

## تأثیر تغییرات اندازه سرنده کنترل در محاسبه ضریب کار مواد معدنی

محمد نوعیپرست

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مریم دلاوریان

فارغ التحصیل کارشناسی استخراج معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۷/۴، تاریخ تصویب ۸۰/۸/۵)

### چکیده

رابطه باند (Bond, 1952) در محاسبه انرژی موردنیاز خردایش مواد معدنی مورد استفاده است و ضریب کار<sup>۱</sup> بیانگر قابلیت خردایش مواد بوده و در رابطه باند بکار می آید. ضریب کار برای هر نوع ماده‌ای مقداری خاص است، که بصورت آزمایشگاهی - محاسباتی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. بمنظور بررسی تغییرات ابعاد دانه‌ها (اندازه سرنده کنترل) در محاسبه ضریب کار، سه نوع ماده معدنی مختلف سرب و روی (الم کوه زنجان)، مس (سرچشمه کرمان) و دولومیت (منطقه آبگرم قزوین) در چهار اندازه ۴۲۵، ۲۱۲، ۱۵۰ و ۱۰۰ میکرون از سرنده کنترل مورد استفاده قرار گرفتند. مجموعاً ۱۲ سری آزمایش انجام گرفت که نتایج و محاسبات مربوط دلات بر افزایش مقدار ضریب کار با افزایش ابعاد دانه‌ها برای هر سه نوع ماده معدنی دارند. رابطه بین  $\sqrt{P_i}$  (اندازه سرنده کنترل) و  $G_i$  (وزن بخشی از ماده که به ازا هر دور گردش آسیا تا ابعاد کوچکتر از  $P_i$  خرد می‌شوند) و همچنین  $P$  (ابعاد روزنه سرنده که ۸۰٪ از محصول آسیا از آن می‌گذرد) و  $P_i$ ، خطی بوده و روابط آنها در محدوده اعتباری (از نظر ابعادی) براساس نتایج تجربی و استفاده از روش رگرسیون ارائه شدند.

### واژه‌های کلیدی: کانه آرائی، خردایش، ضریب کار

### مقدمه

کارخانه کانه آرائی مصرف انرژی بالائی (گاهی تا ۷۰ درصد کل مصرف انرژی کارخانه) را در بر می‌گیرد [۹،۱۰]. بنابراین بمنظور حصول نتایج مطلوب، در مراحل طراحی میزان انرژی موردنیاز واحدهای مختلف خردایش باید مورد محاسبه قرار گیرند و یکی از متداولترین روشها استفاده از رابطه باند [۲،۴] می‌باشد. رابطه باند انرژی موردنیاز جهت کاهش ابعاد دانه‌های خوراک به اندازه دانه‌های محصول را با استفاده از پارامتری که معرف قابلیت خردایش آن ماده است، محاسبه می‌نماید. پارامتر مذکور بنام ضریب کار است، که بنا به تعریف انرژی موردنیاز برای کاهش اندازه مواد بطور تئوری از بینهایت تا ۱۰۰ میکرون می‌باشد و بصورت آزمایشگاهی - محاسباتی [۳] بدست می‌آید.

اندازه کنترلی در اندازه‌گیری ضریب کار سرنده ۱۰۰-۶۵ مش می‌باشد. آنچه که در این مطالعه مورد نظر است، بررسی تغییرات ضریب کار در صورت تغییر اندازه سرنده کنترل، بطور مثال از ۱۰۰ مش به مقادیر درشت تر و یا ریزتر است [۷]. بدان معنا که چنانچه

کانه آرائی با تفکیک کانیهای که جمعاً در یک کانسنگ بطور طبیعی وجود دارد، محصولاتی که دارای ارزش بیشتری هستند را تولید می‌نماید و بدین ترتیب می‌تواند هدفهای بسیار متنوعی از جمله پرعیارسازی، تفکیک براساس ابعاد، کاهش ناخالصی‌های مضر، تفکیک کانیهای باارزش (که باهم وجود دارند) را داشته باشد. به هر حال بطور معمول در مرحله اول کانه آرائی، خردایش کانسنگ (تا آزادسازی کانیها از یکدیگر) انجام می‌شود. باتوجه به آنکه معمولاً حد آزادی کانیهای باارزش (بویژه مواد معدنی فلزی)، بسیار ریز و بطور مثال در حدود ۱۰۰ میکرون می‌باشد، لذا کاهش ابعاد مواد معدنی استخراج شده تا حد مورد نیاز بطور معمول در مراحل مختلف انجام می‌شود. البته چنانچه این کاهش ابعادی در یک مرحله انجام شود، امکان حصول آزادی مطلوب می‌باشد، ولی دانه‌هایی با اندازه‌های بسیار ریز (ریزتر از آنچه که لازم می‌باشد) بدست خواهد آمد، که در روش آرایش ایجاد اختلال خواهد نمود. مراحل خردایش و یا کاهش اندازه (سنگ شکنی و آسیا) در هر

که در آن دانه ای به ابعاد  $F$  به دانه هایی به ابعاد  $P$  در  $n$  بار خردایش تبدیل می شود، و کار لازم نیز با  $W$  نشان داده می شود.  $C$  ضریب ثابتی است که در یکبار خردایش ماده مورد سنجش قرار گرفته و در رابطه (۲) قرار می گیرد.

قانون باند (Bond) [۲،۳،۴] در سال ۱۹۵۲ و توسط (Bond) باند ارائه شده و طبق آن اگر جسمی به اندازه  $F$  تحت تنش به قطعاتی به اندازه  $P$  تبدیل گردد، کار مصرفی متناسب با عکس ریشه دوم اندازه دانه های ایجاد شده می باشد و برای محاسبه کار لازم، باند فرمول زیر را ارائه نمود:

$$W = 10W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (3)$$

که در این رابطه،  $W_i$  ضریب کار ماده معدنی که برحسب کیلووات ساعت برای هر تن کوچک می باشد.  $W_i$  با روش های آزمایشگاهی - محاسباتی و با استفاده از وسایل خردایش مشخص و استاندارد مورد اندازه گیری قرار می گیرد [۳]. این روش ها بصورت تر و خشک و با استفاده از آسیاهای میله ای و یا گلوله ای و یا با انجام برخی آزمایشهای شکست و با استفاده از دستگاه پاندول خاصی انجام می شوند [۵،۶].

یکی از روشهای اندازه گیری ضریب کار استفاده از آسیای گلوله ای باند (Bond Ball Mill) [۳،۹] است که بطریقه خشک در آسیایی با قطر و طول ۳۰۵ میلی متر صورت می پذیرد، و با استفاده از رابطه زیر ضریب کار محاسبه می گردد [۳،۹]:

$$W_i = \frac{44/5}{(P_i)^{0.23} \times (G_i)^{0.82}} \times \frac{1}{\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}} \quad (4)$$

که در آن  $W_i$  ضریب کار ماده معدنی برحسب  $\text{kWh/t}$ ، و  $G_i$  وزن بخشی از ماده که به ازا هر دور گردش آسیا تا ابعاد کوچکتر از سرند  $P_i$  خرد می شود (گرم بر دور)،  $P_i$  اندازه سرند کنترل برحسب میکرون،  $P$  و  $F$  ابعاد روزنه سرندهایی است (برحسب میکرون) که ۸۰٪ از خوراک و محصول به ترتیب از آنها میگذرند.

### شرح آزمایشها

همانگونه که عنوان شد، آزمایشها با استفاده از سه نوع ماده معدنی به شرح زیر صورت پذیرفت:

- الف) نمونه سرب و روی معدن الم کوه زنجان،  
ب) نمونه مس معدن سرچشمه کرمان،

در مورد یک نوع ماده معدنی خاص، اندازه سرند کنترل درشت تر از ۱۰۰ مش باشد، آیا مقدار ضریب کار آن ماده تغییر خواهد نمود؟ و در صورت مثبت بودن پاسخ، تغییرات ضریب کار چه روندی را خواهد داشت؟

باتوجه به هدف مطالعه، سه نوع ماده معدنی مختلف سرب و روی (الم کوه زنجان)، مس (سرچشمه کرمان) و دولومیت (آبگرم قزوین) انتخاب و نمونه های موردنیاز تهیه و چهار اندازه ۴۲۵، ۲۱۲، ۱۵۰ و ۱۰۰ میکرون بعنوان ابعاد کنترلی تعیین شدند. متفاوت بودن مواد معدنی بمنظور افزایش اعتبار دستاورد مطالعه و انتخاب محدوده نسبتاً گسترده اندازه های کنترلی باتوجه به اندازه معمول محصولات در پروسس های کانه آرائی بوده است. باتوجه به توضیحات فوق، آزمایشهای متعددی انجام و همچنین آزمایشهای تکراری نیز بمنظور کنترل نتایج حاصل صورت پذیرفت. براساس نتایج آزمایشگاهی، ضریب کارها محاسبه شده و روند تغییرات پارامترها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و سعی در تعریف رابطه ریاضی تغییرات گردید.

### ملاحظات تئوری

بمنظور محاسبه انرژی موردنیاز در خردایش یک ماده معدنی روابط مختلفی وجود دارد، که مهمترین آنها عبارت از ریتینگر (Rittinger, 1867) [۳،۹،۱۰] کیک (Kick, 1885) [۹،۱۰] و باند (Bond, 1952) [۲،۴] می باشند، که البته روابط ریتینگر و کیک دیگر بصورت عملی کاربردی ندارند، ولی رابطه باند هنوز در محاسبات بکار گرفته می شود.

براساس قانون ریتینگر کار لازم برای خردایش مواد، متناسب با سطح خارجی محصول می باشد [۱۱]، که فرمول آن بصورت زیر می باشد:

$$W = C \left( \frac{1}{P} - \frac{1}{F} \right) \quad (1)$$

که در آن  $P$  و  $F$  اندازه های خوراک و محصول،  $W$  کار موردنیاز و  $C$  ضریب ثابتی است که در یک بار خردایش برای هر ماده مورد محاسبه و در رابطه (۱) قرار داده می شود.

تئوری کیک بر این مبنا است که کار لازم برای ایجاد تغییر شکل در اجسام متناسب با حجم آنها است و مطابق رابطه (۲) بیان شده است:

$$W = CL_m \frac{F}{P} \quad (2)$$



## توضیح و جمع بندی نتایج آزمایش ها

چگالی ظاهری سه نمونه سرب و روی، مس و دولومیت اندازه گیری شد، که به ترتیب ۱/۹، ۱/۴ و ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب بدست آمد. نتایج تجزیه سرندهی خوراک مورد استفاده از این سه نمونه در شکل (۱) ارائه شده است، که براساس آن مقدار  $F_{80}$  برای سرب و روی الم کوه زنجان ۱۵۵۰ میکرون و برای مس سرچشمه ۱۹۵۰ میکرون و برای دولومیت آبگرم ۱۸۰۰ میکرون بدست آمد.  $P_i$  ابعاد روزنه سرندهای کنترل در هر آزمایش برحسب میکرون است، که مقادیر آن از منحنی های سه گانه شکل (۲) (منحنی های تجزیه سرندهی محصولات حاصل از هر آزمایش) برای سه نوع ماده معدنی بدست می آیند. مقادیر  $G_i$  در حین انجام آزمایشهای بدست آمد که در جدول (۱) نتایج حاصل از بررسیهای آزمایشگاهی و همچنین ضریب کار محاسبه شده مربوط ارائه شده است.

همانطوریکه قبلاً نیز اشاره شد در آزمایش های مختلف در مورد هر نمونه، خوراک مورد استفاده کاملاً مشابه بوده که در شکل (۱) توزیع ابعادی آنها ارائه شده است.

مقادیر ضریب کار ( $W_i$ ) بدست آمده برای هر سه نوع ماده معدنی در اندازه های چهارگانه با یکدیگر متفاوت می باشند. ضریب کار برای نمونه سرب و روی در آزمایش های با سرنده کنترل ۴۲۵، ۲۱۲، ۱۵۰ و ۱۰۰ میکرون برابر با ۱۰/۰۷، ۸/۶۴، ۸/۴۶ و ۸/۹۳ می باشند و دلالت بر آن دارد که  $W_i$  و  $G_i$  در آزمایشهای با سرنده کنترل ۴۲۵ میکرون در هر سه مورد، تفاوت بارزی با نتایج حاصل از آزمایش با سرندهای کنترل ریزتر را دارد. این امر بیانگر آن است که ضریب کار مواد معدنی در ابعاد درشت تر افزایش می یابد، زیرا انتخاب شوندهای ذرات برای شکسته شدن با استفاده از گلوله های ریزتر کمتر می شود و یا آنکه یک ضربه گلوله گاهی برای شکستن کافی نیست، و بالطبع به انرژی بیشتری نیاز می باشد که در واقع همان تعریف ضریب تابع شکست<sup>۲</sup> [۱] خواهد بود.

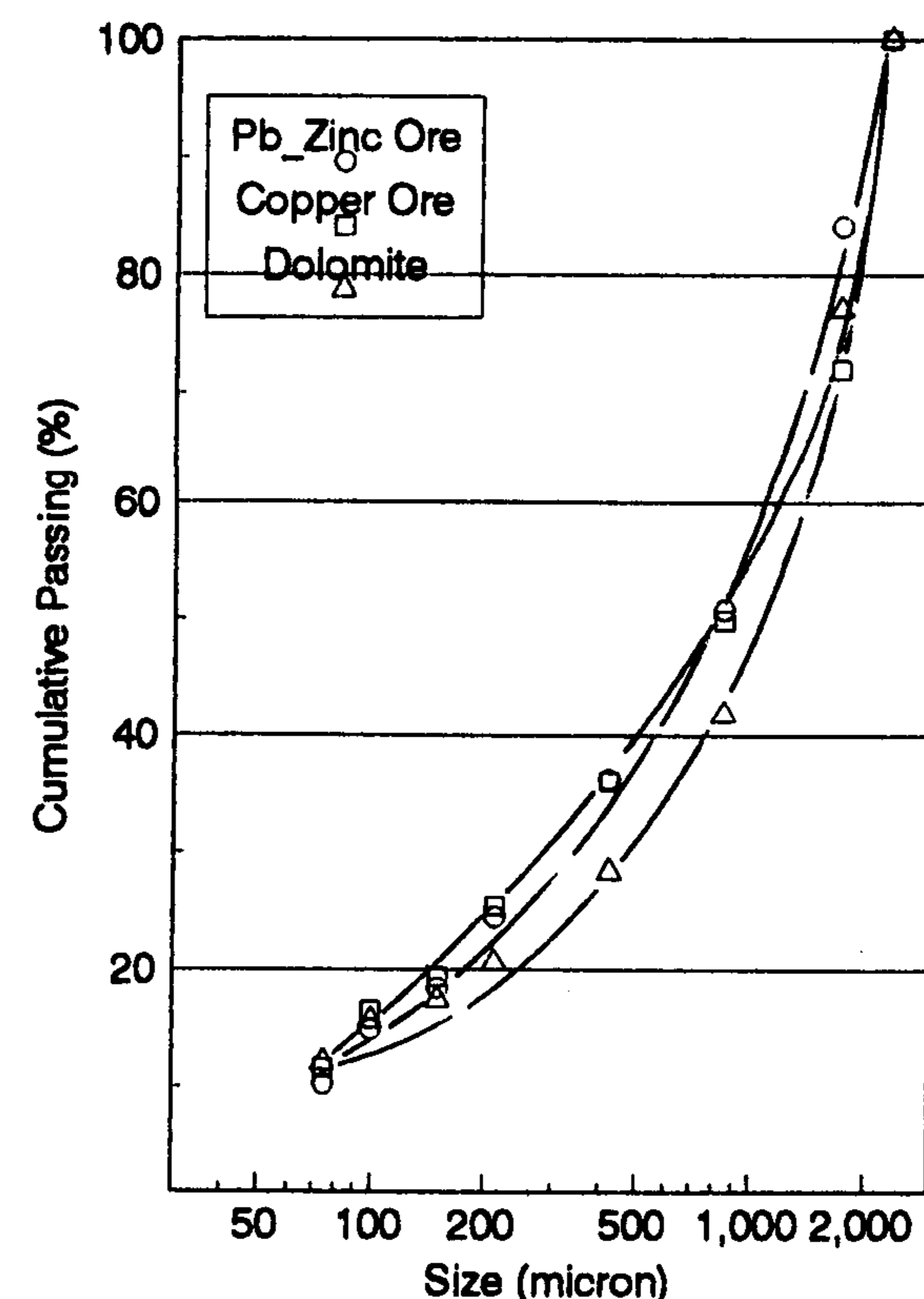
مقادیر بدست آمده  $G_i$  و  $\sqrt{P_i}$  در مورد هر یک از سه نوع معدنی مورد مطالعه در یک دستگاه مختصات رسم و روند خطی آن در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. از نکات جالب توجه این روند خطی، می توان به عبور تقریبی آنها از نقطه صفر اشاره کرد، که با ریزتر شدن سرنده کنترل و نهایتاً صفر شدن ابعاد دانه ها (از نظر تئوریک)، مقدار  $G_i$  (و یا مقدار نرمه تولید شده به ازای هر دور گردش آسیا) نیز کمتر می شود و آن نیز نهایتاً به صفر می رسد.

ج ( نمونه دولومیت منطقه آبگرم قزوین،

برای کنترل از سرندهای با روزنه های ۲۱۲، ۴۲۵، ۱۵۰ و ۱۰۰ میکرون ( $P_i$ ) استفاده شد. بنابراین برای هر نوع ماده معدنی ۴ آزمایش انجام و ضریب کار مربوط در چهار اندازه کنترل مزبور محاسبه شد (مجموعاً ۱۲ سری آزمایش). آسیای مورد استفاده به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی متر بوده، که بجای آسیای گلوله ای استاندارد باند (۳۰۵×۳۰۵ میلی متر) مورد استفاده قرار گرفت [۳،۹]. وزن و تعداد بار خردکننده در آسیا معادل ۵/۹ کیلوگرم و مشتمل بر ۸۵ گلوله فولادی با قطر ۱۵/۸۷ تا ۳۸/۱۰ mm بود. باتوجه به اختلاف ابعاد آسیا و وزن بار خردکننده آسیای استاندارد باند، رابطه مورد استفاده برای محاسبه ضریب کار (رابطه ۴)، بشرح زیر اصلاح گردید [۸،۱۱]:

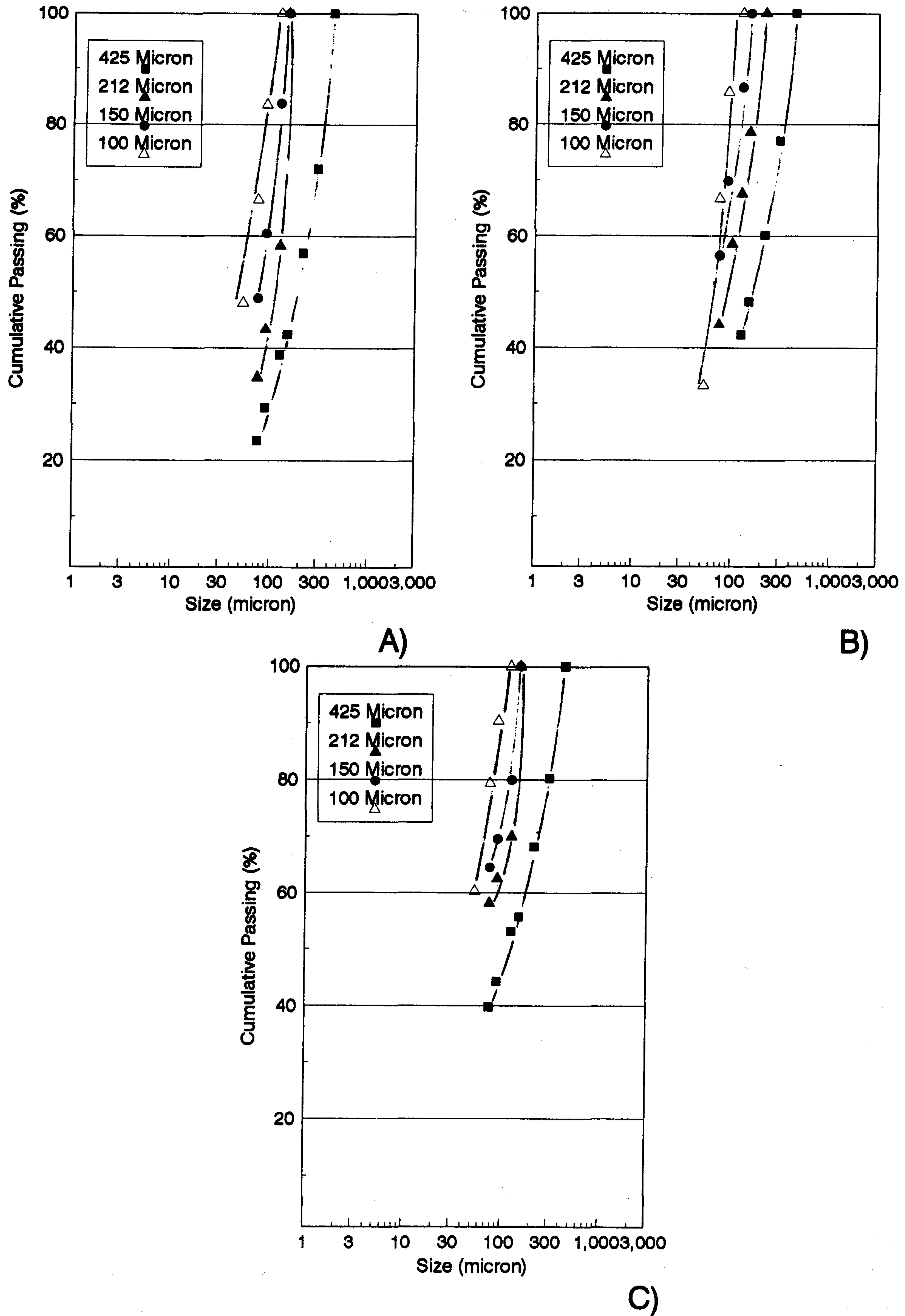
$$W_i = \frac{11/76}{(P_i)^{0.23} \times (G_i)^{0.75}} \times \frac{1}{\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}} \quad (5)$$

پارامترهای موجود در رابطه (۵) همان پارامترهای رابطه (۴) می باشند و تغییر ضریب از ۴۴/۵ به ۱۱/۷۶ و توان  $G_i$  از ۰/۸۲ به ۰/۷۵ بعلت تغییر ابعاد آسیای مورد استفاده و همچنین تغییرات وزن بار خردکننده و بار خردشونده می باشد [۸،۱۱].



شکل ۱: نتایج تجزیه سرندهی نمونه های خوراک برای سه نوع ماده معدنی:

(A) سرب و روی الم کوه زنجان، (B) مس سرچشمه کرمان، (C) دولومیت آبگرم قزوین.



شکل ۲: نتایج تجزیه سرندي محصولات آزمایشهای مختلف با استفاده از سه نوع ماده معدنی و در چهار اندازه سرندي کنترلی مختلف:  
 (A) سرب و روی الم کوه زنجان، (B) مس سرچشمه کرمان، (C) دولومیت آبگرم قزوین.



جدول ۱: نتایج حاصل از آزمایش های مختلف با استفاده از سه نوع ماده معدنی و ضریب کارهای محاسبه شده.

$P_i$	نمونه سرب و روی الم کوه $F = 1550(\mu m)$			نمونه مس سرچشمه $F = 1950(\mu m)$			نمونه دولومیت آبگرم $F = 1800(\mu m)$		
	$P$ ( $\mu m$ )	$G_i$ (g)	$W_i$ (kwh/t)	$P$ ( $\mu m$ )	$G_i$ (g)	$W_i$ (kwh/t)	$P$ ( $\mu m$ )	$G_i$ (g)	$W_i$ (kwh/t)
۴۲۵	۳۲۵	۰/۹۹	۱۰/۰۷	۳۲۰	۱/۲۲	۷/۵۷	۳۰۰	۰/۳۶	۱۸/۴۱
۲۱۲	۱۶۵	۰/۶۹	۸/۶۴	۱۵۵	۰/۹	۶/۴۴	۱۵۰	۰/۳۱	۱۴/۲۲
۱۵۰	۱۱۵	۰/۵۶	۸/۴۶	۱۱۰	۰/۶۶	۶/۹۸	۱۲۵	۰/۳۲	۱۳/۲۵
۱۰۰	۸۵	۰/۴۵	۸/۹۳	۸۷	۰/۶۰	۷/۰۷	۷۶	۰/۲۲	۱۳/۹۳

محاسبه  $G_i$  با دانستن  $P_i$  خواهیم بود که این امر خود از میزان خطای موجود در آزمایش های مربوط به محاسبه ضریب کار خواهد کاست.

شکل (۳-ب) رابطه خطی  $P_i$  و  $P$  را برای هر سه نوع ماده معدنی ارائه می نماید، یعنی آنکه:

$$P_i = K_p P \quad (7)$$

همانند قبل براساس روش رگرسیون و مجموع کمترین مربعات، بهترین مقادیر  $K_p$  برای سرب و روی، مس و دولومیت مورد بررسی بترتیب برابر با ۱/۳۰۷، ۱/۳۷۵ و ۱/۰۵۸ بدست می آیند و لذا رابطه (۷) بصورت زیر ارائه می گردد:

$$P_i = 1/307P \quad (7-1) \quad \text{- سرب و روی}$$

$$P_i = 1/375P \quad (7-2) \quad \text{- مس}$$

$$P_i = 1/058P \quad (7-3) \quad \text{- دولومیت}$$

روابط (۷-۱)، (۷-۲) و (۷-۳) نیز تخمینی از مقادیر  $P$  را در محاسبه و ضریب کار با دانستن اندازه سرنده کنترل را بدست می دهند.

حال با توجه به روابط تعریف شده بین  $G_i$  و  $\sqrt{P_i}$  و همچنین  $P_i$  و  $P$ ، میتوان نسبت به تخمین ضریب کار محاسباتی اقدام نمود. یعنی آنکه به ازای یک مقدار دلخواه از  $P_i$  (روزنه سرنده کنترل)، می توان مقدار متناظر  $P$  و  $G_i$  را با استفاده از مدلهای خطی تعریف شده، بدست آورد و سپس با استفاده از رابطه (۵) ضریب کار محاسباتی نظیر را محاسبه نمود. جدول (۲) نتایج حاصل از محاسبات ضریب کار با استفاده از مدلهای تعریف شده را برای  $P_i$  های مختلف ۴۲۵، ۲۱۲، ۱۵۰ و ۱۰۰ میکرون (ابعاد سرندهای کنترل) را نشان می دهد. مقایر  $P$  و  $G_i$  مندرج در جدول (۲) با

شکل (۳-ب) براساس مقادیر  $P_i$  و  $P$  برای نمونه ماده معدنی ترسیم شده است، که روند خطی مجموعه را بوضوح نشان می دهد. البته کاهش بودن روند  $P_i$  و  $P$ ، قابل پیش بینی بوده است، چراکه با سرنده کنترل بطور مثال ۴۲۵ میکرون بطور طبیعی باید مقدار  $P$  از ۴۲۵ کمتر باشد. قابل ذکر می داند که روند خطی حاصل از نتایج آزمایشها برای سه نوع ماده معدنی خاص مورد استفاده موضوع جدیدی می باشد، که در بیان رابطه ریاضی آن در نظر گرفته شده است.

رابطه خطی  $\sqrt{P_i}$  و  $G_i$  بصورت  $G_i = f(\sqrt{P_i})$  نوشته می شود و  $G_i$  متناسب با ریشه دوم روزنه سرنده کنترل ( $\sqrt{P_i}$ ) می باشد، یعنی آنکه:

$$G_i = K_1 \sqrt{P_i} \quad (6)$$

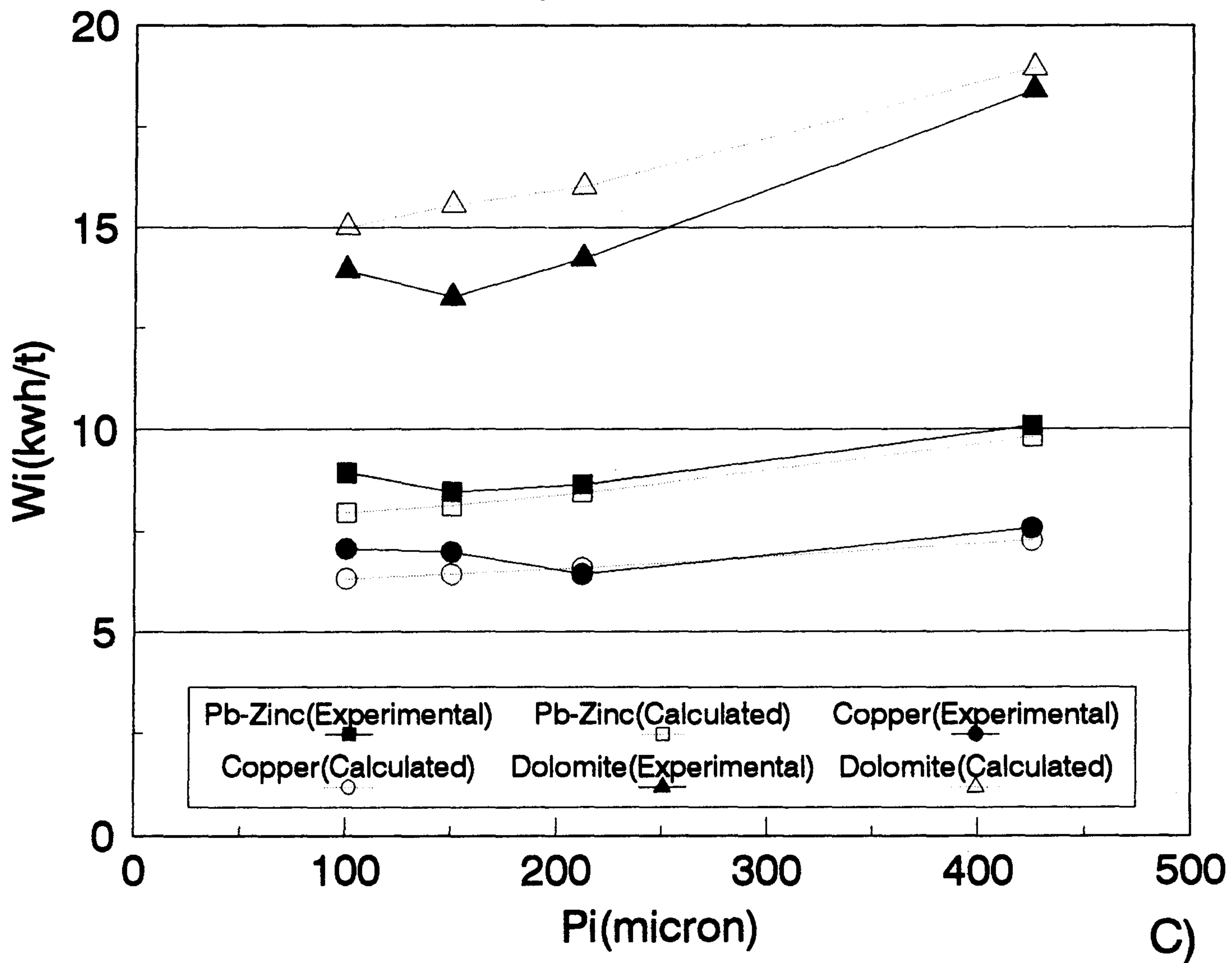
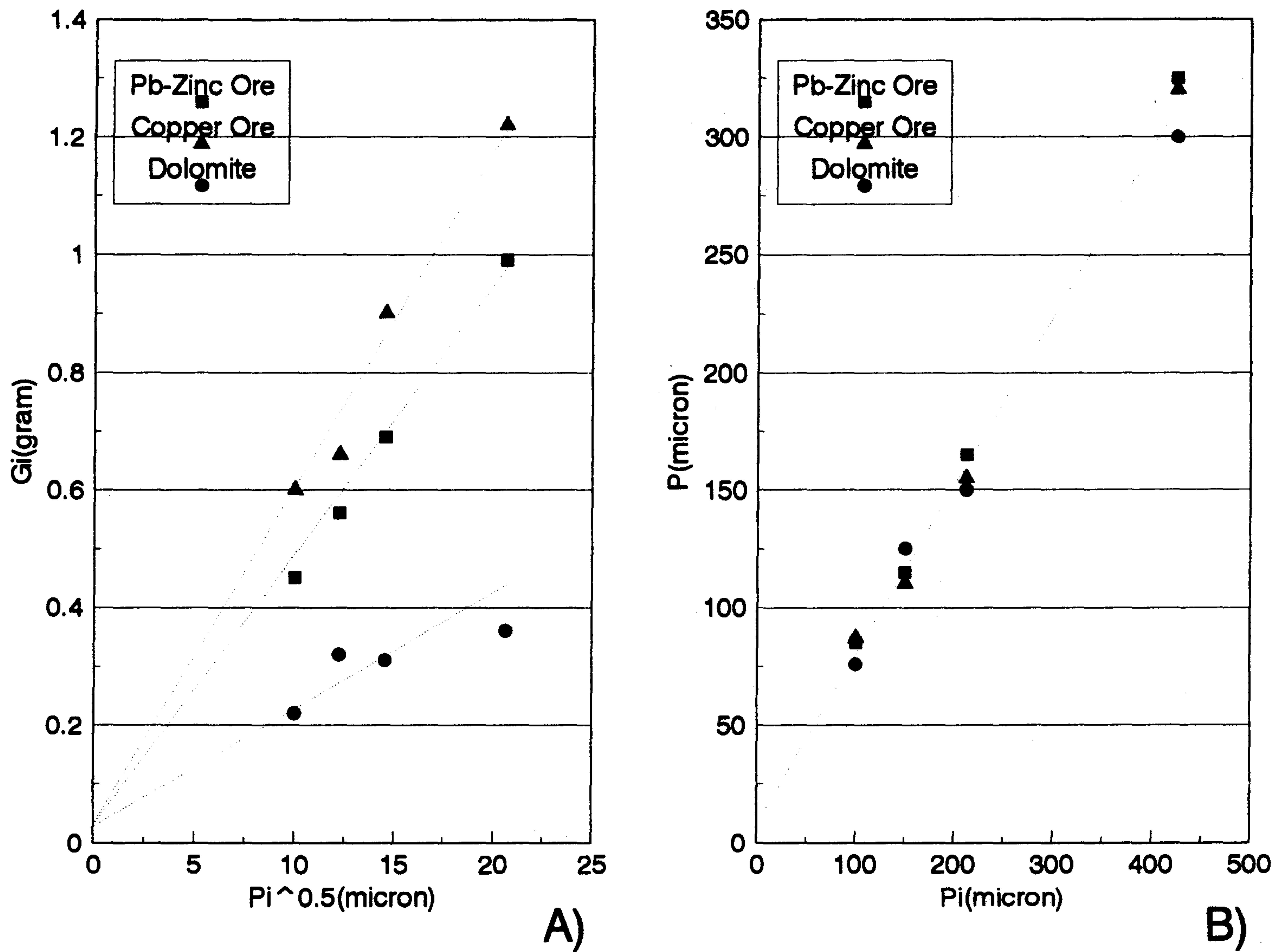
$K_1$  ضریبی است، که به قابلیت خردایش مواد بستگی دارد و در مواد با ضریب کار بالاتر مقدار آن بیشتر خواهد بود. با استفاده از روش رگرسیون و مجموع کمترین مربعات و استفاده از اطلاعات حاصل از آزمایش های مختلف و مقادیر اندیس کار محاسبه شده (جدول ۱)، مقادیر  $K_1$  برای سرب و روی، مس و دولومیت مورد بررسی را به ترتیب برابر ۰/۰۴۸، ۰/۰۶۰، ۰/۰۲۴ بدست می دهد و رابطه (۶) برای سه نوع ماده معدنی بصورت زیر ارائه می گردد:

$$G_i = 0/048 \sqrt{P_i} \quad (6-1) \quad \text{- سرب و روی زنجان}$$

$$G_i = 0/060 \sqrt{P_i} \quad (6-2) \quad \text{- مس سرچشمه}$$

$$G_i = 0/024 \sqrt{P_i} \quad (6-3) \quad \text{- دولومیت آبگرم}$$

روشن است که با بدست آمدن مقادیر  $K_1$  و تعریف روابط (۶-۱)، (۶-۲) و (۶-۳)، در محدوده اعتبار مدل های خطی، قادر به



شکل ۳: منحنی های مربوطه به :

(A) مقادیر  $G_i$  و  $\sqrt{P_i}$  ، (B) مقادیر  $P_i$  و  $P$  ، (C) مقادیر ضریب کار حاصل از آزمایش ها و محاسباتها.



جدول ۲: خلاصه نتایج حاصل از محاسبات براساس مدل‌های خطی ارائه شده.

$P_i$	نمونه سرب و روی الم کوه			نمونه مس سرچشمه			نمونه دولومیت آبگرم		
	$F = 1550(\mu m)$			$F = 1950(\mu m)$			$F = 1800(\mu m)$		
$(\mu m)$	P	$G_i$	$W_i$	P	$G_i$	$W_i$	P	$G_i$	$W_i$
	$(\mu m)$	(g)	(kwh/t)	$(\mu m)$	(g)	(kwh/t)	$(\mu m)$	(g)	(kwh/t)
۴۲۵	۳۲۵/۱۷	۰/۹۹	۹/۸۰	۳۰۹/۰۹	۱/۲۴	۷/۲۷	۴۰۱/۷۰	۰/۴۹	۱۸/۹۶
۲۱۲	۱۶۲/۲۰	۰/۷۰	۸/۴۴	۱۵۴/۱۸	۰/۸۷	۶/۵۸	۲۰۰/۳۸	۰/۳۵	۱۶/۰۱
۱۵۰	۱۱۴/۷۷	۰/۵۹	۸/۱۲	۱۰۹/۰۹	۰/۷۳	۶/۴۳	۱۴۱/۷۸	۰/۲۹	۱۵/۵۶
۱۰۰	۷۶/۵۱	۰/۴۸	۷/۹۵	۷۲/۷۳	۰/۶۰	۶/۳۲	۹۴/۲۵	۰/۲۴	۱۵/۰۰

### خلاصه و نتیجه گیری

بمنظور بررسی تغییرات مقدار ضریب کار به ازای افزایش و یا کاهش ابعاد دانه های مورد استفاده (افزایش و یا کاهش روزه سرند کنترل) سه نوع ماده معدنی متفاوت سرب و روی (الم کوه زنجان)، مس (سرچشمه کرمان) و دولومیت (منطقه آبگرم قزوین) مورد استفاده قرار گرفتند. مواد معدنی فوق هر یک در چهار اندازه کنترلی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. مجموعاً ۱۲ سری آزمایش انجام و پس از محاسبات و تجزیه و تحلیل، نتایج زیر بدست آمدند:

- مقادیر ضریب کار در اندازه های درشت تر برای هر سه نوع ماده معدنی افزایش نشان می دهند.

- رابطه بین  $G_i$  و  $\sqrt{P_i}$  برای هر سه نوع ماده معدنی بصورت خطی است.

- رابطه بین  $P$  و  $P_i$  برای هر سه نوع ماده معدنی بصورت خطی است.

- مدل ریاضی خطی برای  $G_i$  و  $\sqrt{P_i}$  و همچنین برای  $P$  و  $P_i$  معرفی و ضرایب مربوطه در محدوده اعتباری هر مدل براساس نتایج تجربی و استفاده از روش رگرسیون بدست آمده اند.

- مقادیر ضریب کار بدست آمده براساس نتایج حاصل از آزمایش ها و مقادیر ضریب کار محاسباتی با استفاده از مدل های ریاضی تعریف شده هماهنگی مطلوبی را نشان می دهند.

استفاده از روابط (۶-۱)، (۶-۲) و (۶-۳) (برای  $G_i$ ) و (۷-۱)، (۷-۲) و (۷-۳) (برای  $P$ ) محاسبه شده اند. در نهایت مقادیر  $W_i$  محاسباتی با کاربرد مقادیر  $P_i$  و  $P$  و  $G_i$  محاسباتی در رابطه (۵) بدست آمده اند.

همانگونه که مشاهده می شود، مقادیر ضریب کار حاصل از آزمایش (جدول ۱) و محاسباتی (جدول ۲) هماهنگی مطلوبی را نشان می دهند و این امر بویژه در موارد سرب و روی و مس قابل مقایسه و در شکل (۳-۳) کاملاً مشهود می باشد. براساس مدل های خطی تعریف شده، می توان محاسبه نمود که بطور مثال برای ذرات دانه هایی با اندازه ( $P_i$  معادل) ۱۲۰۰ میکرون و مقدار  $G_i$  برای سرب و روی، مس و دولومیت به ترتیب معادل ۱/۶۶، ۲/۰۸ و ۰/۰۸۲ خواهند بود. البته با توجه به اینکه هیچگاه در صنعت و بصورت عملی سرند کنترل ۱۲۰۰ میکرون مورد ملاک قرار نمی گیرد (چرا که معمولاً وسایل خردایش در کانه آرائی بمنظور رساندن ابعاد ماده معدنی به اندازه های ریزتر از ۱۲۰۰ میکرون بکار می روند)، لذا محدوده اعتباری این روند خطی نیز مورد تأیید قرار می گیرد.

### مراجع

- 1 - Austin, L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T., (1984). "Process engineering of size reduction : Ball milling." *Society for Mining Engineers, AIME Inc.*, New York.
- 2 - Bond, F. C. (1960). "Confirmation of the third theory." *AIME Transactions*, Vol. 217, PP. 139-153.

- 3 - Bond, F. C. (1961). "Crushing and grinding calculations, Part I." *British Chemical Engineering*, Vol. 6, No. 6, PP. 378-385.
- 4 - Bond, F. C. (1952). "The third theory of comminution." *AIME Transactions*, Vol. 193, PP. 484-494.
- 5 - Gill, V. B. (1991). *Materials beneficiation*. Springer-Verlag, New York.
- 6 - Lowrison, G. C. (1974). *Crushing and grinding, the size reduction of solids materials*. CRC Press, Inc., Cleveland.
- 7 - Magdalinovic, N. M. (1989). "Calculation of energy required for grinding in Ball Mill." *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 25, PP. 41-46.
- 8 - Nematollahi, H. (1994). "New size laboratory ball mill for Bond Work Index determination." *Mining Engineering*, Vol. 46, No. 4, PP. 352-353.
- 9 - Weiss, N. L. (1985). *SME mineral processing handbook*. Society of Mining Engineers.
- 10 - Wills, B. A. (1997). *Mineral processing technology, 6th Edition*. Butterworth-Heineman, Oxford.

۱۱ - نعمت‌اللهی، ح. "کانه آرائی." انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۷۵).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Work Index

2 - Selection Function