



## مقاله پژوهشی

### بررسی ارتباط خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیک سنگی بلوک های آهن معدن چغارت، با مقدار $D50$ دانه بندی حاصل از آتشباری

جواد کمالی<sup>۱</sup>، حسین جلالی فر<sup>۲\*</sup>، علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سیرجان، سیرجان، ایران
- ۲- دانشکده نفت و مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
- ۳- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: تیر ۱۴۰۲، پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۳)

## چکیده

عملیات آتشباری یکی از مهم ترین و پرهزینه ترین عملیات در فرایند معدنکاری است. آتشباری در واقع، ابتدای سیستم خردایش سنگ در معدن است. همچنین آتشباری تولیدکننده سنگ مورد نیاز مراحل بعدی خردایش است. ابعاد محصول تولیدی آتشباری، نقش بسزایی در قابلیت خردایش سنگ شکنی و آسیاکنی خواهد داشت، به این دلیل، جهت تولید محصول با ابعاد مناسب ابتدا لازم است شناخت کافی از شرایط فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بلوک های معدنی حاصل شود. در این پژوهش با مطالعه ۲۶ بلوک سنگ آهن معدن چغارت بعد از عملیات آتشباری، نسبت به برداشت ویژگی های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بلوک های معدن چغارت اقدام شد. در ادامه، بعد از عملیات آتشباری با تصویربرداری از سطح بلوک منفجر شده، اقدام به آنالیز تصویری ابعاد محصول آتشباری گردید. در مرحله بعد، از سطح بلوک آتشباری شده نمونه های سنگی ای جهت انجام آزمایشات ژئومکانیکی و شیمیایی اخذ شد. بعد از انجام آزمایشات، ارتباط بین ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی سنگ های مورد آزمایش با ابعاد محصول آتشباری ( $D50$ ) مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی های مورد بررسی در این مطالعه شامل: مقاومت فشاری تک محوره، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مقاومت کششی غیرمستقیم، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، درصد سیلیس، آهن و اکسید آهن موجود در بلوک آتشباری می باشند. در پایان، با استفاده از روش تحلیل آماری رگرسیون خطی تک متغیره و چند متغیره، معادلاتی برای تخمین ابعاد محصول تولیدی ( $D50$ ) حاصل از انفجار با استفاده از ویژگی های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی توده سنگ های محصول آتشباری با ضریب تعیین ( $92/48$ ) درصد برای  $D50$  پیش بینی گردید.

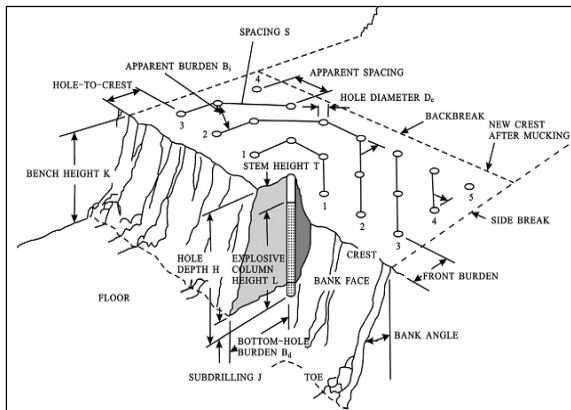
## کلمات کلیدی

آتشباری، دانه بندی، سنگ آهن، معدن چغارت، مقاومت فشاری، رگرسیون خطی

\*عهده دار مکاتبات: [jalalifar@uk.ac.ir](mailto:jalalifar@uk.ac.ir)

DOI: 10.22034/ANM.2024.20099.1596

چال، طول گل‌گذاری، جهت انفجار مهم‌ترین پارامترهای هندسی انفجار و قابل کنترل می‌باشند (شکل ۲) [۵]. حتی وقتی عوامل مؤثر ناشی از ویژگی‌های توده سنگ و سیستم انفجار بر قابلیت انفجار شناخته شد و طراحی صحیحی نیز انجام گرفت، عدم توجه به حضور آب در توده سنگ، دمای منطقه مورد مطالعه و بعضی موارد مربوط به نیروی انسانی می‌تواند تمام محاسبات را به هم بریزد [۶].



شکل ۲: پارامترهای هندسی انفجار [۱۸].

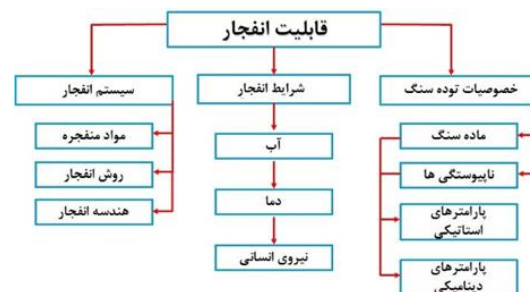
محققان زیادی در زمینه‌های مختلف قابلیت انفجار و خردایش توده سنگ از سالیان گذشته فعالیت کرده‌اند. هینو (۱۹۵۹) با در نظر گرفتن شکست سنگ تحت کشش در اثر نیروهای کششی، نسبت مقاومت تراکمی سنگ به مقاومت کششی را ضریب آتشباری نامید [۷]. دنیس و گاما (۱۹۷۰) با استفاده از شاخص کار باند در یک مدل، ابعاد مواد معدنی طی عملیات انفجار را طبق رابطه‌ای پیش‌بینی کردند [۸]. دا گاما (۱۹۸۳) در آتشباری پله‌ای تمام‌مقیاس پی برد که انرژی کمتری برای خرد کردن یک سنگ ناپیوسته نسبت به یک سنگ هموزن لازم است [۸]. کیسر و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعاتی دریافتند که با افزایش زاویه جهت‌داری، خردایش حاصله منجر به تولید قطعات بزرگ‌تری می‌شود و وقتی دسته‌درزه اصلی موازی با سطح جبهه کار باشد خردایش خوب با هزینه آتشباری کمتری به دست می‌آید. [۹]. کلیک و همکاران (۲۰۰۹) در یک مطالعه، روابطی میان ویژگی‌های توده سنگ مانند وزن حجمی، جذب آب، مقاومت تراکمی تک‌محوره، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی با قابلیت خردایش حاصل از انفجار پیدا کردند. [۱۰].

برخی از محققین حوزه آتشباری، در تعیین قابلیت انفجار بیشتر به دنبال تعیین شاخصی بوده‌اند تا بر اساس آن بتوانند

## ۱- مقدمه

آتشباری یکی از اصلی‌ترین بخش‌های عملیات معدنکاری برای جدا کردن سنگ از توده و خردایش آن تا حد قابل قبول است. لذا این عملیات نیازمند شناخت کامل همه پارامترهای مؤثر و طراحی بهینه است که در نتیجه شرایط نامناسب زمین یا طراحی ضعیف، ممکن است باعث پیامدهای نامطلوبی مثل پرتاب سنگ، لرزش زمین، لرزش هوا، عقب زدگی، ایجاد سروصدا، تولید گردوغبار، بر جای ماندن بلوک‌های بزرگ و تولید محصول با ابعاد نامناسب شود [۱]. عملیات آتشباری خوب، عملیاتی است که منجر به تولید سنگ خردشده‌ای شود که ابعاد و توزیع دانه‌بندی آن مطابق با ابعاد و توزیع دانه‌بندی قابل بارگیری و باربری توسط تجهیزات موجود و قابل خردایش توسط کارخانه سنگ‌شکنی باشد و نیاز به خرد کردن مجدد سنگ نباشد [۲].

قابلیت انفجار توده سنگ ویژگی بسیار مهمی در طراحی آتشباری در معادن و فعالیت‌های عمرانی است که با خصوصیات توده سنگ، سیستم انفجار و شرایط محیطی انفجار دارای ارتباط تنگاتنگ است (شکل ۱) و نتیجه آن خردایش توده سنگ به ابعاد و با توزیع دانه‌بندی موردنیاز است [۲].



شکل ۱: عوامل مؤثر بر قابلیت انفجار [۲].

پارامترهای مربوط به طبیعت توده سنگ شامل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها، قوانین حاکم بر مقاومت و رفتار آن‌ها و شرایط محیطی مثل تنش‌ها، بارهای دینامیکی و هیدروسیستم می‌شود که به پارامترهای غیرقابل کنترل مؤثر بر انفجار نام برده می‌شود [۳]. پارامترهای سیستم انفجار معمولاً قابل کنترل بوده و برای رسیدن به انفجار بهینه قابل تغییر می‌باشند [۴]. از مهم‌ترین پارامترهای آتشباری پس از انتخاب ماده منفجره و روش انفجار ویژگی‌های ابعادی هندسه انفجار است. قطر چال، ارتفاع پله، بارسنگ، فاصله ردیفی چال‌ها، اضافه حفاری

اسکات و مک‌کی (۱۹۹۴) در یک مطالعه بیان کردند، افزایش نرمه زغال‌سنگ باعث کاهش بازیابی شده و نرمه رطوبت بیشتری را حمل می‌کند که باعث افزایش هزینه عملیات زغالشویی خواهد شد. آن‌ها تغییرات در مصرف خرج ویژه منجر که لازمه آن شناخت دقیق توده سنگ منطقه است، نسبت نرمه به دانه‌درشت محصول را کاهش داده و باعث کاهش هزینه زغالشویی و افزایش بازیابی زغال گردیدند [۲۰]. کانچیپولتا و همکاران (۱۹۹۹) در مطالعه‌ای بیان کردند که راه‌اندازی خردایش معدن زمانی مؤثر است که به‌اندازه کافی از بهینه بودن عملیات چالزنی و آتشیاری و بارگیری اطمینان حاصل شود [۲۱].

بهینه‌سازی و دستیابی به یک طراحی و در نهایت اجرای درست عملیات آتشیاری که نهایتاً باعث افزایش بهره‌وری تولید و کاهش هزینه‌ها می‌گردد، نیازمند شناخت دقیق از منطقه موردنظر برای انفجار است. در بسیاری از موارد سیستم انفجار و مدل‌های انفجاری ثابت هستند و پارامتر متغیر، ویژگی‌های توده سنگ بلوک‌های انفجاری است که شرایط و کیفیت انفجار را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۲]. شناخت دقیق ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ بلوک برجا فرایندی زمان‌بر و مستلزم هزینه است؛ بنابراین تعدادی از محققان با استفاده از تست‌های غیر مخرب مانند سرعت موج به مطالعه این ویژگی‌ها پرداخته‌اند [۲۳]. چری و همکاران (۲۰۰۶) در یک تحقیق به اندازه‌گیری سرعت عبور موج التراسونیک و مقاومت تراکمی تک‌محوره پرداختند و روابطی میان سرعت موج التراسونیک، مقاومت تراکمی تک‌محوره و دیگر ویژگی‌های مهندسی سنگ تعریف کردند [۲۴]. اکبری و همکاران (۲۰۱۴) در یک مطالعه با بررسی تغییرات خردایش با توجه به تغییرات خصوصیات توده سنگ نشان دادند که با افزایش فاصله داری، تداوم و بازشدگی ناپیوستگی‌ها، افزایش سرعت موج طولی در سنگ بکر، افزایش زبری و موج بودن سطح ناپیوستگی‌ها، افزایش مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ بکر و افزایش عمود بودن ناپیوستگی‌ها بر سطح آزاد بلوک انفجاری اندازه ذرات خردشده حاصل از آتشیاری نیز افزایش می‌یابد [۲۵]. مهاجرانی و همکاران ۲۰۱۵ در یک کار مطالعاتی عنوان کردند که سرعت امواج فشاری در عملیات انفجار در سنگ‌ها با ویژگی‌های سنگ بکر ارتباط نزدیکی دارد و با اندازه‌گیری سرعت موج فشاری در محیط سنگی می‌توان ساختار و بافت سنگ را ارزیابی کرد [۲۶]. همی (۲۰۱۵) در یک تحقیق

منطقه مورد مطالعه خود را از این نظر دسته‌بندی نمایند. ایشان اغلب به تعدادی از پارامترهای مؤثر ناشی از خصوصیات توده سنگ و سیستم انفجار و در برخی از موارد به شرایط انفجار توجه کرده‌اند [۱۱].

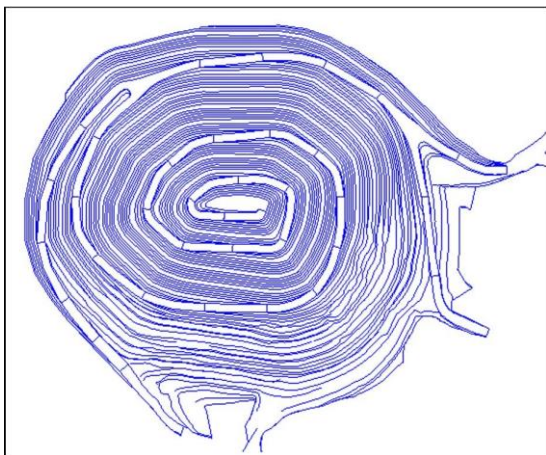
گوپتا و همکاران (۱۹۹۰) رابطه‌ای بر اساس بارسنگ مؤثر، شاخص مقاومت پروتودیاکنف برای تخمین خرج ویژه بر اساس مشاهدات صحرایی پیشنهاد کردند [۱۲]. اسکوت (۱۹۹۶) گزارش داد که خصوصیات توده سنگ کنترل‌کننده آتشیاری شامل پارامترهای مقاومتی، ویژگی‌های مکانیکی مثل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، قابلیت عبور موج ضربه، اندازه و شکل بلوک طبیعی و کاهش اندازه قطعه موردنیاز به‌وسیله آتشیاری است [۱۳]. لاتهام و لو (۱۹۹۹) یک سیستم تعیین قابلیت انفجار را که بر اساس اطلاعات جامعی از خصوصیات سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها توسعه‌یافته است، ارائه کردند [۱۴]. یاراحمدی و دشتکی (۲۰۰۵) بر اساس طبقه‌بندی مهندسی سنگ RMR و اصلاحات صورت گرفته بر اساس طبقه‌بندی لاتهام و لو طبقه‌بندی خود را با عنوان BRMR ارائه نمودند [۱۵]. هان و همکاران (۲۰۰۰) از شبکه عصبی برای طبقه‌بندی قابلیت آتشیاری توده سنگ استفاده کردند [۱۶].

در برخی دیگر از مطالعات عملیات آتشیاری را جهت تولید محصول با ابعاد مناسب جهت بهینه‌سازی هزینه‌های ناشی از مراحل بعدی خردایش طراحی و اجرا کردند که این مهم وابسته به شناخت دقیق از وضعیت توده سنگ محیط و رفتار آن در مواجهه با ویژگی‌های سیستم انفجار است. کوچاویچ و همکاران (۱۹۹۵) طی یک مطالعه، تأثیر طرح‌های انفجار مختلف بر روی خردایش و شکل پشته محل انفجار شده را اندازه‌گیری کردند؛ که به یک ارزیابی سیستماتیک از عملکرد سنگ‌شکن و سرنده از جمله توزیع اندازه و شکل ذره محصولات نهایی منجر شد [۱۷]. مورل و والر (۲۰۰۱) دریافتند که توان عملیاتی آسیا به دلیل اندازه مناسب‌تر اندازه خوراک افزایش می‌یابد. قطعات خردشده بهتر ناشی از انفجار درون سنگ‌شکن اولیه باعث توزیع بهتر ابعاد خوراک برای آسیا می‌شوند [۱۸]. لام و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند که تغییرات در عملیات انفجاری شامل تغییرات خرج ویژه و در برخی موارد تغییرات در قطر چال‌های انفجار، باعث تغییر در محصول تولیدی گردیده و این تغییرات سبب می‌شود عملکرد خردایش در مراحل بعدی شامل سنگ‌شکنی و آسیاکنی تحت تأثیر قرار گیرد [۱۹].

چقرمگی شکست سنگ استفاده کردند. همچنین امامی میدی و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (MLM) و روش‌های آماری مختلف تجزیه و تحلیل. از انواع مختلف MLM، شامل رگرسیون غیرخطی چند متغیره (MNLr)، رابطه‌ای را برای تخمین مدول تغییر شکل پذیری با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مانند شاخص کیفیت سنگ (RQD)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، شرایط درزه‌داری (Jc)، فاصله درزه‌داری (Js)، مدول دینامیکی (Edyn) و شرایط آب‌های زیرزمینی ارائه (Wc). داده‌اند.

## ۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در معدن چغارت از معدن شرکت سنگ آهن مرکزی ایران و یکی از بزرگ‌ترین و قدیمی‌ترین معدن ایران صورت پذیرفت. این معدن در ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق در استان یزد واقع است. در این پژوهش ابتدا تعداد ۲۷ بلوک، از بلوک‌های آهن دار معدن چغارت که در برنامه تولید و آتشباری ۳ ماهه قرار داشت، شکل ۳ محدوده معدن چغارت در زمان مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۳: محدوده معدن چغارت در زمان مطالعه.

پس از انجام عملیات آتشباری در بلوک‌های مورد بررسی با استفاده از شاخص‌هایی با ابعاد مشخص (شکل ۴)، به‌طور متوسط ۲۵ تصویر از سطح کپه انفجاری پروفیل‌های مختلف تهیه شد. سپس دانه‌بندی محصول آتشباری با استفاده از نرم‌افزار Split Desktop، تحلیل و بررسی شد (شکل ۵). سپس میانگینی از دانه‌بندی حاصل از هر بلوک ثبت گردید. نتایج آنالیز تصویری دانه‌بندی در جدول ۱ نشان داده شده است.

دریافت که بین سرعت انتشار موج فشاری در مغزه‌های سنگ و مقادیر مقاومت تراکمی تک‌محوری، رابطه‌ای خطی با همبستگی ۹۰/۵ درصد وجود دارد، [۲۷]. نورانی و همکاران (۲۰۱۶) در یک مطالعه اثر هر یک از پارامترهای مهم توده سنگ نظیر؛ مقاومت، تعداد دسته‌درزه‌ها، جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها و همچنین ابعاد متوسط بلوک‌هایی که به‌واسطه درزه‌ها ایجاد شده‌اند را بر روی سرعت انتشار موج فشاری، ضرایب عبور و بازتاب، بررسی کردند [۲۸].

مطالعات گذشته جنبه‌های مختلفی از قابلیت انفجار را مورد بررسی قرار داده‌اند و هرکدام از منظرهای خاص قابلیت انفجار در معادن را مورد بررسی قرار داده و به نتایج متفاوتی رسیده‌اند [۲۹]. بهبود قابلیت انفجار در معدن یکی از عوامل مؤثر در بهبود فرایندهای کاهش اندازه ذره در گام‌های بعدی معدنکاری و فراوری خواهد بود. بهبود قابلیت انفجار نیازمند اطلاع دقیق از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و شیمیایی سنگ برجا و همین‌طور عناصر سازنده سنگ‌ها است. مطالعات گذشته معمولاً اثر یک یا دو فاکتور تأثیرگذار در عملیات آتشباری و محصول حاصل از آتشباری را مورد بررسی قرار دادند [۳۰]. در این مطالعه قصد بر این است تا اثر برخی از پارامترهای ژئوفیزیکی، ژئومکانیکی و ژئوشیمیایی توده سنگ نظیر وزن مخصوص، مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، مقاومت کششی غیرمستقیم، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، درصد سیلیس ماده سنگ و همین‌طور درصد آهن و اکسید آهن بلوک‌ها، بر ابعاد سنگ‌های حاصل از آتشباری بررسی شود. این ویژگی‌ها، پارامترهای مهم و تأثیرگذار در قابلیت انفجار خواهد بود و بر عملیات خردایش مراحل بعدی شامل سنگ‌شکنی و آسیابگری اثرگذار هستند.

در مطالعه حاضر با توجه به اهداف پروژه که شناخت نحوه اثرگذاری ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی توده سنگ بر ابعاد محصول انفجار است، از رگرسیون خطی برای بررسی ارتباطات استفاده شده است. امکان استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل دیگر نیز وجود دارد. امامی میدی و همکاران (۲۰۲۲) از چهار نوع مختلف روش یادگیری ماشین، یعنی رگرسیون خطی چند متغیره (MLR)، رگرسیون غیرخطی چند متغیره (MNLr)، روش کوپولا و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) در پیش‌بینی و ارزیابی تأثیر پارامترهای کلان سنگ (مقاومت فشاری تک‌محوری، استحکام کششی و مدول تغییر شکل) بر

نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های به آزمایشگاه مکانیک سنگ ارسال شد. ابتدا از نمونه‌های گرفته شده از کپه‌های انفجاری مغزه‌گیری شد. شکل ۶ تعدادی از مغزه‌های اخذ شده از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶: تعدادی از مغزه‌های اخذ شده از نمونه سنگ‌های کپه انفجاری.



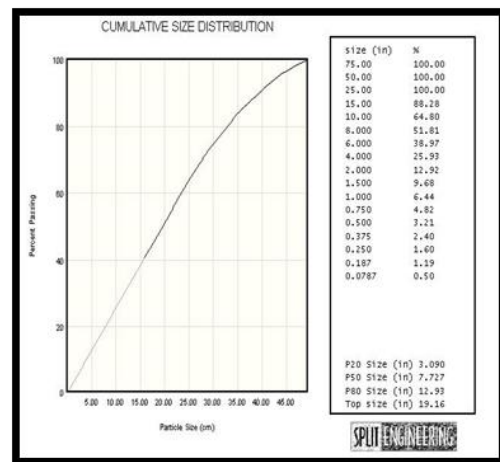
شکل ۴: تصویربرداری از بلوک 2-845 بعد از آتشیاری.



شکل ۷: نمایش صفحات شکست در یک نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره.

در بخش دیگر از این پژوهش تعداد ۲۰۸ تست صحیح مقاومت کششی غیرمستقیم انجام گرفت. برای تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها از آزمون برزلی استفاده شد که به تعیین مقاومت کششی هر نمونه انجامید. در تهیه نمونه‌ها در این بخش از استاندارد بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) استفاده شد [۳۱].

همچنین تعداد ۲۰۸ آزمایش صحیح مقاومت فشاری سه محوره (3axial) برای به دست آوردن مقادیر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\Phi$ ) انجام شد. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و ابزاری موجود در آزمایشگاه، برای تمام نمونه‌ها در شرایط یکسان از بارهای جانبی ۱، ۲ و ۳ مگا پاسکال جهت انجام آزمایش سه محوره استفاده گردید. در بخشی دیگر از این پژوهش تعداد ۳۱۲ آزمایش صحیح تعیین وزن مخصوص (SG) از مغزه‌ها بر روی نمونه‌های هر بلوک معدنی صورت پذیرفت. در این پروژه با اندازه‌گیری مقادیر طول و قطر مغزه‌ها مقدار حجم هر مغزه



شکل ۵: منحنی دانه‌بندی اخذ شده از Split Desktop

جدول ۱: برداشت ابعاد محصول آتشیاری

| Block ID | D80 (mm) | D50 (mm) | D20 (mm) |
|----------|----------|----------|----------|
| BC-2     | ۲۲۳٫۶    | ۱۳۰٫۸    | ۴۱٫۷     |
| BC-4     | ۶۱۸٫۳    | ۲۹۷٫۴    | ۵۶٫۸     |
| BC-8     | ۴۲۱٫۲    | ۱۹۷٫۶    | ۶۶٫۴     |
| BC-12    | ۵۲۶٫۸    | ۲۳۹٫۴    | ۴۴٫۹     |
| BC-26    | ۳۷۲٫۵    | ۱۶۵٫۹    | ۵۳٫۷     |
| BC-28    | ۳۳۸٫۶    | ۱۸۶٫۵    | ۵۳٫۲     |

پس از تصویربرداری از سطح کپه‌های انفجاری، اقدام به نمونه‌برداری از سنگ‌های هر بلوک، جهت انجام آزمایشات مکانیک سنگی و عیار سنجی هر بلوک شد. در این تحقیق سعی شد از تیپ‌های مختلف سنگی هر بلوک به‌گونه‌ای نمونه‌برداری شود که نمونه‌ها معرف بلوک معدنی باشند. در این پژوهش به‌طور میانگین از هر بلوک معدنی ۶ نمونه سنگی که قابلیت گرفتن حداقل ۵ مغزه جهت آزمایش‌های مکانیک سنگی را دارا باشد، برداشت شد. بعد از نمونه‌گیری،

در بخش دیگر از این مطالعه نمونه‌های سنگی اخذ شده، جهت اندازه‌گیری مقادیر عناصر آهن (Fe)، اکسید آهن (FeO) و نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) و درصد سیلیس (SiO<sub>2</sub>)، به آزمایشگاه تعیین عیار معدن چغارت ارسال گردید. با توجه باینکه استانداردهای مختلفی جهت انجام آزمایشات مکانیک سنگی وجود دارد، در این تحقیق مشخصات نمونه و روش انجام آزمایش مطابق پیشنهاد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ در نظر گرفته شد [۳۲].

جدول ۵: اندازه‌گیری پارامترهای عیاری نمونه‌ها

| Sample ID | Fe (%) | FeO (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | Ratio |
|-----------|--------|---------|----------------------|-------|
| BC-2-1    | ۴۸٫۶۸  | ۱۸٫۳۴   | ۱۳٫۵                 | ۲٫۶۵  |
| BC-4-1    | ۴۷٫۲۳  | ۱۲٫۴۵   | ۶٫۴۵                 | ۳٫۷۹  |
| BC-8      | ۶۰٫۷۹  | ۲۵٫۷    | ۹٫۵                  | ۲٫۳۷  |
| BC-10     | ۶۱٫۳۵  | ۱۹٫۲    | ۵٫۴                  | ۳٫۲۰  |
| BC-12     | ۵۷٫۶   | ۲۳٫۱    | ۸٫۸۵                 | ۲٫۴۹  |
| BC-216    | ۶۲٫۶۸  | ۱۴٫۳۵   | ۸٫۲۵                 | ۴٫۳۷  |

جدول ۶ و ۷ مقادیر میانگین نتایج به دست آمده پارامترهای اندازه‌گیری شده در ۲۷ بلوک انفجاری را نشان می‌دهد.

جدول ۶: میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده کل بلوک‌ها

| پارامتر       | $\sigma_1$ (MPa) | $\sigma_t$ (MPa) | E (GPa) | $\nu$ | SG (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------|------------------|------------------|---------|-------|--------------------------|
| مقدار میانگین | ۳۶/۰۱            | ۳/۱۵             | ۶٫۳۶    | ۰٫۱۷  | ۳٫۹۷                     |

جدول ۷: میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده کل بلوک‌ها

| پارامتر       | C (MPa) | $\Phi$ (Degree) | SiO <sub>2</sub> (%) | Ratio | D50 (mm) |
|---------------|---------|-----------------|----------------------|-------|----------|
| مقدار میانگین | ۶٫۸۶    | ۴۷٫۰۸           | ۱۱٫۱۰                | ۲/۸۰  | ۲۳۳٫۵    |

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، پس از انجام آزمایشات میدانی، مکانیک سنگی و عیاری نمونه‌ها، برای بررسی ارتباطات بین متغیرهای این پژوهش، اقدام به بررسی ارتباط تک متغیره و چند متغیره ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی نمونه‌های محصول آتشفباری با دانه‌بندی مواد حاصل از آتشفباری در بلوک‌های معدنی گردید. در ادامه مقادیر ضرایب تعیین حاصل از ارتباطات رگرسیونی مابین متغیرها ارائه شد. لازم به ذکر از در ارائه اشکال مربوط به ارتباطات چند متغیره

به دست آمد و سپس با تقسیم مقدار وزن بر حجم نمونه، مقدار وزن حجمی مغزه‌های هر نمونه محاسبه گردید. بخشی از نتایج به دست آمد از اندازه‌گیری مقادیر وزن مخصوص (SG)، مقاومت تراکمی تک‌محوره (UCS)، مدول الاستیسیته (E)، نسبت پواسون (V)، مقاومت کششی ( $\sigma_t$ )، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\Phi$ )، نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) و درصد سیلیس (SiO<sub>2</sub>)، به ترتیب در جداول ۲ تا ۵ آورده شده است. لازم به ذکر است پس از آزمایشات مربوط به هر بلوک، از تمام مقادیر به دست آمده از نمونه‌های سنگی هر بلوک میانگین‌گیری شد و ارتباطات در هر بلوک، با استفاده از میانگین مقادیر آزمایشات بررسی گردید. به عبارت دیگر در بررسی و تحلیل نتایج این پژوهش، هر نقطه و عدد در نمودارها، نشان‌دهنده میانگینی از حداقل ۶ آزمایش در یک بلوک معدنی معین است.

جدول ۲: اندازه‌گیری وزن مخصوص نمونه‌ها

| Sample ID | L (mm) | D (mm) | Mass (gr) | SG (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------|--------|--------|-----------|--------------------------|
| BC-2-1-1  | ۱۳۲٫۳  | ۵۱٫۹   | ۷۶۱       | ۲٫۷۲                     |
| BC-4-1-1  | ۱۳۰٫۱  | ۵۱٫۶   | ۱۲۶۴٫۴    | ۴٫۶۵                     |
| BC-8-1-1  | ۱۳۵٫۳  | ۵۲     | ۱۱۲۶٫۵    | ۳٫۹۲                     |
| BC-10-1-2 | ۱۰۸٫۵  | ۵۲     | ۶۸۷٫۲     | ۲٫۹۸                     |
| BC-12-2-2 | ۱۱۳٫۹۵ | ۵۲     | ۹۱۵٫۸     | ۳٫۷۹                     |
| BC-26-1-1 | ۱۳۳٫۳  | ۵۱٫۷   | ۷۷۴٫۲     | ۲٫۷۷                     |

جدول ۳: مقادیر مقاومتی تک‌محوره و مقاومت کششی

| Sample ID | UCS (MPa) | E (GPa) | $\nu$ | $\sigma_t$ (Mpa) |
|-----------|-----------|---------|-------|------------------|
| BC-2-1    | ۱۲٫۴۹     | ۲٫۴۳    | ۰٫۴۲  | ۱٫۳۷             |
| BC-4-1    | ۵۹٫۹۵     | ۸٫۸۶    | ۰٫۰۷۴ | ۵٫۰۴             |
| BC-8-1    | ۲۶٫۷۸     | ۴٫۷۳    | ۰٫۱۶۳ | ۲٫۵۵             |
| BC-10-2   | ۳۹٫۹۶     | ۶٫۸۶    | ۰٫۱۲۹ | ۳٫۶              |
| BC-12-1   | ۳۲٫۴۷     | ۵٫۳۷    | ۰٫۱۶  | ۲٫۷۶             |
| BC-26-2   | ۳۹٫۶۷     | ۷٫۰۰۲   | ۰٫۱۶۶ | ۳٫۵۷             |

جدول ۴: مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

| Sample ID | L(mm) | D (mm) | C (MPa) | $\Phi$ (Degree) |
|-----------|-------|--------|---------|-----------------|
| BC-2-1    | ۱۳۲٫۳ | ۵۱٫۹   | ۲٫۲۷    | ۴۹٫۹۷           |
| BC-4-1    | ۱۳۰٫۱ | ۵۱٫۶   | ۹٫۲۴    | ۳۷٫۷۵           |
| BC-8-1    | ۱۳۵٫۳ | ۵۲     | ۳٫۱۷    | ۶۱٫۹۴           |
| BC-10-1   | ۱۱۰٫۱ | ۵۱٫۸   | ۱۰٫۴۶   | ۳۴٫۵۴           |
| BC-12-2   | ۱۲۹٫۸ | ۵۲     | ۵٫۱۲    | ۴۰٫۰۶           |
| BC-28-1   | ۱۳۱٫۱ | ۵۱٫۸   | ۵٫۲۴    | ۴۵٫۴۴           |

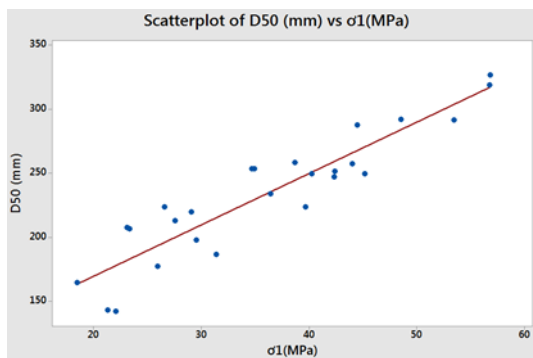
با توجه به شکل ۸ مشخص است که با افزایش وزن مخصوص بلوک‌های حاوی آهن، سنگ‌های حاصل از انفجار در ابعاد بزرگ‌تری شکسته شده‌اند. شکل ۸ نشان می‌دهد که یک رابطه مستقیم میان مقادیر D50 محصول انفجار و مقادیر وزن مخصوص بلوک آتشکاری شده وجود دارد. این ارتباط با استفاده از رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$D50 = 32.684e^{0.4926SG} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، SG وزن مخصوص بلوک‌های آتشکاری شده است. از رابطه (۱) چنین به نظر می‌رسد که با افزایش وزن مخصوص بلوک‌ها، استحکام و یکپارچگی سنگ‌ها افزایش یافته و در نتیجه مواد در ابعاد درشت‌تر می‌شکنند. در این رابطه ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برابر با ۰/۷۷۷ است. استفاده از رابطه فوق بیان می‌کند که افزایش یا کاهش ۱۰ درصدی در وزن مخصوص بلوک‌های حاوی آهن، باعث تغییرات ۲۱،۵۸ درصدی D50 محصول آتشکاری خواهد شد.

### ۳-۱-۲- ارتباط D50 و مقاومت فشاری تک‌محوره

در این قسمت، ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های اخذ شده از بلوک‌های آتشکاری شده حاوی آهن، با D50 محصول انفجار مورد مطالعه قرار گرفت. ارتباط میان مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_1$ ) با ابعاد محصول انفجار (D50) در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: ارتباط D50 و مقاومت فشاری.

مطابق شکل ۹، با افزایش مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_1$ ) در بلوک‌های حاوی آهن، محصول عملیات آتشکاری به شکل چشم‌گیری افزایش یافته است. این افزایش در مقادیر D50 محصول آتشکاری در رابطه (۲) با ضریب تعیین ( $R^2$ ) ۰/۷۹۱۶ نشان داده شده است.

$$D50 = 121.29e^{0.0176\sigma_1} \quad (2)$$

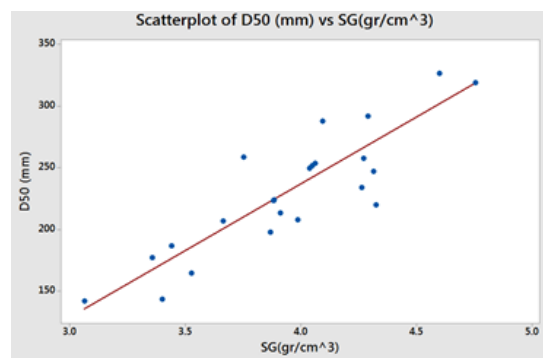
میان پارامترهای مختلف، صرفاً بهترین خط برازش شده نشان داده شده است. معادلات ابتدایی نوشته شده برای هر یک از ارتباطات به صورت خطی بوده‌اند؛ اما برای از بین بردن مقادیر عرض از مبدأ معادلات خطی، تصمیم گرفته شد از معادلات نمایی برای بیان ارتباط میان متغیرها استفاده شود. لازم به ذکر است ضرایب همبستگی به دست آمده از معادلات خطی، برای بیان ارتباط تمامی ویژگی‌های توده سنگ با ابعاد محصول انفجار (D50) از ضرایب همبستگی به دست آمده از معادلات نمایی بالاتر است (جدول ۸).

### ۳-۱-۳- ارتباط ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی توده سنگ با D50 حاصل از آتشکاری

در این بخش ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی نمونه سنگ‌های جمع‌آوری شده از بلوک‌های آتشکاری با مقدار D50 محصول آتشکاری این بلوک‌های حاوی آهن مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بخش ارتباط ویژگی‌هایی مانند مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_1$ )، مدول الاستیسیته  $E$ ، نسبت پواسون ( $\nu$ ) و مقاومت کششی غیرمستقیم ( $\sigma_t$ ) با مقادیر D50 محصول آتشکاری مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه ارتباط میان وزن مخصوص (SG)، چسبندگی  $C$  و زاویه اصطکاک داخلی ( $\Phi$ ) با دانه‌بندی ۵۰ درصد محصول عملیات آتشکاری (D50) مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت ارتباط میان درصد سیلیس ( $SiO_2$ ) بلوک‌های آتشکاری و همین‌طور نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) با D50 آتشکاری بررسی شد.

### ۳-۱-۱- ارتباط D50 و وزن مخصوص

در این بخش مقادیر وزن مخصوص مغزه‌های تهیه شده از نمونه‌های معرف از کپه‌های آتشکاری با اندازه‌گیری حجم و وزن هر مغزه به دست آمد. ارتباط میان وزن مخصوص و D50 آتشکاری در شکل ۸ نشان داده شده است.

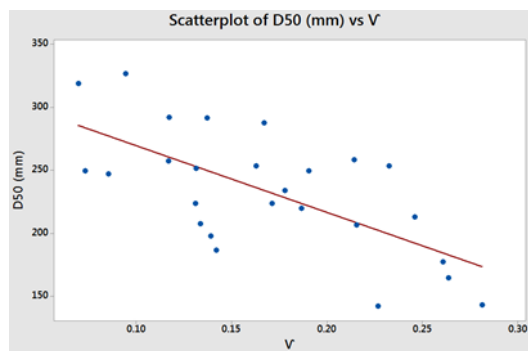


شکل ۸: ارتباط D50 و وزن مخصوص.

رابطه (۳)، با تغییرات ۱۰ درصدی در مدول الاستیسیته بلوک‌های حاوی آهن، تغییر ۶/۴۲ در مقادیر D50 محصول اتفاق می‌افتد.

### ۳-۱-۴- ارتباط D50 و نسبت پواسون

در بخشی دیگر از این مطالعه، ارتباط میان نسبت پواسون (V) نمونه‌های بلوک‌های آتشیاری شده آهن، با D50 محصول انفجار مورد مطالعه قرار گرفت. رابطه نسبت پواسون (V) با D50 محصول انفجار در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: ارتباط D50 و نسبت پواسون.

مطابق شکل ۱۱، چنین به چشم می‌آید که افزایش در مقادیر نسبت پواسون (V) اندازه‌گیری شده از بلوک‌های آهن مورد بررسی، سبب کاهش در مقادیر D50 محصول انفجار شده است. نمودار شکل ۱۱ یک رابطه معکوس معنادار بین مقادیر نسبت پواسون (V) و ابعاد محصول آتشیاری (D50) را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، ارتباط میان نسبت پواسون بلوک‌های آتشیاری شده با دانه‌بندی حاصل از آتشیاری از رابطه (۴) و با ضریب تعیین  $R^2 = 0.45$  مشخص می‌گردد.

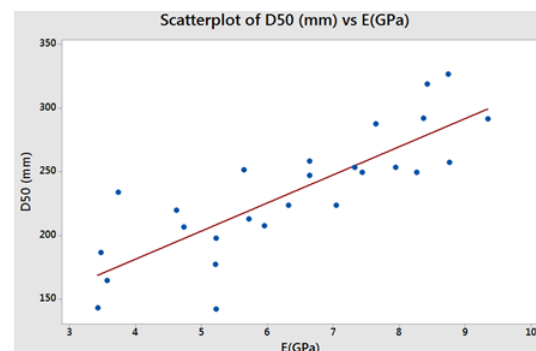
$$D50 = 343.07e^{-(2.423V)} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، V میانگین نسبت پواسون بلوک‌های مورد مطالعه است. با توجه به شکل ۱۱ و رابطه (۴) به نظر می‌رسد که افزایش در مقادیر نسبت پواسون تا حدودی موجب ایجاد سطوح ضعف در سنگ شده و سنگ در امتداد این سطوح ضعف در ابعاد کوچک‌تری D50 شکسته می‌شود. با افزایش ۱۰ درصدی در مقادیر نسبت پواسون (V) بلوک‌ها، ابعاد D50 محصول آتشیاری ۳/۹۸ درصد کاهش یافته است.

در رابطه (۲)،  $\sigma_1$  میانگین مقاومت تراکمی نمونه‌های هر بلوک آتشیاری شده است. با مطالعات انجام‌شده در این تحقیق مشخص شد که با افزایش هرچه بیشتر مقاومت سنگ، عملکرد عملیات آتشیاری کاهش یافته است و سنگ در ابعاد (D50) درشت‌تر خرد می‌شود. با توجه به رابطه (۲)، تغییرات ۱۰ درصدی در مقاومت تراکمی تک‌محوره D50 بلوک‌های حاوی آهن، موجب تغییر ۶/۳۱ در مقادیر D50 محصول آتشیاری می‌گردد.

### ۳-۱-۳- ارتباط D50 و مدول الاستیسیته

قسمتی دیگر از این مطالعه، بررسی ارتباط میان مدول الاستیسیته (E) نمونه‌های بلوک‌های انفجاری شده آهن-دار، با D50 محصول انفجار است. رابطه مقادیر مدول یانگ (E) با ابعاد محصول انفجار (D50) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: ارتباط D50 و مدول یانگ.

مطابق شکل ۱۰، با افزایش مقادیر مدول یانگ (E) بلوک‌های معدنی آهن‌دار، دانه‌بندی (D50) مواد خردشده توسط عملیات آتشیاری درشت‌تر خواهد بود. به عبارتی هرچه مدول الاستیسیته متوسط بلوک‌های حاوی آهن افزایش یابد، مقدار D50 دانه‌های تولیدشده افزایش می‌یابد؛ بدین معنی است که این ویژگی در راستای کاهش قابلیت خردایش سنگ در عملیات آتشیاری عمل می‌کند. ارتباط میان مدول الاستیسیته (E) و D50 محصول انفجار در رابطه (۳) با ضریب تعیین  $R^2 = 0.6503$  نشان داده شده است.

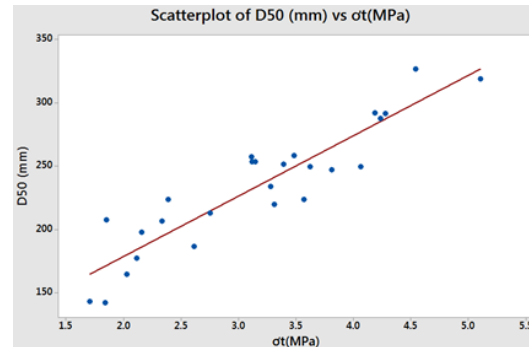
$$D50 = 122.55e^{0.0979E} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، E میانگین مدول الاستیسیته نمونه‌های هر بلوک انفجار شده است. مطابق رابطه (۳) با افزایش مقادیر مدول یانگ (E)، قابلیت خردایش عملیات آتشیاری کاهش یافته و سنگ در ابعاد (D50) بزرگ‌تر می‌شکند. با توجه به



### ۳-۱-۵- ارتباط D50 و مقاومت کششی

ویژگی مهم دیگر مورد بررسی در مطالعه حاضر، مقاومت کشش غیرمستقیم (ot) است. در این پژوهش ارتباط میان مقاومت کششی غیرمستقیم بلوک‌های آهن با D50 محصول انفجار مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۲ ارتباط میان مقاومت کششی غیرمستقیم (ot) به دست آمده از آزمایش برزلی (Brazilian) و ابعاد D50 محصول انفجار نشان داده شده است.



شکل ۱۲: ارتباط D50 و مقاومت کششی

مطابق شکل ۱۲، مشخص است که یک رابطه مستقیم میان افزایش مقاومت کششی (ot) و D50 حاصل از آتشیاری وجود دارد. با افزایش مقاومت کششی (ot) بلوک‌های مورد مطالعه، مقادیر D50 محصول آتشیاری به شدت افزایش یافته است. رابطه (۵) با ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) ۰/۸۰۵۲ این ارتباط مستقیم را توجیه می‌کند.

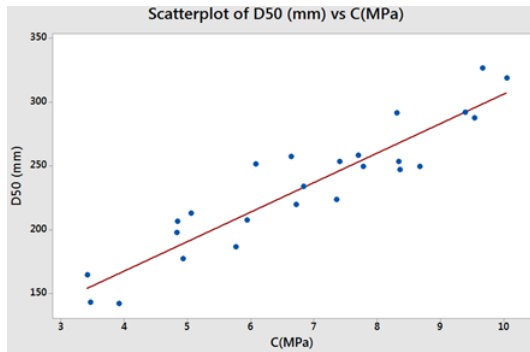
$$D50 = 117.24e^{0.2114ot} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، ot میانگین مقاومت کششی بلوک‌های مورد مطالعه است. با توجه به شکل ۱۲ و رابطه (۵) با افزایش مقادیر مقاومت کششی، با تقویت یکپارچگی و مقاومت بلوک‌ها و کاهش سطوح ضعف در بلوک‌ها، پس از انفجار مواد سنگی در ابعاد D50 بزرگ‌تر می‌شکنند؛ بنابراین با افزایش مقادیر مقاومت کششی بلوک‌ها، کاهش قابلیت خردایش عملیات آتشیاری در بلوک‌ها آهنگار نتیجه می‌شود. تغییرات به میزان ۱۰ درصد در مقاومت کششی موجب تغییرات ۶/۸۹ درصدی در D80 می‌شود.

### ۳-۱-۶- ارتباط D50 و چسبندگی

دیگر ویژگی مهم مورد بررسی در این مطالعه، بررسی ارتباط بین چسبندگی (C) بلوک‌های حاوی آهن مورد مطالعه با مقادیر D50 محصول آتشیاری است. شکل ۱۳

ارتباط میان چسبندگی (C) و D50 در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: ارتباط D50 و چسبندگی.

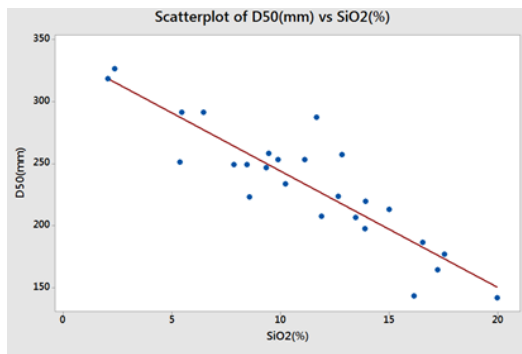
همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، افزایش در مقادیر میانگین چسبندگی (C) بلوک‌های آهن‌دار مورد مطالعه موجب افزایش شدید در D50 محصول آتشیاری داشته است. با توجه به شکل ۱۳ یک ارتباط شدیداً مستقیم مابین چسبندگی بلوک‌های انفجاری با ابعاد محصول خرد شده دارد. رابطه (۶) به ارتباط میان چسبندگی و D50 را نشان می‌دهد. مقدار ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) در رابطه ۱۵ برابر با ۰/۸۴۵۴ است.

$$D50 = 111.84e^{0.1041C} \quad (۶)$$

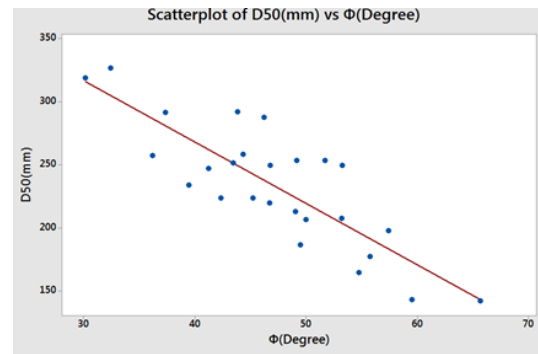
که C میانگین چسبندگی بلوک‌ها است. با توجه به شکل ۱۳ و رابطه میان چسبندگی و ابعاد D50، افزایش در مقادیر چسبندگی، باعث افزایش یکپارچگی بلوک‌ها و کاهش سطوح ضعف می‌گردد. پس از انفجار مواد سنگی در ابعاد درشت‌تری D50 می‌شکنند؛ بنابراین با افزایش مقادیر چسبندگی بلوک‌ها، کاهش قابلیت خردایش عملیات آتشیاری در بلوک‌ها آهنگار نتیجه شده است. تغییرات به میزان ۱۰ درصد در مقادیر چسبندگی موجب تغییرات ۷/۳۹ درصدی در مقادیر D50 می‌شود.

### ۳-۱-۷- ارتباط D50 و زاویه اصطکاک داخلی

یکی دیگر از موارد مطالعه، بررسی ارتباط میان زاویه اصطکاک داخلی (Φ) نمونه‌های بلوک‌های آتشیاری شده آهن، با D50 محصول آتشیاری است. ارتباط مقادیر زاویه اصطکاک داخلی با D50 محصول انفجار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: ارتباط D50 و درصد سیلیس.



شکل ۱۴: ارتباط D50 و زاویه اصطکاک داخلی.

مطابق شکل ۱۵، یک رابطه معکوس بین درصد سیلیس بلوک‌های آهن‌دار و ابعاد D50 محصول آتشفشاری وجود دارد. با افزایش مقادیر سیلیس در بلوک‌های آهن، ابعاد D50 انفجار به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این ارتباط معکوس مابین درصد سیلیس بلوک‌ها و D50 در رابطه (۸) با ضریب تعیین  $(R^2) = 0.7778$  نشان داده شده است.

$$D50 = 363.82e^{-(0.042S)} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، S میانگین درصد سیلیس بلوک‌های آهن است. رابطه (۸) و شکل ۱۵ را می‌توان چنین تفسیر کرد که با توجه به اینکه سیلیس به‌عنوان یک عنصر میهمان در سنگ آهن محسوب می‌شود، با ایجاد فضاهای ضعف در نواحی پرشدگی توسط سیلیس و خاصیت شکنندگی ذاتی سیلیس، منجر به ایجاد سطوح ضعیف و در نهایت شکست سنگ در ابعاد کوچک‌تر می‌شود. با توجه به رابطه (۸) با تغییرات ۱۰ درصدی در مقدار سیلیس موجود در بلوک‌های آهن، تغییرات ۴/۵۶ درصدی D50 مشاهده می‌گردد.

در حالتی که بخش عمده بلوک و ماده سنگ تشکیلی شده از سیلیس باشد و به عبارتی سیلیس سنگ میزبان در نظر گرفته شود با افزایش مقادیر سیلیس مقاومت فشاری تک‌محوره افزایش پیدا می‌کند و طبیعتاً سنگ باید در ابعاد درشت‌تر خرد شود؛ اما با توجه به این که مورد مطالعاتی حاضر صرفاً بر روی سنگ آهن است، سیلیس در اینجا به‌عنوان عنصر مهمان در سنگ آهن حضور دارد و تقریباً در اکثر مغزه‌ها، درزه و به‌طور کلی ناپیوستگی مغزه آهن توسط سیلیس پر شده است و سیلیس درصد کمی از ماده سنگ‌های مورد مطالعه را تشکیل داده است. به عبارت ساده‌تر سیلیس در اینجا در سطوح ضعف آهن قرار گرفته است. هرچه میزان سیلیس موجود در مغزه‌ها و سنگ‌های نمونه افزایش داشته

با توجه به شکل ۱۴، یک ارتباط معکوس میان زاویه اصطکاک داخلی ( $\Phi$ ) و مقادیر D50 محصول آتشفشاری وجود دارد. افزایش در مقادیر زاویه اصطکاک داخلی سبب کاهش در مقادیر D50 شده است. رابطه (۷) با ضریب تعیین  $(R^2) = 0.693$ ، این ارتباط تقریباً معکوس را نشان می‌دهد. مطابق رابطه (۷) و شکل ۱۴، به نظر می‌رسد که افزایش زاویه اصطکاک داخلی در بلوک‌های آهن، سبب افزایش سطوح ضعف و نهایتاً خرد شدن سنگ‌ها پس از آتشفشاری در ابعاد کوچک‌تر شده است.

$$D50 = 643.52e^{-(0.022\Phi)} \quad (7)$$

در رابطه (۷)،  $\Phi$  میانگین زاویه اصطکاک داخلی بلوک‌ها است. با توجه به شکل ۱۴ و رابطه (۷)، به نظر می‌رسد که تا حدودی افزایش در مقادیر زاویه اصطکاک باعث ایجاد سطوح ضعف در سنگ شده و سنگ در ابعاد کوچک‌تری خرد می‌شود؛ بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش در مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ( $\Phi$ ) بلوک‌ها، باعث افزایش قابلیت خردایش عملیات آتشفشاری در بلوک‌ها آهن‌دار شده است. افزایش ۱۰ درصدی در مقادیر زاویه اصطکاک داخلی سنگ، موجب کاهش ۹/۸۴ درصدی در مقادیر D50 محصول انفجار شده است.

### ۳-۱-۸- ارتباط D50 و درصد سیلیس

در بخش دیگر از این مطالعه، ارتباط میان درصد سیلیس ( $SiO_2$ ) نمونه‌های بلوک‌های آتشفشاری شده آهن، با D50 محصول مورد بررسی قرار گرفت. رابطه مقادیر درصد سیلیس ( $SiO_2$ ) با D50 محصول انفجار در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

مقادیر نسبت آهن به اکسید آهن (R)، سبب تقویت یکپارچگی و پیوستگی بلوک‌ها و کاهش سطوح ضعف می‌گردد. پس از انفجار مواد سنگی در ابعاد درشت‌تری خرد می‌شوند؛ بنابراین با افزایش مقادیر نسبت آهن به اکسید آهن، کاهش قابلیت خردایش عملیات آتشباری در بلوک‌ها آهن‌دار نتیجه شده است. به عبارت دیگر هرچه میزان هماتیته بودن بلوک‌های بالاتر رود و نسبت Fe/FeO افزایش یابد، محصول آتشباری در ابعاد درشت‌تری شکسته خواهد شد. تغییرات به میزان ۱۰ درصد در مقادیر R موجب تغییرات ۱۰/۳ درصدی در مقادیر D50 می‌شود.

در این بخش از مطالعه ارتباط مابین D50 محصول آتشباری با ۹ ویژگی فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی ۲۶ بلوک آهن‌دار مورد مطالعه قرار گرفت. این ارتباطات به‌طور اجمالی در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: ارتباط پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی با D50

| متغیر | معادله                     | R <sup>2</sup> | معادله                            | R <sup>2</sup> |
|-------|----------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
| ۱     | D50 = 4.0094σ + 89.11      | ۰.۸۴۱۹         | D50 = 121.29e <sup>0.017601</sup> | ۰.۷۹۱۶         |
| ۲     | D50 = 22.08E + 93.084      | ۰.۶۷۶          | D50 = 122.55e <sup>0.0979E</sup>  | ۰.۶۵۰۲         |
| ۳     | D50 = -531.46V + 322.73    | ۰.۴۴۲۱         | D50 = 343.07e <sup>-2.423V</sup>  | ۰.۴۵           |
| ۴     | D50 = 47.759ot + 82.879    | ۰.۸۲۹۴         | D50 = 117.24e <sup>0.3114ot</sup> | ۰.۸۰۵۲         |
| ۵     | D50 = 108.25SG - 196.4     | ۰.۷۶۷۲         | D50 = 32.684e <sup>0.49265G</sup> | ۰.۷۷۷          |
| ۶     | D50 = 23.145C + 74.758     | ۰.۸۵۲۷         | D50 = 111.84e <sup>0.1041C</sup>  | ۰.۸۴۵۴         |
| ۷     | D50 = -4.8694Φ + 462.76    | ۰.۶۹۲۵         | D50 = 643.52e <sup>-0.0225Φ</sup> | ۰.۶۹۲          |
| ۸     | D50 = 74.753Ratio + 24.473 | ۰.۵۸۸۸         | D50 = 85.647e <sup>0.3508R</sup>  | ۰.۶۳۵۶         |
| ۹     | D50 = -9.4022SiO2 + 337.9  | ۰.۷۹۸۸         | D50 = 363.82e <sup>-0.042Si</sup> | ۰.۷۷۷۸         |

در توضیح جدول ۸ لازم به ذکر است که معادلات اولیه به‌دست‌آمده برای همه ارتباطات به‌صورت خطی بوده‌اند؛ اما برای از بین بردن عرض از مبدأ روابط خطی، تصمیم گرفته شد از معادلات نمایی برای بیان ارتباطات استفاده شود. ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده از معادلات خطی، برای بیان ارتباط تمامی ویژگی‌های توده سنگ با ابعاد محصول انفجار (D50) از ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده از معادلات نمایی بالاتر است.

### ۲-۳- ارتباطات چند متغیره بین ویژگی‌های بلوک‌های آهن با D50

پس از بررسی ارتباطات تک متغیره بین پارامترهای مختلف فیزیکی، مکانیکی و عیاری بلوک‌های معدنی با ابعاد محصول تولیدی حاصل از آتشباری مشخص می‌شود که این عوامل به‌صورت توأمان باعث کاهش یا افزایش D50 محصول تولیدی توسط آتشباری می‌شوند. با توجه به روابط فوق و مشاهده همبستگی بالای بین برخی از ویژگی‌های بلوک

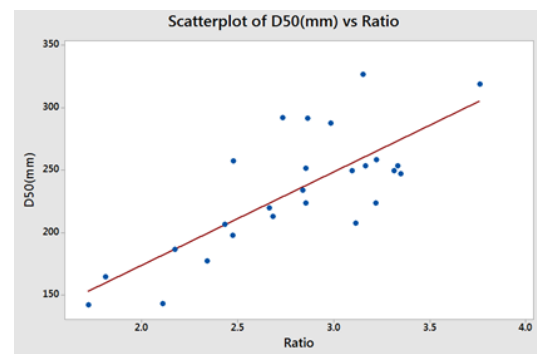
است، میزان بازشدگی درزه و یا سطح ضعف سنگ‌آهن افزایش پیدا کرده و سنگ سریع‌تر می‌شکند.

در این حالت در مقادیر کم سیلیس و هنگامی که سیلیس به‌عنوان عنصر پرکننده و مهمان سنگ اصلی است، با افزایش سیلیس در یک بازه معین نه‌تنها مقاومت سنگ‌آهن افزایش نمی‌یابد که موجب گسترش سطوح ضعف و شکستگی راحت‌تر سنگ‌آهن می‌شود.

نکته دیگر در مورد اثر سیلیس در معادن و خصوصاً در بلوک‌های ماده معدنی (نه باطله) است که با توجه به مقاومت سایشی بالای سیلیس موجب اختلال در عملیات حفاری (نه انفجار) خواهد شد.

### ۳-۱-۹- ارتباط D50 و نسبت آهن به اکسید آهن

دیگر پارامتر مهم مورد بررسی در این مطالعه، بررسی ارتباط مابین نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) بلوک‌ها با مقادیر ابعاد D50 محصول آتشباری است. شکل ۱۶ ارتباط میان نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) و D50 را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: ارتباط D50 و نسبت آهن به اکسید آهن.

با توجه به شکل ۱۶، افزایش در مقادیر میانگین نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) بلوک‌های حاوی آهن مورد مطالعه، باعث افزایش شدید در D50 محصول آتشباری شده است. با توجه به شکل ۱۶ یک ارتباط مستقیم میان نسبت آهن به اکسید آهن بلوک‌های انفجاری با D50 محصول خردشده وجود دارد. رابطه (۹) با ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) ۰.۶۳۵۶ ارتباط میان نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) و D50 را نشان می‌دهد.

$$D50 = 85.647e^{0.3508R} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، R میانگین نسبت آهن به اکسید آهن بلوک‌ها است. با توجه به شکل ۱۶ و رابطه (۹)، افزایش در

استفاده از آزمون‌های مذکور، مؤثرتر و دقیق‌تر بودن ضریب تعیین ( $R^2$ ) در رگرسیون خطی نسبت به ضرایب MSE و RMSE است [۳۳].

در جدول ۱۰ ضرایب همبستگی ارتباط چند متغیره بین قابلیت خردایش آتشیاری و ویژگی‌های بلوک معدنی را نشان می‌دهد.

جدول ۹: پارامترها و خطاهای تخمین مدل برازش D50

| Analysis of Variance     |    |        |         |         |         |
|--------------------------|----|--------|---------|---------|---------|
| Source                   | DF | Adj SS | Adj MS  | F-Value | P-Value |
| Regression               | ۳  | ۵۴۳۳۹  | ۱۸۱۱۲٫۹ | ۹۰٫۱۲   | ۰       |
| $\sigma 1$ (MPa)         | ۱  | ۷۴۶۶   | ۷۴۶۵٫۶  | ۳۷٫۱۵   | ۰       |
| Ratio                    | ۱  | ۱۱۵۵   | ۱۱۵۵٫۴  | ۵٫۷۵    | ۰٫۰۲۵   |
| SG (gr/cm <sup>3</sup> ) | ۱  | ۱۱۵۲   | ۱۱۵۱٫۹  | ۵٫۷۳    | ۰٫۰۲۶   |
| Error                    | ۲۲ | ۴۴۲۰   | ۲۰۱     |         |         |
| Total                    | ۲۵ | ۵۸۷۶۰  |         |         |         |

در جدول ۹، DF عبارت است از درجه آزادی (Degree of freedom) متغیر که بیانگر تعداد مقادیری است که در یک محاسبه مرتبط با شاخص یا برآوردهای آماری، می‌تواند آزادانه تغییر کند. P-Value در بیشتر نرم‌افزارهای آماری برای سهولت در تصمیم‌گیری به نام مقدار احتمال ارائه شده است. این مقدار کمک می‌کند تا بدون مراجعه به جداول توزیع آماری بتواند در مورد رد یا عدم رد فرض صفر تصمیم‌گیری کند. فرض صفر رگرسیون بیان می‌کند که آزمون باید در سطح خطای کمتر از ۵ درصد انجام شود. با مقایسه P-Value و سطح خطا، رد یا عدم رد فرض صورت می‌گیرد [۳۳].

مقدار F-Value پراکندگی جامعه‌های آماری با توزیع نرمال را نشان می‌دهد و به آزمون F معروف است.

جدول ۱۰: ضرایب تعیین مدل برازش D50

| S       | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---------|--------|-----------|------------|
| ۱۴٫۱۷۶۹ | %۹۲٫۴۸ | %۹۱٫۴۵    | %۹۰٫۱۲     |

در جدول ۱۰، S خطای استاندارد برآورد که به آن میانگین ریشه مربع خطا نیز می‌گویند. این مقدار در حقیقت انحراف معیار اصلاح خطا است و ریشه مربعات باقیمانده یا خطا را نشان می‌دهد. در این جدول R-sq عبارت از ضریب تعیین رگرسیون خطی چند متغیره است. R-sq(adj) در جدول ۱۰ مقدار تعدیل‌شده ضریب تعیین یا تشخیص رگرسیون است. ضریب تعیین تعدیل‌شده، میزان  $R^2$  را با

معدنی با خروجی عملیات آتشیاری، می‌توان ارتباط چند متغیره‌ای برای تخمین قابلیت خردایش ناشی از آتشیاری با پارامترهای ذکر شده برقرار کرد؛ که با توجه به همبستگی مشاهده شده بین ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و عیاری مطالعه شده، با ابعاد محصول خردشده، در این پژوهش از رگرسیون خطی چند متغیره برای بررسی ارتباطات چند متغیره مابین این ویژگی‌ها با D50 محصول آتشیاری استفاده شده است.

با بررسی ارتباطات چند متغیره برای تخمین مقادیر D50 بلوک‌های آهن‌دار معدن چغارت، رابطه (۱۰) برای تخمین مقادیر D50 عملیات آتشیاری، با استفاده از ویژگی‌های مورد مطالعه، به دست آمد. در این رابطه SG وزن حجمی،  $\sigma 1$  مقاومت تراکمی تک‌محوره و Ratio نسبت آهن به اکسید آهن را نمایندگی می‌کنند. از اصول ابتدایی بررسی چند متغیره روابط با روش رگرسیون خطی چند متغیره در نظر گرفتن ارتباط میان هریک از پارامترهای مستقل مورد بررسی است. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر میان هریک از ویژگی‌های مستقل مورد بررسی با یکدیگر ارتباطات معنی‌داری وجود دارد، استفاده از تمامی ویژگی‌های مورد بررسی در رابطه خطی چند متغیره امکان‌پذیر نیست. این امر به این دلیل رخ می‌دهد که هنگامی که از دو متغیر مستقل با ضریب همبستگی بالا برای تخمین یک متغیر پاسخ (D50) استفاده می‌شود، یکی از فرض‌های مسلم رگرسیون خطی چند متغیره نقض می‌شود. بدین ترتیب شاخص مقدار احتمال (P-Value) بالاتر از کمترین مقدار از احتمال خطای نوع اول (۵ درصد) شده و اصلی‌ترین قاعده رگرسیون خطی چند متغیره نقض می‌شود. بدین ترتیب با آزمون و خطا در بررسی ارتباطات چند متغیره، متغیرهای مستقل دارای ضریب همبستگی داخلی حذف و پارامترهایی با مقادیر P-Value کمتر از ۰٫۰۵ انتخاب می‌گردند. جدول ۹ مقادیر و خطاهای تخمین چند متغیره D50 با پارامترهای ذکر شده را نشان می‌دهد [۳۳].

در مطالعه حاضر تنها از پارامتر ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای بررسی همبستگی مابین متغیرهای مستقل استفاده شد. دلیل عدم استفاده از ضرایب مانند MSE و RMSE این است که اول این متغیرها زمانی استفاده می‌شود که یک مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری شده در دست باشد. در مطالعه حاضر هیچ‌گونه پیش‌بینی قبلی از ابعاد D50 حاصل از انفجار معدن چغارت در دست نبود. دلیل دوم برای عدم

از توده سنگ بلوک‌های انفجاری که در راستای افزایش مقاومت و یکپارچگی بلوک‌های آهن‌دار معدن چغارت عمل می‌کنند، باعث افزایش در ابعاد محصول انفجار خواهند شد. از طرف دیگر عواملی و ویژگی‌هایی که در جهت ضعف سنگ‌های بلوک‌های معدنی عمل می‌کنند کاهش در ابعاد محصول آتشیاری را سبب می‌شوند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر را می‌توان به‌طور خلاصه در موارد ذیل نشان داد:

➤ افزایش در مقادیر وزن مخصوص (SG) در بلوک‌های آهن‌دار آتشیاری شده سبب افزایش در ابعاد D50 محصول انفجار شده است؛ رابطه (۱) با ضرایب تعیین  $(R^2) 0.777$  ارتباط مابین وزن مخصوص و ابعاد محصول آتشیاری را نشان داده است.

➤ افزایش در مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره  $(\sigma_1)$  بلوک‌های انفجاری سبب افزایش در D50 محصول آتشیاری می‌شود؛ در این پژوهش این ارتباط با رابطه‌ی (۲) با ضرایب تعیین  $(R^2) 0.7916$  نشان داده شده است.

➤ با افزایش مدول الاستیسیته (E) در نمونه‌های سنگی بلوک‌های آهن مورد مطالعه، ابعاد سنگ‌های حاصل از آتشیاری افزایش یافته است؛ این افزایش در مقادیر D50 در رابطه (۳) با ضرایب تعیین  $(R^2) 0.6505$  نشان داده شده است.

➤ با افزایش در مقادیر نسبت پواسون (V) بلوک‌های مورد مطالعه، مقادیر D50 محصول آتشیاری به سمت مقادیر کمتر میل می‌کنند؛ رابطه (۴) این ارتباط معکوس را با ضرایب تعیین  $(R^2) 0.45$  نشان می‌دهند.

➤ افزایش مقاومت کششی  $(\sigma_t)$  نمونه‌های حاصل از انفجار بلوک‌های آهن، افزایش در مقادیر D50 را سبب می‌شود؛ رابطه (۵) با ضرایب تعیین  $(R^2) 0.8052$  این ارتباط مستقیم را نشان می‌دهند.

➤ افزایش چسبندگی (C) در نمونه‌های مورد مطالعه، افزایش در مقادیر D50 را نشان می‌دهد؛ در این مطالعه ارتباط مابین چسبندگی و ابعاد محصول خرد شده در رابطه (۶) با ضرایب تعیین  $(R^2) 0.8454$  مشخص شده است.

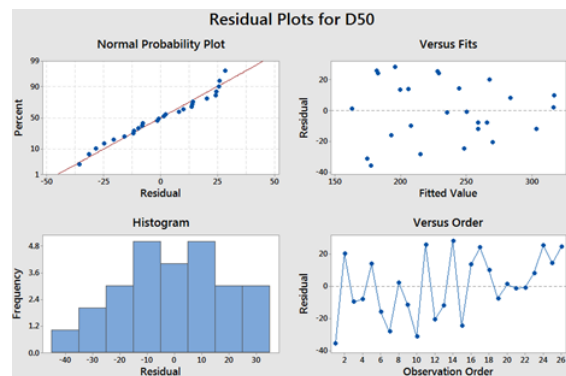
➤ یک ارتباط معکوس مابین زاوی اصطکاک داخلی  $(\Phi)$  نمونه‌های مورد آزمایش در این مطالعه با مقادیر D50 محصول انفجار قابل مشاهده است؛ رابطه (۷) با ضرایب تعیین  $(R^2) 0.693$  مشخص شده است.

توجه به عرض از مبدأهای جدید اصلاح می‌کند. هرچه تفاوت میان  $R^2$  و  $R^2$  تعدیل شده کمتر باشد، نشان از این دارد که متغیرهای مستقل اضافه شده به مدل رگرسیون به‌درستی انتخاب شده‌اند R-sq(pred) در جدول ۱۰ بیانگر ضریب تعیین پیش‌بینی شده است [۳۳].

پس از بررسی ویژگی‌های مختلف توده سنگ‌های بلوک‌های آهن‌دار معدن چغارت و بررسی ارتباطات چند متغیره بین این ویژگی‌ها و مقادیر D50 آتشیاری، بهترین رابطه جهت تخمین D50 از رابطه‌ای (رابطه ۱۰) با دخالت مقاومت فشاری تک‌محوره، نسبت آهن به اکسید آهن و وزن مخصوص توده سنگ‌های بلوک انفجاری به دست آمد.

$$D50 = -45.1 + 2.525 \sigma_1 (\text{Mpa}) + 20.51 \text{ Ratio} + 32.8 \text{ SG} (\text{gr/cm}^3) \quad (10)$$

شکل ۱۷ نمودارهای مربوط به باقی‌مانده‌های مدل برازش D50 را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۷: نمودار باقیمانده‌های رگرسیون مدل برازش D50.

در شکل ۱۷ Residual درصد باقیمانده نرمال شده احتمال مدل برازش خطی رابطه (۱۰) را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل در بخش Versus fits باقیمانده مقادیر فیت نشده را در مقابل مقادیر انطباق یافته مدل برازش را نشان می‌دهد. در بخش Histogram شکل فوق باقیمانده‌های تکرار مدل برازش نشان داده شده است [۳۳].

#### ۴- نتایج

مطالعات میدانی و آزمایشگاهی انجام شده در مطالعه حاضر به‌منظور درک عوامل مؤثر در ابعاد محصول آتشیاری (D50) در معدن چغارت منجر به یافتن ارتباطات معنی‌دار میان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ژئومکانیکی محصول انفجار با اندازه ابعاد محصول گردید. نتیجه کلی مطالعات انجام شده در این پژوهش نشان داد که عواملی و ویژگی‌هایی

تک‌محوره، مدول الاستیسیته) بلوک‌های معدنی (آهن و باطله) چغارت را با D80 محصول انفجار بررسی کرد. روندهای ارتباطات از نظر ارتباط مستقیم یا معکوس شبیه به نتایج پروژه حاضر است

### مراجع

[1] S.Mohajerani, S.M.E.Jalali, "Investigating the effect of mechanical factors and geometric characteristics of the sample on pressure wave velocity in travertine stone samples", Iranian geophysical society journal, 2015, [in persian].

[2] Yarahmadi, A.R Bafghi, "Classification of explosion possibility in iron ore mines of Iran Central Iron company and zoning of Chagharat mine area", Mining Technologies Research Institute, Yazd University, Iran.2014, [in persian].

[3] Calvin J, Konya Ph.D, Edward J, Walter Ph.D "Rock blasting and overbreak control". US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1991, No. FHWA-HI-92-001, 435.

[4] R.Ostovar, "blasting in mines and rocks", Academic jihad publications Amirkabir University of technology, Tehran, 2001, [in persian]

[5] Hustrulid, W. A "Blasting principles for open pit mining", Volume1: "General design concept". A.A.Balkema, Rotterdam. 1999.

[6] M.Ataei, S.M.A.Hosseini, "Operations and economic analyzes in open pit mines", Academic jihad publication, Amirkabir University of technology, Tehran, 2011, [in persian].

[7] Kaushik D, Phalgunisen "Concept of Blast ability – An Update", Indian Mining & Engineering Journal, 2003, 42(8&9): 24-31.

[8] Da Gama D "Use of comminution theory to predict fragmentation of jointed rock masses subjected to blasting". Proceedings, first international symposium on rock fragmentation by blasting, Lulea, Sweden, 1983, 565 –579.

[9] Kacar G, Ozgenoglu A, Bilgin H.A "Effect of discontinuity orientation and spacing on the blasting performance in some open cast mines of TKI-Turkey". ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 595-601.

[10] Kilic A.M, Yaar E, Erdoan Y, Ranjith P.G "Influence of rock mass properties on blasting efficiency". Scientific Research and Essay, 2009, 4(11): 1213-1224.

➤ یک ارتباط شدیداً معکوس مابین درصد سیلیس (SiO<sub>2</sub>) بلوک‌های آهن‌دار با مقادیر D50 وجود دارد و با افزایش درصد سیلیس بلوک‌های آهن، ابعاد محصول انفجار کاهش می‌یابد. این افزایش در قابلیت خردایش بلوک‌ها با استفاده از رابطه (۸) با ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) ۰/۷۷۷۸ توجیه شده است.

➤ هرچه نسبت آهن به اکسید آهن (Ratio) در بلوک‌های مورد مطالعه افزایش یافته، D50 محصول انفجار، مقادیر بالاتری را نشان داده‌اند؛ به عبارت دیگر در بلوک‌های دارای سنگ‌های هماتیت به درصد اکسید آهن بالاتر، ابعاد محصول انفجار درشت‌تر خواهد بود. این ارتباط مستقیم و کاهش قابلیت خردایش بلوک‌ها در روابط (۹) و (۱۸) با ضرایب تعیین (R<sup>2</sup>) ۰/۶۳۱۸ و ۰/۶۳۵۶ نشان داده شده است.

در پایان این پژوهش با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره اقدام به ارائه روابطی جهت تخمین مقادیر D50 محصول آتشیاری گردید. در این تخمین عوامل مؤثر بر مقادیر D80 عبارت از: مقاومت تراکمی تک‌محوره، نسبت آهن به اکسید آهن و وزن مخصوص است که منجر به ارائه یک رابطه با ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) ۰/۹۲۴۸ گردید.

یا توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر؛ به ترتیب چسبندگی، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، وزن مخصوص، نسبت آهن به اکسید آهن و مدول الاستیسیته، بیشترین اثر را در افزایش ابعاد D50 محصول آتشیاری داشته و با افزایش مقادیر پارامترهای یادشده، قابلیت آتشیاری بلوک‌های آهن‌دار کاهش یافته است.

در طرف مقابل به ترتیب افزایش در مقادیر درصد سیلیس، نسبت پواسون و زاویه اصطکاک داخلی، سبب کاهش در اندازه D50 محصول انفجار می‌شود. به عبارت دیگر افزایش در مقادیر ویژگی‌های یادشده سبب افزایش قابلیت انفجار بلوک‌های حاوی آهن شده است.

در مقایسه پژوهش با مطالعات قبلی لازم به ذکر است که مطالعات زیادی در زمینه ارتباط ویژگی‌های توده سنگ انفجار با D50 محصول آتشیاری، در این سطح صورت نگرفته است و عموم مطالعات ارتباط میان برخی پارامترها با D80 محصول انفجار است.

نزدیک‌ترین مطالعه به پژوهش حاضر مطالعه یاراحمدی و همکاران در سال ۲۰۱۴ است. این تحقیق ارتباط تعدادی محدود از ویژگی‌های (وزن مخصوص، مقاومت فشاری

- [22] Bhandari S "Engineering rock blasting operations". A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1997, 375.
- [23] A. Pouramini," Determination of Rock Geomechanical Properties Effects on Autogenous mill Grindability of Iran Central Iron Ore" A Thesis of M.Sc in mining engineering, Yazd university, Iran, 2021, [in persian].
- [24] Chary, K.B.S., L. P. Prasanna, K. J., Vijayakumar, N. A., Naga Lakshumi, V. & Rao, M.V.M.S, "Evaluation of Engineering Properties of Rock Using Ultrasonic Pulse Velocity and Uniaxial Compressive Strength". National Seminar on Non-Destructive Evaluation. 2006: p. 379-385
- [25] M. Akbari, G. Lashkaripour, A.R. Yarahmadi Bafghi, M. Ghafoori. "Effect of rock mass properties on blast fragmentation in central Iran iron ore mines" Iranian Society of Engineering Geology, 2014, [in persian].
- [26] S.Mohajerani, S.M.E.Jalali, "Investigating the effect of mechanical factors and geometric characteristics of the sample on pressure wave velocity in travertine stone samples", Iranian geophysical society journal, 2015, [in persian]
- [27] M.Hemati, "Geomechanically classification of rock mass using wave velocity (case study: Chagharat mine)" A Thesis of M.Sc in mining engineering, Yazd university, Iran, 2015, [in persian].
- [28] M.R.Hemati Noorani, A.R. Yarahmadi Bafghi, A. Ghorbani." Sensitivity analysis of effect of discontinuities properties on elastic wave propagation, using distinct element method", Iranian society of mining engineering, 2017.
- [29] Kulatilake P.H.S.W. Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks, Engineering Geology, 2010,114: 298-311.
- [30] G.R.Anaraki,"Granite mining", Proceedings of the second seminar on building, decorative and facade stones, 1991, [in persian].
- [31] ISRM (International Society for Rock Mechanics), Commission on standardization of laboratory and field tests (1978-2), "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geo mech. Abstr.1987, 15, 99-103.
- [32] ISRM (International Society for Rock Mechanics), Commission on standardization of laboratory and field tests (1979-1), "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock material", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geo mech. Abstr.,1979, 16(2),135-140.
- [11] M.B.Farhadian, "Useful life of building, decorative and facade stones", Proceedings of the second seminar on building, decorative and facade stones, 1991, [in persian].
- [12] Hagan T.N "The effect of rock properties on the design and results of tunnel blasts". J. Rock Mech. Tunneling Technol. 1995, 1(1): 25-39.
- [13] Scott A "Blast ability and blast design, Proc. 5th international symposium on rock fragmentation by blasting", Montreal, Canada, Colorado School of Mines, Colorado, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1996, 27-36.
- [14] Latham J.P, Lu P "Development of an assessment system for the blast ability of rock masses". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1999, 36: 41-55.
- [15] Mdashtaki, A.R.Yarahmadi Bafghi,A.Emami Meybodi," Presenting a new classification in order to determine the blasting capability and the amount of fragmentation caused by blasting (BRMR)( A case study of Chagharat mine-Bafaq)", The 3rd Iran Mining Engineering Conference-Bafgh, 2009, [in persian].
- [16] Han J, Weiya X, Shouyi X "Artificial neural network method of rock mass blast ability classification". In: Proceedings of the fifth international conference on Geo Computation, London, UK, 2000, 23-25.
- [17] Kojovic, T, Michaux, S and McKenzie, C. "Impact of blast fragmentation on crushing and screening operation in quarrying". Proceedings, Explore 95. Brisbane, 427-436. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne. 1995.
- [18] Morrell, S and Valery, W. 2001. Influence of feed size on AG/ SAG mill performance. SAG 2001. Vancouver. 1 204-214. The University of British Columbia: Vancouver.
- [19] [Lam, M, Jankovic, A, Valery, W and Kanchibotla, S. Maximizing SAG mill throughput at Porgera gold mine by optimizing blast fragmentation. SAG 2001, Vancouver, 1 271-287. University of British Columbia: Vancouver. 2001.
- [20] Scott, A and McKee, D J. "The interdependence of mining and beneficiation processes on the performance of mining processes". Proceedings, Annual Conference, Darwin, 303-307. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne. 1994.
- [21] Sarma Kanchibotla,Valter Valery,S.Morrell : "Modeling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding", A Conference on rock breaking, Kalagoorlie ,melbourne,1999.

Learning Models for Predicting Rock Fracture Toughness Mode-I and Mode-II. *Journal of Mining and Environment*. 2022 Apr 1;13(2):465-80.

[35] Emami Meybodi E, DastBaravarde A, Hussain SK, Karimdost S. Machine-learning method applied to provide the best predictive model for rock mass deformability modulus ( $E_m$ ). *Environmental Earth Sciences*. 2023 Mar;82(6):149.

[33] Chicco.D, Warrens. M, The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evelution, *Journal of Jurman Giuseppe*, 2021.

[34] Emami Meybodi E, Hussain SK, Fatehi Marji M, Rasouli V. Application of Machine