



بررسی فرایند پیش تغلیظ توریم در سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند با استفاده از ماریچ همفری و بهینه‌سازی آن با روش آماری

علیرضا خانچی*، حسن صدیقی، شیدا انصار، جواد فصیحی رامندی، ایرج اکبری
پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: جداسازی با ماریچ همفری یکی از شیوه‌های کنسانتره‌سازی کانی‌ها است که اساس آن روش‌های ثقلی است. عملکرد کنسانتره‌سازی در فرایندهای فرآوری مواد معدنی، به وسیله‌ی عیار و بازیابی مشخص می‌شود. این عامل‌ها وابسته به انتخاب مناسب متغیرهای فرایندی است. در این مقاله آرایه‌ی متعامد L_9 برای طراحی آزمایش‌ها بر مبنای بهینه‌سازی چندگانه برای دست‌یابی به بالاترین عیار و بازیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش‌ها پارامترهای نرخ خوراک‌دهی، درصد جامد پالپ و اندازه‌ی ذرات ورودی خوراک مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که دستگاه ماریچ همفری، برای پیش‌کنسانتره‌سازی مطلوب بوده و با بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن، عیار و بازیابی توریم، به ترتیب، ۴۹ و ۵ درصد افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: پیش تغلیظ، توریم، آنومالی ۵ ساغند، ماریچ همفری، بهینه‌سازی

Investigation of Thorium Preconcentration Process on 5th Anomaly of the Saghand Ore and its Optimization Using Statistical Method

A.R. Khanchi*, H. Sedighi, Sh. Ansar, J. Fasihi, I. Akbari

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Abstract: The Humphrey spiral is one of the mineral concentration techniques based on gravity separation. In various mineral processes, the characteristics of concentration performance are indicated by the grade and recovery factors. These factors depend on appropriate selection of process parameters. In this work, The L_9 orthogonal array is used in the design of an experiment based on multi-objective optimization method to achieve the maximum concentration grade and recovery. The input process parameters that have been considered are the feed size, feed rate, and feed solids. The results show that the Humphrey spiral can be considered as a suitable technique for the preconcentration of thorium. Accordingly, upon considering the parameters which are affecting the performance of the Humphrey spiral, the grade and recovery of thorium increase to 49 and 5 percent, respectively.

Keywords: Preconcentration, Thorium, 5th Anomaly of Saghand, Humphrey Spiral, Optimization



۱. مقدمه

روش‌های فرآوری ثقلی، مغناطیسی و الکترواستاتیکی استفاده می‌شود. فلوتاسیون روشی استاندارد برای استحصال موناژیت از ذخایر گرما-آبی و آذرین است، با وجود این، روش‌های فیزیکی مانند روش‌های ثقلی برای پیش‌تغلیظ در این گونه ذخایر استفاده می‌شود. پس از بالا بردن عیار توریم در کنسانتره با استفاده از روش‌های فیزیکی و فلوتاسیون، برای استخراج از روش‌های هیدرومتالورژی استفاده می‌شود. در این فرایند کانی‌ها در محلول اسیدی یا قلیایی حل و به این ترتیب، توریم به صورت یون وارد محلول می‌شود [۷، ۸].

دستگاه جداکننده‌ی ماریپچ همفری یکی از دستگاه‌های مهم در کنسانتره‌سازی کانی‌ها است که اساس کار آن بر مبنای روش ثقلی است. پارامترهایی که در عملکرد دستگاه ماریپچ همفری اثر گذارند عبارت از نرخ جریان خوراک ورودی، اندازه‌ی ذرات، درصد جامد خوراک ورودی و موقعیت جداکننده‌ی کنسانتره و باطله هستند [۹، ۱۰]. کنسانتره‌سازی مطلوب با استفاده از دستگاه ماریپچ همفری وابسته به انتخاب مناسب پارامترهای عملیاتی دستگاه و درصد جامد خوراک ورودی به دستگاه است [۱۱]. بنابراین تعیین مقدار بهینه‌ی پارامترهای عملیاتی دارای اهمیت فراوان است.

در طراحی آزمایش برای بهینه‌سازی یک شاخص کیفیت در یک زمان، در اغلب مواقع بدون در نظر گرفتن شاخص‌های کیفیت دیگر اقدام به انجام آزمایش می‌کنند. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده که تنظیم پارامترهای بهینه‌سازی برای یک کیفیت مشخص ممکن است، بر روی دیگر پارامترهای کیفیت تأثیر منفی بگذارد. اما همیشه شرایطی مطلوب است که تمام شاخص‌های کیفیت بهبود یابند، به عنوان مثال عیار و بازیابی شاخص‌های کیفیت مستقلی در فرایند کنسانتره‌سازی محسوب می‌شوند، به طور هم‌زمان در یک فرایند تولید محصول و یا فرایند مشابه باید بهینه شوند. آنتونی نشان داد که تابع زیان کیفیت تاگوچی بر مبنای روش بهینه‌سازی چندگانه برای فرایندهای صنعتی می‌تواند روشی برای حل این مشکلات باشد. او ارتقاء قابل توجهی در بهینه‌سازی شاخص‌های کیفیت چندگانه، در مقایسه با بهینه‌سازی یک شاخص کیفیت به دست آورد [۱۲].

در فرایندهای فرآوری مواد معدنی، انجام آزمایش‌های مقایسه‌ای ضروری است تا امکان دستیابی به عملکرد بهتر،

توریم به صورت گسترده در طبیعت توزیع شده است، این عنصر غالباً به همراه لانتانیدها در طبیعت مشاهده می‌شود. با وجود ناشناخته بودن میزان دقیق ذخیره‌های توریم به عنوان یک عنصر راهبردی، ذخیره‌های شناخته شده‌ی آن نشان می‌دهد که مقدار توریم موجود در جهان تقریباً سه برابر اورانیم است [۱]. توریم می‌تواند طی فرایند زیاسازی، به اورانیم-۲۳۳ (^{233}U) تبدیل شده و به عنوان سوخت رآکتور مورد استفاده قرار بگیرد. استفاده از چرخه‌ی سوخت توریم در مقایسه با چرخه سوخت اورانیم، مقادیر کم‌تری پلوتونیم و دیگر عناصر فرااورانیم تولید می‌کند [۲].

توریم در چندین کانی یافت می‌شود؛ رایج‌ترین ذخیره‌های آن، ذخیره‌های فسفاته‌ی عناصر خاکی نادر-توریم (موناژیت) است. مقدار متوسط توریم در کانی موناژیت ۶ الی ۷ درصد و حداکثر مقدار توریم اکسید موجود در آن ۱۲ درصد است. ذخیره‌های موناژیت موجود در جهان ۱۲ میلیون تن برآورد شده است، که دو سوم آن در ذخیره‌های پلاسری و در قسمت شرقی هند قرار دارد. ذخیره‌های توریم در دنیا در کشورهای مختلفی شناسایی شده‌اند. بزرگ‌ترین ذخیره‌های توریم دنیا در استرالیا، هند، آمریکا، نروژ، کانادا و کشورهای چون برزیل و آفریقای جنوبی واقع شده‌اند [۳]. یکی از ذخیره‌های عناصر خاکی نادر شامل توریم در منطقه‌ی ساغند (شمال استان یزد) واقع شده است، که عیار میانگین آن ۰/۵ درصد تخمین زده شده است [۴]. کانسنگ ساغند منشأ گرما-آبی دارد و از نوع ذخیره‌های متاسوماتیک است. این ذخیره علاوه بر عناصر خاکی نادر، شامل ایلمنیت، هماتیت، کلسیت، موناژیت (کانسنگ اصلی توریم) و اورانینیت (کانسنگ اصلی اورانیم) است. موناژیت مهم‌ترین کانی حاوی عناصر خاکی نادر و توریم در کانسنگ ساغند است. موناژیت ساغند به عنوان موناژیت پرتوزا طبقه‌بندی می‌شود؛ موناژیت پرتوزا به طور متوسط حاوی ۶ درصد توریم و ۰/۳ درصد اورانیم است [۵، ۶].

برای استحصال توریم از سنگ معدن چندین روش وجود دارد. این روش‌ها شامل ترکیبی از روش‌های ثقلی، مغناطیسی و الکترواستاتیکی با روش فروشویی است. در پلاسره‌های ساحلی برای جدا کردن عناصر خاکی نادر و توریم عمدتاً از ترکیبی از



کانی‌های ایلمنیت ((FeTiO_3) ، هماتیت ((Fe_2O_3) ، منیتیت ((Fe_3O_4) ، کلسیت ((CaCO_3) ، باستانزیت ((LnFCO_3) و موناازیت ($(\text{Ce, La, Nd, Th}) \text{PO}_4$) در نمونه است (جدول ۲). مطالعه‌ی این نمونه با استفاده از میکروسکوپ نوری نشان داد که کانی موناازیت به صورت پراکنده در ترکیب سیمانی ایلمنیت و هماتیت قرار گرفته است، از این رو کانی‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی توریم (موناازیت) در طی فرایند خردایش اولیه در بخش‌های درشت دانه تمرکز بیش‌تری از خود نشان داد. نتایج تجزیه‌ی کانسنگ آنومالی ۵ ساغند نشان داد که مقدار توریم در نمونه کم‌تر از ۱۷۰ ppm بود.

۲.۲ دستگاه‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه ماریچ همفری ساخت شرکت دانش فراوان استفاده شد. این دستگاه شامل ۵ پیچ، جنس ماریچ آن، فایبرگلاس، ظرفیت (تن در ساعت) آن، ۰/۵ تا ۱/۵، دارای یک نقطه‌ی خوراک‌دهی، حجم مخزن خوراک‌دهنده‌ی آن ۶۰ لیتر، جنس مخزن آن فولاد زنگ نزن، و پمپ آن سانتریفوژ پلی اتیلن بود.

برای تجزیه‌ی عنصری از دستگاه پلاسمای جفت شده‌ی القایی مدل Elmer Optima 3000 Dv Icp Aes برای شناسایی فازها از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Stoe Stadi-P-Cu $K\alpha_1$ استفاده شد. تفسیر نتایج پراش پرتو ایکس با استفاده از نرم‌افزار panalytical x'pert highscore به انجام رسید.

توسط فرایند مورد ارزیابی قرار گیرد. در بعضی از کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی افزایش ۱ تا ۲ درصدی در عیار و بازیابی، بازدهی اقتصادی قابل توجهی را به همراه خواهد داشت [۱۳]. در فرایند پیش تغلیظ توریم دست‌یابی به بالاترین عیار و بازیابی مطلوب است، زیرا علاوه بر کاهش هزینه، زمان فرایند‌های خالص‌سازی را نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد.

با توجه به این‌که تاکنون هیچ کار تجربی به منظور افزایش هم‌زمان عیار و بازیابی توریم با ماریچ همفری در ایران انجام نشده است، بررسی بهینه‌سازی هم‌زمان عیار و بازیابی پیش‌کنسائره‌ی توریم حاصل از این دستگاه امری ضروری است. هدف این پژوهش، بررسی امکان کاربرد جداکننده‌ی ماریچ همفری در پیش‌تغلیظ توریم از سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند و بهینه‌سازی هم‌زمان عیار و بازیابی توریم در فرایند کنسائره‌سازی با آن است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ مشخصه‌یابی کانسنگ اولیه

تهیه‌ی نمونه‌ی معرف با استفاده از روش تقسیم مخروطی و تقسیم‌های متوالی با ریفل انجام شد سپس به منظور مشخصه‌یابی نمونه‌ی تهیه شده از آنومالی ۵ ساغند، از پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) و تجزیه‌ی عنصری با دستگاه پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP) استفاده شد. نتایج تجزیه‌ی عنصری در جدول ۱ نشان داده شده است. الگوی پراش پرتو ایکس حاکی از حضور

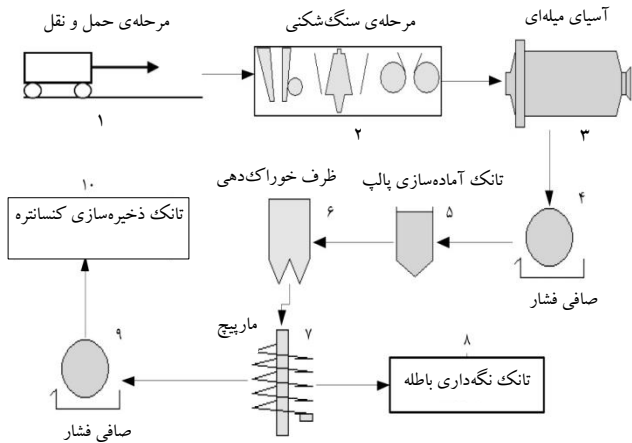
جدول ۱. نتایج تجزیه‌ی عنصری کانسنگ آنومالی ۵ ساغند (در سطح اطمینان ۹۵ درصد)

Ce	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Eu	Tb	Dy	عنصر
۷۱۰±۷۹۹	۸۱۲±۱۰۳۷	۱۴۴±۱۰۷۲	۵۳±۰۶۲	۵±۰٫۰۶	۷۰±۰٫۸۹	۷±۰٫۰۸	۹±۰٫۱۲	۸۵±۱٫۱۱	مقدار (ppm)
Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Th	U	عنصر	
۵±۰٫۱۱	۸۲±۱٫۶۹	۱۵±۰٫۲۶	۱۰۳±۱٫۳۳	۱۰±۰٫۱۴	۷۵۰±۱۱٫۸۴	۱۶۲±۱٫۴۷	۲۰۵±۱٫۸۹	مقدار (ppm)	

جدول ۲. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ نوری

کانی	کلسیت	هورنبلند	منیتیت	هماتیت	ایلمنیت
توزیع کانی	کانی اصلی	کانی اصلی	کانی اصلی	کانی اصلی	کانی اصلی
کانی	کلریت	کوارتز	دیویدلیت-اوراینیت	سریدوت	روتیل
توزیع کانی	کانی فرعی (کم)	کانی فرعی (کم)	کانی فرعی (کم)	کانی فرعی (کم)	کانی فرعی (کم)

۳.۲ روش آزمایش



شکل ۱. روندنمای فرایند پیش‌کنسانتره‌سازی.

۴.۲ طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش تاگوچی

روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها یکی از قوی‌ترین شیوه‌های کنترل کیفیت آماری است که در آن سطح‌های عامل‌های کنترلی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که تغییرات به وجود آمده در پاسخ‌ها به علت نویز و عامل‌های غیر قابل کنترل مانند رطوبت، ارتعاش و درجه‌ی حرارت محیط خنثی شود. در روش تاگوچی طراحی آزمایش‌ها بر اساس آرایه‌های متعامد استاندارد انجام می‌شود [۱۴، ۱۵]. در تمامی آزمایش‌ها، مقدارهای شاخص‌های کیفیت^(۲) برای محاسبه‌ی مقدارهای زیان کیفیت^(۳) برای هر شاخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک فرایند، تابع زیان کیفیت بسته به طبیعت شاخص‌های کیفیت می‌تواند دارای اشکال مختلفی باشد. در این کار پژوهشی (کنسانتره‌سازی موناژیت حاوی توریم) مقدارهای بالاتر برای هر دو پارامتر عیار و بازیابی مطلوب است، بنابراین تابع زیان کیفیت در آزمایش شماره ۱ام (Li)، بر اساس هدف مقدارهای بیش‌تر نتیجه مطلوب‌تر، چنین ارایه می‌شود [۱۲]

$$Li = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right] \quad (1)$$

که در آن، y_i نتیجه‌ی مشاهده شده در آزمایش ۱ام است که دارای سطح‌های پارامتر یکسان هستند و n تعداد آزمایش‌ها است. برای بهینه‌سازی هم‌زمان چند شاخص کیفیت، باید مقادیر زیان کیفیت [Li] به‌نحیج شود، زیرا یکای شاخص‌های کیفیت با هم مشابه نیستند [۱۶]

$$\hat{I}_{ij} = \frac{I_{ij}}{I_{i*}} \quad (2)$$

نمونه‌ی معرف تهیه شده پس از آماده‌سازی، با استفاده از سنگ‌شکن‌های فکی، استوانه‌ای و آسیای میله‌ای تا زیر ۱۰۰۰ میکرون خرد شد. آزمایش‌ها به صورت ناپیوسته مطابق روندنمای شکل ۱ انجام شد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، روندنمای پیش‌تغلیظ شامل دستگاه‌های خردایش، دستگاه ماریچ آزمایشگاهی، تانک همزن‌دار برای آماده‌سازی پالپ^(۱)، پمپ برای تغذیه‌ی ماریچ با نرخ جریان ثابت و ظروف جمع‌آوری کنسانتره و باطله است. پالپ تهیه شده با درصد جامد مشخص به تانک هم‌زدن‌دار منتقل و به مدت ۴۰ دقیقه هم‌زده شد. پالپ همگن موجود در تانک با استفاده از پمپ و با نرخ جریان ثابت به داخل ماریچ همفوری منتقل شد. پارامترهای عملیاتی که عبارت بودند از اندازه‌ی ذرات (A)، درصد جامد پالپ (B) و نرخ جریان پالپ ورودی به ماریچ همفوری (C)، به عنوان متغیرهای فرایندی در نظر گرفته شدند. با توجه به این‌که نحوه‌ی تنظیم درجه‌ی کنسانتره به کنترل دقیق جریان پالپ بستگی داشت، با کنترل دقیق این درجه می‌شد به جدایش مطلوبی دست یافت.

آزمایش‌های اولیه نشان داد که درجه‌ی کنسانتره، مستقل از نرخ جریان‌های ورودی عمل می‌کرد، به عبارت دیگر نرخ جریان‌هایی که در این آزمایش در نظر گرفته شدند تأثیری بر کارایی درجه‌ی کنسانتره نداشتند. بنابراین در این آزمایش‌ها درجه به عنوان یک متغیر در طراحی آزمایش منظور نشد و در طول آزمایش‌ها، تنظیم درجه به نحوی انجام شد که با توجه به نرخ جریان ورودی، کنسانتره با عیار یکنواخت از آن خارج شد. به این منظور تنظیم دقیق این درجه بر اساس نرخ جریان ورودی و به طور تجربی انجام شد. در طی انجام هر آزمایش از خروجی کنسانتره تحت شرایط ثابت نمونه‌برداری شد. نمونه‌های برداشت شده پس از عبور از صافی، خشک و پس از توزین برای تعیین عیار و محاسبه‌ی بازیابی مورد استفاده قرار گرفت. از هر نمونه، ۳ گرم توزین و بر روی آن ۱۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید و ۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید اضافه، و درون اتوکلاو با پوشش تفلون در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان ۲ ساعت حرارت داده شد. سپس فرصت کافی برای خنک شدن اتوکلاو داده شد و در نهایت محلول درون آن برای تجزیه شدن با دستگاه پلاسما جفت شده‌ی القایی رقیق و آماده‌سازی شد.



مورد استفاده قرار می‌گیرد. اهمیت نسبی عامل‌ها اغلب با کمیت F-ratio یا درصد اثر ارایه می‌شود. مقادیر بالاتر F-ratio نشان‌دهنده‌ی اهمیت بیش‌تر آن متغیر فرایندی است.

برای انجام این آزمایش‌ها سه سطح برای هر یک از سه عامل و بدون در نظر گرفتن اندرکنش آن‌ها در نظر گرفته شد. بر این اساس، آرایه‌ی متعامد L_9 برای این آزمایش‌ها انتخاب شد. مقادیر عددی عامل‌های کنترلی در سطح‌های متفاوت در جدول ۳ داده شده است. در جدول ۴ آزمایش‌ها به همراه سطح‌های متفاوت عامل‌های کنترلی در هر آزمایش ارایه شده است. به طور کلی ۹ آزمایش با دو بار تکرار به روش تاگوچی انجام گرفت، و در هر آزمایش سطح‌های متفاوتی از عامل‌ها انتخاب شد تا اطلاعات کافی جهت تعیین اثر هر عامل در آزمایش‌ها فراهم شود.

۳. نتایج و بحث

مقدارهای عیار و بازیابی در هر آزمایش بر مبنای طراحی L_9 در جدول ۴ داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بالاترین عیار برای توریم به طور متوسط ۴۵۶ ppm در آزمایش ۵ به دست آمد، این در حالی است که کم‌ترین مقدار عیار را در آزمایش ۱ می‌توان یافت. ارزیابی نتایج بازیابی نشان داد که بالاترین بازیابی در آزمایش ۴ قابل دستیابی بود.

جدول ۳. متغیرهای عملیاتی و سطح‌های آن‌ها

متغیر	نماد	یکا	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
اندازه‌ی ذرات	A	μm	۵۰۰	۷۰۰	۱۰۰۰
درصد جامد خوراک	B	%	۱۵	۲۰	۳۰
نرخ جریان خوراک	C	L/s	۰.۵	۱	۱.۵

جدول ۴. طرح تاگوچی L_9 و عیار و بازیابی توریم

شماره‌ی آزمایش	سطح‌های عامل‌ها			نتیجه‌ها			
	A	B	C	عیار (ppm)		بازیابی (%)	
				آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۱	آزمایش ۲
۱	۱	۱	۱	۲۷۳	۲۹۷	۵۸.۱۴	۵۰.۵۷
۲	۱	۲	۲	۳۱۴	۳۱۰	۵۲.۰۴	۴۷.۸۱
۳	۱	۳	۳	۲۸۴	۳۷۱	۴۹.۹۲	۴۳.۵۱
۴	۲	۱	۲	۴۲۵	۴۱۸	۵۵.۰۸	۵۹.۴۵
۵	۲	۲	۳	۴۳۲	۴۸۰	۴۹.۹۸	۵۷.۴۹
۶	۲	۳	۱	۳۴۹	۳۰۹	۵۶.۰۶	۵۱.۰۵
۷	۳	۱	۳	۲۹۷	۵۱۴	۵۲.۰۲	۵۳.۷۳
۸	۳	۲	۱	۳۴۶	۳۸۱	۵۶.۱	۴۱.۶۱
۹	۳	۳	۲	۳۳۹	۳۳۳	۴۸.۹۶	۴۷.۳۷

که در آن، L_{ij} ، زیان کیفیت بهنجار شده برای i امین شاخص کیفیت در j امین شرایط آزمایش است و L_i^* زیان کیفیت بیشینه برای i امین شاخص کیفیت در تمام آزمایش‌های انجام شده است. L_{ij} از حداقل مقدار صفر تا حداکثر مقدار ۱ تغییر می‌کند. اگر w_i ضریب وزنی برای i امین شاخص کیفیت و p تعداد شاخص کیفیت باشد، پس زیان کیفیت بهنجار شده‌ی کلی برای j امین شرایط آزمایش (L_j) چنین محاسبه شود [۱۶]

$$TNQL(L_j) = \sum_{i=1}^p w_i \hat{L}_{ij} \quad (۳)$$

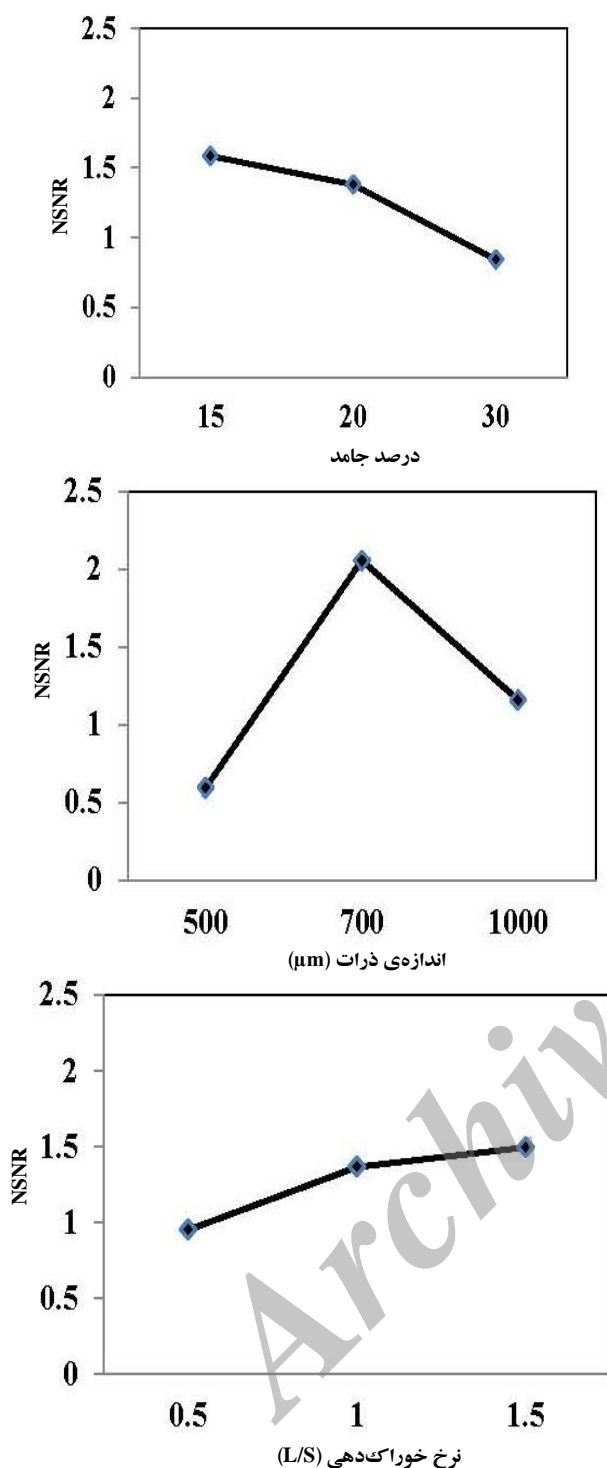
نسبت چندگانه‌ی سیگنال به نویز^(۴) ($MSNR$) برای ارایه‌ی شاخص کیفیت^(۵) در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نسبت سیگنال به نویز (S/N) نشان‌دهنده‌ی نسبت بخش مطلوب به بخش نامطلوب است. $MSNR$ با j امین شرایط آزمایش (η_j) متناظر است که چنین محاسبه می‌شود

$$\eta_j = -1 \cdot \log_{10}(TNQL(L_j)) \quad (۴)$$

هدف آزمایش بهینه‌سازی، افزایش مقدار $MSNR$ است. مقادیر میانگین برای $MSNR$ ها، وقتی یک متغیر فرایندی در آزمایش‌های مختلف ثابت است، برای تفسیر اثر این متغیر بر روی شاخص کیفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. سطح متغیر متناظر با بیشینه‌ی میانگین $MSNR$ ها، سطح بهینه برای آن متغیر نامیده می‌شود. مقادیر قابل پیش‌بینی ($MSNR(\eta_{opt})$) در شرایط بهینه‌ی سطح‌های متغیرها چنین محاسبه می‌شود [۱۷]

$$\eta_{opt} = \bar{\eta} + \sum_{i=1}^k (\eta_{mi} - \bar{\eta}) \quad (۵)$$

که در آن $\bar{\eta}$ میانگین $MSNR$ برای تمامی آزمایش‌ها است، K تعداد عامل‌های کنترلی است و η_{mi} متوسط $MSNR$ برای i امین عامل کنترلی متناظر با سطح بهینه‌ی متغیر است. به منظور تأیید پاسخ‌های پیش‌بینی شده‌ی تعدادی آزمایش، اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در شرایط بهینه‌ی پیشنهادی انجام می‌شود [۱۴]. تحلیل واریانس ($ANOVA$) برای تخمین درصد اثر کمی هر عامل کنترلی بر روی پاسخ‌های اندازه‌گیری شده،



شکل ۲. اثر سطح‌های عامل‌ها بر نسبت‌های S/N چندگانه

جدول ۶. اثر سطح‌های عامل‌ها بر نسبت‌های چندگانه‌ی S/N (dB)

عامل‌ها	علامت	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	اختلاف پیشینه	درجه‌ی اهمیت
اندازه‌ی ذرات	A	۰.۵۹۵۳	۲.۰۵۴۹*	۱.۱۵۸۹	۱.۴۵۹۶	۱
درصد جامد خوراک	B	۱.۵۸۴۲*	۱.۳۸۱۲	۰.۸۴۳۷	۰.۷۴۰۵	۲
نرخ خوراک‌دهی	C	۰.۹۵۰۰	۱.۳۶۵۶	۱.۴۹۳۶*	۰.۵۴۳۶	۳

* سطح بهینه

به منظور ارزیابی اثر هر عامل بر روی عیار و بازیابی، مقادیرهای نسبت S/N برای هر عامل باید محاسبه می‌شود. برای محاسبه‌ی کل زیان کیفیت بهنجار شده (TNQL)، برای هر دو شاخص کیفیت عیار و بازیابی، درصد اهمیت یکسان در نظر گرفته شد، یعنی در این آزمایش‌ها $W_1=W_2=0.5$. نسبت سیگنال به نویز چندگانه (MSNR) برای هر عامل از طریق میانگین‌گیری از مقادیرهای TNQL در سطوح‌های متفاوت محاسبه شد. این نتایج در جدول ۵ داده شده است.

نمودارهای اثر سطح‌های عامل‌ها بر MSNR (شکل ۲) نشان می‌دهد که برای سه عامل اندازه‌ی ذرات، درصد جامد و نرخ خوراک‌دهی شیب خطوط بین سطوح‌های متفاوت، یکسان نیست. بنابراین، سطوح‌های مختلف هر عامل اثرهای متفاوتی بر روی MSNR دارد. افزایش در مقدار MSNR، هنگامی که نرخ خوراک‌دهی از ۰.۵ به یک تغییر می‌کند به مراتب بیش‌تر از هنگامی است که نرخ خوراک‌دهی از ۱ به ۱.۵ لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شیب MSNR در نرخ خوراک‌دهی بالاتر از ۱ لیتر بر ثانیه ثابت می‌ماند. با وجود این، شیب خط برای درصد جامد بین سطوح‌های ۱۵ تا ۲۰ درصد کم‌تر از شیب آن در فاصله‌ی ۲۰ تا ۳۰ درصد است. برای عامل اندازه‌ی ذرات کم‌ترین مقدار MSNR در ابعاد ۵۰۰ میکرومتر مشاهده شد و با تغییر اندازه‌ی ذرات خوراک ورودی از ۵۰۰ به ۷۰۰ میکرومتر مقدار MSNR افزایش یافت اما با افزایش بیش‌تر در اندازه‌ی ذرات از مقدار MSNR کاسته شد. اثر عامل‌های مختلف بر پیش‌کنسارته‌سازی در جدول ۶ نشان داده شده است. سطوح‌های بهینه‌ی عامل‌ها برای بیشینه مقدار MSNR در شرایط اندازه‌ی ذرات ۷۰۰ میکرومتر (سطح ۲)، نرخ خوراک‌دهی ۱.۵ لیتر بر ثانیه (سطح ۳) و درصد جامد ۱۵ درصد (سطح ۱) به دست آمد.

جدول ۵. کل زیان کیفیت بهنجار شده (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز چندگانه (MSNR)

شماره‌ی آزمایش	A	B	C	TNQL	MSNR (dB)
۱	۱	۱	۱	۰.۸۶۹۵	۰.۶۰۷۱
۲	۱	۲	۲	۰.۸۴۸۷	۰.۷۱۲۰
۳	۱	۳	۳	۰.۸۹۸۱	۰.۴۶۶۷
۴	۲	۱	۲	۰.۵۵۷۳	۲.۵۳۸۸
۵	۲	۲	۳	۰.۵۷۴۴	۲.۴۰۷۴
۶	۲	۳	۱	۰.۷۵۵۳	۱.۲۱۸۶
۷	۳	۱	۳	۰.۶۹۰۷	۱.۶۰۶۷
۸	۳	۲	۱	۰.۷۸۹۹	۱.۰۲۴۲
۹	۳	۳	۲	۰.۸۲۳۰	۰.۸۴۵۸



۱.۳ نتایج ANOVA

معنی دار است. در این مطالعه، درجه‌ی آزادی خطا ۲ است. مقدار F_{cr} برای این آزمایش‌ها، درجه‌ی آزادی ۲ و سطح اطمینان ۹۵ درصد، ۱۹ است. بر مبنای این نتایج، نسبت F برای اندازه‌ی ذرات خوراک ورودی و درصد جامد بزرگ‌تر از مقدار F_{cr} است. این بیان‌گر آن است که واریانس این عامل‌ها معنی دار است و آن‌ها اثرات معنی‌داری بر روی پاسخ آزمایش‌ها دارند.

انجام آزمایش‌های اعتبارسنجی، یک مرحله‌ی نهایی بسیار مهم در اثبات صحت طراحی آزمایش‌ها است. هدف از انجام آزمایش‌های اعتبارسنجی، تأیید اعتبار شرایط بهینه‌ی پیش‌بینی شده به وسیله‌ی ماتریس آزمایش‌ها، به منظور ارزیابی بهینه‌ی مقدارهای قابل انتظار شاخص‌های کیفیت است. این آزمایش‌ها در شرایط بهینه‌ی تعیین شده انجام شد، مقادیر پیش‌بینی شده‌ی عیار و بازیابی و نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۸ داده شده است. مقدار پیش‌بینی شده در مقدار $MSNR$ در سطح‌های بهینه‌ی متغیرهای فرایند مطابق با محاسبات، ۲/۵۹ تعیین شد، این در حالی است که در آزمایش‌های اعتبارسنجی مقدار ۲/۵۴ (عیار ppm) ۴۲۹/۱۳ و بازیابی ۵۵/۷۶٪ به دست آمد. با مقایسه‌ی عیار و بازیابی در آزمایش اطمینان با آزمایش اولیه که در آن عیار و بازیابی، به ترتیب، ۲۸۵/۳۶ ppm و ۵۴/۳۵٪ است، هم‌چنان که مشاهده می‌شود افزایش قابل توجهی در مقادیر این شاخص‌های کیفیت روی داده است.

برای بررسی پارامترهای مؤثر بر یک فرایند، از ANOVA استفاده می‌شود. ANOVA برای شاخص‌های کیفیت عیار و بازیابی در جدول ۷ نشان داده شده است. ردیفی که در جدول به عنوان خطا (Error) نشان داده شده، مجموع سهم خطاهای دیگر را نشان می‌دهد که متأثر از عامل‌های غیرقابل کنترل (نویزها) و یا پیش‌بینی نشده بوده است. همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود، مقادیر محاسبه شده‌ی خطا در حدود ۳ درصد است. این نتیجه نشان‌دهنده‌ی آن است که خطای آزمایش پایین بوده و یا حتی اگر عاملی در طراحی منظور نشده، برآیند آن با سایر خطاها نقش بارزی در ایجاد خطای کلی نداشته است، به عبارت دیگر مجموع عامل‌های غیرقابل کنترل اثر معنی‌داری در روند طراحی آزمایش نداشته است. براساس اطلاعات این جدول، مؤثرترین عامل اندازه‌ی ذرات با درصد اثر ۶۸/۹۲٪ و دومین عامل معنی دار، درصد جامد با مقدار ۱۷/۹۹٪ است.

نسبت واریانس (F-ratio) برای مشخص کردن اثرات معنی‌دار هر عامل بر روی $MSNR$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر بالای نسبت F ، نشان‌دهنده‌ی اثر بیش‌تر بر روی $MSNR$ است. برای هر پارامتر نسبت واریانس با F بحرانی^(۶) (F_{cr}) (نسبت واریانس موجود در جدول‌های استاندارد در یک حد اطمینان) مقایسه می‌شود، اگر مقدار نسبت واریانس بیش‌تر از مقادیر F بحرانی باشد، آزمایش‌های آماری در درجه‌ی اطمینان انتخاب شده

جدول ۷. تحلیل واریانس (ANOVA) برای شاخص‌های کیفیت چندگانه (عیار و بازیابی)

منبع واریانس	درجه‌ی آزادی (f)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت واریانس (F)	واریانس بحرانی (F_{cr})	مجموع مربعات خالص (S')	درصد مشارکت (P)
اندازه‌ی ذرات	۲	۳,۲۴۹	۱,۶۲۴	۷۸	۱۹	۳,۲۰۸	۶۸,۹۲۳
درصد جامد	۲	۰,۸۷۹	۰,۴۳۹	۲۱,۱۰۱	۱۹	۰,۸۳۷	۱۷,۹۹۱
نرخ خوراک‌دهی	۲	۰,۴۸۴	۰,۲۴۲	۱۱,۶۲	۱۹	۰,۴۴۲	۹,۵۰۵
خطا	۲	۰,۰۴	۰,۰۲				۳,۵۸۱
مجموع	۸	۴,۶۴۵					٪۱۰۰

جدول ۸. نتیجه‌های آزمایش‌های اطمینان در سطح‌های بهینه‌ی متغیرها

شرایط اولیه آزمایش	متغیرهای بهینه		
	پیش‌بینی شده	تجربی	تجربی (تکرار)
سطح	$A_1B_1C_1$	$A_2B_1C_2$	$A_2B_1C_2$
عیار (ppm)	۲۸۵,۳۶	-	۴۲۹,۱۳
بازیابی (%)	۵۴,۳۵	-	۵۵,۷۶
$MSNR$	۰,۶۰۷۱	۲,۵۹۱	۲,۵۴۵۶



5. Nuclear Energy Agency, Uranium 2007: Resources, Production and Demand, OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency (2008) 218-223.
6. P.M.B. Pillai, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Extraction and Processing of Rare Earths, Indian Rare Earths Ltd (2008) 1-4.
7. G. Özbayoğlu, Atalay, Beneficiation of bastnaesite by a multi-gravity separator, Journal of Alloys and Compounds, 303 (2000) 520-523.
8. M. Kul, Y. Topkaya, İ. Karakaya, Rare earth double sulfates from pre-concentrated bastnasite, Elsevier, Hydrometallurgy, 93 (2007) 129-135.
9. Y.M. Anwar, A.M. Abdel-Rehim, Extraction of thorium from Egyptian monazite Bull, Fac. Sci. Alex. Univ, 10 (1970) 152-171.
10. F.L. Cuthbert, Thorium Production Technology, US Atomic Energy Comm., Addison (1958).
11. C. Maurice, N. Kenneth, Principles of mineral processing, SME, -Technology & Engineering (2003) 2422.
12. J. Antony, Multi-response optimization in industrial experiments using Taguchi's quality loss function and principal component analysis, Quality and Reliability Engineering International, 16 (2000) 3.
13. N. Aslan, Multi-objective optimization of some process parameters of a multi-gravity separator for chromite concentration, Separation and Purification Technology, 64 (2008) 237.
14. P.J. Ross, Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw Hill, New York (1988).
15. M.S. Phadke, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1989).
16. J. Antony, Simultaneous Optimisation of Multiple Quality Characteristics in Manufacturing Processes Using Taguchi's Quality Loss Function, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17 (2001) 134.
17. W.H. Yang, Y.S. Tarn, Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, Journal of Materials Processing Technology, 84 (1998) 122.

۴. نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی هم‌زمان شاخص‌های کیفیت عیار و بازیابی برای پیش‌تغلیظ توریم با دستگاه ماریچ همفیری با استفاده از تابع زیان کیفیت تاگوچی به انجام رسید. آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با استفاده از دستگاه ماریچ همفیری می‌توان عیار توریم سنگ معدن توریم- اورانیم آنومالی ۵ ساغند را از ۱۶۵ به ۴۲۰ ppm افزایش داد. هم‌چنین نتایج نشان داد که سطح‌های بهینه‌ی متغیرهای فرایندی برای به دست آوردن عیار و بازیابی بیشینه‌ی توریم به وسیله‌ی جداکننده‌ی ماریچ همفیری، اندازه‌ی ذرات خوراک ورودی ۷۰۰ میکرومتر، نرخ خوراک‌دهی ۱٫۵ لیتر بر ثانیه و درصد جامد ۱۵ درصد بوده و پارامترهای اندازه‌ی ذرات خوراک و درصد جامد اثر بسیار مهمی در شرایط عملیاتی فرایند پیش‌تغلیظ دارند. با انجام بهینه‌سازی، عیار و بازیابی، به ترتیب، ۴۹ و ۵ درصد افزایش یافت که در مقایسه با مقادیر عیار و بازیابی برای آزمایش اولیه افزایش قابل توجهی است.

پی‌نوشت‌ها

۱. Pulp
۲. Quality Characteristics Values
۳. Quality Loss Values
۴. Multiple Signal to Noise Ratio
۵. Quality Index
۶. Critical F

مرجع‌ها

1. U. Turan, What is the potential use of thorium in the future energy production, Progress in Nuclear Energy, 37 (2000) 137-144.
2. J. Merkel Broder, Andrea Hasche-Berger, Uranium, Mining and Hydrogeology, Springer (2008) 54-58.
3. R. Omar, Z. Ali Rahman, M.T. Latif, Rare earth processing in Malaysia, Proceedings of the Regional Symposium on Environment and Natural Resources, Malaysia. 1 (2002) 287-295.
4. B. Samani, Geological phenomena and uranium mineralization in the Sagand area, Atomic Energy Organization of Iran, (1366) 11-19.