نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره هفتم، شماره۲، تابستان ۱۴۰۲، صفحه ۳۹ تا ۵۱
https://doi.org/10.22034/IRSRM.2024.459943.1556

# تاثیر کاربرد روش پاوردک بر عملیات انفجار – مطالعه موردی معدن سنگ آهن سراب

**سید مصلح افتخاری[1*]، صبا شریفیان جزی[2]، کاوه آهنگری[3]**

۱- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشکده معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی گروه معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

**دریافت : ۱۴۰۲/۰۳/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹**

**(نویسنده مسئول: mosleh.eftekhari@modares.ac.ir)**

**چکیده**

انفجار یکی از مهم‌ترین مراحل در عملیات معدن‌کاری است که دستیابی به الگوی انفجار بهینه برای بهبود خردایش و کاهش هزینه‌ها اهمیت بسیاری دارد. یکی از روش‌هایی که می‌تواند برای بهبود انفجار استفاده شود، روش پاوردک است. این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از روش پاوردک در عملیات آتشکاری معدن سنگ آهن سراب حسن آباد یاسکوند پرداخته است. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه روش سنتی آتشکاری با آتشکاری به روش پاوردک به منظور دستیابی به خردایش مناسب و کاهش هزینه‌ها می‌باشد. به منظور اطمینان از نتایج و قابلیت تعمیم نتیجه‌گیری حاصل، برای هر الگوی انفجار ۳ بار تکرار ثبت شده است و میانگین مقادیر بدست آمده ملاک مقایسه و تصمیم‌گیری قرار گرفته است. به منظور ارزیابی خردایش حاصل از انفجار از روش آنالیز تصویری و با استفاده از نرم‌افزار *Slipt-Desktop* بهره گرفته شده است. نتایج نشان داد که استفاده از پاوردک باعث کاهش ابعاد خردایش به میزان ۶۰ درصد، کاهش میزان حفاری ویژه به میزان ۶ درصد و کاهش خرج ویژه به میزان ۱۱ درصد شده است. همچنین، استفاده از پاوردک امکان انتخاب الگوی انفجاری بزرگ‌تر را فراهم کرده و به دستیابی به خردایش مناسب و کاهش هزینه‌ها منجر می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش پاوردک از منظر فنی و اقتصادی به عنوان یک روش مؤثر در بهینه‌سازی عملیات آتشکاری در معدن آهن سراب تأیید می‌شود.

**واژگان کلیدی** **انفجار، آتشکاری، پاوردک، معدن آهن سراب، آنالیز تصویری، خردایش**

## ۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت روز افزون و توسعه علوم مختلف فنی و مهندسی، شاخه مهندسی معدن نیز به عنوان یکی از مهمترین و با سابقه‌ترین این علوم پیشرفت چشمگیری داشته و در برخی از موارد پا را فراتر نهاده است. سیکل عملیات معدن‌کاری شامل پنج مرحله، چالزنی، آتشکاری، بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی اولیه است. هدف اساسی از دو مرحله نخست خردکردن سنگ تا اندازه‌ای مشخص است [۱]. هر کدام از مراحل فوق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از شاخص‌های مهم در سیکل عملیات معدن‌کاری به آتشکاری اشاره کرد. تئوری انفجار شاید یکی از مهمترین موضوعات علمی و فنی است، که با علوم بسیاری از قبیل شیمی، فیزیک، ترمودینامیک و مکانیک سنگ ارتباط پیدا می‌کند. به طور

کلی شکستن سنگ بر اثر انفجار ماده منفجره ناشی از دو عامل است:

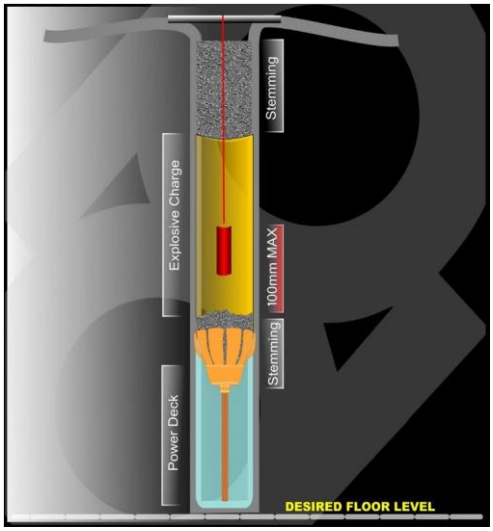
- عامل اول، انفجار ماده منفجره و آزاد شدن انرژی
- عامل دوم، عدم مقاومت سنگ

درک درست از فرآیند خردایش و تخریب مواد در انفجار، به مهندسان کمک می‌کند تا برای هر کاربرد، ماده منفجره مناسب را انتخاب کنند. همچنین، با شناخت تأثیر هر عامل در نتیجه انفجار، می‌توان این عملیات‌ها را بهتر بهینه‌سازی کرد. در مواردی مانند انفجار در پله‌های معدن، که ماده منفجره درون چال‌ها قرار می‌گیرد، گاز نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. موج تنش ناشی از انفجار باعث ایجاد ترک در سنگ می‌شود. سپس، گاز به داخل این ترک‌ها نفوذ کرده و آن‌ها را گسترش می‌دهد و توده سنگ را حرکت می‌دهد. این فرآیند در نهایت منجر به خرد شدن کامل سنگ می‌شود.

طراحی قرارگیری مادهٔ منفجره در چال انفجاری را می‌توان به چال کاملاً پرشده از مادهٔ منفجره و چال انفجاری با ستون هوا تقسیم‌بندی کرد. در حالت چال‌های کاملاً پرشده از مادهٔ منفجره، در اثر انفجار انرژی موج ضربه به سنگ اعمال شده و با توجه به شدت زیاد آن، سنگ اطراف چالِ انفجاری خرد خواهد شد. به علت شدت انرژی زیاد و خردایش بیش از حد سنگ، بخشی از انرژی مادهٔ منفجره در این قسمت تلف می‌شود. در مقابل، استفاده از ستون هوا در چال انفجاری، باعث می‌شود انرژی مادهٔ منفجره کاهش یافته و خردایش در فاصلهٔ معینی از چال انفجاری اتفاق افتد. در این روش، افزایش فشار حاصل از انفجار به علت ورود سریع گاز حاصل از انفجار به ستون هوا و انتقال انرژی به این بخش در اثر فشرده کردن هواست. همچنین، به علت قرارگیری ستون هوا در کف چال انفجاری، امواج ضربهٔ تشکیل‌شده، در راستای چالِ انفجاری نوسان کرده و اندرکنش آن‌ها با یکدیگر و همچنین انعکاس آن‌ها از سمت گل‌گذاری و همچنین کف چال (که محل قرارگیری ستون هواست) منجر به تشکیل میکروترک‌های بیشتر در بلوک انفجاری می‌شود.

اساس روش بدین صورت است که ستون هوا در قسمت تحتانی چال قرار گرفته و سطح آزادی برای انرژی انفجار فراهم کرده و با انفجار چال در پوش مابین ستون هوا و قسمت خرج‌گذاری شده همانند پیستون به سمت پایین جابجا و فشار انتهای چال را افزایش می‌دهد (شکل ۱). در انفجارهای معمولی، طول چال انفجاری برابر با ارتفاع پله به‌علاوهٔ مقدار اضافه حفاری است. اضافهٔ حفاری از ایجاد پاشنه در اثر انفجار جلوگیری می‌کند. در حالیکه در چال انفجاری در روش پاوردک، مقدار اضافهٔ حفاری چال انفجار حذف شده و تراز کف چال برابر با کف پله است.

انفجار به روش پاوردک بطور کامل مکانیزم انفجار را برای انتقال انرژی انفجار به سنگ‌های اطراف تغییر می‌دهد و می‌تواند میزان بهره‌گیری از انرژی انفجار را به مراتب افزایش دهد. طراحی الگوی آتشکاری مهمترین و کلیدی‌ترین بخش عملیاتی در معدن‌کاری است.




**شکل ۱- شماتیکی از کاربرد و قرارگیری پاوردک در چال انفجاری *[۲]***

البته باید به این نکته توجه داشت، با وجود محدویت‌ها و حساسیت مسئله آتشکاری، از تامین مواد از سازمان‌های مربوطه تا زمان انجام این فرآیند سعی بر آن است که نتیجه مطلوب در پروژه‌های راهسازی، سد سازی و معدنی حاصل شود. در پروژه‌های معدنی با توجه به نیاز بار ورودی به واحدهای خردایش و دانه‌بندی بار ورودی می‌توان الگوی مناسب انفجار را ارائه کرد *[۴]*. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر استفاده از روش پاوردک در معدن سنگ آهن سراب جهت کاهش هزینه‌های مربوط به حفاری و مصرف مواد ناریه و هچنین دستیابی به خردایش مطلوب در سنگ است. مورد مطالعه در این پروژه، معدن آهن سراب حسن آباد یاسکوند می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه روش سنتی

آتشکاری با آتشکاری به روش پاوردک به منظور دستیابی به خردایش مناسب و مقایسه هزینه‌ها می‌باشد. به منظور اطمینان از نتایج و قابلیت تعمیم نتیجه‌گیری حاصل، برای هر الگوی انفجار ۳ بار تکرار ثبت شده است و میانگین مقادیر بدست آمده ملاک مقایسه و تصمیم‌گیری قرار گرفته است. به منظور تعیین میزان خردایش حاصل از عملیات انفجار از روش آنالیز تصویری استفاده شده است. در این روش، آنالیز عکس‌های گرفته شده به روش اتوماتیک انجام می‌شود. در روش اتوماتیک، با استفاده از الگوریتم‌هایی که در هر نرم‌افزار تعبیه شده است، مرز قطعات به صورت خودکار تعیین می‌شود که هر نرم‌افزار از روش و الگوریتم خاصی برای این کار استفاده می‌کند و در این تحقیق از نرم افزار *Slipt-Desktop* بهره گرفته شده است. برای رسیدن به نتایج مطلوب در این روش باید از کیفیت تصاویر از هر لحاظ اطمینان به عمل آید.

## ۲- پیشینه مطالعات

در معادن سطحی با توجه به نوع معدن از مواد منفجره مختلف استفاده می‌شود اما هدف اصلی در کلیه معادن خرد کردن سنگ‌ها در مرحله اولیه انفجار است و یکی از مهمترین پارامترهای استخراج می‌باشد. خردایش مناسب یکی از با اهمیّت‌ترین موضوعات استخراج معادن است. در این مورد طراحی الگوهای مختلف آتشکاری، انتخاب نوع مواد منفجره، قطر حفاری، روش آنالیز آتشکاری صورت گرفته و غیره مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهندسی انفجار یکی از اقتصادی‌ترین راه‌ها برای خرد نمودن سنگ‌ها می‌باشد. با این حال نرخ بهره‌گیری از انرژی انفجار تنها ۷ تا ۲۲ درصد می‌باشد. مابقی انرژی آزاد شده در غالب اثرات نامطلوب مهندسی انفجار مانند سر و صدا، فشار هوا، لرزش زمین و غیره ظهور می‌کند [۱].

مقالات بسیاری در مورد روش پاوردک منتشر شده است که مزایای مکانیزم تکنیک ایردک را توضیح می‌دهد. مل نیکوو (*Melnikov, 1971*) اولین فردی بود که مکانیزم انفجار ایردک که در آن ایردک انرژی انفجاری درون حفره انفجار را دوباره پخش می‌کند را توضیح داد. فضای خالی، فشار دهانه چال را کاهش داده و شرایط را برای کار بیشتر انرژی انفجاری در مدت طولانی‌تر فراهم می‌کند. ایردک ضایعات انرژی انفجاری در تخریب اضافی را کاهش داده و همزمان مواد منفجره باقی مانده در شکست سنگ را خارج می‌کند [۵].

ایردک امکان انبساط محصولات انفجاری در فضای هوا را ایجاد می‌کند که فشار محصول انفجار را کاهش خواهد داد. امواج شوک تولید شده در مخالف جهت در وسط ایردک حرکت کرده و مانند برخورد به روبروی چال انفجار و انتهای مسدود شده برگشت می‌شود. انرژی برگشت شده مجدداً به فضای ایردک برخورد کرده و این فرآیند تا تکمیل فرآیند انفجار سنگ بطور پیوسته تکرار می‌شود. فورنوی (*Fournoy et al, 1981*) تست‌های آزمایشگاهی انفجار ایردک بر روی پلاکس گلاس ضخیم انجام دادند تا پدیده رشد ترک را مشاهده نمایند. آنها به این نتیجه رسیدند که موج تنش به سمت پشت مسدود و برگشت شده حرکت می‌کند. همبستگی موج‌های برگشتی و موج‌های اولیه زمان کار انرژی انفجاری را بهبود می‌بخشد که موجب شکست‌های بیشتر جرم سنگ اطراف می‌شود. فورنوی برای ایردک در مقایسه با منطقه شارژ مواد منفجره سطح شکست بیشتر و منطقه بر هم کنش مسدود شده بیشتری یافتند [۶].

چیاپتا و ممل (*Chiappetta and Memmele,1987*) تائید کردند که امواج تنش اضافی برای بهبود شکست ابتدایی و بارگیری تکراری برای بهبود استفاده از انرژی انفجاری در شکست سنگ موردنیاز است. بنابراین ایردک پارامترهای فوق‌الذکر را تامین کرده است [۷]. مارچنکو (*Marchenko, 1990*) نتیجه‌گیری کرد که ایردک بطور قابل توجهی تنش در منطقه *پایینی چال و نیز سطح منطقه خرد شده اطراف شارژ* مواد منجره را کاهش می‌دهد و تنش در مناطق دورتر را ۲۵ درصد افزایش می‌دهد که خرد شدن سنگ را بهبود می‌بخشد [۸]. لیو و کاتسابانیز (*Liu and Katsabanis, 1996*) نتیجه‌گیری کردند که استفاده از ستون هوا در انفجارها، بارگذاری اولیه را تضعیف کرده و انرژی انفجاری را ذخیره می‌کند. این انرژی ذخیره شده به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و سپس انرژی جنبشی منجر به برخورد سنگ‌ها به صورت انرژی کرنش و اتلاف الاستیک می‌شود. این فرآیند شکست سنگ را در داخل توده سنگ افزایش می‌دهد. در این راستا، دو مدل عددی برای به‌دست آوردن منحنی‌های تاریخچه فشار استفاده شد که مکانیزم شکست انفجار را تفکیک می‌کردند. از منحنی‌های فشار بالاترین عنصر بار انفجاری مشاهده می‌شود که مقدار فشار پس از انفجار به اوج می‌رسد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد، در حالی که در

شبیه‌سازی ستون هوا تشکیل بارگذاری ثانویه مشاهده شد. این بارگذاری‌های اضافی نمایانگر آسیب بیشتر به توده سنگ بودند [۹]. لو و هاسترولید (*Lu & Hustrulid, 2003*) با استفاده از نظریه مدیریت موج شوک و روش‌های شبیه‌سازی عددی، انتشار امواج کم‌فشار و منعکس شده در انفجار با ستون هوا را بررسی کردند. آنها دریافتند که این انتشار موج منجر به تخلیه فشار شده و باعث ایجاد تنش کششی با قدرت بالا در سنگ‌های اطراف چال انفجاری می‌شود که شکست سنگ را افزایش می‌دهد [۱۰]. سینگ و همکاران (*Singh et al, 2012*) مدل انفجار با ستون هوا را با استفاده از ابزار المان محدود شبیه‌سازی کردند تا پدیده انرژی شوک در ستون هوا را بهتر درک کنند. دو مدل انفجار گودال با تقارن محوری برای ردیابی تفاوت‌های بین پر کردن کامل و انفجار ستون هوا استفاده شد. نتایج نشان داد که رابطه انرژی با استفاده از ستون هوا به کلی تغییر می‌کند. در حالتی که پر کردن کامل انجام می‌شود، انرژی جنبشی به طور کامل به ستون پرکننده به شکل پرتاب سنگ منتقل می‌شود، در حالی که در حالت ستون هوا، انرژی به طور مکرر ذخیره و به توده سنگ اطراف منتقل می‌شود. از منحنی‌های تاریخچه فشار نقاط هدف مختلف مشاهده می‌شود که ستون هوا پدیده‌های متفاوتی از فشار برای بارگذاری و باربرداری به صورت انعکاسی را نشان می‌دهد. این نوع بارگذاری و باربرداری منجر به آسیب شدیدتر نسبت به بارگذاری لحظه‌ای می‌شود [۱۱]. در سال ۲۰۱۳ روماياوس و همکاران (*Rommayawes et al, 2013*) به بررسی اثر طول ایردک بر خردایش در انفجار معدن سنگ پرداختند. در این تحقیق، مجموع ۳۰ انفجار پاوردک با طول ایردک بین ۱۵ تا ۶۵درصد طول شارژ تحت آزمایش قرار گرفتند در حالیکه دو پارامتر مهم دیگر شامل حداکثر فاصله اتصال و جهت انفجار نیز در نظر گرفته شدند. میانگین سایز خردایش از آنالیز تصاویر بدست آمد و بعنوان نشانه‌ای برای عملکرد انفجار مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که میانگین سایز خردایش در طول ایردک بالاتر و حداکثر فضای اتصال، افزایش یافت. بعلاوه، یک جهت انفجار غیردلخواه نیز سایز خردایش میانگین را افزایش می‌دهد. به منظور تسهیل کاربردها، ارتباط بین سایز خردایش میانگین و طول ایردک را در یک نمودار نشان داده‌اند [۱۲]. در سال ۲۰۲۰ لو و همکاران (*Lou et al, 2020*) بر اساس تئوری لوله شوک به تجزیه و تحلیل فشار ضربه وارد بر دیواره چال آتشباری با خرجگذاری شعاعی ستون هوا پرداختند. این محققین سعی کرده‌اند قانون شکل گیری و انتشار موج شوک و شرح دوره زمانی فشار ضربه بر دیواره چال آتشباری در حین انفجار با خرج گذاری شعاعی جدا شده (جفت نشده) مواد منفجره امولسیون سنگ را نشان دهند [۱۳]. گائو و همکاران (۲۰۲۳) روش‌های شبیه‌سازی عددی را برای بررسی عملکرد انفجار هنگامی که ستون هوا در انتهای چال انفجاری قرار دارد، به کار بردند. یافته‌ها نشان داد که ستون هوا در انتهای چال به عنوان یک واسطه کاهش‌دهنده عمل می‌کند و از سنگ در انتهای چال محافظت می‌کند. این روش انرژی انفجار را مجدداً توزیع کرده، اوج فشار موج شوک را کاهش داده و از آسیب بیش از حد به سنگ در انتهای چال جلوگیری می‌کند [۱۴].

## ۳- روش تحقیق

هدف اصلی عملیات آتشکاری خردشدگی مطلوب سنگ می‌باشد، که به عنوان مهمترین پارامتر ارزیابی نتایج آتشکاری نیز معرفی می‌شود. در حقیقت عامل اصلی موفقیت در معدنکاری و نگهداری تجهیزات خردشدگی مطلوب توده سنگ است که شامل توزیع یکنواختی از سنگ‌های خرد شده با کمترین میزان قله سنگ باشد. هزینه‌های بارگیری و حمل با خردایش مناسب کاهش می‌یابد. همچنین هزینه‌های خردایش به دلیل عبور ذرات ریزتر از دهانه سنگ‌شکن با افزایش خردشدگی، کاهش خواهند یافت و هزینه‌های تعویض و ترمیم آسترهای داخلی و تعمیر و نگهداری و زمان انسداد مسیر قطعات خرد شده در سنگ‌شکن کاهش یافته و نرخ تولید افزایش خواهد یافت. بر همین اساس توزیع دانه‌بندی سنگ حاصل از انفجار از اهمیت بالایی برخوردار است.

مدل‌های ریاضی مختلفی برای پیش‌بینی توزیع ابعاد توده سنگ خرد شده قبل از انفجار ارائه شده است. هرچند هیچ روش یا مدلی وجود ندارد که پیش‌بینی واقعی خردشدگی را ارائه دهد، اما مدل‌ها و روش‌های ارائه شده جهت انتخاب اولیه پارامترهای طراحی انفجار به کار می‌آیند. اگرچه این مدل‌ها ابعاد حاصل از انفجار را به طور تقریبی پیش‌بینی می‌کنند، ولی سودمندترین و سریع‌ترین روش برای رسیدن به خردشدگی مناسب می‌باشند. از جمله این مدل‌ها

می‌توان به مدل کازنتسوف (*Kuznetzov, 1973*) [۱۵]، مدل لارسون (*Larsson, 1974*) [۱۶]، مدل کاز- رام (*Cunningham, 1983*) [۱۷] و دنیس و گاما (*Dinis and Gama, 1995*) [۱۸] اشاره نمود. روش‌های تعیین توزیع و متوسط ابعاد قطعات پس از انفجار به دو گروه روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. از روش‌های مستقیم می‌توان روش آنالیز سرندی را نام برد. استفاده از آنالیز سرندی به منظور بررسی دانه‌بندی، از گذشته تا به حال روشی مشکل، وقت‌گیر و بسیار هزینه‌بر است و در مقیاس بزرگ نمی‌توان از آن استفاده کرد. در مقابل آن از روش‌های غیر مستقیم، می‌توان روش‌های مبتنی بر تصویر برداری یا روش مشاهده‌ای را نام برد. در طول چند سال اخیر یکی از روش‌های مبتنی بر تصویر برداری که بسیار مرسوم بوده است روش آنالیز تصویری است. با استفاده از این روش ضمن صرفه جویی در زمان سرعت و دقت انجام آنالیز دانه‌بندی، افزایش قابل قبول داشته است.

در این تحقیق جهت ارزیابی کاربرد روش پاوردک به بررسی خردایش حاصل از انفجار با استفاده از روش آنالیز تصویری پرداخته شده است. در روش آنالیز تصویری برای تعیین دانه بندی، بایستی چهار مرحله زیر به دقت انجام شود:

الف - انتخاب جامعه آماری

ب - انتخاب محل نمونه‌گیری (انتخاب نمونه)

ج - تهیه تصویر (عکس‌برداری)

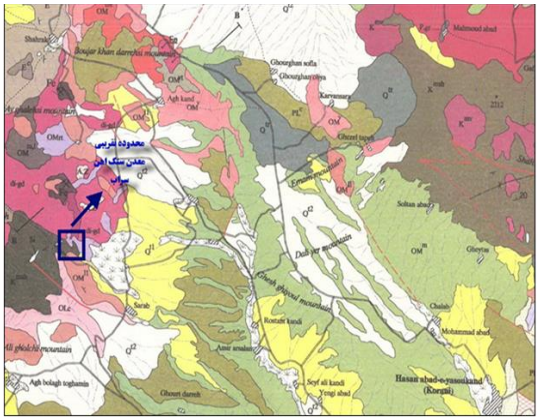
د - آنالیز تصویری با استفاده از نرم افزار

در روش آنالیز تصویری از عکس‌های دیجیتال که از کپه انفجار تهیه شده است استفاده می‌شود. بعد از تهیه عکس در یک فرآیند نرم افزاری، با استفاده از نرم افزار *Split-Desktop* تصاویر به عنوان اطلاعات ورودی وارد نرم افزار می‌شود. در مرحله بعدی تصاویر ورودی مدل شده و منحنی دانه‌بندی برای هر انفجار ترسیم می‌شود.

## ۴- مطالعات صحرایی و خصوصیات زمین شناسی معدن مورد مطالعه

معدن سنگ آهن سراب در مرز استان کردستان و زنجان واقع گردیده است و از نظر ساختار زمین شناسی تأثیر پذیرفته از سه زون اصلی ساختاری زمین شناسی در ایران است و به همین دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی خاصی در این استان وجود دارد. زون زاگرس در غرب استان، زون سنندج-سیرجان در مرکز استان (که بیشترین بخش استان را پوشش می‌دهد و محدوده مورد مطالعه در آن واقع گردیده است) و بخش‌های شمال شرق استان که در حاشیه ایران مرکزی و زیر زون آتشفشانی ارومیه-دختر قرار دارد، اصلی‌ترین زون‌های زمین شناسی تأثیر گذار بر شکل گیری وضعیت کنونی زمین شناسی این استان است.

جایگاه این معدن در برگه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب و ۱:۱۰۰۰۰۰ یاسوکند (قجور) واقع شده است. شکل (۲) بخشی از برگه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ یاسوکند می‌باشد که توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه گردیده و معدن سراب در آن واقع شده است.




**شکل ۲- بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ قجور (یاسوکند) که محدوده معدن در آن مشخص شده است (تهیه شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافـات معدنی کشور- ۱۳۷۹)**

اصلی ترین و گسترده ترین واحد لیتولوژیک، آهک‌های کرم رنگ تا قهوه‌ایی روشن است که بلندترین ارتفاعات منطقه را تشکیل می‌دهد. سن این آهک ها بر اساس فسیل‌های یافت شده در آنها به ابتدای میوسن تعیین گردیده است. این آهک-ها با علامت *OL1* در نقشه یاسوکند مشخص شده است. دومین واحد اصلی در این منطقه واحد *di-gd* است. این واحد که گسترش چشمگیری در منطقه دارد شامل سنگ‌های آذرین درونی با ترکیب دیوریت تا گرانودیوریت است که به رنگ سبز تیره تا قرمز دیده می‌شود. به دلیل نفوذ این واحد

در میان ماسه سنگ‌های ائوسن و آهک‌های مربوط به سازند قم سن آنها پس از الیگوسن- میوسن (میوسن بالایی) نسبت داده شده است. این واحد خاستگاه اصلی کانسارهای آهن منطقه نظیر معدن سراب و معدن شهرک است. در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ یاسوکند این بخش‌های آهن دار به عنوان یک واحد مستقل درون گرانودیوریت‌ها مشخص گردیده است. واحد زمین شناسی دیگر در این منطقه واحد *OMrt* است. این واحد که به صورت پراکنده دیده می‌شود در پیرامون و در کنتاکت با توده نفوذی گرانودیوریتی وجود دارد. سنگ‌های این واحد شامل توف به شدت دگرگون شده به رنگ آبی تا سبز روشن است. جوانترین واحد زمین شناسی در منطقه نهشته‌های متعلق به کواترنر است که شامل رسوبات تخریبی است و فرو افتادگی‌ها را پر نموده و به صورت پادگانه‌های آبرفتی و آبرفت‌های بادبزنی در شرق محدوده گسترش فراوانی دارد که بر روی آن‌ها کشاورزی دیم رونق فراوان دارد.

ذخیره سنگ آهن سراب از جنس مگنتیتی به همراه هماتیت و در بخش‌های کم سولفید و پر سولفید وجود دارد. توده اصلی ماده معدنی از جنس مگنتیت است. عیار آن در نمونه‌های سطحی حدود ۵۸ تا ۶۱ درصد آهن کل و به صورت سطحی با کانی‌های هماتیتی و لیمونیتی و رس‌ها همراه است. دربخش‌های تحتانی به همراه مگنتیت، کانی‌های پیریت و پیروتیت نیز وجود دارد. که همین موضوع باعث افزایش میزان گوگرد در عمق شده است. ماده معدنی بصورت چندین توده در بین سنگ‌های آهکی و توده آذرین واقع شده است.

ذخیره سنگ آهن معدن سراب را می‌توان به دو بخش کم گوگرد و پر گوگرد تقسیم بندی نمود. سنگ آهن سطحی معدن کم گوگرد بوده، بیشتر به رنگ قهوه ای تیره دیده می‌شود و حداکثر تا عمق ۱۵ متری ادامه دارد. سنگ آهن پر گوگرد ذخیره سراب، مگنتیت‌های حاوی پیریت و پیروتیت است که با رنگ سربی تیره تا سیاهرنگ مشخص هستند. این قسم از ماده معدنی بخش اعظم ذخیره و قسمت نیمه عمیق تا عمیق ذخیره کانسار را تشکیل داده اند و به صورت هم شیب در زیر توده‌های کم گوگرد واقع شده‌اند [۳].

## ۵- تحلیل بررسی خردایش حاصل از آتشکاری به روش سنتی و با استفاده از پاوردک

به منظور ارزیابی اثر کاربرد پاوردک بر میزان خردایش حاصل از انفجار، با استفاده از آنالیز تصویری تعدادی از سیکل‌های انفجار با پاوردک در قیاس با سیکل‌های بدون استفاده از پاوردک مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه خردایش حاصل از انفجار می‌تواند تحت اثر پارامترهای توده سنگ قرار گیرد در نتیجه الگوهای انفجار مشابه می‌تواند نتایج خردایش متفاوتی داشته باشند. بدین منظور هر یک از الگوهای انفجار مورد بررسی برای ۳ سیکل انفجار تکرار شده و مقادیر خردایش حاصل ثبت شده است. مشخصات الگوی‌های انفجار بدون پاوردک و با پاوردک در جدول ۱ ارائه شده است.

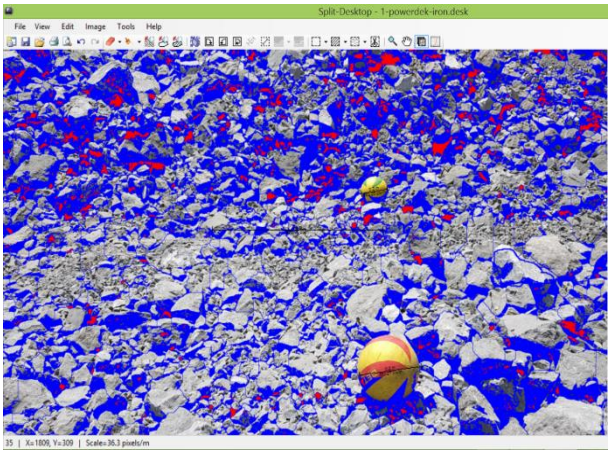
**جدول ۱- مشخصات الگوی‌های انفجار بدون پاوردک و با پاوردک**

| مشخصه انفجار | انفجار بدون پاوردک | انفجار با پاوردک | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | الگوی ۱ | الگوی ۲ | الگوی ۳ | الگوی ۴ | الگوی ۵ |
| **بارسنگ (m)** | ۱/۴ | ۱/۴ | ۱/۷ | ۱/۸ | ۲ |
| **فاصله‌داری (m)** | ۱/۶ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۲ | ۲/۲ |
| **اضافه حفاری (m)** | ۰/۷ | - | - | - | - |
| **گل گذاری (m)** | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۲ |
| **خرج ویژه ($kg/m^3$)** | ۱/۴۰ | ۱/۲۴ | ۰/۸۶ | ۰/۷۷ | ۰/۶۳ |
| **حفاری ویژه ($m/m^3$)** | ۰/۴۸ | ۰/۴۵ | ۰/۳۱ | ۰/۲۸ | ۰/۲۳ |

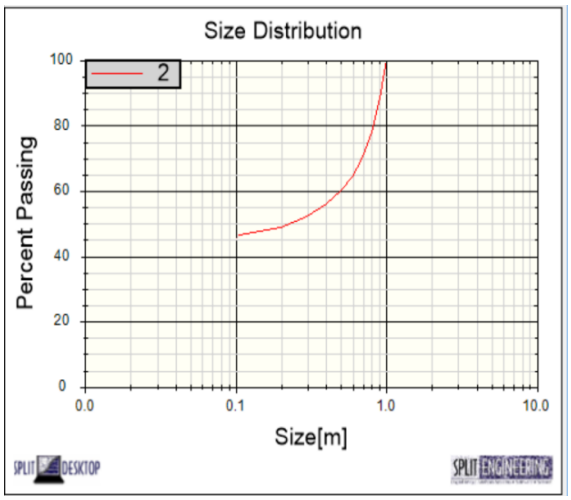
*در هر سیکل انفجار به منظور پردازش میزان خردایش با آنالیز تصویر عکس‌های متعددی تهیه شده است. شکل (۳) نمونه‌ای از خردایش حاصل از انفجار در معدن آهن سراب را نشان می‌دهد. بعد از عکس برداری در ابتدا عکس مورد نظر*

*فراخوانی می‌شود. پس از آن، Split-Desktopدر نرم افزار با استفاده از توپ‌های موجود در عکس مقیاس به نرم افزار معرفی می‌شود و سپس به مرزبندی بین قطعات حاصل از انفجار پرداخته می‌شود که شکل (۴) نمونه‌ای از مرزبندی را نشان می‌دهد. در این قسمت بعد از ویرایش و اصلاحات بر روی نحوه مرزبندی منحنی دانه بندی ارائه می‌شود. شکل (۵) بندی خردایش حاصل از یکی از سیکل‌های انفجار منحنی دانه بدون استفاده از پاوردک (الگوی ۱) را نشان می‌دهد. بندی خردایش شکل‌های ۶ تا ۹ نمونه‌هایی از منحنی دانه حاصل از الگوهای شماره ۲ تا ۵ با استفاده از پاوردک را نشان می‌دهند.*

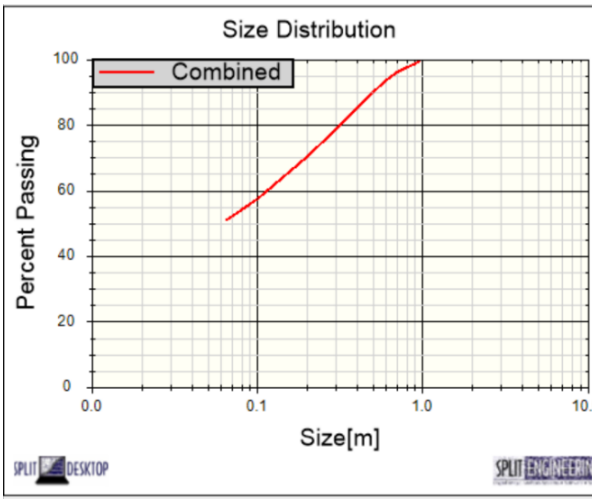
**شکل ۳- نمونه ای از خردایش در معدن آهن سراب**



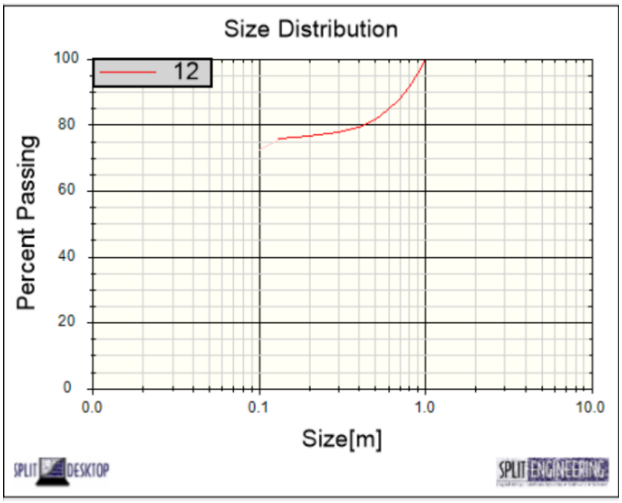

**شکل ۴- نمونه‌ای از مرزبندی خردایش با آنالیز تصویری**



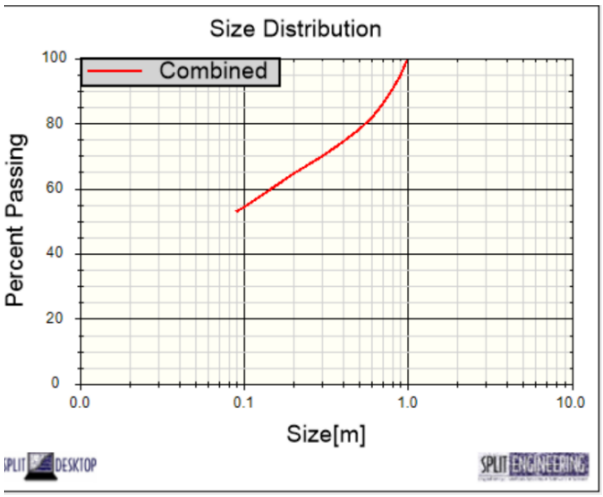

**شکل ۵- نمونه‌ای از منحنی دانه بندی خردایش حاصل از الگوی ۱ بدون پاوردک**




**شکل ۶- نمونه‌ای از منحنی دانه بندی خردایش حاصل از الگوی ۲ با پاوردک**



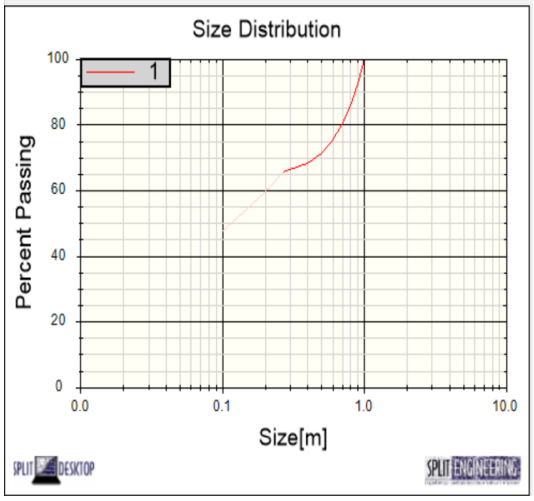

**شکل ۷- نمونه‌ای از منحنی دانه بندی خردایش حاصل از الگوی ۳ با پاوردک**




**شکل ۸- نمونه‌ای از منحنی دانه بندی خردایش حاصل از الگوی ۴ با پاوردک**

جدول (۲) مقایسه بین درصد ذرات مواد خرد شده حاصل از سیکل‌هایی از آتشکاری الگوهای با و بدون پاوردک را نشان می‌دهد.

مقادیر $F_{80}$ مربوط به هر یک از سیکل‌های انفجار مربوط به الگوهای با و بدون استفاده از پاوردک به همراه میانگین $F_{80}$ برای هر یک از الگوهای انفجاری در جدول (۳) گزارش شده است. خلاصه مشخصات و نتایج مربوط به هر یک از الگوهای انفجار با و بدون پاوردک در جدول (۴) ارائه شده است.




**شکل ۹- نمونه‌ای از منحنی دانه بندی خردایش حاصل از الگوی ۵ با پاوردک**

## ۶- بحث و بررسی نتایج

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از پاوردک در مقایسه با روش سنتی انفجار منجر به بهبودهای قابل توجهی در خردایش و کاهش هزینه‌های عملیات معدن‌کاری می‌گردد به گونه‌ای که استفاده از پاوردک در الگوی انفجار مشابه باعث کاهش ابعاد خردایش به میزان ۶۰ درصد شده است. این کاهش ابعاد خردایش نشان‌دهنده توانایی بالای این روش در بهبود کارایی انفجار و افزایش بهره‌وری در عملیات معدن‌کاری است. اما باید دقت شود که این کاهش در ابعاد خردایش در الگوی مشابه می‌تواند سبب افزایش مقدار ذرات ریز حاصل از انفجار گردد که به منظور کاهش درصد ذرات ریز لازم است تمهیداتی از جمله کاهش خرج چال، بزرگ کردن الگوی انفجار، افزایش گل گذاری و یا استفاده از مواد منفجره ضعیف مد نظر قرار گیرد که در الگوهای با شبکه بزرگتر (جدول ۲) نیز میزان درصد ذرات ریز تولیدی کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این، کاهش میزان حفاری ویژه به میزان ۶ درصد و کاهش خرج ویژه به میزان ۱۱ درصد، نتایج قابل توجهی هستند که اهمیت اقتصادی و فنی استفاده از پاوردک را به وضوح نشان می‌دهند. این کاهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از پاوردک می‌تواند به کاهش هزینه‌های کلی عملیات معدن‌کاری منجر شود و از این جهت، انتخاب

اقتصادی مناسبی برای معادن باشد.

بنابراین، با در نظر گرفتن یک چال انفجاری در روش پاوردک در مقایسه با انفجارهای معمولی، نه‌تنها حفاری هر چال کاهش می‌یابد، بلکه خرج مصرفی به‌ازای هر چال و همچنین خرج ویژهٔ انفجار کاهش می‌یابند. همچنین مشاهده می‌گردد که در شرایط استفاده از پاوردک می‌توان الگوی انفجاری را بزرگتر انتخاب کرده و ضمن دستیابی به میزان خردایش مناسب و متناسب با دهانه سنگ شکنی، میزان خرج ویژه و حفاری ویژه را نیز کاهش داد. با توجه به ابعاد دهانه سنگ‌شکنی برابر با ۵۰ سانتی‌متر می‌توان نتیجه گرفت که الگوی شماره ۴ با بهره‌گیری از پاوردک می‌تواند نتیجه مطلوب جهت انفجار را حاصل نماید.

**جدول۲- مقایسه بین درصد ذرات مواد خرد شده حاصل از آتشکاری با و بدون پاوردک در معدن آهن سراب**

| اندازه ذرات (cm) | درصد ذرات عبور کننده (٪) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | الگوی ۱ بدون پاوردک | الگوی ۲ با پاوردک | الگوی ۳ با پاوردک | الگوی ۴ با پاوردک | الگوی ۵ با پاوردک |
| **۱۰** | ۴۵/۶۴ | ۷۲/۶۲ | ۵۴/۴۲ | ۴۷/۶۹ | ۵۷/۲۸ |
| **۲۰** | ۴۸/۷۸ | ۷۶/۴۳ | ۶۴/۶۱ | ۵۹/۷۶ | ۷۰/۲۶ |
| **۳۰** | ۵۲/۰۵ | ۷۷/۷۱ | ۷۰/۰۴ | ۶۶/۱۷ | ۷۸/۵۴ |
| **۴۰** | ۵۵/۹۱ | ۷۹/۳۷ | ۷۴/۲۱ | ۶۸/۳۰ | ۸۴/۸۹ |
| **۵۰** | ۶۰/۱۳ | ۸۱/۵۶ | ۷۸/۱۱ | ۷۱/۲۴ | ۸۹/۹۳ |
| **۶۰** | ۶۴/۴۵ | ۸۴/۳۵ | ۸۱/۸۳ | ۷۵/۰۲ | ۹۳/۵ |
| **۷۰** | ۷۰/۴۳ | ۸۷/۶۹ | ۸۵/۶۵ | ۷۹/۸۵ | ۹۵/۷۱ |
| **۸۰** | ۷۸/۲۰ | ۹۱/۵۱ | ۹۰/۰۰ | ۸۵/۷۰ | ۹۷/۲۸ |
| **۹۰** | ۸۸/۱۶ | ۹۵/۶۵ | ۹۴/۸۴ | ۹۲/۴۷ | ۹۸/۶۹ |
| **۱۰۰** | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |

**جدول ۳- مقادیر $F_{80}$ مربوط به هر یک از سیکل‌های انفجار مربوط به الگوهای با و بدون استفاده از پاوردک در معدن سراب**

| خردایش ($F_{80}$) (m) | الگوی ۱ بدون پاوردک | الگوی ۲ با پاوردک | الگوی ۳ با پاوردک | الگوی ۴ با پاوردک | الگوی ۵ با پاوردک |
|---|---|---|---|---|---|
| **سیکل ۱** | ۰/۸۲ | ۰/۲۸ | ۰/۴۰ | ۰/۴۸ | ۰/۷۵ |
| **سیکل ۲** | ۰/۸۶ | ۰/۳۶ | ۰/۴۳ | ۰/۵۱ | ۰/۷۰ |
| **سیکل ۳** | ۰/۷۸ | ۰/۳۲ | ۰/۳۳ | ۰/۵۵ | ۰/۶۴ |
| **خردایش میانگین** | ۰/۸۲ | ۰/۳۲ | ۰/۳۹ | ۰/۵۱ | ۰/۷۰ |

**جدول ۴- خلاصه مشخصات و نتایج مربوط به هر یک از الگوهای انفجار با و بدون پاوردک در معدن سراب**

| مشخصه انفجار | انفجار بدون پاوردک | انفجار با پاوردک | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | الگوی ۱ | الگوی ۲ | الگوی ۳ | الگوی ۴ | الگوی ۵ |
| **بارسنگ (m)** | ۱/۴ | ۱/۴ | ۱/۷ | ۱/۸ | ۲ |
| **فاصله‌داری (m)** | ۱/۶ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۲ | ۲/۲ |
| **اضافه حفاری (m)** | ۰/۷ | – | – | – | – |
| **گل گذاری (m)** | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۲ |
| **خرج ویژه ($kg/m^3$)** | ۱/۴۰ | ۱/۲۴ | ۰/۸۶ | ۰/۷۷ | ۰/۶۳ |
| **حفاری ویژه ($m/m^3$)** | ۰/۴۸ | ۰/۴۵ | ۰/۳۱ | ۰/۲۸ | ۰/۲۳ |
| **خردایش میانگین $F_{80}$ (m)** | ۰/۸۲ | ۰/۳۲ | ۰/۳۹ | ۰/۵۱ | ۰/۷۰ |

## ۷- نتیجه گیری

آتشکاری مطلوب آتشکاری است، که از لحاظ فنی و اقتصادی و متناسب با شرایط منطقه مورد مطالعه از نظر پرتاب سنگ، لرزش زمین و لرزش هوا شرایط نسبی و ایده‌آل داشته باشد. در این تحقیق به تاثیر کاربرد روش پاوردک بر عملیات انفجار در معدن سنگ آهن سراب پرداخته شد. به منظور بررسی خردایش حاصل از عملیات آتشکاری در این معادن از روش آنالیز تصویری و نرم افزار *Split-Desktop* استفاده شد. نتایج در معدن آهن سراب نشان داد که در حالت استفاده از پاوردک در عملیات آتشکاری در مقایسه با الگوی بدون استفاده از پاوردک بهره‌وری چال افزایش یافته است و میزان خردایش حدود ۶۰ درصد افزایش یافته است. در صورتیکه ابعاد بهینه با توجه به ورودی سنگ شکن ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شود می‌توان جهت بهینه سازی الگوی انفجار با دستیابی به خردایش مناسب و متناسب، حفاری ویژه و خرج ویژه را کاهش داد. الگوی بهینه می‌تواند میزان خردایش را حدود ۳۷ درصد کاهش داده در عین حالیکه میزان حفاری ویژه و خرج ویژه را به ترتیب ۴۲ و ۴۵ درصد کاهش دهد. بنابراین قابلیت کاربرد پاوردک در معدن آهن سراب از منظر فنی و اقتصادی مورد تایید قرار می‌گیرد و می‌تواند به‌عنوان یک روش موثر و کارا در بهینه‌سازی عملیات انفجار در این معادن استفاده شود. به منظور مطالعه جامع‌تر، پیشنهاد می‌شود به بررسی همزمان پیامدهای حاصل از انفجار از قبیل لرزش حاصل از انفجار، پدیده عقب‌زندگی و ایجاد پاشنه در کنار میزان خردایش در شرایط کاربرد پاوردک پرداخته شود.

## ۸- منبع‌ها

[۱]. استوار، رحمت ا.. (۱۳۷۲) ،"آتشباری در معادن"، جلد دوم، انتشار جهاد دانشگاهی امیر کبیر.

[2]. www.minblast.com/products/tulip-plugs

[۳]. گزارش پایانی عملیات اکتشاف تکمیلی، معدن آهن سراب یاسکوند،۱۳۹۳

[4]. Sazid, M., Singh, T. N. (2013). Mechanism of air deck technique in rock blasting-a brief review. In Fourth Indian Rock Conference, no. May (pp. 29-31).

[5]. Xiaoming Lou, Ping Zhou, Jin Yu c, Mingwu Sun, (2020). Analysis on the impact pressure on blast hole wall with radial air-decked charge based on shock tube theory, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 128 105905

[6]. Yan, P., Zhou, W., Lu, W., Chen, M., & Zhou, C. (2016). Simulation of bench blasting considering fragmentation size distribution. International Journal of Impact Engineering, 90, 132-145.

[7]. Chiappetta R.F. and Memmele M.E. (1987). Analytical high—speed photography to evaluate air-decks, stemming retention and gas confinement in pre-splitting reclamation and gross motion studies, Proceedings of the Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Society for Experimental Mechanics, Bethel, CT, USA, pp. 257–301.

[8]. T. Hudaverdi, C. Kuzu, A. Fisne, (2015). Investigation of the blast fragmentation using the mean fragment size and fragmentation index. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 56, December 2012, Pages 136-145.

[9]. Liu L. and Katsabanis P.D. (1996). Numerical modeling of the effects of air decking/decoupling in production and controlled blasting, Proc 5th Int Conf on rock fragmentation by blasting. A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 319–330.

[10]. Lu W. and Hustrulid W. (2003). A further study on the mechanism of air-decking, Fragblast J, Vol. 7, No. 4, pp. 231–255

[11]. Singh T.N, Sazid M. and Saharan M.R. (2012). A study to simulate air deck crater blast formation- a numerical approach, 7th Asian Rock Mechanics Sym., Seoul, South Korea, pp. 495-505.

[12]. Lopez Jimeno, C., López Jimeno, E., & Carcedo, F. J. A. (1995). Drilling and blasting of rocks. AA Balkema.

[13]. Lou X, Zhou P, Yu J, Sun M. (2020). Analysis on the impact pressure on blast hole wall with radial air-decked charge based on shock tube theory, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 128.

[14]. Gao, F., Tang, L., Yang, C., Yang, P., Xiong, X., & Wang, W. (2023). Blasting-induced rock damage control in a soft broken roadway excavation using an air deck at the blasthole bottom. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(3), 97.

[15]. Kuznetsov, V. M. (1973). The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. Soviet mining science, 9, 144-148.

[16]. Larsson, B. (1974). Report on blasting of high and low benches–fragmentation from production blasts. In Proceedings of The Swedish Rock Construction Committee Discussion Meeting BK (Vol. 74, pp. 247-273).

[17]. Cunningham, C. (1983). The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. In Proc.

first int. symp. on rock fragmentation by blasting (pp. 439-453).

[18]. Da Gama, C. Dinis. "A model for rock mass fragmentation by blasting." In ISRM Congress, pp. ISRM-8 congress. ISRM, 1995.

JOURNAL OF ROCK MECHANICS

# The Impact of PowerDeck Application on Blasting Operations - A Case Study of the Sarab Iron Ore Mine

**Mosleh Eftekhari[1*]; Saba Sharifian Jazi[2]; Kaveh Ahangari[2]**
1- Department of Mining Engineering, Faculty of Mining and Materials, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

**Received: 03. June. 2023 Accepted: 20. August. 2023**
**(Corresponding author: mosleh.eftekhari@modares.ac.ir)**

***Keywords***
**Blasting**
**PowerDeck**
**Sarab Iron Mine**
**Image Analysis**
**Fragmentation**

***Final English Extended Abstract***

**Summary**

Blasting is one of the most critical stages in mining operations, and achieving an optimal blast pattern is essential for improving fragmentation and reducing costs. One method that can be used to enhance blasting is the PowerDeck technique. This study investigates the impact of using the PowerDeck method on blasting operations at the Sarab Hasanabad Yaskund iron ore mine. The primary objective of this research is to compare traditional blasting methods with the PowerDeck technique to achieve optimal fragmentation and cost reduction.

**Introduction**

Blasting is crucial in mining operations for breaking rock into manageable sizes for transportation and processing. Optimizing the blast pattern is essential to improve fragmentation and reduce operational costs. The PowerDeck technique has emerged as a promising method to enhance blasting efficiency. This research explores the necessity of improving blast efficiency and the benefits of using the PowerDeck method over traditional blasting techniques. The objective is to achieve better fragmentation while minimizing drilling and explosive costs, thus enhancing overall mining productivity.

**Methodology and Approaches**

This study involved a comparative analysis of blasting operations using the traditional method and the PowerDeck technique at the Sarab Hasanabad Yaskund iron ore mine. The analysis was conducted over multiple blasting cycles, with similar blast patterns used for both methods. Specific drilling and charge parameters were recorded for each cycle. Digital image analysis was employed to assess fragmentation sizes using the Split-Desktop software. The collected data was then analyzed to determine the efficiency and cost-effectiveness of each method.

**Results and Conclusions**

The results demonstrated that using the PowerDeck technique significantly improved blast fragmentation, reducing the average fragmentation size by 60% compared to traditional methods. Additionally, specific drilling and specific charge requirements decreased by 6% and 11%, respectively. This reduction in drilling and explosive costs, coupled with improved fragmentation, validates the PowerDeck method as a superior blasting technique. The study concludes that PowerDeck is an effective method for optimizing blasting operations, offering both technical and economic advantages for the Sarab iron ore mine.