تحقیقات بتن
سال یازدهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۹۷
ص ۱۳۱ – ۱۲۳
تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۲۲
تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۲

یادداشت پژوهشی

بررسی رابطه بین انرژی لازم برای خردایش مواد معدنی و ویژگی‌های فیزکی و مکانیکی سنگ در کارخانه سیمان ارومیه

عطاالله بهرامی *
استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه
حسن مومیوند
دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه
فاطمه کاظمی
کارشناس ارشد مهندسی استخراج معدن
ابوصالح دهقانی
کارشناس مهندسی معدن
مهدی موتاب
کارشناس‌ارشد گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه

چکیده

اندیس کار باند مهمترین پارامتر تعیین‌کننده میزان انرژی مصرفی و بررسی کارایی مدار آسیاکنی است. در این تحقیق اندیس کار مواد معدنی خوراک کارخانه سیمان ارومیه با استفاده از روش استاندارد باند تعیین شده است. مقدار اندیس کار باند برای نمونه‌های سنگ آهن، آهک کم عیار، آهک پرعیار و پوزولان بترتیب ۱٤/۷۵، ۱۱/٦۱، ۱۱/۸۷ و ۱۰/۸۰ کیلووات ساعت بر تن محاسبه شد. به منظور بررسی رابطه بین اندیس کار باند و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ انجام گرفت. بین اندیس کار باند و تخلخل نمونه‌های موجود یک رابطه معکوس (R^2=۰/۷۲۵۳) برقرار است، اما با افزایش چگالی با یک رابطه لگاریتمی افزایش پیدا می‌کند. همچنین اندیس کار باند با افزایش ویژگی‌های مکانیکی سنگ نظیر مقاومت فشاری، کششی و ضریب ارتجاعی بصورت تابع لگاریتمی با همبستگی خوبی (R^2=۰/۸۰) افزایش می‌یابد. براساس نتایج، اندیس کار باند همبستگی بسیار بالایی (حدود ۰/۹۳) با مقاومت‌های کششی و فشاری یک محوری نسبت به سایر ویژگی‌های سنگ دارد. با استفاده از نتایج و روابط بدست آمده می‌توان اندیس کار باند مواد معدنی خوراک کارخانه سیمان ارومیه را با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برآورد نمود.

واژه‌های کلیدی: **اندیس کار باند، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، سنگ آهن، سنگ آهک، پوزولان.**

* نویسنده مسئول: a.bahrami@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

مواد اولیه تولید سیمان پس از استخراج از معدن و فرایند سنگ-شکنی، تحت عملیات خردایش با استفاده از آسیاها قرار می‌گیرند. خردایش با استفاده از آسیا در کارخانه‌های سیمان، شامل دو مرحله آسیای اولیه مواد خام و آسیای مواد پخته شده یا کلینکر است. بیش از ۷۰ درصد از انرژی مورد نیاز در کارخانه‌های سیمان صرف فرایندهای خردایش توسط آسیاها می‌شود. به منظور کاهش هزینه-ها و مصرف انرژی در این بخش مطالعات مختلفی بر روی خردایش مواد و آسیاها صورت گرفته است [۱].

تحقیقات متعددی در رابطه با دانه‌بندی مواد معدنی و رابطه آن با کارایی عملیات سنگ‌شکنی و آسیاکنی انجام گرفته است. قدیمی‌ترین آنها تئوری مربوط به ریتنگر[1] است که برای ذرات با محدوده دانه‌بندی ۱۰۰۰-۱۰ میکرون پیشنهاد شده است، سپس کیک[2] آن را برای محدوده سنگ‌شکنی با اندازه ذرات بزرگتر از ۱ سانتیمتر ارائه نمود. در نهایت تئوری باند که مناسب‌ترین روش برای آسیاهای میله‌ای و گلوله‌ای است، ارائه شد [۲]. استفاده از اندیس کار باند[3] رایج‌ترین شیوه برای انتخاب و بررسی کارایی آسیاها است. آزمون اندیس کار باند آسیای گلوله‌ای در سال ۱۹۵۲ توسط باند ارائه و در سال ۱۹۶۱ اصلاح شد. در این روش، نتایج آزمایش‌های آسیای آزمایشگاهی برای پیش‌بینی مصرف انرژی در مقیاس صنعتی بکار می‌رود [۳].

تمامی روابط ارائه شده توسط این محققین از یک معادله واحد به شکل رابطه ۱، پیروی می‌کنند: (۱)

$$dE = -C\frac{dx}{x^n} \qquad (۱)$$

که E انرژی ویژه موردنیاز خردایش، x شاخص توزیع دانه‌بندی ذرات (P_{80})، n مرتبه فرایند و C ثابت مربوط به ویژگی‌های ماده معدنی است.

اگر توان معادله ۱، به ترتیب دارای مقادیر ۲، ۱/۵ و ۱ بوده و سپس از معادله انتگرال‌گیری شود، به ترتیب روابط پیشنهادی توسط رتینگر (معادله ۲)، باند (معادله ۳) و کیک (معادله ۴) حاصل خواهد شد.

$$E_{1-2} = C\left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1}\right) \qquad (۲)$$

$$E_{1-2} = C\left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}}\right) \qquad (۳)$$

$$E_{1-2} = C(Ln(x_1) - Ln(x_2)) \qquad (۴)$$

در روابط ۲ تا ۴، E_{1-2} انرژی خالص (ویژه) موردنیاز برای کاهش اندازه ذرات از ۱ به ۲ و x_1 و x_2 به ترتیب اندازه اولیه (خوراک) و اندازه نهایی (محصول) ذره هستند.

تحقیقات متعددی سعی بر نشان دادن رابطه بین اندیس کار باند و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها داشته‌اند. نیتا[4] و همکاران (۲۰۰۲) رابطه‌ای بین BWI[5] و ثابت کنتیک دانه‌بندی آسیای کوچک مقیاس، با استفاده از ۲۲ نمونه سنگ آهن ارائه کرده‌اند [۴]. مورل[6] (۲۰۰۴) سعی کرده است رابطه باند را بصورت تابعی اندازه ذرات تعریف کند [۵]. جنت[7] و همکاران (۲۰۱۲) طی تحقیقی به بررسی رابطه بین سختی ویکرز[8] کانی‌های شکننده با اندیس کار باند پرداختند. نتایج منجر به ارائه یک رابطه ریاضی با همبستگی بالا بین ذرات آزاد مونوکریستال و BWI شد [۶]. حافظ[9] (۲۰۱۲) یک رابطه بین BWI و ویژگی‌های مکانیکی سنگ ارائه کرد [۷]. احمدی و همکاران (۲۰۱۳) روشی را برای مشخص کردن BWI براساس مدل کنتیکی ذرات ارائه کردند که در مقایسه با سایر روش‌ها به زمان کمتری نیاز دارد [۸]. چاندار[10] و همکاران (۲۰۱۶) با توجه به زمان‌بر بودن فرایند محاسبه اندیس کار باند و همچنین لزوم وجود کارشناسان خبره و وسایل آزمایشگاهی تخصصی در این روش، به ارائه روشی برای محاسبه اندیس کار باند با استفاده از ویژگی‌های ساده و قابل اندازه‌گیری سنگ پرداختند. آنها آزمایش‌های خود را در مقیاس آزمایشگاهی و با اندازه‌گیری ویژگی‌هایی مانند دانسیته، مقاومت فشاری و سختی ویکرز انجام دادند و نتایج را با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون‌گیری و روابط ریاضی، برای محاسبه اندیس کار باند آنالیز نمودند [۹]. با وجود تحقیقات گسترده انجام گرفته در این زمینه، روش باند اکنون نیز بصورت گسترده‌ای برای

[1] Von Rittinger
[2] Kick's
[3] Bond Work Index (BWI)
[4] Nitta
[5] Bond Work Index (BWI)
[6] Morrell
[7] Gent
[8] Vickers
[9] Haffez
[10] Chandar

محاسبه انرژی مورد نیاز آسیاهای گلوله‌ای و میله‌ای در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰].

در این تحقیق، با تهیه نمونه‌هایی از مواد معدنی خوراک کارخانه سیمان ارومیه شامل سنگ آهن، آهک کم عیار و پرعیار و همچنین نمونه پوزولان سعی بر تعیین اندیس کار باند این مواد و ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شده است. بدین منظور ابتدا بر روی نمونه‌ها آزمایش استاندارد تعیین اندیس کار باند انجام گرفت. سپس آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگی شامل چگالی، تخلخل، مقاومت فشاری یک محوره، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی صورت گرفته است. در نهایت رابطه بین اندیس کار باند و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با تعیین خواص مکانیکی مواد معدنی مورد نیاز کارخانه سیمان، می‌توان اندیس کار باند آنها را (در مدت زمان کوتاه‌تر و هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر) تخمین و بدین طریق از میان معادن و گزینه‌های موجود نمونه با میزان اندیس باند کمتر را انتخاب نمود. با توجه به اینکه صنعت تولید سیمان بعنوان یکی از زیربخش‌های مهم صنایع غیرفلزی، به شدت به انرژی وابسته بوده و مصرف‌کننده بیش از ۸/۵ درصد از کل انرژی مصرفی در بخش صنایع غیرفلزی است [۱۳-۱۱]، و همچنین با توجه به هزینه‌های چشمگیر تولید انرژی، انتخاب مواد اولیه با اندیس کار باند (خردایش) و ویژگی‌های مکانیکی پایین‌تر (از میان گزینه‌های موجود) از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر خواهد بود.

۲- روش تحقیق

آزمایش استاندارد تعیین اندیس کار باند دقیق‌ترین روش تعیین قابلیت خردایش مواد معدنی است. برای انجام این آزمایش نمونه موجود با استفاده از سری سرندهای انتخابی برای انجام عملیات دانه‌بندی (ابعاد ۶۵ تا ۱۰۰ مش، P_1) مورد آنالیز سرندی قرار می‌گیرد. برای شروع آزمایش، یک بخش از نمونه به حجم ۲۰۷ سانتیمتر مکعب بعنوان بار ورودی به آسیا، برداشته می‌شود (A). در اولین مرحله، پس از چندین دور گردش آسیا، محصول تولیدی آن با استفاده از سرند انتخاب شده (P_1) آنالیز می‌گردد. بخش باقیمانده روی سرند مجددا به آسیا برگردانده و مقدار بار اولیه مجددا به وزن اولیه A رسانده می‌شود. بر مبنای این مرحله از آزمایش وزن مقدار ماده‌ای که به ازای هر دور گردش آسیا به ابعاد کوچکتر از سرند P_1 خرد شده است تعیین می‌گردد (G_i)، و بر مبنای آن تعداد دور لازم برای مرحله بعد به منظور دستیابی به بار در گردش معادل ۲۵۰٪ (نسبت وزن بخش باقیمانده روی سرند به وزن اضافه شده از سنگ اولیه برای رسیدن به وزن اولیه A) محاسبه می‌شود. مقدار بار در گردش معادل تولید محصولی است که وزن بخش عبور کرده از سرند P_1 در آن به وزن اولیه (A)، $\frac{۱}{۳.۵}$ است. آزمایش تا زمانی که شرایط تعادل آسیا برقرار گردد ادامه می‌یابد (۸-۶ دور).

با تعیین میانگین G_i و همچنین دانه‌بندی مجموع محصولات بدست آمده از سه آزمایش آخر و بدست آوردن دهانه سرندی که ۸۰٪ محصول از آن عبور می‌کند (P) و نیز پارامتر F از بار اولیه، اندیس کار باند به شرح زیر تعیین می‌شود:

$$W_i = \frac{44.5}{(P_1)^{0.23} \times (G_i)^{0.82}} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)^{-1} \quad (۵)$$

P_1 سرند انتخاب شده برای انجام عملیات طبقه بندی، P دهانه سرندی که ۸۰٪ مواد آسیا شده از آن عبور می‌کنند، G_i میانگین وزن مقدار سنگی که به ازای هر دور گردش آسیا به ابعاد کوچکتر از سرند P_1 خرد شده است و F دهانه سرندی است که ۸۰ درصد مواد قبل از ورود به آسیا از آن عبور می‌کنند [۱۴].

همانگونه که مشخص است، فرایند آزمایش تعیین اندیس کار به روش باند، زمان‌بر است. بعلاوه حجم نمونه مورد نیاز برای هر آزمایش، زیاد بوده و آزمایش باید صرفا توسط آسیایی با مشخصات تعیین شده توسط باند انجام شود، که این تجهیزات در هر آزمایشگاهی موجود نیست. با مشخص کردن ویژگی‌های ساده و قابل اندازه‌گیری سنگ (ویژگی‌های فیزیکی و مکانیک سنگی) و تعیین رابطه بین آنها با اندیس کار باند، می‌توان اندیس کار باند را با صرف زمان و هزینه کمتر به عنوان تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیک سنگی برآورد نمود.

۳- آزمایش‌های تعیین رابطه اندیس کار باند و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ

کارخانه سیمان رشکان شهرستان ارومیه، در مجاورت روستای رشکان واقع در کیلومتر ۳۵ جاده ارومیه – مهاباد واقع شده است.

مواد معدنی مورد نیاز این واحد صنعتی برای تولید سیمان شامل سنگ آهک، سیلیس، سنگ گچ، پوزولان و سنگ آهن، از معادن استان آذربایجان غربی و استان‌های همجوار تهیه می‌کند. مواد معدنی ورودی به این کارخانه پس از انجام فرایند خردایش اولیه با استفاده از سنگ‌شکن، به منظور همگن‌سازی به انبارهای دپو منتقل می‌شوند.پس از یکنواخت شدن، خوراک به سمت سیلوها (برای کنترل مواد ورودی به آسیا) هدایت می‌شوند. در این واحد صنعتی از دو فاز آسیاکنی شامل آسیای گلوله‌ای (فاز اول) و آسیای غلتکی (فاز دوم) استفاده می‌شود. محصول فرایندهای آسیاکنی به سیلوی هموژن و سپس پیش‌گرم‌کن، منتقل می‌شوند. در نهایت پس از پخت مواد اولیه تهیه سیمان در کوره و سرد شده کلینکر حاصل، فرایند خردایش در آسیا صورت گرفته و سیمان تولیدی به واحد بسته‌بندی منتقل می‌شود.

برای محاسبه اندیس کار باند مواد معدنی خوراک این کارخانه و تعیین رابطه آن با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیک سنگی مواد، نمونه‌هایی از سنگ آهن، آهک و پوزولان خوراک کارخانه تهیه گردید. بر روی نمونه‌های موجود آزمایش‌هایی تعیین اندیس کار باند و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ، به شرح زیر انجام گرفته است:

۳-۱- تعیین اندیس کار باند

در این تحقیق سعی بر استفاده از آسیاهای رایج در آزمایشگاه‌های کانه‌آرائی با پیروی از روش باند شده است. آسیای مورد استفاده در این بررسی، دارای ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ میلیمتر (قطر × طول) است (ابعاد آسیای مورد استفاده در آزمایش باند ۳۰۵× ۳۰۵ میلیمتر است). سایر پارامترها نیز به نسبت ($\frac{۲}{۳}$)^{۳} کوچک شده‌اند. به این ترتیب بار خردکننده آن، ۵۲ عدد گلوله به وزن ۵/۹ کیلوگرم (وزن گلوله‌ها در روش باند ۲۰/۱۲۵ کیلوگرم) است. ترکیب گلوله‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. سرعت گردش این آسیا مشابه آسیای استاندارد باند، معادل سرعت بحرانی آسیا، ۸۶ دور در دقیقه و حجم ماده معدنی داخل آسیا، ۲۰۷ سانتیمتر مکعب بوده است. روند انجام آزمایش کاملاً مشابه روش استاندارد باند با استفاده از آسیای گلوله‌ای است.

با اندازه‌گیری و محاسبه پارامترهای مربوطه و استفاده از رابطه تجربی اندیس کار باند (رابطه ۵)، مقدار اندیس کار باند برای نمونه‌های سنگ آهن، آهک کم عیار، آهک پرعیار و پوزولان به ترتیب ۱۴/۷۵، ۱۱/۶۱، ۱۱/۸۷ و ۱۰/۸۰ کیلووات ساعت بر تن تعیین شد.

جدول ۱- مشخصات گلوله‌های بکار رفته در آسیای گلوله‌ای دانشگاه ارومیه

قطر گلوله‌ها (cm)	٤	۳	۲/۵	۱/۵
تعداد	۱۰	۱۹	۱۴	۹
حجم گلوله‌ها (cm^3)	۳۳۵/۱۰	۲۶۸/۶۰	۵۸/۶۴	۱۵/۹۰

۳-۲- تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، نمونه‌های مورد نیاز از سنگ آهن، آهک و پوزولان آماده سازی شدند. هریک از آزمایش‌های تخلخل، چگالی، مقاومت فشاری یک محوری، مقاومت کششی برزیلی و ضریب ارتجاعی مماسی روی مغزه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۴ میلیمتر بر اساس استانداردهای ASTM انجام گرفت. برای تعیین تخلخل و چگالی، به ترتیب حجم، جرم خشک و اشباع مغزه‌های استوانه اندزه‌گیری شد و سپس تخلخل و چگالی برای هر یک از سه نوع سنگ محاسبه گردید. مقاومت فشاری یک محوری و ضریب ارتجاعی روی مغزه‌های آماده سازی شده به قطر ۵۴ میلیمتر و نسبت ارتفاع به قطر ۲/۲۲ و مقاومت کششی دارای نسبت ارتفاع (ضخامت) به قطر ۰/۸۵ برای سنگ آهن، آهک و پوزولان انجام شده است (شکل ۱و ۲). برای اندازه گیری کرنش محوری دو عدد کرنش سنج الکتریکی در جهت قائم در وسط ارتفاع هر یک از نمونه‌های سنگ نصب گردید و با بار گذاری محوری، کرنش مربوط به آن اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته در جدول (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، آزمایش مربوط به هر ویژگی بر روی سه نمونه انجام و میانگین آنها به عنوان مقدار ویژگی مربوطه محاسبه گردید.

شکل ۱- الف) نمونه‌ای از انجام آزمایش فشاری و ضریب ارتجاعی، ب) نمونه سنگ آهن شکسته شده پس از آزمایش مقاومت کشش برزیلی

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیک سنگی مواد معدنی خوراک کارخانه سیمان ارومیه

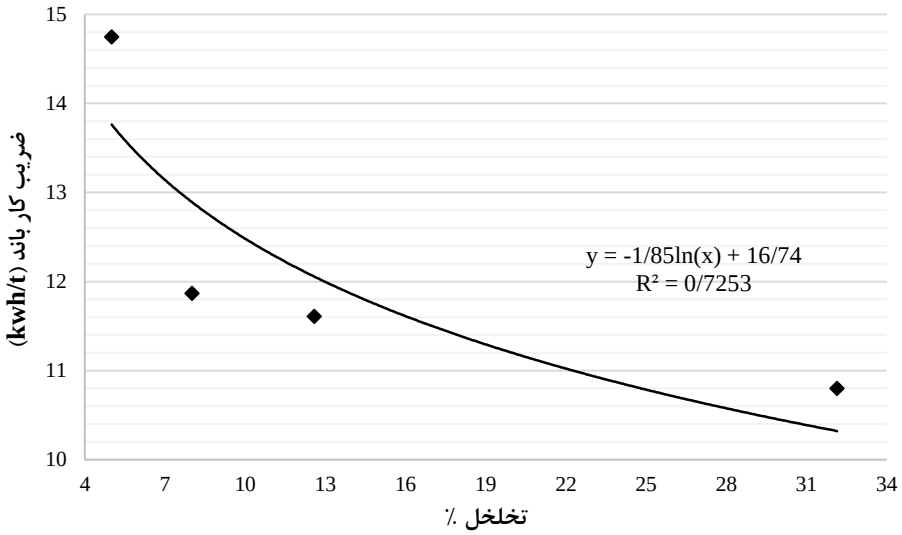
اندیس کار باند (kwh/t)	ضریب ارتجاعی (GPa)	چگالی (gr/cm^3)	مقاومت کششی (MPa)	تخلخل ٪	مقاومت فشاری یک محوری (MPa)	
۱٤/۷۵	۶۱/۳	۴/۰۰	۶/۰۴	۵/۰۰	۹۸/۴	سنگ آهن
۱۱/٦۱	۴/۳۲	۲/۶۰	۲/۸۷	۱۲/۵۸	۶۶/۷۳	آهک کم عیار
۱۱/۸۷	۵/۳۴	۲/۶۹۵	۳/۲۰	۸/۰۱	۵۸/۳۰	آهک پرعیار
۱۰/۸۰	۸/۰۰	۱/۸۶	۳/۰۰	۳۲/۱۵	۳۵/۰۰	پوزولان

٤- تحلیل نتایج

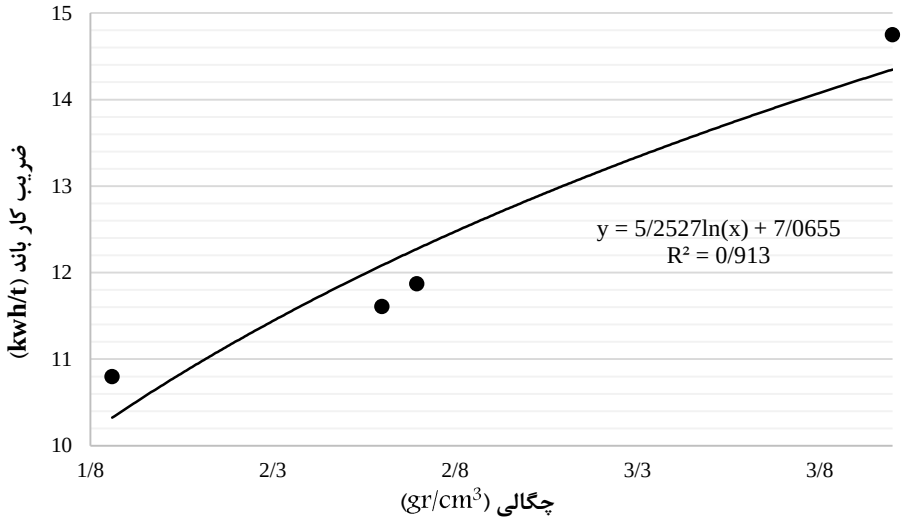
٤-۱- رابطه بین اندیس کار باند با تخلخل و چگالی

تخلخل به عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی و نقطه ضعف در سنگ، پارامتری است که بیشترین اطلاعات از ماهیت ریز ساختاری درونی سنگ را نشان می‌دهد [۱۸-۱۵]. نتیجه بررسی تأثیر تخلخل بر اندیس کار باند نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل سنگ‌های مختلف آهن، پوزولان و آهک، خوراک سنگ شکنی کارخانه سیمان اندیس کار باند به صورت تابع لگاریتمی با همبستگی ۰/۷۲۵۳ = R^2 کاهش می‌یابد (شکل ۲). اندیس کار باند (BWI) طبق رابطه ۶، با افزایش چگالی (γ) به صورت تابع لگاریتمی با همبستگی خوبی (۰/۹۱۳ = R^2) افزایش می‌یابد (شکل ۳).

$$BWI = 5.2527 \ln(\gamma) + 7.0655 \qquad (۶)$$



شکل ۲- رابطه بین اندیس کار باند و تخلخل برای سنگ‌های مختلف آهن، پوزولان و آهک



شکل ۳- رابطه بین اندیس کار باند و چگالی برای سنگ‌های مختلف آهن، پوزولان و آهک

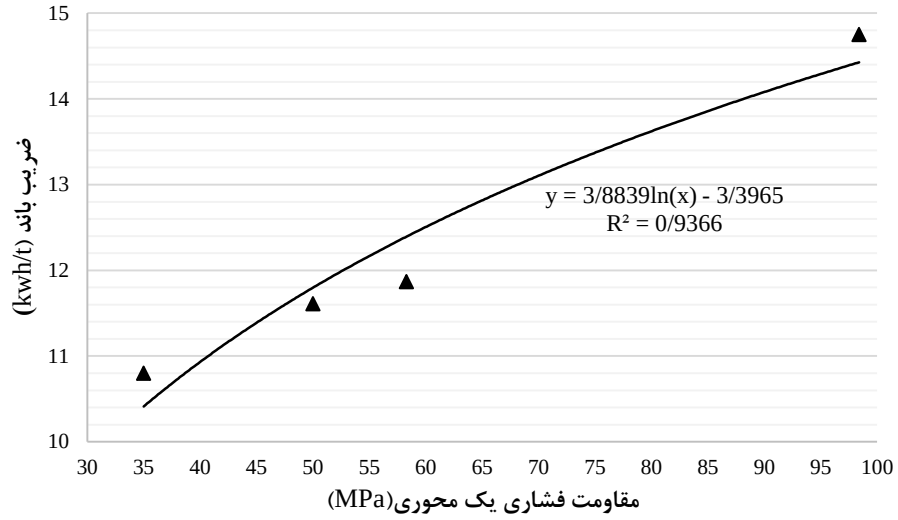
٤-۲- رابطه بین اندیس کار باند با ویژگی‌های مقاومت فشاری یک محوری، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی

نتیجه بررسی تأثیر مقاومت فشاری یک محوری (σ_{ci}) بر اندیس کار باند نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری یک محوری سنگ‌های مختلف آهن، پوزولان و آهک خوراک سنگ شکنی کارخانه سیمان اندیس کار باند به صورت تابع لگاریتمی با همبستگی خوبی (R^2=۰/۹۳۶۶) افزایش می‌یابد (شکل ۴).

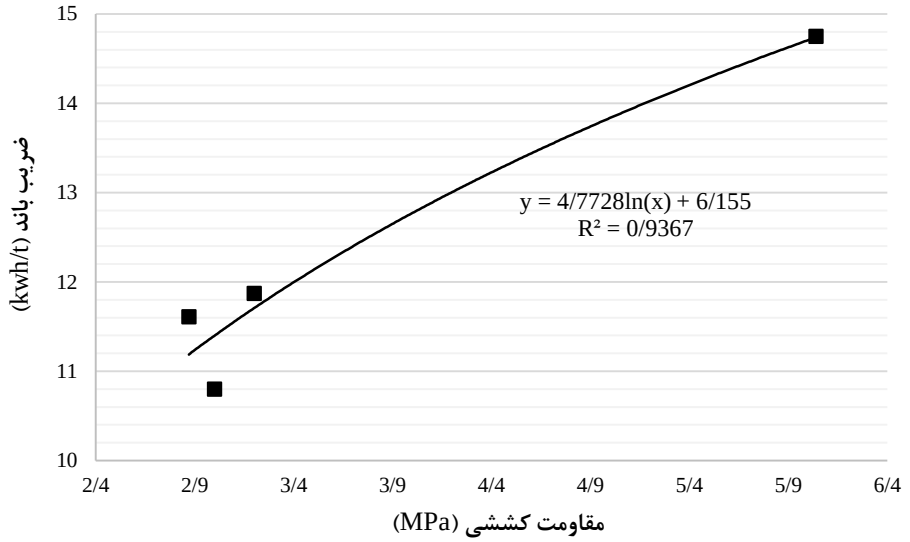
$$BWI = 3.8839 \ln(\sigma_{ci}) - 3.3965 \qquad (۷)$$

با افزایش مقاومت فشاری یک محوری، انرژی مورد نیاز برای خردایش و دانه‌بندی سنگ افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر با افزایش مقاومت فشاری یک محوری، انرژی بیشتری برای ایجاد سطح جدید در سنگ لازم است. همچنین اندیس کار باند به صورت تابع لگاریتمی نیز با همبستگی خوبی (R^2=۰/۹۳۶۷) با افزایش مقاومت کششی (σ_t) افزایش می‌یابد (شکل ۵).

$$BWI = 4.7728 \ln(\sigma_t) + 6.155 \qquad (۸)$$



شکل ۴- رابطه بین اندیس کار باند و مقاومت فشاری یک محوری برای سنگ‌های مختلف آهن، پوزولان و آهک

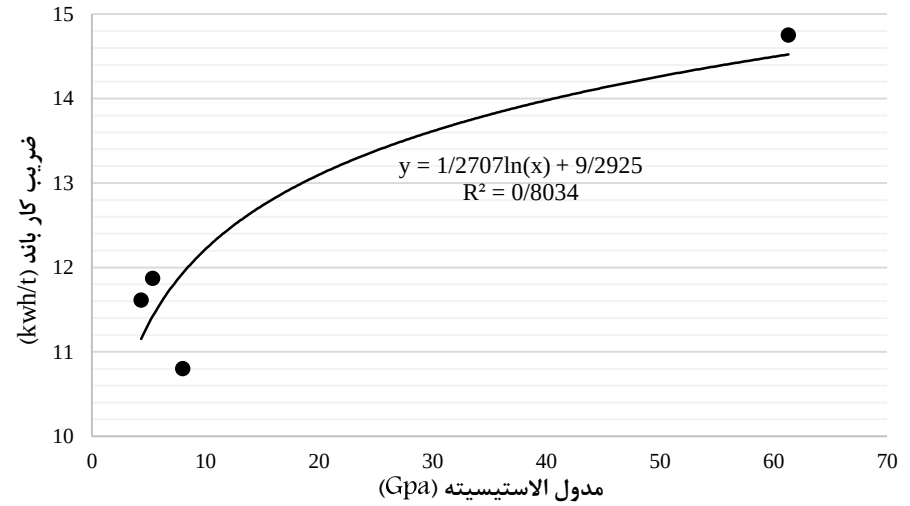


شکل ۵- رابطه بین اندیس کار باند و مقاومت کششی برای سنگ‌های مختلف آهن، پوزولان و آهک

رابطه بین اندیس کار باند و ضریب ارتجاعی نمونه‌های سنگ آهن، آهک و پوزولان در شکل (۶) نشان داده شده است. اندیس کار باند با افزایش ضریب ارتجاعی سنگ‌ها به صورت لگاریتمی با همبستگی خوبی (R^2=۰/۸۰۳۴) افزایش می‌یابد.

$$BWI = 1.2707 \ln(E_t) + 9.2925 \quad (۹)$$

اندیس کار باند بالای سنگ آهن به دلیل ماتریکس پیچیده و ساختار میکروکریستالی آن است. در مورد نمونه‌های آهک و پوزولان کریستال‌ها درشت‌تر و در نتیجه اندیس کار باند آنها کمتر است.



شکل ۶- رابطه رابطه بین اندیس کار باند و ضریب ارتجاعی مماسی چهار نوع سنگ آهن، پوزولان و آهک

۵- نتیجه‌گیری

اندیس کار باند یک شاخص بسیار مهم در تعیین انرژی مورد نیاز برای خردایش مواد معدنی و مدار آسیاکنی در کارخانه‌های سیمان است. در این تحقیق با انجام آزمایش استاندارد باند، اندیس کار نمونه‌های سنگ آهن، آهک کم عیار، آهک پرعیار و پوزولان، به ترتیب برابر ۱۴/۷۵، ۱۱/۶۱، ۱۱/۸۷ و ۱۰/۸۰ کیلووات ساعت بر تن بدست آمد. براساس نتایج آزمایش‌های انجام گرفته برای تعیین رابطه اندیس باند با ویژگی‌های فیزیکی سنگ شامل چگالی و تخلخل، اندیس کار باند با افزایش چگالی سنگ، افزایش و با افزایش تخلخل کاهش پیدا می‌کند. همچنین براساس آزمایش‌های

مکانیک سنگی و اندیس کار باند انجام گرفته روی نمونه سنگ-های آهن، آهک و پوزولان، اندیس کار باند با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی، در تمامی حالات با رابطه تابع لگاریتمی و ضریب تصمیم گیری بیش از ۰/۸۰ افزایش می‌یابد. اندیس کار باند دارای بیشترین همبستگی به ترتیب با داده-های مقاومت کششی و مقاومت فشاری یک محوری نمونه‌های آزمایش شده است.

٦- مراجع

[1] Mucsi, G. "Fast test method for the determination of the grind ability of fine materials", Chem. Eng. Res. Des. 86(2008), pp: 395 – 400.

[2] Hukki, R.T. "Proposal for a solomnic settlement between the theories of Von Rittnger, Kick and Bond", Trans. AIME, 223(1962), pp: 403 – 408.

[3] Ahmadi R., Shahsavari Sh. "Procedure for Determination of Ball Bond Work Index in the Commercial Operations", Minerals Engineering, Elsevier, 22(2009), pp: 104-106.

[4] Nitta, S., Bissombolo, A., Furuyama, T., Mori, S. "Relationship between Bond's work index (W_i) and uniformity constant (n) of grinding kinetics on Tower mill milling limestone", Int. J. Miner. Process. 66(2002), pp: 79 – 87.

[5] Morrell, S. "An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits", Int. J. Miner Process. 74(2004), pp: 133 – 141.

[6] Gent, M., Menedez, M., Torano, J., Torno, S.A. "Correlation between Vickers Hardness indentation values and the Bond Work Index for the grinding of brittle minerals", Powder Technology, 224(2012), pp: 217-222.

[7] Haffez, G.S.A. "Correlation between Bond work index and mechanical properties of some Saudi ores", J. Eng. Sci. 40(2012), pp: 271 – 280.

[8] Ahmadi, R., Hashemzadehfini, M., Parian, M.A. "Rapid determination of Bond rod–mill work index by modeling the grinding kinetics", Adv. Powder Tech. 24(2013), pp: 441– 445.

[9] Chandar, K.R., Deo, S.N., Baliga, A.J. "Prediction of Bond's work index from field measurable rock properties", International journal of Mineral Processing, 2016.

[۱۰] حسنی صدرآبادی، س؛ پرنده، ل؛ دهقانی، ع. "ارزیابی روش‌های ساده و غیرمستقیم تخمین اندیس کار باند (مطالعه موردی: سنگ آهن چغارت)"، نشریه مهندسی معدن. (۱۳۹۱)۷، صص: ۶۸-۶۳.

[11] Worreler, E., Galistky, C. "Energy efficiency improvement opportunities for cement making, an energy star Guide for Energy and plant managers", Report LBNL- 54036, Lawrence Berkley national laboratory, Berkley, 2004.

[12] Avami, A., Sattari, S. "Energy Conservation Opportunities: Cement Industry in Iran", International Journal of Energy. 3(1)(2007), pp:1-7.

[13] Madlool, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A. "A critical review on energy use savings in the cement industries", Renew. Sustain. Energy Rev. 15(2011), pp: 2042–2060.

[14] Bond, F.C. "Crushing and grinding calculations, part I–II, British Chemical Engineering", (1961), pp: 378–385 and 543–548.

[15] Smorodinov, M.I., Motovilov, E.A., Volkov, V.A. "Determinations of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks, Proc. Second Congress of ISRM", Belgrade, Privredni pregled, 2(1970), pp: 35 - 37.

[16] Dunn, D.E., Lafountain, L.J., Jackson, R.E. "Porosity dependence of mechanism of brittle fracture in sandstones", Journal of Geophysical Research, 78(1973), pp: 2403 - 2417.

[17] Laskaripour, G.R., Passaris, E.K.S. "Correlations between index parameters and mechanical properties of shales", Proc. 8th Congress of ISRM, Tokyo, 1(1995), pp: 257 - 261.

[18]. Moomivand, H. "Development of a new method for estimating the indirect uniaxial compressive strength of rock using Schmidt hammer, Journal of BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (Journal of Minig, Metallurgical, Materials", Geotechnical and Plant Engineering, 156(2011), pp: 142 – 146.

Investigate the relationship between of the bond work index and the physical and mechanical properties of rocks (case study: the feed of Uremia cement plant)

Ataallah Bahrami *
Assistant professor of mineral processing, Department of mining, university of uremia
Hasan Moomivand
Associate professor of mining engineering, Department of mining, university of uremia
Fatemeh Kazemi
Graduate of MSC mining engineering, university of uremia
Abusaleh Dehghani
Student of mining engineering, university of uremia
Mehdi Mutab
Expert of mine engineering department, university of uremia

Abstract

The bond work index is the most important parameter that determines the amount of energy consumed and examines the efficiency of the grinding circuit. In this research, the bond work index of mineral feed of Uremia cement plant was determined using by standard bands method. The bonding index for iron ore, low grade and high grade limestone and pozzolan were calculated to be 14.75, 11.61, 11.87 and 10.80 Kwh/t, respectively. In order to investigate the relationship between the bond index and the physical and mechanical properties of rocks, experiments were conducted to determine the physical and mechanical properties of rocks. The bonding index with the porosity of the samples, there is an inverse relationship (R^2=0.7253), but increased with logarithmic relationships by increasing the density. Also, the bond index increases with increasing mechanical properties of rock such as compressive strength, tensile strength and elastic coefficient as logarithmic function with good correlation (R^2=0.80). According to the results, the bond work index has a very high correlation (about 0.93) with tensile strength and one-axial compressive strength compared to other rock properties. By Using the results and formulas, we can estimate the bond work index of mineral feeds of Uremia cement plant using physical and mechanical properties.

Keywords: Bond work index, Physical and mechanical properties, Iron ore, limestone, pozzolan.

* Corresponding Author: a.bahrami@urmia.ac.ir