

ارزیابی روش‌های ساده و غیر مستقیم تخمین اندیس کار باند (مطالعه موردی: سنگ آهن چغارت)

سعید حسنی صدرآبادی^۱، لیلا پرنده^۲، علی دهقانی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، مرکز پژوهشی سنگ آهن، دانشگاه یزد، s_hassani_s@yahoo.com
۲- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، مرکز پژوهشی سنگ آهن، دانشگاه یزد، l.parand@yahoo.com
۳- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، مرکز پژوهشی سنگ آهن، دانشگاه یزد، a.dehghani@yazduni.ac.ir

(دریافت ۱۱ مرداد ۱۳۸۹، پذیرش ۲۷ مهر ۱۳۹۰)

چکیده

با وجود پیشرفت‌هایی که در زمینه مدل‌سازی آسیاها فراهم شده است، هنوز هم اندیس کار باند به طور گسترده‌ای در طراحی آسیاهای صنعتی استفاده می‌شود. آزمایش قابلیت خردایش کانه با استفاده از استاندارد باند، برای دست‌یابی به بار درگرددش ۲۵۰ درصد در مقیاس آزمایشگاهی ارائه شده است. این اندیس، مقاومت مواد در مقابل آسیا شدن را نشان می‌دهد. تعیین اندیس کار باند، زمان‌بر است و به‌طور معمول بعد از ۷ تا ۱۰ سیکل خردایش به دست می‌آید. در این تحقیق، دو روش اندازه‌گیری اندیس کار باند با روش استاندارد مقایسه شده‌اند. ابتدا روش تعیین سریع اندیس کار با استفاده از سینتیک مرتبه اول خردایش در آسیای گلوله‌ای باند، مرور شده است. در این آزمایش، از نمونه‌های بار اولیه آسیای گلوله-ای سه‌چاهون استفاده شده است. اختلاف بین اندیس کار استاندارد باند و اندیس کار به دست آمده توسط این روش کمتر از ۶ درصد بوده است. سپس اندیس کار به صورت غیرمستقیم، با استفاده از آزمون‌های شکست ضربه‌ای و سایشی، بر روی نمونه‌های بار اولیه آسیای خودشکن چغارت محاسبه شده است. آزمون‌های مربوط به آزمایش شکست ضربه‌ای با استفاده از دستگاه وزنه افتان و در محدوده‌های ابعادی و سطوح مختلف انرژی انجام شد و مقادیر اندیس t_{10} که به عنوان یک مشخصه خردایش در نظر گرفته می‌شود، مشخص شد. سپس داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده با معادله تجربی ارائه شده توسط Napier-Munn برازش داده شد و ضرائب A و b به ترتیب برابر با ۵۶/۴۰ و ۱/۲۱ به دست آمد. اندازه پارامترهای A و b، مقاومت سنگ در برابر ضربه را نشان می‌دهند. در نهایت آزمون سایش بر روی ۳ کیلوگرم از ذرات (۳۷/۵+۵۳- میلی‌متر) سنگ آهن چغارت توسط آسیای سایش انجام شد. این ذرات به مدت ۱۰ دقیقه در این آسیای گردان آزمایشگاهی که دارای ابعاد ۳۰۵*۳۰۵ میلی‌متر و ۴ عدد بالابرنده به ارتفاع ۶/۳۸ میلی‌متر است و در ۷۰ درصد سرعت بحرانی، یعنی ۵۳ دور در دقیقه (rpm) می‌چرخد، خرد شدند و مقدار اندیس t_{10} که به عنوان پارامتر سایش در نظر گرفته می‌شود برابر ۰/۶۱ تعیین شد. ارتباط بین اندیس‌های ضربه و سایش با اندیس کار استاندارد باند توسط پژوهشگران استرالیایی ارائه شده است. نتایج به دست آمده با استفاده از روش‌های غیرمستقیم ضربه و سایش به طور قابل قبولی به روش استاندارد اندیس کار باند نزدیک بود (اختلافی در حدود ۳ درصد). مقایسه مقادیر به دست آمده از روش‌های بالا با مقادیر استاندارد باند، نشان داده است که این روش‌ها دقت قابل قبولی برای تعیین اندیس کار مواد دارند و با صرف وقت و خطای کمتری قابل اجرا هستند.

کلمات کلیدی

اندیس کار باند، سینتیک مرتبه اول خردایش، آزمون‌های شکست سایشی و ضربه‌ای.

۱- مقدمه

نتایج تحقیقات همچنین نشان داده است که ثابت نرخ خردایش (k) را می‌توان با استفاده از یک آزمایش خردایش طبق رابطه زیر محاسبه کرد:

$$k = \frac{\ln R_0 - \ln R}{t} \quad (2)$$

بنابراین برای محاسبه k لازم است R را با آزمایش به کمک آسیای گلوله‌ای باند محاسبه کرد. برای بار در گردش استاندارد، ۲۵۰ درصد، می‌توان نوشت:

$$\frac{R}{U} = 2.5 \quad (3)$$

$$U + R = M \quad (4)$$

$$R = \frac{2.5}{3.5} M \quad (5)$$

$$U = \frac{1}{3.5} M \quad (6)$$

که در آن: R ، وزن مواد باقیمانده بر روی سرند کنترل (گرم)؛ U ، وزن خوراک جدید (گرم).

در یک سیکل خردایش استاندارد، وزن روی سرند کنترل در شروع خردایش (R_0) برابر است با:

$$R_0 = \frac{2.5}{3.5} M + R' = \frac{2.5}{3.5} M + \frac{1}{3.5} M r_0 \quad (7)$$

$$R_0 = \left(\frac{2.5}{3.5} + \frac{1}{3.5} r_0 \right) M \quad (8)$$

که در آن: R' ، وزن مواد موجود روی سرند کنترل در خوراک تازه (گرم) و r_0 ، نسبت مواد روی سرند کنترل در خوراک تازه است.

با استفاده از رابطه (۱)، (۵) و (۸) برای بار در گردش ۲۵۰ درصد، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{2.5}{3.5} M = \left(\frac{2.5}{3.5} + \frac{1}{3.5} r_0 \right) M e^{-kt} \quad (9)$$

با استفاده از روابط بالا، زمان t_c طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_c = \frac{\ln(1+0.4r_0)}{k} \quad (10)$$

که در آن: t_c ، زمان یک سیکل خردایش برای رسیدن به بار در گردش ۲۵۰ درصد است.

برای آسیای گلوله‌ای باند، تعداد دور کلی چرخش آسیا (N) برای محاسبه زمان خردایش (t) استفاده می‌شود:

$$t = \frac{N}{n} \quad (11)$$

هم اکنون اندیس کار باند مبنای رایج برای انتخاب آسیاها در مقیاس صنعتی است. آزمون اندیس کار آسیای گلوله‌ای باند، در سال ۱۹۵۲ توسط باند ارائه و در سال ۱۹۶۱ اصلاح شد. در این روش، نتایج آزمایش‌های آسیای آزمایشگاهی برای پیش-بینی مصرف انرژی در مقیاس صنعتی به کار می‌رود [۱]. در روش استاندارد باند، به منظور تعیین اندیس کار با آسیای گلوله‌ای، ۱۵ کیلوگرم نمونه معرف، که ابعاد ذرات آن بزرگتر از ۳/۳۵ میلی‌متر است با سنگ‌شکنی تا ابعاد کوچکتر از ۳/۳۵ میلی‌متر (۶ مش) خرد می‌شود. اولین آزمون آسیاکنی با انتخاب تعداد دور دلخواه آغاز می‌شود. در مراحل بعد تعداد دور آسیا به نحوی محاسبه می‌شود که به تدریج بار در گردش ۲۵۰ درصد تولید شود. آسیا کردن به همین روش ادامه می‌یابد تا اینکه در سه سیکل خردایش نهایی، زیرسردی تولید شده در هر دور آسیا ثابت شود. بنابراین در این روش با انجام ۷ تا ۱۰ سیکل خردایش، بار در گردش ۲۵۰ درصد حاصل می‌شود. زیرسردی سرند کنترل مربوط به آخرین آزمون، تجزیه سردی می‌شود. در نهایت، اندیس کار (WI) در آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی به کمک معادله باند محاسبه می‌شود [۲].

با وجود این که اندیس کار باند به طور گسترده‌ای در طراحی آسیاهای صنعتی استفاده می‌شود، اما این روش طولانی است و منجر به ایجاد خطا می‌شود. به همین دلیل تلاش‌های زیادی برای ساده و مختصر کردن آزمایش باند انجام شده است [۲].

در این تحقیق، ابتدا اندیس کار باند با استفاده از روش‌های سینتیک خردایش و روش‌های ضربه‌ای و سایش، بر روی نمونه‌های سنگ آهن سه‌چاهون و چغارت محاسبه شده است. سپس اندیس کار نمونه‌های بالا با روش استاندارد باند به دست آمده و با نتایج روش‌های ساده و غیر مستقیم مقایسه شده‌اند.

۲- روش تعیین اندیس کار باند با استفاده از سینتیک خردایش

نتایج تحقیقات روی سینتیک خردایش در آسیای گلوله‌ای باند، نشان داده‌اند که در زمان‌های کوتاه خردایش، فرآیند آسیاکنی از قانون سینتیک درجه اول تبعیت می‌کند [۱]:

$$R = R_0 e^{-kt} \quad (1)$$

که در آن: R ، میزان مواد روی سرند کنترل در زمان (t); R_0 ، میزان مواد روی سرند کنترل در شروع خردایش ($t=0$); K ، ثابت نرخ خردایش و t ، زمان خردایش است.

مساوی یا به‌طور تقریبی مساوی با $M(2.5/3.5)$ گرم باشد، به عبارتی وزن مواد عبور کرده باید معادل $m = M(1/3.5)$ گرم باشد.

۱۵- وزن دانه‌ریز تولید شده در هر دور آسیا (G)، در آزمایش دوم با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$G = \frac{m - \frac{1}{3.5} M (1 - r_0)}{N_c} \quad (14)$$

۱۶- در نهایت اندیس کار باند (WI) از فرمول باند به دست می‌آید:

$$WI = \frac{49.1}{P_1^{0.23} \times (Gbp)^{0.82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{F_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (15)$$

که در آن: WI، اندیس کار آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی باند Gbp (KWh/t)؛ میزان مواد دانه‌ریز تولید شده در هر دور آسیا (گرم بر دور)؛ P_1 ، اندازه سرنده کنترل (میکرون)؛ P_{80} ، اندازه دهانه سرنده که ۸۰٪ محصول از آن عبور می‌کند (میکرون) و F_{80} ، اندازه دهانه سرنده است که ۸۰٪ بار اولیه از آن عبور می‌کند (میکرون).

۳- تعیین اندیس کار باند به کمک آزمون‌های شکست سایشی و ضربه‌ای

این روش‌ها برای تعیین اندیس کار مواد به صورت غیر مستقیم به کار می‌روند.

۳-۱- آزمون شکست سایشی

آزمون شکست سایشی یک آزمون شکست با انرژی کم می‌باشد. در این آزمایش، ۳ کیلوگرم از ذرات $(5/37+53)$ میلیمتر) به صورت خشک تهیه شده، به مدت ۱۰ دقیقه در یک آسیای گردان آزمایشگاهی 305×305 میلیمتری که دارای ۴ عدد بالابرنده به ارتفاع $6/38$ میلیمتر است و در ۷۰ درصد سرعت بحرانی، یعنی ۵۳ دور در دقیقه (rpm) می‌چرخد، خرد می‌شوند. سپس محتویات آسیا خارج شده و محصول به‌دست آمده با سرندهایی با نسبت $\sqrt{2}$ و به صورت خشک تا ۳۸- میکرون دانه‌بندی شده و مقدار t_{10} آن تعیین می‌شود. میانگین هندسی اندازه اولیه ذرات، $44/60$ میلیمتر می‌باشد. t_{10} به عنوان یک مشخصه خردایش در نظر گرفته می‌شود و به صورت درصد عبوری از روزه‌ای به اندازه یک دهم اندازه اولیه تعریف می‌شود [۲].

پارامتر سایش (t_a)، با معادله زیر تعریف می‌شود [۳]:

با جایگزینی t در رابطه‌های (۲) و (۱۰)، روابط زیر به دست می‌آید:

$$k = \frac{n(Ln R_0 - Ln R)}{N} \quad (12)$$

$$N_c = n \frac{Ln(1 + 0.4r_0)}{k} \quad (13)$$

که در آن: n ، تعداد دور آسیا در یک دقیقه؛ N ، تعداد دور کلی آسیا و N_c ، تعداد دور کلی آسیا است که بار درگردشی معادل ۲۵۰ درصد تولید می‌کند.

با توجه به محاسبات انجام شده که در معادلات (۷)، (۱۲) و (۱۳)، منعکس شده است، اندیس کار باند را می‌توان با انجام دو آزمایش، به صورت زیر، به دست آورد:

۱- نمونه تا $3/35$ - میلیمتر سنگ‌شکنی می‌شود.

۲- توزیع ابعادی خوراک مربوطه تعیین می‌شود.

۳- 700 cm^3 از نمونه را برداشته و وزن می‌شود (M).

۴- مقدار $R = M(2.5/3.5)$ محاسبه می‌شود.

۵- از خوراک کلی یک نمونه دقیق گرفته می‌شود و با سرنده کنترل، سرنده می‌شود. از بخش باقیمانده روی سرنده دو نمونه معادل وزن $R = M(2.5/3.5)$ برای دو آزمایش آماده می‌شود.

۶- دو نمونه دیگر، هر یک به وزن $M(1/3.5)$ گرم، نیز از نمونه اولیه تهیه می‌شود.

۷- سپس با مخلوط کردن یکی از نمونه‌های تهیه شده از مواد باقیمانده روی سرنده، به وزن $M(2.5/3.5)$ گرم، با یکی از نمونه‌های تهیه شده از نمونه اولیه، به وزن $M(1/3.5)$ گرم، نمونه مورد نظر آماده می‌شود.

۸- نسبت مواد درشت‌تر از سرنده کنترل (R_0) در نمونه‌های تهیه شده، تعیین می‌شود.

۹- یکی از نمونه‌ها داخل آسیای باند ریخته شده و با یک دور انتخابی (مثلاً ۵۰ یا ۱۰۰ دور در دقیقه) خرد می‌شود.

۱۰- بعد از خردایش، کل نمونه با سرنده کنترل سرنده می‌شود و نسبت بخش دانه درشت محاسبه می‌شود (R).

۱۱- ثابت نرخ خردایش مواد باقیمانده (K) با استفاده از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

۱۲- تعداد دور کلی چرخش آسیا (N_c) برای آزمایش خردایش دوم، از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

۱۳- نمونه دوم داخل آسیای باند ریخته شده و با N_c دور، خرد می‌شود.

۱۴- بعد از خردایش، نمونه با سرنده کنترل سرنده شده و مواد باقیمانده و عبور کرده از سرنده وزن می‌شوند. آنگاه P_{80} مواد عبور کرده از سرنده محاسبه می‌شود. وزن مواد باقیمانده باید

هندسی ابعاد ذرات در محدوده ۶۳ تا ۵۳ میلیمتر به صورت ریشه دوم حاصلضرب آنها محاسبه می‌شود.

با روشی که در بالا شرح داده شد، مجموعه‌ای از مقادیر t_{10} و E_{cs} برای پانزده ترکیب اندازه - انرژی تولید می‌شود. مدل تجربی زیر (Napier-Munn و همکاران، ۱۹۹۶)، ارتباط بین مقادیر شکست (t_{10}) با انرژی ویژه خردایش (E_{cs}) را به صورت نمائی بیان می‌کند:

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}}) \quad (18)$$

که در آن: t_{10} ، درصد عبورکرده از یک دهم اندازه ذره اولیه (اندیس شکست) و E_{cs} ، انرژی ویژه خردایش (kWh/t) ماست [۲].

پس از برازش منحنی، به روش حداقل مربعات خطا، به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، پارامترهای مشخص کننده شکست (A و b)، که تنها به نوع کانسنگ بستگی دارند، برآورد می‌شود. اندازه پارامترهای A و b ، مقاومت سنگ در برابر ضربه را نشان می‌دهند. این مقادیر در سنگ‌های مقاوم در برابر ضربه، کمتر است. A ماکزیمم مقدار t_{10} به دست آمده است و پارامتر b شیب کلی منحنی در سطوح انرژی‌های پائین‌تر است.

۳-۳- ارتباط بین پارامترهای ضربه و سایش با اندیس کار استاندارد آسیای گلوله‌ای باند

روابط همبستگی بین پارامترهای ضربه ($A*b$) و سایش (t_a) با اندیس کار استاندارد آسیای گلوله‌ای باند (WI) ارائه شده‌اند. این روابط با انجام آزمایش بر روی ۴۷ نوع کانه مختلف توسط شرکت استرالیایی JKMRRC ارائه شده است و به صورت زیر است [۲]:

$$A*b = -3.5 WI + 117 \quad (19)$$

$$t_a = 19.7 WI^{-1.34} \quad (20)$$

لازم به ذکر است که این روابط همچنان که در شکل‌های (۱) و (۲) آمده است دارای ارتباط خیلی قوی نمی‌باشند ولی در موقعی که نتایج وزنه افتان و آسیای سایش را داریم و تقریبی از مقدار اندیس کار را می‌خواهیم می‌توانیم با صرف وقت و هزینه کمتر از آن استفاده کنیم.

$$t_a = t_{10}/10 \quad (16)$$

۳-۲- آزمون شکست ضربه‌ای

آزمون شکست ضربه‌ای یک آزمون شکست با انرژی متوسط تا بالا است که به وسیله دستگاه وزنه افتان انجام می‌شود. مقدار انرژی ویژه خردایش (E_{cs}) به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{cs} = \frac{0.0272 M_d (h_i - h_f)}{m} \quad (17)$$

که در آن: E_{cs} ، انرژی ویژه خردایش (KWh/t); M_d ، جرم وزنه افتان (kg); \bar{m} ، متوسط جرم هر طبقه اندازه ذره (g); h_i ، ارتفاع اولیه وزنه افتان تا بستر (cm) و h_f ، ارتفاع نهایی وزنه افتان تا بستر (cm) است.

برای آزمایش یک نوع کانسنگ، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم نمونه بر حسب طبقات سرندی $\sqrt[4]{2}$ دانه‌بندی می‌شود. تعداد ۱۰ تا ۳۰ قطعه از سنگ معدنی (بسته به جرم ذره) در هر طبقه سرندی، برای انجام آزمایش در هر سطح انرژی لازم است. به‌طور معمول تعداد ۱۵ ترکیب اندازه - انرژی (مانند جدول ۱) انتخاب می‌شود. مقدار یا سطوح انرژی اولیه (داده شده) در هر آزمایش به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که با سختی کانسنگ تناسب داشته باشد. یک نمونه ۱۰۰ کیلوگرمی به ۵ محدوده ابعدی، مطابق جدول (۱) تقسیم می‌شود [۲].

جدول ۱: محدوده‌های ابعدی و سطوح انرژی ویژه خردایش (KWh/t) در آزمون شکست ضربه‌ای

شماره آزمایش	-۶۳+۵۳ mm	-۴۵+۳۷/۵ mm	- 31/5+26/5 mm	-۲۲/۴+۱۹ mm	-16+13/2 mm
۱	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۲۵
۲	۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۳	۰/۲۵	۰/۷۵	۲/۰۰	۲/۵۰	۲/۵۰

محصولات شکست تمامی ذرات، برای هر ترکیب اندازه - انرژی، جمع‌آوری و اندازه آنها تعیین می‌شود. توزیع دانه‌بندی حاصل شده نسبت به اندازه ذره اولیه نرمال می‌شود. در بازه وسیعی از انرژی داده شده، برای اندازه‌های مختلف ذره و نوع کانسنگ، شکل توزیع‌های دانه‌بندی نسبی شبیه به یکدیگر است و می‌تواند تنها با یک نقطه روی توزیع مشخص شود. مرسوم است از معیار درصد عبوری از یک دهم اندازه ذره اولیه، استفاده شود. این درصد با t_{10} مشخص می‌شود. برای محدوده‌های ابعدی مختلف، اندازه اولیه ذره برابر با میانگین هندسی محدوده‌های ابعدی است. به عنوان مثال، میانگین

ورودی به آسیای خودشکن چغارت در کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت بافق انجام شد.

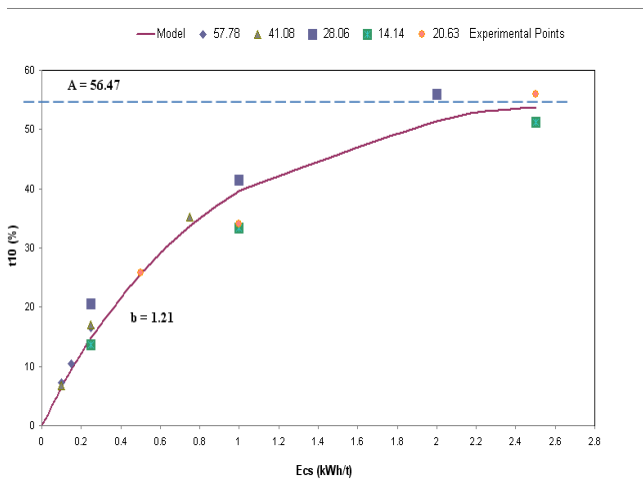
نمودار توزیع ابعادی محصول سایش رسم شد و از روی نمودار، مقدار t_a برابر با ۰/۶۱ به دست آمد.

بر روی نمونه خوراک آسیای خودشکن چغارت، آزمون شکست ضربه‌ای نیز طبق روش‌های استاندارد شرح داده شده، بر روی محدوده‌های مختلف ابعادی و در سطوح مختلف انرژی انجام شد. پس از انجام دادن آزمایش‌ها، نمودارهای توزیع ابعادی محصول شکست، یعنی درصد تجمعی عبورکرده از اندازه ذره اولیه، بر حسب میانگین هندسی محدوده‌های ابعادی مختلف رسم شد.

در یک سطح انرژی خردایش ویژه، کانه‌های سخت‌تر، مقادیر t_{10} کمتر و کانه‌های نرم‌تر، مقادیر t_{10} بزرگتری را دارند. پس از رسم نمودارهای توزیع ابعادی محصول شکست، مقادیر t_{10} از روی نمودارهای بالا خوانده شدند، سپس منحنی $(-t_{10} E_{cs})$ با بهترین برازش ممکن مطابق نمودار شکل (۳) رسم شد.

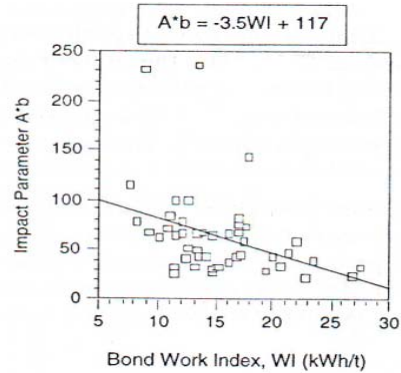
آنگاه مقادیر A و b از روی نمودار شکل (۳) به دست آمد، که مقدار A برابر با ۵۶/۴۷٪ و مقدار b برابر با ۱/۲۱ t/KWh است و در نهایت مدل شکست ضربه‌ای سنگ آهن چغارت با مقدار R^2 (ضریب همبستگی) برابر ۰/۹۷، به صورت زیر به دست آمد:

$$t_{10} = 56.47 \times \left(1 - e^{(-1.21 \times E_{CS})} \right) \quad (21)$$

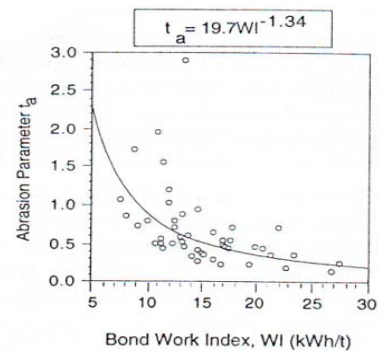


شکل ۳: نتایج آزمایش وزنه افتان، ارتباط اندیس شکست (t_{10}) با انرژی ویژه خردایش (E_{cs})

با قرار دادن مقادیر پارامترهای ضربه و سایش در روابط (۱۹) و (۲۰)، مقادیر اندیس کار به دست آمد که نتایج آن در جدول



شکل ۱: ارتباط بین پارامتر $(A*b)$ و اندیس کار باند (WI) [۲]



شکل ۲: ارتباط بین پارامتر (ta) و اندیس کار باند (WI) [۲].

۴- نتایج

اندیس کار باند به هر دو روش استاندارد و روش سریع با انجام فقط دو آزمایش، بر روی نمونه‌های بار اولیه آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون انجام شد. نتایج کار در جدول (۲) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اختلاف نتایج کمتر از ۶ درصد است. این نتایج، کارایی روش مختصر شده را برای تعیین سریع و ساده اندیس کار باند را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقایسه مقادیر اندیس کار به دست آمده به روش استاندارد باند و روش سریع

نمونه	دهانه سرنده کنترل (μm)	اندیس کار (KWh/t)		میزان اختلاف* (%)
		روش باند WI(B)	روش مختصر شده WI(A)	
کانه آهن	۷۵	۲۴/۴۶	۲۵/۸۳	-۵/۶
سه	۷۵	۲۵/۵۶	۲۴/۰۶	+۵/۹
چاهون	۷۵	۲۴/۶۳	۲۵/۷۵	-۴/۵

$$\Delta = \frac{WI(B) - WI(A)}{WI(B)} \times 100$$

همچنین اندیس کار به هر سه روش استاندارد باند، شکست سایشی و شکست ضربه‌ای بر روی نمونه‌های دانه درشت بار

منابع

- [1] Ahmadi R., Shahsavari Sh., 2009, "Procedure for Determination of Ball Bond Work Index in the Commercial Operations", Minerals Engineering, Elsevier, Volume 22, pp. 104-106.
- [2] Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T., 1996, "Mineral Comminution Circuits, Their Operation and Optimization", JKMR, Australia.
- [3] King R. P., 2001, "Modelling and Simulation of Mineral Processing Systems", Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, USA.
- [4] Sabasinghe G. K. N. S., Kanau, J. L., October 2000 "On the Assessment of Ore Grindability and Bond Work Index for Mill Control", Seventh Mill Operators' Conference, Kalgoorlie, Western Australia.
- [5] Amtech CO., 2006, "Technical Features – Bond Ball Mill Work Index (BWI)", Western Australia.
- [6] F. C. Bond, 1961, "Crushing and Grinding Calculations Part I and II British Chemical Engineering 6 (6 and 8)".
- [7] JKMR CO., 2006, "Procedure for BBMWI Test".
- [8] Magdalinovi N., 1989, "A Procedure for Rapid Determination of the Bond Work Index", International Journal of Mineral Processing 27 (1-2), 125-132.
- [9] Vedat, Deniz, Huseyin, Ozdag, 2003, "A New Approach to Bond Grindability and Work Index: Dynamic Elastic Parameters", Minerals Engineering Journal 16 (3), 211-217.
- [10] Weiss N. L., 1985, "Mineral Processing Handbook, Society of Mining Engineers", AIMM, New York. 2078.
- [11] Gupta A., Yan D. S., 2006, "Mineral Processing Design and Operation, an Introduction", Australia.
- [12] Genc O., Ergun L., Benzer H., 2004, "Single Particle Impact Breakage Characterization of Materials by Drop Weight Testing", Department of Mining Engineering, Ankara, Turkey.
- [13] Free K. S., Mc Carter M. K., King R. P., Feb. 23-25, 2002, "Evaluation of a New Method for Work Index Estimation Using Single Particle Impact Tests", Preprint 04-91, SME Annual Meeting, Denver Colorado.

(۳) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، اختلاف نتایج در این مورد کمتر از ۶ درصد است. این نتایج نیز، کارآیی روش‌های ذکر شده برای تعیین اندیس کار باند به صورت غیر مستقیم بر روی مواد درشت دانه را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه مقادیر اندیس کار به دست آمده به روش استاندارد باند و روش شکست سایشی و ضربه‌ای

نمونه	اندیس کار (KWh/t)			میزان اختلاف (%)	
	روش استاندارد باند با دهانه سرد کنترل ۱۵۰ میکرون WI(B)	روش شکست سایشی WI(A)	روش شکست ضربه‌ای WI(A)	روش شکست سایشی	روش شکست ضربه‌ای
	کانه آهن چغارت	۱۳/۴۴	۱۳/۳۷	۱۳/۹۱	+۰/۵۲
	۱۳/۸۵	۱۳/۳۷	۱۳/۹۱	+۳/۴۷	--/۴۳
	۱۳/۲۰	۱۳/۳۷	۱۳/۹۱	-۱/۲۹	-۵/۳۸

$$\Delta = \frac{WI(B) - WI(A)}{WI(B)} \times 100$$

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روش‌های جایگزین برای تخمین اندیس کار باند ارزیابی شدند. یکی از روش‌های ساده تعیین اندیس کار باند، استفاده از سینتیک خردایش آسیای گلوله‌ای است. در این روش با انجام تنها دو آزمایش و با استفاده از فرمول‌های ارائه شده، اندیس کار باند محاسبه شده است. مقایسه نتایج حاصل از انجام این روش بر روی نمونه سنگ آهن سه‌چاهون با روش استاندارد باند همخوانی خوبی را نشان داده است. همچنین محاسبه اندیس کار باند با استفاده از روش‌های غیرمستقیم، شامل آسیای سایش و دستگاه وزنه افتان نیز بررسی شد. اندیس کار محاسبه شده با این روش‌ها نیز در حد قابل قبولی به مقادیر استاندارد باند نزدیک بود. به طور کلی اختلاف اندیس کارهای محاسبه شده کمتر از ۶ درصد بوده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های بالا و با صرف وقت، هزینه و خطای کمتر می‌توان اندیس کار باند را با دقت خوبی محاسبه کرد.