مجله علمی پژوهش‌های کاربردی در علوم زمین (سال پنجم)
شماره ۱۵ / زمستان ۱۳۹۹ / ص ۵۰- ۳۴

بررسی کاربرد روش های هوشمند و هوش مصنوعی در اکتشاف منابع معدنی با استفاده از سنجش از دور

تاریخ دریافت: آذرماه ۱۳۹۹
تاریخ پذیرش: دی ماه ۱۳۹۹

کمیل روستایی [۱]، میثم داودآبادی فراهانی [۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سنجش از دور، موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی حکمت قم.

[۲] استادیار مدعو موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی حکمت قم.

نام نویسنده مسئول:
کمیل روستایی

چکیده

شناسایی کردن معادن اورانیوم از روی تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک بالا به علت دغدغه‌های منع تکثیر در طی سالهای اخیر اهمیت چشمگیری یافته است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که شناسایی این معادن با بهره‌گیری از روش‌های سنجش از دوری که تنها از امضای طیفی استفاده می‌کنند کاری دشوار می‌باشد. در این رابطه، رویکردی را پیشنهاد می‌کنیم که صرفاً بر امضای فضایی تجهیزات بکار رفته در فرایند استخراج به عنوان یک جایگزین متکی است. با توجه به اینکه استخراج اورانیوم و مس شباهتهای زیادی به همدیگر دارد، بویژه اگر مس از یک کانی درجه پایین و یا از پس‌مانده‌ها استخراج شود، پس احتمال وجود ابهاماتی در شناسایی معادن اورانیوم از روی تصاویر ماهواره‌ای تجاری با تفکیک بالا وجود دارد. روشی را برای متمایز ساختن معادن مس و اورانیوم بر مبنای امضای فضایی تجهیزات که منحصر به فرایند معادن مس بودند پیشنهاد شده است. علاوه بر مشخصه‌هایی که برای تفکیک این معادن از آنها استفاده کردیم. این تکنیک تنها زمانی کاربردی است که استخراج در معادن انجام شود. در صورتیکه اورانیوم با روش‌های لیچینگ (استخراج با حلال) درجا استخراج شود این روش کاربردی ندارد. تصاویر رادار به جهت توانایی نفوذ در عمق قادر به شناسایی ذخایر پنهان هستند. همچنین ترکیب تصاویر رادار و اپتیک به کمک شبکه های عصبی مصنوعی قابلیت شناسایی و تفکیک سازنده های مختلف زمین شناسی از یکدیگر را افزایش می دهد.

کلمات کلیدی: معادن اورانیوم ، معادن مس، سنجش از دور ، شبکه های عصبی.

مقدمه

اورانیوم به شکل‌های مختلف آن یکی از مواد هسته‌ای بسیار مهم می‌باشد. از آنجایی که اورانیوم کاربردهای نظامی و غیرنظامی دارد، پس تولید پایین آن بر یک مبنای جهانی ضروری می‌باشد. آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) یک سازمان مستقل بین‌المللی بر پایه علم و فناوری (با آدرس http://www.iaea.org/about/mission) می‌باشد به عنوان مرکز بین‌الملل مشارکت‌های هسته‌ای فعالیت می‌کند. این سازمان کار خود را از طریق نظام بازرسی خود انجام داده و تحت معاهدات منع تکثیر سلاح هسته‌ای و سایر توافقنامه‌های مرتبط دولت‌ها را مکلف می‌کند از برنامه‌ها و مواد هسته‌ای تنها برای اهداف صلح‌آمیز استفاده کنند.

پس از اینکه IAEA در سال ۱۹۹۰ پیشنهاد کرد که می‌توان از ماهواره‌های غیرنظامی سنجش از دور برای پایش توافقنامه‌های چند جانبه‌ای از قبیل معاهده سال ۱۹۷۰ در مورد منبع تکثیر سلاح هسته‌ای (NPT) استفاده کرد، مطالعات متعددی در مورد استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تجاری در قالب روش‌های امنیتی تحت برنامه‌های پشتیبانی دولت‌های آلمان و انگلستان از IAEA انجام شدند (یاسانی و همکارانش ۱۹۹۶، IAEA.SRDP.R256 ۱۹۹۸، SRDP-R269 و IAEA، ۲۰۰۰). اساساً در این مطالعات عناصر مختلف چرخه سوخت هسته‌ای بررسی شدند تا از این طریق بتوان «عناصر کلیدی» هر کدام از برنامه‌های هسته‌ای را مشخص کرد. تفسیرگر تصاویر می‌تواند این عناصر را در تصاویر ماهواره‌ای شناسایی کنید. کمیته دائمی مشاوره در زمینه اجرای تدابیر امنیتی (SAGSI) سازمان انرژی اتمی تحت سرپرستی مدیر کل پیشنهاداتی برای تقویت تدابیر امنیتی IAEA ارائه کرد که شامل استفاده از اطلاعات منبع باز از قبیل تاصویر بدست آمده از ماهواره‌های تجاری توسط این آژانس می‌باشد. پس از آن، بخش اول چرخه سوخت معادن و آسیاب‌های اورانیوم بررسی و گزارش مقدماتی برای مرکز تحقیقات کشور آلمان تهیه شد. آژانس در حال حاضر از این روش برای تصدیق بیانیه‌های ارائه شده توسط دولت‌های مختلف تحت توافقنامه‌های امنیتی با آژانس به عنوان ابزار برنامه‌ریزی پیش از بازرسی و تحقیق بر روی فعالیت‌های هسته‌ای مخفیانه استفاده می‌کند.

شناسایی کردن سایت اکتشاف اورانیوم و یا آسیاب اورانیوم در طی سالهای اولیه‌ی ابداع روش سنجش از دور به علت تفکیک طیفی و فضایی پایین سنسورهای ماهواره دشوار بود. تلاشهایی توسط سازمان اطلاعات (CIA) ایالات متحده آمریکا برای پایش فعالیت‌های استخراج و آسیاب کردن اورانیوم در جمهوری شوروی سابق (FSR) و همچنین برآورد میزان تولید آن بر مبنای درجه کانه و اندازه‌ی پس‌مانده‌ها با استفاده از تصاویر هوایی انجام گرفت. بعدها، تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک پایین با پرتاب ماهواره CORONA توسط دولت آمریکا در دسترس قرار گرفتند. مطالعات انجام گرفته به تعریف نکات آموخته شده در مورد استخراج و حفاری اورانیوم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای کمک کرده و مسیر را برای انتشار کتابچه‌هایی برای تفسیر این تصاویر هموار ساختند.

با دسترسی به تصاویر ابرطیفی و تکنیک‌های پیشرفته پردازش تصاویر، شاهد شکل جدیدی از علاقمندی به شناسایی آسیاب اورانیوم با استفاده از امضای طیفی هستیم. محققان لابراتوار تحقیقات ملی ساند یا مطالعه‌ی نظام‌مندی برای ارزیابی استفاده از روش سنجش از دور ماهواره‌ای برای شناسایی معادن و آسیاب‌های اورانیوم انجام دادند. مطالعه موردی گزارش شده در این گزارش آسیاب اورانیوم Ranger واقع در استرالیا می‌باشد. در این گزارش به بررسی استفاده پتانسیل از داده‌های ابرطیفی و چندطیفی بدست آمده از چندین ماهواره سنجش از دور می‌پردازیم تا مشخص شود که آیا این موارد منحصربه عملیات حفاری و آسیاب واقعی اورانیوم هستند. در این مطالعه نتیجه‌گیری می‌شود که اگرچه داده‌های ابرطیفی به طبقه‌بندی کانه‌های مختلف به چندگروه کمک می‌کنند، اما وجود میزان اورانیوم در این کانه‌ها به حدی اندک می‌باشد که امضای مشهودی در اختیار حسگر ماهواره‌ای قرار نمی‌دهد. در این مطالعه همچنین نتیجه‌گیری می‌شود که داده‌های ابرطیفی نمی‌توانند فرایندهای آسیاب اورانیوم را از سایر فرایندهای آسیاب از قبیل فرایند آسیاب مس، ریو، وانادیوم، فسفر و خاک‌های نادر تشخیص دهند. بعلاوه، مطالعه کنونی به این موضوع اشاره می‌کنند که هرگاه سیستم‌های ماهواره‌ای با تفکیک فضایی بالا- از قبیل Quickbird- فاقد تفکیک طیفی کافی برای شناسایی مواد مختلف باشد، در این صورت می‌توان از اطلاعات فضایی بدست آمده توسط سیستم‌های دارای تفکیک طیفی بالا- از قبیل Hyperion- استفاده کرد.

با توجه به نکات کلیدی مطالعه بالا، مجموعه‌ای از امضاها و عوامل کلیدی عملیاتی مبتنی بر مشاهدات چندین عملیات آسیاب اورانیوم در سراسر جهان اخیراً توسط چاندرا شاکار و همکارانش توسعه یافتند. تصاویر Google Earth (GE) و نمودار جریان مربوط به این فرایندها در دسترس می‌باشند. تصاویر ماهواره‌ای، مخصوصاً تصاویر Google Earth مورد مطالعه قرار گرفتند تا بتوان مجموعه‌ای از نکات کلیدی در جهت تفسیر داده‌ها تهیه کرد. این نکات کلیدی عملیات سایت‌های آسیاب را به موارد قابل مشاهده در تصاویر ماهواره‌ای ارتباط می‌دهند. شکل و اندازه‌ی مشخصه‌های مشاهده شده و موقعیت آنها در زنجیره فرایند مجموعه‌ای از امضاهای فضایی ایجاد می‌کند که می‌توان از آن برای شناسایی آسیاب اورانیوم استفاده کرد. متداول‌ترین مشخصه در بین این مجموعه نمونه به موازات امضاهای آنها به عنوان مبنایی برای توسعه درختی تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این روش می‌توان ظرفیت تولید آسیابهای اورانیوم را برآورد کرد.

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که فرایند استخراج مس بسیار مشابه با فرایند استخراج اورانیوم است، مخصوصاً هرگاه مس از پس‌مانده‌ها استخراج شد و یا درجه کانه پایین باشد. تعدادی از تجیهزات مورد استفاده در این دو فرایند بسیار مشابه‌اند. بنابراین، اطمینان یافتن از این مورد بسیار مهم است که آسیاب مس به اشتباه آسیاب اورانیوم نامگذاری نشود و یا بالعکس. در راستای این مطالعه، یکسری خصوصیات فضایی در آسیاب‌های مس شناسایی شدند که در آسیاب اورانیوم وجود ندارند، از جمله این خصوصیات می‌توان به ساختمان فرایند Electrowinning (الکترولیز فلزات از سنگ‌های معدنی) اشاره کرد. این خصوصیات کمک می‌کند تا شناسایی آسیاب اورانیوم با اطمینان بیشتری انجام بگیرد.

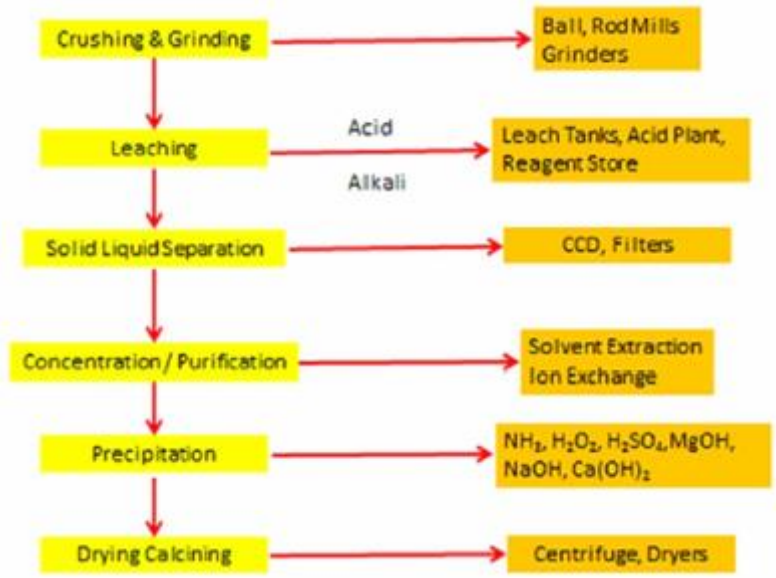
در این مقاله، مطالعه قبلی را گسترش دادیم تا بتوانیم آسیاب اورانیوم را شناسایی کرده و آن را از آسیاب مس متمایز سازیم. با در نظر گرفتن اندازه تجهیزات مورد استفاده در فرایند استخراج دو عنصر اورانیوم و مس امکان چنین تمایزی وجود دارد. ما نشان می‌دهیم که می‌توان از اندازه‌های متفاوت دستگاه‌های CCD (دکانتاسیون (سرریز) جریان مخالف) مشاهده شده در آسیاب‌های اورانیوم و مس برای تشخیص سایت‌های استخراج از همدیگر استفاده کرد. با استفاده از این اندازه‌ها به همراه امضای فضایی بخش فرایند Electrowinning و دستگاه‌های قدرت موجود در آسیاب مس می‌توان الگوریتم تصمیم را برای شناسایی آسیاب اورانیوم و تشخیص آن از آسیاب مس طراحی کرد.

امضاهای فضایی و رویکرد پیشنهادی را می‌توان اصلاح کرد و برای تحلیل تصاویر مبتنی بر اشیا بکار گرفت. این مقاله به بررسی روش لیچینگ (برشویی) انبوه یا عملیات لیچینگ (برشویی) درجا [ISL] نمی‌پردازد. برای این دو عملیات خصوصیات مشهود مختلفی در تصاویر ماهواره‌ای نیاز می‌باشد. این مطالعه تنها به بررسی عملیات آسیاب هیدرومتالوژیکی مربوط به استخراج اورانیوم می‌پردازد. از آنجایی که آسیاب‌های ISL دارای خصوصیات سطحی قابل تشخیص هستند، پس تحقیق گسترده بر روی آسیاب‌ها و معادن ISL در سراسر جهان به شناسایی امضاهای فضایی برای این قبیل سایت‌ها کمک می‌کند.

فرایند استخراج اورانیوم

شرایط زمین‌شناختی مطلوب برای پیدا کردن و کشف کانه‌های حامل اورانیوم بطور گسترده‌ای در سراسر جهان مورد تحقیق قرار گرفته و اسنادی در رابطه با آنها ارائه شده‌اند. مراحل مختلف مربوط به استخراج، بهسازی کانه و بعمل‌آوری بیشتر آن به شکل کیک زرد با جزئیات بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. اورانیوم از معادن باز و یا زیرزمینی استخراج می‌شود.

طبیعت رسوبات هر منطقه‌ای تعیین‌کننده شیوه یا فرایند استخراج می‌باشد. مراحل کلی فرایندهای مورد استفاده برای استخراج اورانیوم در تصویر ۱ نشان داده می‌شوند. این تصویر همچنین تجهیزات نوعی مورد استفاده برای دستیابی به نتیجه مطلوب در هر مرحله را نشان می‌دهد. ممکن است تجهیزات دیگری در این فرایند بکار گرفته شوند. اما باید ذکر کرد که در اینجا بیشتر بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی تجهیزات مورد استفاده برای فرایندهای کلیدی بر خود تجهیزات و وسایل تمرکز می‌شود. هدف ما پی بردن به این موضوع است که کدام یک از تجهیزات مورد استفاده در عملیات آسیاب اورانیوم در تصاویر ماهواره‌ای مشهود و قابل شناسایی هستند.



تصویر ۱- مراحل کلی فرایندهای مورد استفاده برای استخراج اورانیوم

پس از اینکه کانه خرد و بطور مناسبی آسیاب شد، اورانیوم با استفاده از اسیدها یا بازها به شکل محلول لیچینگ می‌شود. ترکیب معدنی کانه تعیین‌کننده نوع خاصی فرایند شستشو در یک آسیاب می‌باشد.

لیچینگ یا شستشو را می‌توان در تانکرهای مخصوص، بصورت انبوه و یا درجا انجام داد. کانه‌های اورانیوم درجه بالا معمولاً در تانکرها و اما کانه‌های درجه پایین‌تر بصورت انبوه یا درجا لیچینگ می‌شوند.

با توجه به اهداف این مطالعه، ما آن تعداد از آسیاب‌هایی که از روش لیچینگ انبوه استفاده می‌کنند را بررسی نکردیم. دلیل حذف این تعداد از آسیاب‌ها از این مطالعه اینست که مراحل مختلف فرایند لیچینگ در آنها نسبتاً متفاوت بوده و شناسایی این قبیل آسیابها در تصاویر ماهواره‌ای غیرممکن است.

پس از مراحل لیچینگ به مرحله جداسازی جامد- مایع می‌رسیم. این کار با استفاده از تغلیظ‌کننده‌ها و فیلترهای و کانتاسیون (سرریز کردن) جریان مخالف (CCD) انجام می‌گیرد. در اصل، اگر محلول شستشو شده حاوی مقدار کافی از اورانیوم باشد، می‌توان آن را بطور مستقیم رسوب داد. این کار به ندرت انجام می‌شود و محلول شستشو شده در معرض استخراج حلال و یا فرایند تبادل یون قرار می‌گیرد.

مرحله نهایی بازیافت اورانیوم جامد یا کیک زرد از محلول است. این مرحله مستلزم تشکیل رسوب و خشک‌سازی است.

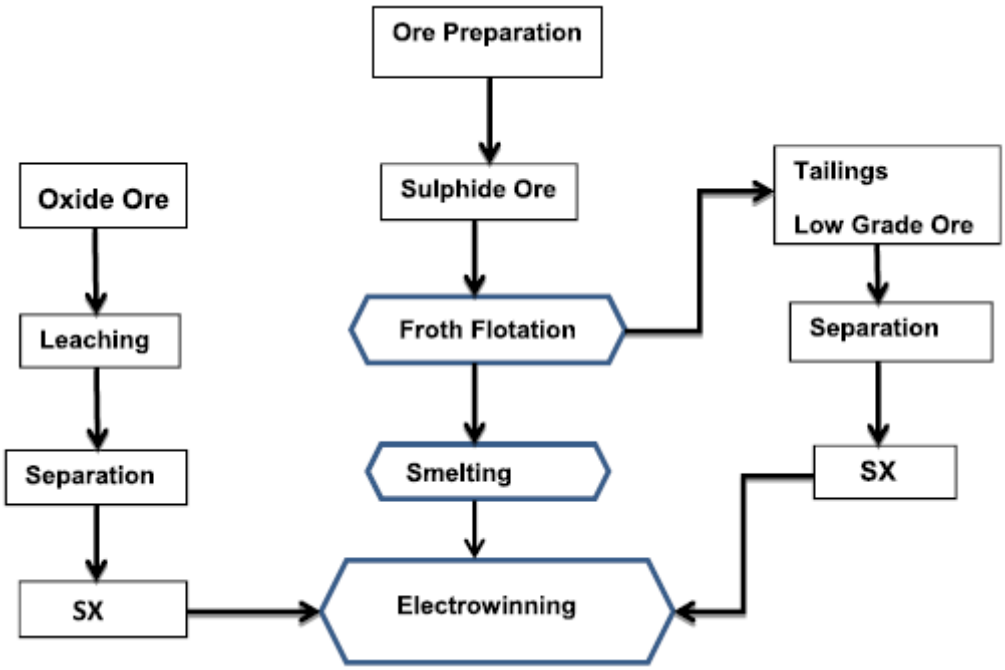
فرایند استخراج مس

مراحل کلی فرایند استخراج مس در گزارش مربوط به لابراتوار تحقیقات ملی Sandia موجود می‌باشد.

مس اغلب به شکل سولفید یا اکسید وجود دارد. اگرچه مراحل خرد و آسیاب کردن در تمام فرایندهای استخراج متداول هستند، اما مراحل فرایند برای دو نوع کانه متفاوتند. مراحل اصلی در فرایند استخراج مس بطور شماتیک در تصویر ۲ نشان داده می‌شوند. کانه سولفید پس از خرد و آسیاب شدن اولیه و کنسانتره‌سازی مس وارد مرحله‌ی شناورسازی کف می‌شود. کف حاصل از فرایند شناورسازی حاوی مقدار انبوهی از مس می‌باشد. گدازگر (دستگاه گدازگر) را می‌توان در سایت آسیاب و یا هر جای دیگری قرار داد. گدازگر کنسانتره مس را به مس حبابی تبدیل می‌کند که این مس به نوبه‌ی خود تصفیه شده تا مس آندی تشکیل شود. در پایان مس آندی وارد مرحله Electrowinning می‌شود تا فلز مس با خلوص بالا تولید شود.

پس مانده‌های حاصل از شناورسازی کف حاوی مقداری مس هستند که می‌توان آنرا بازیافت کرد. این پس‌مانده‌ها با سولفوریک اسید شستشو شده و از یکسری CCD به دنبال مرحله استخراج حلال عبور می‌کنند. محلول مس بدست آمده از مرحله استخراج حلال به منظور استخراج مس وارد بخش Electrowinning می‌شود.

مس موجود به شکل اکسید پس از خرد و آسیاب شدن با استفاده از سولفوریک اسید شستشو می‌شود. پس از کنسانتره‌سازی از طریق فرایند استخراج حلال، محلول حاوی مس وارد بخش Electrowinning می‌شود. بسته به کنسانتره‌سازی کانه، مرحله‌ی لیچینگ یا قبل از استخراج حلال و Electrowinning با توالی مراحل CCD دنبال می‌شود.



تصویر ۲- مراحل کلی فرایند استخراج مس

ویژگی‌های مهم آسیاب اورانیوم

ما با تفسیر کردن تصاویر Google Earth (GE) تعداد زیادی از آسیاب‌های اورانیوم تجاری در سراسر جهان، مجموعه‌ای از نکات کلیدی و مهم را برای شناسایی آسیاب اورانیوم بر مبنای ویژگی‌های فضایی تجهیزات مورد استفاده در عملیات آسیاب در عوض جستجوی امضاهای طیفی تعیین کردیم. نکات کلیدی موجود برای شناسایی آسیاب اورانیوم به همراه تصاویر GE آن توسعه می‌یابند. از متداول‌ترین ویژگی‌های این مجموعه به همراه امضاهای آنها برای تصمیم‌گیری در این مورد استفاده می‌شود که آسیاب مشاهده شده در تصویر ماهواره‌ای آسیاب اورانیوم می‌باشد یا خیر.

هدف ما تشخیص دادن آن تعداد تجهیزات منحصر به عملیات آسیاب کردن اورانیوم است که در تصویر ماهواره‌ای مشهود و قابل شناسایی هستند.

در این راستا، یازده عملیات آسیاب اورانیوم را انتخاب کردیم. مجموعه نمونه‌ی منتخب ما در جدول ۱ نشان داده می‌شود.

جدول ۱- مجموعه نمونه‌ی منتخب

Country	Mill Name	Location (Lat / Long)
USA	Sweet Water	42 03 N 107 54 W
Canada	Rabbit Lake	58 15 N 103 40 W
Australia	Ranger	12 41 S 132 55 E
Canada	Mclean Lake	58 21 N 103 50 W
Canada	Key Lake	57 13 N 105 40 W
Niger	Arlit	18 47 N 7 21 E
Namibia	Rossing	22 28 S 15 03 E
Namibia	Langer	22 49 S 15 20 E
Russia	Krasnokamensk	50 06 N 118 11 E
Czech Republic	Rozna	49 30 N 16 14 E
Romania	Feldiora	45 50 N 25 30E

تصاویر GE موجود برای هر کدام از این آسیاب‌ها با جزئیات بیشتر و با استفاده از سایر اطلاعات عمومی موجود مورد مطالعه قرار گرفتند.

مجموعه ویژگی‌های مشهودی که ما از روی این تصاویر شناسایی کردیم مبنایی برای شناسایی ویژگی‌های مهم مربوط به آسیاب اورانیوم تشکیل می‌دهند. برای تحلیل کامل تصاویر GE این آسیاب‌ها اثر چاندراشکار و همکارانش را مشاهده کنید.

تصویر GE آسیاب اورانیوم در شکل ۳ آمده است. این تصویر ساختمان‌های خردسازی/ آسیاب کردن، بخش لیچینگ، CCDها و بخش استخراج حلال را نشان می‌دهد.

اگرچه وسایل خردسازی، آسیاب کردن و تهیه دوغاب در اغلب این تصاویر قابل شناسایی هستند، اما دارای خصوصیات ویژه‌ای برای عملیات آسیاب کردن اورانیوم نمی‌باشند. مشهودترین ویژگی در این تصویر ماهواره‌ای واحد CCD می‌باشد که در فرایند تفکیک‌سازی جامد/ مایع بکار می‌رود.

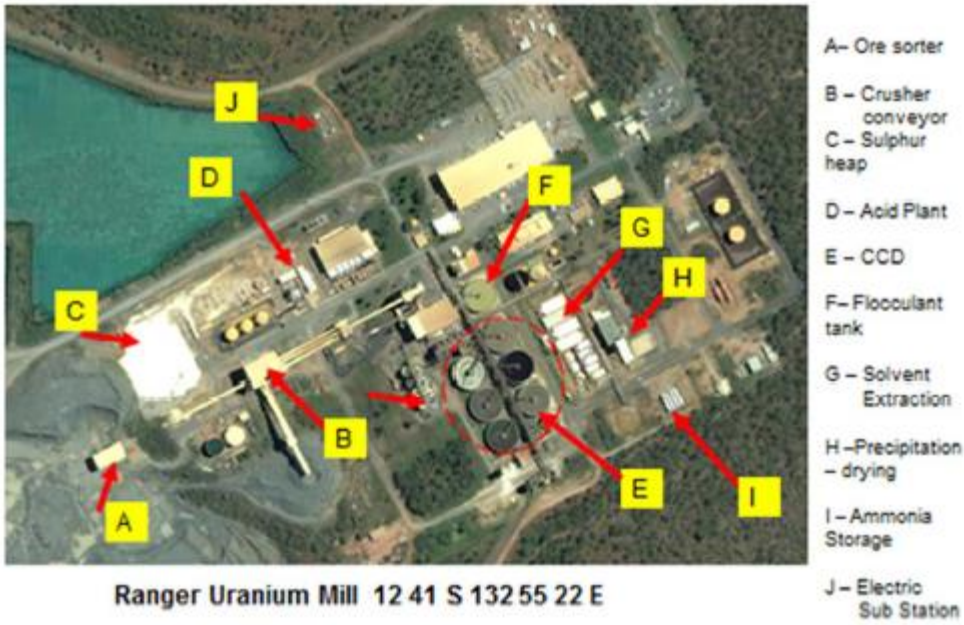
ویژگی‌های متعددی در رابطه با فرایند لیچینگ وجود دارد. بعضی از این ویژگی‌ها در تمام آسیاب‌ها قابل مشاهده هستند. در مورد لیچینگ اسید می‌توان دستگاه‌های مربوط به ذخیره اسید یا تانکرهای لیچینگ را مشاهده کرد گاهی اوقات تانکرهای ذخیره‌سازی اسید در مجاورت وسایل لیچینگ قرار می‌گیرند. از آنجایی که لیچینگ قلیاها مستلزم دماهای بالاتر است، پس باید به جستجوی دودکش، مبدل‌های حرارتی و حتی دود پرداخت. اگرچه شناسایی کردن وسایل لیچینگ دشوار و مستلزم دانش دقیق‌تری در مورد فرایندهای بکار رفته می‌باشد، اما می‌توان این کار را به روش‌های دیگری انجام داد. با توجه به اینکه ما اطلاع داریم عملیات لیچینگ به دنبال مرحله تهیه کاند می‌باشد و پس از آن مرحله تفکیک‌سازی جامد/ مایع را داریم، پس توالی این عملیات به شناسایی بعضی از خصوصیات لیچینگ کمک می‌کند.

ویژگی جالب توجه بعدی تجهیزات مرتبط با فرایند کنسانتره‌سازی و خالص‌سازی می‌باشد. در اغلب آسیاب‌ها، این کار با ستون‌های استخراج حلال (SX) و یا فرایند تبادل یون (IX) انجام می‌گیرد. گاهی اوقات از ترکیب این دو استفاده می‌شود. ستون‌های SX در داخل ساختمان تعبیر می‌شوند و ممکن است قابل شناسایی باشند، در سایت‌های آسیابی که مورد مطالعه ما می‌باشند ما متوجه شدیم که ستون‌های SX در داخل یک سری ساختمان مشابه قرار گرفته و تانکرهای ذخیره‌سازی حاوی حلال‌های مورد استفاده در فرایند SX به آنها اتصال یافته‌اند. ستون‌های IX معمولاً باز گذاشته شده و در تصاویر ماهواره‌ای قابل مشاهده هستند.

ویژگی‌های مرتبط با تهیه رسوب، خشک و کلسینه کردن قطعاً در تصویر ماهواره‌ای قابل شناسایی نیستند. در اغلب موارد، این ویژگی‌ها را می‌بایستی به روش غیرمستقیم و در حضور مخازن حاوی حلال‌ها و شناسه‌گرهای مورد استفاده به این منظور شناسایی کرد. آنچه که از اهمیت برابر با وسایل SX یا IX برخوردار است این می‌باشد که ما می‌توانیم از آنها برای شناسایی امکانات موجود استفاده کنیم. در اغلب آسیاب‌هایی که از آمونیاک استفاده می‌شود، سیلندرهای آمونیاک به وضوح در تصویر ماهواره‌ای قابل مشاهده هستند.

اساساً روش ما برای تشخیص آسیاب اورانیوم از روی تصاویر GE ابتدا شناسایی مدار CCD، سپس تلاش برای تعیین محل جریان رو به بالای وسایل لیچینگ می‌باشد. اگر از وسایل SX یا IX برای فرایند CCD استفاده شود سپس می‌توانیم با درجه اطمینان بالایی نتیجه‌گیری کنیم که سایت آسیاب اورانیوم می‌باشد.

این رویکرد محدودیت‌های خاصی دارد، چرا که بسیاری از فرایندهای استخراج مواد معدنی دیگر بسیار مشابه با فرایند استخراج اورانیوم هستند. از بین آنها، تشخیص دادن فرایندهای استخراج مس و اورانیوم از همدیگر بسیار دشوار می‌باشد. با شناسایی کردن ویژگی‌های فضایی منحصربه آسیاب‌های مس قادر خواهیم بود آسیاب اورانیوم را به شکل بهتری تشخیص داده و آن را از آسیاب مس تفکیک کنیم.



تصویر ۳- تشخیص آسیاب اورانیوم از روی تصاویر GE

ویژگی‌های متمایزکننده آسیاب اورانیوم از آسیاب مس

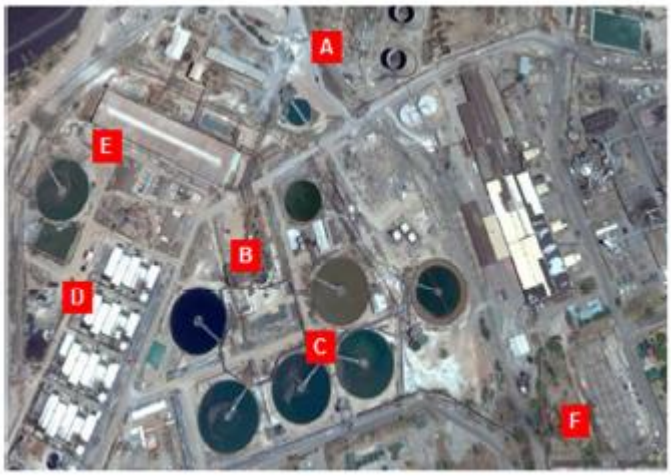
بیشتر مراحل این فرایند برای اورانیوم و مس مشابه‌اند. اما مس و اورانیوم از لحاظ بعضی جزئیات فرایند تفاوت‌هایی دارند، می‌توان از این تفاوت‌ها برای جداسازی آسیاب مس از آسیاب اورانیوم استفاده کرد.

یک تفاوت عمده بین آسیاب اورانیوم و آسیاب مس مربوط به مقیاس عملیات می‌باشد. از لحاظ قابلیت رشد اقتصادی، آسیاب‌های مس می‌بایستی بازده بسیار بیشتری نسبت به آسیاب‌های اورانیوم داشته باشند. بنابراین یک آسیاب مس به ناچار حداقل ۲ تا ۳ برابر بزرگتر از یک آسیاب اورانیوم می‌باشد.

آسیابی که کانه مس درجه پایین و یا بخشی از آسیاب مسی که پس‌مانده‌های حاصل از فرایند شناورسازی کف را پرداز می‌کند مشابه با آسیاب اورانیوم به نظر می‌آید. این چنین آسیابی دارای ویژگی‌هایی مانند مدارهای CCD، واحدهای SX بعلاوه وسایل لیچینگ اسید می‌باشد که در آسیاب اورانیوم نیز آنها را مشاهده می‌کنیم. بهرحال، فاکتور متمایزکننده برای استخراج مس از پس‌مانده‌های شناورسازی کف اینست که پس از استخراج حلال، پس‌مانده در عوض وارد شدن به بخش رسوب‌گذاری وارد بخش Electrowinning می‌شود. از آنجایی که این بخش دارای امضای واقعی این مراحل در تصویر ماهواره‌ای می‌باشد پس می‌توان از آن برای تفکیک‌سازی و تشخیص آسیاب اورانیوم از آسیاب مس استفاده کرد.

تصویر ۴ تصویر GE آسیاب پس‌مانده‌های مس در آسیاب مس Nchange واقع در کشور زامبیا می‌باشد. ما ویژگی‌هایی را در این تصویر مشاهده می‌کنیم، بسیار مشابه با ویژگی‌های مشاهده شده در آسیاب اورانیوم هستند.

بطور مثال، CCDها در کارخانه استخراج مشاهده می‌شوند. همچنین یکسری مراحل استخراج حلال وجود دارد که در ساختمان‌های مجزا و اما مشابهی تعبیه شده‌اند. ما همچنین کارخانه تولید برق را مشاهده می‌کنیم. بعلاوه، ساختمان Electrowinning را مشاهده می‌کنیم که در آسیاب اورانیوم وجود ندارد. بنابراین، این بخش فاکتور متمایز کننده برای استخراج مس از پس‌مانده‌های شناورسازی محسوب می‌شود. در آسیاب مس Nchange، پس از فرایند استخراج حلال شاهد بخش Electrowinning هستیم. در عوض این بخش در آسیاب اورانیوم بخش رسوب‌گذاری وجود دارد. از آنجایی که بخش Electrowinning دارای امضای خاص خود می‌باشد، پس می‌توان از شواهد مربوط به این مرحله در تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص دادن آسیاب اورانیوم از آسیاب مس استفاده کرد.



تصویر ۴- تشخیص دادن آسیاب اورانیوم از آسیاب مس

بخش Electrowinning دارای ساختار خاصی می‌باشد که در تصویر ۵ نشان داده می‌شود. در این تصویر، ساختمان طویل مربوط به این بخش به آسانی قابل شناسایی است که معمولاً در مجاورت بخش استخراج حلال قرار می‌گیرد.

ویژگی متمایزکننده دیگر مربوط به ابعاد CCDها می‌باشد. مقیاس اقتصادی مورد نیاز برای تولید مس بطور چشمگیری بزرگتر از مقیاس مورد نیاز برای تولید اورانیوم می‌باشد. این کار مستلزم کانه‌های درجه بالاتر و پردازش حجم بالاتری از مواد در آسیاب مس می‌باشد. اگر CCDها در فرایند تولید مورد استفاده قرار بگیرند. اندازه تجهیزات و اندازه کلی کارخانه احتمالاً بسیار بزرگتر باشد. اگر CCDها در فرایند تولید مورد استفاده قرار بگیرند، احتمال زیادی وجود دارد که قطر آنها برای مس بسیار بزرگتر از اورانیوم باشد، بررسی دقیق‌تری از قطر CCD آسیاب‌های مختلف بعمل آمد تا بتوان صحت آنها را تأیید کرد. این بحث با جزئیات بیشتر در بخش بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد.

تصویر ۵- بررسی دقیق‌تری از قطر CCD آسیاب‌های مختلف

ابعاد تجهیزات CCD

ما مشاهده کردیم که CCDها ویژگی معمول آسیاب‌های اورانیوم و مس می‌باشند. اگرچه همواره در سایت‌های استخراج مس وجود ندارند اما به هنگام پردازش پس‌مانده‌های مس شاهد وجود آنها هستیم. در این قبیل موارد باید راهی پیدا کنیم تا اطمینان حاصل شود که آسیاب مس را به اشتباه در ردیف آسیاب اورانیوم طبقه‌بندی نکرده‌ایم. گاهی اوقات احتمال دارد که در یک آسیاب شاهد یکسری CCD باشیم، اما نمی‌توان آن را به عنوان ویژگی متمایز آسیاب اورانیوم در نظر گرفت. در صورتی این اتفاق می‌افتد که بخش Electrowinning در آن نزدیکی نباشد. اما ساختمان‌هایی وجود دارد که دارای ظاهر مشابه با ساختمان‌های استخراج حلال هستند.

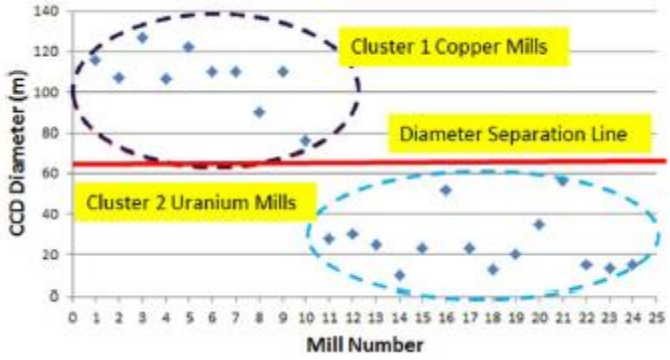
در این مورد باید چه تصمیمی بگیریم؟ در طی تحقیق و پژوهش در مورد مسأله‌ی جداسازی آسیاب اورانیوم از آسیاب مس متوجه شدیم که ابعاد CCD آسیاب مس بزرگتر از آسیاب اورانیوم می‌باشد. بنابراین قطر CCD حاصل از نمونه‌های آسیاب مس را با قطر آن برای آسیاب اورانیوم مقایسه کردیم.

داده‌های نمونه‌ی ما از ۱۰ آسیاب مس و ۱۴ آسیاب اورانیوم تشکیل می‌شوند. این داده‌ها در جدول ۲ نشان داده می‌شوند. آسیاب‌های مس در مکزیک، ایالات متحده آمریکا، اندونزی، زامبیا و شیلی واقع شده‌اند.

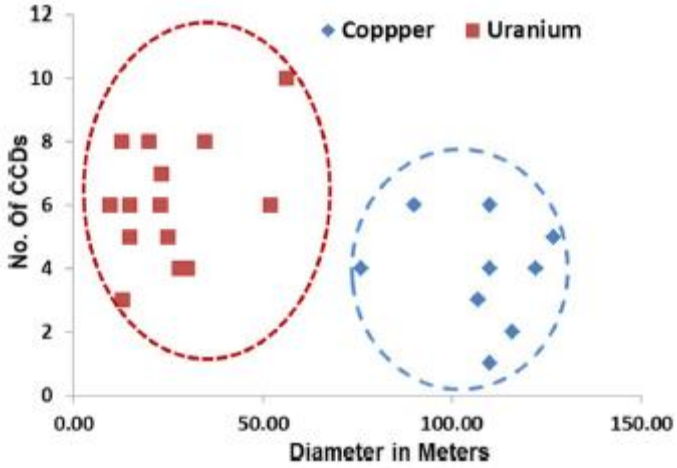
در تصویر ۶ طرح ابعاد CCD آسیاب‌های مختلف مس و اورانیوم در این مجموعه نمونه ارائه می‌شود.

جدول ۲- داده‌های نمونه‌ی ما از ۱۰ آسیاب مس و ۱۴ آسیاب اورانیوم

Sl. No.	Facility Name	CCD Diameter (m)	Number of CCD	Latitude - Longitude
Copper Mills				
1	Chino, USA	116.00	2	32.79 N 108.06 W
2	Pinto Valley, USA	107.00	3	33.39N 110.97 W
3	Escondida, Chile	126.80	5	24.26 S 69.05 W
4	Carlotta, USA	106.80	3	33 23 N 110 59 W
5	Cananea, Mexico	122.00	4	30.97 N 110.30 W
6	Grasberg, Indonesia	110.00	1	04 03 S 137 07 E
7	Twin Buttes, USA	110.00	4	31 52 N 111 06 W
8	Phelps Dodge, USA	90.00	6	33 04 N 109 20 W
9	Phelps Dodge, USA	110.00	6	33 04 N 109 20 W
10	Nchanga, Zambia	76.00	4	12 32 S 27 50 E
Uranium Mills				
11	Feldiora, Romania	28.01	4	45 50 N 25 30E
12	Rabbit Lake, Canada	30.01	4	58 15 N 103 40 W
13	Rozna, Czech Republic	24.98	5	49 30 N 16 14 E
14	Sweet Water, USA	9.75	6	42 03 N 107 54 W
15	Arlit, Niger	23.01	6	18 47 N 7 21 E
16	Krasnokamensk, Russia	52.01	6	50 06 N 118 11 E
17	Langer, Namibia	23.15	7	22 49 S 15 20 E
18	McClean Lake, Canada	12.85	8	58 21 N 103 50 W
19	Key Lake, Canada	20.00	8	57 13 N 105 40 W
20	Ranger, Australia	34.65	8	12 41 S 132 55 E
21	Rossing, Namibia	56.32	10	22 28 S 15 03 E
22	Olympic Dam, Australia	15.00	5	30 27 S 136 52 E
23	Turamdih, India	13.00	3	22 43 N 86 11 E
24	Dera Ghazi khan, Pakistan	15.00	6	29 59 N 70 35 E



تصویر ۶ - طرح ابعاد CCD آسیاب‌های مختلف مس و اورانیوم



تصویر ۷- طرح‌های پراکنده‌ای از قطر و تعداد CCDها

از روی تصویر ۶ واضح است که می‌توان از قطر CCDها در آسیاب‌های اورانیوم و مس برای تفکیک آنها استفاده کرد. آستانه تفکیک‌سازی کمی بزرگتر از ۶۰m می‌باشد. در صورتیکه قطر CCD به تنهایی فاکتور متمایزکننده نویدبخشی باشد، بررسی دقیق‌تر فرایند CCD حاکی از آنست که این قطر به تنهایی برای تعیین حجم بازدهی یا محصول کافی نیست. همچنین این احتمال وجود دارد که نمونه خاصی از آسیاب‌های مس و اورانیوم که ما انتخاب کرده‌ایم باعث تفکیک‌سازی مشخصی شود. نمونه‌های دیگر تغییرات بزرگتری در قطر CCD نشان دادند. این وضعیت باعث ایجاد تداخل و افزایش احتمال طبقه نادرست می‌شود. پس برای ارتقا توانایی تفکیک‌سازی باید از ویژگی‌های دیگر بهره گرفت.

با توجه به اینکه موضوعی که ما قصد پی بردن به آن را داریم بر مبنای حجم می‌باشد، ما چندین CCD دیگر به روش طبقه‌بندی خود اضافه کردیم به آسانی در تصویر ماهواره‌ای مشاهده می‌شوند که قوت جداسازی دو گروه از همدیگر را بهبود می‌بخشند.

تصویر ۷ طرح‌های پراکنده‌ای از قطر و تعداد CCDها نشان می‌دهد از روی این تصویر واضح است که اگرچه از لحاظ تعداد CCDها تداخلاتی وجود دارد، اما این دو خوشه بطور واضحی قابل تفکیک هستند. یک خوشه نشان دهنده آسیاب‌های مس و خوشه دیگر نشان دهنده آسیاب‌های اورانیوم می‌باشد.

مقادیر متوسط نمونه و انحراف معیار برای دو خوشه در جدول ۳ نشان داده می‌شوند. تغییرپذیری در قطر مربوط به این دو خوشه تقریباً مشابه می‌باشد. همچنین از روی این طرح واضح است که می‌توان این دو خوشه را تنها به استفاده از قطر از هم تفکیک کرد. حداکثر قطر CCD اورانیوم ۵۶/۳۲ بوده که کوچکتر از حداقل قطر CCD مس (۷۶/۰ m) می‌باشد.

اگر این متغیر را به تنهایی در نظر بگیریم می‌توانیم کار طبقه‌بندی را با استفاده از معیار ساده‌ی نزدیک بودن مقدار حاصل به مقدار متوسط خوشه طبقه‌بندی کنیم. با تعیین نقطه میانی فاصله بین این دو متوسط می‌توانیم چنین تصمیم‌گیری کنیم که هر نقطه‌ی نمونه با قطر کمتر از ۶۶/۵۰ m در خوشه اورانیوم طبقه‌بندی شود. بهرحال همانطور که قبلاً ذکر کردیم با افزودن ویژگی‌های دیگر از قبیل تعداد CCDها می‌توانیم به الگوریتم طبقه‌بندی قوت بیشتری بدهیم و در عین حال مراقب بایاس (پیشقدری) نمونه هم باشیم.

جدول ۳- مقادیر متوسط نمونه و انحراف معیار برای دو خوشه

Feature	CCD Diameter (m)		No. of CCDs	
Statistics	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
Copper	107.46	14.81	3.8	1.62
Uranium	25.55	14.12	6.1	1.91

دو متغیر تعداد CCDها و قطر بیانگر حجم کانه مصرف شده توسط آسیاب بوده و معیار طبقه‌بندی بر مبنای این دو متغیر میزان خطای طبقه‌بندی نادرست را کاهش می‌دهد. دو رویکرد برای تعریف توابع متمایزکننده وجود دارد در ساده‌ترین مورد تنها فاصله اقلیدس بدون توجه به تغییرپذیری در خوشه‌ها در نظر گرفته می‌شود. این متغیر طبقه‌بندی‌کننده حداقل فاصله از میانگین می‌باشد. طبقه‌بندی‌کننده فاصله Mahalanobis (برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای) تفرق بین خوشه‌ها را در نظر می‌گیرد که به شکل واریانس- ماتریس‌های هم واریانس دو خوشه- بیان می‌شود.

طبقه‌بندی کننده حداقل فاصله از میانگین

ما در زیر در مورد طبقه‌بندی کننده حداقل فاصله از میانگین و توابع متمایزکننده آن بحث می‌کنیم.

فرض کنید ما می‌خواهیم پی ببریم که آیا یک آسیاب نامشخص بر مبنای دو ویژگی- قطر CCD و تعداد CCDها- آسیاب اورانیوم می‌باشد یا آسیاب مس. ما به شکل زیر پیش می‌رویم.

ما بردار مصرف این دو ویژگی را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$X = (x_1 x_2)$ در اینجا:

x_1: قطر CCD

x_2: تعداد CCDها

دو خوشه وجود دارد: C1 نماد اورانیوم و C2 نماد مس.

هدف ما یافتن توابع تصمیم $d_1(X)$ و $d_2(X)$ می‌باشد، به نحوی که اگر بردار نمونه x به C1 تعلق داشته باشد پس $d_1(X)$ بزرگتر از $d_2(X)$ خواهد بود.

تابع مرز (در مورد این دو ویژگی یک خط مستقیم خواهد بود) تفکیک‌کننده این دو خوشه به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$d(X) = d_1(X) - d_2(X) = 0 \quad (۱)$$

ما این خط مرز را با استفاده از داده‌های نمونه‌ی جدول ۲ بدست خواهیم آورد.

با دنبال کردن روش ارائه شده توسط گونزالس و وودس، باید گفت تابع فاصله دیورد خوشه C1 (اورانیوم) صدق می‌کند:

$$d_1(X) = m_1 * x_1 + m_2 * x_2 - 0.5(m_1^{\ 2} + m_2^{\ 2}) \quad (۲)$$

در اینجا m_1 و m_2 به ترتیب قطر متوسط نمونه CCD و قطر متوسط نمونه‌های CCD می‌باشند. این مقدار از روی داده‌های مربوط به آسیاب‌های اورانیوم محاسبه می‌شود.

مشابهاً، با قرار دادن مقادیر قطر متوسط نمونه CCD و قطر متوسط نمونه CCDهای آسیاب‌های مس در عبارت (۲) می‌توان تابع تصمیم $d_2(X)$ را بدست آورد. با استفاده از داده‌های حاصل از این نمونه، ما داریم:

$$d_1(X) = 22.55x_1 + 6.1x_2 - 345.0063 \quad \text{برای اورانیوم} \quad (۳)$$

$$d_2(X) = 107.46x_1 + 3.8x_2 - 5781.046 \quad \text{برای مس} \quad (۴)$$

خط تصمیم (معادله (۱) بالا) تفکیک کننده این دو خوشه پس از ساده‌سازی عبارت به مقدار زیر کاهش می‌یابد:

$$35.6130 * x_1 - x_2 - 2363.496 = 0 \quad (۵)$$

خط مرز در تصویر ۸ به شکل AB نشان داده می‌شود. از آنجایی که این خط بر مبنای فاصله اقلیدسی است پس عمود بر خطی است که مقادیر متوسط دو خوشه را به هم متصل می‌کنند. نقاط موجود در بخش تحتانی سمت راست این خط به آسیاب مس تعلق دارند و تمام نقاط موجود در بخش تحتانی سمت چپ این خط را می‌توان به عنوان آسیاب اورانیوم طبقه‌بندی کرد.

واضح است که این خط تفکیک‌سازی همواره از روی قطر CCD تعیین می‌شود. بنابراین، خط مذکور همواره عمودی بوده و از مقدار ۶۶,۳۷۱ بر روی محور x عبور می‌کند.

در اندازه‌گیری فاصله اقلیدسی با مسائلی مواجه می‌شویم، چرا که تغییرپذیری در مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه نمی‌شود. برای رفع این مشکل بهتر است به مقدار فاصله Mahalanobis توجه داشته باشیم. در این اندازه‌گیری به هم واریانس بین دو ویژگی مورد مطالعه تجه خاصی می‌شود.

اولویت با فاصله اقلیدس است چرا که واریانس نقاط دو خوشه را بررسی می‌کند. اساساً، اندازه‌گیری فاصله Mahalanobis شامل متوسط فاصله و واریانس- یعنی هم‌واریانس دو متغیر- می‌باشد. فرض مهم اینست که ماتریس‌های واریانس- هم واریانس برای این دو خوشه مشابه هستند. این وضعیت ما را قادر می‌سازد به ماتریس مشترک واریانس- هم واریانس از روی داده‌های نمونه دست یابیم.

در کل، تابع فاصله Mahalanobis برای یک خوشه به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$[(x-M)^1 S^{-1}(x-M)],$$

در اینجا x بردار نمونه و به شکل قبل تعریف می‌شود.

S^{-1} معکوس ماتریس مشترک واریانس- هم واریانس برای دو خوشه می‌باشد. M بردار میانگین می‌باشد.

با قرار دادن مقادیر میانگین دو خوشه در این عبارت دو تابع فاصله $d_1(X)$ و $d_2(X)$ برای این دو خوشه خواهیم داشت که از روی داده‌های نمونه موجود محاسبه می‌شود.

تابع طبقه‌بندی کننده که باز هم یک خط مستقیم می‌باشد به شکل قبل تعریف می‌شود:

$$d(X) = d_1(X) - d_2(X) = 0 \quad (۶)$$

شکل نهایی معادله‌ی این خط تفکیک‌کننده که از روی داده‌های نمونه بدست آمده است بدون اینکه در قالب یک فرمول ریاضیاتی ارائه شود به شکل زیر می‌باشد:

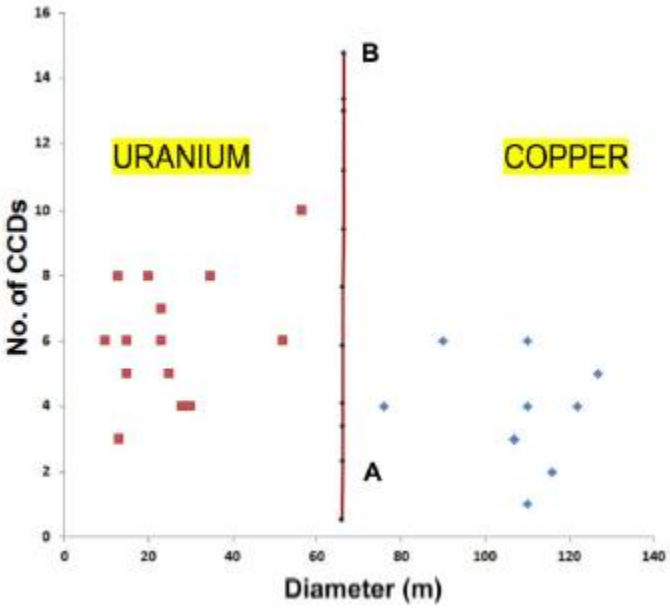
$$x_2 = 0.32071 * x_1 - 16.3788$$

یا

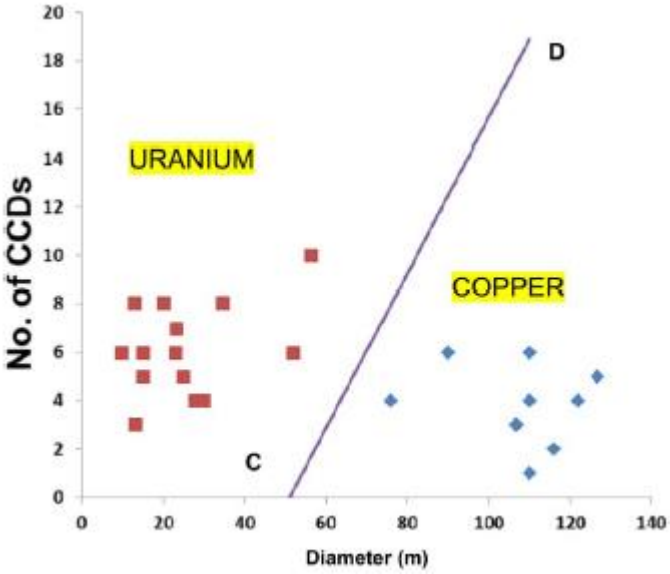
$$d(X) = x_2 - 0.32071 * x_1 + 16.3788 = 0$$

این مقدار در تصویر ۹ بهش کل خط CD برای طرح پراکنش مشابهی نشان داده می‌شود. واضح است که این خط تحت تأثیر هر دو ویژگی قرار می‌گیرد. این خط عمود بر خط اتصال‌دهنده مقادیر متوسط این دو خوشه نیست. نقطه میانی خط اتصال‌دهنده مقادیر میانگین این دو خوشه بر روی این خط قرار می‌گیرد.

تمام بردارهای نمونه نامعلوم x در صورتیکه $d(X) > 0$ باشد در خوشه C1 یا خوشه آسیاب اورانیوم و در غیر این صورت در خوشه C2 طبقه‌بندی می‌شوند.



تصویر ۸- خوشه های آسیاب اورانیوم



تصویر ۹- طرح پراکنش

الگوریتم تصمیم برای تشخیص دادن آسیاب اورانیوم از آسیاب مس

مطالعه قبلی ما اثبات کرد که CCDها، استخراج حلال و تجهیزات تبادل یون دارای امضاهای خاصی هستند که در صورت وجود داشتن در تصاویر ماهواره‌ای قابل تشخیص می‌باشند. ضرورت تشخیص دادن آسیاب اورانیوم از کارخانه استخراج پس‌مانده‌های مس ما را به سمت جستجوی ویژگی‌های خاصی سوق داد که در آسیاب مس وجود دارند اما در آسیاب اورانیوم به چشم نمی‌خورند. در نتیجه این اکتشاف به درختی تصمیمی دست یافتیم که در آن تنها به امضای فضایی تجهیزات مورد استفاده توجه می‌شود. برای شفاف‌سازی بیشتر، این درختی تصمیم در تصویر ۱۰ نشان داده می‌شود.

در این مقاله به این موضوع اشاره می‌کنیم که تصاویر ماهواره‌ای تجاری با تفکیک بالا روشی را برای اندازه‌گیری و تعیین اندازه‌ی ساختمان‌ها و وسایل کار در اختیار ما قرار می‌دهند. با توجه به اینکه بخش Electrowinning در آسیاب مس وجود دارد اما در آسیاب اورانیوم شاهد وجود آن نیستم پس می‌توان از این گزینه برای تفکیک دو نوع آسیاب مذکور از همدیگر استفاده کرد. همچنین می‌توان از ویژگی معمولی مانند CCDها یا کارخانجات تولید برق برای تشخیص این دو نوع آسیاب براساس اندازه آنها استفاده کرد. کارخانجات تولید برق در آسیاب اورانیوم به چشم نمی‌خورند اما در آسیاب مس همواره در کناب بخش Electrowinning فعالیت می‌کنند اما اندازه آنها خیلی بزرگ نیست.

ما مشاهده کردیم که در مورد کارخانه Nchanga بخش یا کارخانه تولید برق فضایی با مساحت ۷۵m×۱۲۰m را اشغال می‌کند در حالیکه در مرکز Ranger مساحت آن ۲۲m×۳۵m می‌باشد. در بیشتر آسیاب‌های اورانیومی که ما به تحلیل آنها پرداختیم، شاهد وجود کارخانه تولید برق در مجموعه تولید آن نیستیم.

بعلاوه، از روی تحلیل انجام شده در این مقاله مشاهده کردیم که می‌توان از متغیرهای اندازه و تعداد CCDها در مجموعه آسیاب برای تصمیم‌گیری و پی بردن به این مورد استفاده کرد که آیا این آسیاب اورانیوم می‌باشد یا خیر.

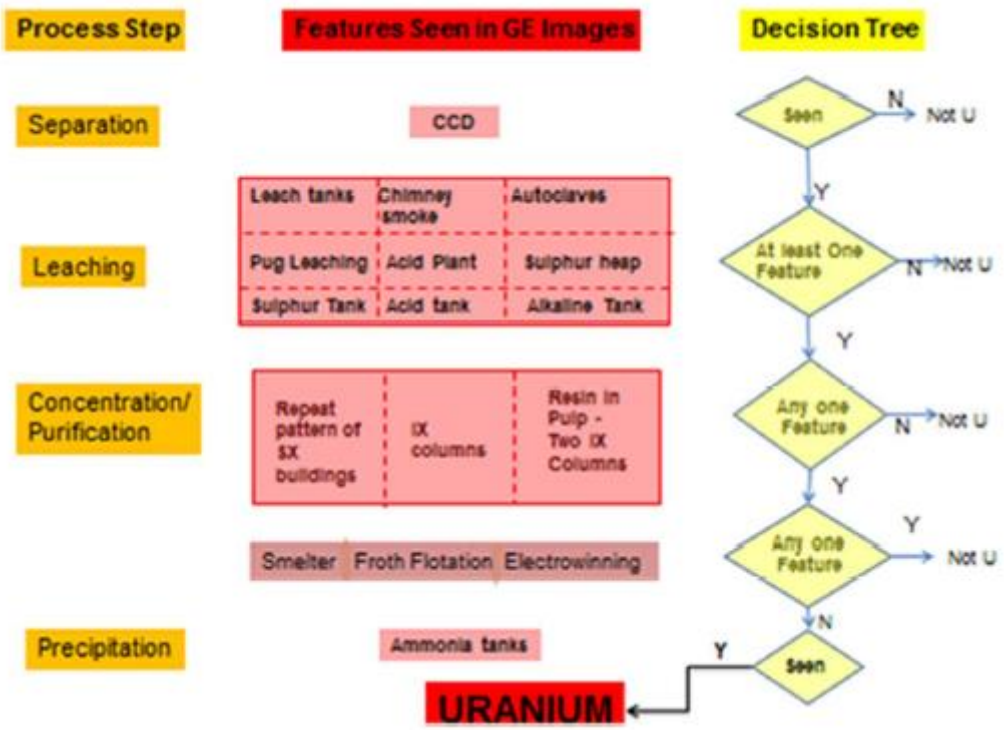
در تحلیل تصاویر متوجه شدیم که CCDها متمایزترین ویژگی آسیاب اورانیوم هستند. حالت دایره‌وار و بسیار مشهود آنها را نمی‌توان نادیده گرفت. اغلب اوقات تجهیزات مرتبط با لیچینگ را می‌توان به علت همجواری با CCDها شناسایی کرد. اما ارائه توصیف فضایی از این تجهیزات دشوار می‌باشد. مشابهاً، اگرچه ساختمان استخراج حلال الگوی تکراری را از خود نشان می‌دهد اما تشخیص آن از روی تصاویر ماهواره‌ای مستلزم دقت زیاد در مشاهده و کسب آموزش‌های لازم در زمینه‌ی مشاهده این تصاویر می‌باشد.

از آنجایی که اغلب اوقات آسیاب‌های مس با آسیاب‌های اورانیوم اشتباه گرفته می‌شوند، در وضعیتی که قادر به تصمیم‌گیری در این مورد نباشیم که آیا آسیاب مس می‌باشد یا آسیاب اورانیوم، می‌توان از ابعاد CCD به عنوان یک عامل متمایزکننده بسیار مطلوب استفاده کرد.

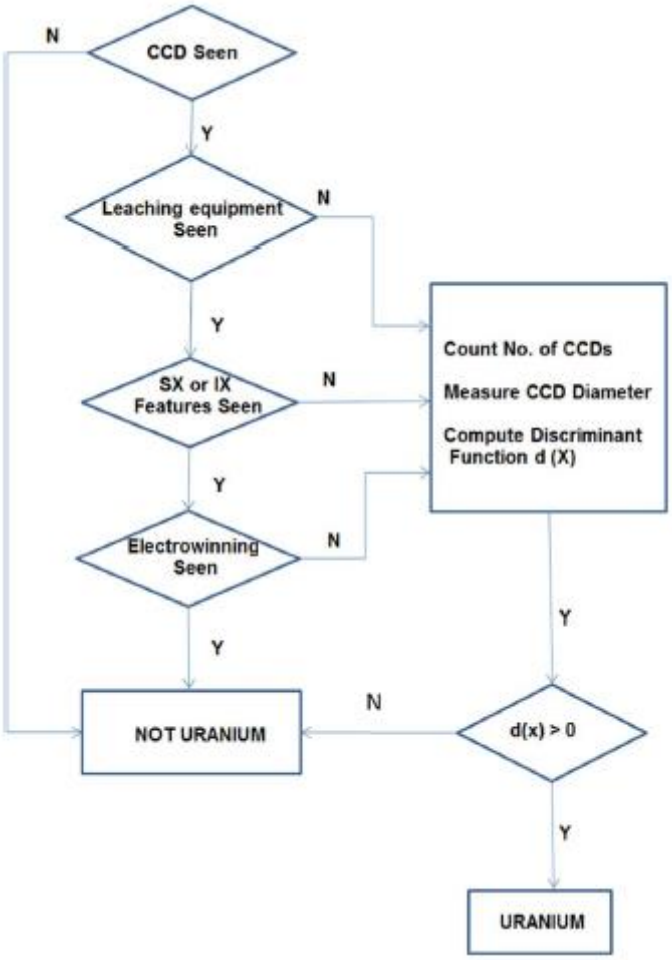
بنابراین، برای متمایز ساختن و یا تشخیص آسیاب اورانیوم از آسیاب مس در تصاویر Google Earth درختی تصمیم زیر را ترسیم کردیم (تصویر ۱۱). ابعاد CCD شواهد بیشتری برای تصمیم‌گیری در این مورد فراهم می‌کنند که آیا آسیاب مورد شک آسیاب اورانیوم می‌باشد یا خیر.

در صورتیکه بخش Electrowinning در امتداد CCDها و ویژگی‌های دیگر مشاهده شود، این الگوریتم تصمیم آسیاب را به عنوان غیراورانیومی طبقه‌بندی می‌کند. منظور اینست که هرگونه آسیاب دارای بخش Electrowinning آسیاب اورانیوم نخواهد بود. آنچه که این الگوریتم تصمیم قصد انجام را دارد اینست:

اگر CCDهایی وجود داشته باشد و بخش Electrowinning مشاهده نشود و اگر وسایل لیچینگ و استخراج قابل شناسایی باشند، پس با محاسبه تابع تمایز بر مبنای خصوصیات CCD می‌توان تصمیم گرفت که آیا آسیاب اورانیوم می‌باشد یا خیر.



تصویر ۱۰- الگوریتم تصمیم برای تشخیص دادن آسیاب اورانیوم از آسیاب مس



تصویر ۱۱- فلوچارت تصمیم برای تشخیص دادن آسیاب اورانیوم از آسیاب مس

منابع و مراجع

1. Photo Interpretation Student Handbook, 1996. National Imagery and Mapping Agency, pp. 434–439 ⟨http://sites.miis.edu/geospatialtools2013/files/2012/07/Photo-Interpretation-Student-Handbook.-Photo-Interpretation-Principles.pdf⟩
2. SRDP-R256, Commercial satellite imagery and safeguards, November 1998. Some case studies using multi-spectral and radar data, Report for the IAEA, SRDP-R256, JOPAG/11.98-PRG-284, Task JNT D00988.
3. SRDP-R269, Commercial satellite imagery and safeguards, January 2000. Further case studies using multi-spectral and radar data, Report for the IAEA, SRDP-R269, JOPAG/01.00-PRG-301, Task JNT D00988.
4. Stork, C., Smartt, H., Blair, D., Smith, J., 2006. Systematic Evaluation of Satellite Remote Sensing for Identifying Uranium Mines and Mills, Sandia Report SAND2005-7791, January 2006.
5. Sundaresan, L., Chandrashekar S., Jasani B., 2015. Monitoring Uranium Mining and Milling using Commercial Observation Satellites, ESARDA Bulletin Issue No. 53, December, Pp 73–82.
6. Alavi Naini, M. (1981), Naybandan Quadrangle Map 1:250000, Geological Survey of Iran.
7. EVNVI Tutorials, September (2001) Edition, National Space Science Data
8. Center NASA/Goddard Space Flight Center.
9. Girouard, G., Bannari, A., Harti, A. EI., Desrochers, A. (2005), Validated Spectral Angle Mapper Algorithm for Geological Mapping: Comparative study between Quickbird and Landsat-TM.
10. Hardcastle, K.C. (1995), Photolineament Factor: A new computer-aided method for remotely sensing the degree to which bedrock is fractuted, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.61, p. 739-747.
11. IAEA-TECDOC. (2003), Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data.
12. Kruse, F.A., Lefkoff. A. B., Boardman. J. W., Heidebrecht. K. B., Shapiro. A. T.,Barloon. P.J and Goetz. A.F.H. (1993), The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. Remote sens. Environ.44:145-163.

۱۳. .کریم پور، محمد حسن، ملک زاده، آزاده، حیدریان، محمد رضا.۱۳۸۴ اکتشاف ذخایر معدنی(مدلهای زمین شناسی، ژئوشیمی، ماهواره ای و ژئوفیزیکی) .انتشارات دانشگاه فردوسی، چاپ اول.

۱۴. .کلاگری، ع .ا.، ۱۳۷۱ . اصول اکتشافات ژئوفیزیکی .انتشارات دانشگاه تبریز.

۱۵. .لکزایی، احمدرضا، ضیا، افشار، ظریفی، مجید، بیدهندی، نبی، یگانی، فرخشاد، حفیظی، محمدکاظم.۱۳۸۲ . اکتشاف اورانیوم به روش ژئوفیزیک هوایی در فاز شناسایی در منطقه برندق .دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، دانشگاه تهران.

۱۶. لیلساند و کی فر، ترجمه مالمیریان، حمید، ۱۳۸۱ ، اصول و مبانی سنجش از دور و تعبیر و تفسیر تصاویر هوایی و ماهوار های .انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.

۱۷. .مجری طرح :کره ای، محمدتقی، مجری فنی :محمدی جوآبادی، علی، مهدی زاده تهرانی، سیمین، مشاورعلمی : سامانی، بهرام، مسئول اجرایی :زارعی نژاد، مژگان، گروه دورسنجی :عسگری، امیر عباس، گروه ژئوفیزیک هوایی :علوی ، مژگان، گروه تلفیق و مدلسازی :بهنیا ،پوران، گروه اطلاعات زمین مرجع:اصفهانی نژاد، مژگان، موسوی، سید علی، تنظیم کنندگان :مژگان، موسوی، سید علی .۱۳۸۷ . گزارش بررسی های اکتشافات سیستماتیک ناحیه ای و شناسایی نواحی امیدبخش معدنی در زون بافق – پشت بادام.

۱۸. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

۱۹. .معروفی نقدی، خسرو، محمدزاده، محمد جعفر، فلاحت، رضا .۱۳۸۳ . بررسی آلتراسیون و انطباق آن بااولین کنفرانس مهندسی TM. ساختارهای خطی و حلقوی در منطقه آلوت با استفاده از تصاویر ماهواره ای معدن ایران.

۲۰. .معصومی، فیض الله، فلاحت، رضا .۱۳۸۴ . تجزیه و تحلیل و تلفیق داد ههای ژئوفیزیکی هوائی با روش آنالیز و تئوری فازی جهت تهیه نقشه پتانسی لیابی منطقه سرچشمه کرمان .دوازدهمین (PCA) مولفه اصلی کنفرانس ژئوفیزیک ایران، دانشگاه تهران.

۲۱. .معصومی، فیض الله .۱۳۸۶ . تهیه نقشه پتانسیل معدنی در شمال بافت با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. پایان نامه کارشناسی بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

22. Abdeen, M. M., Thurmond, A. K., Abdeslam, M. G., 2001. Application of ASTER band ratio images for geological mapping in arid regions: the Neoproterozoic Allagi Surture, Egypt. GSA Annual Meeting. November, USA.