

بررسی تأثیر شدت درزه‌داری توده‌سنگ بر عملکرد سیستم‌های نگهداری در تونل با استفاده از مدلسازی عددی *DFN-DEM* (مطالعه موردی: تونل دسترسی سد رودبار لرستان)

مهدی نوروزی^{۱*}، رامین رفیعی^۲، مهدی باجولوند^۳، عابدین حجتی تواندشتی^۴

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: مهر ۱۳۹۵، پذیرش: مرداد ۱۳۹۶)

چکیده

در این مقاله، شبیه‌سازی *DFN-DEM* با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای سه‌بعدی *PFC^{3D}* به منظور بررسی تأثیر تغییرات شدت درزه‌داری توده‌سنگ بر عملکرد سیستم‌های نگهداری تونل انجام شده است. این نرم‌افزار به دلیل توانایی ایجاد درزه‌های با اندازه محدود و با ویژگی‌های آماری مختلف و انعطاف‌پذیری در برابر شرایط مختلف و همچنین امکان مشاهده تخریب و ریزش‌های صورت گرفته به طور لحظه‌ای در طول تحلیل پایداری تونل، برای مدلسازی عددی در نظر گرفته شده است. در این مقاله، با تمرکز بر تونل دسترسی به گالری سد رودبار لرستان، ابتدا با استفاده از مدلسازی سیستم درزه‌های تصادفی مجزای *DFN* و بر اساس خصوصیات برداشت شده از توده‌سنگ پیرامون تونل، شکستگی‌های منطقه در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و سپس با مدل سنگ بکر منطقه پیوند داده شده است. در ادامه عملکرد سیستم‌های نگهداری شاتکریت و قاب فولادی تونل نسبت به تغییر شدت درزه‌داری توده‌سنگ بررسی شده است. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده مقاومت بیش‌تر قاب فولادی نسبت به شاتکریت در برابر تغییر شدت درزه‌داری توده‌سنگ دربرگیرنده تونل است. آسیب جدی به سیستم نگهداری شاتکریت با دو برابر شدن تعداد درزه‌ها اتفاق می‌افتد، در حالی که در مورد قاب فولادی، تخریب جدی فضا با چهار برابر شدن تعداد درزه‌ها اتفاق می‌افتد. لذا در مواردی که انتظار افزایش شدت درزه‌داری بر اثر عوامل مختلفی چون انفجار، زلزله و غیره می‌رود، سیستم نگهداری قاب فولادی دارای قابلیت اعتماد بالاتری است.

کلمات کلیدی

مدلسازی عددی، سیستم نگهداری تونل، شدت درزه‌داری، نرم‌افزار *PFC^{3D}*، سد رودبار لرستان

*عهده دار مکاتبات: mnoroozi.mine@gmail.com, mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه و سابقه موضوع تحقیق

طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها اغلب با استفاده از روش‌های تجربی طبقه‌بندی توده‌سنگ (GSI, RMR و Q) و پیشنهادات آن صورت می‌گیرد [۱، ۲]. وجود ساده‌سازی‌های زیاد، عدم توانایی در تحلیل شکل‌های پیچیده سطح مقطع، ناکارآمدی در شرایط وجود عدم قطعیت و دیگر محدودیت‌ها، کاربرد این روش‌ها را تنها به داشتن یک تخمین اولیه از شرایط پایداری سیستم نگهداری محدود می‌کند. در این زمینه مدلسازی عددی می‌تواند بسیار کارآمدتر باشد. انعطاف‌پذیری، زمان حل مناسب، هزینه کم و قابلیت طراحی‌های چندمرحله‌ای، تحلیل حساسیت سیستم نسبت به عوامل گوناگون و مقایسه عملکردها با در نظر گرفتن ویژگی‌های مختلف مقاومتی و هندسی سیستم نگهداری از امتیازات این روش است [۳]. به دلیل اهمیت فنی و اقتصادی سیستم‌های نگهداری در تونل و فضاهای زیرزمینی و با هدف دوری از طراحی‌های محافظه‌کارانه که در بسیاری از روش‌های طراحی مشاهده می‌شود، استفاده از روشی که شرایطی نزدیک به واقعیت را ایجاد کند، امری ضروری است. امروزه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه مدلسازی‌های عددی، امکان شبیه‌سازی توده‌سنگ و سیستم‌های نگهداری و نزدیکی شرایط مدل به حالت واقعی به وجود آمده است. از طرفی از آنجا که خصوصیات هندسی دسته درزه‌ها مخصوصاً شدت درزه‌داری در اثر عوامل مختلف مانند انفجار، زلزله، گسلش و غیره ممکن است دچار تغییراتی شوند، لذا ضروری است که عملکرد سیستم‌های نگهداری در شرایط مختلف درزه‌داری منطقه مورد مطالعه قرار بگیرند. در ادامه به برخی از مطالعاتی که تاکنون در زمینه بررسی پایداری سیستم‌های نگهداری تحت تأثیر تغییر شرایط درزه‌داری توده‌سنگ با روش‌های عددی صورت گرفته اشاره شده است.

پالاسی و اسدالهی در سال ۲۰۰۴، با استفاده از نرم‌افزار UDEC به بررسی تأثیر ویژگی‌های هندسی و مکانیکی درزه بر عملکرد راک بولت و شاتکریت پرداختند [۴]. مالمگرن و نردلوند در سال ۲۰۰۸ با استفاده از نرم‌افزار UDEC تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل مدول یانگ و مقاومت سنگ را روی عملکرد راک بولت و شاتکریت مورد بررسی قرار

دادند [۵]. جئورجیو و همکاران در سال ۲۰۰۸ تحلیل حساسیت حفیات قائم در سنگ سخت نسبت به شرایط تنش برجا را با استفاده از نرم‌افزارهای PFC^{3D} و PFC^{2D} انجام دادند [۶]. در این مطالعه توجه خاصی به شرایط چاه شده و کم‌تر به تأثیر پارامترهای هندسی درزه پرداخته شده است. لی و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر شاتکریت بر روی توزیع تنش و میزان جابجایی‌ها در دیواره تونل را با استفاده از نرم‌افزار دوبعدی FLAC انجام دادند [۷]. نتایج این مطالعه حاکی از کارآمد بودن شاتکریت در کنترل جابجایی‌های دیواره تونل است. در مطالعه آنها مدل DFN در نظر گرفته نشده است. روح‌پرور و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر ساختار و شرایط درزه‌داری توده‌سنگ بر سیستم نگهداری تونل با استفاده از نرم‌افزار Phase^{2D} پرداختند [۸]. در این پژوهش نیز مدل DFN ایجاد نشده است. بوون و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر پارامترهای طراحی سیستم نگهداری بر روی همگرایی تونل در سنگ درزه‌دار را با استفاده از روش المان مجزا مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. کاتساگا در سال ۲۰۱۶ به بررسی پایداری بازکننده‌های زیرزمینی با استفاده از روش مهندسی DFNE و نرم‌افزار 3DEC پرداخت [۳]. در پژوهش او درزه‌ها با طول بینهایت در نظر گرفته شده است.

با نگاهی به پژوهش‌های گذشته می‌توان دریافت که اکثر مطالعه‌های گذشته دوبعدی هستند. همچنین قابل ذکر است، در کلیه مطالعه‌هایی که سیستم‌های درزه، با مدل اجزای مجزای دوبعدی (UDEC) و سه‌بعدی (3DEC) شبیه‌سازی شده است، انتهای بسته درزه به منظور منظم نمودن سیستم درزه در این نرم‌افزارها حذف می‌شود، که سبب تغییر شبکه درزه، تغییر توزیع تنش تحت بارگذاری مکانیکی و حصول نتایج اشتباه در تعیین پارامترهای الاستیک توده‌سنگ‌های درزه‌دار می‌شود [۱۰، ۱۱]. در این نرم‌افزارهای تجاری، ترک‌زایی اولیه و خردشدن بلوک سنگی در طول فرآیندهای بارگذاری در نظر گرفته نمی‌شود. اما در عین حال، برای حالت‌هایی که مکانیزم شکست توده‌سنگ شامل شکست بلوکی و تکمیل درزه‌های غیرکامل در داخل بلوک‌های بزرگ باشد، این می‌تواند سهم مهمی در رفتار توده‌سنگ داشته باشد و نباید نادیده گرفته شود [۱۰، ۱۲]. لذا به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزارهای مورد کاربرد (UDEC و 3DEC)، می‌توان به این نتیجه رسید که

کردن تخریب صورت گرفته تحت تأثیر تغییرات تنش و شرایط ناپیوستگی‌ها در حین فرآیند تحلیل پایداری، در این مقاله انتخاب شده است.

۲- مورد مطالعاتی: تونل دسترسی به گالری جناح راست سد رودبار لرستان

محل پروژه سد و نیروگاه رودبار لرستان در استان لرستان و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز و در مسیر رودخانه رودبار قرار دارد (شکل ۱-الف). نیروگاه سد دارای ۶ تونل دسترسی است که در این مقاله، برداشت‌های انجام شده از تونل دسترسی به گالری واقع در جناح راست سد صورت گرفته است (شکل ۱-ب). این تونل دسترسی در تشکیلات دالان (به سن پرمین) متشکل از لایه‌های متوسط تا ضخیم خاکستری رنگ آهک دولومیتی واقع شده است. ضخامت لایه‌ها از ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند. جهت صفحات لایه‌بندی در حدود آزمون ۴۵ درجه و شیب ۸۵ درجه است. تونل تقریباً عمود بر امتداد لایه‌بندی حفر شده است که از جنبه حفاری و پایداری مطلوب است [۱۳].



ب

مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی میزان حساسیت سیستم‌های نگهداری فضاهای زیرزمینی نسبت به تغییرات ویژگی‌های درزه‌داری منطقه در شرایطی نزدیک به واقعیت، انجام نشده است. این خود ضرورت استفاده از روشی عددی با قابلیت شبیه‌سازی تونل و توده‌سنگ درزه‌دار در شرایطی نزدیک به شرایط برجا منطقه را واضح می‌سازد.

در این مقاله، به دلیل اهمیت شبیه‌سازی توزیع صحیح ناپیوستگی‌ها و چگونگی تأثیر تغییرات این ناپیوستگی‌ها بر پایداری فضاهای زیرزمینی، با تمرکز بر تونل دسترسی به گالری سد رودبار لرستان به عنوان یک مورد واقعی، مدل‌سازی سیستم‌های نگهداری تونل و توده‌سنگ در برگرفته آن در شرایطی نزدیک به حالت محیط واقعی با کاربرد روش DFN-DEM و با استفاده از نرم‌افزار PFC^{3D} ارایه شده است. همچنین برای نخستین بار میزان وابستگی عملکرد شاتکریت و قاب فولادی به تغییر شدت درزه‌داری توده‌سنگ، به صورت سه‌بعدی و با لحاظ دقت بسیار در شبیه‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار بررسی شده است. نرم‌افزار PFC^{3D} به دلیل قابلیت شبیه‌سازی شبکه درزه‌ها به صورت آماری و با طول‌های درزه محدود و با تعداد زیاد (شبیه‌سازی شرایط مدل بسیار نزدیک به حالت واقعی) و همچنین توانایی مدل



الف

شکل ۱: پروژه سد و نیروگاه رودبار لرستان (الف) موقعیت جغرافیایی (ب) نمای داخلی تونل دسترسی به گالری

دهنده در شبیه‌سازی که عبارت است از خواص مکانیکی سنگ بکر (مانند مقاومت تراکمی تک محوره، مدول الاستیک و نسبت پواسون) ابتدا طی چندین مرحله سعی - خطا بر اساس خواص میکرو^۲ مواد به دست می‌آیند. سپس با تعیین المان‌ها با ابعاد مناسب، مدل سنگ بکر ساخته شده و در

۳- مدل‌سازی توده‌سنگ در PFC^{3D}

مدل‌سازی توده‌سنگ در نرم‌افزار PFC^{3D} شامل دو مرحله شبیه‌سازی سنگ بکر و شبکه درزه‌های مجزا و سپس پیوند این دو مدل به یکدیگر است. خواص ماکرو^۱ مواد تشکیل

مرحله بعدی، مدل DFN به آن اضافه می‌شود. در این مقاله از نرم‌افزار PFC^{3D} نسخه ۵ استفاده شده است.

۳-۱- فرایند کالیبراسیون خواص میکرو

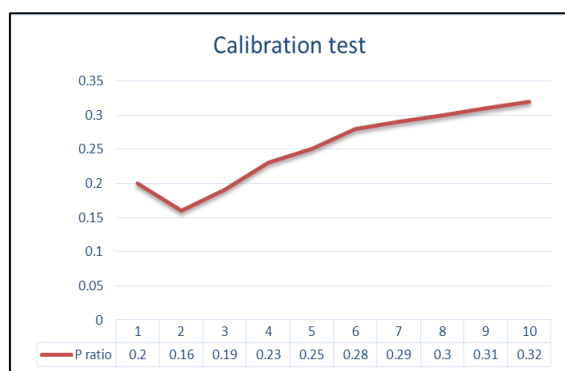
در این مطالعه، کالیبره کردن خواص میکرو، با استفاده از شبیه‌سازی سه آزمون آزمایشگاهی تراکمی تک‌محوره، تراکمی سه‌محوره و برزیلی و مقایسه نتایج آن با مقادیر آزمایشگاهی انجام شده است. مقادیر آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ محل سد رودبار لرستان، که در آزمایشگاه برای نمونه‌های سنگ سالم با قطر ۵۰ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر ۲ حاصل شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است. در نسخه ۵ نرم‌افزار PFC^{3D}، در ابتدا با استفاده از آزمون سه محوره، خواص میکروی نسبت سختی (Krat)، مدول یانگ اتصال (deform emod) و مدول یانگ بست موازی (pb_deform emod) برای دستیابی به خواص ماکروی نسبت پواسون و مدول الاستیک کالیبره شدند. سپس با کاربرد این میکروپارامترها و با استفاده از آزمون تراکمی تک محوره، دو میکروپارامتر دیگر یعنی چسبندگی بست موازی (Pb_coh) و کشش بست موازی (Pb_ten) برای رسیدن به ماکروپارامتر مقاومت تراکمی تک محوره کالیبره شدند. مدل رفتاری میکرو بین گلوله‌ها و دیوارها^۳، مدل تماسی خطی^۴ و مدل رفتاری میکرو بین گلوله‌ها^۵، مدل بست موازی خطی^۶ در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ روند کالیبراسیون در طول ده آزمایش نشان داده شده است. پس از انجام ده مرتبه شبیه‌سازی، مقادیر مقاومت فشاری

تک‌محوره، مدول یانگ و نسبت پواسون به ترتیب برابر ۲۵ مگاپاسکال، ۲۲ گیگاپاسکال و ۰/۳۲ به دست آمده است. تغییرات مقادیر میکرو پارامترها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. آزمون تراکمی تک‌محوری و آزمون سنجش نسبت پواسون و مدول الاستیک اجرا شده در نرم‌افزار PFC^{3D} به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

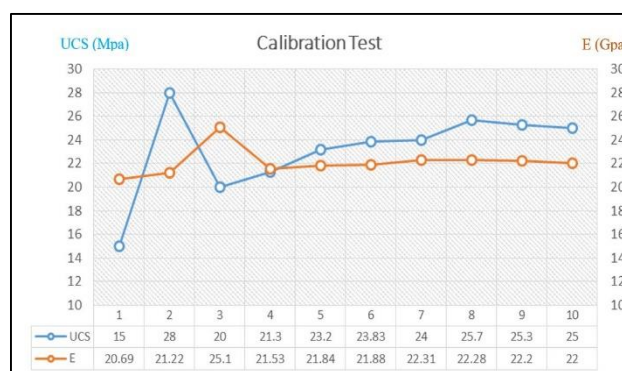
در نهایت آزمون برزیلی نیز شبیه سازی شده تا مقدار مقاومت کششی نمونه نیز بر اساس میکرو خواص حاصله کالیبره شود. در این آزمون نمونه‌ای با نسبت ضخامت به قطر برابر با ۰/۵ تهیه شد. در شکل ۵-الف آزمون برزیلی شبیه‌سازی شده و همچنین نحوه گسیختگی نمونه و در شکل ۵-ب نمودار تنش-کرنش حاصل از آن نشان داده شده است. نتیجه حاصل بیان کننده مقدار مقاومت کششی برابر ۲/۸۴ مگاپاسکال است. برای مدل ساخته شده، نسبت $\sigma_t/\sigma_c = 8/8$ به دست می‌آید که این مقدار بر این اساس تجربه مورد تایید است.

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی ماده سنگ منطقه مورد مطالعه [۱۴]

ویژگی	مقادیر آزمایشگاهی
مقاومت تراکمی تک محوره	۲۵ Mpa
مدول الاستیک (E)	۲۲ Gpa
نسبت پواسون (ν)	۰/۳۲
تخلخل	۰/۱
چگالی (γ)	۲۷۰۰ Kg/m ³



ب

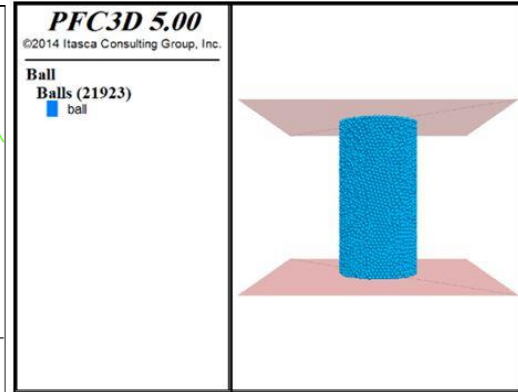
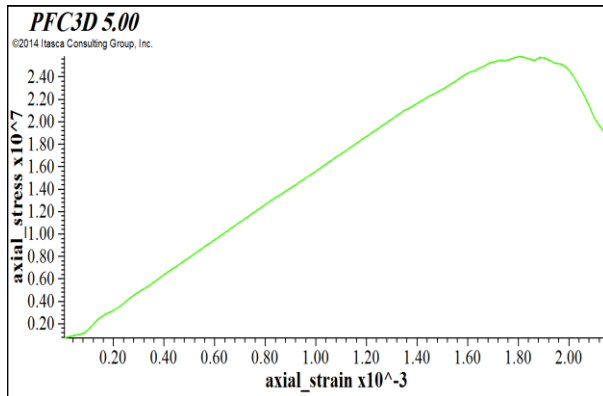


الف

شکل ۲: الف) فرایند کالیبراسیون الف) مقادیر مقاومت تراکمی تک‌محوره و مدول الاستیک ب) پارامتر نسبت پواسون

جدول ۲: مقادیر خواص میکرو بین گلوله‌ها طی فرایند کالیبره کردن مدل

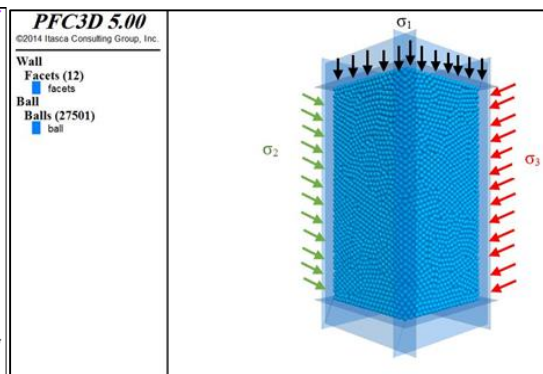
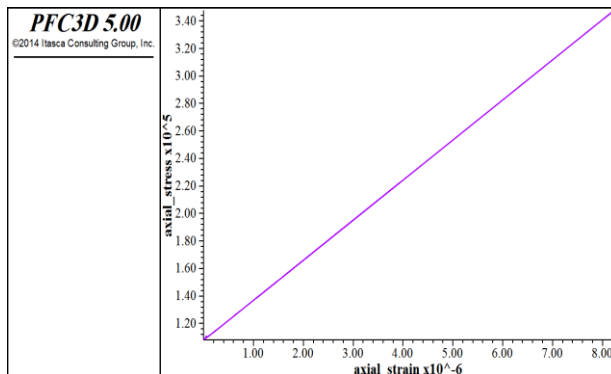
مراحل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
E (pa)	6e ⁹	6.4e ⁹	9.5e ⁹	6.1e ⁹	6.3e ⁹	6.5e ⁶	8e ⁹	7.5e ⁹	7e ⁹	6.9e ⁹
K rat(K _n /K _s)	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
Pb_coh	50e ⁶	10e ⁶	6e ⁶	6e ⁶	5e ⁶	4e ⁶	30e ⁶	40e ⁶	40e ⁶	5.16e ⁶
Pb_ten	10e ⁶	5e ⁶	5e ⁶	5e ⁶	5e ⁶	4e ⁶	8e ⁶	10e ⁶	10e ⁶	5.16e ⁶



ب

الف

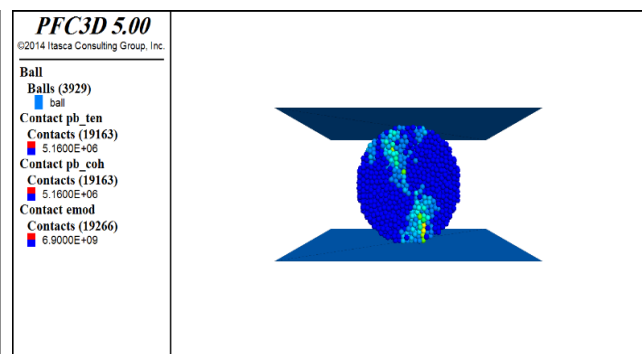
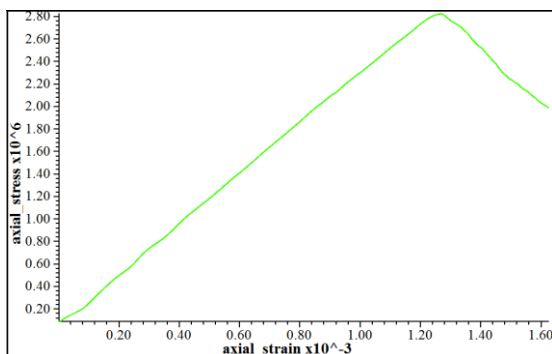
شکل ۳: آزمون تراکمی تک‌محوری (الف) شبیه‌سازی آزمون (ب) نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون



ب

الف

شکل ۴: آزمون سنجش مدول الاستیک و نسبت پواسون



ب

الف

شکل ۵: آزمون برزلی (الف) شبیه‌سازی آزمون (ب) نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون

ریزویژگی‌ها به آن اعمال شده است. موقعیت حفر تونل در مدل به نحوی است که دیواره‌های تونل از مرزهای کناری مدل به اندازه دو برابر عرض دهانه تونل فاصله داشته باشند. از آنجایی که المان‌ها در این روش مدلسازی، به صورت

۳-۲- فرایند کالیبراسیون خواص میکرو

پس از به دست آوردن ریزویژگی‌های مدل، بلوک پیرامون تونل با ابعاد ۴۰×۲۰×۹۵ ساخته شده و مقادیر

توده‌سنگ از مواد طبیعی ناهمگن و ناهمسانگرد تشکیل شده است، ممکن است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله جهت، پایایی و فاصله‌داری دارای مقادیری پراکنده در توده‌سنگ باشند. بنابراین لازم است ماهیتی تصادفی برای این ویژگی‌ها در نظر گرفته شود و در مدلسازی توده‌سنگ به کار رود [۱۵]. در این مقاله برای شبیه‌سازی سیستم شکستگی‌های محیط اطراف تونل دسترسی به گالری از مدلسازی سه‌بعدی شبکه تصادفی درزه‌های مجزا DFN استفاده شده است. ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های منطقه با برداشت‌های انجام شده از تونل به روش خط برداشت و پنجره برداشت، تعیین شده که در جدول ۴ بیان شده است.

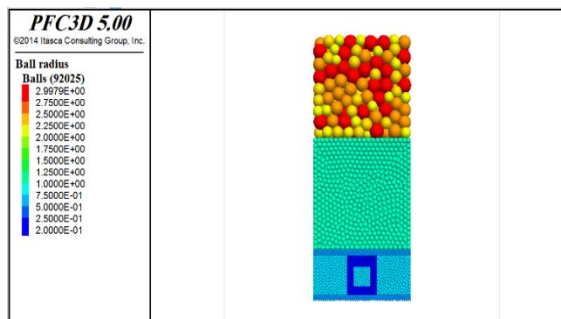
همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، شبکه‌ای از ناپیوستگی‌های مجزا بطور تصادفی در بلوکی به ابعاد $40 \times 20 \times 30$ متر مکعب به تعداد ۱۶۳۴۷ درزه شبیه‌سازی شده است. در نرم‌افزار PFC^{3D} هرچه تعداد المان‌های تشکیل دهنده مدل شبیه‌سازی شده بیش‌تر باشد، زمان و نحوه محاسبات پیچیده‌تر می‌شود. به این ترتیب به منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین کاهش پیچیدگی حل مسئله، محدوده تأثیر DFN تا ارتفاع ۱۵ متر بالاتر از تاج تونل ایجاد شده است. در ساخت مدل DFN، میکروپارامترهای مقاومتی دسته درزه‌ها شامل چسبندگی، مقاومت کششی، نیروی اصطکاک داخلی بر اساس مقادیر ذکر شده در جدول ۵ در نظر گرفته شده است. کالیبراسیون این پارامترها بر اساس مقایسه مقادیر مقاومت توده‌سنگ واقعی و نتیجه حاصل از آزمون تراکمی تک محوره توده‌سنگ در PFC انجام شده است. در این پژوهش از مدل درزه-صاف^۷ که بر سطح تماس ذرات اعمال می‌شود، برای درزه‌ها استفاده شده است. مدل SJM پیشرفت بزرگی در ویرایش‌های چهار و پنج این نرم‌افزار محسوب می‌شود. با استفاده از این مدل می‌توان رفتار سطح مشترک را بدون در نظر گرفتن جهات تماس توپ‌ها در طول سطح مشترک شبیه‌سازی نمود. بدین ترتیب می‌توان از لغزش بلوک‌های سنگی در طول سطح درزه اطمینان حاصل نمود [۱۶].

توپ‌هایی با شعاع مشخص‌اند، در قسمت‌های مختلف بلوک، ابعاد مختلفی از المان‌ها با هدف کاهش زمان محاسبات و یا افزایش دقت در نزدیکی فضای تونل اعمال شده است. مشخصات این المان‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: شرح ابعاد المان‌ها در ترازهای مختلف

توصیف ابعاد	ابعاد المان (شعاع توپ) به متر
ارتفاع ۵۰ تا ۹۵	۲ تا ۳
ارتفاع ۱۵ تا ۵۰	۱ تا ۲
ارتفاع ۵ تا ۱۵ (بلوک چپ تونل)	۰/۲ تا ۰/۵
ارتفاع ۵ تا ۱۵ (بلوک راست تونل)	۰/۲ تا ۰/۵
نزدیک فضای تونل	۰/۲

در این مقاله به اندازه ۲۰ متر از طول تونل مدلسازی شده است. پس از برقراری ویژگی‌های ساختاری سنگ، محیط به حالت تعادل رسیده و به عنوان بلوک ماده سنگ ذخیره می‌شود. در شکل ۶ مدل نهایی ماده سنگ به همراه تعداد المان‌های (توپ‌های) سازنده محیط و شعاع توپ‌ها نشان داده شده است.



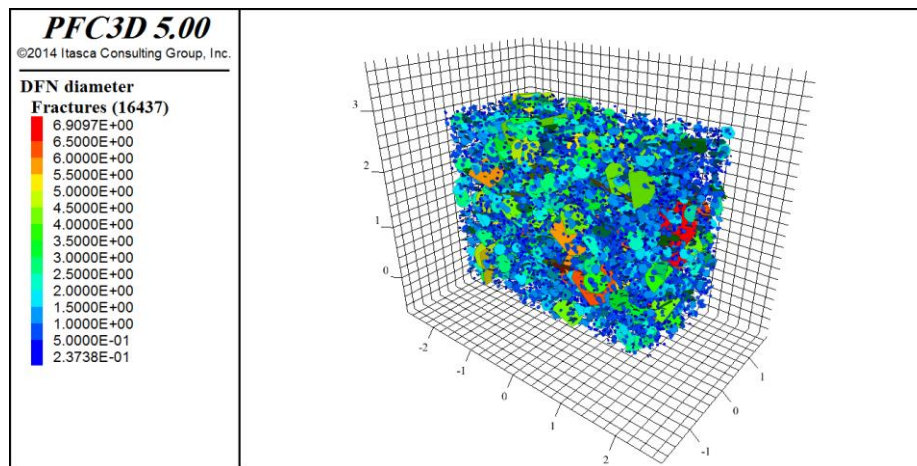
شکل ۶: بلوک ماده سنگ مدلسازی شده متشکل از المان‌های توپی نرم‌افزار PFC^{3D}

۳-۳- مدلسازی شبکه درزه بر اساس برداشت‌های میدانی

شبکه درزه‌های توده‌سنگ و ویژگی‌های هندسی آن از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مقاومت و پایداری توده‌سنگ است. نخستین گام در مطالعه رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌های درزه‌دار، ساخت مدلی هندسی از شبکه درزه متناسب با هندسه داده‌های برداشت شده از زمین است. از آنجا که

جدول ۴: خصوصیات هندسی دسته درزه‌های برداشت شده [۱۵]

دسته درزه	جهت دسته درزه Dip/DDir	ثابت توزیع فشار (k)	چگالی $P_{32}(m^{-1})$	پارامترهای توزیع طول			انحراف استاندارد
				تابع توزیع	پارامتر مقیاس	پارامتر موقعیت	
۱	۵۳/۱۲۱	۱۳/۰۳	۰/۳۶	لاگ نرمال	۰/۹۴۲	-۰/۰۸۹	۱/۵۸۵
۲	۴۸/۳۲۶	۱۶/۱۱	۰/۱۲	لاگ نرمال	۰/۸۷۶	۰/۰۵۲	۱/۵۳۶



شکل ۷: شبکه تصادفی درزه‌های مجزا (DFN) ایجاد شده در بلوک مورد نظر

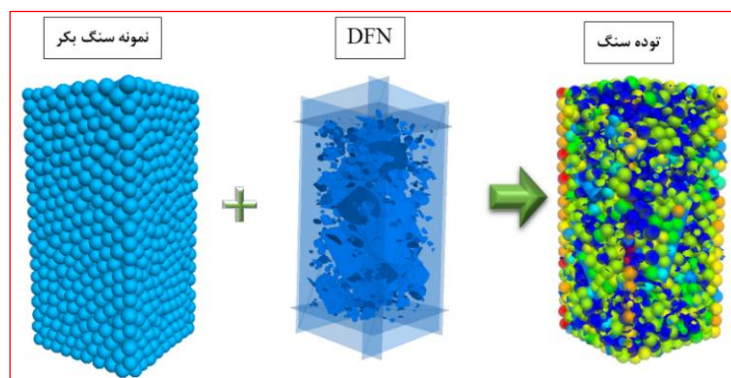
جدول ۵: خواص میکرو درزه‌ها برای ساخت مدل DFN

میکروپارامتر سطح درزه‌ها	مقاومت کششی (Mpa)	چسبندگی (Mpa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ضریب سختی برشی	ضریب سختی نرمال
علامت در PFC	Sj-ten	Sj-coh	Sj-fric	Sj-K _s	Sj-K _n
مقادیر	۲	۱۰	۰/۷	۱۰ ^{-۸}	۱۰ ^{-۸}

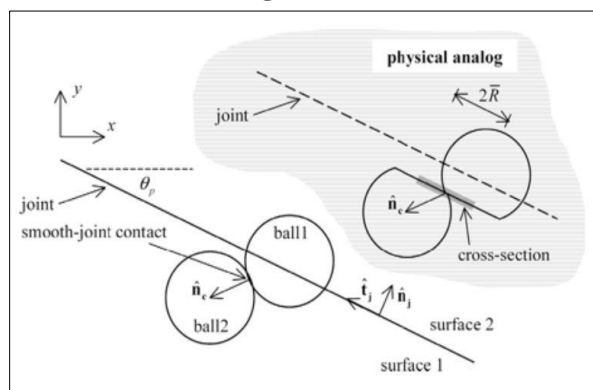
۳-۴- پیوند مدل سنگ بکر و شبکه درزه‌ها (مدل توده‌سنگ)

طبق تعریف مهندسی سنگ، به مجموعه سنگ بکر به همراه درزه‌های موجود در آن توده‌سنگ گفته می‌شود. در نرم‌افزار PFC^{3D} پس از مدل‌سازی شبکه درزه‌ها و ماده‌سنگ، دو سیستم به منظور شبیه‌سازی توده‌سنگ منطقه با هم پیوند داده می‌شوند. در شکل ۸ روند پیوند نمونه شبیه‌سازی شده سنگ بکر و شبکه تصادفی درزه‌های مجزا نشان داده شده است. در این نرم‌افزار نحوه عملکرد شبکه درزه‌ها با مدل رفتاری SMJ بر روی ماده‌سنگ به این ترتیب است که تماس‌های برقرار شده بین توپ‌ها را قطع کرده و از این طریق باعث ضعیف شدن و کاهش چشم‌گیر مقاومت و همچنین موجب حرکت قطعات تشکیل شده بر روی هم در امتداد درزه‌ها می‌شود (شکل ۹).

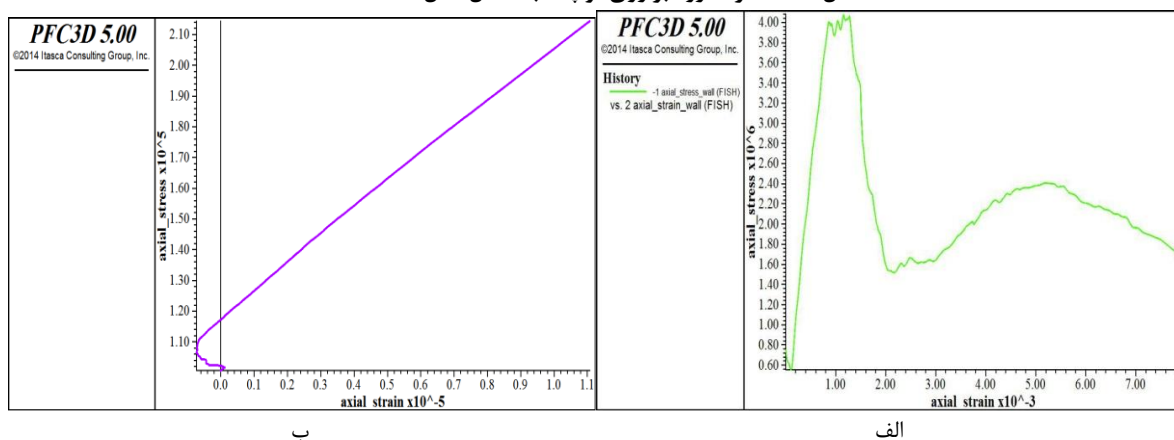
مطالعات عددی انجام شده بر روی توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه، کاهش مقاومت تراکمی تک‌محوره از مقدار ۲۵ مگاپاسکال به ۴/۳۵ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. همچنین نسبت پواسون توده‌سنگ از ۰/۳۲ به ۰/۳۸ افزایش یافته و مدول الاستیک نیز به ۱۲/۰۲ گیگاپاسکال کاهش یافته است [۱۴]. برای دستیابی به این نتایج، آزمون‌های بارگذاری تک‌محوره و سه‌محوره، مجدداً بر روی توده‌سنگ شبیه‌سازی شده اجرا شدند. همانطور که در بخش مدل‌سازی شبکه درزه‌ها نیز توضیح داده شد، به طور هم‌زمان در این مرحله کالیبراسیون میکروپارامترهای درزه‌ها تا حصول نتایج انجام شد. کاهش مقاومت تراکمی تک‌محوره، نسبت پواسون و مدول الاستیک همگی می‌توانند در ناپایداری فضای حفاری شده در این منطقه نقش کلیدی ایفا کنند. نتایج آزمون بارگذاری تک‌محوره و سه‌محوره به منظور تعیین خواص ماکرو توده‌سنگ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸: روند پیوند نمونه سنگ بکر و شبکه تصادفی درزه‌های مجزا DFN و تشکیل توده‌سنگ



شکل ۹: عملکرد درزه بر روی توپ‌ها با اعمال مدل SMJ [۱۶]



شکل ۱۰: آزمون‌های بارگذاری توده‌سنگ در PFC^{3D} (الف) آزمون تراکمی تک‌محوره (ب) آزمون سه‌محوره

در نرم‌افزار PFC^{3D} با استفاده از حذف المان‌ها در یک محدوده مشخص به صورت استوانه و یا مکعبی شکل و یا ترکیبی از هر دو، حفر تونل را می‌توان شبیه‌سازی نمود. برای تونل مورد مطالعه در این پژوهش که به شکل نعل اسبی است، استوانه‌ای در بالای یک مکعب مستطیل حفر شده است. اندازه و موقعیت تونل، اندازه روباره و ناحیه تاثیر DFN در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در محدوده تونل ۱۴۸۱۳ توپ قرار داشت که با حفر تونل از مدل حذف شدند. علاوه بر توپ‌های موجود در محدوده تونل، همان طور که در شکل

۴- تحلیل پایداری سازه

هدف از این مقاله، بررسی پایداری تونل نسبت به تغییرات شدت درزه‌داری توده‌سنگ است. برای این منظور پس از شبیه‌سازی توده‌سنگ مورد نظر، با شبیه‌سازی حفاری تونل و اعمال سیستم‌های نگهداری امکان تحلیل پایداری فراهم شده است.

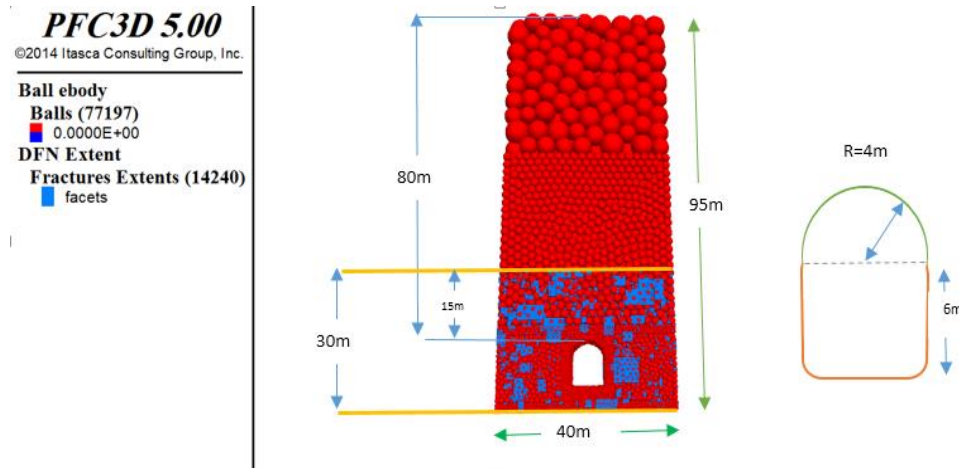
۴-۱- مدلسازی حفر تونل

۱۱ مشاهده می‌شود، درزه‌های موجود در توده سنگ در ناحیه تونل نیز حذف شده‌اند.

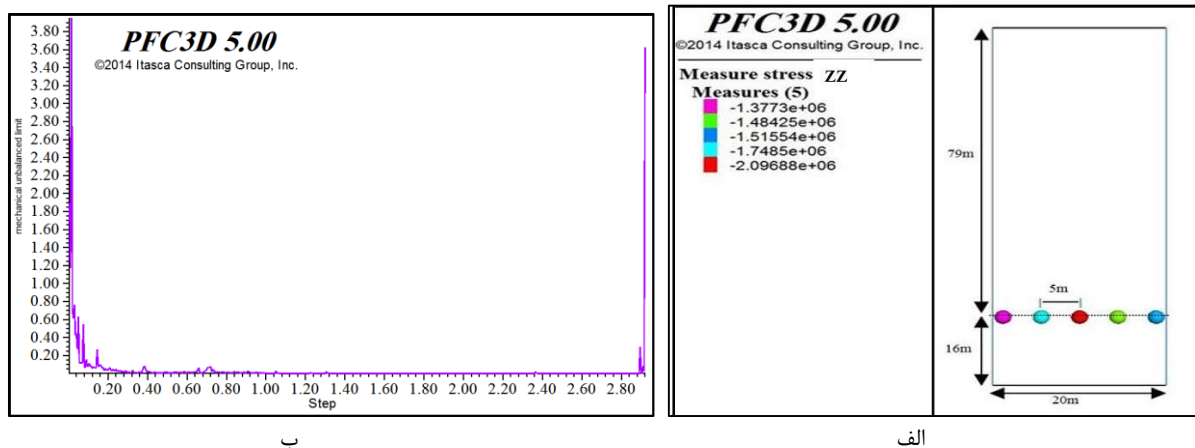
۲-۴- عملکرد تونل بدون سیستم نگهداری

در این بخش وضعیت تونل بدون سیستم نگهداری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، در قسمت تاج تونل و در امتداد طول تونل، تعداد ۵ ابزار اندازه‌گیری تنش^۸ قرار داده شده تا در حین تحلیل پایداری تونل، بتوان تنش وارد شده در هر لحظه را اندازه‌گیری و مشاهده کرد (شکل ۱۲-الف). این ابزار به صورت یک کره است که تعدادی از توپ‌ها را دربر گرفته و در هر لحظه سه مؤلفه اصلی تانسور تنش در محل قرارگیری‌شان شامل σ_{xx} ، σ_{yy} ، σ_{zz} را محاسبه

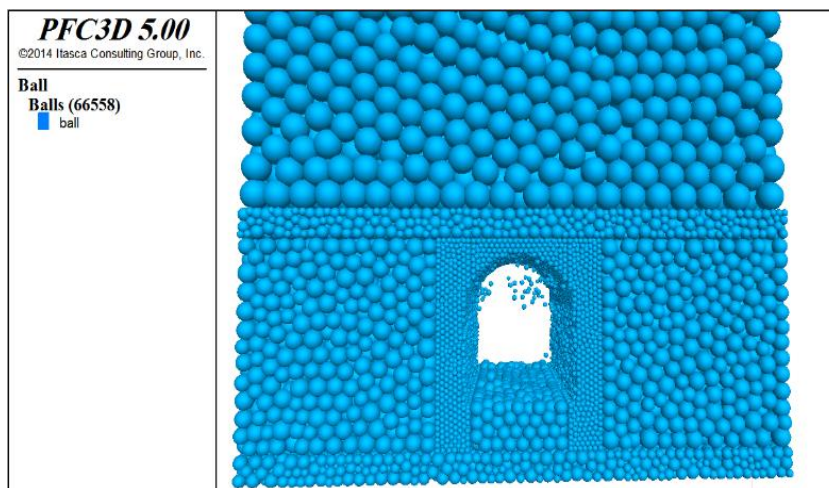
می‌کند. شعاع کره‌های اندازه‌گیری متناسب با ابعاد توپ‌ها و برابر با ۱ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲-الف بیشینه تنش وارد بر تاج تونل در حالت بدون نگهداری در مترائهای مختلف طول تونل نشان داده شده است. بر این اساس بیشینه تنش وارد بر تاج تونل ۲/۰۹۷ مگاپاسکال است که در مترائ ۱۰ تونل رخ می‌دهد. از طرفی همان‌طور که در شکل ۱۲-ب نشان داده شده، افزایش نیروهای نامتعادل تنها اندکی پس از اعمال بارگذاری بیان‌کننده این مفهوم است که توده سنگ پیرامون تونل ناپایدار است. این ناپایداری در شکل ۱۳ نیز به طور شماتیک نشان داده شده است. به منظور پایداری تونل، بلافاصله بعد از حفر تونل باید سیستم نگهداری اعمال شود.



شکل ۱۱: نمایش اندازه و موقعیت تونل، اندازه روباره و ناحیه تأثیر DFN



شکل ۱۲: الف) ابزارهای اندازه‌گیری به منظور محاسبه بیشینه تنش وارد بر تاج تونل در مترائهای مختلف طول تونل ب) نمودار نیروهای نامتعادل و افزایش آن هنگام ریزش تونل در حالت بدون سیستم نگهداری



شکل ۱۳: ریزش تونل بدون اعمال سیستم نگهداری

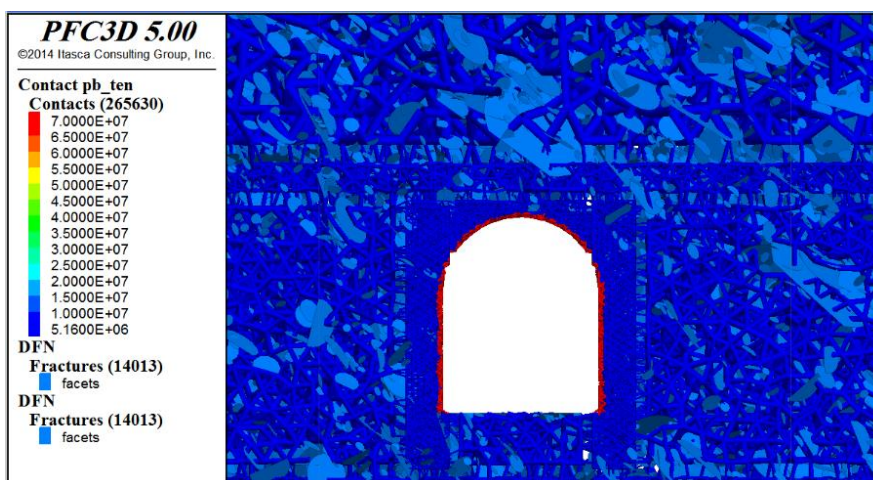
۴-۳- اجرای سیستم‌های نگهداری

سیستم‌های نگهداری شاتکریت و قاب فولادی از رایج‌ترین نوع نگهدارنده‌ها در فضاهای زیرزمینی هستند. شبیه‌سازی این نگهدارنده‌ها در نرم‌افزارهای عددی بیش‌تر به صورت المان‌های ساختاری پیش‌بینی شده است. اما در نرم‌افزار PFC^{3D} هیچ المان ساختاری برای شبیه‌سازی سیستم نگهداری در تونل پیش‌بینی نشده است. به این منظور با استفاده از ایجاد المان‌های جدید و خواص مخصوص آنها، قاب فولادی و شاتکریت شبیه‌سازی شده که در ادامه شرح داده شده است.

۴-۳-۱- شبیه‌سازی سیستم نگهداری شاتکریت

با توجه به این موضوع که هر چه شرایط به حالت واقعی نزدیک باشد، پاسخ‌های به دست آمده قابل اطمینان‌تر خواهند بود، باید مقداری همگرایی انجام شده در تونل قبل

از اعمال نگهداری دائمی رعایت شود تا شرایط رهایی تنش به خوبی مدل شود. در نتیجه ابتدا اجازه داده می‌شود تا مقداری همگرایی الاستیک (قبل از وقوع ریزش و رسیدن به حد پلاستیک) در دیواره‌ها و سقف رخ دهد. سپس با اعمال سیستم شاتکریت، محیط پایدار شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، عملکرد شاتکریت برای نگهداری مدل به صورت تقویت کردن تماس‌های موجود در محدوده شبیه‌سازی شاتکریت انتخاب شده است. ویژگی‌های مکانیکی شاتکریت موردنیاز در جدول ۶ ارائه شده است. به منظور دست پیدا کردن به این خواص، با فرآیند کالیبراسیونی همانند آنچه که برای سنگ سالم بیان شد، میکروپارامترهای ارائه شده در جدول ۷ برای شاتکریت حاصل شده است.



شکل ۱۴: عملکرد شاتکریت برای نگهداری فضای تونل (رنگ قرمز محدوده شاتکریت است)

جدول ۶: مشخصات مکانیکی شاتکریت اجرا شده در مدل

خواص ماکرو شاتکریت	ضخامت (cm)	مقاومت تراکمی تک‌محوره (Mpa)	مدول الاستیک (Gpa)	نسبت پواسون
مقادیر	۲۰	۲۵۰	۳۳/۵	۰/۱۶

جدول ۷: خواص میکرو کالیبره شده برای شاتکریت

خواص میکرو	Krat	Pb_ten	Pb_coh	pb_deform emod	deform emod
مقادیر	4	70e6	70e6	20e9	20e9

۴-۳-۲- شبیه‌سازی سیستم نگهداری قاب فولادی

از رایج‌ترین استانداردهای موجود در طراحی قاب‌های فولادی می‌توان به استاندارد آمریکایی و انگلیسی در این زمینه اشاره کرد. بر اساس استاندارد BS EN 10088-1 نوع مقطع پیشنهادی برای مصارف صنعتی (از جمله نگهداری فضاهای زیرزمینی) مقطع H شکل است [۱۷]. در این مقاله، سطح مقطع مستطیلی به ابعاد ۲۰×۸۰ سانتی‌متر برای هر یک از قاب‌های اصلی، سطح مقطع ۲۰×۵۰ سانتی‌متر برای لارده‌های به کار رفته در دیواره و سطح مقطعی با ابعاد ۴۰×۲۰ سانتی‌متر برای لارده سقف در سرتاسر طول تونل

شبیه‌سازی شده است. مشخصات فولاد به کار رفته در شبیه‌سازی قاب فولادی اصلی و همچنین لارده‌های بین آن در جدول ۸ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۹ میکرو خواص کالیبره شده فولاد نیز ارائه شده است. لازم به ذکر است که در نظر گرفتن ضریب رانکین و سایر پارامترهایی که در مقاومت قاب فولادی اثرگذارند مثل ممان اینرسی در این مقاله امکان‌پذیر نبوده است و قاب به صورت یک تیر صلب با شکلی ساده و با ابعاد ذکرشده، شبیه‌سازی شده است.

جدول ۸: مشخصات فولاد به کار رفته در شبیه‌سازی قاب فولادی [۱۷]

کد مقطع در استانداردهای	نام (شماره)	وزن مخصوص (Kg/m^3)	مقاومت کششی (Mpa)	UCS (Mpa)	مدول الاستیک (Gpa)	نسبت پواسون
316L	X2CrNiMo17-12-2	8000	520-670	220	200	0.2
316S11	1.4404					

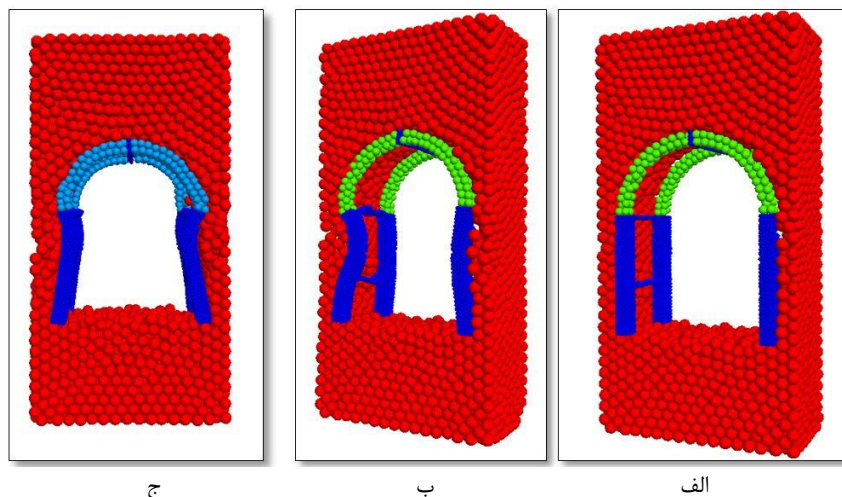
جدول ۹: خواص میکرو کالیبره شده برای فولاد

خواص میکرو	Krat	Pb_ten	Pb_coh	pb_deform emod	deform emod
مقادیر	4	105e6	105e6	85e9	85e9

به منظور نمایش قابلیت تغییر شکل‌پذیری قاب فولادی در محدوده‌های مختلف (پایدار تا گسیختگی کامل) مدلی مفهومی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همچنین برای بهینه‌سازی تعداد قاب‌ها در طول تونل، تحلیل حساسیت فواصل قاب‌ها از یکدیگر و همچنین لارده‌های رابط آنها انجام شد. بر این اساس، اندازه دو قاب متوالی برای پایداری تونل ۴ متر و فاصله لارده‌ها (۳ لارده در راستای محور تونل در هر یک از طرفین و یک لارده در سقف) از هم ۱/۵ متر برآورد شده است.

وجود عدم قطعیت‌ها در ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های منطقه و خصوصیات آنها از جمله نگرانی‌هایی است که امروزه در زمینه طراحی سیستم‌های نگهداری تونل و فضاهای زیرزمینی وجود دارد [۳]. خصوصیات هندسی و مقاومتی دسته درزه‌های منطقه تحت تأثیر بارهای دینامیکی ناشی از انفجار، زلزله و گسلش می‌تواند تغییر کند. ایجاد درزه‌های جدید و یا گسترش درزه‌های قبلی در محیط به طور موثری می‌تواند شدت درزه‌داری منطقه (P_{32}) را تغییر دهد. در ادامه این مقاله با تغییر اندازه شدت درزه‌داری، عملکرد سیستم‌های نگهداری، مورد مطالعه قرار گرفته است.

۵- بررسی تغییر شدت درزه‌داری توده سنگ بر سیستم‌های نگهداری تونل



شکل ۱۵: مدل مفهومی قاب فولادی با قابلیت تغییر شکل‌پذیری (الف) پایدار (ب) تغییر شکل از یک طرف (ج) تغییر شکل کامل از طرفین در مرز گسیختگی

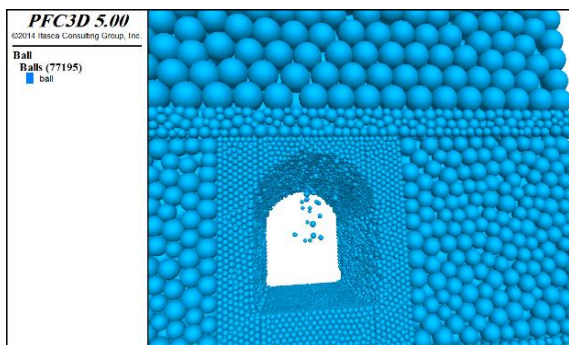
۵-۱- عملکرد سیستم نگهداری شاتکریت نسبت به تغییر شدت درزه‌داری

سیستم نگهداری تونل دسترسی سد رودبار لرستان بررسی و نتایج در جدول ۱۰ نشان داده شده است. تعداد درزه‌ها در بلوکی به ابعاد $30 \times 20 \times 40$ متر مکعب ایجاد شده است. حالت اول، شدت درزه واقعی بر اساس برداشت‌های میدانی است. شدت آسیب به تونل بر اساس تعداد المان‌های ریزشی در گام‌های زمانی^۹ یکسان بیان شده است.

شدت درزه‌داری توده‌سنگ پارامتر مهم تعیین کننده تعداد درزه‌ها در شبیه‌سازی شبکه درزه‌های منطقه است. در این بخش با تغییر آن و در نتیجه تغییر تعداد درزه‌ها، میزان تأثیر آن بر عملکرد سیستم نگهداری شاتکریت به عنوان

جدول ۱۰: تأثیر تغییر شدت درزه‌داری بر عملکرد شاتکریت

مراحل	شدت درزه‌داری		درصد افزایش شدت درزه‌داری	تعداد درزه‌ها	شدت آسیب	شرح آسیب
	دسته درزه ۱	دسته درزه ۲				
۱	۰٫۳۶	۰٫۱۲	۰	۱۴۲۷۸	پایدار	همگرایی مجاز
۲	۰٫۴	۰٫۱۶	۲۰	۱۷۱۳۰	بسیار جزئی	ناپایداری در دیواره‌های تونل
۳	۰٫۴۴	۰٫۲	۳۸	۱۹۷۱۴	متوسط	ریزش در سقف
۴	۰٫۵	۰٫۳	۶۷	۲۳۹۷۳	نسبتاً زیاد	ریزش در سقف و دیواره سمت راست
۵	۰٫۶	۰٫۴	۱۱۰	۳۰۰۰۵	زیاد	ریزش در سقف و دیواره‌ها
۶	۰٫۷	۰٫۵	۱۴۷	۳۵۳۸۴	شدید	ریزش در سرتاسر تاج تونل
۷	۱	۱	۳۲۰	۶۰۱۰۲	خیلی شدید	ریزش در سرتاسر تاج تونل و دیواره‌ها

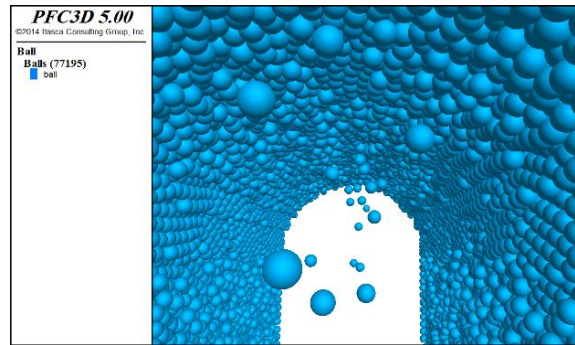


شکل ۱۶: ریزش شدید سقف تونل در مرحله ۶

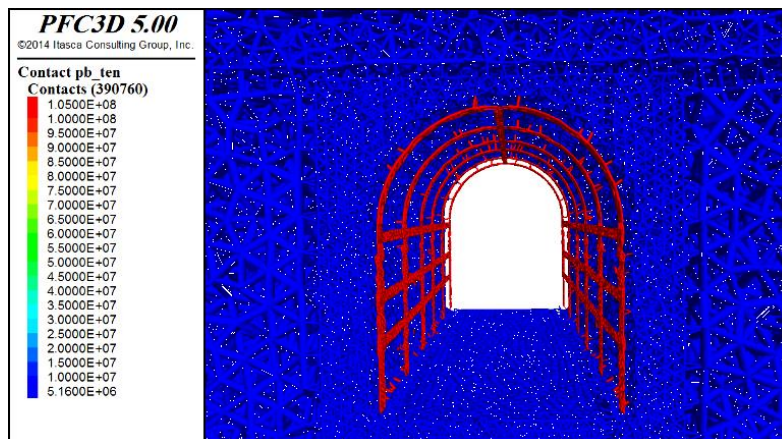
در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ ریزش تونل همراه با نگهداری شاتکریت در مراحل ۶ و ۷ نشان داده شده است. به طور مشخص، مقایسه عملکرد سیستم نگهداری شاتکریت در شرایط مختلف شدت درزه‌داری نشان‌دهنده عدم توانایی شاتکریت در کاربرد به عنوان سیستم نگهداری دائمی در صورت افزایش ۴۰ درصدی شدت درزه‌داری است.

۵-۲- عملکرد سیستم نگهداری قاب فولادی نسبت به تغییر شدت درزه‌داری

در این بخش در ابتدا با توجه به شرایط کنونی منطقه و شبیه‌سازی توده‌سنگ اطراف تونل، با اجرای سیستم قاب فولادی طراحی شده (شکل ۱۸)، پایداری تونل حاصل شده است. سپس با تغییر شرایط درزه‌داری در توده‌سنگ شبیه‌سازی شده، عملکرد سیستم قاب فولادی بررسی شده است.



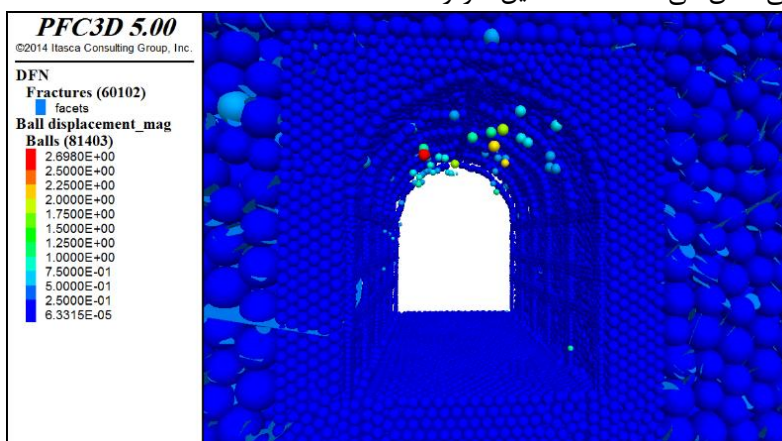
شکل ۱۷: ریزش خیلی شدید سقف و دیواره‌های تونل در مرحله ۷



شکل ۱۸: پایدارسازی تونل با استفاده از قاب فولادی

می‌توان افزایش احتمال تشکیل گوه در اثر اتصال درزه‌های موجود در توده‌سنگ در اطراف فضای تونل دانست که نهایتاً موجب افزایش بار وارد بر سیستم نگهداری می‌شود. در نهایت در مرحله ۷ قاب به طور کامل و در گام‌های زمانی اولیه گسیخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، المان‌های جدا شده مربوط به ساختار قاب هستند. نتایج کامل حاصل از ۷ مرحله تحلیل حساسیت قاب فولادی نسبت به تغییر شرایط درزه‌داری در جدول ۱۱ ارائه شده است.

پارامتر تعیین میزان حساسیت سیستم نگهداری قاب فولادی، تعداد المان‌های ریزشی مدل و مدت زمان وقوع این ریزش‌ها یا تغییر شکل‌ها در تونل است. نتایج به دست آمده، نشان دهنده مقاومت بیش‌تر قاب فولادی نسبت به شاتکریت در برابر تغییر شدت درزه‌داری توده‌سنگ دربرگیرنده تونل است. در مراحل اولیه افزایش شدت درزه‌داری توده‌سنگ، ریزش تنها در حد فاصل دو قاب در تاج تونل رخ می‌دهد (در صورتی که گام‌های زمانی بسیار زیاد در نظر گرفته شود). با نزدیک شدن تحلیل حساسیت به مراحل پایانی، تغییر شکل قاب نیز به صورت جزئی اتفاق می‌افتد که علت این امر را



شکل ۱۹: گسیختگی کامل قاب فولادی در ناحیه قوسی (مرحله ۷)

جدول ۱۱: تأثیر تغییر شدت درزه‌داری بر عملکرد قاب فولادی

مرحله	شدت درزه‌داری		تعداد درزه‌ها	درصد افزایش شدت درزه‌داری	شدت آسیب به تونل	شدت آسیب به قاب فولادی	شرح آسیب
	دسته ۱ درزه	دسته ۲ درزه					
۱	۰/۳۶	۰/۱۲	۱۴۲۷۸	۰	پایدار	---	---
۲	۰/۴	۰/۱۶	۱۷۱۳۰	۲۰	پایدار	بدون آسیب	بسیار جزئی در ناحیه سقف
۳	۰/۴۴	۰/۲	۱۹۷۱۴	۳۸	بسیار جزئی	همگرایی بسیار جزئی در تاج تونل در مدت زمان طولانی	بسیار جزئی در ناحیه سقف
۴	۰/۵	۰/۳	۲۳۹۷۳	۶۷	بسیار جزئی	بسیار جزئی در ناحیه سقف در مدت زمان نسبتاً زیاد	بسیار جزئی در ناحیه سقف
۵	۰/۶	۰/۴	۳۰۰۰۵	۱۱۰	متوسط	جزئی در ناحیه سقف در مدت زمان کوتاه	جزئی در ناحیه سقف
۶	۰/۷	۰/۵	۳۵۳۸۴	۱۴۷	نسبتاً زیاد	همگرایی در ناحیه قوسی در مدت زمان طولانی	ریزش نسبتاً زیاد سقف تونل در اثر تشکیل گوه
۷	۱	۱	۶۰۱۰۲	۳۲۰	زیاد	گسیختگی قاب در ناحیه قوسی در زمان کوتاه	ریزش زیاد تاج تونل

۶- تحلیل نتایج و پیشنهادات

در این مقاله شبیه‌سازی تونل بر اساس برداشت‌های انجام شده از توده‌سنگ دربرگیرنده تونل دسترسی به گالری سد رودبار لرستان با هدف بررسی تأثیر شدت درزه‌داری توده‌سنگ بر عملکرد سیستم‌های نگهداری شاتکریت و قاب فولادی در تونل با استفاده از مدلسازی عددی DFN-DEM صورت گرفت که نتایج زیر به دست آمد:

۱- شدت درزه‌داری توده‌سنگ‌های اطراف فضاهای زیرزمینی تحت تأثیر عوامل مختلف قابل تغییر است، بنابراین سیستم‌های نگهداری باید در این شرایط مورد بررسی قرار گیرند.

۲- مطالعات صورت گرفته تاکنون به دلیل ساده‌سازی‌های موجود در شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و برخی محدودیت‌های نرم افزارهای به کار رفته، قادر به پاسخگویی نحوه عملکرد سیستم‌های نگهداری در شرایط تغییر شدت درزه‌داری توده‌سنگ نبودند.

۳- تغییرات به وجود آمده در شاتکریت در گام‌های زمانی اولیه اجرای مدل رخ داده است. این عملکرد ناشی از غیر صلب بودن سیستم نگهداری است و باید پس از اجرای شاتکریت، بلافاصله سیستم نگهداری دیگری نظیر راک‌بولت یا قاب فولادی در تونل به منظور مقاومت در برابر تغییر شدت درزه‌داری احتمالی توده‌سنگ اجرا شود.

۴- عملکرد سیستم نگهداری شاتکریت در شرایط مختلف شدت درزه‌داری نشان دهنده عدم توانایی آن در کاربرد به عنوان سیستم نگهداری دائمی در صورت افزایش ۴۰ درصدی شدت درزه‌داری است.

۵- قاب فولادی دارای مقاومت بالاتری در برابر افزایش شدت درزه‌داری توده‌سنگ نسبت به سیستم نگهداری شاتکریت است. شدت آسیب به تونل و ساختار قاب تا ۶۷ درصد افزایش شدت درزه‌داری بسیار جزئی بوده است. این شدت از آسیب مترادف با ۲۰ درصد افزایش شدت درزه‌داری در نگهداری با شاتکریت است. آسیب محسوس به تونل در حالت نگهداری با قاب فولادی در گام‌های زمانی نسبتاً زیاد اتفاق می‌افتد. این امر می‌تواند به صلبیت بالای سیستم نگهداری ارتباط داده شود.

آسیب جدی به سیستم نگهداری شاتکریت با دو برابر شدن تعداد درزه‌ها اتفاق می‌افتد، درحالی‌که در مورد قاب فولادی، تخریب جدی فضا با چهار برابر شدن تعداد درزه‌ها اتفاق می‌افتد.

مراجع

[1] Abrah, B., Faramarzi, L. (2012), Temporary support system design by experimental and numerical methods for ponstak tunnels of Rudbar Lorestan dam, 9th National Congress on Civil Engineering, Mashhad, (In Persian).

- [10] Yang, J.P., Chen, W.Z., Yang, D.S., Yuan, J.Q. (2015), Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling, *Computers and Geotechnics*, 64, 20–31.
- [11] Yang, J.P., Chen, W.Z., Dai, Y.H., Yu, H.D. (2014), Numerical determination of elastic compliance tensor of fractured rock masses by FEM modeling, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 70, 474–482.
- [12] Vallejos, J., Brzovic, A., Lopez, C., Bouzeran, L., Mas Ivars, D. (2013), Application of the Synthetic Rock Mass approach to characterize rock mass behavior at the El Teniente Mine, Chile, *The 3rd International FLAC/DEM Symposium*, Itasca Consulting Group, Hangzhou, China, p.15.
- [13] Second Report of Geology Engineering, (2007), Rudbar Lorestan Dam & Hydropower Plant, Iran Water & Power Resources development Co, (In Persian).
- [14] New Diversion Tunnel Report. (2013), Rudbar Lorestan Dam & Hydropower Plant. Iran Water & Power Resources development Co.
- [15] Noroozi, M., kakaie, R., jalali, S.E. (2015), Three-dimensional geometrical simulation of rock mass discontinuities network in the access tunnel of Rudbar Lorestan dam & hydropower plant, *Tunneling & Underground Space Engineering*, Volume 4, Issue 1, 53-68, (In Persian).
- [16] Itasca, (2010), PFC3D-Particle flow code in 3-dimensions, version 4.0, user's manual, vols. I & II, Itasca Consulting Group, Inc.
- [17] Baddoo, N.R., Burgan, B.A. (2012), Structural design of stainless steel, *The Steel Construction Institute*, UK, SCI P29, ISBN 1 85942 116 4.
- [2] Golnari, S., Hamidvand, M., Vahedi, M., Mokhtari, M. (2014), Stability Analysis and Support Design of Garin Dam Water Diversion Tunnel, 1st National Conference of Architecture, Construction and Urban Environment, (In Persian).
- [3] Katsaga, T. (2016), Stability evaluation of underground opening using a Discrete Fracture Network Engineering (DFNE) approach. Itasca International Inc, Minneapolis, ISBN 978-0-09767577-4-0.
- [4] Palassi, M., Asadollahi, P. (2004), Design of Rockbolt and Shotcrete for Tunnels in Jointed Rock. 57th Canadian Geotechnical Conference, Quebec City.
- [5] Malmgren, L., Nordlund, E. (2008), Interaction of shotcrete with rock and rock bolts: a numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(4), 538-553.
- [6] Hadjigeorgiou, J., Esmaili, K., Grenon, M. (2008), Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 296–308.
- [7] Li, L., Wu, A.X., Wang, Y.M.. (2013), Mechanism of wet shotcrete interacting with rock in support systems. *J. Cent. South Univ*, 20(3), 821–829.
- [8] Roohparvar, F., Moadeli, A., Ebadi, M. (2014), Investigation of the effect of the structure and joints conditions of the rock mass on tunnel support system, 1st National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tehran, (In Persian).
- [9] Boon, C.W., Houlsby, G.T., Utili, S. (2015), Designing Tunnel Support in Jointed Rock Masses via the DEM. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(2), 603–632.

⁶ linear parallel bond model

⁷ Smooth Joint Model (SJM)

⁸ Measure tool

⁹ Time step

¹ Macro properties

² Micro properties

³ ball-facet

⁴ linear contact model

⁵ ball-ball