

مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی امکان‌پذیری استخراج بلوک‌های سنگ ساختمانی بدون کف‌بری، مطالعه موردی: معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات

رضا احمدی^{۱*} و سارا عباسی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

نویسنده مسئول: * Rezahmadi@gmail.com

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۲۷

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱

چکیده

عدم‌نیاز به برش کف (کف‌بری) در استخراج بلوک‌های سنگ‌ساختمانی به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیات استخراج و کاهش زمان انجام عملیات، هدف اصلی پژوهش حاضر است. با استفاده از روش‌هایی همانند حفر چال‌های موازی شامل روش‌های استخراج با پارس‌وگوه، استفاده از مواد شیمیایی منبسط‌شونده و چال‌های موازی همپوش می‌توان به برش اولیه سنگ پرداخت و بلوک را بدون نیاز به کف‌بری از سینه‌کار جداسازی نمود. البته در این روش‌ها همواره محدودیت‌های ارتفاع و ضخامت (عرض) بلوک و سرعت‌عمل پایین وجود دارد. بنابراین مطالعات آزمایشگاهی به‌منظور دستیابی به هدف، بطور ویژه در روش استخراج با سیم‌برش الماسه در معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات واقع در استان مرکزی به‌عنوان مطالعه موردی انجام شد. در برخی مناطق این معدن بویژه منطقه ۱۴ در زیر لایه تراورتن، لایه‌ای از جنس شیل (رس) وجود دارد. در فرآیند آزمایش، برای شبیه‌سازی واقعیت در عمل، ابتدا بر روی نمونه‌ها در آزمایشگاه دو برش قائم عمودبرهم (با زاویه نود درجه نسبت به یکدیگر) ایجاد شد. سپس به کمک قطعه فولادی گوه‌ای شکل با انتهای صفحه‌ای بر شکاف نمونه‌های سنگ نیروی قائم اعمال گردید. نتایج پژوهش حاضر به کمک مطالعات آزمایشگاهی بر روی چهار نمونه سنگی تراورتن حاجی‌آباد محلات دارای لایه‌بندی طبیعی و ظریف نشان داد که با اعمال نیروی قائم بر شکاف نمونه‌ها و بدون کف‌بری، در سطوح ضعف مکانیکی سنگ سطوح شکست صاف و مسطح ایجاد شد. این یافته نشان‌دهنده امکان‌پذیری استخراج معادن سنگ‌ساختمانی تراورتن دارای لایه‌بندی و ارتفاع زیاد، با روش استخراج سیم‌برش الماسه بدون نیاز به کف‌بری است.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌ساختمانی، سیم‌برش الماسه، کف‌بری، مطالعات آزمایشگاهی، تراورتن حاجی‌آباد محلات

۱- پیشگفتار

استخراج نیز همانند استخراج حرارتی (جت‌شعله)، استخراج هیدرومکانیکی (جت‌آب) و استخراج توسط اشعه لیزر بصورت خیلی محدود مورد استفاده قرار گرفته است. برای جداسازی بلوک از سینه‌کار نیز می‌توان از جک‌های هیدرولیکی و مکانیکی، بالشتک‌های منبسط‌شونده (هیدرولیکی و هوای فشرده) و تجهیزات جابجایی در معادن همانند لودر، بلدوزر، بیل مکانیکی و جرثقیل استفاده کرد. انتخاب روش استخراج مناسب از میان روش‌های موجود به معیارهای مختلفی از جمله فناوری روز در دسترس، سودناخالص، مرغوبیت، ایمنی، امکان تأمین آب کافی، میزان سازگاری با محیط‌زیست و غیره بستگی دارد. در جدول ۱ روش‌های مختلف برش سنگ ساختمانی بطور کیفی مورد مقایسه قرار گرفته است. اگرچه در حال حاضر استخراج ۹۰ درصد معادن سنگ تزئینی ایران با

استخراج سنگ‌های ساختمانی شامل دو مرحله است؛ مرحله نخست برش اولیه بلوک و جداسازی آن از سینه‌کار و مرحله دوم، قواره‌کردن آن یعنی تقسیم‌بندی بلوک‌ها به قطعات کوچک‌تر قابل حمل‌ونقل و جابجایی است که برش ثانویه نیز نامیده می‌شود. برای استخراج بلوک سنگ‌ساختمانی، روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین، متداول‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها عبارتند از روش استخراج با سیم‌برش‌های فولادی و الماسه، استخراج با ماشین‌های شیارزن (هاواژ) و استخراج با چال‌های موازی که خود شامل روش‌های استخراج با پارس‌وگوه (دستی و مکانیکی یا دستگاهی یا مکانیزه)، استخراج با استفاده از مواد شیمیایی منبسط‌شونده و چال‌های موازی همپوش می‌باشد. همچنین طی سال‌های اخیر روش‌های نوین

و معدن دره‌بخاری در منطقه محلات استان مرکزی از ترکیب دو روش استخراج سیم‌برش الماسه و ماشین شیارزن برای استخراج بخش‌هایی از معدن استفاده می‌شود (احمدی، ۲۰۲۲).

روش سیم‌برش الماسه صورت می‌گیرد (خدادادی، ۲۰۰۲؛ اسعدفاطمی و پروین، ۲۰۰۵؛ عطایی، ۲۰۰۸؛ احمدی، ۲۰۱۷ب)، ولی استفاده از روش‌های دیگر بصورت انفرادی و یا ترکیبی در برخی از معادن، بازدهی و راندمان بهتری دارد. به‌عنوان مثال در معدن مرمیت پرتاووسی بهاباد یزد

جدول ۱. مقایسه کیفی روش‌های مختلف برش اولیه سنگ ساختمانی

Table 1. Qualitative comparison of various primary cutting methods of building stone

روش استخراج فاکتور مقایسه	سیم‌برش	ماشین برش با بازوی زنجیردار	ماشین برش نواری	آتشباری کنترل‌شده	پارس‌وگوه مکانیکی	پارس‌وگوه دستی	پودرهای منبسط‌شونده
سرمایه‌گذاری اولیه	متوسط	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	متوسط	متوسط	کم	کم
انعطاف‌پذیری	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	خیلی زیاد	زیاد
سازگاری با محیط‌زیست	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	کم	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	زیاد
بازدهی انرژی	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	متوسط	متوسط	کم	متوسط
سهولت در جابجایی بلوک‌ها	نسبتاً زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	نسبتاً زیاد	زیاد	زیاد
صدمه وارده به سنگ	هیچ	هیچ	هیچ	زیاد	کم	کم	خیلی کم
نیاز به نیروی کار ماهر	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	نسبتاً زیاد	کم	هیچ	کم

استخراج با پارس‌وگوه و استخراج با پودرهای منبسط‌شونده دامنه هدف در انجام پژوهش حاضر است که نخست اصول کلی هریک از این روش‌ها ارائه می‌شود. سپس روش انجام مطالعات آزمایشگاهی به‌منظور دستیابی به هدف بطور ویژه در روش استخراج با سیم‌برش الماسه در معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات واقع در استان مرکزی به‌عنوان مطالعه موردی آورده می‌شود.

۲-۱- روش استخراج با فناوری سیم‌برش الماسه

اگرچه مدت زمان زیادی از ورود فناوری سیم‌برش الماسه به صنعت سنگ نمی‌گذرد، اما در همین مدت، پیشرفت‌های زیادی حاصل کرده و با توجه به مزیت‌های این سیستم نسبت به روش‌های سنتی و همچنین انعطاف‌پذیری زیاد این سیستم، امروزه به‌عنوان بهترین و مناسب‌ترین روش در صنعت سنگ‌ ساختمانی تلقی می‌شود. روش کار این سیستم بدین صورت است که دستگاه سیم‌برش الماسه به طول ۲۵ تا ۴۵ متر (بیشینه ۱۵۰ متر) به وسیله یک وینچ (چرخ) به قطر ۵۰ تا ۸۰ سانتی‌متر با قرقره راهنما، در یک جهت معین به‌طور دائم روی سنگ چرخیده و موجب برش آن می‌شود (فیلگوئیرا و پیناتی، ۲۰۰۵). برای این منظور ابتدا در سنگ سه چال عمود برهم (دو چال افقی و یک چال قائم متقارب با

در ارتباط با سنگ‌های ساختمانی در گذشته پژوهش‌های چندی در زمینه‌های گوناگون مرتبط با این نوع ماده معدنی و نیز مقایسه روش‌های مختلف استخراج سنگ‌های ساختمانی با یکدیگر با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های مختلف انجام شده است (منندها و همکاران، ۲۰۱۴؛ کدیگلو، ۲۰۰۸). همچنین در موارد معدودی نیز بهینه‌سازی‌هایی در زنجیره صنعت سنگ ساختمانی شامل اکتشاف، استخراج و فرآوری سنگ صورت گرفته است (آروزیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ارشدنژاد و همکاران، ۲۰۱۱؛ پرسی و همکاران، ۲۰۰۶؛ فیلگوئیرا و پیناتی، ۲۰۰۵؛ ماربلی، ۲۰۰۴). اما هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی و ارزیابی شرایط، امکان‌سنجی و ارائه راهکارهایی برای استخراج سنگ‌های ساختمانی با روش‌های متداول و به‌روز استخراج سنگ بدون ایجاد برش افقی در کف بلوک سنگ (کف‌بری) است که تاکنون در هیچ پژوهشی به آن پرداخته نشده و مورد بررسی قرار نگرفته و وجه تمایز و نوآوری این پژوهش نسبت به سایر پژوهش‌های انجام شده قبلی است.

۲- مواد و روش‌شناسی پژوهش

عدم نیاز به کف‌بری در روش‌های متداول و معمول استخراج بلوک‌های سنگ‌ ساختمانی همانند سیم‌برش الماسه، روش چال‌های موازی شامل چال‌های همپوش،

بستگی دارد. تعداد چال‌ها برای یک سطح معین حد بهینه‌ای دارد که با در نظر گرفتن نوع سنگ، نوع و قیمت مته مورد استفاده در آن حد با کمترین هزینه، بهترین نتیجه حاصل می‌شود. هرچه چال‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، بلوک بهتر و مطمئن‌تر جدا می‌شود. البته از نظر اقتصادی تعداد زیاد چال‌ها پرهزینه است و باید فاصله مناسب چال‌ها را برای هر نوع سنگ با آزمایش‌های متعدد به‌دست آورد. تعداد چال‌ها در هر بلوک سنگ با افزایش طول و عرض بلوک، کاهش پیدا می‌کند. بنابراین استخراج بلوک‌هایی با طول و عرض بیشتر، اقتصادی‌تر است؛ البته بزرگی بلوک به شرایط معدن، تجهیزات، دستگاه‌ها و ماشین‌آلات نیز بستگی دارد. هم‌چنین عمق چال به جنس سنگ و ارتفاع بلوک مورد نظر بستگی دارد. به‌عنوان مثال در مورد سنگ گرانیت چهارپنجم ارتفاع بلوک، سنگ‌آهک یک‌سوم تا نصف ارتفاع بلوک و سنگ مرمر دو سوم ارتفاع بلوک مناسب است. در این روش بعد از حفر چال‌ها (همپوش یا غیرهمپوش) و ایجاد یک برش اولیه از ابزارها و روش‌های مکمل برای جداسازی بلوک بریده شده از سینه‌کار استفاده می‌کنند. پارس و گوه، مواد منبسط شونده، جک‌های هیدرولیکی و مکانیکی و تجهیزات جابجایی در معدن برای این منظور استفاده می‌شوند. در تمام این روش‌ها هدف، غلبه بر مقاومت کششی سنگ است.

۲-۳- روش استخراج به‌کمک پارس و گوه

استفاده از پارس و گوه یکی از قدیمی‌ترین روش‌های مورد استفاده در استخراج بلوک‌های سنگ است که به‌روش نعل‌وپارس نیز معروف است. در معادن سنگ ایران این روش، هم به‌عنوان یک روش برش اولیه سنگ‌های ساختمانی و هم یکی از روش‌های تبدیل بلوک‌های بزرگ سنگ به قطعات منظم و کوچک‌تر است. پس از حفر چال‌ها در هر چال دو تیغه فلزی و بین دو تیغه، یک گوه از جنس فلزی محکم قرار می‌گیرد. در این حالت مطابق شکل ۲ ابتدا گوه به‌کمک یک چکش سبک، بین دو پارس جایگذاری می‌شود. سپس با یک پتک به‌وزن ۱۰ کیلوگرم عمل ضربه‌زنی بر روی گوه تا شکافتن سنگ صورت می‌گیرد.

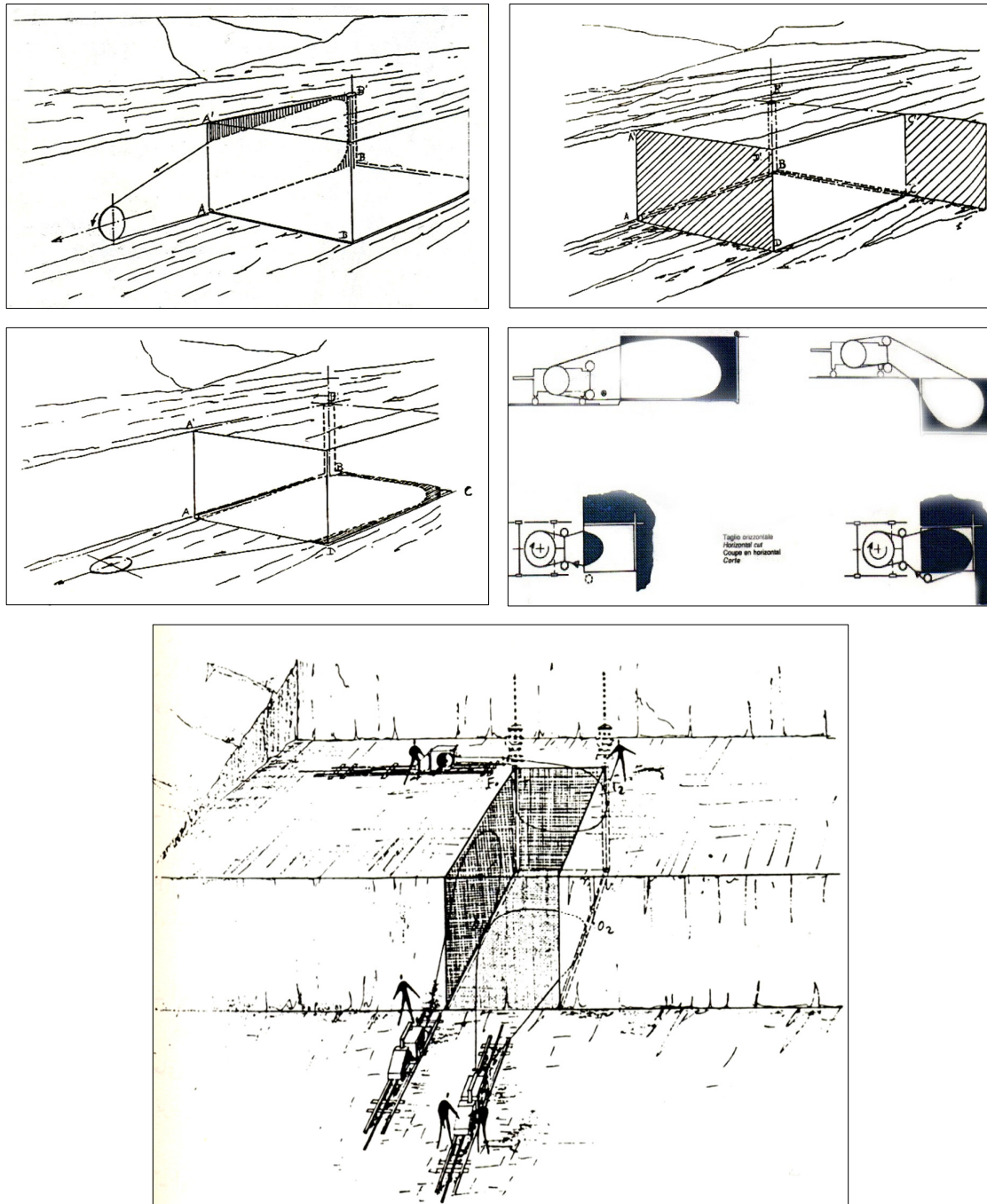
یکدیگر در یک نقطه) که محدوده بلوک را تشکیل می‌دهند، حفر شده، سیم الماسه از آن‌ها عبور داده می‌شود. به‌منظور خنک‌کردن سیم الماسه باید پیوسته آب وارد شیار سنگ شود. کمترین میزان آب مورد نیاز شش تا هشت لیتر در دقیقه است. چنانچه آب مصرفی جمع‌آوری شود و مجدداً مورد استفاده قرار گیرد، میزان آب مورد نیاز روزانه تا حدود ۲۰۰۰ لیتر کاهش می‌یابد؛ ولی در عمل میزان آب مصرفی که باید در مسیر برش، جریان یابد به‌مراتب بیش از این مقدار است و حدود یک متر مکعب در ساعت آب مصرف می‌شود؛ به‌ویژه در برش افقی باید دقت کرد که آب به‌اندازه کافی وارد شیار سنگ گردد. در غیراین‌صورت در اثر برش، پودر سنگ با آب کم، مخلوط شده و سبب تشکیل رسوب می‌شود که از بین بردن این رسوبات، به آب فراوان و پرفشار نیاز دارد.

دستگاه برش در موقع کار بر روی ریل قرار دارد و با استفاده از امکانات الکترونیکی و هیدرولیکی به‌طور خودکار بر روی ریل جابجا می‌شود و با انجام عمل برش، خود را به عقب می‌کشد. دستگاه وینچ معمولاً در فاصله پنج تا هشت متری سینه‌کار قرار می‌گیرد. بدین‌ترتیب حدود ۱۵ متر از سیم الماسه به‌طور آزادانه کار می‌کند. سازوکار دستگاه به‌گونه‌ای است که می‌توان مطابق شکل ۱ با جابجایی و تغییر جهت محور وینچ از حالت افقی به عمودی سنگ را به‌طور افقی و یا عمودی برید. برش افقی باید زمانی صورت گیرد که برش عمودی کوه هنوز انجام نشده است زیرا در غیر این صورت در انتهای برش افقی امکان دارد بلوک سنگ از کوه جدا شده و سیم‌برش را که در حالت افقی کار می‌کند، له نماید. بطورکلی بحرانی‌ترین، زمان‌برترین و پرهزینه‌ترین مرحله برش، برش سطح افقی یا کف بلوک سنگ است.

۲-۲- روش استخراج با چال‌های موازی

روش استخراج سنگ به‌کمک چال‌های موازی که به روش حفاری خطی نیز معروف است، قدیمی‌ترین روش استخراج سنگ می‌باشد. در این روش برای جداسازی بلوک سنگ از توده اصلی ابتدا در خط مورد نظر که بعداً ضلعی از صفحه جداسازی خواهد بود، تعدادی چال به فواصل معین از یکدیگر یا چسبیده به یکدیگر حفر می‌شود.

فاصله چال‌های یک ردیف می‌تواند از صفر تا چندین سانتی‌متر (معمولاً پنج تا ۳۰ سانتی‌متر) متغیر باشد. این امر به نوع سنگ، وزن مخصوص، سختی و استحکام سنگ



شکل ۱. نحوه برش وجوه مختلف بلوک سنگ با استفاده از روش سیم‌برش الماسه (احمدی، ۲۰۰۸)

Fig. 1. Cutting procedure of different surfaces of a stone block using diamond cutting wire method (Ahmadi, 2008)

نیست و در واقع به‌نوعی کار پارس‌وگوه را انجام می‌دهند. برای استفاده از این مواد باید چال‌های موازی در سنگ حفر کرد. سپس ماده مورد نظر را با آب مخلوط کرده تا بصورت دوغاب درآید. مطابق شکل ۳ دوغاب در چال‌ها ریخته شده و پس از مدتی در اثر پدیده آب‌گیری، تا

۲-۴- روش استخراج به‌کمک پودرهای منبسط-شونده

یکی از مواردی که در کارهای معدنی ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد، انواع پودرهای منبسط‌شونده است. قدرت انفجار و تخریب این مواد همانند باروت، آنفو و دینامیت

درخصوص بکارگیری پودرهای منبسط‌شونده تولید داخل، رضایت چندانی حاصل نشد، بنابراین گرایش به سمت استفاده از پودرهای منبسط‌شونده ساخت خارج همانند فرکت^۱، دکسپن^۲، کتراک^۳ و استامایت بیشتر است.

چندین برابر حجم خود افزایش حجم می‌دهد. در اثر این افزایش حجم، تنش فشاری بسیار زیادی به دیواره چال وارد می‌شود (<https://katrock.ir>). این پودرها انواع مختلفی دارند. بر اساس هشت مورد نظرسنجی‌های صورت‌گرفته از کارکنان معادن استان‌های مرکزی و همدان



شکل ۲. تصاویر پارس‌وگوه فلزی

Fig. 2. Images of metallic feathers and wedge



شکل ۳. پر کردن چال‌ها با پودرهای منبسط‌شونده و نمونه برش بلوک سنگ با این روش (ماربلی، ۲۰۰۴)

Fig. 3. Filling the holes with expansion powders and sample of stone lock cut by this method (Marbelli, 2004)

انواع پودرهای منبسط‌شونده تولید خارج نیز دارای مزایا و معایبی هستند، بنابراین در مورد بکارگیری این مواد نمی‌توان نسخه واحدی تجویز کرد و تنها مورد خاصی را برای استفاده در تمامی معادن سنگ توصیه نمود، بلکه کاربران می‌توانند با مقایسه انواع پودرهای منبسط‌شونده، بسته به جنس و نوع سنگ‌ساختمانی، شرایط محیطی (آب

اگرچه روش پودرهای منبسط‌شونده، در معادن سنگ ساختمانی ایران کاربرد گسترده‌ای ندارد، اما داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که این روش نسبت به دیگر روش‌های استخراج سنگ‌های ساختمانی بجز مورد بازدهی انرژی (که وضعیت متوسط دارد)، از منظر سایر جنبه‌های دیگر در سطح مطلوب‌تری قرار دارد. بطور کلی هریک از

³ Katrock

¹ FRACT.AG

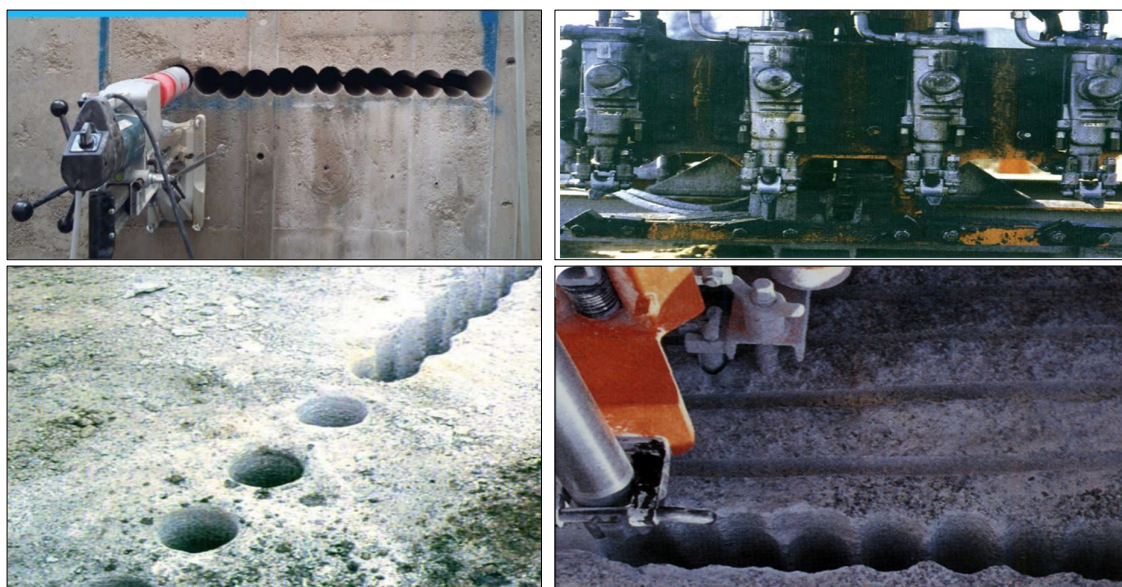
² Dexpan

اصلی جدا می‌شود. در حفر این چال‌ها می‌بایست نهایت دقت به عمل آید تا تمام چال‌ها بر روی یک صفحه واقع شوند. بدین منظور می‌توان از دستگاه‌های حفاری که دارای شاسی مخصوص هدایت‌کننده مته هستند، استفاده نمود. در این نوع دستگاه‌ها دو یا چهار مته بر روی یک شاسی قرار دارد. برای جداکردن سنگ همزمان چندین سرمته در یک صفحه، سنگ را برش می‌دهند. همچنین می‌توان از دستگاه حفاری استفاده کرد که بطور هم‌زمان یک صفحه برشی را ایجاد کند. دستگاه‌های حفر چال موازی، سبک بوده و به صورت تک‌بوم یا چندبوم روی یک ریل طراحی و تولید می‌شوند. همچنین قابلیت حفاری با آن‌ها به صورت عمودی، افقی و مایل امکان‌پذیر است. پایه‌های استقرار این دستگاه حفاری می‌تواند روی زمین و یا بر روی دیوار نصب شود.

و هوایی) و نوع عملکرد یعنی سرعت‌عمل، میزان مصرف و قیمت محصول یکی از انواع این پودرها را انتخاب کرده و بصورت انفرادی یا همراه با دیگر روش‌های استخراج سنگ ساختمانی بصورت ترکیبی برای استخراج استفاده نمایند. همچنین پیشنهاد می‌شود با انجام عملیات آزمایشگاهی متعدد و دقیق و افزودن یک‌سری ویژگی‌ها به پودرهای منبسط‌شونده تولید داخل، کیفیت آن‌ها را بالا برده و به محصولات مشابه خارجی نزدیک نمود.

۲-۵- روش استخراج با چال‌های همپوش موازی

در این روش برای جداسازی بلوک سنگ از توده اصلی مطابق شکل ۴ فقط از حفر چال‌هایی در کنار یکدیگر استفاده می‌شود. این چال‌ها به‌گونه‌ای حفر می‌شوند که مجموع آن‌ها باعث ایجاد یک صفحه آزاد در محدوده سنگ شده و در نتیجه سنگ در این صفحه به راحتی از توده



شکل ۴. انواع دستگاه‌های حفر و چال‌های همپوش موازی ایجاد شده در سنگ

Fig. 4. Types of drilling devices of overlapping parallel drill holes with the holes created in stone

۱۸ منطقه (زون^۱) تقسیم‌بندی شده است که با گذشت زمان، استخراج ماده معدنی از مناطق مختلف و کاهش وسعت محدوده‌ها، تقسیم‌بندی مناطق محدوده تغییر پیدا کرده است. در حال حاضر این محدوده شامل نه منطقه به نام‌های شش شرقی (6E)، شش غربی (6W)، هشت شرقی (8E)، هشت غربی (8W)، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۷ و ۱۸ می‌باشد.

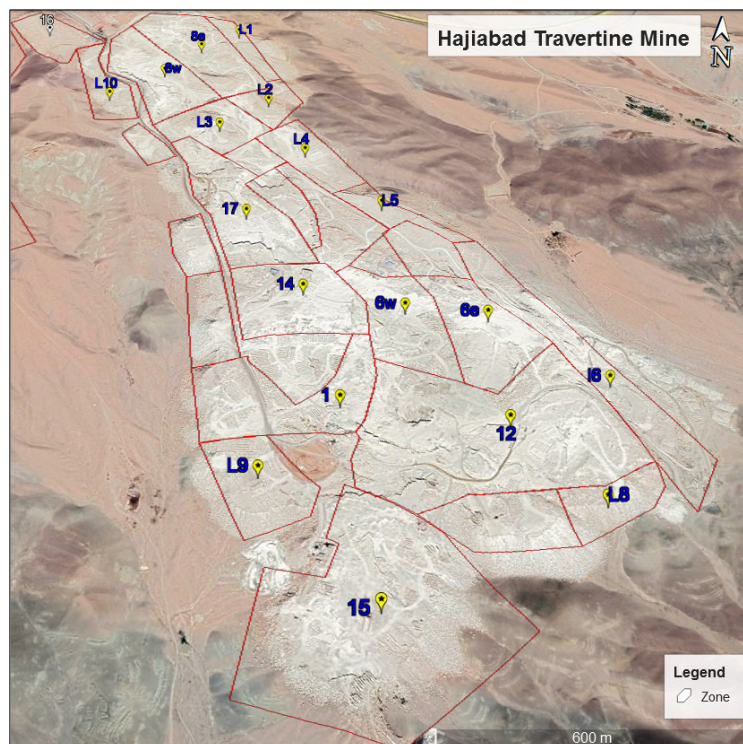
۳- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات (محدوده مورد مطالعه) بزرگ‌ترین معدن تراورتن ایران و خاورمیانه است که در غرب شهر محلات و کیلومتر پنج جاده محلات به خمین قرار دارد. به دلیل وسعت زیاد، محدوده مطابق شکل ۵ به

¹ zone

شیری رنگ تشکیل می‌دهد که توده‌ای بوده و به‌ندرت دارای لایه‌بندی هستند. مورفولوژی و زمین‌ریخت‌شناسی در ناحیه معدنی حاجی‌آباد به شکل تپه‌ماهور است. این تپه‌ها که عمدتاً ارتفاع کم و سطح مسطحی دارند، از ماسه‌سنگ، مارن و شیل‌های ائوسن تشکیل شده‌اند که بر روی این ارتفاعات در ناحیه با ناپیوستگی دگرشیب واحدهای تراورتن کوتاه‌تر قدیم نهشته شده‌اند. رخنمون واحدهای سنگی پالئوزوئیک در بخش شمالی و سنگ آهک‌های ستیغ‌ساز کرتاسه در بخش‌های شمالی و جنوبی برگه محلات مرتفع‌ترین ارتفاعات ناحیه را پدید آورده‌اند. براساس مطالعات و بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده در محدوده معدنی تراورتن حاجی‌آباد، شش نوع واحد سنگ‌چینه‌ای تفکیک شده است که شامل یک واحد ماسه‌سنگ، شیل و مارن ائوسن، دو واحد کنگلومرایبی تحتانی و فوقانی کوتاه‌تر و سه واحد تراورتن است که دارای قابلیت معدنکاری هستند. در این محدوده معدنی، نهشت تراورتن در بین دو واحد کنگلومرایبی و طی دو نسل صورت گرفته است. با توجه به اینکه تراورتن معدن حاجی‌آباد از رسوبات چشمه‌های آبگرم در بستری ناهموار تشکیل شده، ضخامت لایه تراورتن در محدوده متغیر است.

محدوده معدنی تراورتن حاجی‌آباد در پهنه ساختاری ایران مرکزی واقع شده است. از نظر موقعیت زمین‌شناسی این محدوده معدنی در چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۴۵۰۰۰۰ گلپایگان و برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات قرار دارد. از نظر چینه‌شناسی قدیمی‌ترین واحدهای سنگی رخنمون‌یافته سنگ‌های منسوب به سازند سلطانیه متعلق به پروتروزوئیک پسین-کامبرین پیشین هستند که در شمال‌غرب شهرستان محلات گسترش داشته و شامل دولومیت‌های ضخیم‌لایه به‌رنگ زرد، خاکستری‌تیره تا روشن هستند. سازندهای زاگون و لالون نیز با ناپیوستگی بر روی این واحد سنگی قرار گرفته‌اند که از شیل سیلتی سبز تا قرمز در پایین تا ماسه‌سنگ‌های آرکوزی کمی دگرگونه در بالا ادامه می‌یابد. حد بالایی این سازندها با همبری گسله توسط واحدهای سنگی پرمین پوشیده می‌شود. سنگ‌های پرمین در شمال و غرب محلات گسترش وسیعی دارند، بخش زیرین این واحد سنگی (P^{dl}) بطور عمده از دولومیت‌های قهوه‌ای تا خاکستری ضخیم لایه تشکیل شده و بخش میانی آن عمدتاً (p^l) آهک‌های دولومیتی خاکستری تا خاکستری‌روشن است. بخش فوقانی این واحد سنگی را آهک‌های بلورین سفید تا



شکل ۵. منطقه‌بندی اولیه ۱۸ گانه محدوده معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات بر روی نقشه Google Earth.

Fig. 5. Preliminary zoning of Mahallat, Hajjiabad travertine mine to 18 areas on the Google Earth map

تراورتن نسبتاً محکم و مقاوم در کف به شیل‌ها و رس‌های سست و ضعیف منتهی می‌شوند، به همین دلیل این معدن به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است.

بطور کلی در سنگ‌هایی که دارای لایه‌بندی مشخص باشند و جنس سنگ‌ها و مقاومت آن‌ها در لایه‌های سنگی متفاوت باشد، می‌توان با استفاده از روش‌هایی همانند روش حفر چال‌های موازی به برش اولیه سنگ پرداخت و بدون کفبری با روش‌هایی همانند پارس‌وگوه، جک‌های هیدرولیکی و مکانیکی، بالشتک‌های منبسط‌شونده و وسایل مکانیکی همانند بیل مکانیکی، لودر، بولدوزر و جرتفیل بر مقاومت کششی سنگ غلبه کرد و بلوک را از سینه‌کار جداسازی نمود. استخراج سنگ به کمک چال‌های موازی برای کانسارهایی که لایه‌بندی طبیعی دارند و نیاز به حفر چال‌های افقی ندارند (مانند معادن تراورتن) با موفقیت انجام می‌شود و همین‌طور برای معادن گرانیت با توجه به سختی سنگ روش‌های مناسبی هستند. به هر حال به‌منظور جلوگیری از انحراف چال‌ها، استفاده از این روش‌ها در معادن دارای پله‌های کوتاه توصیه می‌شود. به عبارت دیگر اگرچه این روش‌ها برای استخراج سنگ‌های نرم و سخت، گزینه مناسبی هستند، ولی در استفاده از آن‌ها همواره محدودیت ارتفاع بلوک وجود دارد. حال آنکه معمولاً ارتفاع بلوک‌های سنگ در معادن تراورتن به‌منظور اقتصادی بودن بطور متوسط هفت متر است و گاهی به بیش از ۱۰ متر نیز می‌رسد. از طرفی ضخامت (عرض) بلوک‌هایی که با چال‌های موازی بریده می‌شوند، نیز کم است. با توجه به هزینه بالای حفاری و محدودیت‌های یاد شده به نظر می‌رسد که استفاده از این روش‌ها برای سنگ‌های نرم همانند تراورتن برای قواره‌کردن بلوک‌های سنگی یعنی در مرحله برش ثانویه مناسب‌تر باشد.

در پژوهش حاضر به‌منظور استخراج بلوک‌های سنگی تراورتن در برخی مناطق معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات (بویژه منطقه ۱۴) روش سومی پیشنهاد می‌شود. در این راستا یک سری مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مکعبی‌شکل سنگ تراورتن حاجی‌آباد دارای لایه‌بندی انجام شد و چگونگی استخراج بلوک‌های سنگی تراورتن در عمل بدون نیاز به کفبری مورد مطالعه قرار گرفت که در ادامه نتایج آن‌ها آورده می‌شود.

۴- ایده استخراج بلوک‌های تراورتن حاجی‌آباد بدون نیاز به کفبری

در معدن تراورتن حاجی‌آباد همانند بسیاری از معادن بزرگ تراورتن دنیا از روش سیم‌برش الماسه برای استخراج سنگ استفاده می‌شود. از یکسو با توجه به اینکه استخراج سنگ‌ها در ابعاد وسیع و تناژ بالایی صورت می‌گیرد، هزینه‌های ناشی از آن همچون فرسوده‌شدن ماشین‌آلات و خرابی آن‌ها، حفاری، حمل‌ونقل، هزینه کارکنان و غیره نیز بسیار زیاد است. این هزینه‌ها تا زمانی صرفه اقتصادی دارند که با استخراج سنگ با هر روشی بتوان آن‌ها را جبران کرده و سودی از استخراج بدست آورد. چنانچه روشی یا امکانی بوجود آید تا بتوان هزینه‌ها را هرچند به مقدار کم کاهش داد، این امر می‌تواند بسیار موثر باشد. ازسوی دیگر وجود لایه‌بندی از ویژگی‌های تراورتن محلات است (احمدی، ۲۰۱۷ الف). در شرایطی که در زیر یک لایه آهکی (تراورتن، مرمر، مرمریت یا سنگ‌چینی) یک سنگ‌پی^۱ از جنس دیگر (مثلاً رس) وجود داشته باشد، ایده استخراج بلوک سنگ بدون کفبری مطرح می‌شود، زیرا در این حالت در مرز^۲ دولا، میزان مقاومت مکانیکی سنگ تغییر چشم‌گیری نمی‌نماید. برای شناسایی چنین مرزهایی در صورتی که پنهان باشند، می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی همانند مقاومت‌ویژه الکتریکی و رادار نفوذی‌به‌زمین^۳ (GPR) (احمدی، ۲۰۱۸؛ پرسی و همکاران، ۲۰۰۶؛ کدیگلو، ۲۰۰۸) و یا بررسی مغزه‌های حفاری استفاده نمود. از آنجایی که انسجام سنگ تراورتن تحت تاثیر دو عامل یعنی سطوح لایه‌بندی و وجود حفرات و خلل‌و فرج زیاد، کاهش پیدا می‌کند (احمدی، ۲۰۱۷ الف)، مقاومت آن در برابر تنش‌های کششی و خمشی نسبتاً کم خواهد بود. زیرا مقاومت کششی سنگ‌های ساختمانی قبل از هر چیز، به سطوح ناپوستگی موجود در سنگ بستگی دارد که به عنوان سطوح ضعف مکانیکی محسوب می‌شوند. به‌عبارت دیگر، سنگ در قسمت‌هایی که دارای لایه‌بندی، تغییر جنس سنگ‌شناسی و در نتیجه تغییر مقاومت مکانیکی است، ضعیف‌تر بوده و احتمال گسیختگی سنگ در آن بخش‌ها بیشتر است. مطابق شکل ۶ در بخش‌هایی از معدن سنگ تراورتن حاجی‌آباد محلات بویژه در منطقه ۱۴ این معدن، چنین شرایطی وجود دارد، یعنی لایه‌های سنگی

³ Ground Penetrating Radar

¹ Basement

² Interface



شکل ۶. وجود لایه‌بندی در سنگ‌های منطقه ۱۴ معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات

Fig. 6. Bedding existing in the stones of zone 14 of Mahallat, Hajiabad travertine mine

جایی ادامه پیدا می‌کند که یکی - دو سانتی‌متر از مرز لایه‌بندی ظریف افقی در نمونه‌های سنگ (در صورت وجود) پایین‌تر رود. طول برش‌ها در راستای افق (فاصله برش‌ها تا سطوح آزاد) نیز در راستای طول نمونه‌ها حدود ۱۲ سانتی‌متر و در راستای عرض نمونه‌ها حدود هشت سانتی‌متر است. برای شبیه‌سازی آنچه که در عمل در معادن سنگ ساختمانی تراورتن صورت می‌گیرد، به‌منظور اعمال نیروی قائم بر شکاف نمونه‌های سنگ در انجام آزمایش، ابتدا مطابق شکل ۸ قطعه‌ای از جنس فولاد به شکل گوه‌ای با انتهای صفحه‌ای شکل ساخته شد. برای ثابت‌کردن و جلوگیری از حرکت نمونه‌های سنگ زیر

۵- روش انجام مطالعات آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش، مطابق شکل ۷ الف تعداد چهار نمونه تقریباً مکعبی شکل به طول ۲۰، ارتفاع ۱۵ و عرض ۱۵ سانتی‌متر و دارای لایه‌بندی ظریف از لاشه‌های معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات انتخاب و آماده‌سازی شدند. بر روی این نمونه‌ها در آزمایشگاه بوسیله دستگاه برش، دو برش قائم عمودبرهم (با زاویه نود درجه نسبت به یکدیگر) ایجاد شد (شکل ۷ ب). مطابق شکل این دو برش تا انتهای سنگ ادامه نیافته و در راستای قائم نیز برش تا انتها ادامه پیدا نکرده است. ابعاد برش‌ها در نمونه‌های سنگی در راستای قائم حدود هفت-هشت سانتی‌متر است و برش تا

شکست مسطح افقی در مرز لایه‌بندی ظریف سنگ شد. نیروی وارده بر شکاف نمونه‌های سنگی از طریق یک اهرم دستی قابل کنترل، بصورت تدریجی و به آرامی با نرخ حدود ۱۶ تن بر ثانیه افزایش می‌یافت. در مورد نمونه‌های سنگی مورد آزمایش در اثر بارگذاری نیرویی در بازه ۲۶۰ تا ۳۱۲ تن شکست اتفاق افتاد.

دستگاه پرس، از مهارهای فولادی استفاده شد. پس از ثابت کردن نمونه‌های سنگی زیر دستگاه پرس با حرکت عمودی پرس، قطعه فولادی به داخل شیار سنگ فرو رفته و یک مولفه افقی نیرو به سمت جلو در قسمت برش‌خورده سنگ ایجاد کرد که با غلبه بر مقاوت کششی، سنگ را به جلو هل داد و مطابق شکل ۹ باعث ایجاد یک صفحه



شکل ۷. نمونه سنگ تراورتن مورد آزمایش قبل و بعد از برش با دستگاه

Fig. 7. Travertine stone sample tested before and after cutting with the machine

صاف و مسطح نیستند. به‌منظور استخراج بلوک‌های سنگی تراورتن که ارتفاع آن‌ها بطور متوسط هفت متر است و گاهی به بیش از ۱۰ متر نیز می‌رسد، روش‌های مذکور قابل استفاده نیستند. در معادن تراورتن دارای لایه‌بندی همانند منطقه ۱۴ معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات که از روش سیم‌برش الماسه برای استخراج استفاده می‌شود، استخراج بلوک سنگ بدون کف‌بری با انجام مطالعات آزمایشگاهی بررسی شد.

۶- نتیجه‌گیری

بطور کلی در سنگ‌هایی که دارای لایه‌بندی مشخص باشند و جنس سنگ‌ها و مقاوت آن‌ها در لایه‌های سنگی متفاوت باشد، می‌توان با استفاده از روش‌هایی همانند روش حفر چال‌های موازی به برش اولیه سنگ پرداخت و بلوک را از سینه‌کار جدا کرد. ولی در استفاده از این روش‌ها همواره محدودیت ارتفاع بلوک وجود دارد. سرعت عمل با این روش‌ها نیز پایین است و گاهی سطوح شکست کاملاً



شکل ۸. تصویر قطعه گوه‌ای شکل، قرارگیری نمونه سنگ در زیر دستگاه پرس، مهار نمونه با مهارهای فولادی و اعمال نیروی قائم به آن به کمک قطعه گوه‌ای شکل

Fig. 8. Image of wedge-shaped piece, setting the stone sample under the press, fixing the sample with steel restrainer and loading the vertical force on that using the wedge-shaped piece



شکل ۹. تصویر سطح شکست افقی صاف یک نمونه مورد آزمایش پس از اعمال نیرو
Fig. 9. Image of horizontal failure plane of a tested specimen after applying the force

آنکه در عمل شرایط بارگذاری بهتر است زیرا در عمل برای جداسازی بلوک بریده شده از سینه‌کار ابتدا نیروی قائم و سپس نیروی افقی وارد می‌شود. برای استخراج بلوک‌های سنگ تراورتن معدن حاجی‌آباد محلات بویژه در منطقه ۱۴

در فرآیند انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها، نیرو فقط در راستای قائم بر شکاف نمونه سنگ اعمال شد و هیچ‌گونه نیروی افقی وارد نگردید. در واقع اعمال نیرو در راستای قائم موجب غلبه بر مقاومت کششی سنگ می‌شود. حال

- Arosio, D., Munda, S., Zanzi, L (2012) Quality control of stone blocks during quarrying activities, 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Shanghai, China.
- Arshadnejad, S., Goshtasbi, K., Aghazadeh, J (2011) A model to determine hole spacing in the rock fracture process by non-explosive expansion material: A case study from Iran, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18(5): 509-514. 10.1007/s12613-011-0470-5.
- Ataei, M (2008) Building stone quarrying, Shahrood University, 286 p. (in Persian).
- Fatemi, S. A. A and Parvin, A (2005) Technical and economic investigation to use the diamond cutting wire to quarry granite, 1st Mining Engineering Conference, Tarbiat Modares University (in Persian).
- Filgueira, M. and Pinatti, D. G (2005) In Situ diamond wires: diameter determination of the external cutting rope, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Published by Elsevier Ltd, 23: 85-90. 10.1016/j.ijrmhm.2004.09.004. <https://katrock.ir>.
- Kadiglu, S (2008) Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization, *Journal of Applied Geophysics*, 64: 109-114. 10.1016/j.jappgeo.2008.01.001.
- Khodadadi, D (2002) Design of lybid ornamental stone mine with diamond wire method by considering optimum block size, MSc. thesis, Tarbiat Modares University, 129 p. (in Persian).
- Manandhar, S., Suetsugu, D., Hara, H., Hayashi, H (2014) Performance of waste quarry by-products as a supplementary recycled subgrade material, 9th International Symposium on Lowland Technology, Saga, Japan.
- Marbelli, B (editor) (2004) Marmomachin Associazione Italiana Marmomachin Directory for Promotion of Marbles, Granites, Travertines, or Stone & their Relative Technology Made in Italy.
- Porsani, J. L., Sauck, W. A., Junior, A. O. S (2006) GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil, *Journal of Applied Geophysics*, 58(3): 177-187. 10.1016/j.jappgeo.2005.05.010.
- که اغلب تراورتن در بالا و شیل (رس) در پایین قرار دارد، پیشنهاد می‌شود عمق چال قائم اندکی بیشتر از مرز (کنتاکت) دو لایه طبیعی باشد. بعد از ایجاد دو برش در راستای قائم در بلوک سنگ، بطور همزمان از جک‌های هیدرولیکی یا مکانیکی با پاکت‌های (بالشتک‌های) منبسط شونده (هیدرولیکی یا هوای فشرده) برای جداسازی بلوک از سینه کار استفاده شود. بدین ترتیب بر بلوک سنگ نیروی افقی هم وارد می‌شود و بر مقاومت کششی سنگ بهتر غلبه می‌گردد. نتایج پژوهش حاضر به کمک مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی تراورتن دارای لایه‌بندی طبیعی و ظریف نشان داد که با اعمال نیروی قائم و بدون کفبری، در سطوح ضعف مکانیکی سنگ، سطوح شکست صاف و مسطح ایجاد شد. این یافته نشان‌دهنده امکان‌پذیری استخراج معادن سنگ ساختمانی تراورتن دارای لایه‌بندی و ارتفاع زیاد، با روش استخراج سیم‌برش الماسه بدون نیاز به کفبری است. نتایج این پژوهش برای کلیه کاربران علوم زمین یعنی زمین‌شناسان، مهندسی معدن، مهندسی عمران و ژئوتکنیک، کارکنان معادن (معدن‌کاران) و معدن‌داران بویژه از نوع سنگ ساختمانی، قابل استفاده است.

References

- Ahmadi, R (2008) Strategies to improve the technology of stone production in order to increase the quota of processed stone exports in Markazi province, Report of research project, Management and Trade Organization of Markazi province, 150 p (in Persian).
- Ahmadi, R (2017a) Strategies to improve the production chain of building stone industry in Iran- case study: Mahallat travertine stone industry, *Journal of Mineral Resources Engineering*, 1(2): 47-60. 10.30479/JMRE.2017.1006 (in Persian).
- Ahmadi, R (2017b) Effective advertisement on marketing to enhance export in stone industry, *Journal of Mineral Resources Engineering*, 2(2): 53-67. 10.30479/JMRE.2017.1138 (in Persian).
- Ahmadi, R (2018) Application of Ground-Penetrating Radar (GPR) method to evaluate and control the quality of dimension stone blocks, *Journal of Engineering Geology*, 12(1): 1-26. 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1 (in Persian).
- Ahmadi, R (2022) Position, performance and comparison of types of expansive powders used for quarrying, 10th Iranian Mining Engineering Conference, University of Sistan and Bluchestan, Zahedan (in Persian).

Experimental studies to investigate the feasibility of building stone blocks quarry without floor cutting, case study: Mahallat, Hajiabad travertine mine

R. Ahmadi^{1*} and S. Abbasi²

1- Assist. Prof., Dept. of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- B. Sc., Dept. of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* Rezahmadi@gmail.com

Received: 2023.2.20 Accepted: 2023.5.17

Abstract

The main purpose of the present research, is not to cut the floor of stone block in quarrying dimensional stones in order to save the costs of the quarry operation and reduce the operation time. By using methods such as drilling parallel drill holes, containing quarry with feathers and wedge, use of expansion chemical materials and overlapping parallel drill holes methods, initial cutting the stone as well as separating it from the mountain without need to cut the floor is possible. Of course, in these methods, there are always limitations on the height and thickness (width) of the block and the speed of operation is low. Therefore, to achieve the goal, experimental studies were carried out, especially in the quarry method with diamond cutting wire in Mahallat, Hajiabad travertine mine located in Markazi province as a case study. In some zones of this mine, especially zone 14, there is a layer of shale under the travertine layer. In the experiment process, to simulate the reality in practice, first, two perpendicular vertical cuts (with a ninety degrees angle to each other) were created on the samples in the laboratory. Then, using a wedge-shaped steel piece with a flat end, a vertical force was applied into the crack of the stone samples. The results of the present research through experimental studies on four travertine stone samples of Mahallat Hajiabad with natural and fine layering, showed that by applying vertical force into the cracks of the samples without any floor cutting, smooth and flat fracture surfaces were created in the mechanically weak surfaces of the stone. This finding reveals the possibility of quarrying travertine building stone mines with layering and high height, by diamond wire cutting quarry method without the need for floor cutting.

Keywords: Building stone, Diamond cutting wire, Floor cutting, Experimental studies, Mahallat Hajiabad travertine

Introduction

Building stones Quarrying consists of two stages: the first step is the initial cutting of the block and its separation from the mountain whereas the second step is to cut it, which means dividing the blocks into smaller parts that can be transported and moved, so is also called secondary cutting. The main purpose of the present research, is not to cut the floor of stone block in quarrying dimensional stones in order to save the costs of the quarry operation and reduce the operation time. By using methods such as drilling parallel drill holes, containing quarry with feathers and wedge, use of expansion chemical materials and overlapping parallel drill holes methods, initial cutting the stone as well as separating it from the mountain without need to cut the floor is possible. Of course, in these methods there are always limitations on the height and thickness

(width) of the block and the speed of operation is low. Currently, about 90 percent of Iran's building stone mines are quarried by diamond wire cutting method. However, usually the height of stone blocks in travertine mines quarrying by diamond wire cutting method is economically seven meters on average and sometimes it reaches more than 10 meters.

Materials & Methods

To achieve the goal in this research, experimental studies were carried out, especially in the quarry method with diamond cutting wire in Mahallat, Hajiabad travertine mine located in the Markazi province as a case study. Hajiabad travertine mine is the largest travertine mine in Iran and the Middle East, which is located in the west of Mahallat city, five kilometers far from Mahallat on the road toward Khomein. Due to the large extension,

the mine's area quarry has been divided into 18 zones according to Figure 1, and the passing of time, blocks quarrying from the variety of zones and area reduction of the zones, the division of the region has changed. At the moment, this region includes nine zones called Eastern Six (6E), Western Six (6W), Eastern Eight (8E), Western Eight (8W), 12, 14, 15, 17 and 18. In some zones of this mine, especially zone 14, there is a layer of shale under the travertine layer. In the experiment process, to simulate the reality in practice, first, two perpendicular vertical cuts (with a ninety degrees angle to each other) were created on the samples in the laboratory. Then, using a wedge-shaped steel piece with a flat end, a vertical force was applied into the crack of the stone samples.

Discussion of Results & Conclusion

In situations that under a limestone layer (travertine and marble) there is a basement of

another type (for example, clay), the approach of stone blocks quarrying without any floor cutting is proposed, because in this case, at the interface of two layers the mechanical strength of the stone changes significantly. The results of the present research through experimental studies on four travertine stone samples of Mahallat Hajiabad with natural and fine layering, showed that by applying vertical force into the cracks of the samples without any floor cutting, smooth and flat fracture surfaces were created in the mechanically weak surfaces of the stone. This finding reveals the possibility of quarrying travertine building stone mines with layering and high height, by diamond wire cutting quarry method without the need for floor cutting. The results of this research can be used for all users and practitioners of earth sciences, namely geologists, mining engineers, civil and geotechnical engineers, mine owners and workers (miners) especially building stone types.