ متری و ۷,۵ متری برای پیچ‌سنگ‌ها در نظر گرفته شده است. به منظور طراحی آرایش های متفاوت، فاصله پیچ‌سنگ‌ها در راستای طول تونل یا گام نصب پیچ‌سنگ (s)، برابر چهار مقدار ۱ و ۱/۵ و ۲ و ۲/۵ در نظر گرفته شده است. همچنین فواصل پیچ‌سنگ‌ها در جهت محیط تونل دایره‌ای چهار مقدار متفاوت در نظر گرفته شده است. بدین صورت که با در نظر گرفتن محیط ۳۰ متری برای تونل، چهار الگوی با فواصل ۱ متر (با زاویه ۱۲ درجه نسبت به مرکز تونل) ۱,۵ متر (زاویه ۱۸ درجه)، ۲ متر (زاویه ۲۴ درجه) و ۲,۵ متر (زاویه ۳۰ درجه) بر روی محیط تونل نصب شده‌اند که تعداد پیچ‌سنگ‌ها در محیط تونل (d) در هر حالت به ترتیب ۱۲ و ۱۵ و ۲۰ و ۳۰ پیچ‌سنگ می‌باشد. در جدول ۵ سناریوهای مختلف برای پیاده سازی الگوی مرسوم پیچ‌سنگ تعریف شده‌اند. در نتیجه چگالی شبکه های به دست آمده برای شبیه‌سازی از ۱×۱ تا ۲×۲ متفاوت می‌باشد.

۳- نتایج

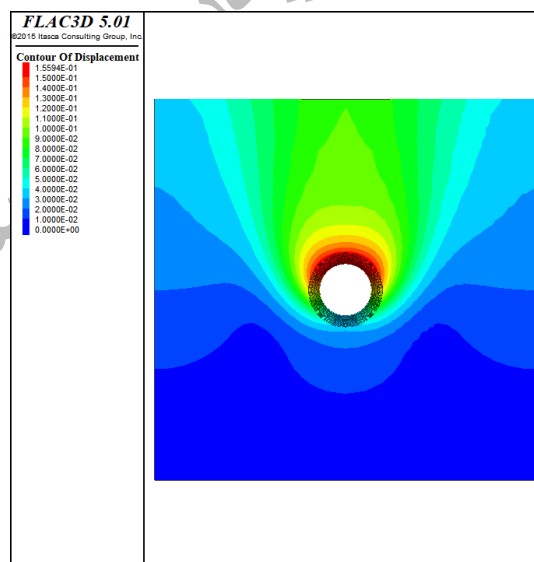
در ابتدای این بخش ابتدا برای حالت متداول و منظم اجرای کابل نتایج گزارش می‌گردد سپس تاثیر آرایش کوتاه و بلند با دو حالت متفاوت کابل های نصب شده ارائه خواهد گردید و سپس حالت بهینه معرفی می‌گردد.

جدول ۵- شماره سناریوهای مختلف طراحی الگوی مرسوم کابل

تعداد کابل نصب شده بر روی محیط تونل (d)				گام نصب کابل (s)	طول کابل (متر)
۳۰	۲۰	۱۵	۱۲	(متر)	
۴	۳	۲	۱	۱	۵
۸	۷	۶	۵	۱/۵	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۲	
۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۲/۵	
۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱	۷/۵
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۱/۵	
۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲	
۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲/۵	



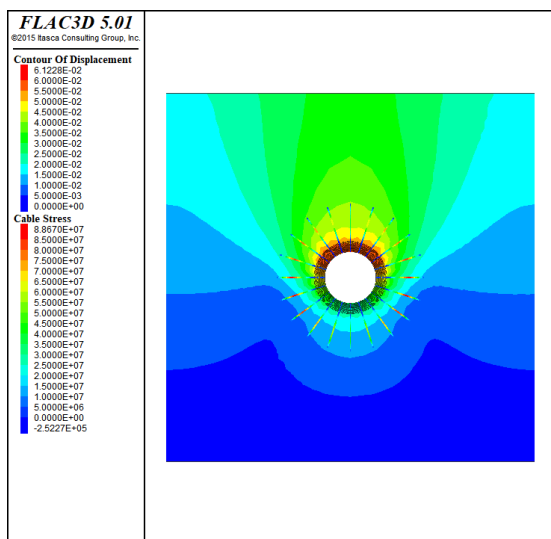
(ب)



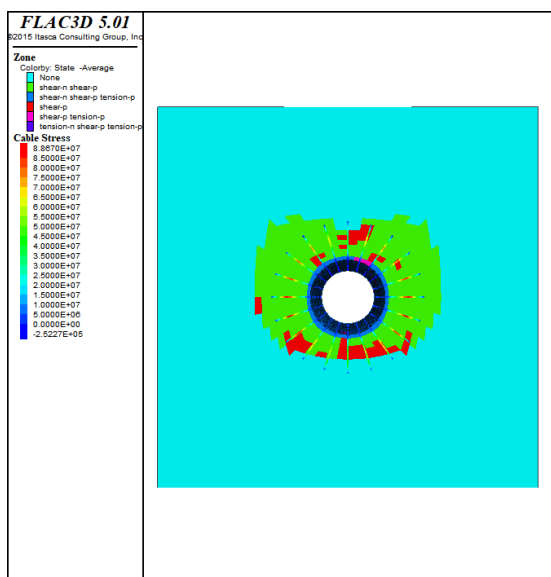
(الف)

شکل ۷- مدل شبیه سازی شده بدون نصب نگهداری (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

کاهش یافته است (قسمت ب). میزان ضریب ایمنی در این مدل برابر با ۲/۱۲ می باشد.

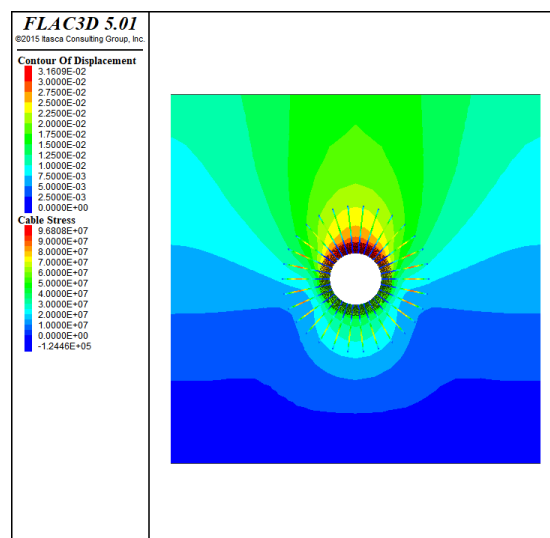


(الف)

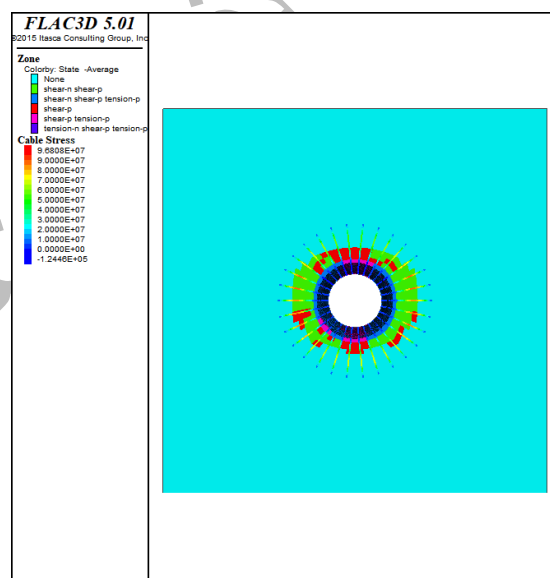


(ب)

شکل ۹ - مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۷ با نصب پیچسنگ ۵ متری با الگوی ۱/۵×۱/۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل



(الف)

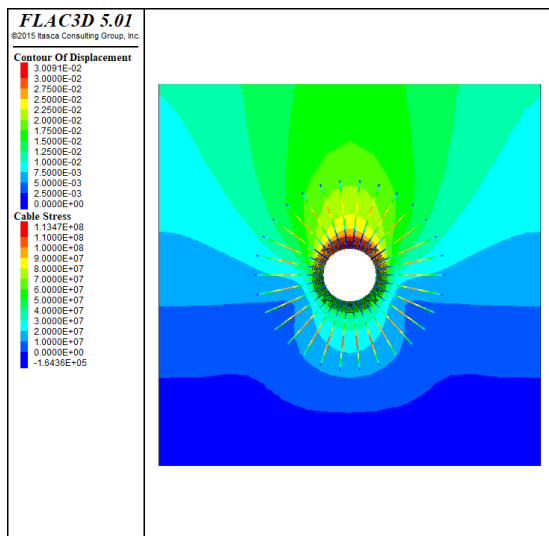


(ب)

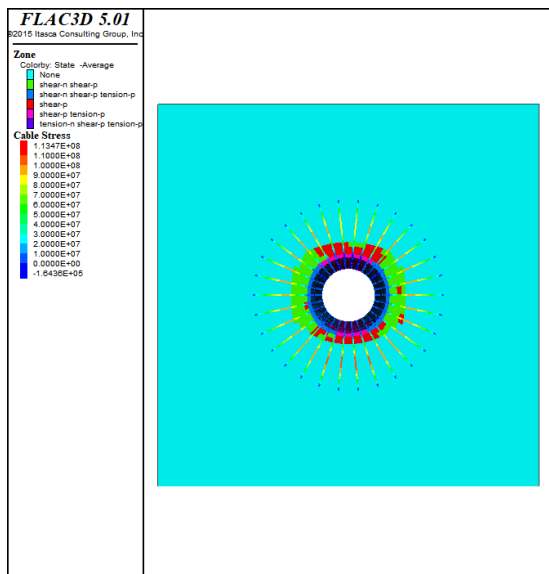
شکل ۸ - مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۴ با نصب پیچسنگ ۵ متری با الگوی ۱×۱ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

شکل ۱۱ قسمت الف مدل شبیه سازی شده مربوط به سناریوی شماره ۲۰ با نصب پیچسنگ ۷/۵ متری با الگوی ۱×۱ که چگالتین الگوی انتخابی است را نمایش می دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵/۵ سانتیمتر به ۳ سانتیمتر کاهش یافته که مقدار قابل توجهی بوده و کمتر از تراز دوم هشدار ساکورایی است، همچنین ناحیه تاثیر اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه ای (به طور تقریبی ۸۸/۹ درصد)

است (قسمت ب). ضریب ایمنی به دست آمده برای این مدل برابر با ۱/۵۹ می باشد.



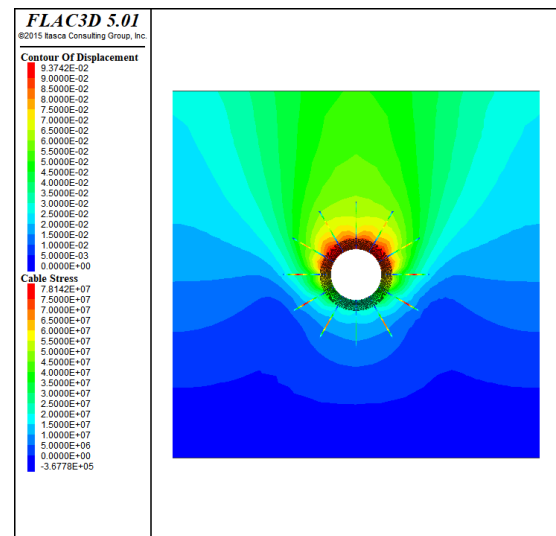
(الف)



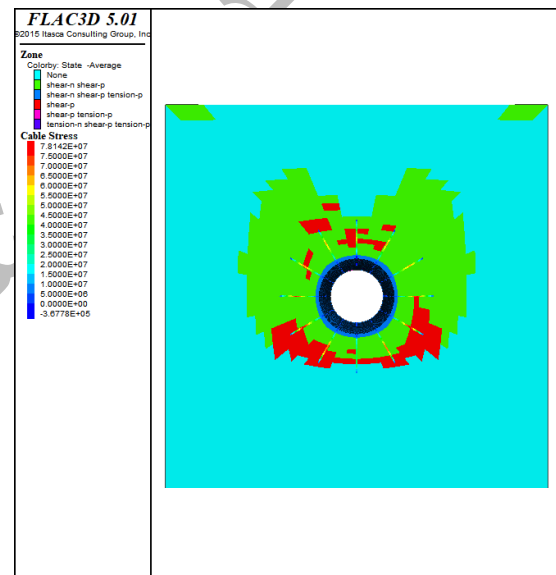
(ب)

شکل ۱۱ - مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۲۰ با نصب پیچ سنگ ۷/۵ متری با الگوی ۱×۱ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

در نهایت شکل ۱۳ در قسمت الف مدل شبیه سازی شده سناریوی ۲۹ با نصب پیچ سنگ ۵ متری با الگوی ۲/۵×۲/۵ که غیرچگال ترین شبکه است را نمایش می دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵/۵ سانتیمتر به ۸/۱۲ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار از حد آستانه هشدار برای تراز اول



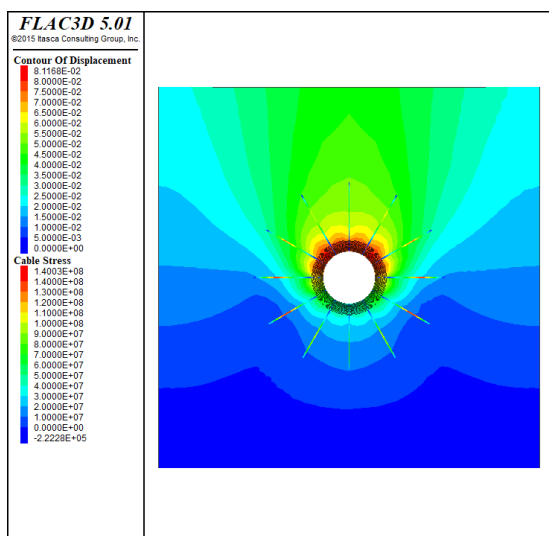
(الف)



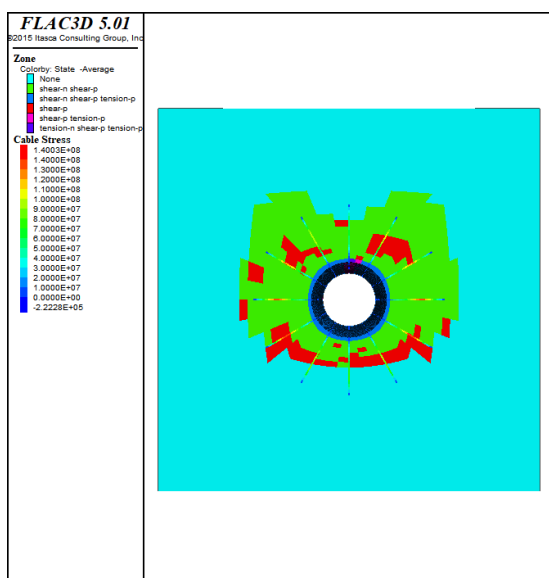
(ب)

شکل ۱۰ - مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۱۳ با نصب پیچ سنگ ۵ متری با الگوی ۲/۵×۲/۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

شکل ۱۲ قسمت الف مدل شبیه سازی شده سناریوی ۲۲ با نصب پیچ سنگ ۷/۵ با الگوی ۱/۵×۱/۵ را نمایش می دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵/۵ سانتیمتر به ۵/۷۵ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار کمتر از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورائی در این مدل می باشد. ناحیه تاثیر اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه ای نسبت به مدل بدون نگهداری (به طور تقریبی ۵۹/۶ درصد) کاهش یافته



(الف)

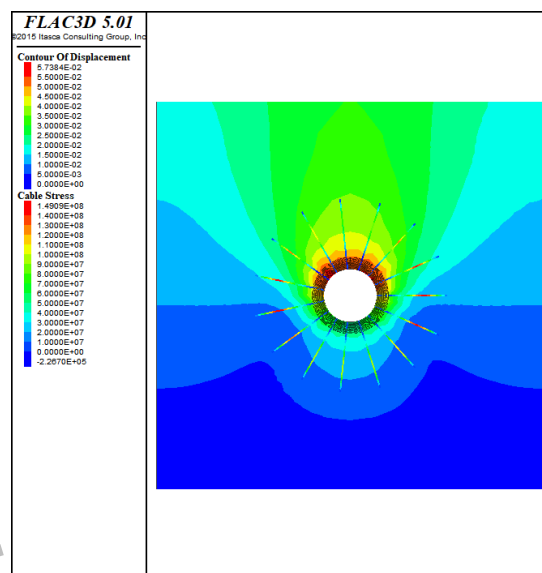


(ب)

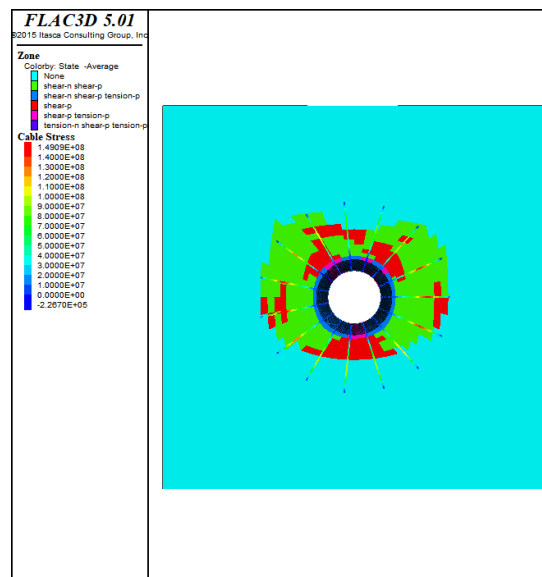
شکل ۱۳ - مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۲۹ با نصب پیچ سنگ با الگوی ۲/۵×۲/۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

پس از مدلسازی در فضای نرم افزار FLAC 3D نتایج حاصله برای گروهی که به طور منظم و متناوب نصب شده اند را می توان در جدول ۶ مشاهده نمود. در این جدول میزان جابجایی های اتفاق افتاده برای هر حالت گزارش شده است. در ادامه نمودارهای مختلف مربوط به میزان جابجایی (شکل های ۱۴ و ۱۵)، مساحت ناحیه تأثیر (شکل های ۱۶ و ۱۷) و طول کل پیچ سنگ مصرفی (شکل های ۱۸ و ۱۹) آورده شده است.

ساکورائی در این مدل عبور کرده است. اگر چه ناحیه تاثیر اطراف تونل نسبت به مدل اولیه کاهش یافته است ولی وسعت آن از دو مدل قبلی که با نگهداری های چگالتری نصب شده اند بیشتر می باشد (قسمت ب). ضریب ایمنی برای این مدل مقدار ۱/۷۱ محاسبه شده است.

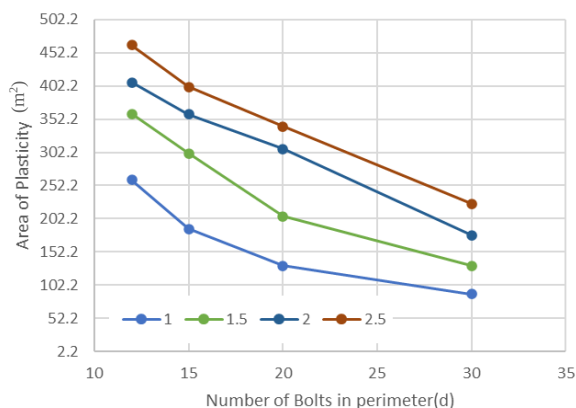


(الف)

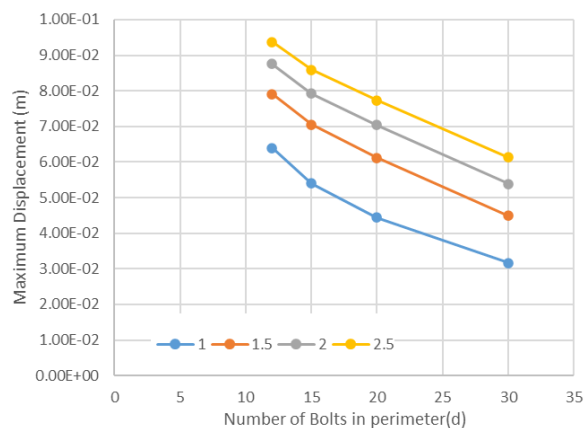


(ب)

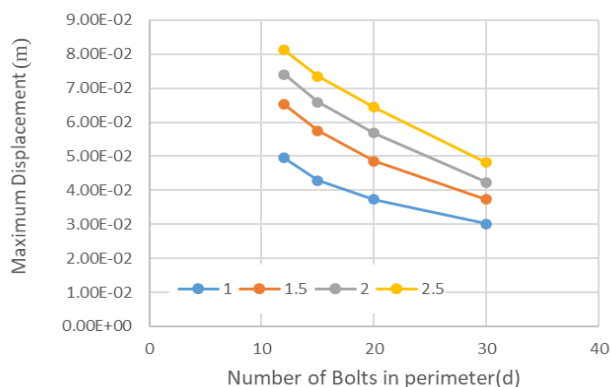
شکل ۱۲ - مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۲۲ با نصب پیچ سنگ ۷/۵ با الگوی ۱/۵×۱/۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۱۶ - نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول (s)



شکل ۱۴ - نمودار بیشترین میزان جابجایی نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول تونل (s)



شکل ۱۵ - نمودار بیشترین میزان جابجایی نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۷/۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول تونل (s)

جدول ۶- میزان جابجایی ناشی از حالات مختلف طراحی شده برای کابل منظم

جابجایی (سانتی متر)				گام نصب کابل (s) (متر)	طول کابل (متر)
تعداد کابل نصب شده بر روی محیط تونل (d)					
۳۰	۲۰	۱۵	۱۲		
۳/۱۶	۴/۴۴	۵/۴	۶/۴	۱	۵
۴/۴۹	۶/۱۲	۷/۰۶	۷/۹۱	۱/۵	
۵/۳۹	۷/۰۴	۷/۹۲	۸/۷۶	۲	
۶/۱۴	۷/۷۳	۸/۵۹	۹/۳۷	۲/۵	
۳/۰۱	۳/۷۳	۴/۲۹	۴/۹۶	۱	۷/۵
۳/۷۳	۴/۸۶	۵/۷۵	۶/۵۳	۱/۵	
۴/۲۳	۵/۶۹	۶/۶۰	۷/۴	۲	
۴/۸۲	۶/۴۴	۷/۳۵	۸/۱۲	۲/۵	

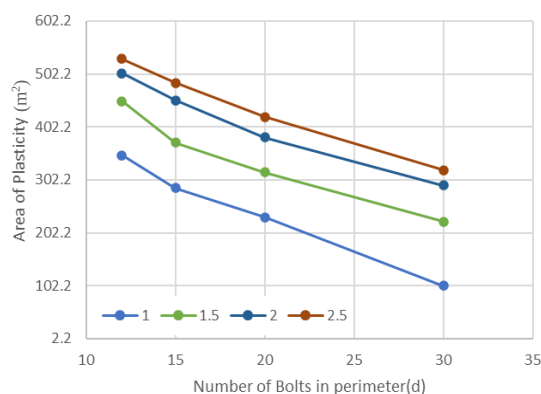
با توجه به آنالیز انجام شده برای انتخاب شبکه بهینه پیچ‌سنگ گذاری، شبکه $1/5 \times 1/5$ برای زمینی با خصوصیات مذکور جهت پایداری انتخاب شده است. میزان پیچ‌سنگ مصرفی برای این الگو با توجه به طول تونل که برابر ۲۸ متر بوده که شامل ۱۹ گام نصب در آن خواهد بود و در هر گام تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ ۵ متری نصب شده، که در مجموع طول پیچ‌سنگ مصرفی برابر با ۱۹۰۰ متر است. حال برای بررسی میزان تاثیر طرح‌های پیچشی، طرح‌های کوتاه-بلند و طرح‌های ترکیبی به صورت مجزا برای هر طرح، مدل‌سازی‌های مجزا با ابعاد شبکه متفاوت و الگوی خاص انجام شده تا شبکه بهینه به دست آمده و تاثیر طرح‌های مذکور در کاهش میزان مصرفی پیچ‌سنگ برآورد شود. هر طرح با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل (مطابق با الگوی به دست آمده از شبیه سازی اولیه) مدل شده و بعد از آن اقدام به افزایش یا کاهش گام نصب پیچ‌سنگ در راستای تونل برای حصول نتیجه مطلوب گردیده است.

۳-۲- تحلیل اثر آرایش کوتاه و بلند

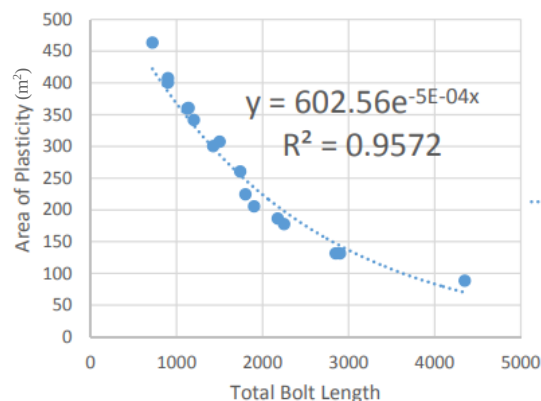
۳-۲-۱- آرایش کوتاه و بلند با کابل های ۵ و ۷/۵ متری

در ادامه برای بررسی پایداری فضا، با طرح پیچ‌سنگ‌های کوتاه- بلند، پیچ‌سنگ‌های کوتاه ۵ متر و پیچ‌سنگ‌های بلند ۷/۵ متر، جهت مدل‌سازی انتخاب شده است. شبیه سازی اولیه با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل و با طول گام ۱ متر انجام شده که میزان جابجایی به مقدار ۵/۵ سانتی متر رسیده است، که از حد مجاز ساکورایی کمتر است. نتایج کانتورهای جابجایی اطراف تونل و همچنین ناحیه تاثیر اطراف تونل در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.

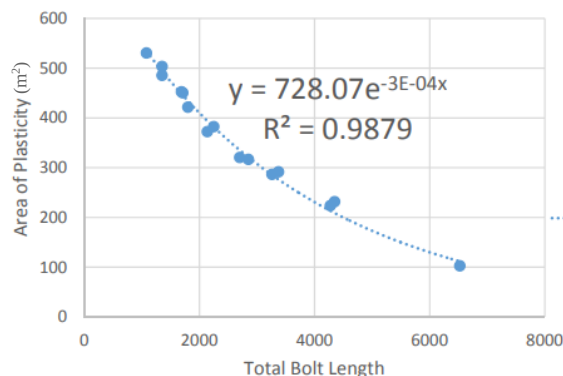
در این مرحله با افزایش طول گام برای یافتن شبکه بهینه، شبیه سازی‌های متعدد شبکه پیچ‌سنگ با گام‌های ۱/۵ و ۱/۷ و ۲ و ۲/۲ و ۲/۵ انجام شده تا با استفاده از تعداد پیچ‌سنگ کمتر مقدار جابجایی باقی مانده از مقدار حد مجاز ساکورایی (۷ سانتیمتر) فراتر نرود. مقادیر جابجایی حاصل از اعمال شبکه کوتاه-بلند ۵ و ۷/۵ متری در شکل ۲۱ آورده شده است. با توجه به این نمودار اندازه شبکه بهینه با الگوی پیچ‌سنگ کوتاه-بلند $1/5 \times 2/2$ به دست آمده است (شکل ۲۱ و ۲۲).



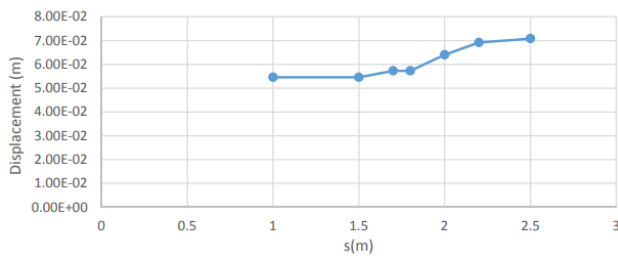
شکل ۱۷- نمودار مساحت زون تاثیر نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۷/۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول (s)



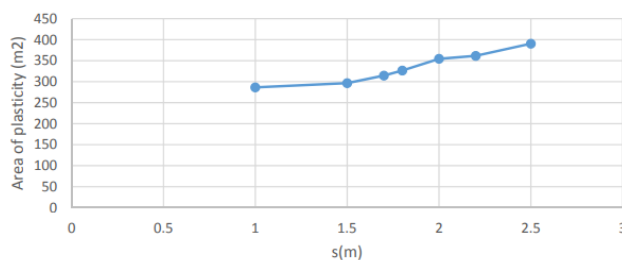
شکل ۱۸- نمودار مساحت زون تاثیر نسبت به طول کل پیچ سنگ مصرفی ۵ متری در سناریوهای مختلف



شکل ۱۹- نمودار مساحت زون تاثیر نسبت به طول کل پیچ سنگ مصرفی ۷/۵ متری در سناریوهای مختلف



شکل ۲۱ - میزان جابجایی برحسب گام نصب کابل در مدلسازی الگوی کوتاه- بلند ۵ و ۷/۵ متری با گام های مختلف نصب

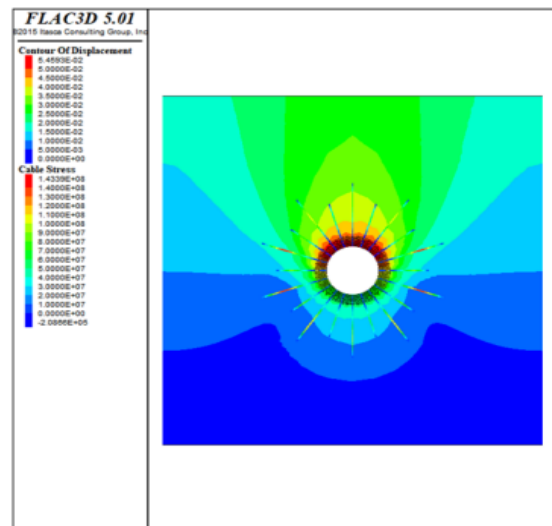


شکل ۲۲ - مساحت ناحیه پلاستیک در مدلسازی الگوی کوتاه- بلند ۵ و ۷/۵ متری با گام های مختلف نصب

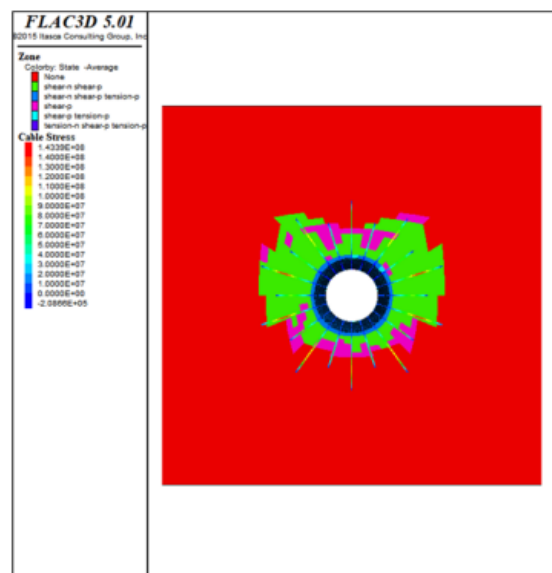
۲-۳-۲- آرایش کوتاه و بلند با کابل های ۳/۷۵ و ۵ متری در ادامه برای بررسی پایداری فضا، با طرح پیچ سنگ های کوتاه- بلند، پیچ سنگ های کوتاه ۳/۷۵ متر و پیچ سنگ های بلند ۵ متر، جهت مدل سازی انتخاب شده است. شبیه سازی اولیه با تعداد ۲۰ پیچ سنگ در محیط تونل و با طول گام ۱ متر انجام شده که میزان جابجایی به مقدار ۶/۷ سانتیمتر رسیده است، که کمتر از حد مجاز ساکورایی می باشد. شکل ۲۳ نتایج کانتورهای جابجایی و ناحیه تاثیر اطراف تونل را نمایش می دهند.

در این مرحله با افزایش طول گام برای یافتن شبکه بهینه، شبیه سازی های متعدد شبکه پیچ سنگ گام های ۱/۵ و ۱/۷ و ۱/۸ و ۲ و ۲/۲ و ۲/۵ انجام شده تا با استفاده از تعداد پیچ سنگ کمتر مقدار جابجایی باقیمانده از مقدار حد مجاز ساکورایی (۷ سانتیمتر) فراتر نرود. اندازه شبکه بهینه با الگوی پیچ سنگ کوتاه- بلند ۱/۷×۱/۵ به دست آمده است (شکل ۲۴ و ۲۵) تعداد گام نصب پیچ سنگ در این مدل برابر ۱۶ بوده که با توجه به الگوی مصرفی پیچ سنگ در هر گام که برابر با ۸۷/۵ متر می باشد (۱۰ پیچ سنگ ۳/۷۵ متری و ۱۰ پیچ سنگ ۵ متری) صرفه جوئی پیچ سنگ در این الگو

تعداد گام نصب پیچ سنگ در این مدل برابر ۱۳ بوده که با توجه به الگوی مصرفی پیچ سنگ در هر گام که برابر با ۱۲۵ متر می باشد (۱۰ پیچ سنگ ۷/۵ متری و ۱۰ پیچ سنگ ۵ متری) صرفه جوئی پیچ سنگ در این الگو برابر با ۱۷۵ متر در ۲۸ متر بوده، که برابر با ۱۰ درصد پیچ سنگ مصرفی نسبت به الگوی مرسوم می باشد.



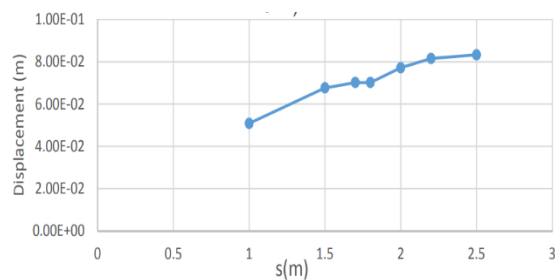
(الف)



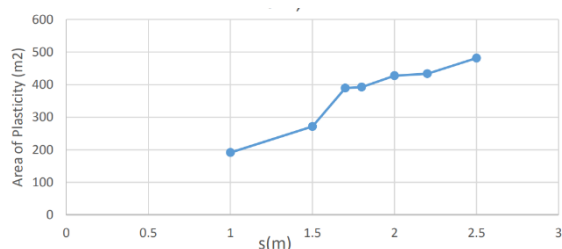
(ب)

شکل ۲۰ - مدلسازی الگوی کوتاه- بلند با پیچ سنگ های به طول ۵ و ۷/۵ متر با فاصله شعاعی ۱/۵ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

تونل و زاویه پیچش ۶ درجه در هر گام مدلسازی انجام شده است.



شکل ۲۴- میزان جابجایی بر حسب گام نصب کابل



شکل ۲۵- مساحت ناحیه پلاستیک در مدلسازی الگوی کوتاه- بلند ۳/۷۵ و ۵ متری با گام‌های مختلف نصب



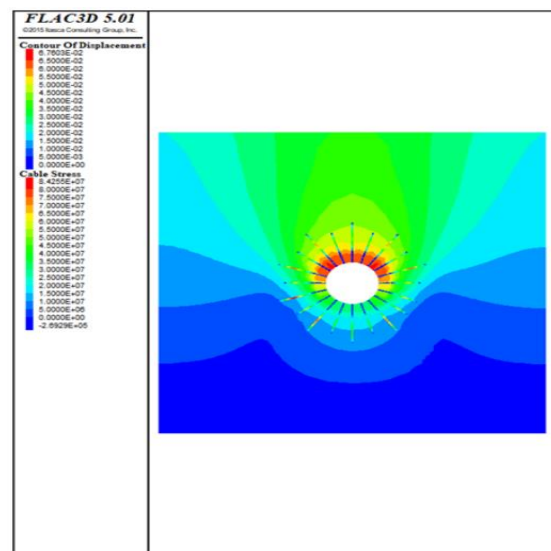
شکل ۲۶- نحوه نصب و گردش کابل در هر گام با زاویه ۶ درجه

مدلسازی آرایش پیچشی برای کابل با طول ۵ متر برای گام‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر انجام گرفت. در این حالت تنها یک مقدار برای فاصله کابل‌ها در محیط تونل (d) در نظر گرفته شد و به عبارت دیگر تنها حالتی که تعداد کابل‌ها در محیط تونل ۲۰ عدد بوده است مورد مدلسازی قرار گرفته است. در ادامه نتایج مربوط به پیاده‌سازی الگوهای مختلف آورده شده است.

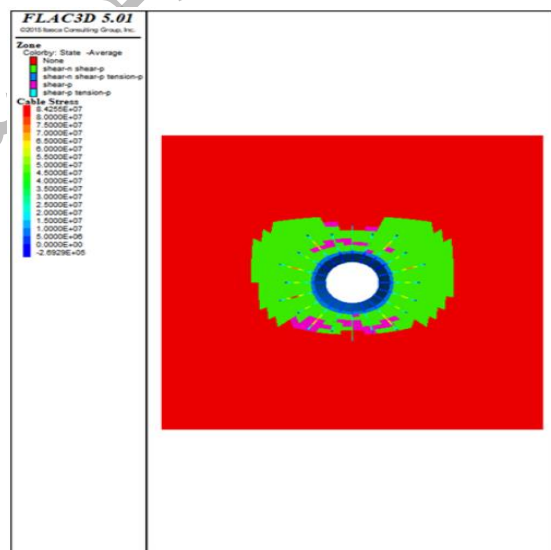
با توجه به شکل ۲۷ مشاهده می‌شود که میزان جابجایی از ۷ سانتیمتر به ۴ سانتیمتر کاهش یافته، که بیانگر کارایی الگوی پیچشی بر میزان پایداری فضا و کاهش میزان جابجایی است.

مدلسازی آرایش پیچشی برای کابل با طول ۷/۵ متر برای گام‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر انجام گرفت. در این حالت

برابر با ۱۰۰ متر در ۲۸ متر بوده، که برابر با ۶ درصد پیچ‌سنگ مصرفی نسبت به الگوی مرسوم می‌باشد.



(الف)

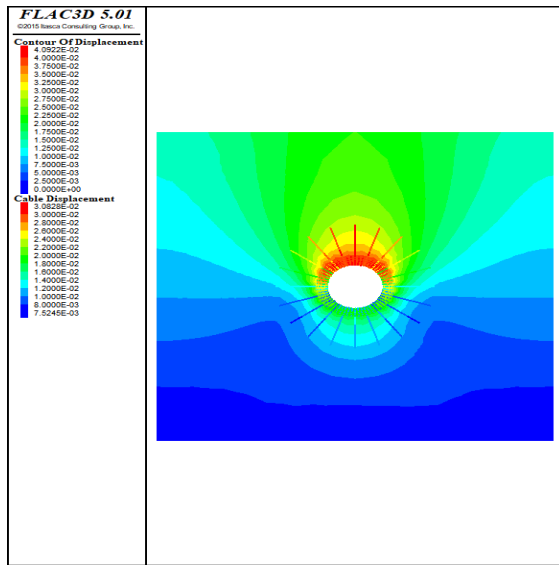


(ب)

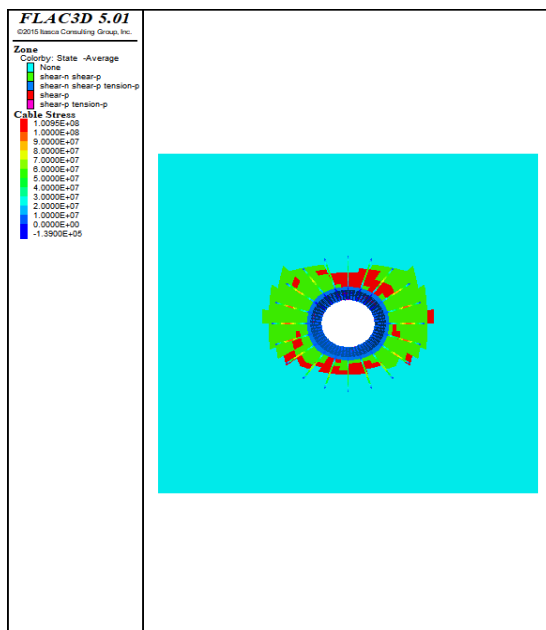
شکل ۲۳- مدلسازی الگوی کوتاه- بلند با پیچ سنگ‌های به طول ۳/۷۵ و ۵ متر با فاصله شعاعی ۱/۵ متر و ۱ متر در عمق، الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

۳-۳ تحلیل آرایش پیچشی

دومین طرح انتخابی برای پیاده‌سازی کابل‌ها در محیط تونل، طرح پیچشی است. همانطور که در شکل ۲۶ قابل مشاهده است. در گام نخست برای طرح پیچشی با فاصله ۱/۵ متر بر روی محیط تونل، طول گام دو متر در راستای



(الف)



(ب)

شکل ۲۷- مدلسازی الگوی پیچشی با پیچ سنگ به طول ۵ متر با فاصله شعاعی ۱/۵ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

تنها یک مقدار برای فاصله کابل ها در محیط تونل (d) در نظر گرفته شد و به عبارت دیگر تنها حالتی که تعداد کابل ها در محیط تونل ۲۰ عدد بوده است مورد مدلسازی قرار گرفته است. در ادامه نتایج مربوط به پیاده سازی الگوهای مختلف آورده شده است.

شکل ۲۸ نشان می دهد که میزان جابجایی از ۷ سانتیمتر به ۳/۵ سانتیمتر کاهش یافته، که بیانگر کارایی الگوی پیچشی بر میزان پایداری فضا و کاهش میزان جابجایی است. در راستای افزایش گام نصب با استفاده از شبکه پیچشی، تا آنجاکه جابجایی تونل از ۷ سانتیمتر تجاوز نکند، شبکه های مختلف با تغییر طول گام شبیه سازی شده تا شبکه بهینه استخراج شود.

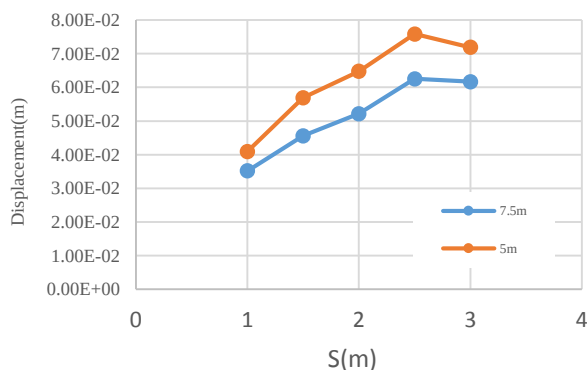
در شکل ۲۹ مقدار جابجایی ایجاد شده پس از اعمال نگهداری پیچشی با کابل های ۵ و ۷/۵ متری در گام های مختلف نگهداری آورده شده است. چنانچه مشاهده می شود برای دستیابی به جابجایی حداکثر ۷ سانتیمتر که حد مجاز تراز هشدار اول ساکورایی می باشد، الگوهای با گام ۲/۵ متری برای پیچ سنگ های ۷/۵ متری و با گام ۲ متر برای کابل ۵ متری مناسب می باشد و پیچ سنگ ۷/۵ متری جابجایی ها را به میزان بیشتری کاهش می دهد.

۳-۴ بررسی اثر تغییر خصوصیات کابل

به منظور بررسی اثر تغییر خصوصیات پیچ سنگ، دو نمونه کابل با خصوصیات متوسط و ضعیف با الگوهای منظم علاوه بر مدل های قبلی مورد مدلسازی و بررسی قرار گرفته اند. در جدول ۷ خصوصیات دو کابل استفاده شده در مدلسازی ها آورده شده است.

در شکل های ۳۰ و ۳۱ نتایج حاصل از دو نمونه از کابل های ضعیف و متوسط با طول های ۵ و ۷/۵ متر نشان داده شده است.

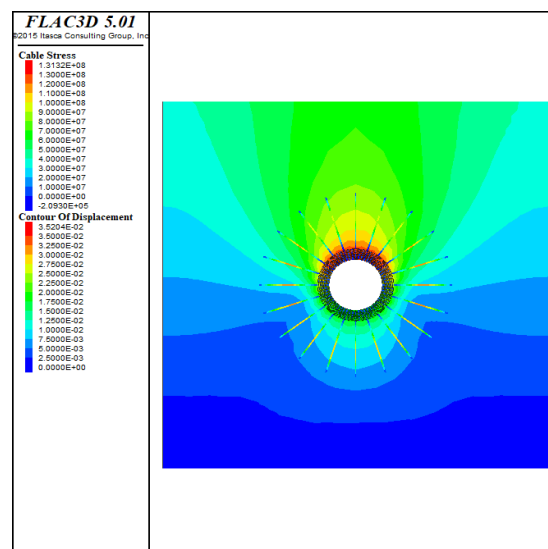
نتایج حاصل از تغییر خصوصیات پیچ سنگ با الگوهای متفاوت را می توان به صورت جامع در جدول ۸ مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می شود استفاده از کابل ضعیف با خصوصیات ذکر شده، جابجایی ها را در بیشتر الگوها به کمتر از حد مجاز ساکورایی رسانده است.



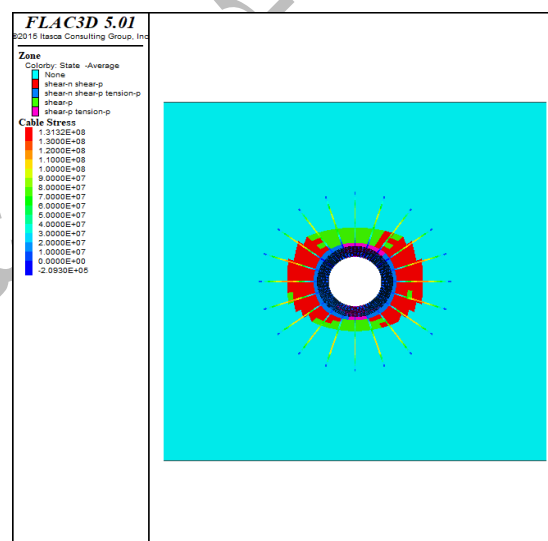
شکل ۲۹- مقایسه میزان جابجایی الگوی پیچشی با پیچ سنگ های ۵ و ۷/۵ متری در گام های مختلف

۵-۳ پیشنهاد الگوی بهینه

با توجه به نمودارهای شکل ۳۲ و ۳۳ که مربوط به مقایسه میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک در چهار الگوی منظم، پیچشی، کوتاه-بلند و ترکیبی با طول های ۵ و ۷/۵ متری با تعداد ۲۰ پیچ سنگ در محیط تونل میباشد و مقایسه آن با چهار الگوی مربوط به پیچسنگ ۵ متری شکل‌های ۳۴ و ۳۵، به نظر میرسد که الگوی پیچشی همواره کمترین میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک را به توجه به گام های نصب پیچسنگ، به همراه دارد. اما از آنجایی که الگوی ترکیبی از نظر میزان مصرف پیچسنگ و اجرا سهولت بیشتری داشته و مقرون به صرفه‌تر میباشد به عنوان الگوی بهینه تعیین می‌گردد.



(الف)



(ب)

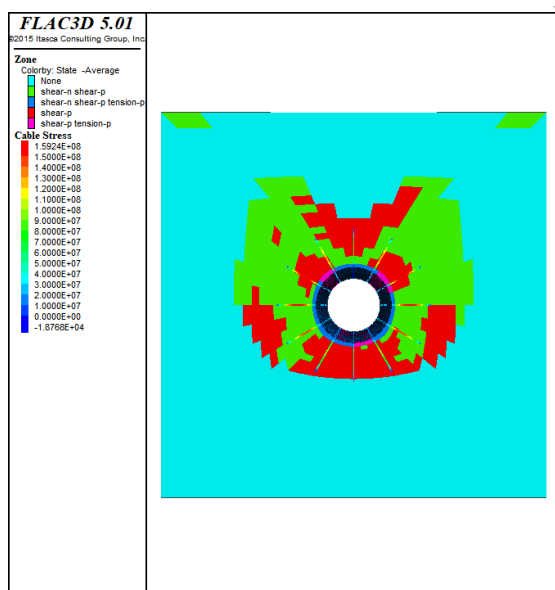
شکل ۲۸- مدلسازی الگوی پیچشی با پیچ سنگ به طول ۷/۵ متر با فاصله شعاعی ۱/۵ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

جدول ۷- خصوصیات دو پیچ سنگ متوسط و ضعیف مورد استفاده در مدلسازی

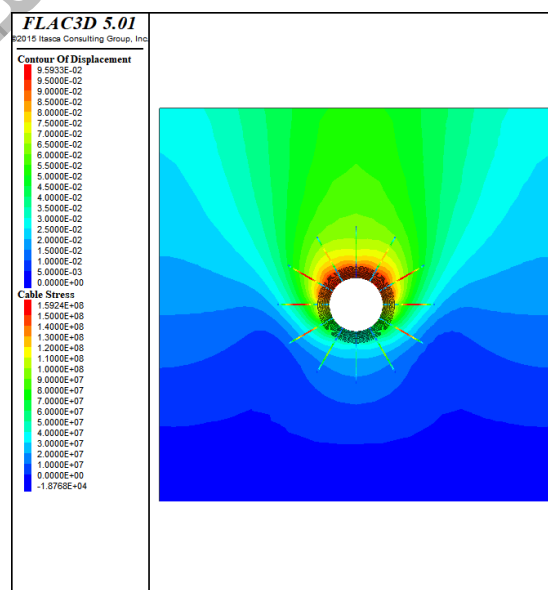
مدول الاستیسیته (GPa)	مساحت مقطع (mm ²)	مقاومت تسلیم (MPa)	ظرفیت کششی دوغاب (MN)	سختی دوغاب (MPa)	مقاومت دوغاب (MPa)	پیش کشش در کابل (MPa)	توصیف پیچ سنگ
۹۰	۵۰۵/۵	۳۰۰	-	۱۷۰	-	۵	متوسط (۲)
۴۵	۲۵۶/۵۷	۲۰۰	-	۱۰۰	-	۱	ضعیف (۳)

جدول ۸- نتایج مربوط به مدلسازی پیچ سنگ با خصوصیات متوسط و ضعیف

شماره مدل	توصیف پیچ سنگ	طول پیچ سنگ (متر)	تعداد پیچ سنگ در محیط تونل (d)	طول گام (s) (متر)	جابجایی (سانتیمتر)
۱	۲	۵	۱۲	۱/۵	۹/۵۹
۲	۲	۵	۱۵	۱	۷/۷۶
۳	۲	۵	۲۰	۲/۵	۹/۵۶
۴	۲	۷/۵	۱۲	۱/۵	۹/۱۰
۵	۲	۷/۵	۱۵	۲/۵	۹/۸۶
۶	۲	۷/۵	۲۰	۱/۵	۷/۸۳
۷	۳	۵	۱۲	۱	۵/۴۷
۸	۳	۵	۱۵	۱/۵	۶
۹	۳	۵	۲۰	۲/۵	۶/۷۲
۱۰	۳	۵	۳۰	۲	۴/۶۲
۱۱	۳	۷/۵	۱۲	۱/۵	۵/۸۳
۱۲	۳	۷/۵	۱۵	۱/۵	۵/۲۸
۱۳	۳	۷/۵	۲۰	۲/۵	۵/۷۶
۱۴	۳	۷/۵	۳۰	۱	۳/۰۴

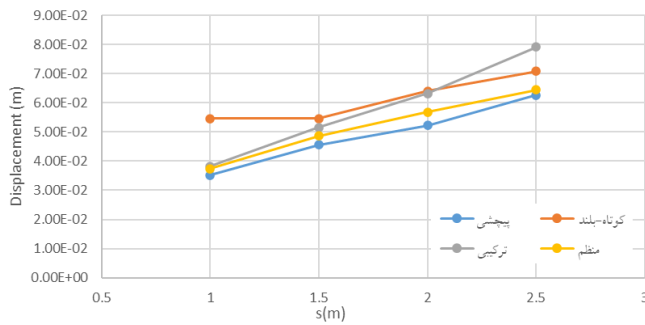


(ب)

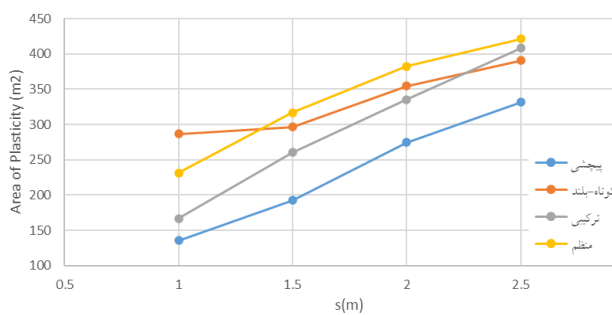


(الف)

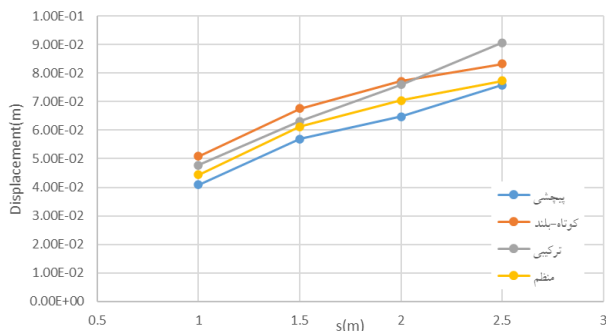
شکل ۳۰- مدلسازی الگوی منظم پیچ سنگ ۵ متر با خصوصیات متوسط فاصله شعاعی ۲/۵ متر و ۱/۵ متر در عمق (الف) کانالهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل



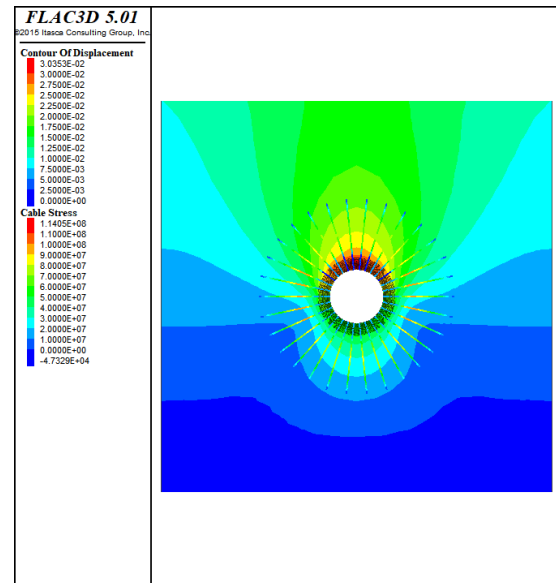
شکل ۳۲- نمودار جابجایی به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه- بلند مربوط به پیچ سنگ ۵ و ۷/۵ متری



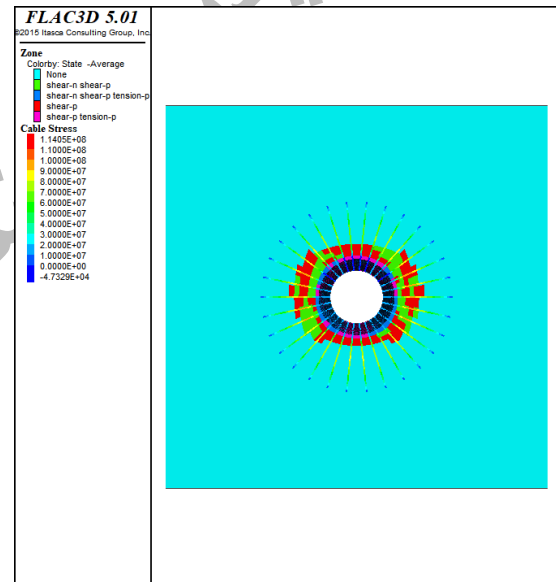
شکل ۳۳- نمودار زون پلاستیک به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه- بلند مربوط به پیچ سنگ ۵ و ۷/۵ متری



شکل ۳۴- نمودار جابجایی به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه- بلند مربوط به پیچ سنگ ۳/۷۵ و ۵ متری



(الف)



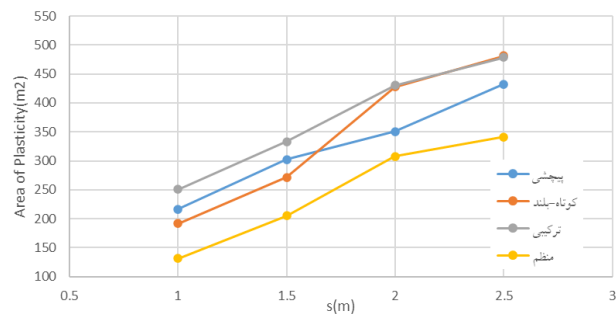
(ب)

شکل ۳۱- مدلسازی الگوی منظم پیچ سنگ ۷/۵ متر با خصوصیات ضعیف فاصله شعاعی ۱ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل

دارد. الگوی کوتاه-بلند با حفظ شرایط پایداری سازه‌ای، به دلیل سهولت اجرا و صرفه‌جویی اقتصادی به‌عنوان الگوی بهینه برای نگهداری در زمین‌های ضعیف پیشنهاد شد.

مراجع

- [1] Bagheri, M.; Jalalifar, H.; R. Rahmannejad, R., (2008), The Evaluation and Applicability of Rock Bolts in Coal Mines with regard to the Kerman Province Mines. In: Proceedings of the Aachen international symposium on Roof-bolting in Mining, March 2008. Publisher: Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen; pp 257-274.
- [2] Sanmariam Esfahani, N., Azari, A., Baghbanan, A., Hashem Al-Hosseini, H. (2023). Evaluation of optimal rock bolt arrangement for the stability of a jointed rock mass using 3D DEM-DFN method – Case study: Kolab 2 cavern. Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 13(34), 67–81. (In Persian)
- [3] Croney P. Legge T. and Dhalla A., (1978), Location of block release mechanism in tunnels from geological data and the design of associated support. Computer Methods in Tunnel Design. Institute of Civil Engineers. London, pp 97-119.
- [4] Everling G., (1964), Model test concerning the interaction of ground and roof support in gate roads. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 1, pp 319-326.
- [5] Fahimifar, A.; Soroush, H. (2004): A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses. In: Tunnelling and Underground Space Technology, 20(2004), Issue 4; Publisher: Elsevier Press; pp 333-343.
- [6] Farmer IW, Shelton PD., (1980), Factors that affect underground rockbolt reinforcement systems design. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy (1980);89:68-83.
- [7] Goodman R. E. and Shi G., (1985), Block Theory and Its Application to Rock Engineering. Englewood Cliffs, New Jersey.
- [8] Habenicht H., (1983), The anchoring effects – our present knowledge and its shortcomings – A key note lecture. Proc. of Int. Symp. on Rock Bolting, Abisko, pp 253-268.
- [9] Hobbs D. W., (1968), Scale model studies of strata movement around mine roadways. Int. J.



شکل ۳۵- نمودار زون پلاستیک به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیششی، ترکیبی، کوتاه- بلند مربوط به پیچ سنگ ۳/۷۵ و ۵ متری

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد الگوهای مختلف کابل کششی برای نگهداری فضاهای زیرزمینی در شرایط توده‌سنگ بسیار ضعیف با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FLAC3D بررسی شد. چهار الگوی مرسوم، کوتاه-بلند، پیششی و ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج به شرح زیر است:

- در حالت بدون نگهداری، جابجایی حداکثر تونل به حدود ۱۵/۵ سانتی‌متر رسید که بسیار بیشتر از حد مجاز (۷ سانتی‌متر) بوده و ناپایداری کامل سازه‌ای را نشان داد.
- در الگوی مرسوم، استفاده از کابل‌های ۵ متری با فاصله‌گذاری ۱/۵×۱/۵ متر موجب شد جابجایی حداکثر به ۶/۱ سانتی‌متر کاهش یابد و پایداری تأمین شود. در این حالت، مصرف کل کابل برای یک تونل ۲۸ متری برابر با ۱۹۰۰ متر محاسبه شد. برای طول ۷/۵ متر، این مقدار به ۵/۷ سانتی‌متر رسید.
- در الگوی کوتاه-بلند (۵ و ۷/۵ متر به صورت یکی در میان)، اندازه شبکه بهینه ۱/۵×۲/۲ بدست آمد و مصرف کابل حدود ۱۰٪ کمتر از حالت مرسوم بود. در ترکیب دیگر (۳/۷۵ و ۵ متر)، اندازه شبکه بهینه ۱/۵×۱/۷ به دست آمده و صرفه‌جویی حدود ۶٪ حاصل شد.
- در الگوی پیششی، کابل‌های ۵ و ۷/۵ متری به ترتیب با گام ۲ و ۲/۵ متری مناسب می‌باشد و پیچ سنگ ۷/۵ متری جابجایی‌ها را به میزان بیشتری کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که انتخاب صحیح الگوی کابل تأثیر مستقیم بر کاهش جابجایی و کنترل زون پلاستیک

- Oxford: Pergamon
- Rock Mech. Min. Sci. Vol. 5, pp 219-235.
- [23] Farmer IW, Shelton PD., (1980), Factors that affect underground rockbolt reinforcement systems design. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy (1980);89:68-83.
- [24] Crawford AM, Ng L, Lau KC. ,(1985), The spacing and length of rock bolts for underground openings in jointed rock. In: Einsenstein Z, editor. Proceedings of the 84 5th international conference on numerical methods in geomechanics. A.A. Balkema. pp 293-300.
- [25] Stillborg B., (1994), Professional user's handbook for rockbolting. ClausthalZellerfeld: Trans Tech Publications.
- [26] Schubert W., (2001), Recent experience with squeezing rock in Alpine tunnels. In: CUC erock support in medium to poor rock conditions.
- [27] Li CC., (2012), Design principles of rock support for underground excavations. In: Eurock 2012. Stockholm, Sweden.
- [28] Ziping, H. (2001): Stabilizing of rock cavern roofs by rockbolts. Department of geology and mineral resources engineering; Faculty of applied earth science; Norwegian University of Science and Technology; PhD thesis.
- [29] Ng C.W.W., Lee G.T.K., (2002) , A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces", Computers and Geotechnics, Vol. 29:pp 673-697 .
- [30] Fellin W., King J., Kirsch A., (2010), Oberguggenberger M., "Uncertainty modelling and sensitivity analysis of tunnel face stability", Structural Safety Vol. 32 402-410
- [31] Sakurai, Sh., 2010; "Modeling strategy for jointed rock masses reinforced by rock bolts in tunneling practice". Acta Geotechnica, Vol. 5.2, pp. 121-126.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [10] Hoek E., (1963), Experimental study of rock stress problems in deep level mining. Proc. 1st Congr. on Experimental Mechanics, New York, pp 177-193.
- [11] Hoek E. ,(2007), Model to demonstrate how bolts work. In: Practical rock engineering;.
- [12] Itasca Consulting Group, (2015), FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.1., ITASCA Consulting Group, Inc, Minneapolis, MN.
- [13] Junlu, L. (1999): A new rockbolt design criterion and knowledge expert system for stratified roof. The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Dissertation. In: website: www.eng.unsw.edu.au/faculty/publicat/2007/Eng%20Research%20Guide.pdf.
- [14] Kaiser PK, Tannant DD, McCreath DR. ,(1996), Canadian rock burst support handbook. Sudbury, Canada: Geomechanics Research Center.
- [15] Li C. C., (2017), Principles of rockbolting design, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, pp 396-414.
- [16] Kovari, K. (2004): History of rockbolt and the sprayed concrete lining method. In: Proceedings of the Aachen International symposium on Roofbolting in Mining (2004); Publisher: Wissen-schaftsverlag Mainz in Aachen; pp 39 – 85.
- [17] Rabcewicz, L. V. (1964). The new Austrian tunnelling method. Water power
- [18] Panek LA., (1964), Design for bolting stratified roof. Transactions of the Society of Mining Engineers ;229:9-13.
- [19] Coates DF, Cochrane TS. , (1970), Development of design specifications for rock bolting from research in Canadian mines. Research Report R224. Mining Research Centre, Energy, Mines and Resources Canada.
- [20] Lang T. ,(1972), Rock reinforcement. Bulletin of the International Association of Engineering Geology;9: 15-39.
- [21] Barton N, Lien R, Lunde J. ,(1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics;6(4),pp 189-239
- [22] Schach R, Garschol K, Heltzen AM., (1979), Rock bolting: a practical handbook.

- [40] Longji Guo, Zhigang Tao, Manchao He, Massimo Coli. (2024). Excavation compensation and bolt support for a deep mine drift, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 16, Issue 8, Pages 3206-3220, ISSN 1674-7755
- [41] Chenglei Du, Yong Cheng, Quansheng Liu, Zitao Cheng, Yiwei Liu, You Lu, Haitao Jiang. (2025). A new type of rockbolt model in 3D FDEM and its application to tunnel excavation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 155, Part 1, 106210, ISSN 0886-7798
- [42] Sarfarazi, V. , Zhou, L. , Haeri, H. , Salehipour, P. , Elahi, A. , Moayer, A. and Fatehi Marji, M. (2025). Failure Mechanisms of Concrete-Bolt Attachment Surface: Impact of Cable Bolt Indent Number and Shape. *Journal of Mining and Environment*, 16(1), 223-239.
- [43] Karami, M., Abreh, B., Faramarzi, L. (2012). Practical training in FLAC3D software. Isfahan University of Technology - Academic Jahad Publications. (In Persian)
- [44] Hosseini, M., Afzal Aghaei, A. (2012). Back analysis of Siyah Bisheh dam power plant cavern using instrumentation data. *Journal of Mining Engineering*, 7, (In Persian).
- [34] Mark C., (2015) , Design of roof bolts systems, *Ergonomics in Mining project*.
- [35] 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.
- [36] 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
- [37] Skrzypkowski, K., Korzeniowski, W., Zagórski, K., & Zagórska, A. (2019). Flexibility and Load-Bearing Capacity of Roof Bolting as Functions of Mounting Depth and Hole Diameter. *Energies*, 12(19), 3754.
- [38] Sarfarazi, Vahab & Asgari, Kaveh & Nasrollahi, Mehdi. (2021). Interaction between rock bolt and rock bridge under tensile loading. *Geomechanics and Geoengineering*. 25. 455-471. 10.12989/gae.2021.25.6.455.
- [39] Fu, J., Sarfarazi, V., Haeri, H., Zarei, A. S., Bahrami, R., Imani, M., & Marji, M. F. (2024). Experimental and Numerical Analyses of Shear Failure Mechanisms of Rock Bolt Surrounded by Bedded Rock. *International Journal of Geomechanics*, 24(12), 04024276.