

تأثیر کاهش شیب دیواره معدن چغارت بر پایداری به روش شبکه‌ی شکستگی مجزا - المان مجزا

میرحسین شهامی^۱؛ میثم لک^۲؛ علیرضا یاراحمدی بافقی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، m.h.shahami@gmail.com
۲- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، meysam.lak@stu.yazd.ac.ir
۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی و پژوهشکده مهندسی معدن، دانشگاه یزد، ayarahmadi@yazd.ac.ir
(دریافت ۱۶ دی ۱۳۹۴، پذیرش ۱۴ خرداد ۱۳۹۶)

چکیده

تحلیل پایداری شیب دیواره‌های معادن سطحی به خصوص شیب‌های سنگی، از جمله مهم‌ترین مسائل مورد توجه در طراحی معادن سطحی است که با اجرای یک مدل‌سازی ژئوتکنیکی قابل دسترسی است. این مدل ژئوتکنیکی برای توده‌سنگ‌های درزه‌دار ایجاد می‌شود و شامل دو زیر مدل به نام‌های مدل هندسی و مکانیکی است. مدل هندسی توده‌های سنگی شامل شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا (DFN) است که براساس وضعیت توپوگرافی، حدود مدل، بلوک‌های تکتونیک و ناپیوستگی‌های موجود ایجاد می‌شود. مدل مکانیکی با هدف تحلیل‌های مکانیکی (استاتیکی یا دینامیکی) توده‌سنگ ایجاد شده و شامل بررسی پارامترهای ژئومکانیکی، وضعیت تنش‌های برجا، شرایط آب‌های زیرزمینی، قوانین حاکم بر مقاومت و رفتار توده‌سنگ، روش‌های تحلیل پایداری و در نهایت قیاس و نتیجه‌گیری در مورد پایداری مکانیکی است. هدف از این مقاله، ایجاد یک مدل ژئوتکنیکی و تحلیل مکانیکی مربوط به آن برای بلوک تکتونیک شماره ۲-۴ معدن سنگ آهن چغارت در دو مقطع از کاواک قدیم و جدید و مقایسه‌ی آن‌ها برای بررسی تغییرات پایداری دیواره‌ی مذکور در طراحی شیب جدید است. برای دستیابی به این هدف، مدل‌سازی هندسی با روش شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا در سیستم ناپیوستگی‌های نامحدود غیر ترتیبی با تمرکز بر حذف اثر تصادفی مدل‌سازی هندسی، و تحلیل مکانیکی مربوط به آن به وسیله‌ی نرم‌افزار المان مجزای UDEC انجام و نتایج تحلیل شدند. بررسی‌ها نشان دهنده‌ی جابجایی‌های کمتر و ثبات بیشتر دیواره‌ی جدید نسبت به دیواره‌ی قدیمی است.

کلمات کلیدی

تحلیل پایداری، مدل‌سازی هندسی، شبکه‌ی شکستگی مجزا، مدل‌سازی عددی، UDEC

۱- مقدمه

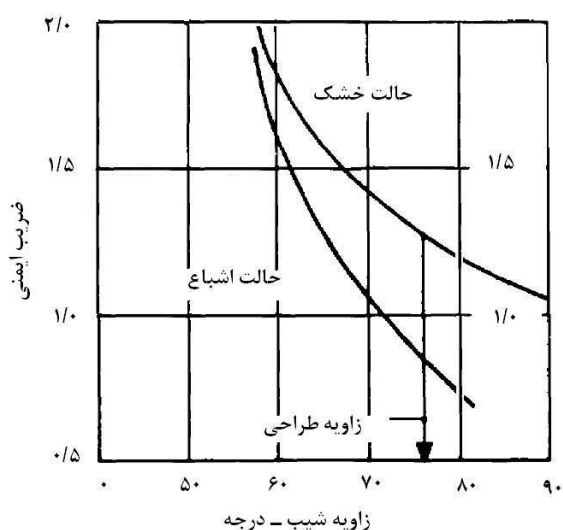
توده سنگ و به تبع آن شیروانی‌های سنگی اغلب دارای ناپیوستگی هستند. بنابراین مدل‌سازی شیب سنگ‌های درزه‌دار به صورت ناپیوسته به واقعیت نزدیک‌تر است. سیستم هندسی و نحوه‌ی قرار گرفتن درزه‌ها در توده سنگ بسیار پیچیده است. کیفیت و کمیت پارامترهای هندسی برداشت شده از درزه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه که در دیدرس قرار دارند، محدود و دارای عدم قطعیت است. راه حل عمده برای از بین بردن این عدم قطعیت و نزدیک کردن سیستم درزه‌های موجود زمین به واقعیت، استفاده از شبکه‌ی درزه‌ی مجزای

فعالیت‌های مختلف مهندسی، نیازمند ایجاد فضاهای سطحی و زیرزمینی در ابعاد مختلف است. در مهندسی معدن، معادن روباز برای استخراج مواد معدنی نزدیک به سطح ایجاد می‌شوند. این فضاها در ابعادی با مساحت کم و عمق کم‌تر از ۱۰۰ متر شروع و تا مساحت‌های صدها هکتاری و عمق بیشتر از ۸۰۰ متر ادامه می‌یابد [۱]. طراحی شیب‌های سنگی و مطالعه و بررسی پایداری آن‌ها مهم‌ترین مسئله در مبحث مهندسی شیروانی‌های سنگی است.

^۱ تصادفی با فرض توزیع آماری مشخصات هندسی درزه‌هاست [۲،۳]. پیش از این، تحقیقات زیادی روی ساخت شبکه‌ی درزه‌ی مجزا و تولید شکستگی‌های سنگ با این روش انجام شده است [۴-۸].

برای تحلیل پایداری شیروانی‌های موجود در سنگ‌های ناپیوسته، روش‌های متنوع استاتیکی (تعادل حدی)، هیبریدی و عددی استفاده می‌شوند. در میان روش‌های استاتیکی و هیبریدی مرسوم در تحلیل پایداری شیب سنگ‌ها می‌توان به روش‌هایی نظیر تئوری بلوکی [۹] گروه‌های کلیدی [۱۰] و بلوک کلیدی توسعه یافته توسط مولدن-اورتا [۱۱] اشاره کرد که در یک تحلیل تکرار شونده و پیشرونده پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار را بررسی می‌کند. از جمله روش‌های عددی مرسوم در تحلیل پایداری توده سنگ‌های درزه‌دار می‌توان به روش اجزای مجزا اشاره کرد که بعد از معرفی آن توسط کاندال^۲، استفاده از آن به‌طور وسیعی در محیط‌های ناپیوسته مورد توجه قرار گرفته است.

مطالعات بسیاری در زمینه‌ی تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی انجام شده است. هوک و بری [۱۲] نشان دادند که ضریب ایمنی شیب‌های سنگی با کاهش شیب، افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش ضریب ایمنی با کاهش شیب در حالت اشباع با سرعت بیشتری انجام می‌شود (شکل ۱).



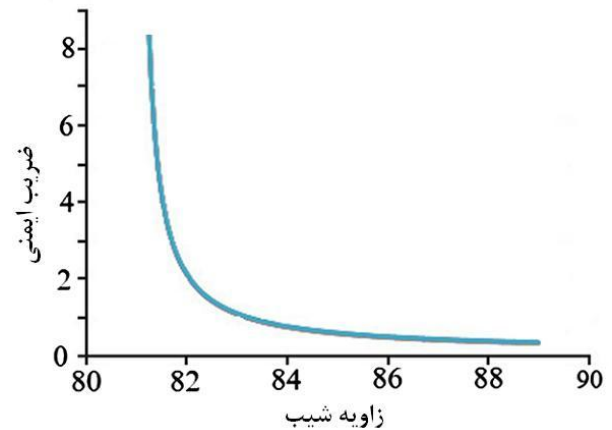
شکل ۱: افزایش ضریب ایمنی شیروانی سنگی در اثر کاهش شیب در دو حالت خشک و اشباع [۱۲]

وطن‌پور و همکاران [۱۳] ضمن بررسی نقش ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ شمال مشهد، برای یک ترانشه سنگی به ارتفاع ۲۰ متر و طول ۸۰ متر، نشان دادند که با کاهش شیب دیواره ضریب ایمنی به دلیل وجود ناپیوستگی‌هایی با شیب ۸۱ درجه به سمت دیواره به صورت نمایی منفی افزایش می‌یابد (شکل ۱۳).

روش استخراج معدن روباز انتخاب شده است. کاواک‌های زیادی برای استخراج این معدن توسط شرکت‌های مشاور آلمانی EBE، کاوشگران و کارشناسان معدن تهیه شد که طرح اجرایی آن، طرح تهیه شده توسط کارشناسان دفتر طراحی آن معدن در سال ۱۳۹۳ با نسبت باطله برداری ۰/۷ بوده است (شکل ۳-الف). به دلیل وجود ناپایداری‌های موضعی در محدوده معدن و با بررسی‌های میدانی، تحلیل پایداری مجدد دیواره‌ها و از جمله دیواره بلوک ۲-۴ در دستور کار قرار گرفت و محدوده نهایی جدید توسط شرکت کاوشگران طراحی شد [۲۲] (شکل ۳-ب) و نسبت باطله برداری بیش از دو برابر شد که دلیل اصلی افزایش نسبت باطله برداری کاهش شیب دیواره‌های مختلف معدن است.

۳- مناطق هموزن آماری و بلوک‌های تکتونیکی

در مطالعات آماری برای ایجاد همگنی، تقلیل واریانس‌ها و خطاهای شبیه‌سازی اغلب تفکیک جامعه به جوامع کوچکتر با در نظر گرفتن حجم اطلاعات قابل قبول انجام می‌گیرد. در شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها نیز این امر الزامی است. بنابراین به منظور تقسیم‌بندی توده سنگ چنارت به بلوک‌های با مشخصات مشابه، ساختارهای زمین‌شناسی توده تجزیه و تحلیل شد و این توده به واسطه‌ی حضور گسل‌های اصلی طبق گزارشات مشاورین معدن به چهار بلوک تکتونیکی تقسیم شد. اغلب فرض تفکیک مناطق هموزن آماری بر اساس ساختارهای اصلی فرضی صحیح است و در صورت خلف بودن آن می‌توان مناطق دارای ممان‌های آماری یکسان را مجدداً ترکیب کرد. لازم به ذکر است که بلوک چهارم خود به دلیل وجود اختلاف بین بعضی از مشخصات به بلوک‌های ۱-۴ و ۲-۴ تقسیم می‌شود. شکل ۴-الف، موقعیت این بلوک‌ها و مقاطع عمود بر دیواره‌ها که برای تحلیل‌های دو بعدی مورد توجه‌اند، را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تغییر ضریب ایمنی شیروانی سنگی نسبت به زاویه شیب به صورت نمایی منفی [۱۳]

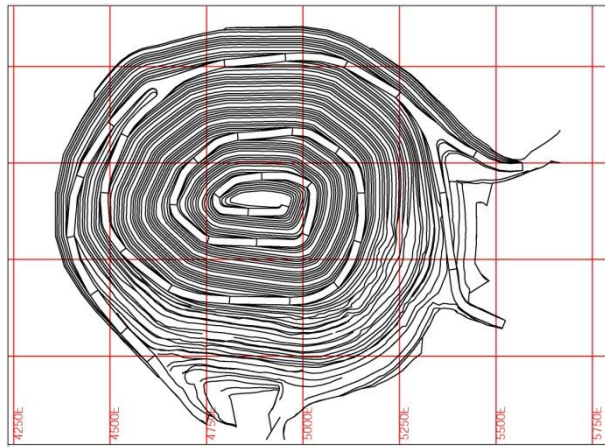
منجزی و رضاخواه [۱۴] در طراحی شیب پایدار دیواره‌های معدن مس سونگون، تحلیل پایداری را در شرایط بارگذاری استاتیکی انجام داده و با استفاده از روابط آماری ضریب ایمنی را در مقاطع مورد تحلیل یافته و در بخش‌های بحرانی دیواره با کاهش شیب، به شیب پایدار رسیده است.

تحلیل پایداری و طراحی شیروانی‌های سنگی با استفاده از روش اجزای مجزا در مطالعات پیشین گسترش زیادی داشته است [۱۵، ۱۶]. این تحلیل‌ها اغلب با استفاده از نرم‌افزار UDEC [۱۷] و برای دیواره‌ی سدها [۱۸] یا معادن روباز [۱۹، ۲۰] و یا راه‌ها و جاده‌ها [۲۱] انجام شده است.

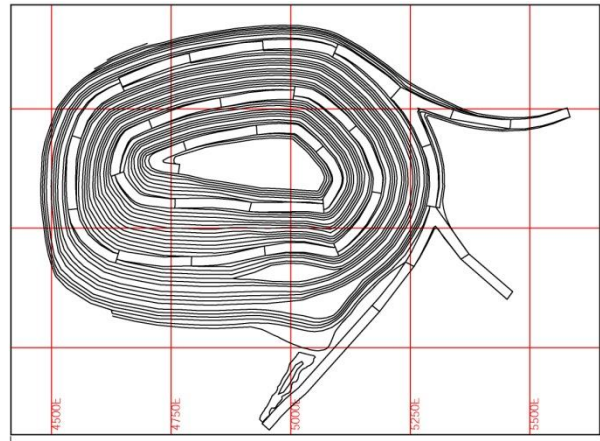
مسئله تحقیق حاضر تحلیل و ایجاد اطمینان از پایداری دیواره جدید معدن نسبت به دیواره قدیم آن در بلوک تکتونیکی ۲-۴ با توجه به کاهش شیب دیواره است. بنابراین پس از بررسی منطقه‌ی مورد مطالعه و تهیه داده‌های ژئومکانیکی، مدل‌سازی هندسی مقاطع قدیم و جدید از بلوک تکتونیکی مورد مطالعه به کمک روش‌های آماری و تحلیل پایداری دو مقطع با روش اجزای مجزا در نرم‌افزار UDEC انجام شد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

از نظر مورفولوژی شکل کانسار چنارت توده‌ای گوه مانند بوده که دهانه‌ی این گوه به طرف سطح زمین است، به طوری که

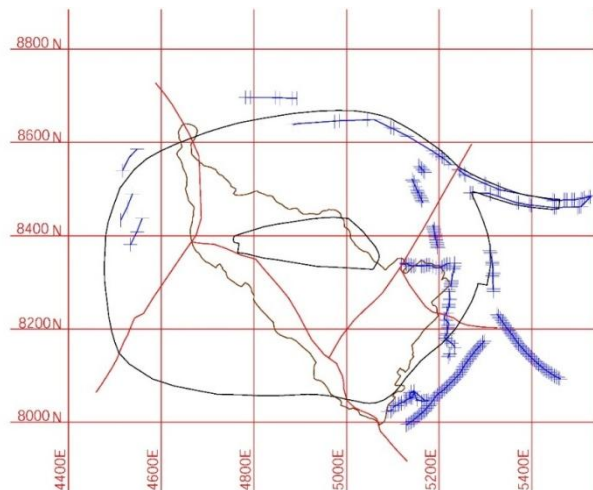


(ب)

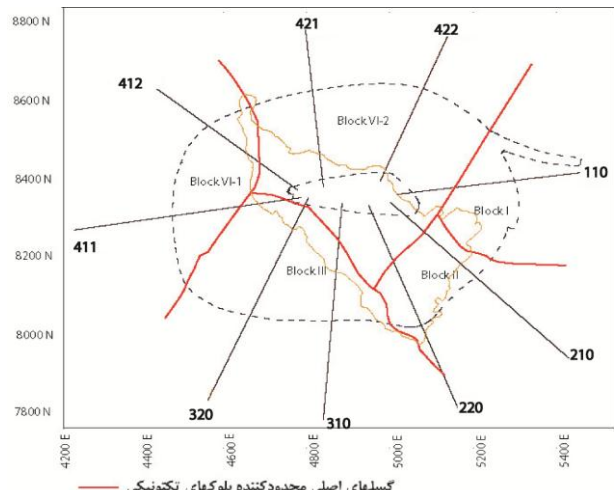


(الف)

شکل ۳: محدوده‌ی نهایی کاواک معدن سنگ آهن چغارت، الف: کاواک قدیم، ب: کاواک جدید [۲۲]



(ب)



(الف)

شکل ۴: الف: محدوده‌ی بلوک‌های تکتونیکی محدوده معدن چغارت [۲۲] ب: خطوط برداشت در بلوک‌های مختلف معدن چغارت [۲۳]

ارتفاعی مختلف و در ترانشه‌ها برداشت شده و پارامترهای هندسی درزه‌ها شامل جهت شیب، شیب، فاصله‌داری و گسترش به‌عنوان پارامترهای هندسی با استفاده از کمپاس، متر و دوربین نقشه‌برداری و JCS و JRC به‌عنوان پارامترهای مکانیکی ناپیوستگی‌ها با استفاده از پروفیل‌متر و چکش اشمیت اندازه‌گیری شده‌اند [۲۳].

۶- ترسیم و دسته‌بندی درزه‌ها

به‌منظور دسته‌بندی و تفکیک دسته‌دَرزه‌ها و مشخصات هر کدام از آن‌ها، اطلاعات برداشت شده‌ی هر بلوک توسط نرم‌افزار Dips تجزیه و تحلیل شده است.

در بلوک تکتونیکی ۲-۴ تعداد ۳۹۷ درزه برداشت شده است که تمرکز این درزه‌ها در شکل ۵-الف، به نمایش درآمده است. به‌گونه‌ای که حدود ۸ تمرکز قابل تشخیص است. از این میان ۴

۴- مدل‌سازی هندسی

عوامل ساختاری غالب پس از گسله‌های اصلی در توده‌سنگ‌های درزه‌دار، ناپیوستگی‌ها (درزه، لایه‌بندی، شیستوزیته، دگر شیبی و غیره) می‌باشند که ویژگی‌های آن‌ها در هر یک از مناطق هموژن آماری، مورد توجه در مدل‌سازی هندسی است. درزه‌نگاری یکی از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی هندسی است که به‌ترتیب در سه مرحله‌ی برداشت، ترسیم و تفکیک و در نهایت تحلیل آماری انجام می‌شود.

۵- برداشت درزه‌ها

عملیات برداشت درزه‌ها در خط برداشت‌هایی به موازات جبهه کارهای هر بلوک تکتونیکی معدن چغارت انجام شده است. شکل ۴-ب، نشان‌دهنده‌ی خطوط برداشت درزه‌ها در بلوک‌های تکتونیکی است. داده‌های مورد نیاز از جبهه‌کارها در ترازهای

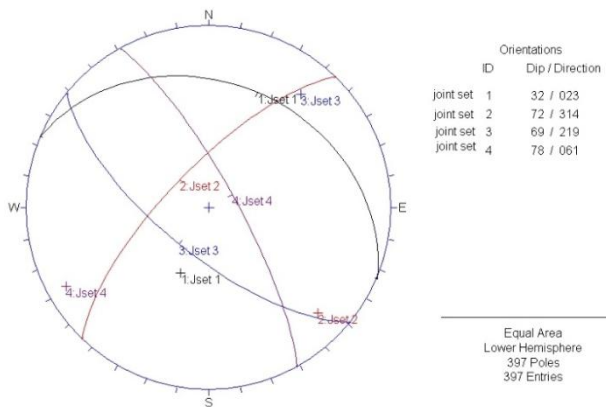
بررسی پارامترهای شیب و جهت شیب را می‌توان نرمال فرض نمود و پارامتر فاصله‌داری از تابع توزیع نمایی، لاگ نرمال و به ندرت نرمال پیروی کرده است.

۸- شبیه‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها

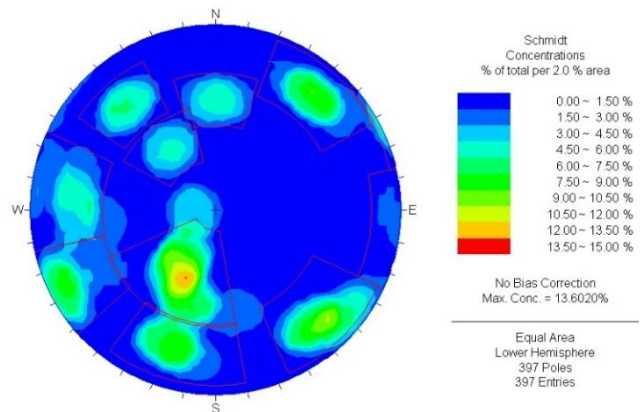
به منظور شبیه‌سازی هندسی ناپیوستگی‌های یک توده‌سنگ می‌توان از دو روش استفاده کرد:

(الف) روش سیستم ناپیوستگی‌های نامحدود (ترتیبی یا غیر ترتیبی)

(ب) روش سیستم دیسک‌های تصادفی (دایروی یا چند وجهی)



(ب)



(الف)

شکل ۵: الف: کنتور تمرکز درزه‌ها و تفکیک آن‌ها در بلوک تکتونیکی ۲-۴ و ب: دسته‌درزه‌ها و صفحه‌ی شیب در بلوک تکتونیکی ۴-۲.

(شکل ۶). توپوگرافی مقطع ۴۲۱ در طرح نهایی قدیم و جدید معدن چغارت در شکل ۷ نمایش داده شده است.

برنامه 3DGM برای تولید شبکه‌ی شکستگی‌های منفصل از یک الگوریتم شبیه‌سازی تصادفی استفاده کرده و تمامی خصوصیات درزه مانند جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، فاصله‌داری یا چگالی درزه‌داری، گسترش (قطر دیسک) را تولید می‌کند. بنابر خاصیت تصادفی مدل‌سازی هندسی هر بار یک الگو از درزه‌ها تولید می‌شود که ممکن است نتایج تحلیل متأثر از این عامل قرار گیرند.

جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، گسترش (قطر) هر دیسک شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل‌سازی مراکز دیسک‌ها توسط یک پروسه‌ی سه‌بعدی توزیع پواسون، جهت‌داری توسط تابع توزیع فیشر و ابعاد درزه اغلب توسط تابع توزیع لاگ نرمال شبیه‌سازی شدند [۸]. بر اساس مشخصات هندسی شبکه‌ی ناپیوستگی توده‌سنگ چغارت و همچنین تحلیل‌های انجام شده

دسته‌درزه تمرکز قابل قبولی دارند که شکل ۵-ب، وضعیت آن‌ها را نشان می‌دهد.

۷- تحلیل آماری

در مدل‌سازی هندسی به روش آماری یکی از ملزومات توابع توزیع و ممان‌های آماری هر یک از ویژگی‌های دسته‌درزه‌ها است. در این بخش مشخصات شیب، جهت شیب و فاصله‌داری هر دسته‌درزه تحلیل شده است.

با استفاده از نرم‌افزار Minitab هیستوگرام پارامترهای مورد تخمین ترسیم و ماهیت تابع توزیع آن‌ها مطالعه و بررسی نرمال بودن داده‌ها با آزمون Anderson-Darling انجام گرفته است. نتایج این مطالعه آماری در جدول ۱ آمده است. در این

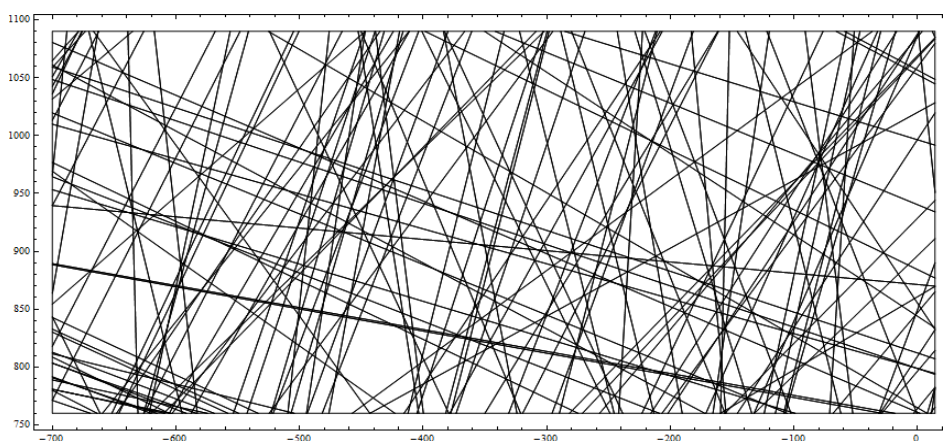
در روش اول، ناپیوستگی‌ها نامحدود بوده تا مرزهای مدل ادامه می‌یابند و اگر تسلسلی وجود داشت دسته‌درزه‌های غالب مرز مدل را قطع و دسته‌درزه‌های ثانویه به ناپیوستگی‌های اولیه محدود می‌شوند. عدم نظر گرفتن گسترش ابعاد درزه‌ها از جمله معایب این سیستم بوده و باعث تولید تعداد غیر واقعی بلوک در مجموعه‌ی بلوکی منتج از شبیه‌سازی می‌شود.

شبیه‌سازی به روش دیسک‌های تصادفی با جانمایی درزه‌ها بر اساس تابع توزیع پواسون، با فرض دیسکی بودن شکل صفحات، برای از بین بردن اثر تصادفی مدل هندسی در این مطالعه، با استفاده از اطلاعات آماری جدول ۱ برای هر یک از مقاطع قدیم و جدید ۱۰ مدل هندسی که هر یک بیانگر یک الگو از شبکه‌ی شکستگی‌های منفصل هستند، تولید شد و کلیه‌ی مراحل مدل‌سازی مکانیکی بر روی هر ۱۰ الگوی درزه‌داری اجرا شد.

بر همین اساس و به کمک برنامه 3DGM [۸] که در محیط نرم افزاری متکتیکا اجرا می‌شود عملیات مدل‌سازی هندسی بلوک ۲-۴ به صورت سه بعدی انجام و مقطع ۴۲۱ تهیه گردید

و به دلیل سادگی، روش ناپیوستگی‌های نامحدود به‌عنوان روش شبیه‌سازی این توده انتخاب شد.
جدول ۱: نتایج تحلیل آماری دسته‌درزه‌های بلوک ۴-۲ [۲۳]

پارامتر	دسته‌درزه‌ی یک			دسته‌درزه‌ی دو			دسته‌درزه‌ی سه		
	شیب	امتداد شیب	فاصله‌داری	شیب	امتداد شیب	فاصله‌داری	شیب	امتداد شیب	فاصله‌داری
A-squared	۰/۸۱	۰/۹۰	۰/۴۳	۱/۰۲	۰/۶۲	۱/۴۱	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۷۹
مقدار P	۰/۰۳۴	۰/۰۲۰	۰/۲۹۵	۰/۰۱۰	۰/۱۰۱	<۰/۰۰۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۳۹
میانگین	۷۰/۵۵	۲۲۰/۸۵	۲/۴۶۱	۳۱۴/۸۴	۷۴/۴۴۹	۰/۶۲۷	۳۵/۳۵۴	۲۳/۱۱۴	۰/۷۳۹
انحراف معیار	۳/۳۱۲	۶/۸۷	۰/۲۰۶	۸/۶۰	۶/۷۴۹	۰/۴۳۳	۹/۰۱۰	۶/۸۶۷	۰/۴۳۴
واریانس	۱۰/۹۷۲	۴۷/۲۶	۰/۰۴۳	۷۳/۹۹	۴۵/۵۵	۰/۱۸۷	۸۱/۱۸	۴۷/۱۵۴	۰/۱۸۹
چولگی	۰/۱۵۵	۰/۰۶۰	۰/۱۴۳	-۰/۴۴۷	۰/۳۸۹	۱/۵۶۹	-۰/۱۷۰	-۰/۰۰۷	۰/۴۳۷
کشیدگی	-۰/۲۹۶	-۰/۴۰۳	۰/۳۵۵	-۰/۱۷۳	-۰/۴۶۶	۵/۳۸۹	-۱/۰۹۰	-۱/۰۴۸	۰/۰۵۸۸



شکل ۶: مقطع دو بعدی ۴۲۱ از مدل هندسی سه بعدی بلوک نکتونیک ۲-۴ شبیه‌سازی شده در برنامه 3DGM

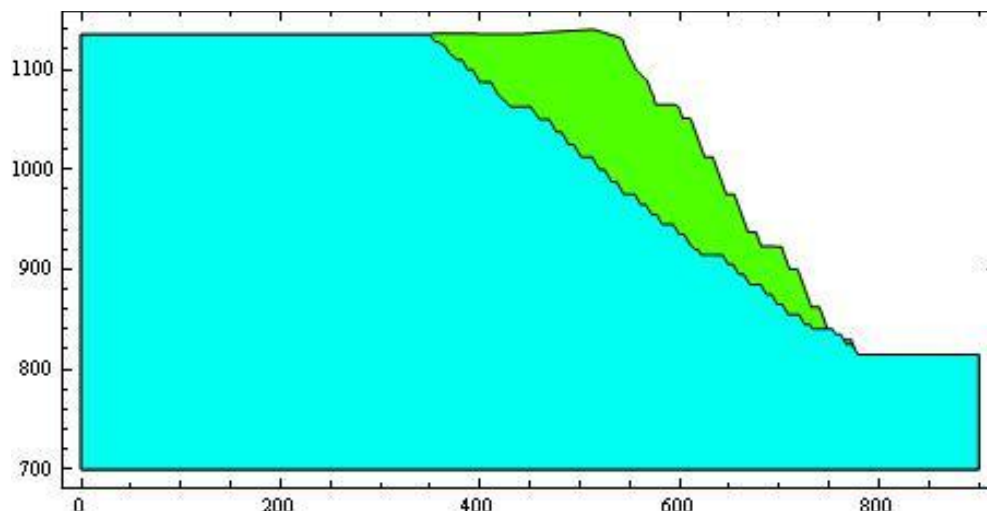
۹- مدل‌سازی مکانیکی

مدل‌سازی مکانیکی به‌صورت دو بعدی و به‌روش المان مجزای صریح، در محیط نرم‌افزاری یودک صورت گرفت. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی‌های ژئومکانیکی در شرایط مختلف را در محیط ناپیوسته دارد. برای تهیه مدل هندسی در این نرم‌افزار اطلاعات هندسی مدل‌های ۱۰ گانه مقطع ۴۲۱ تهیه‌شده، با توجه به قابلیت برنامه 3DGM به‌صورت فایل قابل ورود به یودک درآمده و برای طرح‌های قدیم و جدید معدن وارد نرم‌افزار شد. در نرم‌افزار یودک، بلوک‌ها در حالت عادی صلب هستند و برای تغییرشکل‌پذیر شدن باید به نواحی تفاضل محدود کوچک‌تری تقسیم شوند. در این‌جا به‌منظور تغییرشکل‌پذیر شدن بلوک‌ها، عملیات گسسته‌سازی به نواحی مثلی با بیشینه ابعاد ۵ متر انجام شد که طی آن در هر یک از مدل‌های مقاطع قدیم و جدید به‌ترتیب تقریباً ۴۰۰۰۰ و ۴۱۰۰۰ ناحیه ایجاد شد.

خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر منطقه‌ی چغارت حاصل آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص و آزمایش‌های مقاومت تراکمی تک‌محوره و سه‌محوره روی نمونه‌های چاه‌های اکتشاف ژئومکانیکی انجام شده توسط شرکت EBE [۲۴] در جدول ۲ آمده است.

در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی درزه‌دار، ریزش‌ها اغلب به صورت ساختاری است. به‌عبارت دیگر درزه‌ها نقش اساسی در ناپایداری دارند بنابراین تعیین خواص مقاومتی و مکانیکی درزه‌ها به‌منظور تحلیل پایداری اهمیت خاصی دارد. بدین منظور عدد زبری سطح درزه‌ها از طریق برداشت زبری سطوح با استفاده از پروفیل متر تعیین شده است.

مقاومت فشاری سطح درزه JCS با استفاده از چکش اشمیت در هر بلوک تخمین زده شد و مقادیر زاویه اصطکاک پایه طبق گزارش یاراحمدی [۲۳] در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه یزد تهیه شده است.



شکل ۷: توپوگرافی مقطع ۴۲۱ در طرح نهایی قدیم و جدید معدن چغارت

جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و درزه‌های بلوک تکتونیکی ۲-۴ معدن چغارت [۲۴] [۲۳]

پارامتر	میانگین	انحراف معیار
سنگ بکر		
وزن مخصوص ماده سنگ (gr/cm^3)	۲,۶۰۳	۰,۰۳۳۰
مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (Mpa)	۷۰	۲۴,۶۳
زاویه اصطکاک ماده سنگ (درجه)	۴۱,۸	۱۵,۱۷
چسبندگی ماده سنگ (Mpa)	۲۷,۶	۱۰,۴۳

درزه‌ها	
زبری سطح درزه	۵,۵۷
عدد اشمیت	۴۳,۶۵
زاویه اصطکاک سطح درزه (درجه)	۳۲,۲
چسبندگی سطح درزه (Mpa)	۰,۲۸۱۸
سختی نرمال (Gpa)	۱۵۰/۲
سختی برشی (Gpa)	۷۵

۱۰- بررسی و تحلیل نتایج

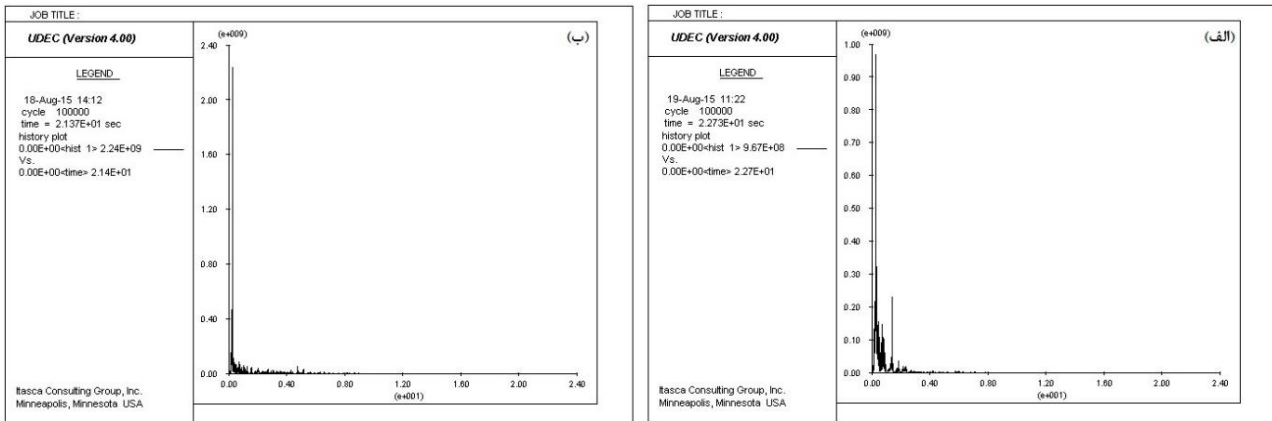
هدف از این مطالعه بررسی تأثیر کاهش شیب بر پایداری دیواره بلوک تکتونیکی ۲-۴ معدن چغارت است. به‌منظور بیان بهتر نتایج این تحلیل، ۸ نقطه‌ی کنترلی نزدیک به دیواره‌ی شیب‌دار در مقاطع قدیم و جدید در نظر گرفته شد که در شکل ۹ موقعیت آن‌ها نشان داده شده است.

ویژگی نقاط مذکور این است که تراز ارتفاعی هر کدام از آن‌ها در مقطع دیواره‌ی قدیم و در مقطع دیواره‌ی جدید یکسان است. از این رو می‌توان پارامترهای ثبت شده در هر نقطه از

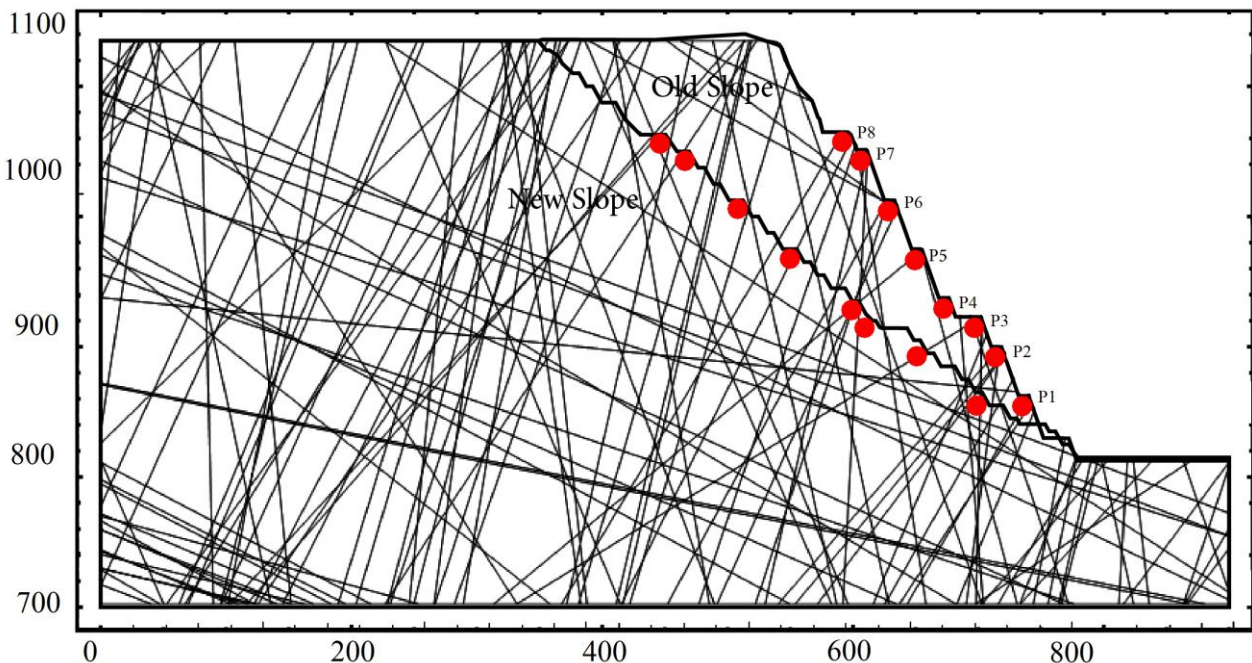
علاوه بر خواص ژئومکانیکی، برای سنگ بکر و درزه‌ها باید مدل رفتاری نیز تعیین شود. در نرم‌افزار یودک، ۷ مدل رفتاری برای سنگ بکر و ۴ مدل رفتاری برای درزه‌ها وجود دارد. لازم به ذکر است که در این مطالعه، سنگ بکر به صورت الاستیک فرض شده و برای درزه‌ها مدل تماس سطحی کولمب در نظر گرفته شده است. نهایتاً مدل مکانیکی تعریف شده حل شده و به تعادل رسید.

شکل ۸-الف و ۸-ب، به ترتیب نمونه‌ای از نمودار نیروی‌های نامتعادل کننده‌ی یکی از مدل‌های مقاطع قدیم و جدید را نشان می‌دهد.

مقطع قدیم را با نقطه‌ی متناظرش در مقطع جدید مقایسه کرد.



شکل ۸: نمودار نیروی نامتعادل کننده‌ی الف: مقطع قدیم و ب: مقطع جدید



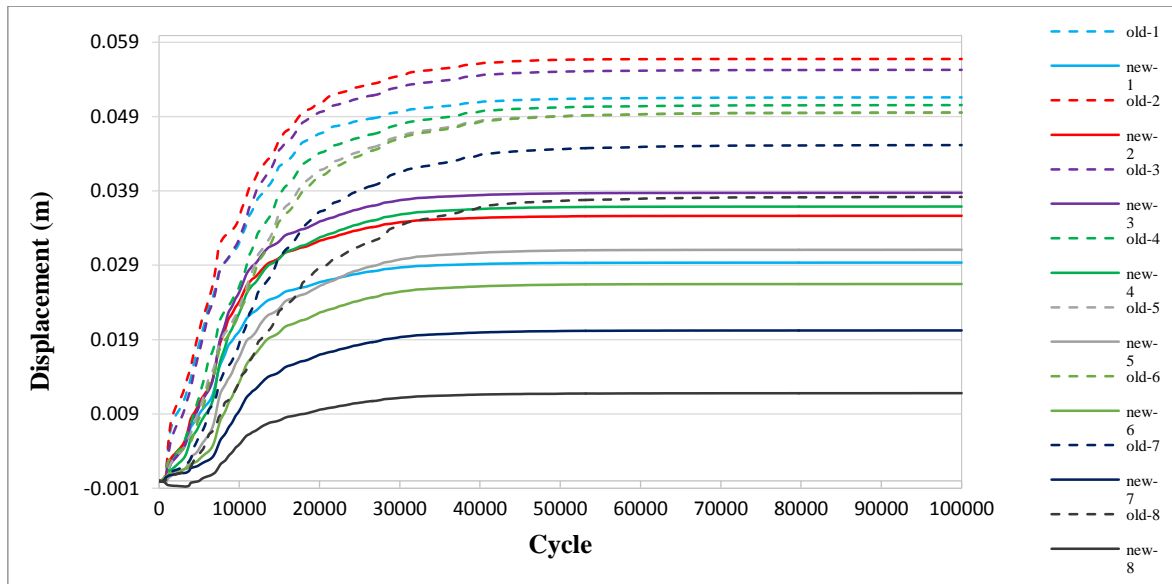
شکل ۹: نقاط کنترلی در مقاطع دیواره‌ی قدیم و جدید

خط ممتد نشانه‌ی جابجایی در مقطع دیواره‌ی جدید و هر رنگ نشانه‌ی یک نقطه‌ی کنترلی است. بنابراین هر یک از خط‌چین‌ها بیانگر میانگین جابجایی کلیه‌ی مدل‌های دیواره‌ی قدیم در نقطه‌ای خاص و هر خط ممتد بیانگر میانگین جابجایی همه‌ی مدل‌های دیواره‌ی جدید در یک نقطه‌ی خاص است. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، جابجایی در راستای X در نقاط کنترلی مقطع قدیم از نقاط متناظر آن‌ها در مقطع جدید به مقدار قابل توجهی بیشتر است. شکل ۱۱ جابجایی در راستای Y را نشان می‌دهد و علامت منفی صرفاً جهت جابجایی رو به پایین را بیان می‌کند. در این

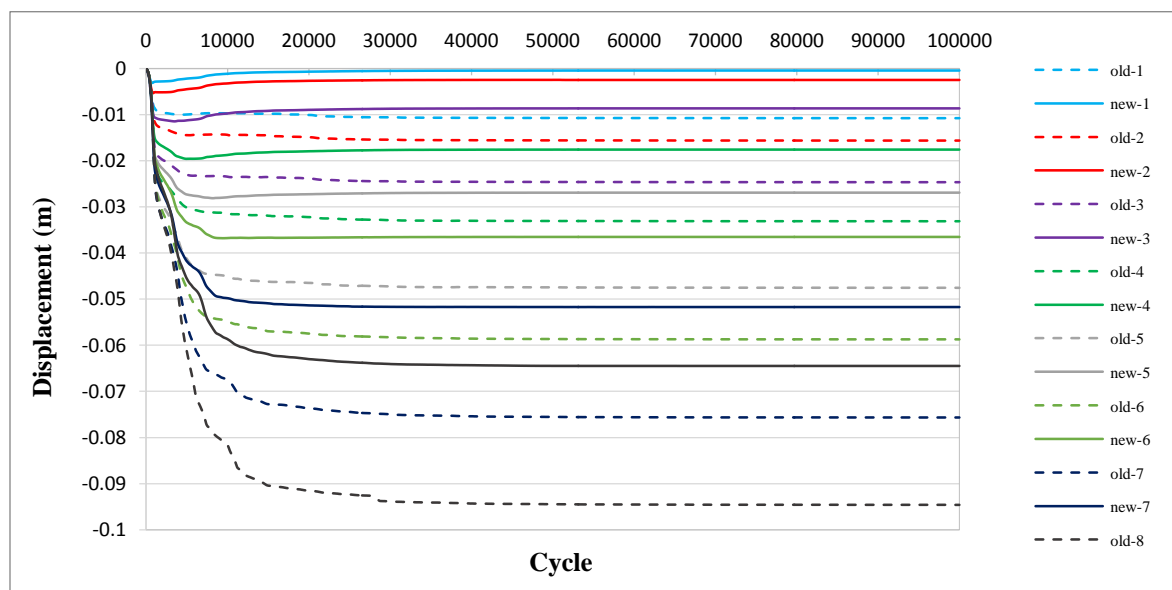
مهم‌ترین پارامتر کنترلی در شیروانی‌ها میزان جابجایی سطح شیب‌دار و کنترل آن است. به‌همین منظور در این مقاله جابجایی در ۸ نقطه‌ی کنترلی مذکور ثبت شده است. نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب این جابجایی‌ها را در دو راستای X و Y و در هر دو مقطع قدیم و جدید نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که این جابجایی‌ها در ۸ نقطه‌ی کنترلی مورد نظر برای ۱۰ مدل هندسی مقطع قدیم و ۱۰ مدل مقطع جدید به طور مجزا ثبت شده و میانگین هر کدام در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. همچنین در این نمودارها خط‌چین نشانه‌ی جابجایی در مقطع دیواره‌ی قدیم،

مورد نیز جابجایی در راستای y در نقاط کنترلی مقطع قدیم بیشتر از نقاط متناظر آن‌ها در مقطع جدید است. برای مشخص شدن این اختلافات در جابجایی دیواره‌های قدیم و جدید، میانگین جابجایی در نقاط کنترلی مقطع قدیم و جدید ۴۲۱ به طور مجزا محاسبه و در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور میانگین جابجایی در مقطع قدیم بیشتر از جابجایی در مقطع جدید است و به حدود ۲ برابر می‌رسد. به عبارت دیگر، با تبدیل دیواره‌ی قدیم معدن چنارت در بلوک تکتونیکی ۲-۴ به دیواره‌ی جدید، جابجایی‌ها تقریباً نصف شده است. این مسئله بیانگر پایداری بیشتر دیواره‌ی جدید نسبت به دیواره‌ی قدیم است. البته در این تحقیق تغییرات ضریب اطمینان و قابلیت

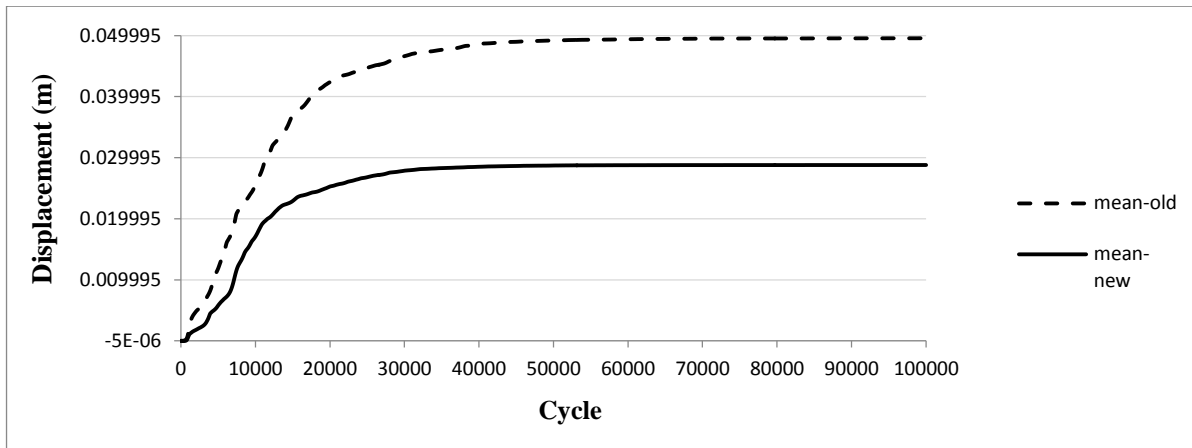
اعتماد دیواره مورد توجه قرار نگرفته است ولی به‌نظر می‌رسد با توجه به متوسط اختلاف ۲٫۵ سانتی متر در جابجایی‌ها اختلاف ضرایب اطمینان و احتمال ریزش نیز زیاد نباشد. قضاوت در خصوص مسائل اقتصادی این تغییر شیب و اثر آن بر قیمت‌های تمام شده بر اساس این تحقیق کمی دشوار است اما بر اساس یک محاسبه سرانگشتی در صورتی که مساحت بین دو مقطع ۳۱۶۶۷٫۶ متر مربع باشد و با وزن حجمی ۲٫۶۰۳ تن بر مترمکعبی سنگ دیواره و با احتساب ۶۰۰ متر محدوده بلوک تکتونیکی ۲-۴ تناژ باطله‌برداری اضافی عبارت خواهد بود از ۴۹٫۴۶ میلیون تن که به‌نظر می‌رسد قضاوت در خصوص این دیواره و تغییر شیب ناگهانی از ۵۲ به ۳۵ درجه محافظه کارانه بوده است.



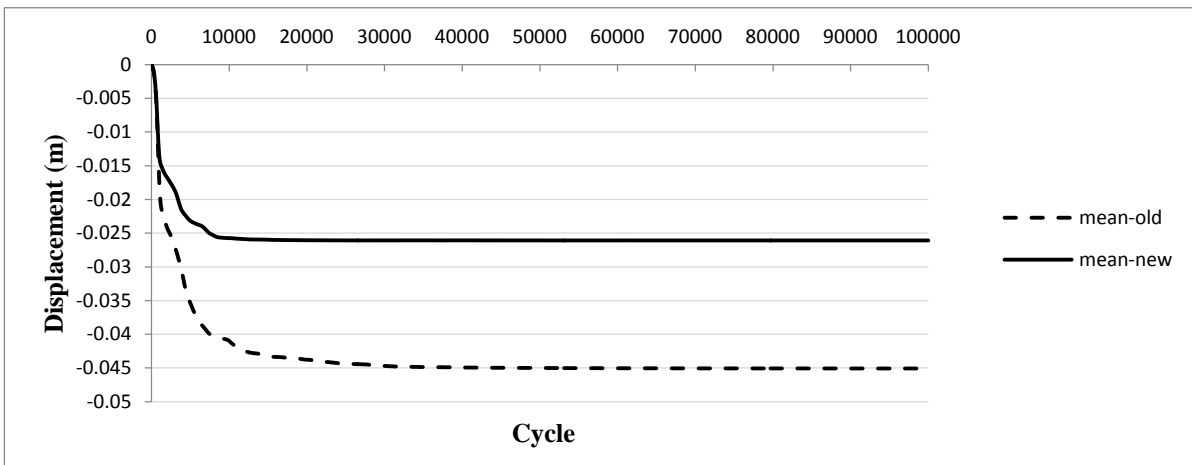
شکل ۱۰: نمودار جابجایی در راستای x در نقاط کنترلی ۱ تا ۸ برای مقاطع قدیم و جدید



شکل ۱۱: نمودار جابجایی در راستای y در نقاط کنترلی ۱ تا ۸ برای مقاطع قدیم و جدید



شکل ۱۲: میانگین جابجایی در راستای x برای مقاطع قدیم و جدید



شکل ۱۳: میانگین جابجایی در راستای y برای مقاطع قدیم و جدید

در مدل‌های مقطع جدید، و در راستای y از ۴/۵۱ سانتیمتر در مقطع قدیمی به ۲/۶۱ سانتیمتر در مقطع جدید رسیده است. کمتر بودن جابجایی‌ها در مقطع جدید نسبت به مقطع قدیمی حاکی از پایداری و ثبات بیشتر دیواره‌ی جدید است.

مراجع

- [1] Hoek E, Bray j.; 1977; "*Rock Slope Engineering*", The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [2] Baghbanan A, Jing L.; 2007; "*Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44:704-719.
- [3] Baghbanan A, Jing L.; 2008; "*Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45:1320-1334.
- [4] Priest SD, Hudson JA.; 1981; "*Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline*

۱۱- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی تغییرات پایداری دیواره‌ی بلوک تکتونیکی ۲-۴ معدن سنگ آهن چغارت واقع در بلوک ایران مرکزی در دو از کاواک مقطع قدیم و جدید است. درزه‌ها در این تحقیق به صورت شبکه‌ی شکستگی مجزای تصادفی با استفاده از روش سیستم ناپیوستگی‌های نامحدود به کمک برنامه‌ی 3DGM تولید و کلیه‌ی مراحل تحلیل با استفاده از روش المان مجزا و در محیط نرم‌افزاری UDEC انجام گرفته است. در نهایت نتایج دو مقطع قدیمی و جدید با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌گر کاهش جابجایی‌ها در شیروانی مورد نظر پس از تبدیل مقطع قدیمی به مقطع جدید است به طوری که میانگین بیشینه‌ی این جابجایی‌ها در راستای x از ۴/۹۶ سانتیمتر در مدل‌های مقطع قدیمی به ۲/۸۸ سانتیمتر

- [۱۴] منجزی. م.، رضاخواه. م.، ۱۳۸۶، "طراحی شیب پایدار دیواره های معدن مس سونگون"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره دوم، شماره سوم، ۴۱-۴۹.
- [15] Maleki Javan MR, Kilanehei F, Mahjoob A.; 2014; "Rock slope stability analysis using Discrete Element Method", International Journal of Transportation Engineering, 2(3): 199-212.
- [16] Jiang M, Jiang T, Crosta GB, Shi Zh, Chen H, Zhang N.; 2015; "Modeling failure of jointed rock slope with two main joint sets using a novel DEM bond contact model", Engineering Geology.
- [17] Choi SO, Chung SK.; 2004; "Stability analysis of jointed rock slopes with the Barton-Bandis constitutive model in UDEC", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(3).
- [18] Wang X, Rong G, Peng J.; 2012; "A study of high slope stability of yangfanggou dam site", Procedia Engineering, 28: 442- 447.
- [19] Sabino LM.; 2014; "Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil", International Journal of Mining Science and Technology, 24: 777-782.
- [20] Masoud Shamsoddin Saeed, Maarefvand P, Yaaghubi B.; 2015; "Two and three-dimensional slope stability analyses of final wall for Miduk mine", International Journal of Geo-Engineering.
- [21] Kainthola A, Singh PK, Singh TN.; 2014; "Stability investigation of road cut slope in basaltic rock mass, Mahabaleshwar, India", Geoscience Frontiers, 1-9.
- [۲۲] شرکت مهندسی مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱، "طرح پیت نهایی معدن چنارت"، جلد اول گزارش، ۳۵:۳۱.
- [۲۳] یاراحمدی بافقی ع. ر. و همکاران، ۱۳۹۱، "تعیین قابلیت اعتماد دیواره های نهایی معادن سطحی با مطالعه موردی روی دیواره های معدن سنگ آهن چنارت"، طرح پژوهشی، پژوهشکده مهندسی معدن دانشگاه یزد
- [۲۴] شرکت مهندسی مشاور EBE آلمان، ۱۳۸۶، "گزارش آزمایشگاه مکانیک سنگ، بروی گمانه اکتشافی A۶"، آرشیو معدن چنارت.
- surveys", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 18: 183-197.
- [5] Xu Ch, Dowd P.; 2010; "A new computer code for discrete fracture network modelling", Computers & Geosciences, 36: 292-301.
- [۶] جولایی. ا.، باغبانان. ع.، ۱۳۹۱، "مدل سازی سه بعدی شبکه‌ی انتقال سیال درون سنگ‌های درزه‌دار با استفاده از مدل شبکه‌ی لوله‌ای و روش المان مجزا"، نهمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [7] Zhang L, Ding X.; 2010; "Variance of non-parametric rock fracture mean trace length estimator", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47: 1222-1228.
- [۸] گودرزی. ه.، یاراحمدی بافقی. ع.، ۱۳۹۱، "مدل سازی ژئومکانیکی سه بعدی توده‌سنگ"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق.
- [9] Goodman RE, Shi GH.; 1985; "Block theory and its application to rock engineering", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jerse.
- [10] Yarahmadi Bafghi AR, Verdel T.; 2003; "The key-group method", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 27:495key-g.
- [11] Mauldon M, Ureta J.; 1996; "Stability analysis of rock wedges with multiple sliding surfaces", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 33:51-66.
- [12] Hoek E., & Bray B.; 1989; "Rock slopes: design, excavation, stabilization", Turner-Fairbank Highway Research Center, p:2-4.
- [13] Vatanpour N., Ghafoori M., Hedayati Talouki H.; 2014; "Probabilistic and sensitivity analyses of effective geotechnical parameters on rock slope stability: a case study of an urban area in northeast Iran", Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, 71:1659-1678.

پی‌نوشت

¹ Discrete Fracture Network (DFN)² Cundall