نشریه علمی- پژوهشی "مهندسی معدن "
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره هشتم، شماره نوزدهم، سال ۱۳۹۲ ، صفحه ۳۵ تا ۴۴
Vol. 8, No. 19, 2013, pp. 35-44

مدل‌سازی مدارهای فلوتاسیون صنعتی با استفاده از نرم افزارهای صفحه گسترده، مطالعه موردی: کارخانه زغالشویی زرند

امیر حاجی زاده عمران[۱]; غلامعباس پارساپور[۲]; صمد بنیسی[۳*]

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی- دانشگاه شهید باهنر کرمان. hajizade@kmpc.ir
۲- دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی- دانشگاه شهید باهنر کرمان. parsapour@kmpc.ir
۳- استاد فرآوری مواد معدنی- دانشگاه شهید باهنر کرمان. banisi@mail.uk.ac.ir

(دریافت ۲۶ خرداد ۹۲، پذیرش ۳ شهریور ۱۳۹۲)

چکیده

یکی از مشکلات مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند همانند سایر کارخانه‌های فرآوری، تغییرات زیاد خصوصیات خوراک ورودی به‌دلیل تعدد معادن تامین کننده زغال سنگ است. با مدل‌سازی مدار فلوتاسیون، می‌توان تغییر پارامترهای متالورژیکی(محتوای خاکستر محصول پرعیار و راندمان) که در نتیجه تغییر خوراک ایجاد می‌شود را پیش‌بینی نمود و راهکارهای مناسب برای رسیدن به نتایج مطلوب را از قبل به کار بست. جهت انجام این کار از مدل سینتیکی مرتبه‌ی اول با ثابت نرخ های توزیع‌شده بر اساس طبقه‌های ابعادی استفاده گردید. مشخصات گونه‌های مختلف خوراک و توزیع زمان ماند در هر ردیف سلول فلوتاسیون پارامترهای اصلی ورودی در این نوع مدل‌سازی می‌باشند. زمان ماند متوسط خوراک ورودی در هر کدام از ردیف‌های فلوتاسیون کارخانه با استفاده از نمک به‌عنوان ردیاب به ترتیب برای پرعیارکنی اولیه ۶/۶، رمق‌گیر ۹/۶ و پرعیارکنی ثانویه ۱۲/۶ دقیقه بدست آمد. با انجام آزمون آزمایشگاهی فلوتاسیون، خوراک به پنج گونه‌ی غیرخاکستر تندشناورشونده، غیرخاکستر کندشناورشونده، خاکستر تندشناورشونده، خاکستر کندشناورشونده و غیرخاکستر و خاکستر غیرقابل شناور تقسیم گردید. با در نظر گرفتن سهم هر کدام از این گونه‌ها و ثابت نرخ سینتیک مربوطه، مدل‌سازی صورت پذیرفت. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که با استفاده از این مدل، پارامترهای متالورژیکی کارخانه با دقت خوبی قابل پیش بینی است، بطوریکه با حد اطمینان ۹۵ درصد، اختلاف بین مقادیر واقعی و محاسبه شده‌ی راندمان، بین ۱/۴ تا ۵/۷ درصد و اختلاف بین مقادیر واقعی و محاسبه‌شده‌ی محتوای خاکستر محصول، بین ۰/۹- تا ۰/۴ درصد بدست آمد.

کلمات کلیدی

زغالشویی، مدل‌سازی فلوتاسیون، ثابت نرخ سینتیک

۱- مقدمه

مدل‌سازی فلوتاسیون، بیان ریاضی رابطه‌ی بین متغیرهای تاثیرگذار و کارآیی متالورژیکی فلوتاسیون است. با استفاده از مدل‌سازی فلوتاسیون، عملکرد متالورژیکی (راندمان و محتوای خاکستر محصول پرعیار) فرآیند با توجه به تغییر در متغیرها، قابل پیش‌بینی است. آگاهی از خصوصیات متالورژیکی محصول در هر فرآیند، به راهبران سیستم کمک می‌کند تا رویکردهای کنترلی مناسبی را جهت دستیابی به محصولی با خصوصیات متالورژیکی مطلوب اتخاذ نمایند. محدوده‌ی مدل‌ها از انواع بر مبنای معادلات بنیادی تا انواع تجربی گسترده شده است. مدل‌های استفاده شده در فلوتاسیون را می توان به سه نوع کلی مدل‌های تجربی، احتمالاتی و سینتیکی تقسیم نمود[۱]. با توجه به اینکه خصوصیات خوراک مدار فلوتاسیون کارخانه‌ی زغالشویی زرند، نوسان زیادی دارد که موجب نوسان در راندمان (نسبت وزنی محصول پرعیار به خوراک) و محتوای خاکستر محصول فلوتاسیون می‌شود؛ در صورتی‌که بتوان با استفاده از یک مدل مناسب، کارآیی مدار فلوتاسیون را با توجه به خصوصیات مواد ورودی و شرایط عملیاتی مدار با یک روش ساده و سریع پیش‌بینی نمود، این امکان فراهم می‌شود تا شرایط قابل کنترل در عملیات فلوتاسیون برای هر نوع خوراک به شکلی تنظیم گردد تا محصول بدست آمده دارای شرایط مطلوب باشد. از سوی دیگر، مدل‌سازی فلوتاسیون، جزء اصلی در روال بهینه سازی ترکیب مدارهای فلوتاسیون می‌باشد و با انجام آن، امکان انتخاب بهترین ترکیب ممکن نیز فراهم می‌گردد[۲]. مدل سینتیکی مرتبه‌ی اول با ثابت نرخ توزیع-شده، یکی از مدل هایی است که برای مدل‌سازی فلوتاسیون به کار گرفته می‌شود[۳و۴]. به دلیل امکان پذیر بودن محاسبه و اندازه‌گیری پارامترهای این نوع مدل، از آن برای پیش‌بینی پارامترهای متالورژیکی مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند استفاده شد.

۲- متن

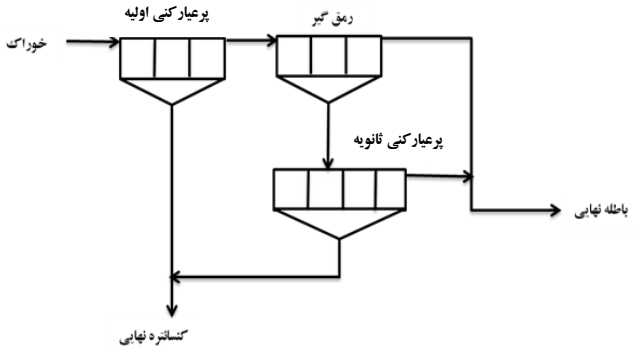
۲-۱- روش مدل‌سازی

در این نوع مدل‌سازی ذرات بر اساس ثابت نرخ شناورشوندگی، به چند گونه تقسیم شده و برای هر دسته ثابت نرخ مجزا درنظر گرفته می‌شود. روند مدل‌سازی به این صورت است که با تعیین تعداد گونه‌ها و سهم آنها در ورودی و مشخص‌بودن ثابت نرخ سینتیکی گونه‌ها، بازیابی هر گونه (R) در هر ردیف فلوتاسیون، با توجه به الگوی اختلاط مواد، از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۵]، که در آن K، τ_{pf}، τ و n به ترتیب ثابت نرخ سینتیک، زمان ماند مربوط به جریان پیستونی، زمان ماند متوسط مربوط به واکنشگر کاملاً مخلوط و تعداد واکنشگر مورد استفاده در مدل‌سازی توزیع زمان ماند است. در این حالت، الگوی اختلاط هر ردیف فلوتاسیون با به کارگیری n واکنشگر کاملاً مخلوط و یک واکنشگر با جریان پیستونی مدل می‌شود. بنابراین مهمترین پارامترهایی که در این روش مدل‌سازی مورد نیاز می‌باشند، تعداد و مشخصات گونه‌ها و الگوی اختلاط مواد در ردیف‌های فلوتاسیون است.

$$R = 1 - \frac{e^{-K.\tau_{pf}}}{(K.\tau+1)^n} \qquad (۱)$$

۲-۲- تعیین الگوی اختلاط مواد

مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند از سه مرحله پرعیار کنی اولیه، رمق گیر و پرعیار کنی ثانویه تشکیل شده است (شکل ۱). مراحل پرعیار کنی اولیه و رمق گیر هر کدام شامل ۳ سلول و مرحله پرعیارکنی نهایی شامل ۴ سلول است. برای تعیین الگوی اختلاط پالپ در ردیف های مدار فلوتاسیون از نمک به عنوان ردیاب استفاده شد. برای این کار حدود ۲۰ کیلوگرم نمک در آب داغ به صورت محلول درآمد و به طور لحظه‌ای در ورودی هر کدام از ردیف های سلول های پرعیارکنی اولیه، رمق‌گیر و پرعیارکنی ثانویه اضافه شد. هنگام اضافه شدن محلول نمک به ورودی اولین سلول هر ردیف، اولین نمونه از باطله همان ردیف گرفته شد و سپس ۲۳ نمونه در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه‌ای، ۱۱ نمونه در فواصل زمانی ۶۰ ثانیه‌ای و ۳ نمونه در فواصل زمانی ۹۰ ثانیه‌ای برداشته شد.



شکل ۱- مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند

مقدار هدایت الکتریکی هر کدام از این نمونه‌ها بوسیله‌ی یک هدایت‌سنج (Hana، مدل HI 8733) اندازه‌گیری گردید. قبل از اندازه‌گیری هر کدام از نمونه‌ها، ابتدا الکترود هدایت‌سنج به مدت ۳۰ ثانیه در دو ظرف محتوی آب خالص قرار داده شد تا اثر نمونه‌های قبلی در الکترود باقی نمانده باشد. پس از ثبت هدایت الکتریکی پالپ در زمان‌های مختلف، با استفاده از نرم‌افزار RTD [۶]، منحنی تغییرات هدایت الکتریکی برحسب

زمان بدست آمده با مدل N-Mixer مدل‌سازی شد و متوسط زمان ماند و الگوی اختلاط هر کدام از ردیف‌ها بدست آمد.

۲-۳- تعیین گونه‌ها

از آنجائیکه اندازه ذرات زغالسنگ بر رفتار سینتیکی آنها تاثیر می‌گذارد، در مرحله ی اول، محدوده‌ی دانه‌بندی ذرات، مبنای تقسیم‌بندی گونه‌ها قرار گرفت. برای این منظور، راندمان در زمان طولانی و ثابت نرخ سینتیک هر کدام از محدوده‌های ابعادی (۷۵-، ۷۵+، ۱۵۰+، ۳۰۰+، ۵۰۰+، ۷۱۰+، ۱۰۰۰+ میکرون) تعیین گردیدند.

برای تعیین پارامترهای سینتیکی در مدار کارخانه از ورودی، باطله و محصول پرعیار هر کدام از سلول‌های پرعیارکنی اولیه و رمق‌گیر، در سه نوبت با فاصله زمانی ۳۰ دقیقه، نمونه‌هایی گرفته شد. محل‌های نمونه‌برداری از سلول‌ها در شکل ۲ با دایره نشان داده شده اند. لازم به توضیح است که مدار نمایش داده شده در شکل ۲ مراحل پرعیارکنی اولیه و رمق گیر نشان داده شده در شکل ۱ است.

برای ساده‌ترکردن مراحل نمونه‌برداری و آنالیز سرندی، دامنه‌های ابعادی با توجه به تغییرات ثابت نرخ سینتیکی آنها گروه‌بندی شدند. بهترین گروه‌بندی با توجه به مقادیر ثابت نرخ سینتیک و تغییرات راندمان در دامنه‌های ابعادی مختلف انتخاب گردید. چون زغالسنگ ترکیبی از محتوی خاکستر و زغال خالص(غیرخاکستر) می‌باشد، لذا مرحله دوم در تعیین گونه‌ها، تفکیک هر کدام از دامنه‌های ابعادی به بخش‌های خاکستر و غیرخاکستر بود. در نهایت، چون هر کدام از بخش‌های خاکستر و غیرخاکستر می‌توانند قابلیت شناوری متفاوتی داشته باشند، لذا این بخش‌ها نیز به دو قسمت با شناوری سریع و کند تقسیم گردیدند.

برای اینکه بتوان این تقسیم‌بندی را در مورد هر کدام از ابعاد انجام داد، بازیابی تجمعی غیرخاکستر و خاکستر هر بخش ابعادی نسبت به زمان ماند در سلول‌های پرعیارکنی اولیه و رمق‌گیر رسم گردیدند. با برازش این نقاط بر مدل سینتیکی با دو نرخ شناوری(رابطه ۲)[۸]، هر یک از این ابعاد به ۵ بخش مجزا ازلحاظ سینتیکی تقسیم شدند.

$$R = R_\infty \left[\left(\varphi \times \left(1 - e^{(-K_s \times t)}\right)\right) + \left((1-\varphi) \times \left(1 - e^{K_f \times t}\right)\right)\right] \quad (۲)$$

که در آن، R_∞ بازیابی در زمان طولانی(بازیابی حداکثری)، φ سهم بخش کندشناور شونده، $1-\varphi$ سهم بخش تندشناورشونده، K_S ثابت نرخ سینتیک بخش کندشناور شونده و K_f ثابت نرخ سینتیک بخش تندشناور شونده می‌باشند.

در نتیجه هرکدام از ابعاد به ۵ بخش زیر تقسیم شد:

۱- غیرخاکستر تندشناورشونده(N.Ash(fast))

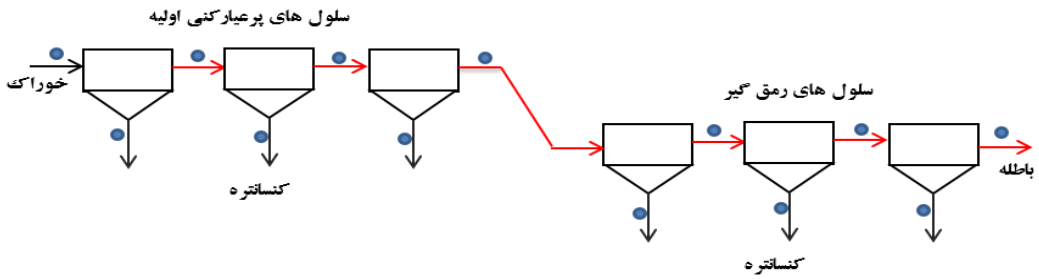
۲- غیرخاکستر کندشناورشونده(N.Ash(slow))

۳- خاکستر تندشناورشونده(Ash(fast))

۴- خاکستر کندشناورشونده(Ash(fast))

۵- خاکستر و غیرخاکستر غیرقابل شناور(Gangue)

روش محاسبه سهم و ثابت نرخ سینتیک هر کدام از گونه‌ها در خوراک فلوتاسیون به این صورت بود که ثابت نرخ سینتیک غیر خاکستر و خاکستر بخش‌های تند و کندشناورشونده، بازیابی حداکثری غیرخاکستر و خاکستر بخش‌های تند و کندشناورشونده‌ی مربوط به هر کدام از محدوده‌های ابعادی، با برازش اطلاعات آزمایش سینتیک صنعتی بر معادله‌ی ۲ بدست آمد. با داشتن بازیابی غیر خاکستر و خاکستر بخش‌های تند و کندشناورشونده برای هر دامنه ابعادی، مقدار مواد غیرخاکستر و خاکستر هر بخش که به محصول پرعیار راه پیدا کرده‌اند، محاسبه شد. ثابت نرخ سینتیک مواد غیر خاکستر و خاکستر راه یافته به محصول پرعیار از مجموع ضرب ثابت نرخ سینتیک غیر خاکستر و خاکستر هر بعد، در سهم آن بدست آمد. برای بقیه مواد غیرخاکستر و خاکستر که به باطله راه پیدا می‌کند ثابت نرخ سینتیک صفر درنظر گرفته شد.



شکل۲- محل‌های نمونه‌برداری از سلول‌های پرعیارکنی اولیه و رمق‌گیر کارخانه زغالشویی زرند(●: محل نمونه‌گیری)

۲-٤- مدل‌سازی فلوتاسیون

پس از تعیین گونه‌های موجود در خوراک فلوتاسیون، الگوی اختلاط ردیف‌ها، درصد جامد هر کدام از جریان‌ها و دبی ورودی به مدار فلوتاسیون، محاسبات مدل‌سازی با استفاده از صفحه گسترده اکسل (Excel) انجام شد. روش انجام مراحل و

محاسبات مربوط به مدل‌سازی به صورت زیر می‌باشد:

اگر خوراک مدار بر اساس ثابت نرخ فلوتاسیون(K) به M گونه تقسیم شود و مدار شامل N ردیف سلول باشد، موازنه جرم مربوط به گونه mام، در ردیف سلول iام به صورت رابطه ۳ است[۷]:

$$\overline{F}_i^m = F_i^m + \sum_{j=1}^{N} C_j^m c_{ij} + \sum_{j=1}^{N} T_j^m t_{ij} = C_i^m + T_i^m \quad (۳)$$

$\overline{F}_i^m$:کل ورودی از گونه mام به ردیف سلولiام

F_i^m: مقدار گونه mام در خوراک تازه ورودی به ردیف سلولiام

C_j^m: کل محصول پرعیار خروجی از ردیف سلول jام مربوط به گونه mام

T_j^m: کل باطله خروجی از ردیف سلول jام مربوط به گونه mام

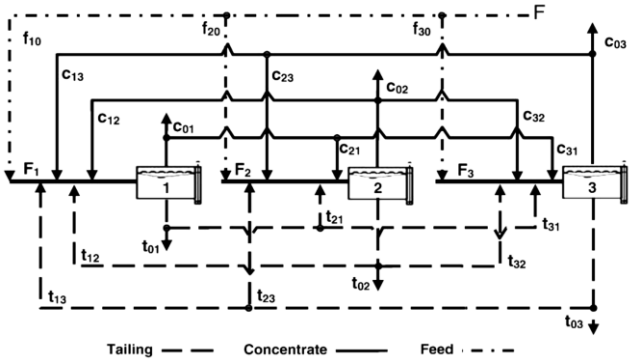
c_{ij} : کسری از محصول پرعیار سلول j که به سلول i وارد می‌شود.

t_{ij} : کسری از باطله سلول j که به سلولiوارد می‌شود.

f_{i0} : سهم سلول i از خوراک ورودی

یک مجموعه از مقادیر f_{i0}، c_{ij} و t_{ij} مشخص‌کننده‌ی یک ترکیب (شکل ۳) معین از مدار فلوتاسیون می‌باشند. به همین دلیل، این مجموعه متغیرها، پارامترهای ساختاری مدار نامیده می‌شود(شکل۳).

پارامترهای ساختاری(t_{ij},c_{ij},f_{ij}) در واقع یک نوع توصیف ارتباط بین بخش‌های مختلف مدار فلوتاسیون به زبان ریاضی می‌باشد. f_{10} بیان‌کننده بخشی از خوراک است که وارد اولین سلول می‌شود. اگر f_{10} برابر یک باشد بدین معناست که همه خوراک ورودی در ابتدا وارد اولین سلول می‌شود. C_{02} نشان-دهنده بخشی از کنسانتره سلول دوم است که بیرون می‌رود. اگر کنسانتره سلول دوم وارد سلول سوم گردد، C_{02} برابر صفر خواهد بود. مقدار t_{03} زمانی برابر یک می‌باشد که باطله سلول سوم از مدار خارج شود.



شکل۳-پارامترهای ساختاری در یک مدار فلوتاسیون سه‌مرحله‌ای[۷]

باید توجه داشت که c_{ij} و t_{ij} مقادیری بین صفر تا یک دارند. عامل غنی‌شدگی (g_i^m)برای گونه mام در ردیف سلولiام به صورت رابطه۴ تعریف می شود.

$$g_i^m = \frac{C_i^m}{T_i^m} \quad (۴)$$

رابطه ۳ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{j=1}^{N} C_j^m c_{ij} - \sum_{j=1}^{N} T_j^m t_{ij} = C_i^m + T_i^m - F_i^m \quad (۵)$$

اگر از دو عبارت مجموع، یک عضو که در آنi و j برابر هستند بیرون آورده شود، رابطه ۵ به صورت زیر در خواهد آمد:

$$F_i^m = C_i^m - T_i^m - C_i^m c_{ii} \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} C_j^m c_{ij} - t_{ii} T_i^m - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} T_j^m t_{ij} \quad (۶)$$

با جایگذاری رابطه ۴ در رابطه‌ی ۶ داریم:

$$F_i^m = (1 + g_i^m) T_i^m - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} \left(t_{ij} + g_j^m c_{ij}\right) T_j^m \quad (۷)$$

برای اینکه حل معادلات موازنه جرم برای مدارهایی با تعداد زیاد ردیف سلولی ساده‌تر باشد، می توان رابطه ۷ را به صورت ماتریسی نوشت و با استفاده از روابط مربوط به ماتریس‌ها معادلات را حل کرد. شکل ماتریسی رابطه ۷ به صورت رابطه ۸ می‌باشد.

$$[F^m] = [G^m] \times [T^m] \quad (۸)$$

که در آن $[F^m]$ یک بردار N×1 و $[G^m]$ یک ماتریس N×N و$[T^m]$ یک بردار N×1 است. رابطه ۸ باید برای هر گونه نوشته و حل شود، در نتیجه برای خوراکی که شامل M گونه باشد باید M معادله ماتریسی طبق رابطه ۸ نوشته و حل شود. برای مثال شکل ماتریسی موازنه جرم گونه m ام، برای مداری شامل سه ردیف سلول به صورت زیر می‌باشد[۷]:

$$\begin{bmatrix} F_1^m \\ F_2^m \\ F_3^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+g_1^m & -(t_{12}+g_2^m c_{12}) & -(t_{13}+g_3^m c_{13}) \\ -(t_{21}+g_1^m c_{21}) & 1+g_2^m & -(t_{23}+g_3^m c_{23}) \\ -(t_{31}+g_1^m c_{31}) & -(t_{32}+g_2^m c_{32}) & 1+g_3^m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1^m \\ T_2^m \\ T_3^m \end{bmatrix}$$

به طور کلی:

$$G_{ij}^m = \begin{cases} 1+g_j^m & : i=j \\ -\left(t_{ij}+g_j^m c_{ij}\right) & : i \neq j \end{cases} \quad (۹)$$

باید توجه داشت که رابطه ۹ باید با محدودیت‌های زیر حل گردد.

$$c_{0j} + \sum_{i=1}^{N} c_{ij} = 1 \quad (۱۰)$$

(مجموع کسر جرمی محصول پرعیار سلول jام برابر ۱ است)

$$t_{0j} + \sum_{i=1}^{N} t_{ij} = 1 \quad (۱۱)$$

(مجموع کسر جرمی محصول پرعیار سلول jام برابر ۱ است)

با حل رابطه ۸، مقدار ماتریس $[T^m]$ مشخص می‌شود. با مشخص بودن ماتریس $[T^m]$، مقدار محصول پرعیار و باطله خروجی از مدار برای هر گونه از روابط ۱۲ و ۱۳ قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_0 = \sum_{m=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} c_{0j} g_j^m T_j^m \quad (۱۲)$$

$$T_0 = \sum_{m=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} t_{0j} T_j^m \quad (۱۳)$$

اگر w^m جزء جرمی ماده باارزش در گونه m ام باشد، مقدار ماده با ارزش در خوراک تازه ورودی به مدار (M_f) و محصول پرعیار (M_c) به ترتیب از روابط ۱۴ و ۱۵ بدست می‌آید.

$$M_f = \sum_{m=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} w^m F_j^m \quad (۱۴)$$

$$M_c = \sum_{m=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} w^m c_{0j} g_j^m T_j^m \quad (۱۵)$$

در نتیجه عیار محصول پرعیار (G) و بازیابی مدار (R) با استفاده از روابط ۱۶ و ۱۷ می‌تواند محاسبه شود[۵].

$$G = \frac{M_c}{C_0} \times 100 \quad (۱۶)$$

$$R = \frac{M_c}{M_f} \times 100 \quad (۱۷)$$

غنی‌شدگی، با توجه به الگوی اختلاط ردیف سلول‌ها، تعریف می‌شود. برای مثال اگر ردیف سلول iام معادل z_i ظرف مخلوط کامل با زمان ماند τ_iو یک ظرف پیستونی با زمان ماند $\tau_{pf,i}$ باشد، مقدار g_i^m به صورت زیر قابل محاسبه است:

میزان از دست‌رفتن گونه m یا هدرروی برابر است با:

$$T_i^m = \frac{e^{K^m \tau_{pf,i}}}{(1+K^m \tau_i)^z} F_i^m \quad (۱۸)$$

رابطه ۴ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$g_i^m = \frac{F_i^m - T_i^m}{T_i^m} \quad (۱۹)$$

با جایگذاری رابطه ۱۸ در۱۹خواهیم داشت:

$$g_i^m = \frac{(1+K_m \tau_i)^z}{e^{K^m \tau_{pf,i}}} - 1 \quad (۲۰)$$

با استفاده از اطلاعات اولیه مربوط به خوراک و مشخص کردن پارامترهای ساختاری مدار(f_{0i},t_{ij}, c_{ij}) و الگوی اختلاط در هر ردیف سلول، روال مدل‌سازی مدار فلوتاسیون آغاز می‌شود. با توجه به رابطه ۲۰ می‌توان مشاهده کرد که مقدار غنی‌شدگی برای هر گونه در یک ردیف به τ_i، $\tau_{pf,i}$و z_i بستگی دارد و با مشخص شدن این عوامل، مقدار g_i برای همه گونه‌ها قابل محاسبه است.

با مشخص کردن مقدار g_iها و با در نظر گرفتن متغیرهای ساختاری مدار مورد نظر، می‌توان مقدار Tها را محاسبه کرد.

با مشخص کردن مقدار باطله خروجی از هر ردیف سلول، دبی باطله آن ردیف مشخص می‌شود. با توجه به اینکه زمان ماند در هر ردیف سلول به دبی باطله وابسته است، در نتیجه در صورت تفاوت قابل توجه بین دبی باطله حاصل از مدل‌سازی با دبی باطله در زمان تعیین الگوی اختلاط باید مراحل مدل‌سازی با در نظر گرفتن زمان ماند جدید تکرار شود.

اگر τ_iو $\tau_{pf,i}$ زمان ماند مربوط به دبی Q_t باشند که برای شروع مدل‌سازی استفاده شده اند و دبی محاسبه شده از مدل‌سازی$Q_{t(model)}$باشد، زمان ماندهای جدید (τ'_i, $\tau'_{pf,i}$) برایتکرار مدل‌سازی از روابط ۲۱ و ۲۲ قابل محاسبه است.

$$\tau'_{pf,i} = \tau_{pf,i} \times \frac{Q_t}{Q_{t(model)}} \quad (۲۱)$$

$$\tau'_i = \tau_i \times \frac{Q_t}{Q_{t(model)}} \quad (۲۲)$$

با مشخص شدن زمان ماندهای جدید، مراحل مدل‌سازی تکرار می‌شود تا زمانی که نسبت $\frac{Q_t}{Q_{t(model)}}$ برابر یک شود. سپس کارایی متالورژیکی از روابط ۱۲ و ۱۷ محاسبه می‌شود[۲].

اطلاعات مربوط به سهم هر کدام از ابعاد توسط کاربر در قسمت ورودی اطلاعات (Input data) وارد می‌شود و با توجه به روش ذکرشده، درصد و سهم هر کدام از ۵ گونه در قسمت گونه‌ها (Species) محاسبه می‌گردد. اطلاعات مربوط به تناژ

ورودی به مدار فلوتاسیون، درصد جامد خوراک و کنسانتره، زمان ماند و دبی باطله هر کدام از ردیف‌ها در زمان اندازه‌گیری زمان ماند و پارامترهای ساختاری نیز با توجه به مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند (شکل۱) مطابق جدول ۱ در قسمت Circuit وارد می‌شود.

پارامترهای ساختاری این مدار به این صورت می‌باشند که f_{10} بیان‌کننده بخشی از خوراک است که وارد پرعیارکنی اولیه می‌شود. اگر f_{10} برابر یک باشد بدین معناست که همه خوراک ورودی در ابتدا وارد سلول‌های پرعیارکنی اولیه می‌شود. C_{02} نشان‌دهنده بخشی از کنسانتره ردیف دوم است که بیرون می‌رود. اگر کنسانتره مرحله دوم وارد مرحله سوم (پرعیارکنی ثانویه) گردد، C_{02} برابر صفر خواهد بود و C_{03} برابر یک است.. مقادیر t_{02} و t_{03} برابر یک می‌باشد که نشان‌دهنده این است که باطله ردیف‌های دوم و سوم از مدار خارج می‌شود. محاسبات مربوط به مدل‌سازی مدار در حالت پایدار برای هر ۵ گونه به طور جداگانه انجام شد (جدول ۲).

جدول ۱ بخش ورود اطلاعات برای شبیه سازی مدار فلوتاسیون را نمایش می‌دهد. در این جدول اطلاعات دانه‌بندی خوراک، خصوصیات گونه‌های مختلف (سهم گونه (x)، دانسیته گونه (ρs)، درصد زغال‌سنگ (coal) و ثابت نرخ سینتیک (k))، درصد جامد خوراک (Solids Percent-Feed) و کنسانتره (Solids Percent-Concentrate) و اطلاعات توزیع زمان ماند (زمان مربوط به جریان پیستونی (τpf)، زمان مربوط به واکنشگر کاملا مخلوط (τ)، تعداد واکنشگر کاملا مخلوط (z) و دبی باطله در زمان اندازه گیری توزیع زمان ماند (Q tail) را نشان می‌دهد) در هر مرحله، دبی خوراک (Feed) و پارامترهای ساختاری مدار نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱- بخش ورود اطلاعات شبیه‌سازی مدار فلوتاسیون

Input data		Circuit			
Size(μm)	(%)	First Bank		Feed (t/h)	13.0
300	23.9	Solids Percent			
75	28.7	Feed	8.8	Structural Parameters	
-75	47.4	Concentrate	30	f10	1
		RTD		f20	0
Species		τpf (min)	0.4	f30	0
N.Ash(fast)(1)		τ (min)	2.4	c11	0
x1 (%)	41.3	z	2.64	c21	0
ρs (t/m^3)	0.9	Q tail (m^3/h)	89.0	c31	0
coal (%)	100.0	Second Bank		c01	1
k (1/min)	1.01	Solids Percent		c12	0
N.Ash(slow)(2)		Feed	6.5	c22	0
x2 (%)=	27.7	Concentrate	9	c32	1
ρs (t/m^3)	1.2	RTD		c02	0
coal (%)	100.0	τpf (min)	0.7	c13	0
k (1/min)	0.1	τ (min)	3.0	c23	0
Ash(fast)(3)		z	3	c33	0
x3 (%)=	3.2	Q tail (m^3/h)	61.0	c03	1
ρs (t/m^3)	1.8	Third Bank		t11	0
coal (%)	0	Solids Percent		t21	1
k (1/min)	0.8	Feed	9.0	t31	0
Ash(slow)(4)		Concentrate	25	t01	0
x4 (%)	16.5	RTD		t12	0
ρs (t/m^3)	2.0	τpf (min)	2.0	t22	0
coal (%)	0.0	τ (min)	3.5	t32	0
k (1/min)	0.04	z	3.08	t02	1
gangue(5)		Q tail (m^3/h)	15.5	t13	0
x5 (%)=	11.3			t23	0
ρs (t/m^3)	2.2			t33	0
coal (%)	45.0			t03	1
k (1/min)	0.0				

جدول ۲ نتایج حاصل از وارد کردن اطلاعات جدول ۱ را نمایش می‌دهد. در این جدول تناژ کل هر گونه (Ft)، تناژ ورودی از هر گونه به هر ردیف فلوتاسیون (Fi)، عامل غنی شوندگی برای هر گونه (gi)، میزان محصول پرعیار هر گونه در هر ردیف فلوتاسیون (C0)، میزان هدر روی هر گونه در هر ردیف (T0) و چند پارامتر دیگر که برای محاسبه میزان محصول و میزان هدر روی هر گونه نیاز می باشند و در روابط قبلی ذکر شده اند نمایش داده شده اند. در آخرین ستون نمایش داده شده در جدول ۲ نیز تناژ کل خوراک (Ft)، تناژ خوراک از هر گونه ((Fi(t))، تناژ راه‌یافته به کنسانتره از هر گونه

(C0(t)) و تناژ هدر روی شده به باطله از هر گونه (T0(t)) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۲- محاسبات مربوط به شبیه‌سازی مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند با پنج گونه

1st Specie				2nd Specie				3rd Specie			
Ft (t/h)=	5.37			Ft (t/h)=	3.61			Ft (t/h)=	0.41		
Fi(1) (t/h)=	5.37			Fi(2) (t/h)=	3.61			Fi(3) (t/h)=	0.41		
	0.00				0.00				0.00		
	0.00				0.00				0.00		
T/F.i(1)=	0.05			T.F.i(2)=	0.64			T.F.i(3)=	0.08		
	0.01				0.45				0.02		
	0.00				0.36				0.01		
gi(1)=	18.61			gi(2)=	0.571			gi(3)=	11.73		
	105.94				1.23				56.08		
	484.92				1.75				197.6		
G(1)=	19.6	0	0	G(2)=	1.571	0	0	G(3)=	12.73	0	0
	-1	106.9	0		-1	2.23	0		-1	57.08	0
	0	-105.9	485.9		0	-1.23	2.8		0	-56.1	199
G^-1 (1)=	0.051	0	0	G^-1 (2)=	0.636	0	0	G^-1 (3)=	0.079	0	0
	0.000	0.009	0		0.285	0.45	0		0.001	0.018	0
	0.000	0.002	0.002		0.128	0.2	0.4		4E-04	0.005	0.01
Ti(1) (t/h)=	0.27			Ti(2) (t/h)=	2.29			Ti(3) (t/h)=	0.03		
	0.00				1.03				0.00		
	0.00				0.46				0.00		
Ci(1) (t/h)=	5.09			Ci(2) (t/h)=	1.31			Ci(3) (t/h)=	0.38		
	0.27				1.27				0.03		
	0.27				0.81				0.03		
T0(1) (t/h)=	0.00			T0(2) (t/h)=	0.00			T0(3) (t/h)=	0.00		
	0.00				1.03				0.00		
	0.00				0.46				0.00		
C0(1) (t/h)=	5.09			C0(2) (t/h)=	1.31			C0(3) (t/h)=	0.38		
	0.00				0.00				0.00		
	0.27				0.81				0.03		

4th Specie				5th Specie				Total	
Ft (t/h)=	2.14			Ft (t/h)=	1.48			Ft (t/h)=	13.00
Fi(4) (t/h)=	2.14			Fi(5) (t/h)=	1.48			Fi(t) (t/h)=	5.37
	0.00				0.00				3.61
	0.00				0.00				0.41
									2.14
									1.48
T/F.i(4)=	0.84			T/F.i(5)=	1.00				
	0.73				1.00			T0(t) (t/h)=	0.00
	0.67				1.00				1.49
gi(4)=	0.19			gi(5)=	0.00				0.00
	0.37				0.00				1.64
	0.48				0.00				1.48
G(4)=	1.2	0	0	G(5)=	1.0	0	0		
	-1	1.4	0		-1	1.0	0	C0(t) (t/h)=	5.36
	0	-0.4	1.5		0	0.0	1.0		2.12
G^-1 (4)=	0.842	0	0	G^-1 (5)=	1.000	0	0		0.41
	0.617	0.732	0		1.000	1.000	0		0.49
	0.152	0.181	0.675		0.000	0.000	1.000		0.00
Ti(4) (t/h)=	1.80			Ti(5) (t/h)=	1.48				
	1.32				1.48				
	0.33				0.00				
Ci(4) (t/h)=	0.34			Ci(5) (t/h)=	0.00				
	0.48				0.00				
	0.16				0.00				
T0(4) (t/h)=	0.00			T0(5) (t/h)=	0.00				
	1.32				1.48				
	0.33				0.00				
C0(4) (t/h)=	0.34			C0(5) (t/h)=	0.00				
	0.00				0.00				
	0.16				0.00				

۲-۵- الگوی اختلاط مواد در ردیف‌ها

جدول ۳ مقادیر مربوط به پارامترهای زمان ماند را برای هر سه ردیف نشان می دهد. مقادیر پارامترها از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل بدست آمد.

جدول۳- اطلاعات مربوط به تعیین زمان ماند مواد در سه ردیف(مدل N-Mixer)

پارامتر/ردیف	پرعیارکنی اولیه	رمق گیر	پرعیارکنی ثانویه
τ_{pf}^{+}(min)	۰/۳۹	۰/۶۷	۱/۹۸
τ^{-}(min)	۲/۳۵	۲/۹۶	۳/۴۸
N***	۲/۶۴	۳	۳/۰۸
τ_{ave}(min)*	۶/۵۹	۹/۵۵	۱۲/۶۹
S.S.E**	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۱۸

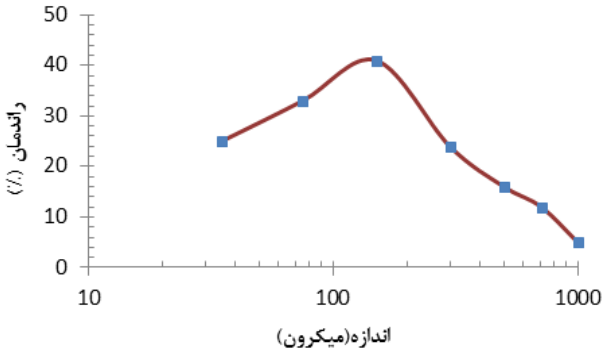
τ_{pf}^{+}: زمان مربوط به جریان پیستونی

τ^{-}: زمان ماند متوسط واکنشگر کاملاً مخلوط

*: زمان ماند متوسط، **: مجموع مربعات خطا، ***: تعداد واکنشگر کاملاً مخلوط

۲-۶- تعداد گونه مورد نیاز جهت مدل‌سازی

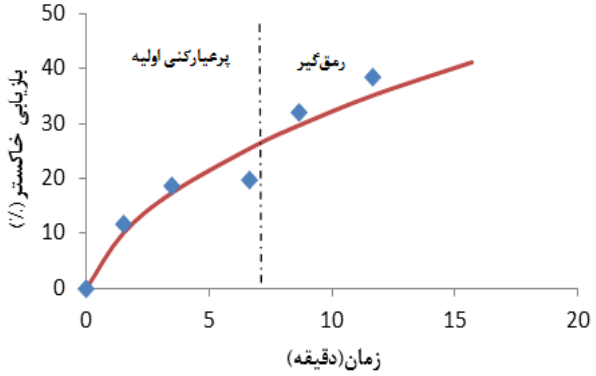
رابطه راندمان و اندازه ذرات برای مواد ورودی به مدار فلوتاسیون در شکل۶ آمده است.



شکل۴- رابطه اندازه ذرات و راندمان در مدار فلوتاسیون کارخانه

بیشترین راندمان برای محدوده‌ی ابعادی ۷۵+ تا ۳۰۰- میکرون بدست آمد.ذرات کوچکتر از این محدوده به دلیل داشتن خاکستر بالا و ذرات بزرگتر از این محدوده به دلیل عدم توانایی حباب در انتقال آنها به کف، راندمان پایینی دارند. با توجه به شکل ۴ می‌توان ذرات زغال‌سنگ را از لحاظ راندمان به سه محدوده ابعادی تقسیم نمود و به عنوان مبنای اولیه برای یافتن گونه‌های موجود در خوراک از این نتایج استفاده نمود. نتایج آزمایش‌های سینتیک مربوط به دامنه ابعادی مختلف نیز در جدول ۴ آمده است. با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که ثابت نرخ سینتیک دامنه ابعادی زیر ۷۵ میکرون تفاوت فاحشی با سایر دامنه‌ها دارد و درنتیجه این دامنه می‌تواند به‌عنوان یک گونه درنظر گرفته شود. همچنین سایر محدوده‌های ابعادی را با توجه به نزدیک بودن ثابت های نرخ سینتیک می‌توان به دو گونه مجزای بین ۷۵ و ۳۰۰ میکرون و درشت تر از ۳۰۰ میکرون در نظر گرفت. البته شایان ذکر است که مواد درشت تر از ۷۱۰ میکرون را با توجه به سهم پایین آنها در خوراک نمی‌توان به‌عنوان یک گونه مجزا درنظر گرفت. بنابراین با توجه به شکل ۴ و جدول ۴ می‌توان خوراک را از لحاظ سینتیکی به سه دامنه‌ی ابعادی ۷۵-، ۳۰۰- ۷۵+ و ۳۰۰+ میکرون تقسیم کرد و برای هر دامنه مقدار ثابت نرخ سینتیک متوسطی درنظر گرفت. بنابراین می‌توان مقدار تقریبی ثابت نرخ سینتیک کلی خوراک را پیش‌بینی نمود. یعنی اگر سهم هر کدام از این محدوده‌های ابعادی در خوراک تغییر کند، سینتیک کلی خوراک نیز تغییرخواهد کرد.

شکل ۵ بازیابی خاکستر تجمعی، نسبت به زمان ماند در ردیف‌های پرعیارکنی اولیه و رمق گیر برای محدوده ۷۵+ تا ۳۰۰- میکرون را نشان می‌دهد. جدول ۵ مقادیر حاصل از برازش مدل سینتیکی با دو نرخ شناوری را بر داده‌های بدست‌آمده از بررسی سینتیکی مدار فلوتاسیون کارخانه در سه محدوده دانه‌بندی نشان می‌دهد.



شکل۵ - رابطه بازیابی خاکستر تجمعی دامنه ۷۵+ تا ۳۰۰- میکرون با زمان فلوتاسیون در سلول‌های پرعیارکنی اولیه و رمق‌گیر

در جدول ۵، R_∞ بازیابی حداکثری، K_f ثابت نرخ سینتیک مواد با شناوری بالا، K_s ثابت نرخ سینتیک مواد با شناوری پایین و Φسهم مواد با شناوری پایین می‌باشند.

سهم و ثابت نرخ سینتیک هر کدام از این ۵ گونه برای دامنه‌های ۷۵- و ۷۵+ تا ۳۰۰- میکرون نیز با روش بالا محاسبه گردید و گونه‌های با خصوصیات مشابه در هر کدام از این سه محدوده‌ی ابعادی با توجه به سهم این ابعاد در خوراک با یکدیگر جمع شدندو در نهایت کل خوراک به ۵ گونه تقسیم شد (جدول ۶).

جدول۴- نتایج آزمایش‌های سینتیک در محدوده‌های ابعاد مختلف

اندازه ذرات (µm)	درصد وزنی	K آزمایشگاهی (1/min)	انحراف معیار(1/min)	میانگینK آزمایشگاهی(1/min)	میانگین انحراف معیار(1/min)
<۷۵	۳۳	۰/۵	۰/۰۱	۰/۵	۰/۰۱
+۷۵ -۱۵۰	۱۷/۲	۱/۹۲	۰/۱۸	۲/۱	۰/۲۰
+۱۵۰ -۳۰۰	۲۹/۸	۲/۳	۰/۲۲		
+۳۰۰ -۵۰۰	۹/۷	۲/۲۵	۰/۵۳	۲/۱۶	۰/۳۷
+۵۰۰ -۷۱۰	۵/۷	۲/۱۹	۰/۱۴		
+۷۱۰ -۱۰۰۰	۲/۱	۱/۶۸	۰/۲۱		
>۱۰۰۰	۲/۵	۰/۷۴	۰/۲۲		

جدول۵: رابطه حاصل از برازش داده‌های سینتیک مدار سینتیکی با دو نرخ شناوری

اندازه ذرات(µm)	خاکستر				غیر خاکستر			
	K_s(1/min.)	Φ(%)	K_f(1/min.)	R_∞(%)	K_s(1/min.)	Φ(%)	K_f(1/min.)	R_∞(%)

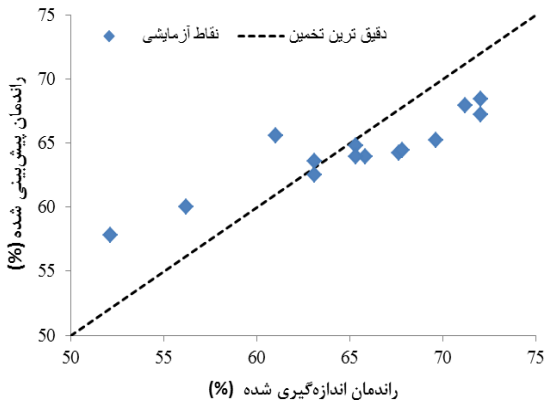
+ ۳۰۰	۰/۰۲	۲۲	۱/۱	۸۴	۰/۱	۵۲	۱/۵	۹۲
+۷۵ -۳۰۰	۰/۰۶	۱۱	۰/۹	۶۴	۰/۱	۵۲	۰/۸	۹۳
-۷۵	۰/۰۳	۱۶	۰/۶	۷۵	۰/۱	۵۱	۰/۹	۹۵

جدول۶- مشخصات گونه‌های مختلف در خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون

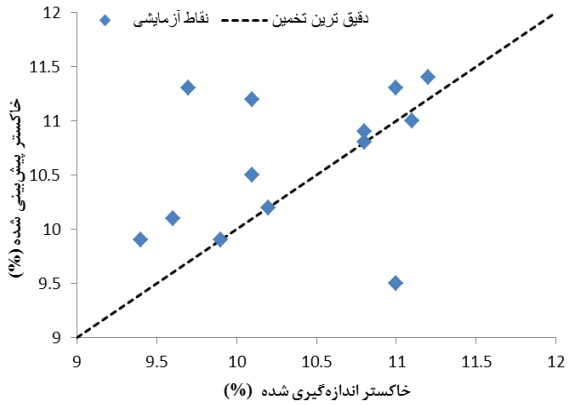
گونه	سهم از خوراک(٪) X_i	درصد زغال Coal	دانسیته ρ_s (mt/m^3)	ثابت سینتیک $K\ (min^{-1})$
۱	۳۵/۵	۱۰۰	۰/۹	۰/۹۵
۲	۳۳/۷	۱۰۰	۱/۲	۰/۱
۳	۲/۸	۰	۱/۸	۰/۸
۴	۱۵/۹	۰	۲	۰/۰۴
۵	۱۲/۲	۴۵	۲/۲	۰

۲-۷- مدل‌سازی مدار فلوتاسیون

برای بررسی اعتبار مدل به‌کارگرفته شده در پیش‌بینی راندمان و درصد خاکستر محصول فلوتاسیون، ۱۴ نمونه در یک بازه‌ی زمانی ۵۰ روزه از خوراک فلوتاسیون گرفته شد و پارامترهای متالورژیکی در این روزها با استفاده از مدل محاسبه شدند. همچنین کارآیی (راندمان و محتوای خاکستر محصول پرعیار) مدار فلوتاسیون کارخانه با استفاده از نمونه‌های تهیه‌شده نیز بدست آمد. شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه نتایج واقعی ونتایج مدل‌سازی را نشان می‌دهند. خطوط نشان داده شده در این منحنی‌ها حد بالا و پایین تخمین راندمان و محتوای خاکستر (با احتمال ۹۵ درصد) را نشان می‌دهند. شایان ذکر است که حد بالا و پایین تخمین‌ها با توجه به انحراف معیار نسبی ثابت نرخ سینتیک دامنه های ابعادی مختلف (جدول ۴) محاسبه شده است.



شکل۶: مقایسه راندمان واقعی و راندمان پیش‌بینی شده



شکل۷: مقایسه محتوای خاکستر محصول پرعیار واقعی و پیش‌بینی شده

استفاده از متوسط ثابت نرخ‌های سینتیک صنعتی در این مدلسازی باعث شده است که بیشترین دقت مدل در شرایط متوسط کارخانه (راندمان حدود ۶۴ درصد فلوتاسیون) و کمترین دقت مدل در زمانی ایجاد شود که شرایط عملیاتی از شرایط متوسط فاصله می‌گیرد. علاوه بر این استفاده از شرایط متوسط کاری باعث گرایش راندمان تخمینی به سمت متوسط راندمان شده است، در نتیجه راندمان تخمینی با مدل در راندمان های بالاتر از متوسط، کمتر از راندمان واقعی و در راندمان‌های پایینتر از متوسط بیش از راندمان واقعی است. البته در همه این حالات با حداطمینان ۹۵ درصد، اختلاف بین راندمان واقعی و محدوده راندمان پیش‌بینی شده بین ۱/۴ تا ۵/۷ درصد است که معادل خطای نسبی بین ۲/۲ تا ۱۰/۹ درصد می‌باشد. نتایج مربوط به محتوای خاکستر نیز نشان می دهد که با حد اطمینان ۹۵ درصد، اختلاف بین خاکستر واقعی

و محدوده خاکستر پیش‌بینی شده قابل قبول می باشد و با همین حد اطمینان، خطای نسبی پیش‌بینی خاکستر بین ۷/۸ تا ۱۴/۷ درصد می‌باشد. البته با توجه به مقادیر مطلق این اعداد اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار مطلق پیش‌بینی شده‌ی خاکستر بین ۰/۹- تا ۰/۴ درصد است که در عمل ناچیز می‌باشد. بنابراین با استفاده از مدل می‌توان با پیش‌بینی راندمان و خاکستر محصول پرعیار، جهت بهبود فرآیند فلوتاسیون با ایجاد شرایط مناسب اقدام نمود.

۳- نتایج

- زمان ماند متوسط در سلول‌های پرعیارکنی اولیه، رمق‌گیر و پرعیارکنی ثانویه مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند با استفاده از ردیاب نمک، به ترتیب برابر با ۶/۶، ۹/۶ و ۱۲/۶ دقیقه بدست آمد.

- مطالعات سینتیکی انجام‌شده روی خوراک نشان داد که می‌توان آن را جهت استفاده در مدل‌سازی به ۵ گونه بر اساس قابلیت شناورشدن تقسیم نمود.

- روشی سریع برای پیش‌بینی راندمان و محتوای خاکستر لحظه‌ای مدار فلوتاسیون با استفاده از سرندکردن خوراک ورودی و یافتن سهم هر کدام از این ابعاد، پیشنهاد گردید.

- با استفاده از مدل‌سازی سینتیکی اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار مطلق مدل‌سازی راندمان در حد اطمینان ۹۵ درصد، بین ۱/۴ تا ۵/۷ درصد بدست آمد.

- با استفاده از مدل‌سازی سینتیکی اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار مطلق مدل‌سازی محتوای خاکستر محصول پرعیار در حد اطمینان ۹۵ درصد، بین ۰/۹- تا ۰/۴ درصد بدست آمد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از همکاری مدیریت و پرسنل کارخانه زغالشویی زرند بدلیل همکاری و اجازه انتشار نتایج این تحقیق تشکر می‌گردد.

۵- مراجع

1- Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlaping, E.V., Thorne, C.G., *Mineral and coal flotation circuits*, Elsevier Scientific, NewYork, pp. 56-96, 1981.

2- Ghobadi, P., *Application of genetic algorithms in flotation networks optimization*, M. Eng. Thesis in Department of Mining Engineering, ShahidBahonar University, Kerman, Iran, 2010.

3- Loveday, B.K., Brouckaert, C.J., *An analysis of flotation circuit design principles*, Chemical Engineering Journal 59, 15–21. 1995.

4- Ferreira, J.P., Loveday, B.K., *An improved model for simulation of flotation circuits*, Minerals Engineering 13, 1441–1453, 2000.

5- Dey, A.K., Kapur, P.C., Mehrotra, S.P., *A search strategy for optimization of flotation circuits*, Int. J. Miner.Process.26, pp. 73- 93, 1989.

6- Farmad, A.R., Yahyaei, M., *Banisi, S., Determination of material residence time distribution in grinding and flotation circuits using spreadsheets*, 3th Iranian Mining Engineering Conference, Yazd University, pp. 1998-2004, 2010.

7- Ghobadi, P., Yahyaei, M., Banisi, S., *Optimization of the performance of flotation circuits using a genetic algorithm oriented by process-based rules*, International Journal of Mineral Processing, 98, 174-181, 2011.

8- Gupta, A., Yan, D.S., *Introduction to mineral processing design and operation*, Elsevier 2006.