



مقاله پژوهشی

مدل سازی عددی تعیین الگوی بهینه کابل کششی در تحلیل پایداری فضاها زیرزمینی

مصالح افتخاری^{۱*}، محمدحسین مختارزاده^۱، امیرحسین کاظمینی نیک^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۰۴ خرداد ۱۴۰۴، بازنگری: ۲۸ مرداد ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۵ شهریور ۱۴۰۴)

چکیده

نگهداری فضاهاى 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 آنها 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، فضاهاى زیرزمینی

* عهده دار مکاتبات: mosleh.eftekhari@modares.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.23174.1678

۱- مقدمه

زمانی که یک فضا حفر می‌شود، توده سنگ حول آن تمایل دارد که به داخل فضا حرکت کند [۲۰، ۲۱]. حرکت و پتانسیل شکست یا ریزش توده سنگ حول فضای حفرشده تابعی از میدان تنش، خصوصیات سنگ، ساختار زمین‌شناسی، روش حفر، زمان خود پایداری، هندسه و ابعاد فضای حفرشده است [۴، ۳]. معمول‌ترین روش برای پایدار نگه‌داشتن فضای حفرشده، نصب نگهداری است. انواع نگهداری‌های اکتیو و پیچ‌سنگ‌هایی (Rock Bolt) که در این دسته قرار می‌گیرند به‌عنوان مقاوم‌سازی توده سنگ در نظر گرفته می‌شوند [۵-۸]. بر اساس آمار، استفاده از پیچ‌سنگ یکی از روش‌های عمده نگهداری در معدنکاری و کارهای عمرانی به شمار می‌رود که قابلیت به‌کارگیری در شرایط مختلف زمین‌شناسی را داراست [۹، ۱۰]. علاوه بر این، استفاده از پیچ‌سنگ نه تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است بلکه در شرایط مختلف نیز قابل‌نصب است. این ابزار را می‌توان در کنار سایر نگهداری‌ها مانند شاتکریت (Shotcrete) و پوشش بتنی (Concrete Lining) و تیرهای فولادی حائل (Props Steel) به کاربرد تا ساختاری سازگارتر با محیط ایجاد کرد. پیچ‌سنگ‌ها با سهولت و سرعت بالا و به روش کاملاً مکانیزه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰-۱۴]. پیچ‌سنگ‌ها تاریخچه‌ای بالغ بر صدسال دارند و به‌عنوان 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 به‌کاررفته 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 ویژه‌ای برخوردار بوده است. پیچ‌سنگ‌ها به میزان زیادی جایگزین سیستم‌های 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 تئوری‌های تحلیلی متعدد، روش‌های جدیدی مانند روش المان محدود، المان مرزی، المان مجزا و روش‌های احتمالاتی و آماری در طراحی پیچ‌سنگ توسعه‌یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های طراحی مورد استفاده در عمل، از منطقه‌ای به منطقه دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر کرده‌اند که دلیل آن تغییرات در شرایط زمین‌شناسی و ساختگاه‌های زیرزمینی است [۱۷]. پانک در سال ۱۹۶۴ [۱۸] به بررسی طراحی شبکه پیچ‌سنگ‌های عمودی در سقف معادن دارای لایه‌بندی 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. طبقه‌بندی 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 رابطه‌ای 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 تأثیر قرار می‌دهد، پرداختند. در ۱۹۸۵ کراوفورد [۲۴] فاصله‌داری و طول پیچ‌سنگ‌ها در فضاهای زیرزمینی در سنگ درزه‌دار را مورد مطالعه قرار داد. استیلیبورگ در ۱۹۹۴ [۲۵] کتابچه‌ای تخصصی در زمینه طراحی نگهداری با استفاده از پیچ‌سنگ تألیف نمود. از آن زمان، این روش نقش مهمی به‌عنوان یکی از نگهداری‌های

شامل طول پیچ سنگ و فاصله داری بهینه پیچ سنگ 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 پیچ سنگ های بلندتر و پیچ سنگ گذاری در کف تونل، نتایج پایداری بهتری را برای توده سنگ اطراف تونل ارائه می دهد. 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 پیچ سنگ در فضاهای زیرزمینی و انواع روش ها و قواعد مورداستفاده در طراحی شبکه پیچ سنگ مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. مدل های عددی نشان می دهند که طراحی الگو پیچ سنگ نقش کلیدی در پایداری فضاهای زیرزمینی دارند [۳۷]. سرفرازی و همکاران ۲۰۲۱ [۳۸] به بررسی آزمایشگاهی و عددی تعامل پیچ سنگ 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 پیچ سنگ-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 پیچ سنگ در مغار کلاب پرداخت و دریافت که با افزایش طول پیچ سنگ تا میزانی بهینه پایداری سیستم نگهداری افزایش می یابد و پس از آن افزایش طول پیچ سنگ تأثیری بر پایداری سیستم نگهداری حفریه زیرزمینی نخواهد داشت [۲].

فو و همکاران (۲۰۲۴) [۳۹] به بررسی آزمایشگاهی و عددی مکانیزم های شکست برشی پیچ سنگ در توده سنگ لایه دار پرداختند. نمونه های ساخته شده شامل لایه هایی از دوغاب و گچ با نسبت های ضخامت مختلف و یک پیچ سنگ تزریقی در مرکز بودند. نتایج نشان داد که نوع و ضخامت ماده پرکننده اطراف پیچ سنگ تأثیر قابل توجهی بر نیروی

اولیه در مهندسی سنگ ایفا می کند. این روش، به طور گسترده ای در معادن زغال سنگ و معدنکاری در سنگ سخت، طرح های برق آبی زیرزمینی، تونل سازی و سایر ساخت های سنگی در مهندسی عمران مورداستفاده قرار گرفته است. شوپرت در ۲۰۰۱ [۲۶] و در ادامه لی در ۲۰۱۲ [۲۷] چنین عنوان کردند که روش های نصب پیچ سنگ در نگهداری سنگ در تونل های عمرانی به گونه ای است که پیچ سنگ های سخت، کاملاً محصور شده در سنگ نصب می شوند و شاکریت 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 پیچ سنگ و کابل های کششی استفاده کرد. نتایج به دست 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 پیچ سنگ 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 پیچ سنگ پرداخته است. در این بررسی به مقایسه دو نوع مقاوم سازی شامل شاکریت و فوالد با پیچ سنگ 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 قرار داده 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 ملاحظاتی به منظور طراحی الگوی پیچ سنگ گذاری در معادن و سازه های زیرزمینی عمرانی در محیط های درزه دار با طراحی سیستم نگهداری پیچ سنگ 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 پیچ سنگ های سقفی پرداخت. بن و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۳۵] در مطالعه ای، روندی را به منظور پایداری نواحی بلوکی اطراف تونل به روش المان مجزا در دو بعد پیشنهاد کرده اند. نهایتاً در این روش الگوی مناسب پیچ سنگ گذاری

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، به‌صورت 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 نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D، عملکرد سیستم نگهداری کابلی در شرایط توده‌سنگ بسیار سست به‌صورت 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 باهدف تعیین الگوی بهینه نصب کابل، نه‌تنها 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. بااین‌حال، بدیهی است که در طراحی اجرایی، می‌توان سیستم نگهداری ترکیبی شامل پیچ‌سنگ، کابل کششی، شاتکریت یا سایر عناصر نگهدارنده را انتخاب و بهینه‌سازی کرد. بااین‌حال، 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.

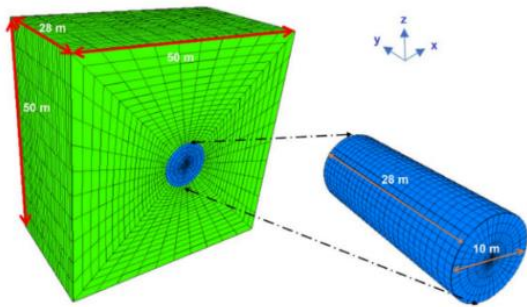
۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، فضای زیرزمینی حفرشده در یک محیط سنگی موردبررسی قرار می‌گیرد. محیط سنگی به‌صورت معادل پیوسته فرض شده و پارامترهای توده سنگ معادل به‌کل مدل تخصیص داده می‌شوند. توده سنگ همگن و پیوسته در نظر گرفته‌شده 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 تحلیل‌شده و سپس تأثیر الگوهای مختلف اجرای شبکه پیچ‌سنگ/کابل کششی بر پایداری و تشکیل زون پلاستیک اطراف فضا بررسی می‌شود تا الگوی بهینه برای پایداری پیشنهاد گردد.

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 درصد 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 قابل‌توجهی 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.

باوجود 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 به‌صورت تجربی و یا با



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 است. همان طور که پیش تر بیان گردیده بود با استفاده از مدل رفتاری موهر کولمب مدل سازی 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 است [۴۳]. در مدل سازی، مرزهای کناری مدل در برابر جابجایی افقی مقید شده اند، در حالی که جابجایی قائم برای آن ها 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)
۰٫۸۳	مدول بالک (GPa)
۲۷	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۰٫۱	چسبندگی (MPa)
۱۰	RMR

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	۱٫۸۲۷۵	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

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 مدل سازی می شود. از این رو، برای لحاظ کردن اثر ناپیوستگی های موجود در توده سنگ (نظیر درزه های ناممتم و گسستگی های موضعی)، مدل سازی سه بعدی به روش محیط پیوسته معادل انجام شده است. مدل عددی شامل تونل و روباره آن و سیستم نگهداری شامل کابل کشی است. 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.

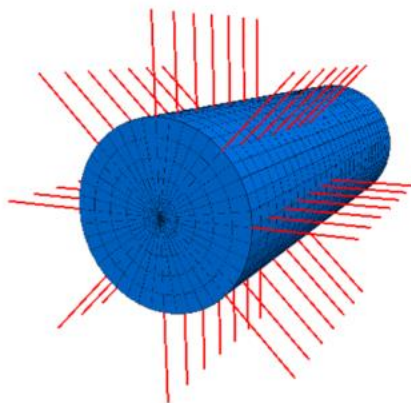
۲-۱- ساخت مدل

از پارامترهای مؤثر در ساخت مدل، شکل هندسی و ابعاد مقطع تونل است، 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 تأثیر 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 المان های مرزی به وجود نیاید و تغییر شکل ها در این المان ها قابل صرف نظر باشد. بر اساس روابط کرش ۴ تا ۵ برابر شعاع مقطع حفاری می تواند به عنوان مرز مدل با توجه به شرایط ذکر شده در نظر گرفته شود [۴۲]. برای دستیابی به دقت مناسب در اطراف تونل ها 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].

شده و تونل به پایداری اولیه برسد. سپس با بکار گیری الگوهای پیشنهادی پیچسنگ‌های پیچشی- الگوی پیچسنگ‌های کوتاه و بلند- الگوی ترکیبی (پیچشی- کوتاه و بلند) به بررسی تأثیر 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 تأثیر این الگوها استفاده شده است. در شکل ۲ الگوی مرسوم نصب کابل که در آن المان‌های نگهداری فاصله منظم و یکسانی را دارند مشاهده می‌گردد.

جدول ۲: مشخصات کابل تزریقی مورد استفاده

مقدار	مشخصات
۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۸۰۴,۳	مساحت مقطع (mm ²)
۴۰۰	مقاومت تسلیم (MPa)
۲,۳۲۲	ظرفیت کششی دوغاب (MPa)
۵۶۰	سختی دوغاب (MPa)
۱	مقاومت دوغاب (MPa)
۱۰	پیش کشش در کابل (MPa)



شکل ۲: الگوی مرسوم پیاده‌سازی 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 سه‌بعدی بر روی دیواره تونل به نمایش در آمده است.

پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوره بر روی سنگ‌های مختلف تعریف می‌شود. این روش اغلب به‌عنوان روشی متداول برای محاسبه همگرایی (جابجایی نسبی دیواره‌های تونل) استفاده می‌شود که در طی بررسی تونل‌های مختلف به دست آمده است. ساکورایی و همکاران علاوه بر روابطی که بین مقاومت تک‌محوره و کرنش بحرانی برای توده سنگ‌های مختلف بیان کرده‌اند. روابط (۱) تا (۳) را نیز بر مبنای مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی ارائه کرده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روابط (۱) تا (۳) نشان‌دهنده حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی است. رابطه (۲) نیز مقدار لگاریتمی متوسط روابط (۱) تا (۳) است.

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

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

$$\text{Log } \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (3)$$

رابطه (۱) تراز هشدار خطر اول، رابطه (۲) تراز هشدار خطر دوم و رابطه (۳) تراز هشدار سوم است. در این روابط ϵ_c کرنش بحرانی و E مدول الاستیسیته بر حسب $\frac{Kgf}{cm^2}$ است. ساکورایی و همکاران، تراز هشدار دوم را به‌عنوان مبنا برای طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد نموده‌اند. شرط پایداری فضای حفاری این است که جابجایی ایجاد شده در تونل (به‌ویژه سقف) از جابجایی مجاز کمتر باشد. میزان کرنش و جابجایی مجاز بر اساس معیار ساکورایی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱: میزان کرنش و جابجایی مجاز بر اساس معیار ساکورایی

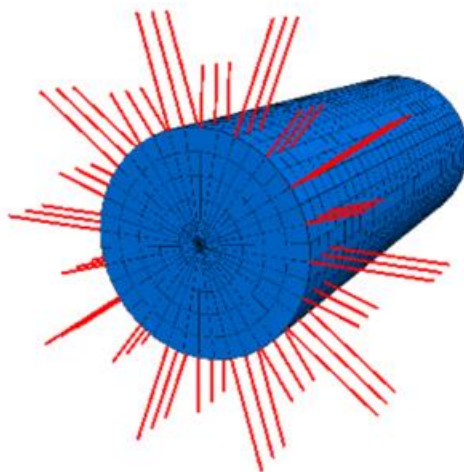
مدول الاستیسیته $(\frac{Kgf}{cm^2})$	کرنش مجاز سطح یک (ϵ_c)	حداکثر میزان جابجایی (cm)
۱۰۲۰۰,۵۳	۰,۱۴	۷

۲-۲- نصب سیستم نگهداری

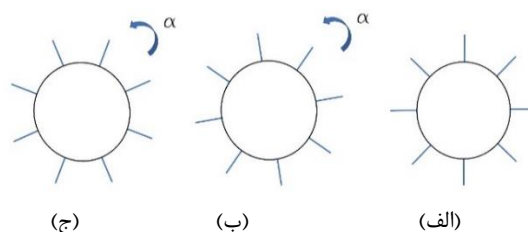
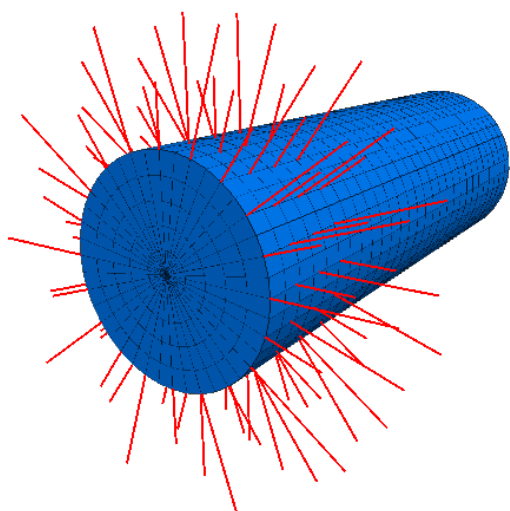
برای نگهداری فضای حفر شده در این پژوهش همان‌طور که پیش‌تر ذکر شده است از پیچسنگ با الگوهای متفاوت به‌عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است. مشخصات مربوط به پیچسنگ در جدول ۴ آورده شده است.

برای بررسی پایداری مدل‌های انتخابی، از الگوهای مرسوم نصب پیچسنگ استفاده شده، تا میزان جابجایی‌ها، از میزان جابجایی بحرانی به‌دست‌آمده از رابطه ساکورایی کمتر

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



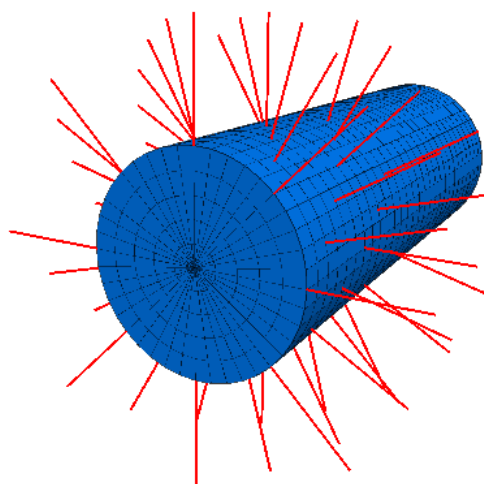
شکل ۳: الگو کوتاه و بلند پیاده سازی کابل



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

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 پیچ سنگ، دو طول (۱) ۵ متری و ۷٫۵ متری برای پیچ سنگ ها در نظر گرفته شده است. به منظور طراحی آرایش های متفاوت، فاصله پیچ سنگ ها در راستای طول تونل یا گام نصب پیچ سنگ (S)، برابر چهار مقدار ۱ و ۱٫۵ و ۲ و ۲٫۵ در نظر گرفته شده است. همچنین فواصل پیچ سنگ ها در جهت محیط تونل دایره ای 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 شده اند که تعداد پیچ سنگ ها در محیط تونل (d) در هر حالت به ترتیب ۱۲ و ۱۵ و ۲۰ و ۳۰ پیچ سنگ است. در جدول ۵ سناریوهای مختلف برای پیاده سازی الگوی مرسوم پیچ سنگ تعریف شده اند. در نتیجه چگالی شبکه های به دست آمده برای شبیه سازی از ۱×۱ تا ۲×۲ متفاوت است.



شکل ۵: الگوی پیچشی پیاده سازی کابل

الگوی نصب کابل با آرایش ترکیبی که خود ترکیبی از روش های قبل بوده، ضمن اینکه کابل های کوتاه و بلند انتخاب شده، الگو با توجه به زاویه نصب کابل ها، با زاویه ای خاص گردش می کند در شکل ۶ این الگو نمایش داده شده است.

جدول ۵: شماره سناریوهای مختلف طراحی الگوی مرسوم کابل

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

۳- نتایج

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

۳-۱- مدل منظم و متداول کابل کششی

همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل ساخته‌شده را بدون نصب هرگونه نگهداری نشان می‌دهد. بیشینه جابجایی در این مدل برابر با ۱۵/۵ سانتی‌متر بوده و زون تأثیر 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.

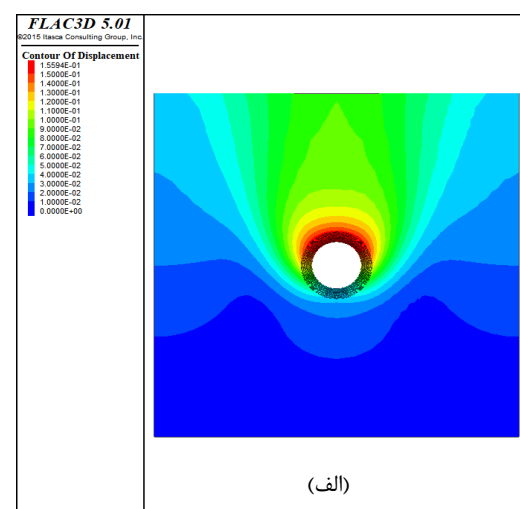
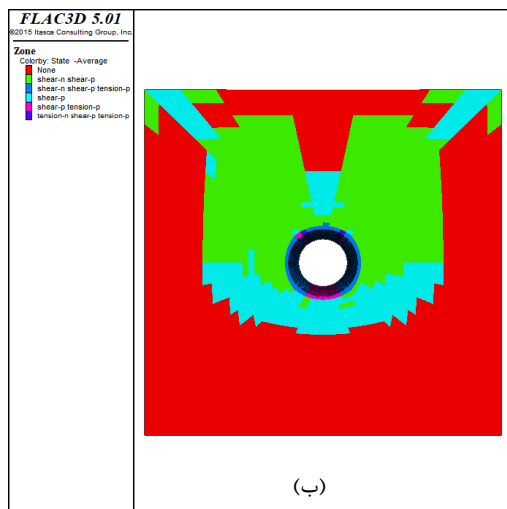
همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده مربوط به سناریوی شماره ۴ با نصب

پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۱×۱ که چگال‌ترین 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 تأثیر اطراف تونل به میزان قابل‌ملاحظه‌ای (به‌طور تقریبی ۸۷ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب).

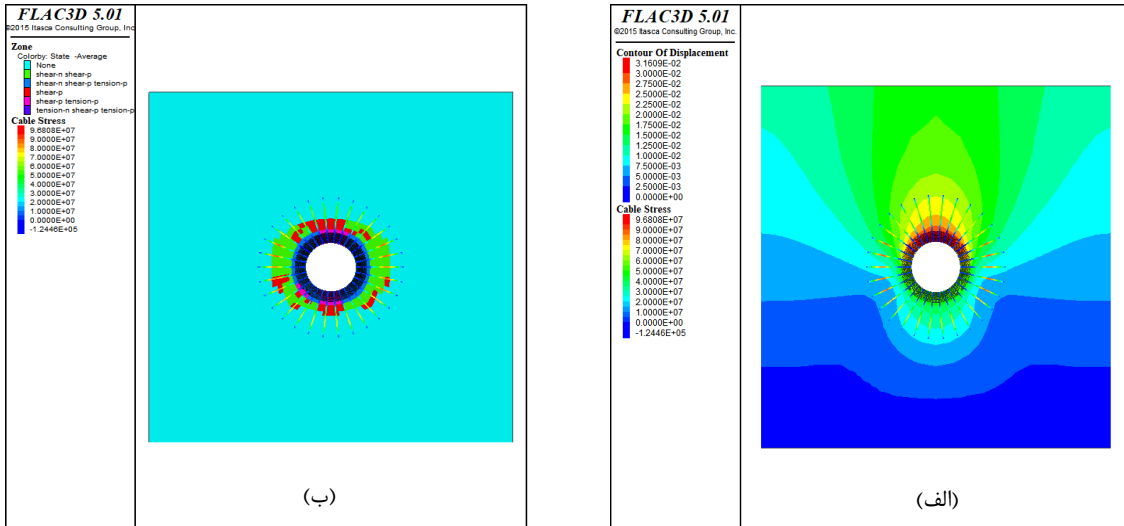
میزان ضریب ایمنی در این مدل برابر با ۲/۴۸ است.

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 سانتی‌متر به ۶/۱۲ سانتی‌متر کاهش یافته که این مقدار کمتر از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورایی در این مدل است. ناحیه تأثیر اطراف تونل به میزان قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به مدل بدون نگهداری (به‌طور تقریبی ۷۷/۷ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). ضریب ایمنی به‌دست آمده برای این مدل برابر با ۲/۷۱ است.

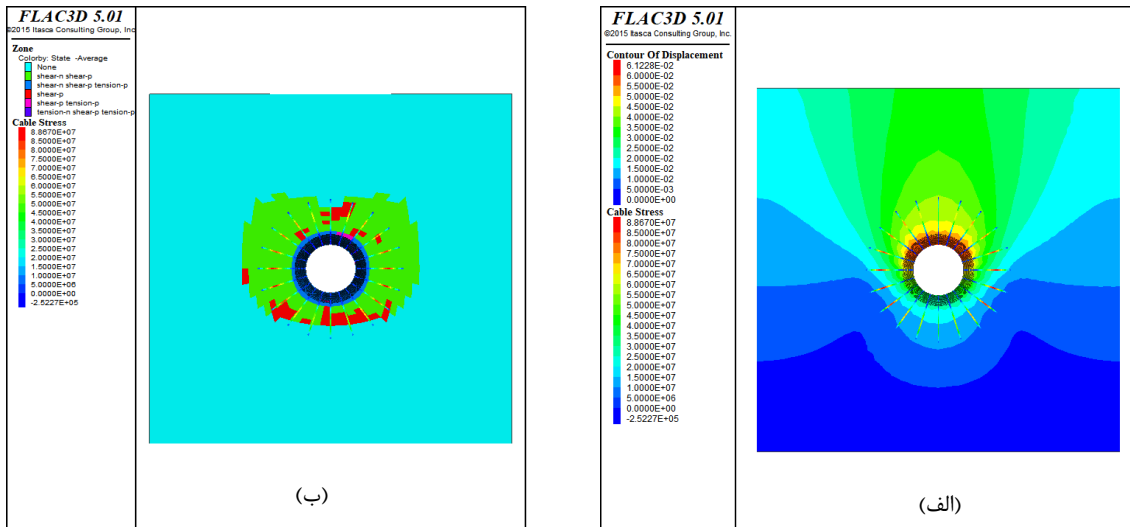
در نهایت شکل ۱۰ قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۱۳ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۲٫۵×۲٫۵ که غیرچگال‌ترین شبکه است را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵/۵ سانتیمتر به ۹/۳۷ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورایی در این مدل عبور کرده است. اگرچه ناحیه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



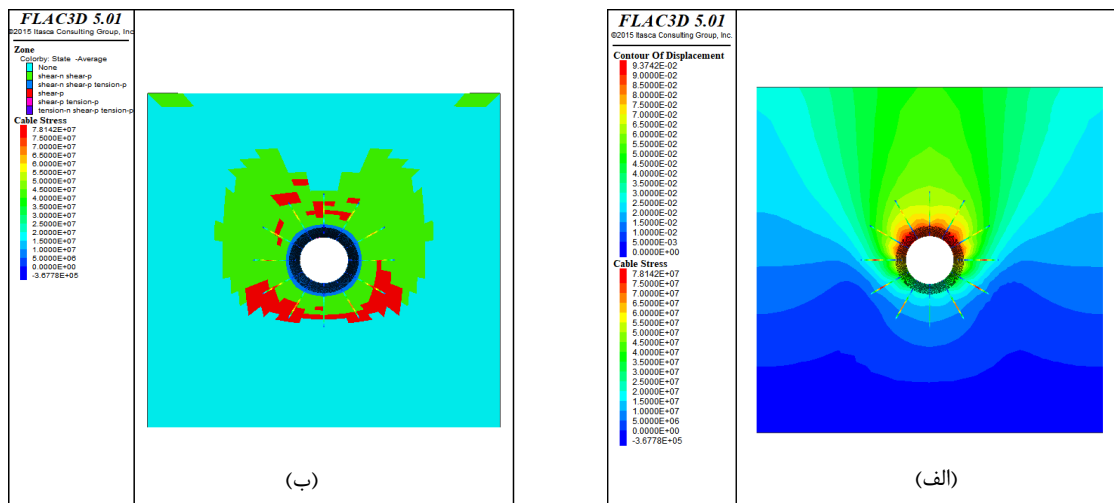
شکل ۷: مدل شبیه‌سازی شده بدون نصب نگهداری (الف) کانورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



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 تأثیر اطراف تونل



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 تأثیر اطراف تونل



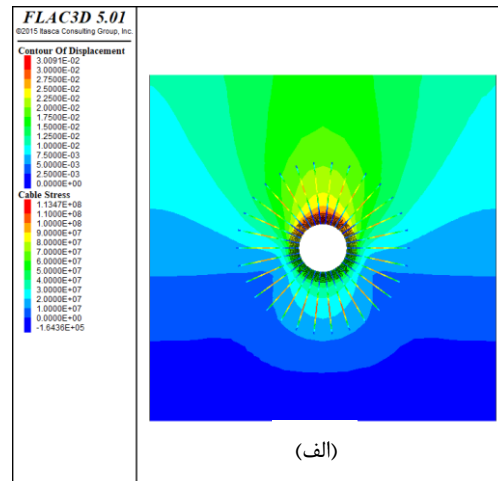
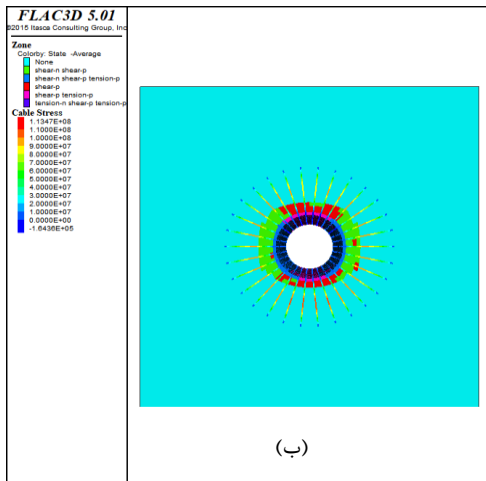
شکل ۱۰: مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۱۳ با نصب پیچسنگ ۵ متری با الگوی ۲٫۵×۲٫۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه‌ای نسبت به مدل بدون نگهداری (به‌طور تقریبی ۵۹/۶ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). ضریب ایمنی به‌دست‌آمده برای این مدل برابر با ۱٫۵۹ است.

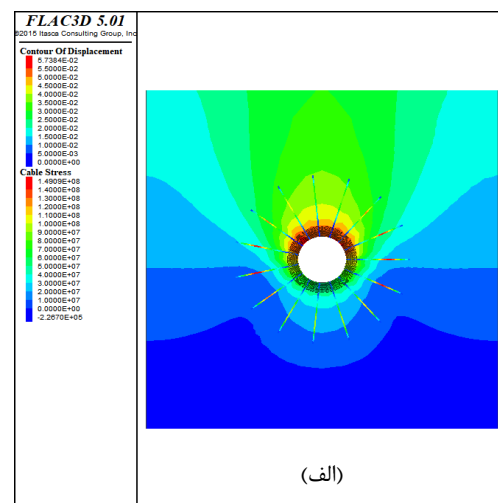
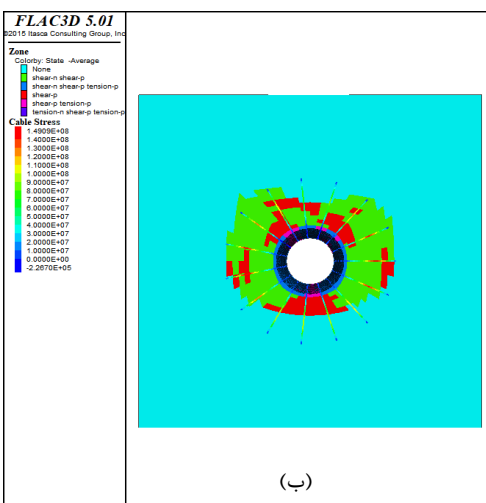
در نهایت شکل ۱۳ در قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۲۹ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۲٫۵×۲٫۵ که غیرچگال‌ترین شبکه است را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتیمتر به ۸٫۱۲ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورائی در این مدل عبور کرده است. اگرچه ناحیه تأثیر اطراف تونل نسبت به مدل اولیه کاهش یافته است ولی وسعت آن از دو مدل قبلی که با نگهداری‌های چگالتری نصب شده‌اند بیشتر است (قسمت ب). ضریب ایمنی برای این مدل مقدار ۱٫۷۱ محاسبه شده است.

شکل ۱۱ قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده مربوط به سناریوی شماره ۲۰ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱×۱ که چگالترین الگوی انتخابی است را نمایش می‌دهد. 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 ساکورائی است، همچنین ناحیه تأثیر اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه‌ای (به‌طور تقریبی ۸۸٫۹ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). میزان ضریب ایمنی در این مدل برابر با ۲٫۱۲ است.

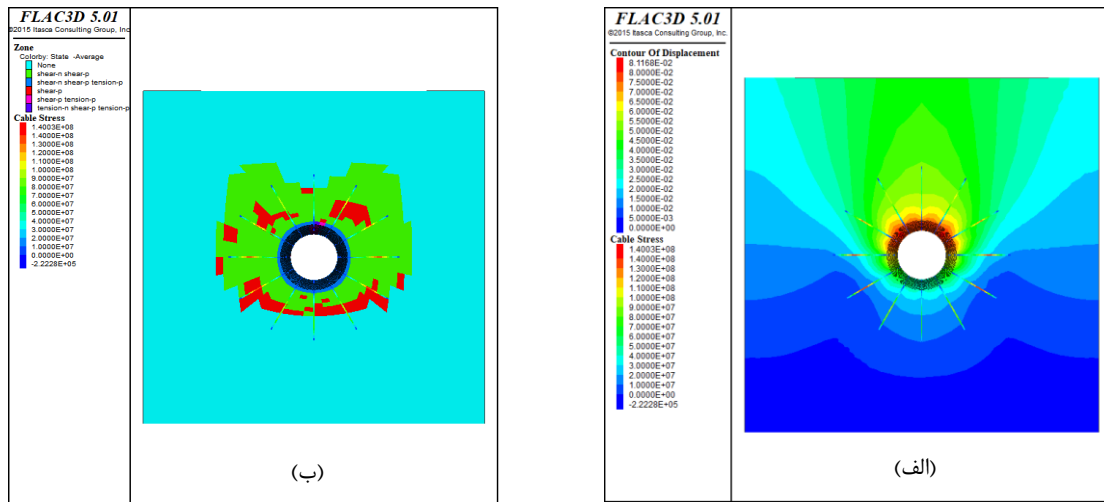
شکل ۱۲ قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۲۲ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱٫۵×۱٫۵ را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتیمتر به ۵٫۷۵ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار کمتر از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورائی در این مدل است. ناحیه تأثیر



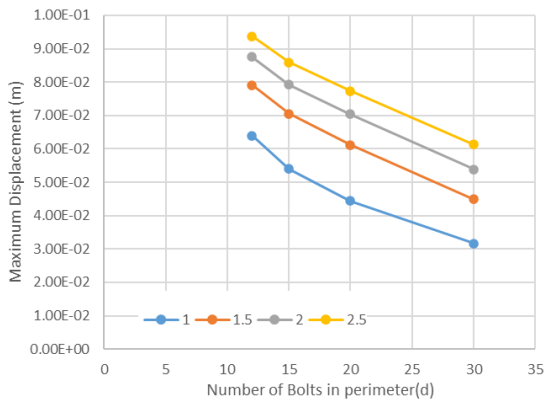
شکل ۱۱: مدل شبیه‌سازی شده سناریوی شماره ۲۰ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱×۱ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۱۲: مدل شبیه‌سازی شده سناریوی شماره ۲۲ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱٫۵×۱٫۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

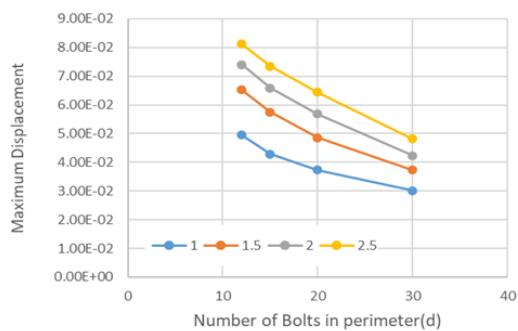


شکل ۱۳: مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۲۹ با نصب پیچ سنگ با الگوی ۲/۵×۲/۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۱۴: نمودار بیشترین میزان جابجایی نسبت به تعداد پیچ سنگ های ۵ متری در محیط تونل (d) در حالت های مختلف گام

نصب کابل در طول تونل (s)



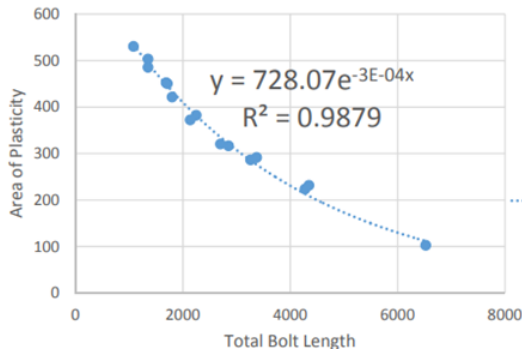
شکل ۱۵: نمودار بیشترین میزان جابجایی نسبت به تعداد پیچ سنگ های ۷/۵ متری در محیط تونل (d) در حالت های مختلف گام

نصب کابل در طول تونل (s)

پس از مدل سازی 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.

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

جابجایی (سانتی متر)				گام نصب کابل (s) (متر)	طول کابل (متر)
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	



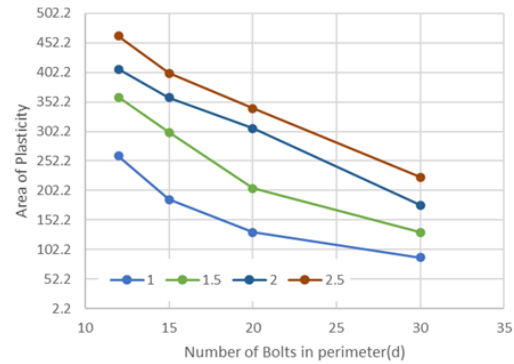
شکل ۱۹: نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به طول کل پیچ سنگ مصرفی ۷/۵ متری در سناریوهای مختلف

با توجه به آنالیز انجام‌شده برای انتخاب شبکه بهینه پیچ‌سنگ گذاری، شبکه ۱/۵×۱/۵ 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 تأثیر 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 تأثیر طرح‌های مذکور در کاهش میزان مصرفی پیچ‌سنگ برآورد شود. هر طرح با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل (مطابق با الگوی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی اولیه) مدل شده و بعد از آن اقدام به افزایش یا کاهش گام نصب پیچ‌سنگ در راستای تونل برای حصول نتیجه مطلوب گردیده است.

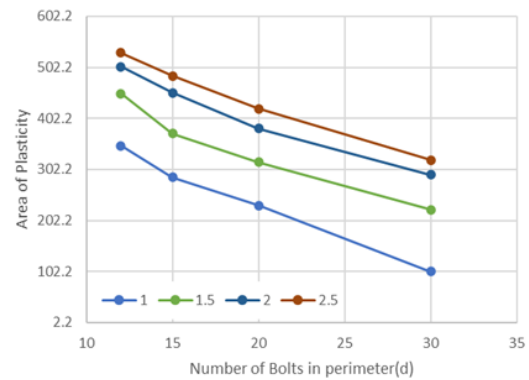
۲-۳- تحلیل اثر آرایش کوتاه و بلند

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

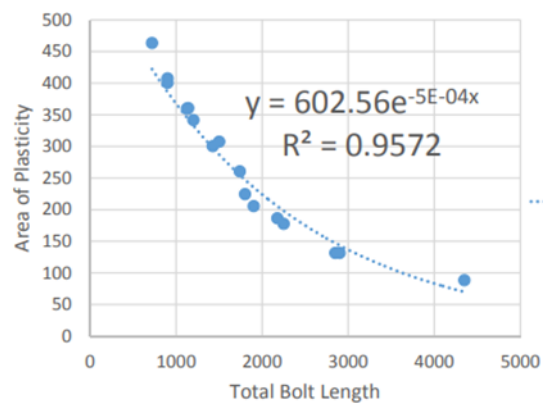
در ادامه برای بررسی پایداری فضا، با طرح پیچ‌سنگ‌های کوتاه- بلند، پیچ‌سنگ‌های کوتاه ۵ متر و پیچ‌سنگ‌های بلند ۷/۵ متر، جهت مدل‌سازی انتخاب شده است. شبیه‌سازی اولیه با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل و با طول گام ۱ متر انجام‌شده که میزان جابجایی به مقدار ۵/۵ سانتی‌متر رسیده است، که از حد مجاز ساکورایی کمتر است. نتایج کانتورهای جابجایی اطراف تونل و همچنین ناحیه تأثیر اطراف تونل در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. در این مرحله با افزایش طول گام برای یافتن شبکه بهینه، شبیه‌سازی‌های متعدد شبکه پیچ‌سنگ با گام‌های ۱/۵ و ۱/۷



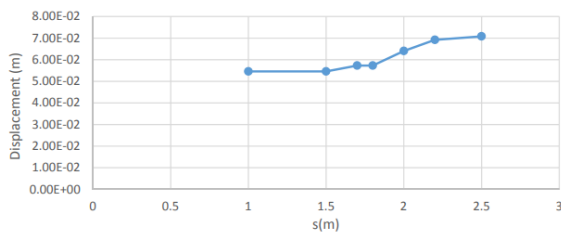
شکل ۱۶: نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول (s)



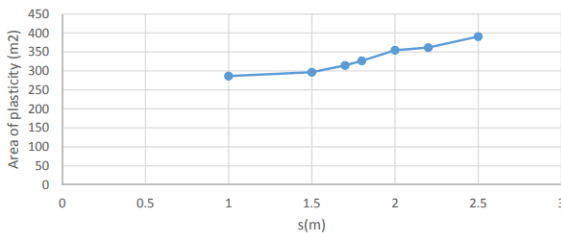
شکل ۱۷: نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۷/۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول (s)



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



شکل ۲۱: میزان جابجایی برحسب گام نصب کابل در مدل سازی الگوی کوتاه- بلند ۵ و ۷٫۵ متری با گام های مختلف

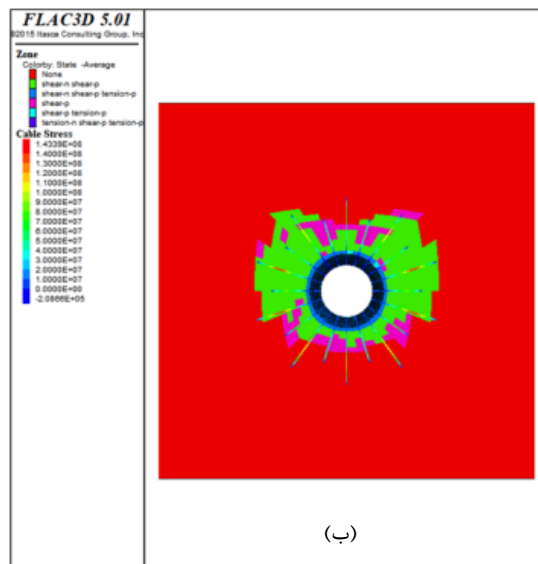
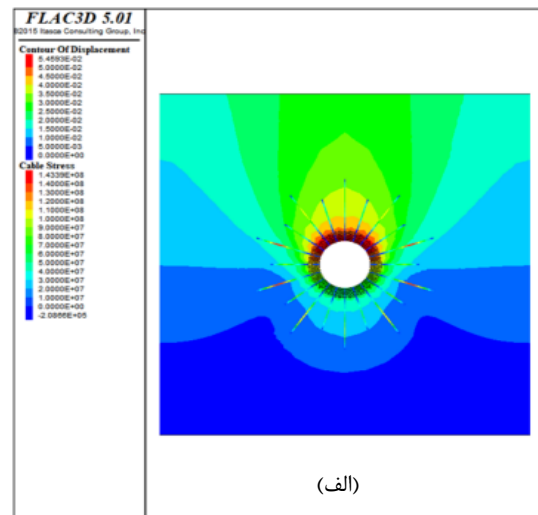


شکل ۲۲: مساحت ناحیه پلاستیک در مدل سازی الگوی کوتاه- بلند ۵ و ۷٫۵ متری با گام های مختلف نصب

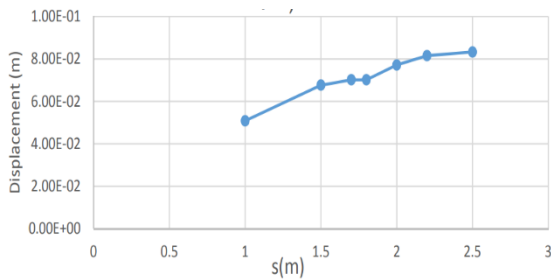
۳-۲-۲- آرایش کوتاه و بلند با کابل های ۳٫۷۵ و ۵ متری در ادامه برای بررسی پایداری فضا، با طرح پیچ سنگ های کوتاه- بلند، پیچ سنگ های کوتاه ۳٫۷۵ متر و پیچ سنگ های بلند ۵ متر، جهت مدل سازی انتخاب شده است. شبیه سازی اولیه با تعداد ۲۰ پیچ سنگ در محیط تونل و با طول گام ۱ متر انجام شده که میزان جابجایی به مقدار ۶٫۷ سانتیمتر رسیده است، که کمتر از حد مجاز ساکورایی است. شکل ۲۳ نتایج کانتورهای جابجایی و ناحیه تأثیر 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 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 است (۱۰ پیچ سنگ ۳٫۷۵ متری و ۱۰ پیچ سنگ ۵ متری) صرفه جوئی پیچ سنگ در این الگو برابر با ۱۰۰ متر در ۲۸ متر بوده، که برابر با ۶ درصد پیچ سنگ مصرفی نسبت به الگوی مرسوم است.

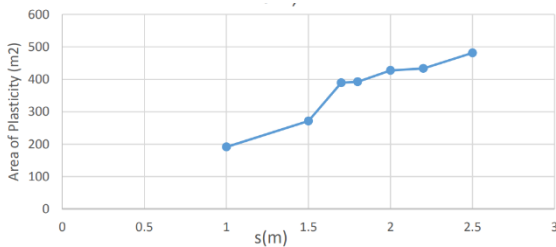
و ۱٫۸ و ۲ و ۲٫۲ و ۲٫۵ انجام شده تا با استفاده از تعداد پیچ سنگ کمتر مقدار جابجایی باقی مانده از مقدار حد مجاز ساکورایی (۷ سانتیمتر) فراتر نرود. مقادیر جابجایی حاصل از اعمال شبکه کوتاه- بلند ۵ و ۷٫۵ متری در شکل ۲۱ آورده شده است. با توجه به این نمودار اندازه شبکه بهینه با الگوی پیچ سنگ کوتاه- بلند ۲٫۲×۱٫۵ به دست آمده است (شکل ۲۱ و ۲۲). 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 است (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 است.



شکل ۲۰: مدل سازی 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 تأثیر اطراف تونل



شکل ۲۴: میزان جابجایی بر حسب گام نصب کابل



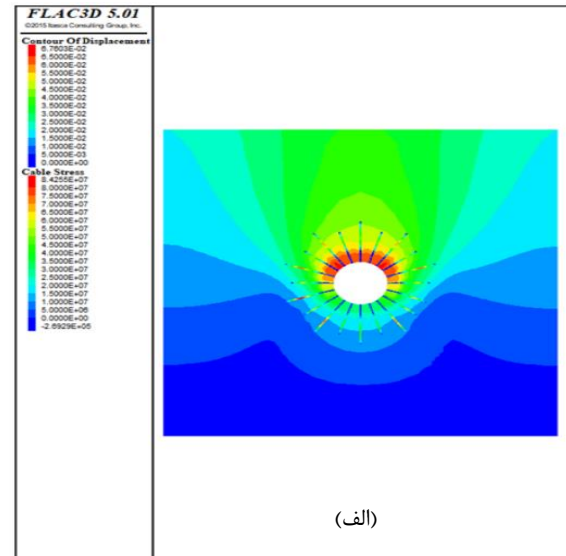
شکل ۲۵: مساحت ناحیه پلاستیک در مدل‌سازی الگوی کوتاه-بلند ۳٫۷۵ و ۵ متری با گام‌های مختلف نصب



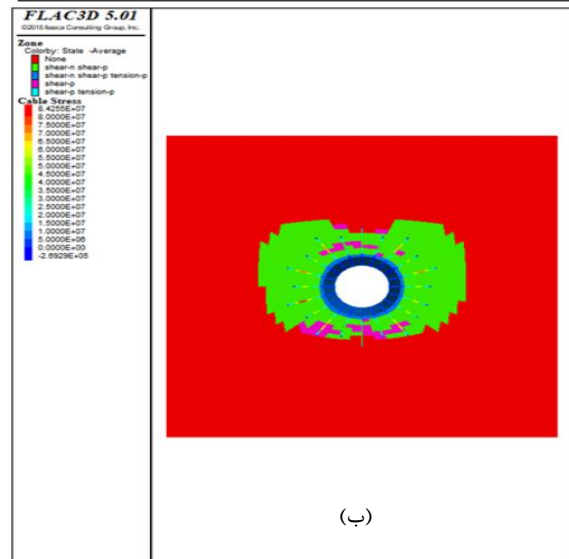
شکل ۲۶: نحوه نصب و گردش کابل در هر گام با زاویه ۶ درجه

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 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



(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 تأثیر اطراف تونل

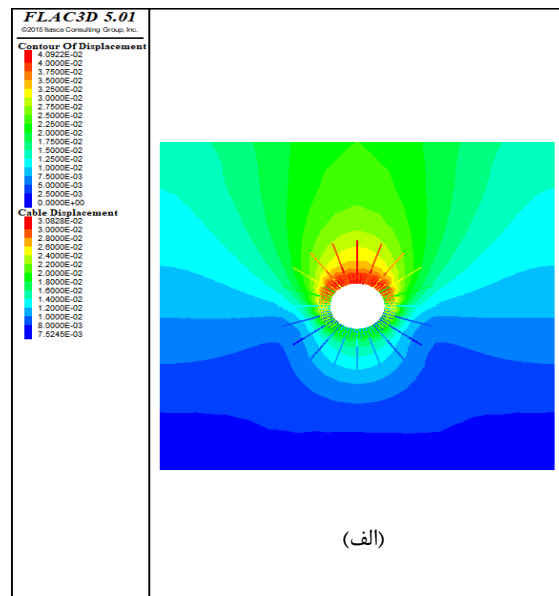
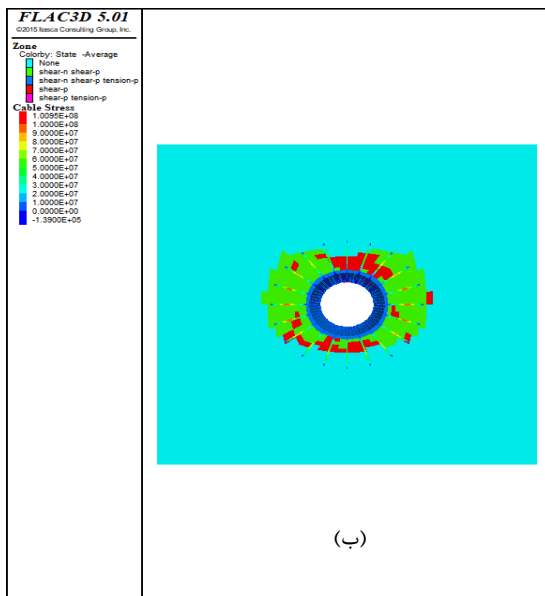
۳-۳- تحلیل آرایش پیچشی

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

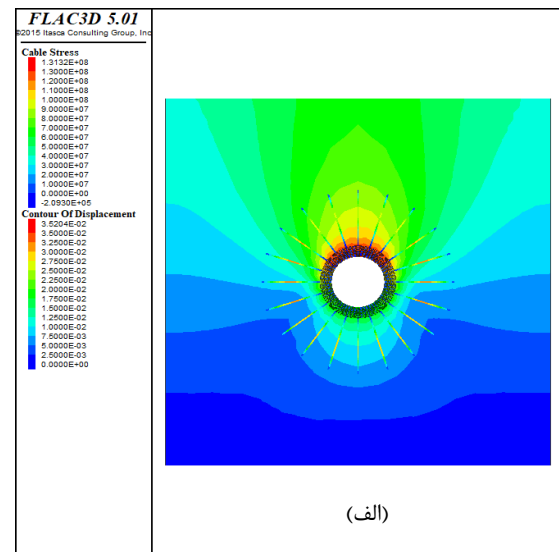
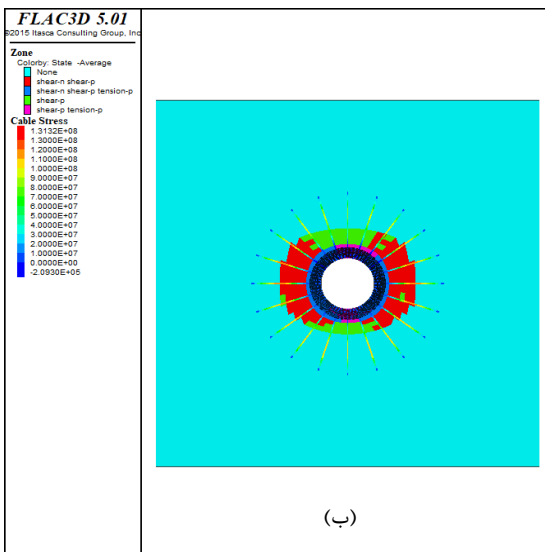
در شکل ۲۹ مقدار جابجایی ایجاد شده پس از اعمال نگهداری پیشگی با کابل های ۵ و ۷ متری در گام های مختلف نگهداری آورده شده است. چنانچه مشاهده می شود برای دستیابی به جابجایی حداکثر ۷ سانتی متر که حد مجاز تراز هشدار اول ساکورایی است، الگوهای با گام ۲٫۵ متری برای پیچ سنگ های ۷٫۵ متری و با گام ۲ متر برای کابل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

مدل سازی 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 سانتی متر به ۳٫۵ سانتی متر کاهش یافته، که بیانگر کارایی الگوی پیشگی بر میزان پایداری فضا و کاهش میزان جابجایی است. در راستای افزایش گام نصب با استفاده از شبکه پیشگی، تا آنجا که جابجایی تونل از ۷ سانتی متر تجاوز نکند، شبکه های مختلف با تغییر طول گام شبیه سازی شده تا شبکه بهینه استخراج شود.



شکل ۲۷: مدل سازی الگوی پیشگی 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 تأثیر اطراف تونل

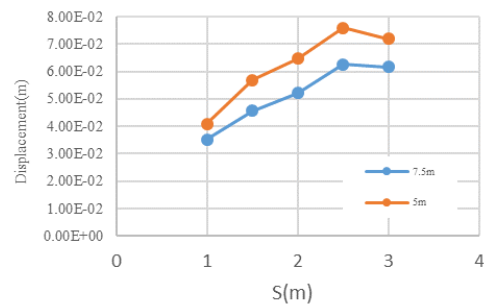


شکل ۲۸: مدل سازی الگوی پیشگی با پیچ سنگ به طول ۷٫۵ متر با فاصله شعاعی ۱٫۵ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

نتایج حاصل از تغییر خصوصیات پیچ‌سنگ با الگوهای متفاوت را می‌توان به صورت جامع در جدول ۸ مشاهده کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از کابل ضعیف با خصوصیات ذکر شده، جابجایی‌ها را در بیشتر الگوها به کمتر از حد مجاز ساکورایی رسانده است.

جدول ۷: خصوصیات دو پیچ‌سنگ متوسط و ضعیف مورد استفاده در مدل‌سازی

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



شکل ۲۹: مقایسه میزان جابجایی الگوی پیچشی با پیچ‌سنگ‌های ۵ و ۷٫۵ متری در گام‌های مختلف

۳-۴- بررسی اثر تغییر خصوصیات کابل

به منظور بررسی اثر تغییر خصوصیات پیچ‌سنگ، دو نمونه کابل با خصوصیات متوسط و ضعیف با الگوهای منظم علاوه بر مدل‌های قبلی مورد مدل‌سازی و بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول ۷ خصوصیات دو کابل استفاده شده در مدل‌سازی‌ها آورده شده است. در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نتایج حاصل از دو نمونه از کابل‌های ضعیف و متوسط با طول‌های ۵ و ۷٫۵ متر نشان داده شده است.

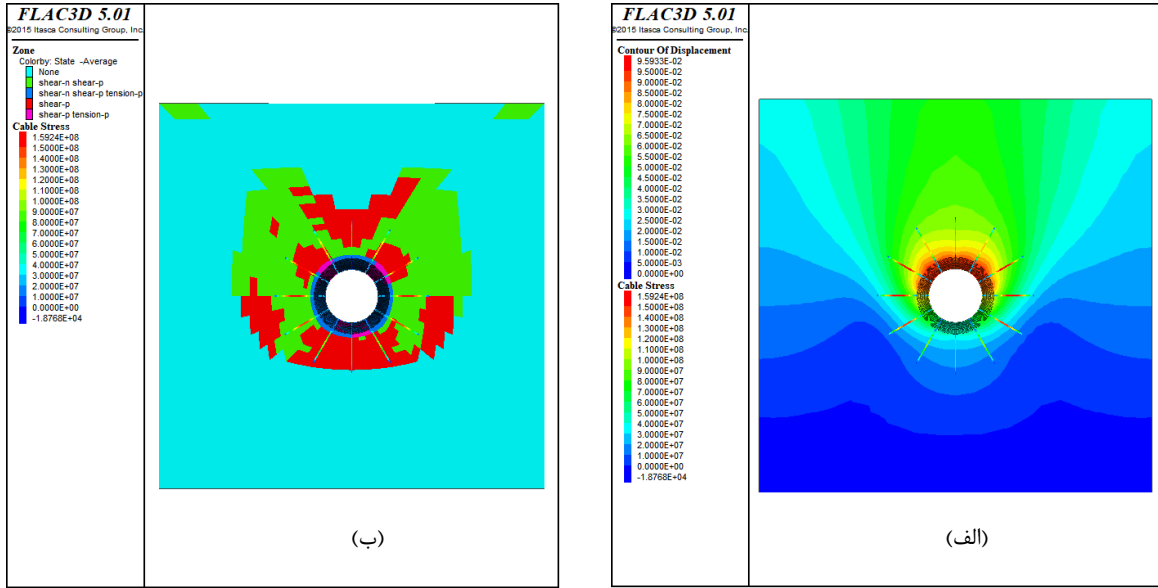
جدول ۸: نتایج مربوط به مدل‌سازی پیچ‌سنگ با خصوصیات متوسط و ضعیف

شماره مدل	توصیف پیچ‌سنگ	طول پیچ‌سنگ (متر)	تعداد پیچ‌سنگ 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

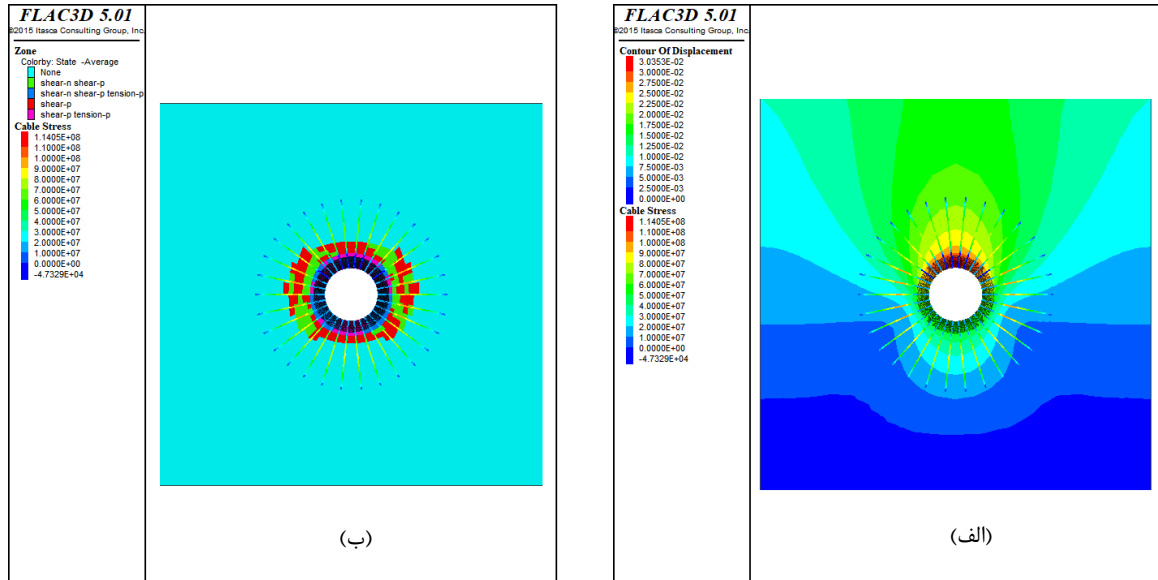
شکل‌های ۳۴ و ۳۵، به نظر می‌رسد که الگوی پیچشی همواره کمترین میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک را به توجه به گام‌های نصب پیچ‌سنگ، به همراه دارد. اما از آنجایی که الگوی ترکیبی از نظر میزان مصرف پیچ‌سنگ و اجرا سهولت بیشتری داشته و مقرون به صرفه‌تر می‌باشد به عنوان الگوی بهینه تعیین می‌گردد.

۳-۵- پیشنهاد الگوی بهینه

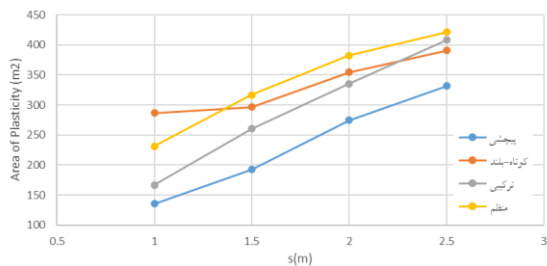
با توجه به نمودارهای شکل ۳۲ و ۳۳ که مربوط به مقایسه میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک در چهار الگوی منظم، پیچشی، کوتاه-بلند و ترکیبی با طول‌های ۵ و ۷٫۵ متری با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل می‌باشد و مقایسه آن با چهار الگوی مربوط به پیچ‌سنگ ۵ متری



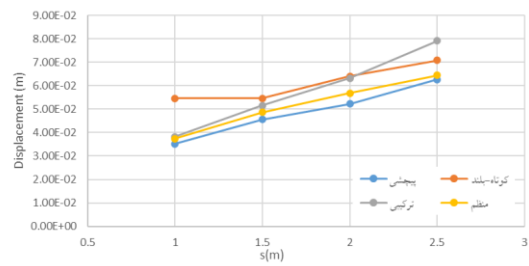
شکل ۳۰: مدلسازی الگوی منظم پیچ‌سنگ ۵ متر با خصوصیات متوسط فاصله شعاعی ۲٫۵ متر و ۱٫۵ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل



شکل ۳۱: مدلسازی الگوی منظم پیچ‌سنگ 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



شکل ۳۲: نمودار زون پلاستیک به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه-بلند مربوط به پیچ‌سنگ ۵ و ۷٫۵ متری



شکل ۳۳: نمودار جابجایی به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه-بلند مربوط به پیچ‌سنگ ۵ و ۷٫۵ متری

ترکیب دیگر (۳/۷۵ و ۵ متر)، اندازه شبکه بهینه $۱,۷ \times ۱,۷$ به دست آمده و صرفه‌جویی حدود ۶ درصد حاصل شد.

- در الگوی پیچشی، کابل‌های ۵ و ۷/۵ متری به ترتیب با گام ۲ و ۲/۵ متری مناسب می‌باشد و پیچ‌سنگ 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 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. Rahmannedad, 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.

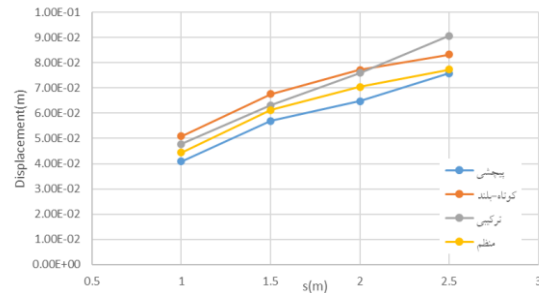
[2] Sanmarian Esfahani, N., Azari, A., Baghbanan, A., Hashem Al-Hosseini, H. (2023). Evaluation of optimal rock bolt arrangement for the stability of a jointed rock mass using 3D DEM-DFN method – Case study: Kolab 2 cavern. Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 13(34), 67–81. [In Persian]

[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.

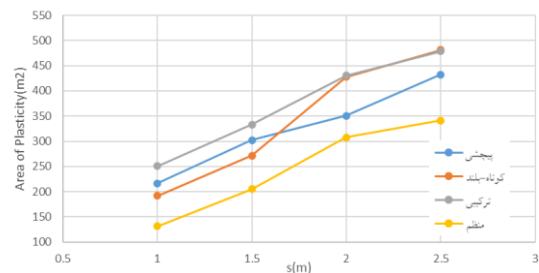
[4] Everling G., (1964), Model test concerning the interaction of ground and roof support in gate roads. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 1, pp 319-326.

[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] Aghakhani H., Ahangari K, Eftekhari M., (2024) Estimation of Deformation Modulus of Azad Pumped Storage Powerhouse Cavern using Back Analysis based on Combination of Extensometer and Load Cell Results, Indian Geotechnical Journal, 1-17.



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



شکل ۳۵: نمودار زون پلاستیک به گام نصب حاصل از مدل‌سازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه-بلند مربوط به پیچ‌سنگ 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، پیچشی 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 $۱,۷ \times ۱,۷$ 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 $۱,۷ \times ۲,۲$ بدست آمد و مصرف کابل حدود ۱۰٪ کمتر از حالت مرسوم بود. در

- 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*. Oxford: Pergamon
- [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: Eissenstein 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*
- [7] Senemarian Isfahani N, Azhari A, Baghbanan A, Hashemolhosseini H, (2023), Evaluation of the optimal arrangement of rock bolts on the stability of jointed rockmass Using Three-Dimensional DFN-DEM Approach - Case study: Clab 2 cavern. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*. Vol. 13, No. 34, pp 67-81.
- [8] Aghakhani H., Ahangari K, Eftekhari M., (2022), Loss displacement estimation of Azad pumped storage powerhouse cavern using combination of numerical modeling and instrumentation results, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7:32.
- [9] Hobbs D. W., (1968), Scale model studies of strata movement around mine roadways. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*. Vol. 5, pp 219-235.
- [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: Wissenschaftsverlag 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*.

- [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].
- Construction. Australian Centre for Geomechanics, pp. 81-105.
- [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.

¹ Encapsulated

² Kirsch