مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
تابستان ۱۴۰۳، جلد هفدهم، شماره ۲، صفحه ۴۷ تا ۶۱

نقش گسیختگی های ساختاری در طراحی استخراج اقتصادی و تحلیل پایداری دیواره‌های معادن سنگ های تزئینی

سید امیراسعد فاطمی* [۱]، محمدجواد آذین فر [۲]، سهیل زارع مطلق [۳]، امین چمنی [۴]

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵

چکیده

تولید سودآور سنگ ساختمانی به ابعاد بلوک استخراجی بستگی دارد. شناسایی و مدلسازی ناپیوستگی ها و نقش آنها در استخراج بهینه و ناپایداری و لغزش بلوکها پارامترهای مهم در تعیین ابعاد بلوک های استخراجی هستند. شکل و حجم زیربلوک توسط الگوی سه بعدی سیستم ناپیوستگی کنترل می شود. عدم توجه به این موضوع در معادن سنگ ساختمانی، مشکلاتی نظیر خردشدگی شدید بلوک های سنگی و بازدهی پایین استخراج را به دنبال دارد. در این تحقیق یک رویکرد بهینه سازی استخراج برای معادن سنگ ساختمانی استفاده شده است. با برداشت ناپیوستگی های موجود در توده سنگ و انتخاب راستاهای مختلف برای جبهه کار، مدل بلوکی سه بعدی ساخته شد. برای هر کدام از راستاها تعداد و حجم زیر بلوک های استخراجی محاسبه شد. بلوک هایی با حجم کمتر از دو مترمکعب باطله در نظر گرفته و بر اساس آن، برای هرکدام از امتداد ها، درصد بازیابی محاسبه شد. بر اساس نتایج بدست آمده از مدلسازی، امتداد آزیموت ۱۵ درجه امتداد با بیشترین حجم بلوکهای اقتصادی به عنوان راستای بهینه پیشنهاد شد. همچنین برای جهت بهینه، تحلیل پایداری سینماتیکی دیواره‌های معدن با توجه به موقعیت فضایی درزه‌ها انجام شد که احتمال لغزش های صفحه ای و واژگونی وجود نداشت اما رخداد لغزش گوه ای محتمل بود. تحلیل پایداری نشان داد که احتمال این لغزش در امتدادهای دیگر نیز وجود دارد که با توجه به درزه داری توده سنگ قابل انتظار بود. بنابراین راستا با بیشترین درصد بازیابی با در نظر گرفتن ایمنی لغزش گوه ای برای طرح استخراج معدن پیشنهاد شد.

کلید واژه‌ها: *گسیختگی ساختاری، درزه، سنگ ساختمانی، سنگ تزئینی، استخراج بهینه، ناپیوستگی، امتداد جبهه کار*

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، عضو هسته پژوهشی مکانیک سنگ، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان afatemi@eng.usb.ac.ir
۲ و ۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، عضو هسته پژوهشی اکتشاف مواد معدنی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
۴. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه بیرجند، بیرجند
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

معادن سنگ های تزئینی از جهات مختلفی با سایر منابع معدنی متفاوت هستند. استخراج سنگ تزئینی، هنر جمع آوری قطعات سنگی کامل و عظیم بدون خرد شدن و ترک خوردگی است به گونه ای که کمترین آسیب به بلوک سنگی استخراج شده وارد شده باشد. به طور کلی عوامل اصلی افزایش سودآوری یک معدن سنگ ساختمانی، بهینه سازی اندازه بلوک و تمرکز بر تولید بلوک های خام با کیفیت بالا و ابعاد مناسب است تا علاوه بر اجتناب از تولید ضایعات ناشی از بلوکهای کوچک و غیر قابل استفاده در مرحله تولید پلاک، صدمات کمتری هم به محیط زیست وارد نماید. مونتانی (Montani, 2003) بیان کرده است که با در نظر گرفتن میانگین جهانی استخراج سنگ‌های تزئینی، تنها یک سوم مواد خام استخراج شده به عنوان محصول نهایی وارد بازار مصرف می‌شود، در حالی که دو سوم باقیمانده ضایعات است. جلالیان (Jalalian, et al., 2021) نیز در تحقیقی بیان کرده است که حدود ۵۱ درصد از کل سنگ استخراج شده از معادن سنگ تزئینی ایران در طول عملیات استخراج به باطله تبدیل می شود و تقریباً ٤١ درصد از سنگی که به کارخانه های فرآوری سنگ می رسد در طول عملیات فرآوری به باطله تبدیل می شود. بنابراین، نرخ بازیافت کلی فرآیند تولید سنگ تزئینی تقریباً ۲۹ درصد است که بیانگر حجم قابل توجهی از منابع از دست رفته و مقادیر زیادی باطله تولید شده است. همچنین اشنایدر (Schneider, et al., 2022) معتقد است، تنها با در نظر گرفتن محدودیت های ناشی از محدودیت های عوارض ساختاری و بر اساس وضعیت زمین شناسی می توان قابلیت استخراج اقتصادی ذخایر سنگ طبیعی را در دراز مدت حفظ یا افزایش داد.

از آنجایی که استخراج سنگ های تزئینی به استخراج بلوک های بزرگ بدون ترک و شکاف بستگی دارد، توزیع و فاصله شکستگی ها در سنگ از اهمیت حیاتی برخوردار است، از طرف دیگر راستای جبهه کار استخراج صفحه جدیدی در توده سنگ ایجاد می کند که با تقاطع با صفحات ناپیوستگی بلوکهای سنگی را تشکیل می دهند. تشکیل بلوک های جداگانه موجود در توده سنگ نتیجه برخورد صفحات ناپیوستگی و صفحه جبهه کار با هم است. صفحات ناپیوستگی موجود در توده سنگ، بلوک استخراجی برش خورده را به زیربلوک های کوچکتر تقسیم می کند. لو (Lu and Latham, 1999) برای این بلوک ها از اصطلاح بلوک های درجا استفاده کرده است. هر چه اندازه زیربلوک های استخراجی کوچکتر باشد قابلیت برش و تولید پلاک های بزرگ از بلوک استخراجی کاهش می یابد. با توجه به اینکه صفحات شکستگی ساختاری باعث جدایش توده سنگ خواهد شد، بنابراین هر گونه ویژگی زمین شناسی که اندازه بلوک را محدود می کند، ارزش محصول نهایی را کاهش می دهد. بهره‌وری بلوک با در نظر گرفتن نقش درزه ها و شکستگی ها در توده سنگ و یافتن بهترین جهت استخراج افزایش می‌یابد و منجر به کاهش هزینه‌های استخراج و آسیب زیست محیطی کمتر می‌شود. هرچند در بسیاری از موارد پیش بینی وجود درزه ها و شکستگی ها در توده سنگ به علت تفاوت وضعیت ظاهری سنگ با آنچه در عمق توده سنگ وجود دارد دشوار و همراه با خطا است، اما مطالعه قسمت‌های کوچک‌تر توده سنگ و به‌کارگیری روش‌های دقیق نقشه‌برداری، این خطاها را کاهش می‌دهد. در میان روش‌های بررسی ناپیوستگی ذخایر سنگ ساختمانی، تکنیک‌های نقشه‌برداری پنجره ای و پردازش تصویر برای معادن در حال بهره برداری توصیه می‌شود، در حالی که به عقیده لویتسکی (Levytskyi, 2017, Martinez et al. 2017) روش‌های حفاری مغزه گیری و روش‌های ژئوفیزیک برای معادنی که جبهه کار باز شده ندارند توصیه می‌شوند.

۲. پیشینه تحقیق

به عقیده کاروالو (Carvallo, et al., 2008) ناپیوستگی ها، شکستگی ها و سطوح لایه بندی، قابلیت بهره برداری از

بلوک های سنگی تزئینی و قابلیت تجاری معادن را تعیین می کنند. وجود ناپیوستگی ها در یک توده سنگ ساختمانی نقشی دوگانه در استخراج معادن سنگ ساختمانی دارند. در صورتی که تعداد ناپیوستگی های موجود در توده سنگ به اندازه ای باشد که بتوان از آنها برای استخراج کمک گرفت، هزینه های برش کاهش خواهد یافت، اما ابعاد و شکل بلوک تولیدی تابعی از راستا و فاصله داری ناپیوستگی ها خواهد بود. توده سنگ هایی بدون یا با ناپیوستگی بسیار کم قابلیت تولید بلوک های با ابعاد بزرگ را دارند اما هزینه برش بلوک ها را افزایش خواهد یافت؛ اما در توده سنگ هایی با ناپیوستگی زیاد یا فاصله داری کم، استخراج منجر به تولید زیربلوک های کوچک و غیر قابل برش خواهد شد. هرچند به تازگی روش هایی توسط جلالیان و استرزالکوفسکی (Jalalian, et al., 2021, Strzalkowski, 2021) برای استفاده از ضایعات سنگ پیشنهاد شده است، اما به حداقل رساندن تولید ضایعات در طول بهره‌برداری و فرآوری از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی تأثیر مطلوب‌تری دارد. به همین دلیل محققین متعددی تلاش کرده اند راهی پیدا نمایند تا با استخراج بهینه معادن، بیشترین ابعاد بلوکی را که می توانند از جبهه کارهای معادن سنگ تزئینی و ساختمانی استخراج نمایند. یکی از این روشها پیاده سازی هندسی ناپیوستگی برای تعیین راستای جبهه کار است (Schneider, 2022, Yarahmadi, et al., 2018, Yarahmadi, et al., 2019) (شاهواروتی فراهانی و بابانوری ۱۳۹۵، الوان دارستانی و کوهی اصفهانی، ۱۳۹۰، شفیعی و همکاران، ۱۳۹۱، عطایی و همکاران، ۱۴۰۰).

سطوح زیربلوک های تشکیل شده، صفحات برش داده شده در عملیات استخراج و یا صفحات درزه های موجود در توده سنگ هستند. بنابراین با برش بلوک اسخراجی بلوک اصلی به زیربلوک هایی با ابعاد متفاوت تقسیم خواهد شد که تعداد و حجم این زیربلوک ها تابعی از تعداد، جهت درزه های موجود و امتداد جبهه کار استخراجی است. محققین زیادی روش هایی برای مدلسازی هندسی شکستگی ها در توده سنگ استفاده کرده اند. گهرویی و همکاران (۱۳۹۷) به روش شبکه شکستگیهای گسسته، مدلسازی سه بعدی هندسی درزه ها را انجام داده اند. مهری شال (۱۳۹۹) با استفاده از ابر نقاط سه بعدی و روش درزه نگاری دیجیتال درزه های موجود در توده سنگ را مدلسازی کرده است.

انتخاب بهترین راستا برای ایجاد جبهه کار استخراج بر اساس درزه های موجود در توده سنگ، انتخاب ابعاد بلوک استخراجی و یا زاویه بهینه پلاک بریده شده از یک بلوک از پارامترهای اساسی در بهینه سازی تولید اسلب است. برای یافتن بهترین مقدار این پارامترها، محققین مختلف روش هایی را به کار برده اند. الکارموتی (Elkarmoty et al., 2020) یک الگوریتم بهینه سازی سه بعدی را برای برش بلوک های سنگی زینتی ارائه داد. الگوریتم توسعه‌یافته وی مبتنی بر مدل‌سازی سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها به عنوان ورودی داده است. در این الگوریتم نسبت بازیابی در چندین جهت استخراج با استفاده از تقاطع بین ناپیوستگی‌ها و جهت حفاری محاسبه شده است. نگوین (Nguyen, et al., 2019) در پژوهشی، یک روش شبیه سازی کامپیوتری برای تولید شبکه شکستگی به صورت سه بعدی با هدف ارزیابی اندازه بلوک های استخراجی معرفی کرده است. نتایج مدل‌های عددی وی برای بهینه‌سازی برخی از پارامترهای فنی برای استخراج سنگ‌های ساختمانی و حصول اطمینان از پایداری دیواره در عملیات معدن می تواند استفاده شود. لو (Lu and Latham, 1999) نیز با تحلیل ناپیوستگی توده سنگ توزیع، فاصله داری و امتدادیافتگی آن ها پیش بینی در خصوص اندازه بلوکهای درجا انجام داده است. یاراحمدی (Yarahmadi, et al., 2018) نیز یک الگوریتم های برای تعیین هندسه بلوک ها و بهینه سازی استخراج بر اساس طبقه بندی کیفیت بلوک های تشکیل شده استفاده کرده است. ماش (Mosch, et al., 2011) نیز تحقیق مشابهی بر روی چندین معدن سنگ ساختمانی انجام داده است.

۳. مطالعه موردی و انتخاب بهینه ترین گزینه استخراج

در این تحقیق، بر اساس شناسایی و تعیین دسته درزه های موجود در توده سنگ یک معدن سنگ تزئینی، سعی شده است با کمک نرم افزار 3DEC در راستاهای فرضی مختلف برای جبهه کار، زیربلوکهای تشکیل شده به لحاظ حجمی تحلیل شوند و با توجه به حجم بلوک‌های ایجاد شده بهینه ترین امتداد برای جبهه کار استخراجی مشخص شود.

منطقه مورد مطالعه ساختگاهی است که در ۸۰ کیلومتری شهرستان طبس، در استان خراسان جنوبی قرار دارد. شکل ۱ عکس هوایی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. ماده معدنی در محدوده مورد نظر سنگ تزیینی مرمریت است که از لحاظ سنگ‌شناسی اکثرا از کلسیت و با ترکیبات ناخالصی از سایر کانی‌ها تشکیل شده‌است. کانی کلسیت دارای کلیواژ کامل موازی با سطوح رومبوئدری است و زاویه بین سطوح کیلواژ ۷٤ درجه می‌باشد. در اثر کلیواژ کلسیت به آسانی به صورت متوازی السطوح لوزی می‌شکند که این موضوع در انتخاب شیوه مناسب برای استخراج و فراوری با اهمیت است (Yarahmadi, et al., 2019).

شکل ۱. عکس هوایی منطقه مورد مطالعه

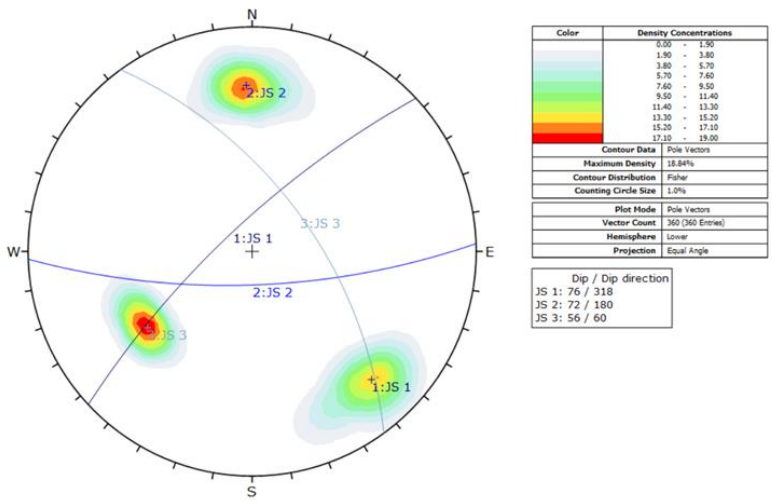
در محدود مورد مطالعه، ذخایر سنگی مورد نظر در دو منطقه مجاور و مجزا از نظر جنس و نحوه تشکیل می‌باشند که با فاصله حدود ٤۰۰ متر از یکدیگر قرار دارند. بخش اول ذخیره، سنگ مرمریت مشکی رنگ است که بخش اصلی ذخیره سنگ ساختمانی را تشکیل می‌دهد. قسمتی از مرمریت مشکی دارای رگچه‌های به شکل خطوط نامنظم کلسیت و سیلیس با طرح‌های ساده و پیچیده می‌باشد و قسمت دیگر با طرح و نقش آراگونیتی از لایه هایی موازی و منظم تشکیل شده‌است. بخش آراگونیتی این ذخیره که ارزش اقتصادی بیشتری دارد، شامل رگه ای به ضخامت حدود ۱۵ متر داخل بخش مشکی رنگ ذخیره محصور شده است.

بخش دوم ذخیره، سنگ مرمریت قرمز رنگ است که اگر چه شکستگی های ساختاری بیشتری در آن وجود دارد و احتمالا قابلیت کوبدهی پایینتری داشته باشد، اما به دلیل طرح و رنگ زیبا، نزدیک بودن به محل ذخیره مرمریت مشکی و بازار مصرف مناسب ارزش اقتصادی جهت استخراج دارد. شکل ۲ رخنمون این بخش از ماده معدنی را نشان می دهد.

شکل ۲. رخنمون ذخیره سنگ. راست: ذخیره مرمریت مشکی چپ: مرمریت قرمز رنگ

شواهد اولیه و گستردگی درزه‌های سطحی بیانگر این موضوع است که میزان کوبدهی بلوک‌های استخراجی به شدت تابع درزه های موجود در توده سنگ می باشد. در برخی مناطق وضعیت جهت‌یافتگی و فاصله ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها به نحوی است که میزان کوبدهی ذخیره را بسیار پایین می‌آورد. از طرف دیگر وضعیت جهت‌یافتگی و فاصله درزه‌های طبیعی ممکن است به نحوی باشد که بتوان از آنها به عنوان یک سطح برش طبیعی در عملیات استخراج بهینه و اقتصادی استفاده نمود. بنابراین ضروری است که برنامه ریزی عملیات استخراج و انتخاب جبهه کارهای استخراجی بر اساس درزه ها و گسستگی های ساختاری توده سنگ باشد.

به منظور طراحی عملیات استخراج بهینه کانسار مورد نظر و لزوم در نظر گرفتن تاثیر وجود درزه های توده سنگ در درصد بازیابی بلوک های استخراجی و کنترل پایداری جبهه کار معدن، تلاش شد به کمک مدلسازی سه بعدی هندسی بلوک های استخراجی، طراحی استخراج معدن به گونه ای انجام شود که راستای انتخاب شده برای جبهه کار علاوه بر پایداری، بلوک های سنگ ساختمانی با ابعاد بزرگتری تولید نماید. به همین منظور مطالعات زمین‌شناسی ساختاری در منطقه مورد مطالعه انجام شد. برداشت دقیق مقدار شیب، امتداد و موقعیت درزه‌ها در محدوده معدنی در یک شبکه منظم انجام و نمودارهای رزدیاگرام برای تحلیل‌های بعدی تهیه شدند. بر اساس برداشت ۳۶۰ درزه در محدوده معدن، مشخصات دسته درزه های موجود در ذخیره بررسی شدند. شکل ۳ دسته درزه های موجود در منطقه را نشان می دهد. بر اساس نتایج بدست آمده از برداشت درزه ها و شکل ۳، سه دسته درزه در منطقه شناسایی شد که مشخصات آنها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل۳. دسته درزه های اصلی موجود در محدوده معدن

جدول ۱. *مشخصات دسته درزه های ساختگاه مورد مطالعه*

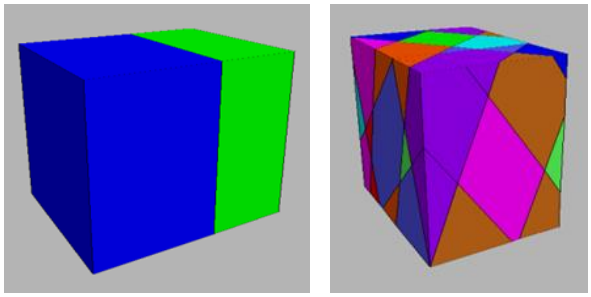
Spacing (m)	Dip	Dip Direction	Joint Set
1.3	76	318	1
2.75	72	180	2
2.73	60	56	3

به علت وجود دسته درزه های مشخص و سیستماتیک، توده سنگ مورد بررسی به آسانی به صورت بلوکهای متوازی السطوح می‌شکند که این موضوع در انتخاب شیوه مناسب برای استخراج و فراوری با اهمیت است. به همین دلیل با توجه به اینکه بلوک های استخراجی حاصل تقاطع صفحات ناپیوستگی و امتداد جبهه کار استخراجی است، بنابراین انتخاب راستای جبهه کار علاوه بر ابعاد بلوکهای سنگی استخراجی بر ناپایداری جبهه کار و تشکیل صفحات و گوه های ناپایدار در جبهه کار نیز تاثیرگذار خواهد بود. برای تعیین بهترین راستا برای جبهه کار استخراجی از اطلاعات جدول ۱ برای برای مدلسازی استفاده شد. در این تحقیق تلاش شده است تا راستایی انتخاب شود که ابعاد بلوک های استخراج شده بهینه ترین مقدار ممکن را داشته باشند و همچنین کمترین ناپایداری در جبهه کار وجود داشته باشد.

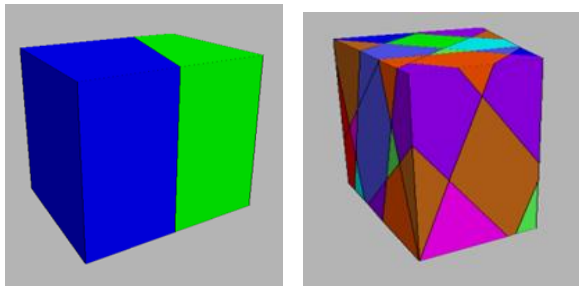
٤. مدلسازی هندسی توده سنگ و تعیین حجم بلوک ها

در این تحقیق به منظور تعیین راستایی که زیربلوک هایی با تعداد کم و حجم بالا تولید می کند، از روش مدلسازی هندسی سه بعدی با نرم افزار 3DEC استفاده شد. در این نرم افزار داده های ورودی اطلاعات برداشت شده درزه ها و راستای انتخابی جبهه کار استخراجی با شیب قائم است. بعد از پیاده سازی مدل، شکل هندسی مدل مطابق با شکل ٤ خواهد شد.

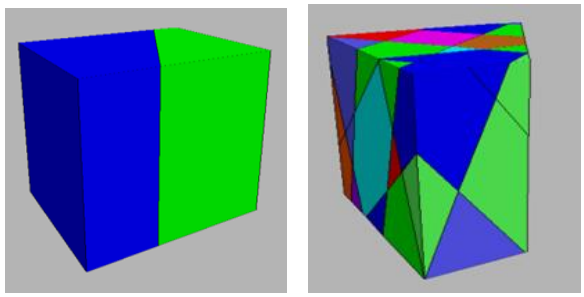
در این تحقیق چهار راستا برای جبهه کار استخراجی و شبیه سازی توده سنگ معدن روباز سنگ ساختمانی انتخاب شد. مدل هندسی با چهار امتداد مختلف ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درجه نسبت به شمال برای دیواره شرقی مدل مورد مطالعه قرار گرفته است.



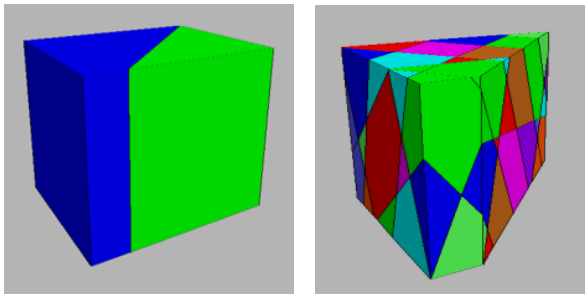
مدل M_I: امتداد دیواره شرقی ۰ درجه



مدل M_II: امتداد دیواره شرقی ۱۵ درجه



مدل M_III: امتداد دیواره شرقی ۳۰ درجه



مدل M_IV: امتداد دیواره شرقی ٤٥ درجه

شکل ٤. چار مدل مورد مطالعه در این تحقیق با امتدادهای مختلف دیواره شرقی

در ابتدا بلوک اصلی توده سنگ به ارتفاع چهار متر در راستای قائم و چهار متر در راستای شمالی – جنوبی و دیواره شرقی بلوک سنگی با این چهار امتداد ایجاد شده و سپس سه دسته درزه در این چهار مدل اعمال شده است. در شکل ٤ این

چهار مدل قبل از ایجاد شیب سنگی و بعد از تشکیل توده سنگ مدل و اعمال دسته درزه ها نمایش داده شده است. مدلهای عددی با چهار امتداد ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درجه نسبت به شمال مدل، بترتیب با نامهای M_I، M_II، M_III و M_IV در این تحقیق نامگذاری و ارجاع داده شده اند.

به منظور مقایسه بهتر و حذف تاثیر حجم مدل، دیواره شرقی در تمامی مدل ها به نحوی استقرار داده شده و قرار گرفته است که حجم توده سنگ بلوک اصلی مورد مطالعه در هر چهار مدل یکسان بوده و معادل ٤٨ متر مکعب باشد. سپس این دسته درزه ها در مدل اعمال شده و در اثر تقاطع این دسته درزه ها، مدل سه بعدی به زیربلوکهای کوچکتر تجزیه و تقسیم می شود.

پس از پیاده سازی درزه ها در هر یک از مدل ها، اطلاعات هر یک از این زیربلوک های تشکیل شده از مدل ها استخراج شد. این اطلاعات شامل تعداد و فراوانی و حجم زیر بلوکها در هر مدل است که این اطلاعات در کلاس های یک متر مکعبی تفکیک شدند. مطالعه داده های زیر بلوکها در هفت کلاس A تا G بشرح جدول ۲ مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول ۲. بازه های هفت کلاس برای مطالعه فراوانی و حجم داده های زیر بلوکها

G	F	E	D	C	B	A	**Classification Name**
6-7	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0-1	**Volumetric Class (m^3)**

۱,٤. *تحلیل فراوانی و حجم زیربلوک ها در راستاهای مختلف*

مدلسازی هندسه سه بعدی بلوک استخراج شده پس از اعمال دسته درزه ها، می تواند تعداد و حجم زیر بلوک های تشکیل شده در مدل را نشان دهد. تعداد زیربلوک ها در کلاس های مختلف مطابق جدول ۲ براساس حجم آنها از نرم افزار استخراج گردید و نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به متغیر بودن حجم بلوک ها در هر کلاس، جهت بدست آوردن جهت جبهه کار بهینه از نظر کوبدهی، باید حجم کل بلوک های موجود در هر کلاس نیز محاسبه شود. حجم زیربلوک هایی که در هر کلاس قرار می گیرند با هم جمع و به عنوان یک شاخص در نظر گرفته شده است. در بعضی مواقع ممکن است که تعداد قابل توجهی از زیربلوک ها حجمی کمتر از ۱ متر مکعب داشته باشند اما مجموع حجم آنها قابل ملاحظه نباشد. از سوی دیگر تعداد بلوک هایی که حجمی بیش از ٦ متر مکعب دارند در مقایسه با سایر کلاس ها قابل توجه نیست. به همین دلیل پس از مدلسازی هندسی، علاوه بر فراوانی تعداد زیربلوک ها در کلاس های تعریف شده، مجموع حجمی هر کلاس از زیربلوک ها نیز محاسبه شد. نتایج در جدول ۳ به صورت تعداد و حجم زیر بلوک های تولید شده در کلاس های A تا G نشان داده شده است.

با توجه به اینکه زیربلوک های تشکیل شده ناشی از استخراج بلوک اصلی سنگ ساختمانی که حجم کمی داشته باشند قابلیت تولید پلاک ندارند، بنابراین این بلوک ها به عنوان باطله در نظر گرفته می شوند. حد آستانه حجم بلوک که کمتر از آن به عنوان باطله در نظر گرفته می شود به نوع و قیمت سنگ بستگی دارد. محققین مختلف مقادیر مختلفی برای مرز بین بلوک باطله و اقتصادی در معادن سنگ ساختمانی ذکر کرده اند. به عنوان مثال، در تحقیق انجام شده توسط شاهواروقی فراهانی (۱۳۹۵)، برای یک معدن سنگ مرمر، این مقدار ۰/۵ مترمکعب در نظر گرفته شده است. در این تحقیق بر اساس تجربیات حاصل از مراحل برش و ساب در کارخانه های فرآوری و با توجه به دوری معدن از کارخانه فرآوری و بالا بودن هزینه های حمل و نقل، مقدار عددی ۲ متر مکعب به عنوان حد آستانه بلوک های اقتصادی و باطله در نظر گرفته شد. بنابراین بلوک های کلاس A و B باطله و سایر کلاس ها، بلوک های اقتصادی لحاظ شدند. بدیهی است بلوک های A و به خصوص بلوک های کلاس B می توانند برای سایر مصارف استفاده شوند.

جدول ۳. فراوانی و حجم زیربلوک ها بر اساس امتدادهای مختلف جبهه کار استخراجی

G	F	E	D	C	B	A	Classification Name	Strike
1	1	1	2	4	6	27	Frequency (number) of subblocks	0 degree
6.07	5.05	4.54	6.95	7.07	8.73	7.29	Volume (m^3) of subblocks	
1	1	2	1	3	8	26	Frequency (number) of subblocks	15 Degree
6.12	5.05	8.06	3.03	9.74	11.3	6.81	Volume (m^3) of subblocks	
1	1	2	1	1	9	29	Frequency (number) of subblocks	30 Degree
6.12	5.05	9.11	3.03	2.97	13.7	8.04	Volume (m^3) of subblocks	
1	1	2	1	2	6	32	Frequency (number) of subblocks	45 Degree
6.05	5.05	9.29	3.03	5.28	9.17	10.1	Volume (m^3) of subblocks	

با توجه به اینکه طول، عرض و ارتفاع بلوک اصلی به ترتیب ٤، ۳ و ٤ متر بود بنابراین حجم بلوک اصلی ٤٨ متر مکعب خواهد بود. بر اساس نتایج جدول ۳ مجموع حجم زیربلوکها در هفت کلاس برای هر چهار مدل دقیقا ٤٨ متر مکعب است که نشان دهنده اعتبار مدل درزه دار می باشد. در صورتی که بلوک های با حجم زیر ۲ مترمکعب (کلاس A و B)، به عنوان باطله در نظر گرفته شود، حجم کل بلوک های اقتصادی بدست آمده، مجموع حجم بلوک های C تا G است که این عدد در چهار امتداد مختلف ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درجه نسبت به شمال برای دیواره شرقی به صورت نتایج جدول ٤ می باشد. با توجه به حجم اولیه بلوک اصلی که ٤٨ متر مکعب است، درصد بازیابی هر امتداد استخراجی بدست خواهد آمد. جدول ٤ درصد بازیابی بلوک اصلی را برای هر جهت انتخابی نشان می دهد.

بر اساس نتایج جدول ٤ مشاهده می شود که راستای بهینه جبهه کار استخراج در دیواره شرقی معدن با توجه به خصوصیات دسته درزه های برداشت شده، زمانی است که با شمال زاویه ۱۵ درجه بسازد.

جدول ٤. درصد بازیابی بلوک های اقتصادی در هر امتداد جبهه کار استخراجی

45 Degree	30 Degree	15 Degree	0 Degree	Strike
28.7	26.28	32	29.68	The total volume of economic sub-blocks
59	54	66	62	Block economic recovery percentage

۵. بررسی پایداری جبهه کار استخراجی انتخابی

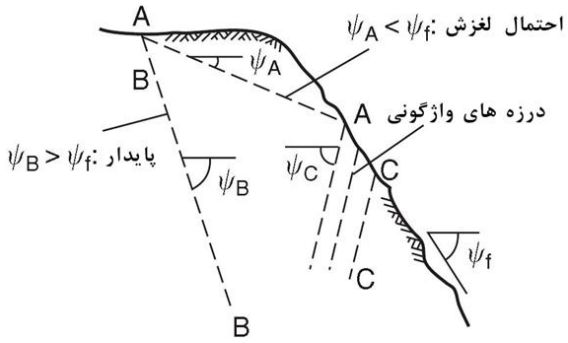
علاوه بر در نظر گرفتن بالاترین ضریب بازیابی، پایداری جبهه کار استخراجی نیز در مرحله طراحی معدن باید مد نظر قرار گیرد. رضایی (۱٤۰۲) معادن سنگ استان لرستان را جهت پایش پایداری ژئوتکنیکی بررسی کرده است. نتایج وی نشان می دهد که معادن سنگ به پایش دوره ای برای کنترل پایداری دیواره ها نیاز دارند. میکائیل (۱٤۰۰) نیز در تحقیقی به ضرورت بررسی و ارزیابی همزمان چالشهای ایمنی و اقتصادی در معادن سنگ ساختمانی اشاره کرده است. به همین دلیل اگرچه تولید بلوک های سنگ ساختمانی با

بیشترین ابعاد ممکن و شکل هندسی مناسب برای فرآوری از اولویت های اولیه طراحی معادن است و تلاش می شود تا با استخراج بهینه از طریق انتخاب راستای مناسب جبهه کار، بیشترین ابعاد بلوکی را که امکان دارد از جبهه کارهای معادن سنگ تزئینی و ساختمانی استخراج شود، اما از طرف دیگر در معادنی که توده سنگ دارای دسته درزه های ساختاری است، راستای جبهه کار تاثیر مستقیم بر میزان پایداری و جابجایی بلوک ها دارد. بنابراین در انتخاب راستای جبهه کار علاوه بر اینکه حجم بلوک های تولیدی باید مد نظر قرار گیرد، به پایداری بلوک های تشکیل شده در جبهه کار نیز باید توجه شود.

با توجه به اینکه در ساختگاه مورد مطالعه، بر اساس نتایج تحلیل حجم زیربلوک ها راستای جبهه کار با آزیموت ۱۵ درجه بالاترین درصد بازیابی را دارد، مطالعات تحلیل سینماتیکی پایداری دیواره معدن هم انجام شد تا در صورت عدم پایداری دیواره در این حالت گزینه های بعدی برای راستای جبهه کار مورد بررسی قرار گیرد. در یک توده سنگ با دسته درزه های موجود در آن متناسب با شیب و امتداد دسته درزه ها امکان لغزش های صفحه ای، گوه ای و واژگونی وجود خواهد داشت.

گسیختگی صفحه‌ای هنگامی رخ می‌دهد که تمامی شرایط هندسی لازم برای وقوع چنین گسیختگی وجود داشته باشد. شرایط لغزش صفحه ای به شرح زیر است که در شکل ۵ نیز نمایش داده شده است.

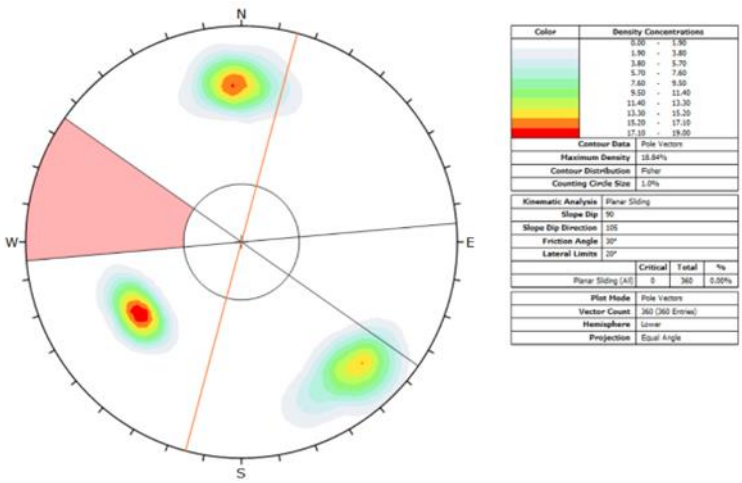
- امتداد صفحه لغزش باید موازی یا تقریباً موازی با دیواره باشد (در محدوده ۲۰ ± درجه)
- صفحه لغزش باید در سطح دیواره نمایان باشد به این معنا که شیب صفحه باید کمتر از شیب دیواره باشد ($\psi_A < \psi_f$).
- شیب صفحه لغزش باید بیش از زاویه اصطکاک این صفحه باشد ($\psi_A > \phi$)
- محدوده بالای سطح لغزش یا باید با شیب بالادست تداخل داشته باشد یا به یک ترک کششی منتهی گردد.
- سطوح رها شده که مقاومت ناچیزی در برابر لغزش دارند بایستی در توده سنگ آشکار شوند تا مرزهای جانبی لغزش مشخص گردد. از طرفی، گسیختگی می‌تواند در صفحه لغزشی که از دماغه شیب می‌گذرد رخ دهد.



شکل ۵. شرایط لغزش صفحه ای (Wyllie and Mah, 2004)

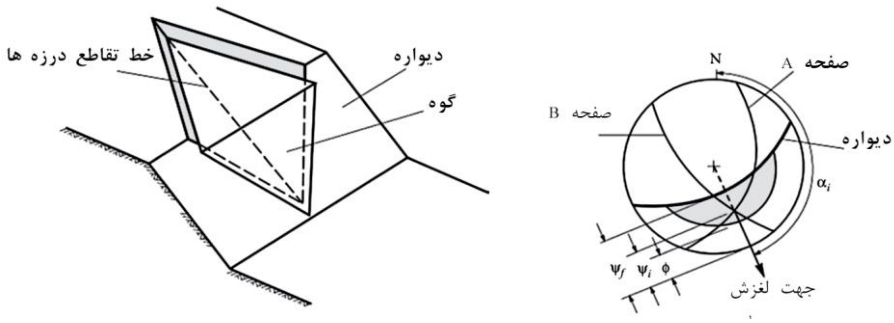
جهت ارزیابی احتمال تشکیل لغزش های صفحه ای، گوه ای و واژگونی از نرم افزار Dips استفاده شده است. داده های ورودی نرم افزار شیب و جهت شیب درزه ها و صفحه جبهه کار و همچنین زاویه اصطکاک سنگ و صفحات درزه است. با توجه به اینکه راستای بهینه جبهه کار در مرحله قبل ۱۵ درجه تعیین شده است، بنابراین شیب و جهت شیب پله ها به ترتیب ۹۰ و ۱۰۵ درجه انتخاب شده است. شیب و جهت شیب درزه ها نیز بر اساس اطلاعات جدول ۱ به نرم افزار وارد شد. بر اساس تحقیقات بارتن (Barton, 1973, Barton, 1976)، زوایای اصطکاک پایه بسیاری از انواع سنگ ها از ۲۱ درجه تا ۳۸ درجه متغیر است که در آن سنگهای رسوبی زاویه اصطکاک پایه کمتری (از ۲۵ درجه تا ۳۰ درجه) نسبت به سنگهای آذرین و دگرگونی (از ۳۰ درجه تا ۳۵ درجه) دارند. بنابراین در اینجا با توجه به ماهیت سنگ مرمر که تا حدی دگرگون شده است، زاویه اصطکاک ۳۰ درجه برای صفحات لغزش در تحلیل سینماتیکی در نظر گرفته شده است.

با توجه به فرض شرایط لغزش صفحه ای و با درنظر گرفتن شیب و جهت شیب امتداد بهینه به ترتیب با ٩٠ و ١٠٥ درجه و ترسیم دایره استریونت لغزش صفحه ای مطابق شکل ٦، قطب دسته درزه هایی که در ناحیه رنگی شکل ٦ قرار می گیرند، پتانسیل لغزش صفحه ای روی آن ها وجود دارد. نظر به اینکه قطب دسته درزه های موجود در توده سنگ در ناحیه رنگی وجود ندارد، بنابراین جبهه کار با آزیموت ١٥ درجه از نظر ریزش صفحه ای ایمن خواهد بود.



شکل ٦. تحلیل سینماتیکی ریزش صفحه ای در جبهه کار با آزیموت ١٥ درجه

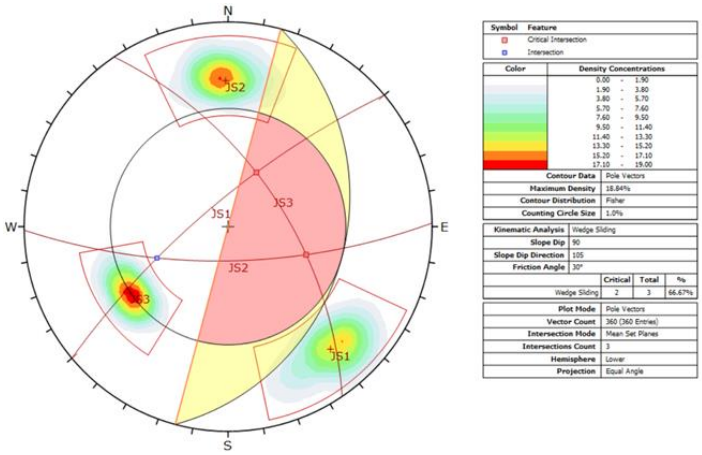
در حالتی که امتداد درزه ها با امتداد جبهه کار (دیواره) موازی نباشد و دیواره را قطع نماید، احتمال تشکیل گوه های سنگی در دیواره وجود دارد. شکل ٧ طرح شماتیکی از این لغزش را نشان می دهد. در این حالت ممکن است لغزش روی خط فصل مشترک و یا روی یکی از صفحات لغزش اتفاق بیافتد. در این مورد باید قطب فصل مشترک دو ناپیوستگی را روی استریونت مشخص کرد. اگر قطب این خط روی سطح پله رخنمون داشته ($\psi_i < \psi_f$) و مقدار آن بیشتر از زاویه اصطکاک درزه باشد($\psi_i > \phi$)، احتمال شکست وجود دارد. احتمال لغزش در این مورد بیشتر از شکست صفحه ای است. زیرا در این حالت دو سطح رهاساز وجود دارد. بنابراین پوش رخنمون برای خط تقاطع نسبت به پوش شکست صفحه ای پهن تر است.



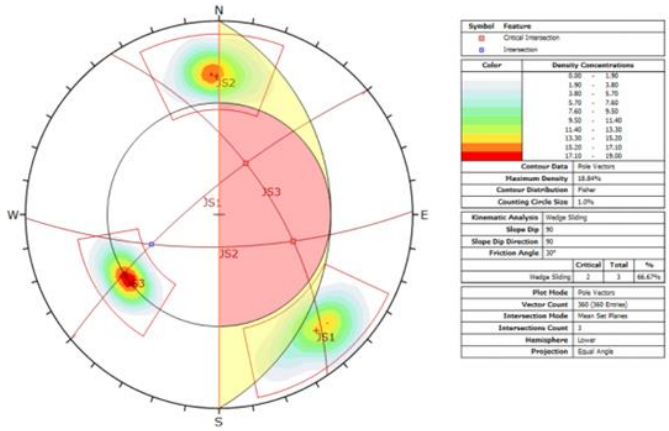
شکل ٧. شرایط هندسی برای شکست گوه ای (Wyllie and Mah, 2004)

در شکل ٨ تحلیل سینماتیکی ریزش گوه ای معدن نشان داده شده است. نقاط مشخص شده بر روی دایره استریونت، نماینده فصل مشترک جفت درزه ها می باشد که در صورت قرار گرفتن در محدوده قرمز رنگ، پتاسیل ریزش گوه ای دارند. با توجه به شکل، دو حالت از سه حالت برخورد دسته درزه ها، شرایط لغزش گوه ای را در امتداد بررسی شده جبهه

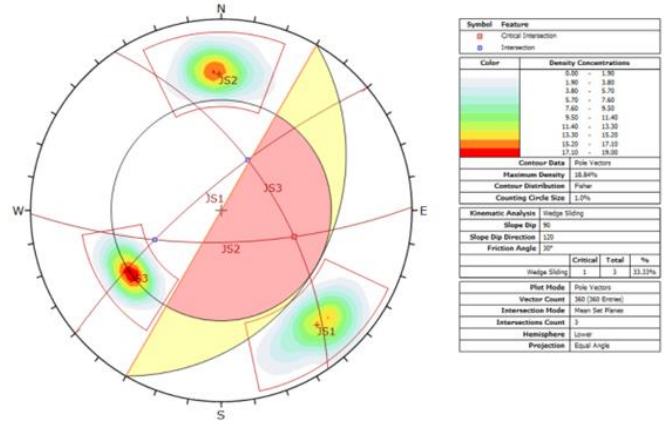
کار دارد. بنابراین احتمال لغزش گوه ای در امتدادهای دیگر نیز بررسی شد تا چنانچه به لحاظ پایداری امتدادهای دیگر شرایط مناسب تری داشته باشند به عنوان راستای جبهه کار انتخاب شود. همچنین اشکال ۹ تا ۱۱ تحلیل سینماتیکی لغزش گوه ای را در امتدادها با آزیموت صفر، ۳۰ و ٤٥ درجه نشان می دهند.



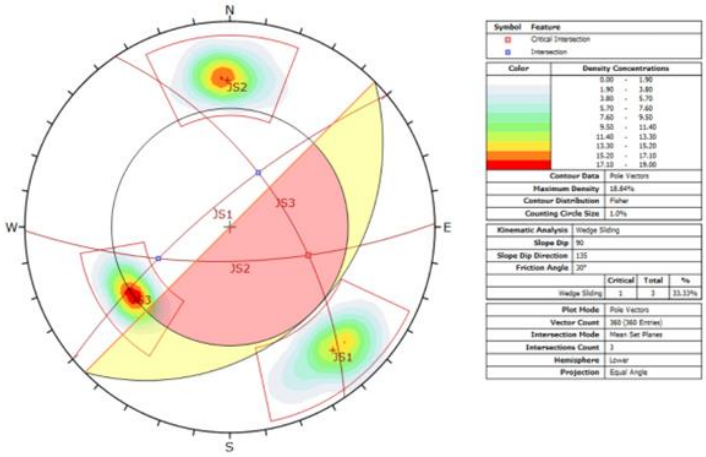
شکل ۸. تحلیل ریزش گوه ای معدن در جبهه کار با آزیموت ۱۵ درجه



شکل ۹. تحلیل ریزش گوه ای در جبهه کار با آزیموت صفر درجه



شکل ۱۰. تحلیل ریزش گوه ای در جبهه کار با آزیموت ۳۰ درجه



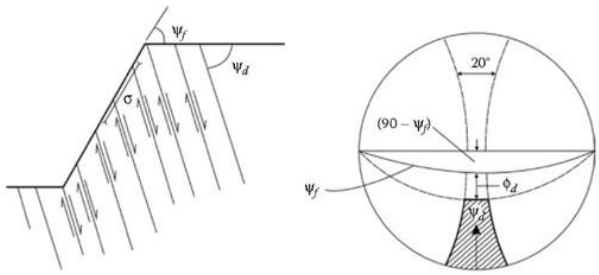
شکل ۱۱. تحلیل ریزش گوه ای در جبهه کار با آزیموت ٤٥ درجه

نتایج شکل های ۹ تا ۱۱ نشان می دهد که در سایر راستاهای جبهه کار نیز احتمال لغزش گوه ای وجود دارد. این امر به دلیل وجود سه دسته درزه با شیب و جهت شیب های متنوع است که باعث می شود در کل توده سنگ شرایط تشکیل گوه فراهم گردد و بنابراین قابل انتظار است که با راستاهای مختلف گوه های سنگی تشکیل شود. با توجه به اینکه در تمامی راستاها شرایط گوه های سنگی وجود دارد بنابراین همان راستای جبهه کار با آزیموت ۱۵ درجه که بیشترین درصد بازیابی را دارد به عنوان راستای بهینه انتخاب شده است. البته باید توجه داشت که در حین استخراج و برش بلوک های سنگی گوه های تشکیل شده و لغزش احتمالی آنها خسارت های جانی و مالی وارد نکند. شکل ۱۲ یک گوه تشکیل شده در جبهه کار یک معدن سنگ ساختمانی را نشان می دهد که ممکن است شبیه به این حالت در ساختگاه مورد مطالعه رخ دهد. هر چند که به دلیل اینکه درزه های برداشت شده در این ساختگاه، درزه های سطح زمین بودند با پیشروی معدن به عمق و کاهش درزه ها احتمال رخداد این لغزش ممکن است کاهش یابد.

شکل ۱۲. ایجاد و لغزش گوه سنگی در یک معدن سنگ تزئینی

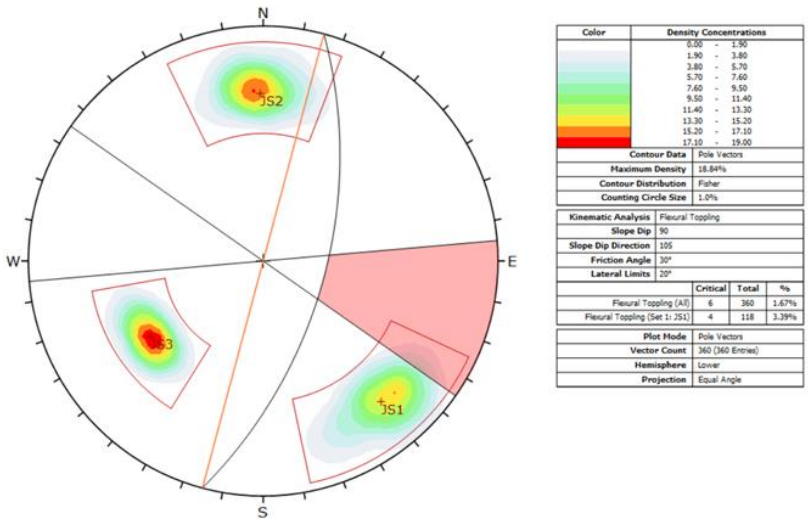
جهت اطمینان خاطر کامل از ایمنی جبهه کار، تحلیل لغزش واژگونی نیز در امتداد انتخاب شده انجام گردید. برای وقوع شکست واژگونی، ناپیوستگیها باید در جهت خلاف سطح پله، شیب داشته و اختلاف امتداد آنها با امتداد سطح پله کمتر از ۲۰ درجه باشد. در این حالت تعدادی بلوک با ضخامت کم به موازات سطح شیب ایجاد می شود. هم چنین شیب این پله ها باید به حد کافی زیاد باشد تا امکان لغزش بین صفحه ای فراهم شود. اگر ϕ_d زاویه اصطکاک سطح لایه ها باشد، لغزش زمانی اتفاق می افتد، که زاویه اعمال نیروی فشاری نسبت به عمود بر سطح لایه، از ϕ_d بیشتر

باشد. جهت تنشهای اصلی در منطقه، به موازات سطح شیب بوده (زاویه شیب ψ_f)، بنابراین لغزش بین لایه ها وشکست واژگونی صفحه های با شیب ψ_d ، در صورتی بوجود می آید که شرط $(90-\psi_f)+\phi_d<\psi_d$ برآورده شود. شرایط شیب و جهت شیب صفحه ها در شکست واژگونی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. شرایط لغزش واژگونی (Wyllie and Mah, 2004)

شکل ١٤ تحلیل سینماتیکی ریزش واژگونی دیواره های معدن را نشان می دهد. با توجه به شکل ١٤، در حالتهای واژگونی مستقیم و مایل به ترتیب ۲ و ۸ درصد از فصل مشترک صفحات پتاسیل ریزش واژگونی دارند که ناچیز بوده و دیواره های معدن از این نظر ایمن می باشند.



شکل ١٤: تحلیل ریزش واژگونی در جبهه کار با آزیموت ۱۵ درجه

با توجه به تحلیل سینماتیکی پایداری جبهه کار معدن با آزیموت ۱۵ درجه و عدم ناپایداری صفحه ای و واژگونی و ناگزیر بودن لغزش های گوه ای در تمام جهات، می توان این جهت را به عنوان امتداد بهینه جبهه کار در نظر گرفت. البته با توجه به احتمال لغزش های گوه ای در عملیات استخراج باید تمهیدات مناسب برای عدم بروز خسارت های جانی و مالی اندیشیده شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با تعیین مشخصات دسته درزه ها در یک معدن سنگ مرمریت و با استفاده از مدلسازی هندسی بلو ک ها در محیط نرم افزار 3DEC ، راستای بهینه جبهه کار استخراجی، جهت دستیابی به بیشترین ارزش اقتصادی تعیین شده است. در این معدن سه دسته درزه مشخص برداشت شده است که پس از مدلسازی این دسته درزه ها و بررسی چهار راستای جبهه کار استخراجی مختلف با زوایای ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درجه نسبت به شمال در دیواره شرقی معدن، مشخص شد که بیشترین میزان حجم استخراج بلوکها به صورت اقتصادی

(حجم بلوکهای زیر دو متر مکعب به عنوان باطله در نظر گرفته شده است)، در راستاهای مورد مطالعه به ترتیب با زوایای ١٥، ٠، ٣٠ و ٤٥ درجه دیواره شرقی با شمال است.

از منظر تحلیل پایداری جبهه کار استخراج، با توجه به هندسه متفاوت چهار مدل، به لحاظ بلوک های تشکیل شده در اثر تقاطع ناپیوستگی ها و امتداد های مختلف جبهه کار در دیواره شرقی، بلوک هایی که امکان لغزش و حرکت پیدا می کنند متفاوت است. به همین منظور مطالعات تحلیل سینماتیکی پایداری دیواره معدن برای هر کدام از راستاهای در نظر گرفته شده انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده، در امتداد با آزیموت ١٥ درجه احتمال لغزش صفحه ای و واژگونی وجود ندارد؛ اما احتمال لغزش گوه ای وجود دارد. از طرفی احتمال لغزش گوه ای در سایر امتداد ها نیز وجود دارد، بنابراین همان امتداد با آزیموت ١٥ درجه به عنوان راستای بهینه استخراج انتخاب شد اما ایمنی کار نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در نهایت بر اساس ملاک های درصد بازیابی و ایمنی جبهه کار، امتداد با آزیموت ١٥ درجه به عنوان راستای بهینه انتخاب شد.

با توجه به اینکه در مرحله مطالعات اکتشافی هنوز هیچ جبهه کاری از توده سنگ باز نشده است تا وضعیت درزه داری آن در عمق مشخص شود، پیش بینی وضعیت بلوک استخراجی و میزان خرد شدگی آن ناشی از گسیختگی های ساختاری توده سنگ، در مراحل اکتشاف معدن ممکن است همراه با خطا باشد. به علاوه با افزایش عمق معدن روند درزه داری توده سنگ ممکن است با برداشت های سطحی که در مرحله اکتشاف انجام شده است متفاوت باشد؛ لذا پیشنهاد می گردد در طی عملیات بهره برداری و باز شدن جبهه کارهای معدن، برداشت درزه ها انجام و نتایج این تحقیق صحت سنجی و بروزرسانی گردد.

منابع

الوان دارستانی، رضا وکوهی اصفهانی، وفا, مطالعات درزه نگاری و بررسی های ژئومکانیکی در طراحی و استخراج معادن سنگ ساختمانی، مطالعه موردی: معدن مرمریت برد شیراز. زمین و منابع, ١٣٩٠. ٤(١): ١١-١٦

رضائی، محمد, پایش پایداری ژئوتکنیکی معادن سنگ لاشه استان کردستان. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران, ١٤٠٢. ١٦(٢): ١٨-١

شاهواروقی فراهانی، حسین و بابانوری، نیما, بهینه سازی راستای استخراج سنگ های ساختمانی با استفاده از تحلیل بلوکی، مطالعه موردی: معدن تراورتن دینگله کهریز، چهارمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، معماری و گسترش شهری. ١٣٩٥.

شفیعی، شهرام, عبادی، محمد و ترکاشوند، مصطفی, تحلیل ناپیوستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی و اهمیت آن در بهینه‌سازی استخراج (مطالعه موردی معدن سنگ ساختمانی سعیدی، کرمان). فصلنامه علمی علوم زمین, ١٣٩١. ٢١(٨٤): ٨٩-٩٨

عطایی، محمد, صالح آبادی، هادی و رفیعی، رامین, تعیین جهت بهینه استخراج به‌منظور بیشینه‌سازی کوپ‌دهی سنگ ساختمانی با استفاده از مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها (مطالعه موردی معدن تراورتن کپیول). نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران, ١٤٠٠. ١٤(٢): ٢٩-١٥

گهرویی باجگیرانی، فرزاد, امامی میبدی، عنایت الله و مهرنهاد، حمید, مدلسازی هندسی درزه ها به روش شبکه شکستگیهای گسسته سه بعدی (مطالعه موردی ساختگاه سد لیرو). نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران, ١٣٩٧. ١١(٣): ٢٩-٤٦

مهری شال، سید احمد, محاسبهٔ توزیع حجم بلوک های برجای توده سنگ دارای درزه های پایا با استفاده از ابر نقاط سه بعدی به دست آمده از روش های درزه نگاری دیجیتال نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران, ١٣٩٩. ١٣(٤): ٤٣-٦٠

میکائیل، رضا, سلطانی، بهروز, علیپور، عارف و جعفرپور، امیر, بررسی و ارزیابی چالشهای ایمنی و اقتصادی پیش‌رو در معادن سنگ ساختمانی استان آذربایجان‌غربی با استفاده از روش FMEA. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران, ١٤٠٠. ١٤(٤): ٥٩-٧٣

Barton, N., Review of a new shear-strength criterion for rock joints. Engineering geology, 1973. 7(4): p. 287-332.

Barton, N., The shear strength of rock and rock joints. International Journal of rock mechanics and mining .sciences & Geomechanics abstracts, 1976. 13(9): p. 255-279

Carvalho, J.F., et al., Decision criteria for the exploration of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline. International journal of rock mechanics, 2008. 45(8): p. .1306-1319

Elkarmoty, M., Bonduà, S., and Bruno, R., A 3D optimization algorithm for sustainable cutting of slabs from .ornamental stone blocks. Resources Policy, 2020. 65: p. 101533

Jalalian, M.H., Bagherpour, R., and Khoshouei, M., Wastes production in dimension stones industry: .resources, factors, and solutions to reduce them. Environmental Earth Sciences, 2021. 80(17): p. 1-13

Levytskyi, V., The new approach of using image and range based methods for quality control of dimension .stone. Reports on Geodesy Geoinformatics, 2017. 103(1): p. 66-77

Lu, P. and Latham, J.-P., Developments in the assessment of in-situ block size distributions of rock masses. .Rock mechanics and rock engineering, 1999. 32(1): p. 29-49

Martinez, J., et al., Utilization of integrated geophysical techniques to delineate the extraction of mining .bench of ornamental rocks (marble). Remote Sensing, 2017. 9(12): p. 1322

Montani, C., Stone 2002—World marketing handbook. Faenza, Gruppo Editoriale Faenza Editice, Faenza, .2003

Mosch, S., et al., Optimized extraction of dimension stone blocks. Environmental Earth Sciences, 2011. 63: .p. 1911-1924

Nguyen, A.T., et al., Determining for an output capacity of dimension stone exploitation from the computer simulations to generate the fracture network in 3D: case study in some dimensional stone quarries in .Vietnam. Inżynieria Mineralna, 2019. 21

Schneider-Löbens, C., et al., Joint Analysis as an Important Tool for an Optimizing Block Extraction of .Natural Stones. Environmental Earth Sciences, 2022. 81(3): p. 94

Strzałkowski, P., Characteristics of Waste Generated in Dimension Stone Processing. Energies, 2021. .14(21): p. 7232

.Wyllie, D.C. and Mah, C., Rock slope engineering. 2004: CRC Press

Yarahmadi, R., et al., Determining the optimum cutting direction in granite quarries through experimental .studies: a case study of a granite quarry. Bulletin of Engineering Geology, 2019. 78(1): p. 459-467

Yarahmadi, R., et al., Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production .in dimension stone quarries. Engineering Geology, 2018. 232: p. 22-33

Yarahmadi, R., et al., A new quality factor for the building stone industry: A case study of stone blocks, slabs, and tiles. Bulletin of Engineering Geology the Environment, 2019. 78: p. 533-542.