چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علـوم زمیـــن
The 42nd National
Geosciences Congress
www.geoconf.ir

فرآوری طلا با جداکننده نلسون

علیرضا غلامی[۱]، مهدی ایران‌نژاد (نویسنده مسئول)[۲]، فاطمه اخلاصی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی دانشگاه امیرکبیر، تهران alireza.gholami96@aut.ac.ir

[۲] استاد دانشکده مهندسی معدن دانشگاه امیرکبیر، تهران iranajad@aut.ac.ir

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی امیرکبیر، تهران f_ekhlasi1107@aut.ac.ir

چکیده

جداکننده‌های نلسون پرکاربردترین جداکننده‌های گریز از مرکز برای فرآوری کانی‌های طلا با روش‌های ثقلی هستند. جداکننده‌ی نلسون به دلیل جدایش مطلوب، به طور گسترده در کانسنگ طلا استفاده می‌شود. تاریخچه توسعه و انواع جداکننده نلسون در این مقاله بررسی شده است. تحقیقات بسیاری در مورد مکانیزم جدایش و ویژگی‌های نلسون از جمله ویژگی‌های جدایش، عوامل مؤثر، بهینه سازی تجهیزات، آزمایش‌های ثقلی طلای قابل بازیابی مورد بحث قرار گرفت. دو پیکربندی از جداکننده نلسون برای فرآیند بازیابی طلا خلاصه شده است. بر اساس بررسی ما، روندهای تحقیق و توسعه‌های اخیر در زمینه تکنیک‌های جداکننده نلسون برای فرآوری مواد معدنی در چند دهه گذشته را بهبود بخشیده است. در نهایت این مقاله یک راهنمای کلی است که به توسعه، ارزیابی و طراحی فلوشیت جدید کارخانه فرآوری مواد معدنی بهتر کمک می‌کند و می‌توان دید بهتری در ادامه فرآیند راه‌اندازی و توسعه کارخانه داشت.

واژه‌های کلیدی

جداکننده نلسون، نیروی گریز از مرکز، بازیابی طلا، جدایش ثقلی

۱- مقدمه

استخراج طلا به روش ثقلی از زمان قدیم به دلیل سادگی، ظرفیت بالای فرآوری، هزینه عملیاتی پایین و از همه مهم‌تر به دلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی رایج بوده است. وزن مخصوص بالای طلا ($19/3\ g/cm^3$) در مقایسه با کانی‌های گانگ با چگالی پایین (g/cm^3 ۵ - ۲/۱) فرآیند پرعیارسازی را با روش‌های ثقلی جذاب می‌کند [۲-۱]. اشکال اصلی فرآیندهای ثقلی مربوط به بازیابی ذرات ریز طلا (کمتر از ۷۵ میکرون) و طلای سولفیدی است [۳]. در دهه ۱۹۸۰ حدود ۲۰ درصد از طلای آفریقای جنوبی با استفاده از روش‌های ثقلی فرآوری می‌شد، در حالی که در اوایل دهه ۱۹۹۰ با پیشرفت در فرآیندهای سیانوراسیون و فلوتاسیون منجر به کاهش پرعیارسازی ثقلی از اکثر کارخانه های فرآوری طلا شد [۴]. با افزایش آگاهی از محیط‌زیست و توسعه جداکننده‌های ثقلی، نقش جدایش ثقلی در فرآوری مواد معدنی دوباره اهمیت پیدا کرد [۵]. جدایش ثقلی به‌خاطر هزینه های عملیاتی پایین، سهولت کار، هزینه سرمایه‌ای پایین و سازگار با محیط‌زیست باعث شده است که در فرآوری مواد معدنی به طور گسترده مورد استفاده گیرد [۶]. از جدایش ثقلی می‌توان به عنوان یک پیش فرآوری در توسعه فرآیند استفاده کرد که مهندسین فرآوری باید آنها را در نظر بگیرند:

- هرچه طلا زودتر فرآوری شود، زودتر می‌توان آن را ذوب، تصفیه و فروخت، بنابراین بازده خالص ذوب[۱] به حداکثر می‌رسد.
- بازیابی کلی کارخانه سیانوراسیون را می‌توان با فرآوری طلای درشت قبل از فروشویی در جایی که ممکن است تماس کافی برای انحلال نداشته باشد، بهبود بخشید.
- بازیابی کلی کارخانه فلوتاسیون را می‌توان با حذف طلایی که برای شناور شدن بیش از حد درشت است بهبود بخشید.
- بار در گردش بالای طلا در مدارهای آسیا را می‌توان کاهش داد تا انباشت طلا به حداقل برسد در نتیجه آسیا بیش از حد طلا کاهش یابد [۷].

واضح است که جدایش ثقلی نمی‌تواند جایگزین فلوتاسیون یا فرآیند سیانوراسیون شود اما می‌تواند اندازه مدار، استفاده از مواد شیمیایی و اثرات محیط‌زیستی ناشی از آن‌ها را کاهش دهد. از این رو جداکننده‌هایی که بر اساس نیروی گریز از مرکز برای جدایش استفاده می‌کنند بسیار کاربردی و موثر هستند. این جداکننده‌ها شامل فالکن[۲]، نلسون[۳]، جیگ کلسی[۴] و جداکننده چند فازی ثقلی[۵] است. جداکننده نلسون به‌خاطر هزینه‌های عملیاتی پایین، سهولت کار، هزینه سرمایه‌ای پایین و سازگار با محیط‌زیست باعث شده است که در فرآوری مواد معدنی به طور گسترده مورد استفاده گیرد [۶].

علی‌رغم مقالات انجام شده، هیچ مطالعه جامعی از تأثیر متغیرهای عملیاتی بر عملکرد KC که منعکس‌کننده عملکرد واقعی در مقیاس صنعتی باشد، نشده است. هدف مقاله حاضر رفع این نقص با انجام یک مطالعه کلی از تأثیر متغیرهای عملیاتی بر روی جداکننده نلسون است. این مطالعه باعث درک بهتر اثر جداکننده نلسون به منظور بهبود عملکرد و بازیابی در مقیاس صنعتی است.

۲- جداکننده نلسون

جداکننده ثقلی گریز از مرکز نلسون یکی از پرکاربردترین جداکننده‌هایی است که به دلیل توانایی قابل توجه آن به طور گسترده برای کانی‌های طلا استفاده شده است. نلسون در سال ۱۹۷۸ توسعه یافت و در سال ۱۹۸۰ توسط بایرون نلسون[۶] در کانادا به ثبت رسید [۸]. جداکننده نلسون اساساً از یک کاسه مخروزی شکل داخلی و مخروط خارجی تشکیل شده است که از یک بستر سیال (آب) برای پرعیارسازی مواد متراکم در محدوده ۸۵۰-۲۰ میکرون استفاده می‌کند. با کاهش اندازه ذرات، سرعت ته نشینی کاهش می‌یابد. بنابراین از نیروی گریز از مرکز برای افزایش اینرسی ذرات ریز استفاده می‌شود. نیروی گریز از مرکز اعمال شده توسط جداکننده نلسون نیروی ثقلی

---

[۱] Net Smelter Return (NSR)

[۲] Falcon

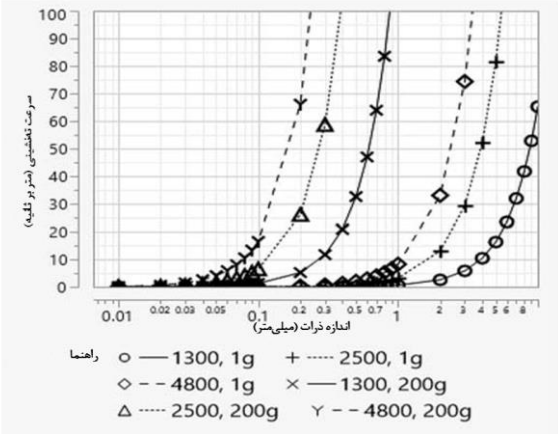
[۳] Knelson

[۴] Kelsey jig

[۵] Multi Gravity Separator (MGS)

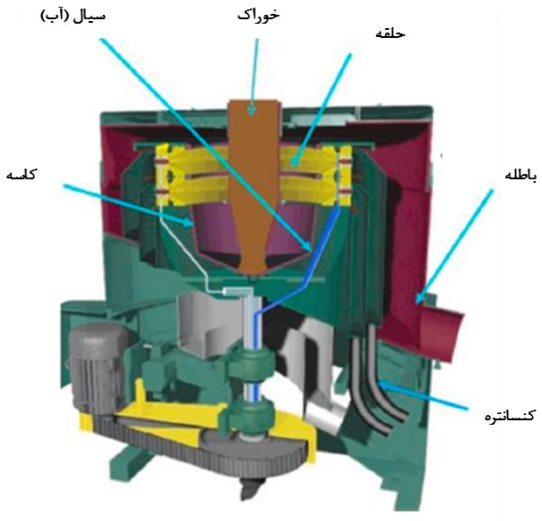
[۶] Byron Knelson

وارد بر ذرات را تا ۶۰ تا ۱۰۰ برابر شتاب زمین افزایش می‌دهد که این امر سرعت ته نشینی و زمان ته نشینی را سریع‌تر می‌کند و بازدهی جدایش افزایش می‌یابد [۹]. شکل ۱ تفاوت در سرعت ته نشینی ذرات، تحت نیروی ثقلی و نیروی گریز از مرکز را نشان می‌دهد. تحت نیروی ثقلی، جدایش ذرات کوچک تر از ۱ میلی‌متر دشوار است. اما با افزایش شتاب موثر از ۱g به ۲۰۰g، جدایش ذرات کوچک‌تر از ۰/۱mm امکان پذیر خواهد بود [۵].



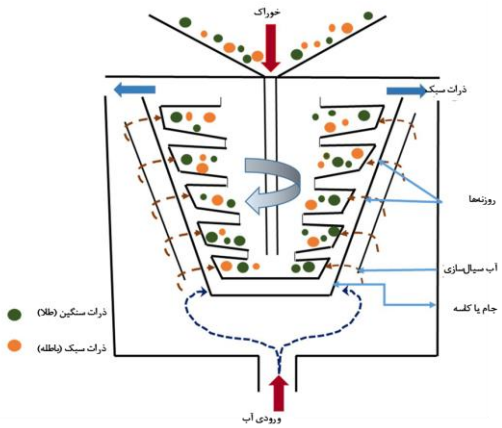
شکل ۱: اثر نیروی گریز از مرکز بر سرعت ته نشینی ذرات [۵]

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است اجزای جداکننده نلسون از سیستم خوراک دهی، سیستم تخلیه باطله - کنسانتره و سیستم تامین آب تشکیل شده است [۱۰].



شکل ۲: جداکننده نلسون [۱۰]

نیروی گریز از مرکز و فشار آب سیال دو پارامتر مهم در جدایش ذرات ریز است. آب از طریق روزنه‌ها وارد کاسه نلسون می‌شود. تحت تأثیر جریان آب و نیروی گریز از مرکز، با توجه به شکل ۳ اصل جدایش بر اساس تفاوت سرعت ته نشینی کانی‌ها در میدان گریز از مرکز تحت آب سیال‌سازی است که ذرات سبک‌تر از قسمت بالا خارج می‌شوند و ذرات سنگین در جام مخروطی به دام می‌افتند [۱۱].



شکل ۳: مکانیزم جدایش نلسون [۱۱]

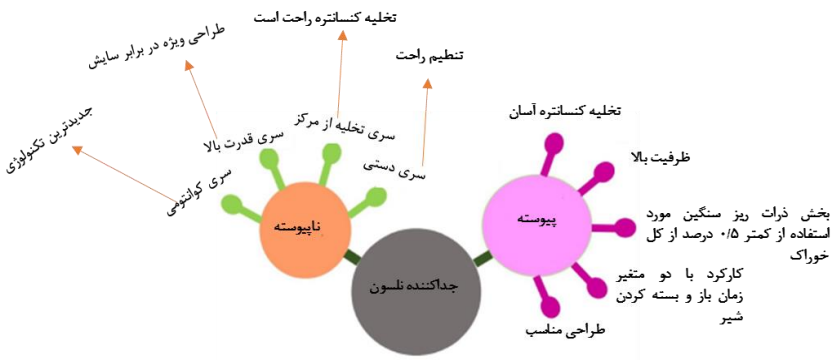
جداکننده نلسون به دو نوع با تخلیه متغیر پیوسته[۱] و ناپیوسته تقسیم‌بندی می‌شود. سری ناپیوسته چهار نوع مختلف دارد که عبارت‌اند از:

۱) دستگاه جداکننده نلسون تخلیه از مرکز[۲]
۲) دستگاه نلسون با قدرت بالا[۳]
۳) دستگاه نلسون با تخلیه دستی[۴]
۴) دستگاه نلسون سری‌های کوانتومی[۵]

KC-MD اغلب در کارهای آزمایشگاهی استفاده می‌شود. KC-XD یک مدل توسعه یافته از KC-MD است و چرخه کاری معمولاً ۲ تا ۴ ساعت دارد. KC-CD را می‌توان کاملاً خودکار و در هر مدار کامپیوتری ادغام کرد و کنسانتره را می‌توان در کمتر از ۲ دقیقه خارج کرد. سری KC-QS نسبتا جدید با پیشرفت‌های زیادی نسبت به KC-XD و اتوماسیون بهتری دارد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است KC-CVD برای فلزات پایه و زغال سنگ طراحی شده است. کاربرد CVD عمدتاً به عنوان یک اسکونجر برای بازیابی فلزات ارزشمند در باطله‌های فلوتاسیون است. در عین حال، کاربرد قابل توجهی برای فرآوری ذرات ریز زغال سنگ دارد [۱۰]. به طور شماتیک تفاوت جداکننده‌های نلسون ناپیوسته و پیوسته در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۲].

---

[۱] Knelson Continuos Variable Discharge Concenterator (KC-CVD)
[۲] Knelson Center-Discharge Series (KC-CD)
[۳] Knelson Extended Duty Series (KC-XD)
[۴] Knelson Manual Discharge Series (KC-MD)
[۵] Knelson Center Quantum Series (KC-QS)



شکل ۴: مقایسه بین نلسون ناپیوسته و پیوسته [۱۲]

۲-۱- مکانیزم جدایش نلسون

سیستم جدایش یک KC بسیار پیچیده است. درک دقیق ویژگی‌های جدایش دشوار است زیرا ذرات کانی‌ها در محفظه جداکننده تحت تأثیر نیروهای مختلف قرار می‌گیرند. در چند دهه اخیر، کارهای زیادی توسط محققان مختلف برای کشف مکانیزم جداسازی KCها انجام شده است، از جمله بررسی ویژگی‌های جدایش، عوامل تأثیرگذار، تغییرات در ساختار دستگاه، آزمایش‌های طلای قابل بازیابی ثقلی[۱]، مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی رایانه‌ای [۱۰].

۲-۱-۱- عوامل جدایش

اصل اساسی جدایش KC بر اساس تفاوت در سرعت ته‌نشینی ذرات کانی‌ها در میدان گریز از مرکز تحت عمل آب سیال است [۱۳]. بیشتر تحقیقات در مورد مکانیزم جدایش KC با جداکننده نلسون MD3 انجام شده است. KC-MD3 با مخروط ۳ اینچ برای تحقیقات آزمایشگاهی مناسب است زیرا قابل حمل است و مقدار خوراک قابل تنظیم است [۱۴].

کارایی یک KC تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله خواص مواد (چگالی، اندازه ذرات) و پارامترهای عملیاتی (دبی آب سیال، سرعت چرخش کاسه، دبی جرمی، چگالی پالپ و زمان) است. برخی از این پارامترها اثرات قابل توجهی دارند، در حالی که اثرات برخی پارامترها محدودتر است. مطالعات گوناگونی اثرات عوامل مختلف بر عملکرد متالورژی KC و برهمکنش این عوامل را بررسی کرده‌اند. خلاصه ای از مطالعات در جدول ۱ نشان داده شده است. اثرات این عوامل بر عملکرد KC در هر مطالعه به طور قابل توجهی به ویژگی های خوراک (کانی شناسی، اندازه ذرات، توزیع چگالی، شکل ذرات، و ...) و طراحی آزمایش های خاص وابسته بود. بنابراین پارامترهای عملیاتی باید با توجه به وضعیت خاص فرآیند تولید انتخاب شود [۱۰].

جدول ۱: خلاصه سوابق تحقیق عوامل تاثیرگذار بر کارایی KC [۱۰]

نوع	مدل	سیال	روش آزمایش	نتایج
ذخایر پلاسری	KC-MD3	آب	OFAT[۲]	فشار آب مهم‌ترین متغیر برای به دست آوردن بازیابی بالای طلا بود در حالی که رقت پالپ اثر معنی‌داری نداشت.
طلا با عیار بالا	KC-MD3	آب	OFAT	راندمان KC عمدتاً تحت تأثیر چگالی خوراک و نرخ خوراک است. فشار آب سیال کردن تأثیر محدودی بر عملکرد متالورژی KC دارد.
مگنتیت / کوارتز اسفالریت/کوارتز	CVD6	آب	OFAT	CVD دارای چهار متغیر عملیاتی (دبی جرمی خوراک، سرعت کاسه، درصد جامد و فشار آب) است که بر عملکرد متالورژیکی تأثیر می‌گذارد و همه آنها با هم تعامل دارند. برای همه متغیرهای عملیاتی، تغییر سطوح برای افزایش عیار باعث کاهش بازیابی می‌شود و بالعکس.
کانسنگ طلا	KC-CD12	آب	OFAT	بازیابی بال تحت تأثیر نرخ خوراک و اندازه ذرات خوراک قرار گرفت. سرعت چرخش و جریان سیال شدن هیچ تأثیر قابل تشخیصی بر بازیابی نداشتند.

[۱] Gravity recoverable gold

[۲] One factor at a time (OFAT)

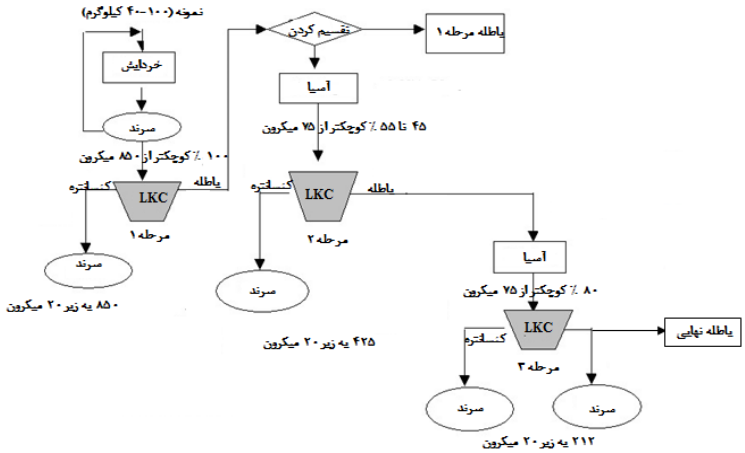
تنگستن / کوارتز	KC-MD3	هوا	RSM	سرعت کاسه و فشار سیال شدن هوا هم برای عیار و هم برای بازیابی معنی‌دار بود
پودر آهن / شن و ماسه	KC-XD12	آب	RSM[1]	بر همکنش بین دبی آب و دبی جرمی مشهودترین واکنش را روی کنسانتره داشت / بر همکنش بین دبی جرمی و درصد جامد خوراک بارزترین پاسخ را در بازیابی داشت.
تنگستن/کوارتز	KC-MD3	هوا	RSM	قدرت موتور در مقایسه با فشار سیال شدن هوا و نرخ دبی جرمی بیشترین تأثیر را داشت
کرومیت	KC-MD3	آب	RSM	نرخ آب سیال شدن به عنوان مؤثرترین پارامتر پیدا شد
ذرات ریز زغال‌سنگ (کمتر از ۱ mm)	KC-MD3	آب	RSM	نیروی گریز از مرکز و فشار آب سیال شدن مهم‌ترین عوامل هستند
مگنتیت/کوارتز	KC-MD3	آب	RSM	برای خوراک ۵٪ و ۱۰٪ مگنتیت، سرعت کاسه به طور منفی بر عیار کنسانتره و بازیابی کانی‌های سنگین به طور مثبت تأثیر می گذارد، در حالی که نرخ آب سیال تأثیر معکوس بر جدایش دارد.

۳- آزمایش GRG

طلای قابل بازیابی ثقلی (Gravity recoverable gold) به بخشی از طلا در کانسنگ یا جریان‌های آسیا گفته می‌شود که می‌تواند با نیروی ثقلی به یک توده کنسانتره کوچک (معمولاً کمتر از ۱ درصد از خوراک) بازیابی شود. GRG شامل طلایی است که به طور کامل آزاد شده است و همچنین طلایی که در کانی‌ها با چگالی بالا قفل شده است که به کنسانتره راه یافته است. مقدار GRG در یک کانسنگ را می‌توان با استفاده از یک جداکننده نلسون آزمایشگاهی[2]تخمین زد که کاربرد آن امکان بازیابی ثقلی در یک مدار خردایش، انتخاب واحد ثقلی و جایگزینی واحدهای موجود برای بهبود عملکرد است. در این تست از نمونه‌ای به وزن ۳۰ کیلوگرم برای طلای ریز با عیار بالا و ۱۵۰ کیلوگرم برای طلای درشت با عیار پایین استفاده شده است. تست GRG شامل سه مرحله آزادسازی و بازیابی متوالی با یک LKC است که مرحله اول ۱۰۰ درصد ریزتر از ۸۵۰ میکرون است. مرحله دوم در ۶۰-۴۵ درصد با عبور از ۷۵ میکرون با بخشی از باطله مرحله ۱ (معمولا ۲۷ کیلوگرم) به عنوان خوراک انجام می‌شود. مرحله سوم معمولا در آسیا نهایی با عبور کردن ۸۰ درصد کمتر از ۷۵ میکرون با استفاده از بیشتر باطله‌های مرحله ۲ انجام می‌شود. این تست آزادسازی و بازیابی تدریجی طلا را که معمولا در مدارهای آسیا به دست می آید را شبیه سازی می‌کند و توزیع اندازه GRG را فراهم می‌کند. بیش از ۲۰۰ نمونه با محتوای ۹۷-۳ درصد GRG از سراسر جهان آزمایش شده است. توزیع اندازه ذرات گانگ و وزن مخصوص آن دو متغیر مهمی هستند که برای انتخاب مدار ثقلی استفاده می‌شوند. وزن مخصوص گانگ به طور معمول برای کانی‌های با محتوای بالای سولفید مهم است. برای فرآوری مواد معدنی با محتوای GRG بالا اما ریز پیشنهاد می‌شود از سزند با اندازه ۲۰۰ تا ۶۰۰ میکرون استفاده شود. شکل ۵ روند اندازه گیری محتوای GRG را با یک LKC ۳ اینچی نشان می دهد [۱۰].

[1] Response surface methodology (RSM).

[2] Laboratory Knelson Concentrator (LKC)



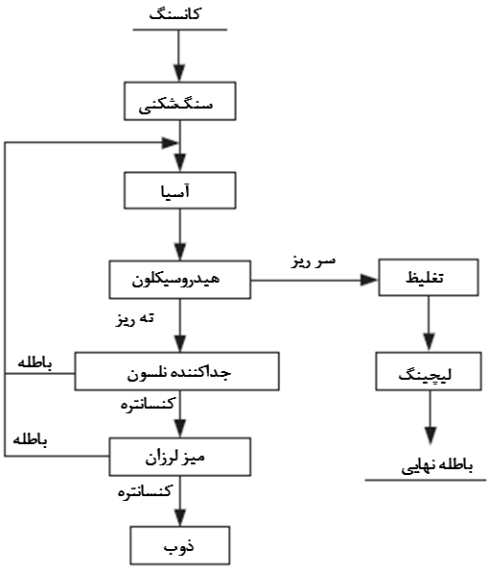
شکل ۵: روش اندازه گیری محتوای GRG با استفاده از LKC [۱۰]

۴- کاربرد جداکننده نلسون

چگالی طلا بالاتر از چگالی کانی‌های گانگ است؛ بنابراین برای جدایش ثقلی مناسب است. در سال‌های اخیر KC به دلیل عملکرد عالی آن برای طلا مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا واحدهای KC برای فرآوری طلای آبرفتی توسعه یافتند. پس از سال‌ها ثابت شده است که این جداکننده‌ها برای تصفیه طلاهای مقاوم موثر هستند. با توجه به نصب یک KC در فرآیند، می‌توان آن را به یک مدار اولیه و مدار ثانویه تقسیم کرد [۱۰]

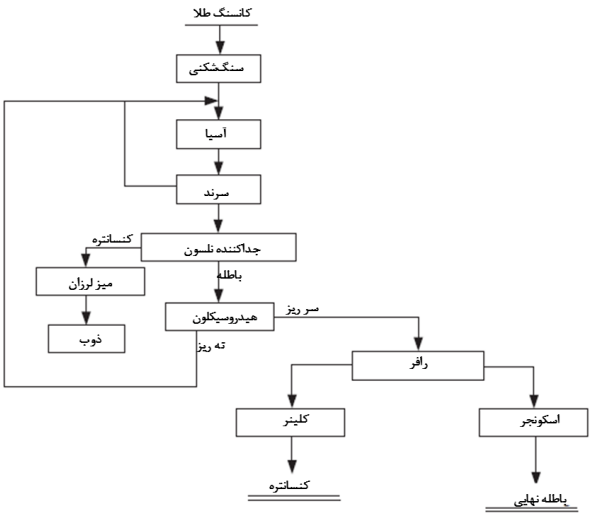
۴-۱- مدار اولیه طلا

برای مدار اولیه، واحدهای KC در مدار آسیا نصب می‌شوند تا طلای آزاد را قبل از فلوتاسیون، سیانوراسیون یا سایر فرآیندها بازیابی کنند. کانسنگ طلای آبرفتی معمولاً با استفاده از یک مدار ثقلی اولیه فرآوری می‌شود زیرا بیشتر طلا آزاد است. شکل ۶ فلوشیت فرآیند ثقلی - سیانوراسیون را نشان می دهد. نصب یک KC در مدار آسیا قبل از سیانوراسیون در معدن Golden Giant توانست تقریباً ۲۵ درصد از تولید طلا را به خود اختصاص دهد که باعث صرفه جویی در هزینه (سالانه ۲۵۰۰۰۰ دلار در کاهش هزینه های باطله برداری) شد [۱۰].



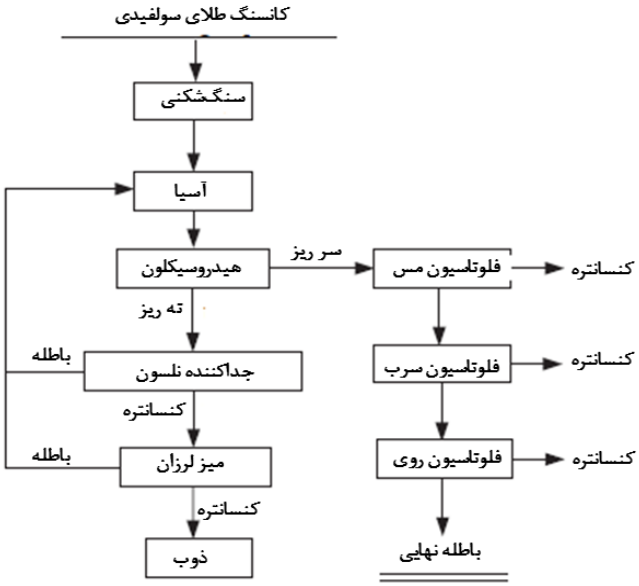
شکل ۶: فلوشیت ترکیبی ثقلی - سیانوراسیون [۱۰]

مدار فرآیند ثقلی- فلوتاسیون معمولاً برای کانسنگ طلا سولفیدی استفاده می‌شود. اجرای مدار ثقلی KC قبل از فرآیند فلوتاسیون می‌تواند به طور موثر طلای آزاد را که به طور اجتناب ناپذیری با باطله از دست رفته را جدا کرده و بازیابی کند که باعث می‌شود نیاز به پمپاژ و مصرف مواد شیمیایی را کاهش دهد. بسته به ماهیت کانسنگ طلا، KCها در نقاط مختلف مدار ثقلی نصب می‌شوند. به طور کلی دو نوع جای گذاری KC وجود دارد. یک نوع KC که به دنبال آسیا گلوله‌ای نصب می‌شود تا تا حد امکان طلا را در محدوده وسیعی بازیابی کند، پس از تغلیظ مجدد توسط میز لرزان، کنسانتره KC را می‌توان به طور مستقیم ذوب کرد. به عنوان یک نمونه، دو KC-XD40 در مدار ثقلی معدن طلای Jinyuan در استان هنان چین نصب شد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، پس از طبقه بندی توسط سیکلون‌ها، باطله های KC برای بازیابی بیشتر طلا به فلوتاسیون پمپ می‌شوند. بازیابی کل طلا ۹۲ درصد و بازیابی طلای مدار ثقلی ۵۷ تا ۶۲ درصد بود [۱۰].



شکل ۷: فلوشیت ترکیبی ثقلی - فلوتاسیون [۱۰]

نوع دوم شامل KCهایی است که به دنبال سیکلون برای بازیابی طلای آزاد از زیر ته ریز نصب می‌شوند و سرریز سیکلون با فلوتاسیون برای بازیابی مس، سرب، روی و سایر فلزات یک به یک فرآوری می‌شود. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، بیشتر این فرآیند با کانسنگ‌های سولفیدی پلی متال پیچیده که حاوی طلا هستند سروکار دارد [۱۰].



شکل ۸: فلوشیت ترکیبی ثقلی – فلوتاسیون کانسنگ سولفیدی طلا [۱۰]

علاوه بر این، KCها را می‌توان برای فرآیند ثقلی-فلوتاسیون - سیانوراسیون استفاده کرد. معدن طلا - مس Rio Narcea در اسپانیا در ابتدا از یک مدار جیگ - فلوتاسیون - سیانوراسیون برای فراوری کانسنگ مس - طلا استفاده می‌کرد. در سال ۱۹۹۸، یک KC-CD30 برای جایگزینی جیگ در مدار سنگ‌شکنی و یک KCCD12 برای تصفیه کنسانتره از KC-CD30 استفاده شد. این امر بازیابی طلای مدار ثقلی را از ۲ درصد به ۲۵-۲۰ درصد با سود خالص ماهیانه ۱۵۰۰۰۰ دلار بهبود بخشید. جدول ۲ برخی از کاربردهای صنعتی KCها را برای بازیابی طلا در جهان فهرست می‌کند [۱۰].

جدول ۲: نمونه‌های کاربردی اولیه KC. [۱۰]

تکنولوژی فرآوری	کشور	نام معدن یا کارخانه	ظرفیت	مدل نلسون	تعداد	بازیابی طلا
ثقلی	استرالیا	Metana Minerals N.L. plants	۳۰۰-۲۴۰ متر مکعب در ساعت	KC-CD30	۹	بازیابی طلا تقریباً ۳۵ درصد افزایش یافت
	روسیه	Zapadnoye	۲۵۰۰ تن در روز	KC-XD48	۴	بازیابی کلی طلا ۸۰ درصد بود.
	چین	Shiyan Jinhaitong Mining Development Co., LTD	۲۰۰۰ متر مکعب در روز	KC-XD40	۱	بازیابی کلی طلا ۸۵ درصد بود.
ثقلی - سیانوراسیون	کانادا	Dome Mine	۱۱۵۰۰ تن در روز	KC-CD30	۵	بازیابی ثقلی از ۳۵ درصد به ۵۰ درصد افزایش یافته است.
	استرالیا	W.M.C.'s St Ives Gold Mine	۱۰۵ تن در ساعت	KC-CD30	۳	بازیابی مدار ثقلی طلا ۳۷/۱ درصد بود.
	استرالیا	Boddington Gold Mine	۱۲ تن در ساعت	KC-CD20	۱	تقریباً ۳۰ درصد از طلا را می‌توان با روش ثقلی بازیابی کرد.
	استرالیا	Paddington Gold Mine	۱۲۰۰۰۰۰ تن در هر سال	KC-CD30	۲	بازیابی طلا از ثقلی به ۳۲/۸ درصد افزایش یافت و بازیابی کلی کارخانه ۲ درصد افزایش یافت.

ادامه جدول ۲

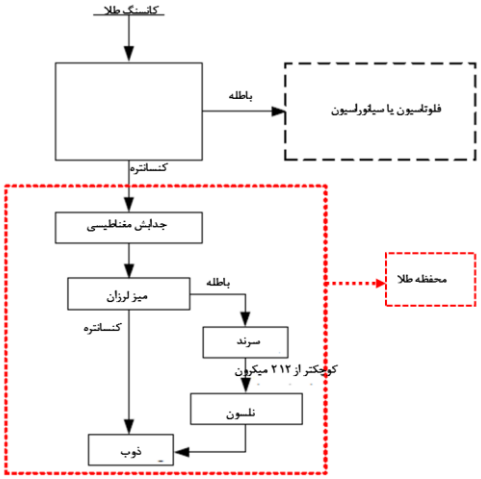
مالزی	Penjom Gold Mine	۱۵۰۰ تن در روز	KC-XD48	۱	بازیابی کلی طلا ۱۰ درصد افزایش یافت.
آمریکا	Fort Knox Gold Mine	۴۰۰۰۰ تن در روز	KC-XD70	۱	بازیابی طلا از مدار ثقلی ۲۰ درصد بود.
آفریقای جنوبی	President Steyn Gold Mine	۲۷۰۰ تن در روز	KC-CD30	۳	بازیابی طلای مدار ثقلی ۵۱ تا ۵۳ درصد بود. بازیافت کلی طلا بیش از ۲ درصد افزایش یافت.
چین	Xin Yi Gold Mine	۵۰۰ تن در روز	KC-CD20	۱	کنسانتره با عیار طلا ۶۱۷/۲ گرم در تن با بازیابی ۳۴/۸۵ درصد تولید شد.
چین	Xin Yuan Gold Mining	۸۰۰ تن در روز	KC-XD30	۱	بازیابی طلا از مدار ثقلی ۳۰ درصد بود.
استرالیا	Pasminco Mining	۵۵۰۰۰۰ تن در هر سال	KC-CD30	۱	بیش از ۳۰ درصد بازیابی طلا در خوراک
کانادا	Westmin copper–zinc deposit	۳۵۰۰ تن در روز	KC-CD30	۲	بازیابی کلی طلا ۴ درصد افزایش یافت.
پرو	Tintaya copper–gold flotation plant	۱,۷۵۰۰۰۰ تن در روز	KC-XD48	۱	بازیابی کلی طلا ۵ درصد افزایش یافت.
چین	Shandong Yingezhuang Gold Mining	۲۰۰۰ تن در روز	KC-XD20	۱	بازیابی طلا از مدار ثقلی ۱۷-۱۵ درصد بود.
چین	Shandong Yingezhuang Gold Mining	۴۵۰ تن در روز	KC-QS30	۲	بازیابی طلا از مدار ثقلی ۶۵ درصد است
چین	Hunchun Zijin Mining Co., LTD	۱۵۰۰۰ تن در روز	KC-XD40	۴	بازیابی طلا از مدار ثقلی ۲۵-۲۰ درصد بود.
کانادا	Les Mines Camchib	-	KC-CD30	۲	بازیابی کلی طلا ۱ تا ۳ درصد افزایش یافت.
چین	Henan Jinqu Gold Co., LTD	۷۰۰ تن در روز	K—CD20 K—CD12	۱+۱	بازیابی طلا از مدار ثقلی ۲۰-۱۶ درصد بود.
چین	Chongli Zijin MiningCo., LTD	۳۰۰۰ تن در روز	KC-XD40	۱	بازیابی طلا از مدار ثقلی ۱۵ درصد بود.

۴-۲- مدار بازیابی ثانویه

مدار بازیابی ثانویه زمانی تعریف می‌شود که واحد KC پس از فلوتاسیون، سیانوراسیون یا فرآیند دیگری که نقش تغلیظ را ایفا می‌کند، نصب شود. برای مدار بازیابی ثانویه، خوراک KC عمدتاً کنسانتره حاصل از ثقلی یا فلوتاسیون، باطله شناورسازی، باطله سیانوراسیون یا تشویه است [۱۰].

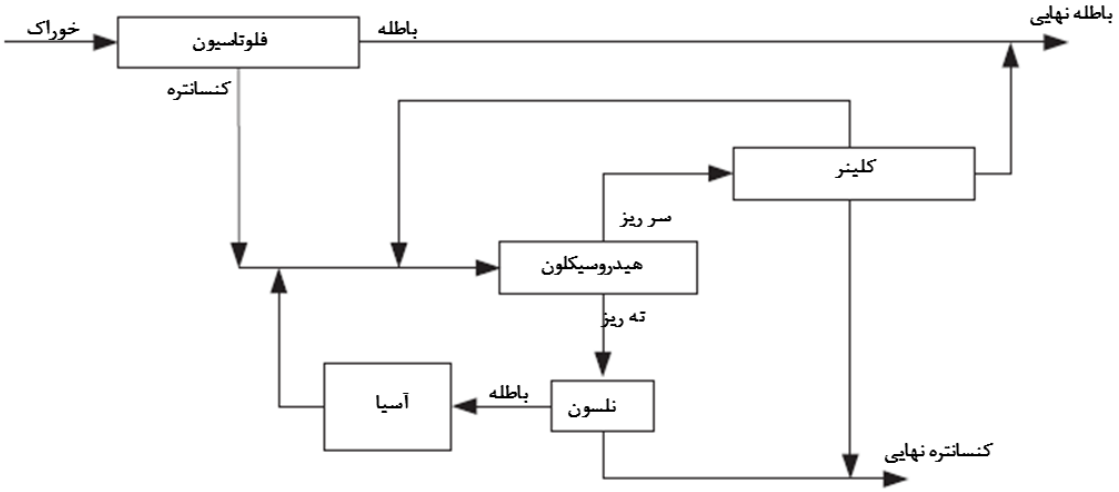
۴-۲-۱- پرعیار سازی

پرعیارسازی برای کنسانتره مورد نیاز است یکی از مهمترین مزایای KC نسبت غنی سازی بالای آن است. بنابراین، کنسانتره طلای حاصل از ثقلی یا فلوتاسیون اغلب با استفاده از KCها قبل از ذوب دوباره غنی‌سازی می‌شود. کنسانتره ثقلی به طور کلی در یک اتاق طلا پرعیار می‌شود و تجهیزات رایج آن یک میز لرزان یا یک KC ناپیوسته است. تحقیقات نشان داده است که مقادیر قابل توجهی از GRG در باطله میز وجود دارد که بیشتر آنها ریزتر از ۰/۱۵ میلی متر است و بیش از ۹۰ درصد را می‌توان با استفاده از KC-MD3 بازیابی کرد. یک فلوشیت در شکل ۹ نشان داده شده است که شامل جداکننده مغناطیسی، میز لرزان، سرند و جداکننده نلسون است [۱۰].



شکل ۹: فلوشیت برای پرعیارسازی کنسانتره اولیه در اتاق طلا [۱۰]

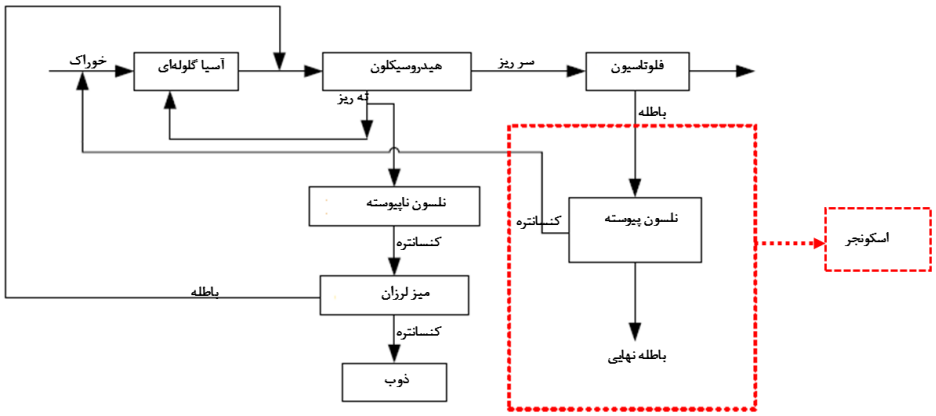
فلوتاسیون یکی از روش های رایج برای بازیابی طلا از کانسنگ سولفیدی طلا است. کنسانتره فلوتاسیون حاوی مقادیر قابل توجهی طلای آزاد و سولفیدهای حاوی طلا است. پس از پرعیارسازی کنسانتره با KC، می‌توان آن را مستقیماً توسط فروشویی سیانوراسیون یا پیرومتالورژی استخراج کرد. در شکل ۱۰ نشان داده شده است که با استفاده از جداکننده نلسون می‌توان بازیابی کل طلا را افزایش داد [۱۰].



شکل ۱۰: پرعیار سازی مدار فلوتاسیون با KC [۱۰]

۴-۲-۲- اسکونجر

یکی دیگر از کاربردهای مهم KC حذف و بازیابی فلزات با ارزش مانند طلا، مس و نیکل از باطله‌های فلوتاسیون است. KC-CVD معمولاً در یک مدار ترکیبی فلوتاسیون - ثقلی به عنوان یک اسکونجر نصب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، یک مدار ترکیبی فلوتاسیون - ثقلی که در آن CVD توسط یک فرآیند آسیا مجدد - فلوتاسیون دنبال می‌شود تا بازیابی کلی فلزات کارخانه و عیارهای محصول افزایش یابد، که به طور بالقوه منجر به کاهش هزینه‌های آسیا می‌شود [۱۵].



شکل ۱۱: فلوشیت ساده یک مدار ترکیبی فلوتاسیون - ثقلی [۱۵]

۵- نتیجه گیری

واضح است که جداکننده نلسون برای فرآوری ذرات ریز بسیار مفید است، به خصوص در مواردی که اختلاف وزن مخصوص بین با کانی باارزش و گانگ زیاد است. نتایج متالورژی نشان می‌دهد که شرایط عملیاتی از جمله نرخ خوراک، سرعت چرخش، نرخ جریان آب سیال و ابعاد ذرات خوراک بر بازدهی جدایش تأثیر دارند که با توجه به کانسنگ مورد نظر، عوامل خاص خود را در بر می‌گیرد. اهمیت جداکننده نلسون در نهایت از دو جنبه حائز اهمیت است: ۱. برای بالابردن بازیابی کلی و کاهش هزینه‌های تولید می‌توان از جداکننده‌های نلسون با سایر فرآیندها استفاده کرد. ۲. از جداکننده نلسون می‌توان برای کانسنگ‌هایی که چگالی پایین‌تری دارند استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود که در آینده بر روی شبیه سازی رفتار ذرات برای جدایش بهتر از جداکننده نلسون موضوعی است که می‌توان بر روی آن کار کرد.

منابع

[1] B.A. WILLS.; 1985, "Gravity Concentration," *Mineral Processing Technology*, p.p. 301–341.

[2] D. Erik Spiller.; 1984, "Applications of Gravity Beneficiation in Gold Hydrometallurgical Systems.," *Annual Symposium on Uranium and Precious Metals*, p.p. 121–126.

[3] A.R. Laplante.;F. Woodcock.;& M. Noaparast.; 1995, "Predicting gravity separation gold recoveries," *Minerals and Metallurgical Processing*, p.p. 74–79.

[4] A.R. LAPLANTE.; 1987, "MINERALOGY AND METALLURGICAL PERFORMANCE OF VARIOUS GOLD-COPPER ORES OF THE CHIBOUGAMAU AREA, QUEBEC," *Proceedings of the Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, p.p. 141–156.

[5] Avimanyu Das.; & Biswajit Sarkar.; 2018, "Advanced Gravity Concentration of Fine Particles: A Review," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, p.p. 359–394.

[6] Damla Izerdem.; & S. Levent Ergun.; 2022, "Investigation of the effects of particle size on the performance of classical gravity concentration equipment," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*.

[7] J. Wells.; & C. Patel.; 1991, "Contemporary practices in gravity recovery installations in the Canadian gold mining industry," *Minerals Engineering*, p.p. 399–409.

[8] B. Knelson.; 1992, "The Knelson concentrator. metamorphosis from crude beginning to sophisticated world wide acceptance," *Minerals Engineering*, p.p. 1091–1097.

[9] Minerals Engineering.; & Vol No I. I.; 1996, "Pergamon An enhanced gravity separator (EGS) commercially known as the Falcon Concentrator Keywords," p.p. 1143–1156.

[10] Qiao Chen.;Hong ying Yang.;Lin lin Tong.;Hui qun Niu.;Fu sheng Zhang.;& Gui min Chen.; 2020, "Research and application of a Knelson concentrator: A review," *Minerals Engineering*.

[11] T. Coulter.; & G.K.N. Subasinghe.; 2005, "A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators," *Minerals Engineering*, p.p. 9–17.

[12] Aryasuta Nayak.;M.S. Jena.;& N.R. Mandre.; 2021, "Application of Enhanced Gravity Separators for Fine Particle Processing: An Overview," *Journal of Sustainable Metallurgy*, p.p. 315–339.

[13] A.K. Majumder.;V. Tiwari.;& J.P. Barnwal.; 2007, "Separation characteristics of coal fines in a Knelson concentrator - A hydrodynamic approach," *Coal Preparation*, p.p. 126–137.

[14] Samad Banisi.; 1992, *An investigation of the behaviour of gold in grinding circuits.*

[15] Givemore Sakuhuni.;Bern Klein.;& N. Emre Altun.; 2015, "A hybrid evolutionary performance improvement procedure for optimisation of continuous variable discharge concentrators," *Separation and Purification Technology*, p.p. 130–138.