

بررسی آزمایشگاهی اثر ابعاد گرد زغال در انفجار مخلوط گرد زغال و متان

حدیث مرادی^۱، فرهنگ سرشکی^{۲*}، محمد عطایی^۳ و محسن نظری^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، h.moradiphd2017@gmail.com

۲- استاد، مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، Farhang@shahroodut.ac.ir

۳- استاد، مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شاهرود، m_nazari@yahoo.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۱۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۸/۰۷/۱۹، پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۳)

چکیده: در معادن زغال سنگ، انفجار مخلوط گرد زغال و گاز متان در سال‌های اخیر باعث اثرات فاجعه‌باری شده است. اشتعال‌پذیری و فعالیت‌های شیمیایی گردوغبار مربوط به اندازه ذرات است. لذا، مکانیسم انفجار گردوغبار زغال سنگ به‌طور گسترده‌ای توسط اندازه ذرات زغال سنگ کنترل می‌شود. در این مقاله، اثر اندازه ذرات گردوغبار زغال سنگ بر روی شدت انفجار گردوغبار زغال سنگ با استفاده از آزمون انفجار در محفظه ۲ لیتری مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های زغال سنگ مورد آزمایش از سه معدن از منطقه زغالی مهم کشور (البرز شرقی، البرز مرکزی و طبس) جمع‌آوری شده و به‌صورت گرد زغال در هشت مقیاس مختلف (۱۴۹، ۱۲۵، ۱۰۵، ۷۴، ۶۳، ۵۳، ۴۴ و ۳۷ میکرون) آماده‌سازی شده است. نتایج آنالیز سرنندی نشان می‌دهد که تقریباً تمام نمونه گرد زغال‌های انتخاب‌شده حداقل غلظت مطلوب انفجار (۲۵۰ گرم بر متر مکعب) را دارند. شدت انفجار هر نمونه با اندازه‌گیری حداکثر فشار، حداکثر میزان افزایش فشار و شاخص انفجار طی آزمایش‌های متعددی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحلیل، تمامی آزمایش‌ها در فشار ۱/۵ بار و دمای اولیه ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، ذرات گرد زغال با ابعاد ۴۴ و ۳۷ میکرون نسبت به سایر ابعاد شاخص انفجاری بالاتری دارند. بنابراین، پارامترهای حداکثر فشار انفجار و حداکثر نرخ افزایش فشار با کاهش اندازه و پراکندگی ذرات، روند افزایشی را در شدت انفجار نشان می‌دهد. حضور ذرات ریز باعث افزایش سطح مؤثر و در نتیجه باعث افزایش سرعت انفجار و نرخ ناپایداری می‌شود که موجب شتاب فرایند انفجار گرد زغال می‌شود. بنابراین، طبق نتایج به‌دست‌آمده، در فرایند بررسی انفجار گرد زغال، علاوه بر غلظت گرد زغال، اندازه ذرات نیز بایستی در نظر گرفته شود. نتایج به‌دست‌آمده در این مکانیسم نه‌تنها در تحقیق و پیشرفت دانش فرایند انفجار گرد زغال مفید است، بلکه در انجام اقدامات لازم برای جلوگیری از انفجار گرد زغال سنگ در معادن زغال سنگ نیز مؤثر است.

کلیدواژگان: گردوغبار زغال سنگ، محفظه احتراق، شاخص انفجار، توزیع اندازه ذرات، پارامترهای انفجاری

مقدمه

در روند تولید زغال سنگ، انفجار متان معمولاً با انفجار گردوغبار زغال سنگ همراه است. بنابراین، انفجار و اثرات مخرب آن شدیدتر و فاجعه‌بارتر است و جزء رویدادها و خطرات مهم برای معادن زغال سنگ به‌شمار می‌آید. لذا، انفجار مخلوط گاز و گرد زغال در معادن زغال سنگ بخش عمده‌ای از حوادث جدی را به خود اختصاص داده است، که به پژوهش‌های دقیقی نیاز دارد [۱].

فرایند انفجار گرد زغال، به‌دلیل تأثیر مستقیم بر حفظ ایمنی محیط استخراجی، باید به‌دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین، ارزیابی خطر انفجار گرد زغال امری اساسی و بنیادی در عملیات استخراج به‌شمار می‌آید [۲].

انفجار گردوغبار زغال سنگ زمانی آغاز می شود که ذرات قابل اشتعال گرد در هوا در نزدیکی منبع احتراق مناسب قرار گیرند. اگر گردوغبار پراکنده شوند و منبع جرقه وجود داشته باشد، به طور معمول یک آتش سوزی ناگهانی^۱ ایجاد می شود [۳]. برای به وجود آمدن آتش سوزی سریع، محصور بودن یک عنصر ضروری است. به همین ترتیب، چهار شرط مهم دیگر نیز برای ایجاد انفجار وجود دارد. طبق گفته کاوفمن [۴]، هنگامی که پنج ضلعی انفجار تکمیل شود، انفجار گردوغبار رخ می دهد. این پنج ضلعی شامل مخلوط کردن، محصور شدن، سوخت، اکسیژن و یک منبع اشتعال است. هنگامی که این پارامترها به حد آستانه کافی (محدوده انفجاری) برسند، انفجار گردوغبار اتفاق می افتد (شکل ۱).

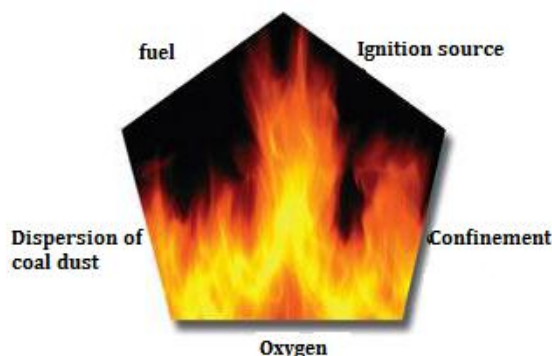


Figure 1- Dust explosion pentagon[4]

شکل ۱- پنج ضلعی انفجار گردوغبار [۴]

مطابق شکل ۲، اگر نسبت ابر گرد زغال قابل احتراق به حجم محبوس شده به اندازه کافی بزرگ باشد، حرارت آزاد شده منجر به افزایش فشار می شود. در این حالت، اگر حداکثر فشار به دست آمده بیش از قدرت ساختار باشد، ساختار متلاشی خواهد شد. انفجار گرد زغال زمانی آغاز می شود که یک ابر گرد زغال قابل اشتعال شود. شعله ایجاد شده در دمای بالا حجمی از گاز را به بخش نسوخته ابر گرد زغال گسترش می دهد. با افزایش سطح شعله، مصرف سوخت افزایش می یابد و باعث بزرگ تر شدن حجم احتراق می شود. با ادامه گسترش گازهای سوخته، شتاب شعله افزایش می یابد و مصرف سوخت را افزایش می دهد و باعث بزرگ شدن حجم احتراق می شود. گر ابر گرد زغال به صورت شناور در یک ساختار محدود ادامه یابد، دمای بالای محصولات احتراق منجر به افزایش فشار می شود [۵].

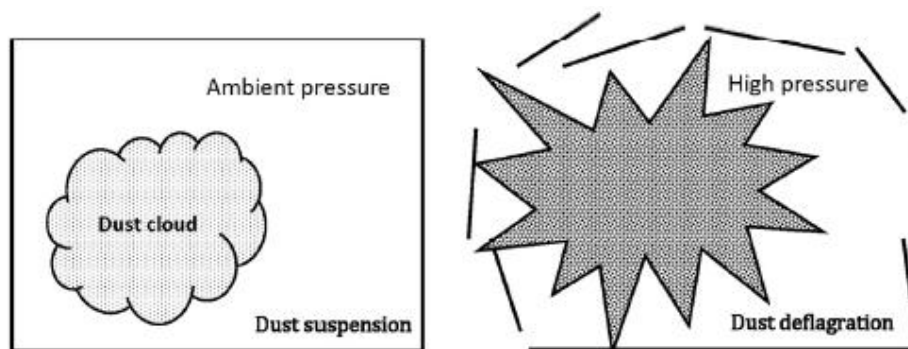
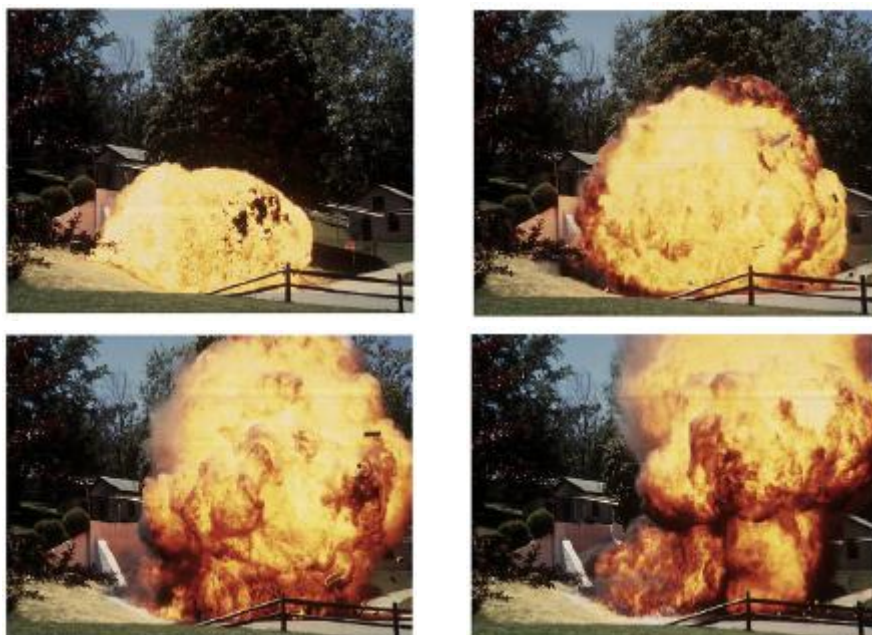


Figure 2- The dust explosion hazard scenario[6]

شکل ۲- خطر انفجار در یک توده ابر گرد زغال [۶]

شکل ۳ انفجار گرد زغال را در حضور متان به صورت مرحله‌ای در معدن بروتون^۱ نشان می‌دهد.



شکل ۳- مراحل انفجار شدید مخلوط انفجار گاز و گرد زغال در معدن بروتون[۴]

Figure 3- The explosive blasting stages of blasting gas and coal dust in the Breton mine[4]

لذا با توجه به اهمیت ایمنی معادن زغال سنگ در سراسر جهان، مطالعه در زمینه ارزیابی خطر انفجار گرد زغال، امری ضروری به نظر می‌رسد. با این حال، پدیده پیچیده انفجار گردوغبار زغال سنگ، به دلیل درآمیخته شدن تعدادی از عوامل مؤثر بر روند انفجار، هنوز به خوبی شناخته نشده است. از این رو، تلاش‌ها در سراسر جهان برای مطالعه فرایند انفجار انواع زغال سنگ برای جلوگیری از خطر انفجار ادامه دارد.

برای ارزیابی و جلوگیری از انفجار گرد زغال، پارامترهای انفجاری مبنایی برای ارزیابی خطر انفجار به‌شمار می‌آیند و عمدتاً شامل حداکثر فشار انفجار (P_{max})، حداکثر سرعت افزایش فشار (dp/dt_{max}) و شاخص انفجار (K_{ST}) است [۷]. انفجار گردوغبار زغال سنگ و شدت انفجار آن به پارامترهای مختلفی، شامل شرایط محیطی و خواص گردوغبار زغال سنگ، بستگی دارد. اندازه ذرات یکی از عناصر کلیدی مطالعات انفجار گردوغبار است [۸، ۹].

در زمینه بررسی اثر اندازه ذرات در انفجار گردوغبار زغال سنگ مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه جدیدترین این مطالعات آورده شده است. آجراش و همکاران [۱۰]، در سال ۲۰۱۷، به‌طور تجربی اثر غلظت و اندازه ذرات گردوغبار زغال سنگ را بر دمای احتراق ابر گرد زغال مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که ویژگی‌های گردوغبار زغال سنگ، مانند خصوصیات شیمیایی (H/C)، غلظت، اندازه ذرات (D_{50}) و رطوبت محتوی، بر حداقل دمای احتراق تأثیرگذار است. برای غلظت‌های کمتر از ۱۰۰۰ گرم بر مترمکعب، با افزایش غلظت گرد زغال سنگ، حداقل دمای احتراق کاهش می‌یابد. همچنین، برای غلظت‌های کمتر از ۱۰۰ گرم بر مترمکعب، حداقل دمای احتراق بیشتر با اندازه ذرات گرد زغال سنگ در ارتباط است. ژانگ و همکاران [۱۱]، در سال ۲۰۱۷، اثر توزیع اندازه ذرات پلی‌متیل متاکریلات^۲ را بر رفتار انتشار شعله مورد بررسی قرار دادند. نتایج عکس‌برداری، با دوربین سرعت بالا، نشان داد که رفتار احتراق ذرات گردوغبار پلی‌متیل

1. Breton
2. polymethyl methacrylate

متاکریلات ۱۰۰ نانومتر، ۵ میکرومتر و ۳۰ میکرومتر متفاوت است و سرعت انتشار شعله در ذرات کوچک‌تر بالاتر است. زلوچور و همکاران [۱۲]، در سال ۲۰۱۸، رابطه بین اثر گردوغبار سنگ بر انفجار گرد زغال‌سنگ را به‌عنوان تابعی از سطح ویژه ذرات با استفاده از آزمایش در یک محفظه انفجار ۲۰ لیتری مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آن‌ها، به‌طور خاص، یک رابطه خطی بین مواد بی‌اثر و سطح ویژه ماده قابل احتراق وجود دارد. با کاهش ابعاد گرد زغال، سطحی که تحت اثر نفوذ اکسیژن قرار می‌گیرد افزایش می‌یابد و احتمال انفجار گرد زغال به‌مراتب افزایش می‌یابد. در این مطالعه، برای صحت کار انجام‌شده مدلی بر مبنای تحلیل رگرسیون انجام شد و ضریب تعیین ۰/۹۷ برای تحلیل داده‌های موجود به‌دست آمد. تاسکون [۱۳]، در سال ۲۰۱۸، تأثیر چولگی^۱ توزیع اندازه ذرات را در قابلیت انفجار گردوغبار مورد بررسی قرار داد. طبق نتایج این مطالعه، در صورتی که چولگی منحنی توزیع اندازه ذرات صفر باشد، منحنی توزیع اندازه ذرات کاملاً متقارن است. اگر چولگی کمتر از صفر باشد، توزیع ذرات ریز بیشتر است و اگر چولگی بیشتر از صفر باشد، توزیع ذرات درشت بیشتر است. میسرا و همکاران [۱۴]، در سال ۲۰۱۸، اثر اندازه ذرات، غلظت و پراکندگی گردوغبار را بر روی حداقل دمای اشتعال، در طی فرایند احتراق در یک محفظه کروی، مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، ذرات گرد زغال‌سنگ در ابعاد مختلف ۳۸ میکرومتر تا ۲۱۲ میکرومتر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش ابعاد ذرات و غلظت گرد زغال‌سنگ، حداقل دمای احتراق افزایش می‌یابد. آزام و میسرا [۱۵]، در سال ۲۰۱۹، اثر اندازه ذرات، غلظت گردوغبار و میزان پراکندگی گردوغبار در هوا را برای تعیین میزان پودر آهک مورد استفاده در مهار انفجار گرد زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که نسبت غلظت پودر سنگ مورد نیاز برای جلوگیری از انفجار گردوغبار زغال‌سنگ با کاهش ابعاد ذرات گردوغبار زغال‌سنگ و افزایش حجم آن‌ها افزایش می‌یابد.

علاوه بر تحقیقات انجام‌شده در زمینه گردوغبار زغال‌سنگ، محققان مختلفی شدت انفجار سایر گردوغبارها را در اندازه‌های مختلف و در محفظه‌های متفاوت همراه با سوخت کمکی مختلف مورد مطالعه قرار دادند که اهم این مطالعات در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول محققان مختلف شدت انفجار پودرهای مختلفی، از قبیل نیاسین، پلی‌اتیلن، سلولز و غیره، را در اندازه‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در زمینه بر آورد شدت انفجار انواع مخلوط گاز و گردوغبار

Table 1- Summary of studies on the estimation of the severity of explosive types of dust and gas

Reference	Dust	Particle size Range (µm)	Test apparatus	Gas	K _{ST} (bar.m/s)
[16]	Polyethylene	75-100	Rectangular cube chamber	Ethylene	-
[17]	Niacin	100-200	1 m ³ chamber	Methane	130-165
	Niacin	100-200	1 m ³ chamber	Propane	140
	Cornstarch	100-200	1 m ³ chamber	Methane	140-175
[18]	Niacin	125	1 m ³ chamber	Ethane	165
[19]	Niacin	75-100	20 lit chamber	Acetone	125-160
[20]	PVC	75	-	Methane	168
	Pea Flour	75	-	Propane	110
	Cellulose	75	-	Propane	110
	Cornstarch	75	-	Hydrogen	128
[21]	PVC	200	Closed Chamber	Propane	70

با مروری بر تحقیقات علمی صورت‌گرفته در این زمینه، به روشنی مشخص می‌شود که بررسی تأثیر ابعاد گرد زغال‌سنگ بر پارامترهای شدت انفجاری مخلوط گرد زغال‌سنگ و متان انجام نشده است. با توجه به عدم وجود چنین تحقیقی در این زمینه و اهمیت جلوگیری خطر انفجار در معادن زیرزمینی، هدف مطالعه حاضر بررسی اثر اندازه ذرات گرد زغال‌سنگ بر شدت انفجار گرد زغال‌سنگ است.

1. Skewness

پارامترهای شدت انفجار برای توصیف خطر انفجار گرد زغال

پارامترهای انفجاری شامل فشار انفجار، حداکثر نرخ افزایش فشار و شاخص انفجار است. این پارامترها به طور معمول در محفظه‌ای با هدف دستیابی به احتراق در مرکز یک ابر گرد زغال یکنواخت اندازه‌گیری می‌شود. فشار انفجار فشار نهایی به دست آمده در یک ظرف آزمون برای رسیدن به انفجار گرد زغال است [۲۲].

فشار انفجار نشان‌دهنده شدت انفجار است. هرچه قدر فشار انفجار بالاتر باشد، آسیب بیشتری به محیط وارد می‌شود. فشار انفجار به طور مستقیم با متوسط دمای شعله در محفظه مورد آزمایش ارتباط پیدا می‌کند. از دیواره محفظه آزمون به طور معمول مقداری حرارت ازدست می‌رود. بنابراین، در به دست آوردن فشار انفجار تجربی محدودیت‌هایی برای شکل و حجم محفظه آزمون وجود دارد [۲۳]. حداکثر نرخ افزایش فشار به طور مستقیم مربوط به نرخ سوختن سوخت است و به اندازه و شکل محفظه آزمون حساس است. اندازه و شکل محفظه آزمون تأثیر زیادی در پراکندگی گرد زغال و حرارت ازدست‌رفته از طریق دیواره‌ها دارد.

شکل ۴ انواع فشارهای موجود در انفجار گرد زغال را نمایش می‌دهد. فشار انفجار (P_{max}) حداکثر فشار به دست آمده طی فرایند آزمون انفجار است و به میزان گرمای آزاد شده از انفجار مرتبط است. حداکثر سرعت افزایش فشار است که در طول آزمایش انفجار افزایش می‌یابد و بیانگر میزان انتشار گرما در برابر انفجار است.

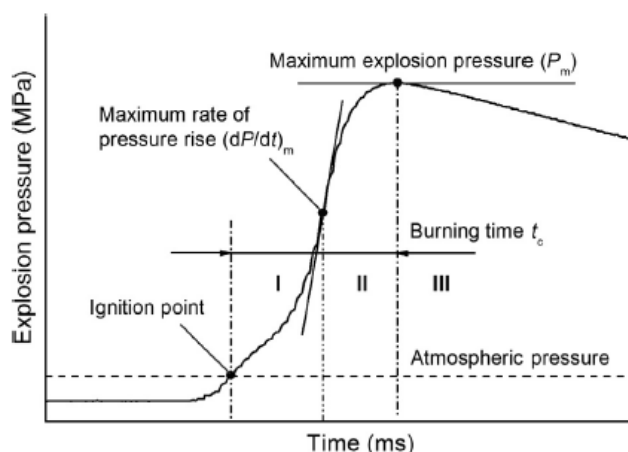


Figure 4- Types of pressure in coal explosion [24]

شکل ۴- انواع فشارهای به دست آمده در انفجار گرد زغال در آزمایش گرد زغال [۲۴]

از ویژگی‌های مهم حداکثر نرخ افزایش فشار یک برآورد اولیه از اطلاعات به دست آمده از آزمون احتراق است که طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۵]:

$$K_{St} = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} \times V^{1/3} \quad (1)$$

در این رابطه، K_{St} پارامتر مربوط به شاخص انفجار، $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ حداکثر نرخ افزایش فشار اندازه‌گیری شده در محفظه آزمون برحسب bar/s و V حجم محفظه آزمون برحسب m^3 است. مقدار زیادی از روش‌های طراحی انفجار با استفاده از شاخص K_{St} انجام می‌شود. براساس میزان شاخص K_{St} محاسبه شده، قابلیت انفجار گرد زغال مطابق جدول ۲ توصیف می‌شود.

جدول ۲- طبقه‌بندی قابلیت انفجار گرد زغال سنگ براساس شاخص K_{St}

Table 2- Coal dust classification according to KSt

K_{St} (bar.m/s)	0	1-200	200-300	>300
Characteristic	No explosion	Weak explosion	Strong explosion	Very strong explosion

آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌های گرد زغال سنگ

نمونه زغال سنگ جمع‌آوری شده از سه معدن قشلاق، طزره و پرورده در آزمایشگاه، ابتدا، در سنگ‌شکن فکی خرد شده و سپس در آسیاب گلوله‌ای به ذرات ریز تبدیل شدند. برای داشتن طیفی از اندازه ذرات مختلف، مطابق با استاندارد ASTM E1226-12 [۲۶]، با استفاده از سرنند لرزاننده، مطابق شکل ۵، آنالیز سرنندی انجام شده و نمونه‌های هر سه معدن با توجه به سرندهای موجود در آزمایشگاه خردایش در اندازه‌های مختلف (۱۴۹ میکرومتر، ۱۲۵ میکرومتر، ۱۰۵ میکرومتر، ۷۴ میکرومتر، ۶۳ میکرومتر، ۵۳ میکرومتر، ۴۴ میکرومتر و ۳۷ میکرومتر) آماده‌سازی شده‌اند. شکل ۶ نمونه گرد و غبار زغال سنگ آماده‌سازی شده را نشان می‌دهد.



Figure 5- a) Vibrating screen in the laboratory, b) Demonstration of how particles pass through the screen
شکل ۵- الف) سرنند لرزاننده موجود در آزمایشگاه و ب) نمایشی از نحوه عبور ذرات از سرنند

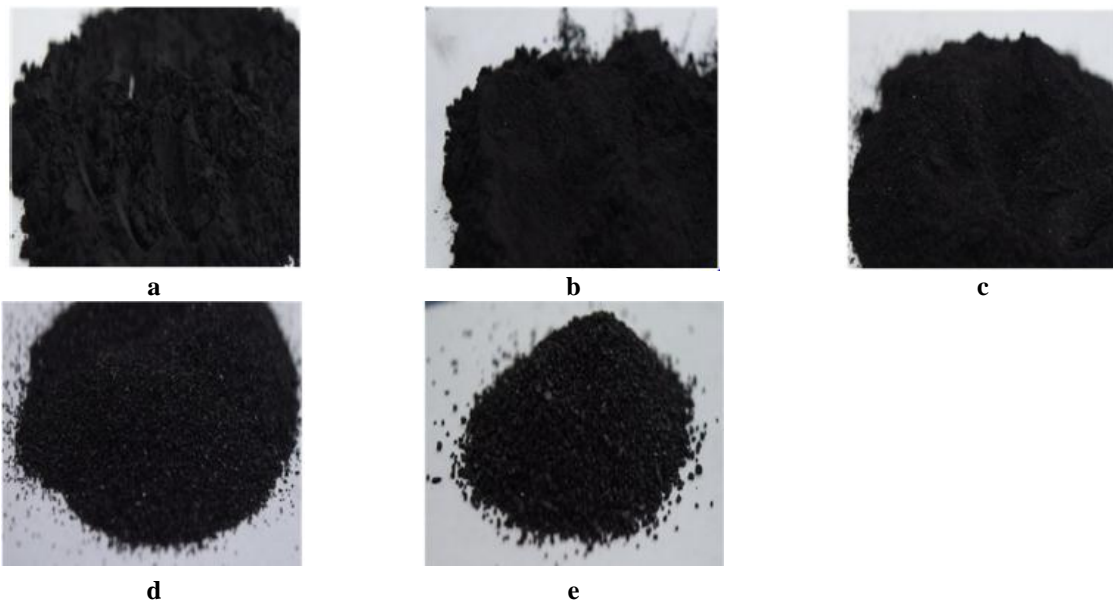


Figure 6- The coal dust samples of different particle size ranges: (a) 44 μm , (b) 63 μm , (c) 74 μm , (d) 125 μm and (e) 149 μm
شکل ۶- ذرات گرد زغال سنگ آماده سازی شده: الف) ۴۴ میکرومتر، ب) ۶۳ میکرومتر، ج) ۷۴ میکرومتر، د) ۱۲۵ میکرومتر و ه) ۱۴۹ میکرومتر

روش نگهداری نمونه‌ها از معدن تا آزمایشگاه به این صورت است که نمونه‌های زغال‌سنگ در بسته‌های پلاستیکی آب‌بند هواناپذیر قرار گرفته و سپس با ورقه‌ای از آلومینیوم پوشانده می‌شوند تا به محل آزمایشگاه انتقال داده شوند. انجام آزمایش‌های نمونه‌های زغال‌سنگ نباید بیش از دو هفته از زمان جمع‌آوری نمونه تا انجام آزمایش به طول انجامد زیرا، در غیر این صورت نمونه‌های زغال‌سنگ دچار اکسایش شده و نتایج از اعتبار لازم برخوردار نیستند. در این تحقیق، با توجه به امکانات موجود، به‌صورت جداگانه، آزمایش‌های مربوط به تعیین مشخصات ذاتی سه نمونه زغال‌سنگ انجام شده که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات ذاتی نمونه زغال‌سنگ‌های مورد آزمایش

Table 3- characteristics inherent in coal dust samples tested

Sample number	Sampling site	Primary analysis (%)			
		moisture content	Volatile substances	Ash	Fixed carbon
1	Gheshlagh Mine, Layer 123	3.5	40.4	7.6	48.5
2	Tazareh mine, layer K25	1.27	45.77	6.33	46.63
3	Parade mine 4, layer C ₁	1.2	45.8	2.4	50.6

معرفی دستگاه آزمون

محفظه طراحی شده مورد استفاده در این تحقیق به شکل استوانه‌ای است و جنس بدنه و دو سر آن از فولاد است. قطر داخلی و ارتفاع بدنه استوانه‌ای ۱۳۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۴۰ میلی‌متر است. دو طرف بدنه اصلی محفظه با شیشه‌هایی از جنس کوارتز با ضخامت ۸۰ و قطر ۱۶۰ میلی‌متر پوشیده شده است. با وجود این، شیشه‌ها محفظه قابلیت تحمل فشار تا ۱۰۰ بار را داراست. هدف از قراردادن این شیشه‌ها مشاهده درون محفظه، به‌منظور بررسی پدیده‌هایی همچون پاشش و احتراق، است. دو آب‌بند سیلیکونی در دو انتهای بدنه استوانه‌ای و دو سر محفظه قرار می‌گیرد تا از نشت گازهای داخل محفظه و ورود هوای بیرون در هنگام ایجاد خلأ جلوگیری کند. نمای انفجاری و هم‌بندی شده این محفظه در شکل ۷ نشان داده شده است.

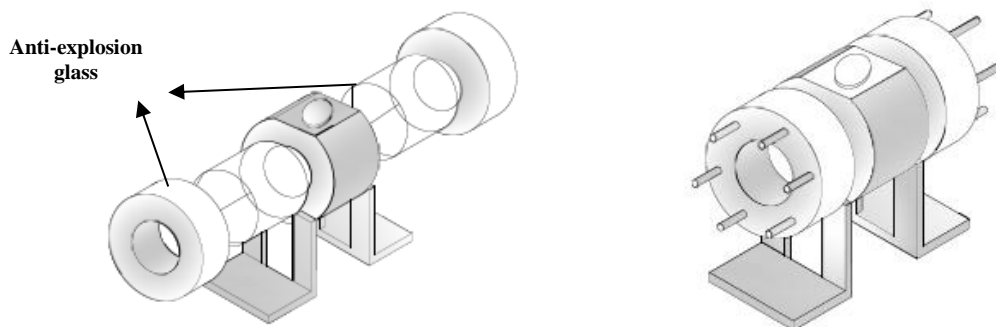


Figure 7- Fixed volume combustion chamber

شکل ۷- محفظه احتراق حجم ثابت

شکل ۸ چیدمان طراحی شده برای آزمایش انفجار گرد زغال را نشان می‌دهد. دو انژکتور، مخزن ورودی گرد زغال، دو الکتروود فولادی جرقه‌زن، سیم‌پیچ^۱ و حسگر دینامیکی فشار (PZ) تعبیه شده است. برای عکس‌برداری از روش نوری شیلیرین استفاده شده است. در این روش، با عبور یک دسته نور موازی از محیط مشخص می‌توان، با توجه به شکست نور در اثر اختلاف چگالی ایجادشده، اثر احتراق را بررسی کرد. به همین منظور، نور از منبع نور مورد استفاده ساخت شرکت VANGUARD کشور آلمان به سمت آینه کروی اول در سمت راست هدایت می‌شود و بعد از عبور از محفظه احتراق به آینه کروی دوم در

1. Coil

سمت چپ برخورد می‌کند. نور انعکاس یافته از این آینه پس از عبور از لبه چاقویی وارد دوربین پرسرعت می‌شود. از خط لوله‌ای که زیر محفظه کشیده شده است هوای مورد نیاز محفظه تأمین می‌شود و دود حاصل از احتراق نیز از همین مسیر به سمت بیرون خارج می‌شود. سه حسگر فشار (PT1، PT2 و PT3) در این مسیر وجود دارد و عملیات تنظیم فشار با این حسگرها صورت می‌گیرد. حسگرهای مربوطه تنظیم فشار هوا ساخت شرکت BD SENSOR و با نام تجاری DMP331 با محدوده اندازه‌گیری ۰ تا ۱ و ۰ تا ۲۵ بار نسبی است. دقت این حسگرها در محدوده اندازه‌گیری در مقیاس نامی به ترتیب برابر با $\pm 0.5\%$ و $\pm 0.35\%$ است. حسگر فشار اول (PT1)، فشار خلأ ایجادشده با تلمبه خلأ در محفظه را اندازه می‌گیرد. تحریک افشانه‌ها، الکتروود جرقه‌زن، شروع فیلم‌برداری و ثبت فشار دینامیکی با واحد مدیریت الکتریکی انجام می‌شود. مخزن گاز متان، که در قسمت راست چیدمان نشان داده شده است، در بیرون از اتاق آزمون تعبیه شده است. شکل ۹ نیز تصاویری از آینه مقعر، دوربین پرسرعت و منبع نور را نشان داده است. مدل دوربین مورد استفاده در این مطالعه MotionBLITZ Cube ساخت کشور کانادا است.

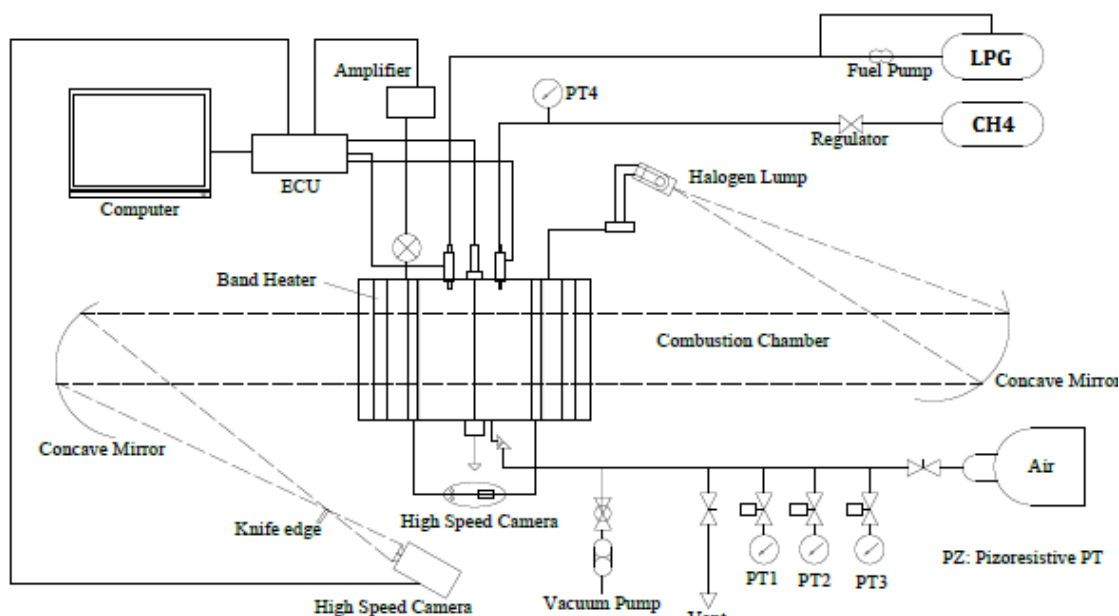


Figure 8- Schematic coal dust explosion test
 شکل ۸- چیدمان آزمون انفجار گرد زغال

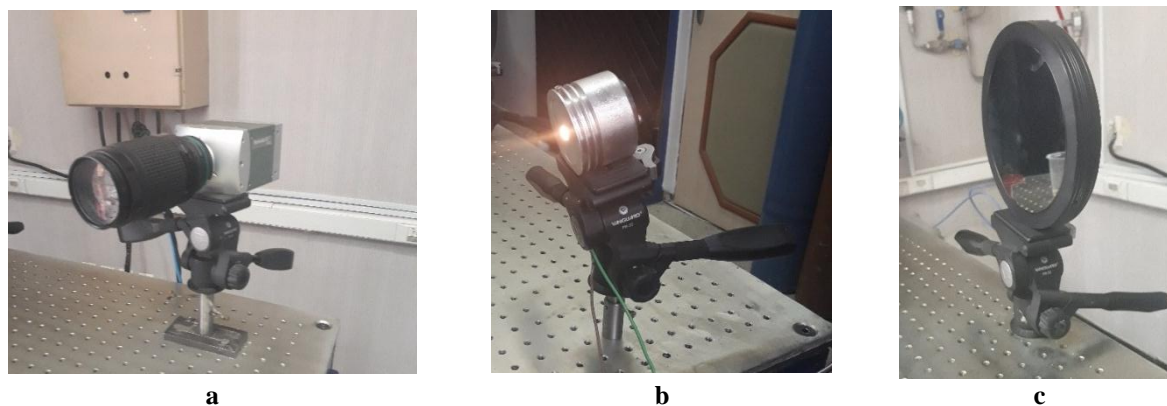


Figure 9- a) high-speed camera MotionBLITZ Cube Model, b) light source, c) concave mirror
 شکل ۹- الف) دوربین پرسرعت مدل MotionBLITZ Cube، ب) منبع نور و ج) آینه مقعر

مراحل اندازه‌گیری پارامترهای انفجاری

در جدول ۴ مراحل آماده‌سازی و انجام آزمون اندازه‌گیری پارامترهای انفجاری گرد زغال آورده شده است که در قسمت‌های بعدی در مورد این مراحل توضیح داده می‌شود.

جدول ۴- مراحل اندازه‌گیری پارامترهای انفجاری گرد زغال سنگ

Table 4- Steps to measure the explosive parameters of coal dust

1	Create a vacuum in the combustion chamber
2	Prepare the mixture by partial pressure method
3	Combustion pressure recording
4	The air chamber is full and empty for vacuuming the remaining dust

ایجاد خلأ در محفظه احتراق

برای اطمینان از خروج گردوغبارهای باقی‌مانده از آزمون قبلی، بعد از پر و خالی کردن محفظه با هوای فشار ۲ مرتبه، با استفاده از تلمبه خلأیی، فشار داخل محفظه تا ۱/۵ کیلو پاسکال کاهش می‌یابد.

تهیه مخلوط با روش فشار جزئی

برای تهیه مخلوط سوخت و هوا در نسبت هم‌ارزی مشخص، از روش فشار جزئی گازها در شرایط آرمانی (گاز ایدئال) استفاده می‌شود. در مخلوط چند گاز در یک محفظه بسته معادلات (۲) تا (۵)، براساس الگوی دالتون^۱، حاکم است:

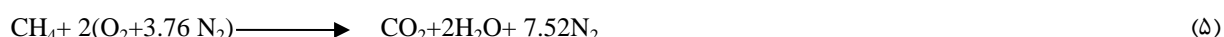
$$V=V_1=V_2=\dots=V_n \quad (2)$$

$$P=P_1+P_2+\dots+P_n \quad (3)$$

$$P_i=x_iP \quad (4)$$

در روابط بالا، V حجم، P فشار، x_i کسر مولی جزء i و 1 تا n اندیس گازهای موجود در مخلوط است. بنابراین، با توجه به رابطه ۴، فشار هر جزء با ضرب فشار کل در کسر مولی حاصل خواهد شد [۲۷].

مخلوط گازی مورد نظر برای این آزمایش مخلوط متان و هوا خواهد بود که واکنش یک‌مرحله‌ای آن به‌صورت زیر است:



آزمایش‌ها برای مخلوط استوکیومتریک (نسبت هم‌ارزی یک) در فشار اولیه ۱/۵ بار و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام خواهد شد. برای آماده‌سازی مخلوط برای شرایط دلخواه می‌توان با فرض گاز ایدئال (با توجه به فشار و دمای پایین) از فشارهای جزئی برای میزان تزریق گاز استفاده کرد که می‌توان به شرح ذیل فشارهای جزئی را محاسبه کرد:

$$P_{\text{CH}_4} = y_{\text{CH}_4} * P, \quad P_{\text{air}} = y_{\text{air}} * P \quad (6)$$

Y کسر مولی گونه‌های شیمیایی است که در حالت استوکیومتریک برای متان خالص در مخلوط مورد نظر به‌صورت زیر خواهد بود:

$$Y_{\text{CH}_4} = n_{\text{CH}_4} / n_t = 1/10.52 = 0.095 \quad (7)$$

بنابراین، در تمام مراحل آزمایش میزان متان مورد استفاده در محفظه ۹/۵ درصد و ثابت است. در فشار اولیه محفظه (فشار ورودی) فشار جزئی هوا و متان به‌شرح جدول ۵ خواهد بود. حسگر فشار، برای اندازه‌گیری فشار جزئی، ساخت شرکت testo و با نام تجاری testo 0528 با محدوده اندازه‌گیری ۰ تا ۲ بار مطلق و دقت آن در محدوده اندازه‌گیری برابر با $\pm 0.25\%$ بوده است.

1. Dalton

جدول ۵- نتایج فشارهای جزئی در نسبت هم‌ارزی یک

Table 5- Results of partial pressures in the equivalence ratio of one

Equivalence ratio	Total initial pressure (bar)	Particular pressure on methane (bar)	Particular pressure on air (bar)
1	1.492	0.142	1.35

افشانه سوخت مورد استفاده از نوع افشانه شش سوراخ تزریق مستقیم (FSI HDEV Gasoline Direct Injection Injectors) و از شرکت بوش است. این افشانه‌ها تا فشار ۲۰۰ بار قابلیت عملکرد دارند. نمایی از این افشانه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



Figure 10- Spray used to spray methane into a closed chamber
شکل ۱۰- افشانه مورد استفاده برای پاشش متان به داخل محفظه بسته

ایجاد جرقه و ثبت فشارهای حاصل از احتراق

برای ایجاد جرقه، طبق شکل ۱۱، در مرکز محفظه از شمع استفاده شده است. این شمع به سیم‌پیچ جرقه متصل می‌شود. همچنین، بر روی محفظه حسگر فشار نصب شده است که قابلیت اندازه‌گیری فشار ۱۰ بار را داراست. حسگر فشار مورد استفاده برای ثبت فشار حاصل از احتراق ساخت کشور آلمان و شرکت Wika است و دقت آن در محدوده اندازه‌گیری در مقیاس نامی برابر با $\pm 0.25\%$ است. فشار حاصل از احتراق از طریق ثبت‌کننده اطلاعات^۱ وارد نرم‌افزار موجود در رایانه می‌شود.

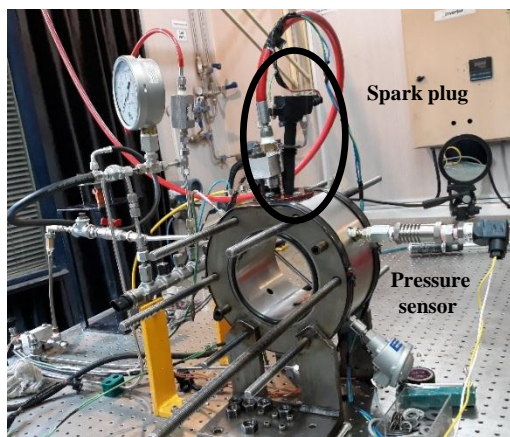


Figure 11- a) Spark array mounted on the chamber, b) Spark plug and plug
شکل ۱۱- الف) سیم‌پیچ جرقه سوار شده بر روی محفظه و ب) سیم‌پیچ جرقه و شمع مورد استفاده

1. Data Lager

واحد مدیریت الکترونیکی، که شامل سه قسمت ورودی، خروجی و درگاه‌های ارتباطی است، فرمان‌های لازم برای سیم‌پیچ جرعه و افشانه‌ها (پاشش گاز متان) را می‌فرستد. برای اعمال فرمان پاشش و جرعه بین رایانه و واحد مدیریت الکترونیکی از یک نرم‌افزار واسطه استفاده می‌شود. این نرم‌افزار شامل سه قسمت متغیرها، ثابت‌ها و نمودار است. تنظیم عواملی از قبیل مدت زمان پاشش، زمان پرکردن سیم‌پیچ جرعه و نیز ثبت داده‌های فشار در رایانه با این نرم‌افزار است. پس از پاشش گرد زغال و گاز متان به داخل محفظه و همگن شدن این مخلوط، جرعه زده شده و بعد از تشکیل شرایط لازم برای احتراق، احتراق انجام شده و فشار و دمای حاصل از احتراق ثبت می‌شود. فشار محفظه احتراق، بعد از شروع احتراق، در مدت زمان مشخصی افزایش می‌یابد تا به نقطه بیشینه خود برسد و در اثر انتقال حرارت با دیواره، روند نزولی درپیش می‌گیرد. شکل ۱۲ روند فرایند انفجار گردوغبار زغال‌سنگ را در فاصله زمانی ۳۰ میلی‌ثانیه از شروع احتراق تا لحظه رسیدن به بیشترین فشار انفجار نشان می‌دهد.

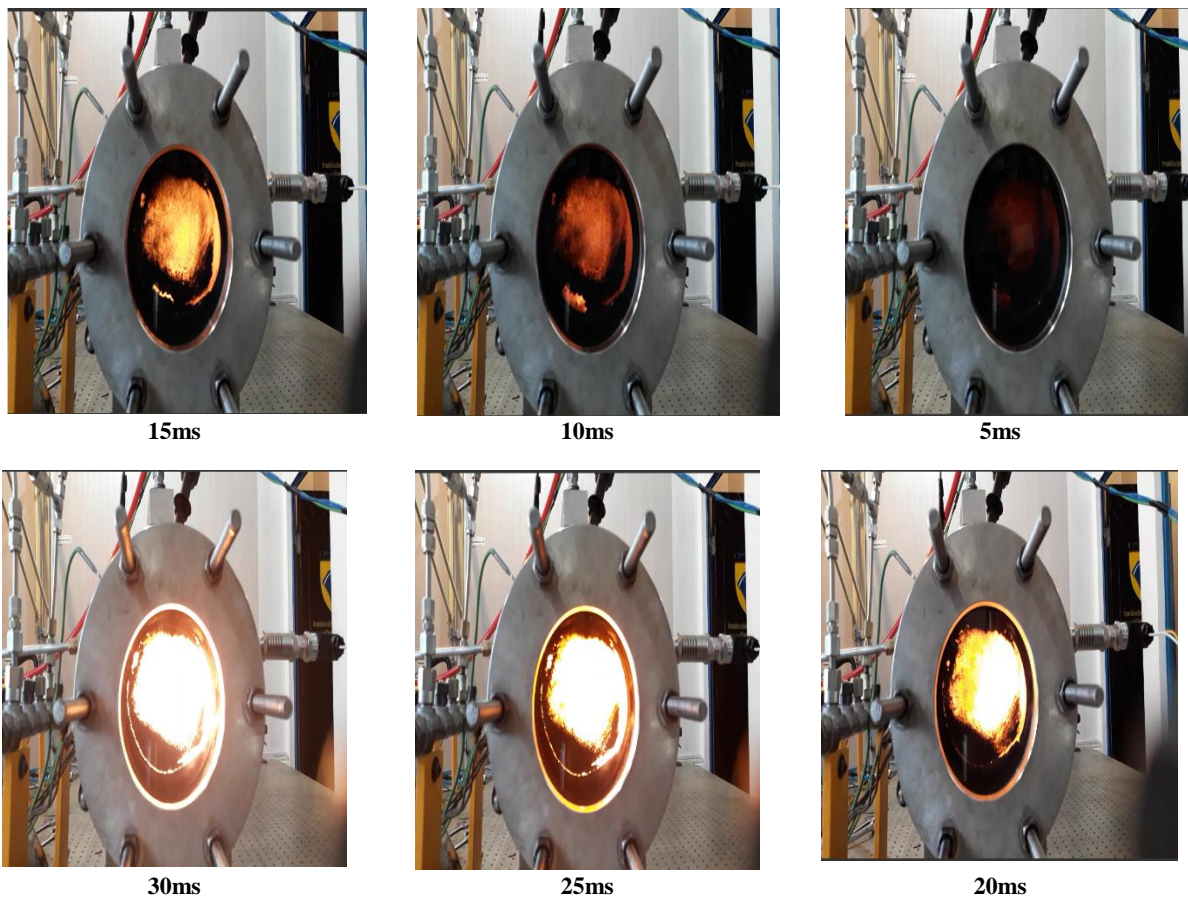


Figure 12- Combustion cycle of coal in a combustion chamber
 شکل ۱۲- روند فرایند انفجار گرد زغال‌سنگ در محفظه احتراق

هرچه ذرات گرد زغال‌سنگ ریزتر باشند، فشار انفجار بالاتر بوده و شدت پخش کروی شعله بیشتر است، زیرا مهم‌ترین عامل در احتراق و انتشار شعله کروی حاصل از احتراق همگن بودن مخلوط مورد نظر است. هرچه اندازه ذرات ریزتر باشد، ذرات گرد زغال با متان و هوا تشکیل مخلوط همگن‌تری را می‌دهد. زیرا، با افزایش اندازه ذرات گرد زغال‌سنگ، ذرات گرد زغال در کف محفظه ته‌نشین می‌شوند و مخلوط در مرکز محفظه از حالت همگنی خارج می‌شود و حالت کروی انتشار شعله کاهش می‌یابد.

تمامی این آزمایش‌ها در یک غلظت مشخص (۷۸۹۴ گرم بر متر مکعب) انجام شده است. در این تحقیق، برای ارزیابی خطای آزمون‌ها و برای کنترل دقت نمونه‌های مورد آنالیز، نمونه تکراری انتخاب شده و در همان شرایط آماده‌سازی می‌شود و در نهایت، با مقایسه تکرارپذیری نتایج با استفاده از روابط آماری، می‌توان دقت آنالیز را ارزیابی کرد. در جدول ۶، به‌عنوان نمونه، برای دستیابی به صحت آزمون‌ها، دو اندازه از هر نمونه مورد آزمایش سه مرتبه در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گرفته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده در هر سه بار تکرار آزمون در شرایط یکسان تغییرات پارامترهای انفجاری تقریباً مشابه حالت اول بوده است و اختلاف جزئی دارند که قابل چشم‌پوشی است. لذا، می‌توان ادعا کرد که نتایج از اعتبار خوبی برخوردارند.

جدول ۶- نتایج حاصل از تکرارپذیری آزمون‌ها در تغییر پارامترهای شدت انفجار برحسب اندازه ذرات برای سه نمونه مورد آزمایش
Table 6- Results of Repeatability of Tests in Changing Parameter of Explosion Intensity by Particle Size for All Three Examples

Sample number	Particle size (μm)	Explosive parameters								
		P _{max}			(dp/dt) _{max}			K _{ST}		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	105	2.03	2.45	2.5	64.5	64.31	64.82	8.3	8.27	8.34
	74	2.04	2.55	2.6	66.54	67.83	68.04	8.56	8.72	8.75
2	105	3.08	3.12	3.06	309.5	310.43	311.05	39.81	39.93	40.01
	74	3.7	4	3.5	319.43	320.4	320.97	41.09	41.21	41.29
3	105	3.63	3.84	4.02	638.12	639.42	639.83	82.08	82.25	82.30
	74	4.67	4.45	4.75	748.86	748.32	749.65	96.32	96.25	96.43

شکل ۱۳ تغییرات فشار داخل محفظه را برای سه آزمایش در شرایط یکسان و نمونه یکسان نشان می‌دهد. مقدار فشار انفجار در شکل ۱۳ از میانگین مقادیر فشار اندازه‌گیری شده برای سه تکرار آزمون حاصل می‌شود. تکرار آزمایش‌ها دقت ابزار، دقت سیستم اختلاط و دقت سیستم احتراق را ثابت می‌کند.

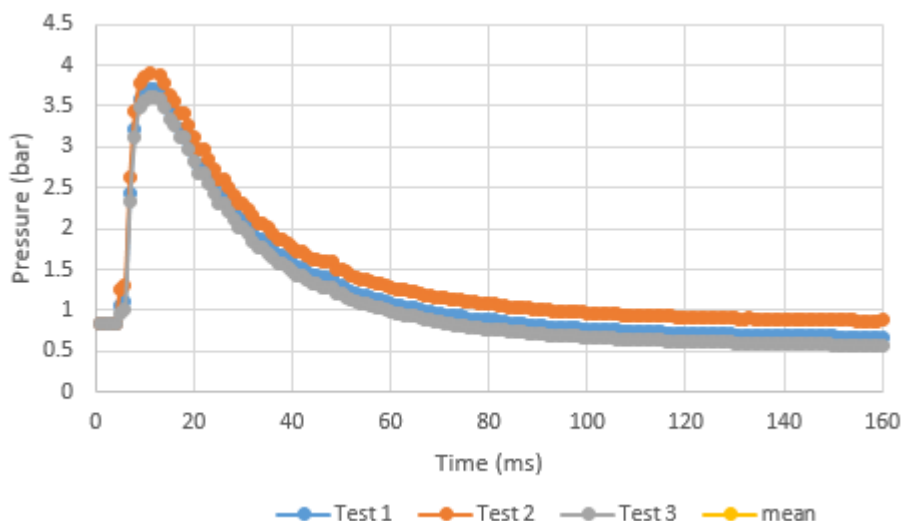


Figure 13- Measured pressure over time in three replicates of test in chamber
شکل ۱۳- فشار اندازه‌گیری شده نسبت به زمان در سه تکرار آزمون در محفظه

برای اطمینان از صحت کارکرد مجموعه آزمایشگاهی و همچنین بهترین حالت عکس‌برداری، آزمایش‌ها، برای هر حالت، حداقل سه دفعه تکرار شده‌اند که میانگین تغییرات پارامترهای انفجاری در هر سه حالت در جدول ۷ آورده شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، با کاهش ابعاد ذرات گرد زغال‌سنگ، شدت انفجار افزایش یافته است. ذکر این نکته لازم است که بعد از انجام هر حالت آزمایش، داخل محفظه با دقت بسیار تمیز شده و در صورت نیاز شست‌وشو داده شده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از احتراق نمونه گرد زغال‌های مورد آزمایش

Table 7- The results of the combustion of a sample of coal dust tested

Sample number	Explosive parameters	Particle size (μm)							
		149	125	105	74	63	53	44	37
1	P_{max} (bar)	2.02	2.06	2.3	2.4	2.45	3.03	3.16	-
	$(dp/dt)_{\text{max}}$ (bar/s)	47	39.11	64.78	67.88	125.69	168.56	178.86	-
2	P_{max} (bar)	2.4	2.5	3.09	3.7	4	4.4	4.65	-
	$(dp/dt)_{\text{max}}$ (bar/s)	320.98	348.25	310.26	320.98	649.82	715.83	1418.13	-
3	P_{max} (bar)	3.74	3.83	3.9	4.5	5.75	6.12	5.3	5.33
	$(dp/dt)_{\text{max}}$ (bar/s)	432.81	526.25	639.38	749.81	1347.18	1501.45	1850.93	1511.25

تحلیل نتایج حاصل از آزمون احتراق گرد زغال

نتایج حاصل از آزمون‌های انجام‌شده را می‌توان در نمودارهای الف و ب شکل ۱۴ به‌صراحت نشان داد.

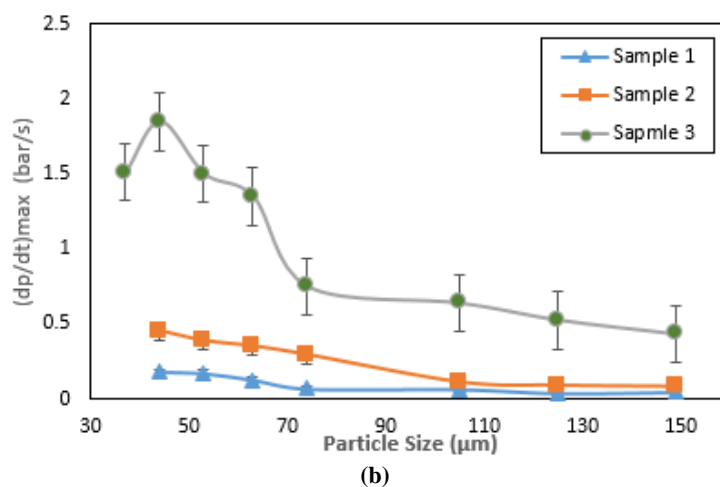
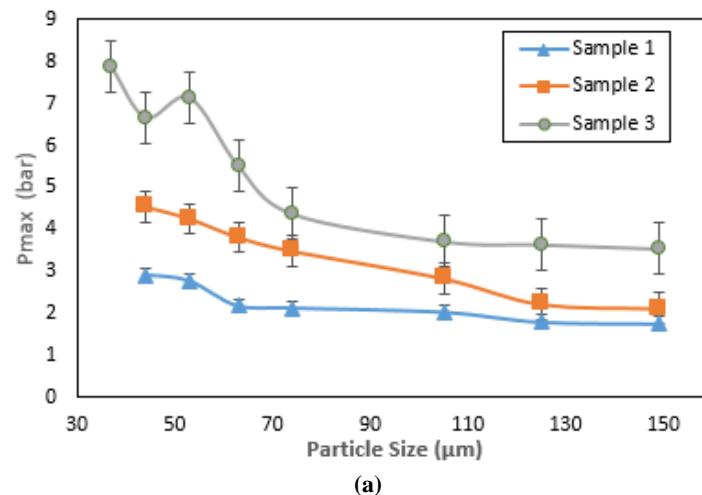


Figure 14- a) Variation of P_{max} of coal dust cloud with particle size, b) Variation of $(dp/dt)_{\text{max}}$ of coal dust cloud with particle size
 شکل ۱۴- الف) تغییرات حداکثر فشار انفجار با اندازه ذرات گرد زغال و ب) تغییرات حداکثر نرخ افزایش فشار با اندازه ذرات گرد زغال

همان طور که در نمودارهای شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، حداکثر فشار انفجار و حداکثر نرخ افزایش فشار، با افزایش اندازه ذرات، کاهش می‌یابد، زیرا اشتعال‌پذیری و فعالیت‌های شیمیایی گرد زغال مربوط به اندازه ذرات است. افزایش اندازه ذرات باعث کاهش سطح مخصوص ذرات می‌شود. این بدان معنی است که سطح مؤثر گرما و واکنش ذرات کاهش می‌یابد. همچنین، در منحنی‌های ارائه شده، منحنی شماره ۳ نسبت به دو منحنی دیگر فشار انفجاری بالاتری دارد که این مورد به مشخصات ذاتی گرد زغال سنگ (رطوبت محتوی، خاکستر محتوی، مواد فرار و کربن ثابت) مربوط می‌شود. هرچه رطوبت و میزان خاکستر نمونه گرد زغال کمتر باشد، قابلیت انفجار نمونه بیشتر خواهد بود.

با داشتن مقادیر حداکثر نرخ افزایش فشار و رابطه (۱)، می‌توان یک شاخص انفجاری برای ارزیابی قابلیت انفجار گرد زغال سنگ به دست آورد که در جدول ۸ و شکل ۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۸- شاخص انفجاری تخمین زده شده نمونه گرد زغال‌های مورد آزمایش

Table 8- Estimated Explosive Index of Coal dust

Sample number	Explosion index	Particle size (μm)							
		149	125	105	74	63	53	44	37
1	K_{St1}	6.045	5.03	8.33	8.73	16.16	21.68	23	-
2	K_{St2}	10.42	11.44	14.18	37.56	45	49.63	58.07	-
3	K_{St3}	55.67	67.69	82.28	96.45	173.29	193.13	238.08	194.39

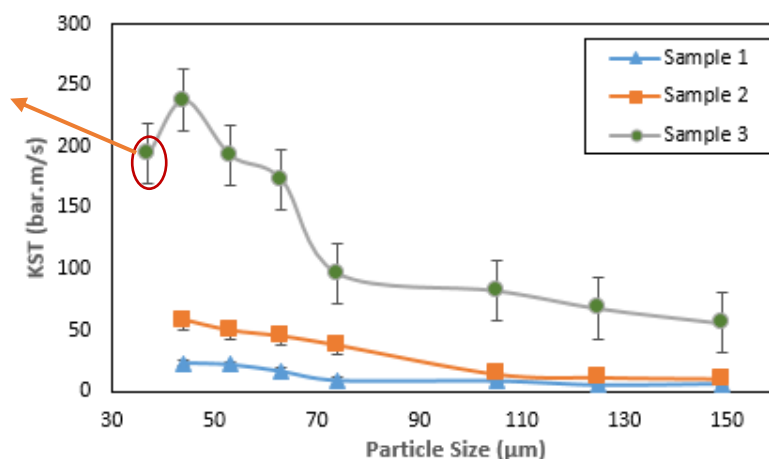


Figure 15- Explosive Indicator Changes (KST) with Particle Size of coal dust

شکل ۱۵- تغییرات شاخص انفجاری (K_{St}) با اندازه ذرات گرد زغال سنگ

طبق نتایج به دست آمده، با افزایش اندازه ذرات، شاخص انفجاری کاهش می‌یابد. لذا، نمونه گرد زغال‌هایی که اندازه‌های درشت‌تری دارند خطر انفجار کمتری دارند. در نمودار نمونه ۳ معدن پروده با اندازه ۴۴ میکرومتر بالاترین شاخص انفجار را داراست. از طرف دیگر، در اندازه ۳۷ میکرومتر، نسبت به اندازه ۴۴ میکرومتر، شاخص انفجاری کاهش یافته است. در این حالت، وقتی اندازه ذرات از حد معینی کوچک‌تر می‌شوند، به دلیل افزایش خاصیت چسبندگی، به هم می‌چسبند و تبدیل به ذرات درشت‌تری می‌شوند و شاخص انفجار کاهش می‌یابد. به همین دلیل، در نمودار نمونه ۳ منحنی حاوی یک بیشینه است. در شکل ۱۶ شاخص انفجاری نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، بیشترین شاخص انفجاری مربوط به نمونه معدن پروده و کمترین شاخص انفجاری مربوط به معدن قشلاق است. بنابراین، نمونه زغال سنگ‌های معدن پروده قابلیت انفجاری بالاتری نسبت به نمونه زغال سنگ‌های معدن طزره و قشلاق دارند.

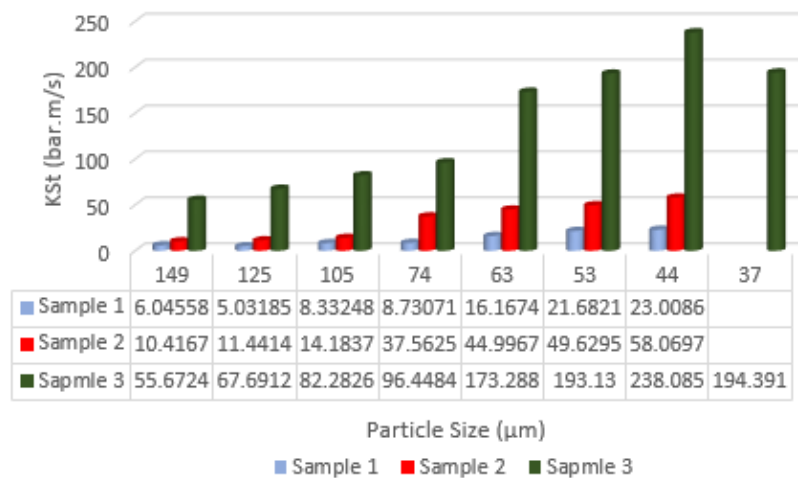


Figure 16- Comparison of the explosive indices obtained from the mines examined
 شکل ۱۶- مقایسه شاخص های انفجاری به دست آمده معادن مورد بررسی

نتیجه گیری

در حوادث معادن زغال سنگ، انفجارهای گرد زغال و متان در سال های اخیر باعث اثرات فاجعه باری شده است. معمولاً انفجار متان با گرد زغال همراه است که اثرات مخرب آن بدتر است. در این مطالعه، اثر ابعاد ذرات گرد زغال سنگ بر شدت انفجار در سه معدن زغال سنگ پرورده، طزره و قشلاق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی به شرح ذیل است:

۱- ذرات گرد زغال کوچکتر از ۷۰ میکرون که معمولاً طی عملیات استخراج تولید می شوند بیشتر مستعد انفجارند و فشار انفجار بالاتری تولید می کنند، زیرا اکسیژن بیشتری به سطح ویژه این ذرات وارد می شود در نتیجه قابلیت انفجار بالاتری دارند.

۲- شاخص ارزیابی انفجار گرد زغال سنگ، با افزایش ابعاد ذرات گرد زغال سنگ، کاهش می یابد. بنابراین، طبق نتایج به دست آمده، نمونه گرد زغال های معدن قشلاق با ابعاد بیشتر از ۶۰ میکرومتر قابل انفجار نیستند. از طرف دیگر، نمونه گرد زغال های معدن پرورده قابلیت انفجاری بالایی دارند.

۳- اگر ابعاد گرد زغال سنگ از حد معینی ریزتر شود، ذرات گردوغبار زغال سنگ، به دلیل افزایش خاصیت چسبندگی، به هم می چسبند و تبدیل به ذرات درشت تری می شوند. از این رو نمونه ۳۷ میکرومتر معدن پرورده نسبت به نمونه ۴۴ میکرومتری شاخص انفجاری پایین تری دارد.

تشکر و قدردانی

در پایان این تحقیق از شرکت ایران خودرو و آزمایشگاه تحقیقات موتور (ایپکو) که در انجام این تحقیق نویسندگان را یاری نموده اند تقدیر و تشکر شود.

منابع

1. S. Shi, B. Jiang and X. Meng, "Assessment of gas and dust explosion in coal mines by means of fuzzy fault tree analysis," *International Journal of Mining Science and Technology*, 28, 2018, pp. 991-998.
2. M. Mittal, "Study of explosibility data of coal dust for designing explosion safety measures," *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 34, 2013, pp. 82-91.

3. S. Hong, Z. Liu, E. Zhao, S. Lin, S. Qiu, J. Qian, H. Liu and S. Xia, "Comparison of behavior and microscopic characteristics of first and secondary explosions of coal dust," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 2017, pp. 382-394.
4. C. W. Kauffman, "Agricultural dust explosions in grain handling facilities. In: Fuel-air explosions," *Proceedings of the International Conference on Fuel-Air Explosions held at McGill University*, Montreal, Canada, pp. 305-47, 1981.
5. R. Eckhoff, *Dust Explosions in the Process Industries*, Third ed. Gulf Professional Publishing, Elsevier, New York, 2003.
6. R. A. Ogle, S. E. Dillon and M. Fecke, "Explosion from a smoldering silo fire," *process safety and environmental protection*, 33, 2014, pp. 94-103.
7. Q. Li, C. Yuan, Q. Tao, Y. Zheng and Y. Zhao, "Experimental analysis on post-explosion residues for evaluating coal dust explosion severity and flame propagation behaviors," *Fuel*, 215, 2018, pp. 417-428.
8. X. Wang, Y. Zhang, B. Liu, P. Liang and Y. Zhang, "Effectiveness and mechanism of carbamide/fly ash cenosphere with bilayer spherical shell structure as explosion suppressant of coal dust," *Journal of Hazardous Materials*, 365, 2019, pp. 555-564.
9. D. Wu, M. Schmidt and J. Berghmans, "Spontaneous ignition behaviour of coal dust accumulations: A comparison of extrapolation methods from lab-scale to industrial-scale," *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 2018, pp. 4181-4191.
10. M. J. Ajrash, J. Zanganeh and B. Moghtaderi, "The effects of coal dust concentrations and particle sizes on the minimum auto-ignition temperature of a coal dust cloud," *Fire and Materials*, 41, 2017, pp. 908-915.
11. X. Zhang, J. Yu, W. Gao, D. Zhang, J. Sun, S. Guo and R. Dobashi, "Effects of Particle Size Distributions on PMMA Dust Flame Propagation Behaviors," *Powder Technology*, 37, 2017, pp. 197-208.
12. I. A. Zlochower, M. J. Sapko, I. N. Perera, C. B. Brown, M. L. Harris and N. S. Rayyan, "Influence of specific surface area on coal dust explosibility using the 20-L chamber," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 2018, pp. 103-109.
13. A. Tascon, "Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility," *Powder Technology*, 338, 2018, pp. 438-445.
14. D. P. Mishra and S. Azam, "Experimental investigation on effects of particle size, dust concentration and dust-dispersion-air pressure on minimum ignition temperature and combustion process of coal dust clouds in a G-G furnace," *Fuel*, 227, 2018, pp. 424-433.
15. S. Azam and D. P. Mishra, "Effects of particle size, dust concentration and dust-dispersion-air pressure on rock dust inertant requirement for coal dust explosion suppression in underground coal mines," *process safety and environmental protection*, 126, 2019, pp. 35-43.
16. B. Gan, B. Li, H. Jiang, D. Zhang, M. Bi and W. Gao, "Ethylene/polyethylene hybrid explosions: Part 2. effects of polyethylene particle size distribution on flame propagations," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55, 2018, pp. 134-143.
17. J. Jiang, Y. Liu, C. Mashuga and S. Manna, "Validation of a new formula for predicting the lower flammability limit of hybrid mixtures," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 2015, pp. 52-58.
18. J. Jiang, Y. Liu and S. Mannan, "A correlation of the lower flammability limit for hybrid mixtures," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 2014, pp. 120-126.
19. R. Sanchirico, A. Di Benedetto, A. Garcia- Agreda and P. Russo, "Study of the severity of hybrid mixture explosions and comparison to pure dust-air and vapour- air explosions," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 2011, pp. 648-655.
20. R. Prugh, "The relationship between flash point and LFL with application to hybrid mixtures," *process safety progress*, 27, 2008, pp. 156-163.
21. K. Chatrathi, "Dust and hybrid explosibility in a 1m³ spherical chamber," *process safety progress*, 13, 1994, pp. 327-340.
22. J. G. Torrent, N. F. Anez, L. M. Pejic, A. B. Montes and J. M. Escobar, "Ignition and explosion parameters of Colombian coals," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, 2016, pp. 706-713.
23. R. Eades, K. Perry, C. Johnson and J. Miller, "Evaluation of the 20 L dust explosibility testing chamber and comparison to a modified 38 L vessel for underground coal," *International Journal of Mining Science and Technology*, 28, 2018, pp. 885-890.
24. S. H. Liu, Y. F. Cheng, X. R. Meng, H. H. Ma, S. X. Song, W. J. Liu and Z. W. Shen, "Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56, 2018, pp. 444-450.
25. T. Abbasi and S. A. Abbasi, "Dust explosions—Cases, causes, consequences, and control," *Journal of Hazardous Materials*, 140, 2017, pp. 7-44.
26. Standard test method for explosibility of dust clouds, ASTM: 2012; E1226-12a.
27. M. J Moran, D. D. Shapiro and M. B Boettner, *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics*, Cabral, S. 7th (ed.), Ideal Gas Mixture and Psychrometric Applications, Wiley Publ. Co., 2010.

English Abstract

Laboratory study of the effect of coal dust in a blend of coal and methane

Hadis moradi¹, Farhang Sereshki^{2*}, Mohammad Ataei³ and Mohsen Nazari⁴

1- Ph.D. Student of in Mining Engineering, Shahrood University of Technology, Iran, h.moradiphd2017@gmail.com

2- Professor, PhD in Mining Engineering, Shahrood University of Technology, Iran, Farhang@shahroodut.ac.ir

3- Professor, PhD in Mining Engineering, Shahrood University of Technology, Iran, ataei@shahroodut.ac.ir

4- Associate Professor, PhD in Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Iran, m_nazari@yahoo.com

*Corresponding author

(Received: 2019.09.07, Received in revised form: 2019.10.11, Accepted: 2019.10.15)

In this study, the effect of coal dust particle size on the intensity of coal dust explosion was investigated using an explosion test in a 2-liter chamber. Samples of coal have been collected from various coal mines in the country and they are used for coal dust preparation. To determine the index of explosion capability (K_{ST}), the distribution of the explosion intensity of each sample should be evaluated by measuring the maximum pressure (P_{max}) and the maximum explosion pressure rise rate (dp/dt_{max}) in different experiments. Coal dust particles at constant concentrations and different sizes (149 μ m, 125 μ m, 105 μ m, 74 μ m, 63 μ m, 53 μ m, 44 μ m, 37 μ m) were evaluated. The results of the sieving analysis show that almost all samples of the prepared coal dust have a minimum optimum explosive concentration (250 g/m³). In this analysis, all tests were carried out at 1.5 bar and the initial temperature was 25 °C. According to the results, coal dust particles with dimensions of 44 and 37 microns have higher explosive index than other dimensions. Therefore, both parameters of maximum explosion pressure (P_{max}) and the maximum explosion pressure rise rate (dp/dt_{max}) show an increasing trend with decreasing particle size. Also an increasing concentration of coal dust shows an increasing trend at the first and then a decrease in the intensity of the explosion. The presence of small coal particles increases the effective level, thus increasing the explosion rate and the rate of instability, which accelerates the process of coal dust explosion. Therefore, according to the results obtained in the process of checking coal dust explosion, in addition to the inherent characteristics of coal dust, particle size coal dust should also be taken into account. The results obtained in this mechanism are useful not only in the research and development of knowledge of coal dust blasting processes, but also in taking the necessary measures to prevent the explosion of coal dust in coal mines.

Keywords: coal dust, combustion chamber, explosion index, particle size distribution, explosive parameters.