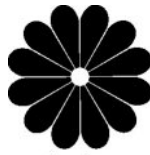


به نام خداوند جان و خرد



پوران پژوهش

کتاب ارشد

مجموعه مهندسی معدن

دروس تخصصی فرآوری

(کانه آرای، فلوتاسیون)

چاپ اول

مؤلف:

امیر کشت گر، محسن حیدری

پاییز ۱۳۹۶

سرشناسه	: کشتگر، امیر، ۱۳۷۲ -
عنوان و نام پدیدآور	: دروس تخصصی فرآوری (کانه‌آرایی - فلوتاسیون) / مولف امیر کشتگر، محسن حیدری.
مشخصات نشر	: تهران: پوران پژوهش، ۱۳۹۶ .
مشخصات ظاهری	: ۲۲۹ ص.
فروست	: کتاب ارشد، مجموعه مهندسی معدن.
شابک	: 978-964-184-604-8
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپا
موضوع	: سنگ معدن -- آماده‌سازی -- راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	: Ore-dressing -- Study and teaching (Higher)
موضوع	: سنگ معدن -- آماده‌سازی -- آزمون‌ها و تمرین‌ها (عالی)
موضوع	: Ore-dressing -- Examinations, questions, etc. (Higher)
موضوع	: فلوتاسیون -- مسائل، تمرین‌ها و غیره
موضوع	: Flotation -- Problems, exercises, etc
شناسه افزوده	: حیدری، محسن، ۱۳۷۲
رده‌بندی کنگره	: TN۵۰۰/ک۵د۴ ۱۳۹۶
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۲/۷۰۷۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۵۰۱۵۱۸۰

انتشارات پوران پژوهش

نام کتاب:	دروس تخصصی فرآوری
تألیف:	امیر کشتگر، محسن حیدری
ناشر:	پوران پژوهش
حروفچینی:	پوران پژوهش
چاپ و صحافی:	دالاهو - ولیعصر
شمارگان:	۲۰۰ نسخه
نوبت چاپ:	اول - پاییز ۱۳۹۶
قیمت:	۱۹۰۰۰ تومان
شابک:	۹۷۸-۹۶۴-۱۸۴-۶۰۴-۸ ISBN: 978-964-184-604-8

دفتر مرکزی: میدان انقلاب - ابتدای کارگر جنوبی - کوچه مهدیزاده - پلاک ۹ - واحد ۴ و ۵ تلفن: ۶۶۹۲۷۰۴۰

این اثر، مشمول قانون حمایت مؤلفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه مؤلف و ناشر، نشر یا بخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

به نام تنها پرستیدنی که قلم را آفرید

پیش‌گفتار انتشارات

نگاهی به شمار داوطلبان آزمون کارشناسی ارشد نشان می‌دهد که در این سال‌ها درخواست تحصیل در دوره‌های تحصیلات تکمیلی دانشگاه‌ها افزایش چشمگیری داشته است. دشواری پیش روی بیشتر داوطلبان، گوناگونی منابع درسی و نبود دسترسی به آنها و همچنین نمونه آزمون‌های مناسب برای تمرین و فهم بیشتر مفاهیم درسی است.

مدیریت بنیاد انتشاراتی پوران پژوهش، آقای دکتر احمد هژبر و همسرشان بانو افسانه عبدی با بیش از ۲۰ سال کوشش در راستای برآورده‌سازی نیاز داوطلبان، با سیاست کلی چاپ کتاب‌های ارزنده با بهایی درخور، آماده‌سازی و گردآوری چهار مجموعه‌ی گوناگون با انگیزه‌های گوناگون را در دستور کار قرار داده است. مجموعه‌ی نخست با نام کتاب ارشد (با جلد آبی‌رنگ) که تاکنون به دست داوطلبان رسیده، با پذیرش چشمگیری همراه بوده است. در هر عنوان کتاب ارشد، پس از شرح کامل درس در هر فصل، پرسش‌های چهارگزینه‌ای آزمون‌های سراسری و آزاد چند سال گذشته با پاسخ‌های تشریحی آورده شده است. شرح درس در هر کتاب از این مجموعه به گونه‌ای است که برای دانشجویان سال‌های پایین‌تر سودمند است و نیز یک منبع درسی مناسب برای دانشجویان و استادان دانشگاه‌ها می‌باشد. کتاب ارشد نخستین بار در مهرماه سال ۱۳۸۰ در قالب پانزده عنوان به داوطلبان شناسانده شد و هم‌اینک بیش از ۳۰۰ عنوان را دربرمی‌گیرد. مجموعه‌ی دوم با نام آزمون‌های جامع ارشد و دکتری (با جلد سیاه رنگ) به گونه‌ای گردآوری شده است که دانشجویان دفترچه‌های آزمون‌های سراسری کارشناسی ارشد و دکتری سال‌های گذشته را با پاسخ‌های تشریحی در یک کتاب خواهد داشت.

مجموعه‌ی سوم با نام بانک تست ارشد (با جلد نارنجی رنگ) در دروس پایه و تخصصی هر رشته، یک کتاب کار به شمار می‌رود که در آن پرسش‌های طبقه‌بندی شده به همراه پاسخ‌های تشریحی آورده شده است تا دانشجو با حل و بررسی آنها توانایی بایسته برای پاسخ‌گویی به آزمون‌ها را به دست آورد. مجموعه‌ی چهارم که با جلد قهوه‌ای رنگ عرضه شده و به عنوان کتاب‌های مرجع در دانشگاه‌ها آموخته می‌شود. این کتاب‌ها شامل تألیفات اساتید برجسته کشور و همچنین ترجمه آثار گران‌بهای مؤلفان بزرگ خارج از کشور می‌باشد.

در پایان از خوانندگان محترم تقاضا می‌شود پیشنهادات و انتقادات خود را به پست الکترونیکی انتشارات پوران پژوهش info@pouran.net ارسال فرمایند.

به نام خدا

مقدمه مؤلف

به یاری خداوند منان، تلاش‌های شبانه‌روزی گروه نویسندگان کتاب‌های کنکور مهندسی معدن به بار نشست و کتابی جامع و کم‌نقص، درخور داوطلبان کنکور کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن نوشته شد. همانطور که می‌دانید، متأسفانه داوطلبان کنکور این رشته از فقدان مرجع آموزشی کامل و تست‌های جدید کنکور رنج می‌برند. ما این مزده را به شما می‌دهیم که به کمک این کتاب‌ها، بدون نیاز به هیچ جزوه و کتاب دیگر، می‌توانید بدون دغدغه به درس خواندن بپردازید. زیرا ما تمامی جزوات اساتید طراح و کتب مرجع را خوانده‌ایم و با بررسی دقیق کنکورهای سالیان گذشته، نکات مورد نیاز را برای شما جمع‌آوری کرده‌ایم. مجموعه کتاب‌های کنکور مهندسی معدن توسط رتبه‌های برتر کنکور و دانشجویان برتر دانشگاه‌های تهران، امیرکبیر و تربیت مدرس نوشته شده است. این کتب شامل دو بخش درسنامه و تست‌های کنکور می‌باشد. بخش درسنامه به شکلی جامع و کامل نوشته شده است که بعد از مطالعه دقیق آن، می‌توانید به آسانی به تمام تست‌های کنکور سال‌های گذشته پاسخ دهید.

کتاب حاضر، شامل ۲ بخش کانه‌آرایی، فلوتاسیون است، که دربرگیرنده دروس تخصصی دو گرایش فرآوری مواد معدنی و محیط زیست معدنی می‌باشند. روش صحیح استفاده از این کتاب، ابتدا مطالعه درسنامه و سپس بررسی تست‌های کنکور است.

می‌توان به جرأت گفت که گرایش فرآوری پرتعدادترین گرایش رشته مهندسی معدن است. علت می‌تواند میان‌رشته‌ای بودن و گستردگی بسیار زیاد این گرایش باشد. لذا خود را ملزم به نگارش این مجموعه دانستیم. درس کانه‌آرایی نسبت به درس فلوتاسیون گستردگی بیشتری دارد. چرا که این درس تمامی مباحث مهندسی فرآوری را شامل می‌شود. با توجه به این موضوع که در سال‌های اخیر ضمن دگرگونی کنکور کارشناسی ارشد در رشته مهندسی معدن و مفهومی‌تر و محاسباتی‌تر شدن آن، در این مجموعه تمرکز بیشتری بر روی مباحث خردایش و طبقه‌بندی قرار گرفته است. در انتهای این بخش سؤالات درس کانه‌آرایی آزمون ۹۶ به صورت مجزا ارائه شده است. در نگارش این بخش از کتاب کانه‌آرایی (دکتر نعمت‌اللهی) و مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی (دکتر صمد بنیسی) استفاده شده است.

بخش دوم دربرگیرنده درس فلوتاسیون است. داوطلبان کنکور به علت اینکه درس فلوتاسیون دربرگیرنده مباحث شیمی است، که به ظاهر پیچیده به نظر می‌رسد از این درس دوری کرده، میلی به مطالعه آن ندارند. سؤالات کنکور سال‌های گذشته نشان می‌دهد که این درس یکی از مهم‌ترین دروس رشته فرآوری مواد معدنی است و مطالعه آن نقش مهمی را در قبولی داوطلبان بازی می‌کند. روش نگارش این بخش به این گونه است که در فصل اول، کلیات و پایه و اساس فلوتاسیون به تفصیل ارائه شده و در فصل دوم آرایش مواد مختلف به روش فلوتاسیون آورده شده است. در انتها همانند بخش قبل سؤالات کنکور ۹۶ به صورت مجزا آورده شده است. در نگارش این بخش علاوه بر کتاب کانه‌آرایی (دکتر نعمت‌اللهی) از کتاب مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی (دکتر صمد بنیسی) و فلوتاسیون (دکتر بهرام رضایی) استفاده شده است.

به یادتان هستیم به یادمان باشید

امیر کشت‌گر - محسن حیدری

Amir.Keshtgar@gmail.com

فهرست مطالب

بخش اول: کانه آرایبی	۱
فصل اول: کلیات کانه آرایبی	۳
فصل دوم: موازنه جرم در مدارهای کانه آرایبی	۲۱
فصل سوم: اصول خردایش و سنگ شکنی	۳۹
فصل چهارم: آنالیز ابعادی	۷۱
فصل پنجم: روش های آرایش ثقلی	۱۰۱
فصل ششم: روش های آرایش الکتریکی و مغناطیسی	۱۳۷
فصل هفتم: مطالب تکمیلی	۱۵۵
آزمون جامع ۱۳۹۶	۱۶۳
بخش دوم: فلوتاسیون	۱۶۹
فصل اول: مبانی فلوتاسیون	۱۷۱
فصل دوم: آرایش مواد به روش فلوتاسیون	۲۰۱
آزمون جامع ۱۳۹۶	۲۲۷

بخش اول

کانه آرایه

فصل ۱

کلیات کانه‌آرایی

تعاریف

کانه‌آرایی (*Mineral Processing*): به مجموعه عملیات عمدتاً فیزیکی گفته می‌شود که بر روی یک ماده معدنی خام انجام می‌شود که از آن یک یا چند محصول قابل فروش و یک باطله حاصل گردد.

کانی (*Mineral*): ماده معدنی طبیعی که دارای ترکیب شیمیایی و ساختمان اتمی ثابتی است.

کانسار (*Deposit*): تمرکز کافی کانی‌ها به طوری که شرایط برای استخراج آنها مناسب باشد.

کانه (*Ore*): کانساری که مورد تقاضا است و استخراج آن اقتصادی است.

گانگ (*Gangue*): مواد اضافی و ناخواسته کانه که به آن باطله هم گفته می‌شود.

عیار (*Grade*): درصد فلز با ارزش در کانه مورد نظر.

بار اولیه (*Feed*): ماده معدنی وارده به هریک از دستگاه‌ها یا مدارهای کانه‌آرایی را بار اولیه گویند.

کنسانتره (*Concentrate*): محصول پر عیار شده توسط کارخانه کانه‌آرایی.

باطله (*Tailing*): محصولی که عمدتاً شامل گانگ و مواد غیر لازم باشد.

جایگاه کانه‌آرایی

عمده ترین جایگاه کانه‌آرایی بعد از استخراج ماده معدنی و قبل از متالورژی استخراجی است. اما این جایگاه می‌تواند تغییر یابد. به عنوان مثال یکی از مباحث اصلی کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی هیدرومتالورژی است که خود شاخه ای از متالورژی استخراجی است. همچنین پس از آشنایی کامل با مباحث این رشته می‌توان در صنایع سیمان، سرامیک، شیشه، تصفیه پساب‌های صنعتی، کاغذسازی و رنگ‌سازی نیز فعالیت کرد.

اهمیت کانه‌آرایی: با توجه به مخارج زیاد و مصرف انرژی مربوط به حمل و نقل مواد معدنی و عملیات ذوب، کانه‌آرایی باعث کاهش هزینه حمل و نقل، ذوب و کاهش اتلاف فلز می‌شود.
هدف کانه‌آرایی: به دست آوردن یک یا چند محصول با خصوصیات مورد نظر که از لحاظ اقتصادی موجه باشد.

نکته: با ارزش و بی ارزش بودن هر ماده معدنی تابعی از زمان، پیشرفت‌های تکنولوژی و موقعیت اقتصادی است.

مزایای کانه‌آرایی:

- کاهش هزینه حمل و نقل
- کاهش هزینه ذوب (هزینه استخراج فلز)
- کاهش اتلاف فلز

عملیات‌های عمده و اساسی کانه‌آرایی

آزادسازی (Liberation): اولین مرحله کانه‌آرایی شامل خردایش و آزاد کردن کانی‌های با ارزش از گانگ است.

یکی از مهمترین اهداف خردایش، آزاد کردن کانی‌های با ارزش از گانگ در بزرگترین اندازه ممکن است.

درجه آزادی (Degree of Liberation): درصدی از کل کانی با ارزش که به صورت آزاد وجود دارد.

پرعیارسازی (Concentration): دومین مرحله، پرعیار کردن یا جدا کردن کانی‌های با ارزش از گانگ است. این عملیات براساس مشخصات فیزیکی، شیمیایی و فیزیکی شیمیایی مواد بنا شده است.

عمده‌ترین این خاصیت‌ها و روش‌های جدایش آن‌ها، که در کانه‌آرایی به کار می‌رود عبارتند از:

- ۱- تفاوت وزن مخصوص (روش ثقلی)
- ۲- تفاوت خاصیت مغناطیسی (روش مغناطیسی)
- ۳- تفاوت خاصیت نوری و رادیواکتیو (روش‌های سنگ جواری و مکانیکی)
- ۴- تفاوت هدایت الکتریکی (سطحی) (روش‌های الکترواستاتیکی)
- ۵- تفاوت خاصیت ترشوندگی (روش فلوتاسیون)
- ۶- تفاوت خاصیت انحلال‌پذیری (روش هیدرومتالورژی)
- ۷- تفاوت خاصیت حرارتی (روش پیرومتالورژی)
- ۸- تفاوت خاصیت الکتریسته (هیدرولیز) (روش الکترومتالورژی)

انواع محصولات

هدف از خرد کردن یک سنگ معدنی، دستیابی به درجه آزادی کافی است و به دلایل فنی و اقتصادی، هرگز درجه آزادی به ۱۰۰٪ نمی‌رسد. بنابراین با در نظر گرفتن یک کانه ساده که تنها متشکل از دو کانی (به طور مثال گالن و کلسیت) باشد، پس از عملیات خرد کردن، عملیات آرایش تولید سه نوع محصول می‌کند. دو محصول آن شامل محصول آراسته (گالن) و باطله (کلسیت) محصولات نهایی هستند. محصول سوم شامل گالن درگیر با کلسیت است که محصول میانی (*middling*) نامیده می‌شود. این محصول را نه می‌توان به عنوان باطله و نه محصول آراسته در نظر گرفت.

عملیات آرایش بر روی محصول میانی مستلزم خرد کردن بیشتر این بخش است.



انواع محصولات میانی

در صورتی که بخش تیره دانه‌های نشان داده شده در شکل فوق کانی با ارزش و بخش روشن گانگ فرض شود، نتیجه روش‌های مختلف آرایش بر روی آنها به شرح زیر خواهد بود:

آ- با توجه به اینکه چگالی چنین دانه‌ای در حد فاصل چگالی‌های کانی با ارزش و گانگ است، در روش‌های ثقلی، بسته به چگالی جدایش، ممکن است به بخش پرعیار شده یا باطله منتقل شود. در روش مغناطیسی نیز بسته به شدت میدان مغناطیسی، ممکن است به بخش پرعیار شده یا

- باطله منتقل شود. در روش‌هایی که بر مبنای خواص سطحی پایه‌گذاری شده‌اند (مانند روش‌های شیمیایی و فلوتاسیون)، چنین دانه‌ای قابل جدایش است.
- ب- چنین دانه‌ای در روش‌های ثقلی و مغناطیسی به بخش میانی منتقل می‌شود، ولی به روش‌های شیمیایی و فلوتاسیون قابل جدایش نیست.
- ج- چنین دانه‌ای در روش‌های ثقلی و مغناطیسی مشابه گانگ رفتار می‌کند، ولی به روش‌های شیمیایی و فلوتاسیون به خوبی قابل جدایش است.
- د- چنین دانه‌ای را تنها با روش شیمیایی می‌توان بازیابی کرد.
- ه- رفتار این دانه مشابه حالت (ب) است.
- و- رفتار این دانه نیز مشابه حالت (ب) است.

شاخص‌های ارزیابی عملیات جدایش

قبل از بیان محاسبات به معرفی علائم و درک دقیق مفهوم آن‌ها می‌پردازیم.

F : که از ابتدای کلمه *Feed* گرفته شده و نشان دهنده وزن خشک بار اولیه ورودی به یک سیستم کانه‌آرایی است.

C : که از ابتدای کلمه *Concentrate* گرفته شده و نشان دهنده وزن خشک کنسانتره است.

T : که از ابتدای کلمه *Tailing* گرفته شده و نشان دهنده وزن خشک باطله است.

f : نشان دهنده عیار بار اولیه و یا بنا به تعریف درصد وزن ماده با ارزش قابل استخراج به کل وزن بار اولیه است.

c : درصد وزن ماده با ارزش در کنسانتره به کل وزن کنسانتره (عیار کنسانتره)

t : درصد وزن ماده با ارزش در باطله به کل وزن باطله (عیار باطله)

عیار (*Grade*): به محتوی محصول قابل فروش در محصول نهایی گفته می‌شود.

$$\text{عیار (\%)} = \frac{\text{وزن فلز در کنسانتره}}{\text{وزن کنسانتره}} \times 100 =$$

بازیابی (*Recovery*): به مقدار ماده یا عنصر با ارزش که به کنسانتره راه پیدا می‌کند، گفته می‌شود.

$$\text{بازیابی (\%)} = \frac{\text{مقدار فلز در کنسانتره}}{\text{مقدار فلز در خوراک}} \times 100 =$$

$$R = \frac{C_c}{F_f} \times 100$$

بازیابی وزنی:

$$\frac{C}{F} = \frac{f - t}{c - t}$$

بنابراین رابطه بازیابی بر اساس عیار به صورت زیر است:

$$R = \frac{c(f - t)}{f(c - t)} \times 100$$

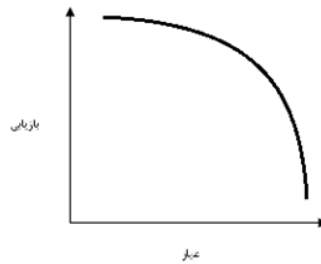
نسبت پر عیارشوندگی (*Ratio of Concentration; C.R.*): نسبت وزن خوراک به وزن کنسانتره و درجه مؤثر بودن فرآیند پرعیارسازی را نشان می‌دهد.

$$C.R. = \frac{\text{وزن خوراک}}{\text{وزن کنسانتره}} = \frac{F}{C}$$

نسبت غنی‌شدگی یا تغلیظ (*Enrichment Ratio; E.R.*): به نسبت عیار کنسانتره به عیار خوراک، نسبت غنی‌شدگی گفته می‌شود.

$$E.R. = \frac{\text{عیار کنسانتره}}{\text{عیار خوراک}} = \frac{c}{f}$$

نکته: در تمام فرآیندهای پرعیارسازی، رابطه عیار کنسانتره و بازیابی تقریباً عکس یکدیگر می‌باشد (شکل زیر)



رابطه عیار و بازیابی

در عملیات کانه‌آرایی، هدف اصلی بالا نگه داشتن همزمان عیار و بازیابی است. استفاده از عیار و بازیابی به طور همزمان عمومی‌ترین روش ارزیابی متالورژیکی (غیر اقتصادی) است.

بازدهی جدایش (*Separation Efficiency; S.E.*)

عیار محصول پرعیار شده و بازیابی آن پارامترهایی هستند که همراه یکدیگر برای ارزیابی فنی یک روش آرایش مورد استفاده قرار می‌گیرند.
برحسب فرمول زیر

$$S.E = R_m - R_g$$

که در آن

R_m : بازیابی کانی با ارزش در کنستانتره

R_g : بازیابی گانگ در کنستانتره

با جای گذاری موارد یاد شده، فرمول زیر حاصل می‌شود:

و با توجه به اینکه:

$$S.E = 100 \times \frac{C}{F} \times \left[\frac{m(c-f)}{f(m-f)} \right]$$

$$\frac{C}{F} = \frac{f-t}{c-t}$$

بنابراین:

$$S.E = \frac{m \times (c-f) \times (f-t)}{f \times (m-f) \times (c-t)}$$

m : حداکثر عیار قابل دسترسی فلز مورد نظر که براساس فرمول شیمیایی آن کانی به دست می‌آید.

مثال: حداکثر عیار مس در کانی کالکوپیریت چه مقدار است؟

فرمول شیمیایی کالکوپیریت به صورت $CuFeS_2$ می‌باشد. بنابراین:

$$m = \frac{m_{Cu}}{m_{Cu} + m_{Fe} + 2m_S} \times 100 = \frac{64}{64 + 56 + (2 \times 32)} \times 100 = 34 / 78\%$$

نکته ۲: معادله حساسیت بازیابی به صورت زیر است:

$$V_R = 57 / 1 \times V_f + 0 / 0003 V_c + 2325 / 2 V_t$$

که در آن V_t و V_c ، V_f ، V_R به ترتیب واریانس بازیابی، واریانس خوراک، واریانس کنسانتره و واریانس باطله هستند. همانطور طور که ملاحظه می‌شود، بازیابی، حساسیت زیادی به عیار باطله دارد و بعکس، حساسیت آن نسبت به عیار محصول پرعیار شده بسیار کم است. بنابراین خطا در اندازه‌گیری عیار باطله نسبت به عیار کنسانتره بر روی مقدار بازیابی به شدت مؤثر است.

نکته ۳: معادله بازیابی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$C_{RAu} = C_{RCu} = \frac{f_{Cu} - t_{Cu}}{C_{Cu} - t_{Cu}}$$

که در آن C_R وزن نسبی محصول پر عیار شده است. این مقدار را در بیشتر موارد می‌توان با استفاده از مؤلفه‌هایی متفاوت با مؤلفه‌هایی که در محاسبه بازیابی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دست آورد. برای مثال در آرایش یک کانه مس-طلا اگر عیار طلا کم باشد (به ویژه در باطله)، برای محاسبه بازیابی طلا می‌توان از عیار مس به جای عیار طلا در محاسبه C_R در معادله بالا استفاده کرد.

نکته ۴: محل برخورد نمودار بازدهی جدایش بر حسب عیار و نمودار بازیابی بر حسب عیار، وضعیت ایده‌آل جدایش را نشان می‌دهد.