



طراحی تعداد سلول‌های فلوتاسیون معدن مس نوچون بر اساس الگوی جریان‌های ایده‌آل

مهدی نحوی^۱، علی اکبر عبدالله زاده^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- استادیار، گروه مهندسی معدن دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت ۱۳۹۴/۰۵/۱۰، پذیرش ۱۳۹۴/۰۹/۲۳)

چکیده

طراحی مدار فلوتاسیون شامل تعداد سلول‌ها و نیز چیدمان آن‌ها از لحاظ سری و موازی بودن برای دستیابی به حداکثر بازیابی از مسایل مهم در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی است. در اکثر کارخانه‌ها از تجربیات گذشته و الگوهای از پیش تعریف شده برای طراحی استفاده می‌شود. در این تحقیق دستیابی به الگوی جریان پیستونی به عنوان مرجع و الگو در نظر گرفته شد و بازیابی حاصل از آن برای محاسبه و طراحی تعداد سلول‌های اولیه (رافر) مدار فلوتاسیون کانسنگ مس معدن نوچون مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه سینتیکی فلوتاسیون نمونه معدن، ثابت سینتیک (k) و بازیابی در بی‌نهایت (R_{∞}) به ترتیب برابر $0.13 (1/\text{min})$ و 96.88 درصد و زمان ماند به میزان 28 دقیقه به دست آمد. با مدلسازی این جریان با الگوی متداول در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی و با توجه به ظرفیت کارخانه (180 مترمکعب در ساعت) واحد فلوتاسیون در سه خط موازی و شامل 7 سلول سری به عنوان رافر تعیین شد. بدین ترتیب با 21 سلول با زمان ماند هر کدام 4 دقیقه و حجم هر سلول 4 مترمکعب، بازیابی کلی 94.34 درصد به دست آمد. این مقدار با بازیابی حاصل از یک سلول آزمایشگاهی با زمان ماند 28 دقیقه که از الگوی جریان پیستونی تبعیت می‌کند، مطابقت دارد.

کلمات کلیدی

جریان پیستونی، مخلوط کننده کامل، مدلسازی فرآیند فلوتاسیون، سینتیک فلوتاسیون.

۱- مقدمه

چیدمان به صورت سری و موازی تعیین شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- توزیع زمان ماند

برای بررسی رفتار جریان در عملیات فلوتاسیون از دو الگوی اصلی جریان پیستونی و مخلوط کننده کامل استفاده می شود. در حالت جریان پیستونی، سیستم به صورت یک ظرف بسته در نظر گرفته می شود که تمام ذرات برای یک زمان یکسان تحت واکنش قرار می گیرند. در این حالت برای محاسبه زمان ماند ذرات در سلول از رابطه ۱ استفاده می شود [۹]:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

که در آن:

τ زمان ماند ذرات

V حجم ظرف

Q دبی جریان

در این سیستم به دلیل اینکه همه ذرات در یک زمان ماند تحت واکنش قرار می گیرند، هیچگونه توزیع احتمالی برای آن وجود ندارد و تابع توزیع زمان ماند آن به صورت یک تابع ضربه و یا دایراک است که واریانس آن صفر است.

در سیستم مخلوط کننده کامل نیز فرض بر آن است که زمان مخلوط شدن مواد در سلول صفر است و یا به عبارتی غلظت مواد در تمام حجم سلول یکسان است. در یک سیستم پیوسته فلوتاسیون، همه ذرات به یک مدت تحت واکنش قرار نمی گیرند. برای محاسبه توزیع زمان ماند در یک عملیات پیوسته باید یک موازنه جرم بین ورودی و خروجی سیستم برقرار باشد که می توان به شکل رابطه ۲ نوشت [۱]:

$$\frac{dm}{m} = -\frac{Q}{V} dt \quad (2)$$

با جایگذاری در ۱ رابطه های ۳ و ۴ به شکل زیر تعریف می شود:

$$\frac{dm}{m} = \frac{-1}{\tau} dt \rightarrow \int_{m(0)}^{m(t)} \frac{dm}{m} = \int_0^t \frac{-1}{\tau} dt \quad (3)$$

$$\ln m(t) - \ln m(0) = \frac{-1}{\tau} t \rightarrow m(t) = m(0)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

با توجه به تعریف تابع توزیع زمان ماند رابطه ۵ به شرح زیر است:

یکی از مشکلات عمده در طراحی بخش فلوتاسیون کارخانه های فرآوری مواد معدنی، نداشتن اطلاعات کافی در زمینه الگوهای جریان موجود در مدارهای فلوتاسیون است. دو نوع الگوهای مختلفی در این زمینه پیشنهاد شده است. دو نوع الگوی جریان ایده آل وجود دارد. یکی از این الگوها، الگوی جریان پیستونی است که یک الگوی کاملاً ایده آل و هدف نهایی کارخانه های فرآوری مواد معدنی دستیابی به این الگو است. الگوی ایده آل دیگر، الگوی اختلاط کامل است [۱]. این الگو به الگوی جریان موجود در کارخانه شباهت بیشتری دارد. یانوتس و همکاران نتایج حاصل از توزیع زمان ماند موجود در کارخانه ها را مدلسازی کرده اند [۲]. همچنین لئینسکی و همکاران نیز نتایج حاصل از توزیع زمان ماند سلول های مکانیکی بزرگ مقیاس را تجزیه و تحلیل نموده اند [۳]. البته در کارخانه های فرآوری مواد معدنی معمولاً ترکیبی از این الگوها استفاده می شود. در تحقیقات یاد شده یک راه حل کلی برای مشخص کردن تعداد سلول های فلوتاسیون ارایه نشده است.

یکی دیگر از مباحث موجود در طراحی سلول های فلوتاسیون، سینتیک فلوتاسیون است [۴]. سینتیک فلوتاسیون به عوامل مختلفی بستگی دارد. یک حالت ایده آل در سینتیک فلوتاسیون، سینتیک مرتبه صفر است که در این حالت مواد معدنی در زمان t به بازایی ۱۰۰ درصد دست پیدا می کنند. معمولاً در فلوتاسیون سینتیک مرتبه صفر کمتر اتفاق می افتد. ویننت و همکاران با استفاده از محاسبات انتگرال جز به جز، خصوصیات سینتیک دسته ای فلوتاسیون را محاسبه نموده اند [۵].

در اکثر تحقیقات سینتیک فلوتاسیون از مرتبه یک در نظر گرفته شده است. معمولاً سینتیک های مرتبه ۲ و بالاتر در فلوتاسیون کمتر اتفاق می افتد. به دلیل اینکه بازایی در عملیات فلوتاسیون رابطه مستقیمی با ثابت سینتیک و توزیع زمان ماند مواد در سلول دارد، برای مدلسازی و طراحی سلول های فلوتاسیون از این پارامترها استفاده می شود. فیلیپ و همکاران مدل های توزیع سینتیکی را برای پیاده سازی روش های جدید برای ذغال توصیف کرده اند [۶].

تحقیقات متفاوت زیادی نیز در زمینه مرتبه فلوتاسیون انجام گرفته است [۷،۸]. در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن الگوی جریان پیستونی، تعداد سلول های فلوتاسیون و نحوه

رفتن مواد در طول زمان با استفاده از یک تابع نمایی کاهش و برای مقادیر بیش از یک این آهنگ با یک روند نمایی افزایش پیدا می‌کند.

اغلب فرآیند فلوتاسیون را از نوع مرتبه اول در نظر می‌گیرند. در صورتیکه سینتیک از نوع مرتبه اول در نظر گرفته شود از جمله در این تحقیق، مقدار مواد معدنی موجود در سلول در هر زمان t به صورت رابطه ۹ قابل محاسبه است:

$$\int_{m(0)}^{m(t)} \frac{dm}{dt} = \int_0^t -kdt \rightarrow m(t) = m(0)e^{-kt} \quad (9)$$

همچنین بازیابی برابر است با:

$$R = \frac{m(0) - m(t)e^{-kt}}{m(0)} = 1 - e^{-kt} \quad (10)$$

بازیابی به دست آمده از رابطه ۱۰ مربوط به یک فرآیند فلوتاسیون ناپیوسته آزمایشگاهی با سینتیک مرتبه یک است. در صنعت، فرآیند فلوتاسیون به صورت پیوسته و با سینتیک مرتبه یک در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه بازیابی در حالت پیوسته، به دلیل اینکه در این شرایط توزیع زمان ماند نیز وجود دارد، بازیابی بر اساس حاصل ضرب تابع توزیع زمان ماند در مقدار بازیابی به دست می‌آید [۱۱]:

$$R = \int_0^{\infty} R(t) \times RTD(t) dt \quad (11)$$

با توجه به رابطه‌های ۶ و ۱۰ مقدار بازیابی برای یک سلول مخلوط کامل به صورت رابطه ۱۲ به دست می‌آید [۱۱]:

$$R = \frac{k\tau}{1 + k\tau} \quad (12)$$

۲-۲-۱- تاثیر تعداد سلول‌های سری بر بهبود بازیابی:

برای کاهش میان بر زدن مواد در سلول‌ها، از پشت سر هم قرار دادن سلول‌ها به صورت سری استفاده می‌شود. با این عمل موادی که زمان ماند کمتری برای بازیابی داشته‌اند و از سلول خارج شده‌اند، در سلول بعدی بازیابی مجدد می‌شوند. در این حالت فرض بر این است که ثابت سینتیکی و زمان ماند برای تمام سلول‌ها یکسان بوده و در نتیجه بازیابی تمام سلول‌ها برابر است. با در نظر گرفتن عملیات پیوسته با سینتیک مرتبه یک، بازیابی در سلول Z ام نسبت به خوراک اولیه طبق رابطه ۱۳ به دست می‌آید [۱]:

$$R_{(z)} = \frac{k\tau}{(1 + k\tau)^z} \quad (13)$$

$$\int_0^{\infty} RTD(t) dt = 1, \quad RTD(t) = \frac{m(t)}{\int_0^{\infty} m(t) dt} \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه ۴ تابع توزیع زمان ماند برای یک مخلوط‌کننده کامل در یک سیستم پیوسته برابر است با:

$$RTD(t) = \frac{m(0)e^{-\frac{t}{\tau}}}{\int_0^{\infty} m(0)e^{-\frac{t}{\tau}} dt} = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

۲-۱-۱- توزیع زمان ماند در سیستم‌های واقعی

در سیستم‌های واقعی، توزیع زمان ماند ترکیبی از حالت‌های مختلف است. بهترین حالت توزیع، شرایطی با توزیع جریان پیستونی است. برای رسیدن به این هدف باید تعداد سلول‌ها را افزایش داد تا توزیع جریان به سمت الگوی جریان پیستونی میل کرده و واریانس آن به صفر میل کند. توزیع زمان ماند برای یک سیستم Z سلولی به صورت سری برابر است با [۱۰]:

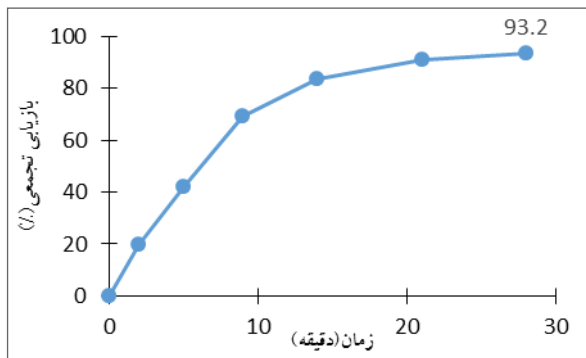
$$RTD(t) = \left(\frac{Z}{\tau_Z}\right)^z \frac{t^{z-1} e^{-\frac{zt}{\tau_Z}}}{(z-1)!}, \quad \tau_Z = z\tau \quad (7)$$

۲-۲- سینتیک فلوتاسیون

عملیات فلوتاسیون از قوانین سینتیکی پیروی می‌کند. با توجه به این مساله، اگر فرآیند فلوتاسیون در یک سلول با مقدار m گرم از ماده A انجام پذیرد می‌توان فرمول کلی رابطه ۸ را برای این عملیات در نظر گرفت:

$$\frac{dm_A}{dt} = -km_A^n \quad (8)$$

که در این رابطه k ثابت واکنش و n مرتبه آن است. مقدار k در فرآیند فلوتاسیون به عوامل مختلفی بستگی دارد و معمولاً در طول عملیات به صورت یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. مقدار n به میزان از دست رفتن مواد در طول عملیات فلوتاسیون بستگی دارد. در صورتیکه مقدار n صفر باشد، فلوتاسیون از مرتبه صفر نامیده شده و عملیات مستقل از غلظت است و با افزایش زمان در طول عملیات، با یک نسبت ثابتی غلظت مواد کاهش پیدا می‌کند. در صورتیکه n برابر با یک باشد، سینتیک از مرتبه یک نامیده شده و به غلظت مواد نیز بستگی دارد. در این فرآیند آهنگ از دست رفتن مواد با یک نسبت لگاریتمی کاهش پیدا می‌کند. چنانچه n مقداری بین صفر و یک باشد، در این حالت آهنگ از دست



شکل ۱: نمودار بازیابی بر اساس زمان

با توجه به نتایج آزمایش و رابطه ۱۵ میزان ثابت سینتیک k و R_{∞} محاسبه شد (جدول ۲):

$$R = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (15)$$

جدول ۲: مقادیر ثابت سینتیک و بازیابی در بینهایت

R_{∞}	k
۹۶٫۸۸ %	۰٫۱۳

با هدف به دست آوردن زمان ماند، دبی و حجم سلول در حالت صنعتی به نحوی که با الگوی حاصل از آزمایش فوق مطابقت داشته باشد ضروری است که بر مبنای رابطه ۱۴ از جمله برای دستیابی به حداکثر بازیابی به میزان ۹۳٫۲ درصد، زمان ماند متوسط بیش از ۲۸ دقیقه باشد. اگر بنا بر فرض سلولی با حجم ۳۰ متر مکعب در نظر گرفته شود با توجه به ظرفیت کارخانه (۳ مترمکعب در دقیقه) از رابطه ۱ میزان زمان ماند متوسط در سلول محاسبه می‌شود:

$$\tau = V/Q = 30/3 = 10 \text{ دقیقه}$$

با توجه به نمودار شکل ۱ مشاهده می‌شود که در زمان ۱۰ دقیقه حدود ۷۲ درصد از مواد بازیابی می‌شود. پس برای دستیابی به مقادیر بیشتر بازیابی، ضروری است راهکارهایی از جمله کاهش دبی ورودی با افزایش تعداد سلول‌ها به صورت موازی، به کار برد. در هر یک از خطوط برای طراحی تعداد سلول‌ها با در دست داشتن مقدار ثابت سینتیک k و زمان ماند متوسط τ ، این دو پارامتر را در رابطه ۱۴ قرار داده و با چند مرحله تکرار، مقدار Z یا همان تعداد سلول‌ها در حالت سری در هر یک از خطوط تعیین می‌شود. در این ارتباط برحسب دبی ورودی و حجم سلول می‌توان چند سناریو برای تعداد سلول‌ها بشرح جدول ۳ در نظر گرفت.

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که با هدف بیش از

۳-۲- مدلسازی تعداد سلول‌ها

از آنجایی که در این تحقیق هدف در طراحی تعداد سلول‌های واحد فلوتاسیون رسیدن به الگوی جریان پیستونی است، بنابراین تعداد سلول‌های سری را باید به گونه‌ای انتخاب کرد که بازیابی حاصل از مجموع سلول‌ها با بازیابی حاصل از جریان پیستونی برابر شود. برای این منظور از برقراری تساوی بین دو بازیابی و از رابطه ۱۴ استفاده می‌شود [۱۲]:

$$1 - e^{-k\tau} = \sum_{z=1}^y \frac{k\tau'}{(1 + k\tau')^z}, \quad \tau' = \frac{\tau}{Z} \quad (14)$$

در ابتدا زمان ماند متوسط τ بر اساس حجم سلول مورد نظر و همچنین دبی ورودی مدار و بر اساس الگوی جریان پیستونی محاسبه می‌شود، سپس این زمان ماند در الگوی اختلاط کامل قرار می‌گیرد و بر اساس تعداد سلول‌های لازم به صورت سری، بازیابی مورد نظر الگوی جریان پیستونی محاسبه می‌شود. قسمت سمت راست رابطه ۱۴ تا زمانی که حاصل کل عبارت با عبارت سمت چپ برابر شود تکرار می‌شود. حجم هر سلول به صورت انتخابی است و در صورتیکه دبی خوراک از دبی حاصل از زمان ماند متوسط و حجم سلول مورد آزمایش بیشتر باشد، باید الگوی به دست آمده را در مسیرهای موازی استفاده کرد تا میزان دبی خوراک را نیز پاسخگو باشد.

۳- تعیین سلول‌های واحد رافر مس نوچون

معدن مس نوچون یکی از معادن شرکت مس کرمان است که در مجاورت معدن مس سرچشمه در حال آماده‌سازی و شروع عملیات استخراج ماده معدنی است. در نظر است که برای فرآوری سنگ مس استخراج شده از معدن فوق، یک خط تولید جداگانه در نظر گرفته شود. در مطالعه سینتیکی فلوتاسیون نمونه این معدن، نتایجی طبق جدول ۱ حاصل شد و عیار باطله نهایی ۰٫۱۳ درصد بوده است.

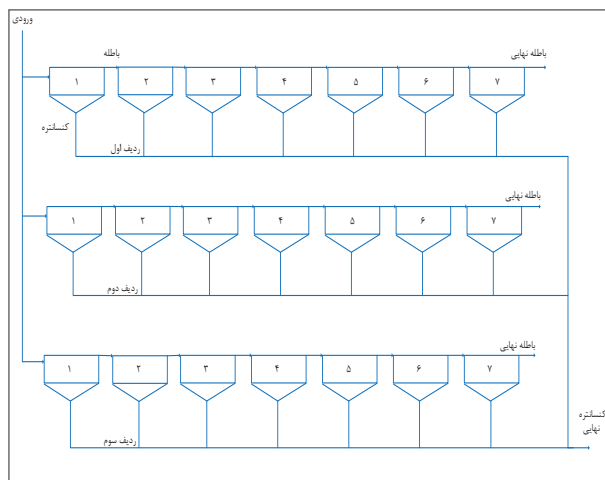
جدول ۱: نتایج حاصل از مطالعه سینتیکی فلوتاسیون نمونه مس معدن نوچون

زمان نمونه گیری (دقیقه)	۲	۵	۹	۱۴	۲۱	۲۸
وزن (گرم)	۳۶	۴۲	۷۵	۶۶	۴۷	۳۳
عیارکنسانتره (درصد)	۱۸	۱۷	۱۲	۷	۵	۲/۵

بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده طبق جدول ۱، نمودار بازیابی- زمان به صورت شکل ۱ است:

جدول ۳: نتایج حاصل از مراحل تکرار برای بازیابی

تعداد سلول	دبی ورودی ۳ متر مکعب بر دقیقه		دبی ورودی ۳ متر مکعب بر دقیقه		دبی ورودی ۱ متر مکعب بر دقیقه	
	زمان ماند کلی (دقیقه)	بازیابی کلی (درصد)	زمان ماند کلی (دقیقه)	بازیابی کلی (درصد)	زمان ماند کلی (دقیقه)	بازیابی کلی (درصد)
۱	۲۰	۷۲/۲۲	۳/۳۳	۳۰/۲۳	۴	۳۴/۲۱
۲	۴۰	۹۲/۲۸	۶/۶۷	۵۱/۳۲	۸	۷۶/۵۲
۳	۶۰	۹۷/۸۶	۱۰	۶۶/۰۴	۱۲	۷۱/۵۲
۴			۱۳/۳۳	۷۶/۳۱	۱۶	۸۱/۳۷
۵			۱۶/۶۷	۸۳/۴۷	۲۰	۸۷/۶۸
۶			۲۰	۸۸/۴۷	۲۴	۸۹/۹۱
۷			۲۳/۳۳	۹۱/۹۵	۲۸	۹۴/۶۷
۸			۲۶/۶۷	۹۴/۳۹		



شکل ۲: شمای کلی مدار فلوتاسیون با سه خط موازی هر یک مشتمل بر هفت سلول به صورت سری

مانند در آن‌ها با یکدیگر برابر است ولی با این تفاوت که زمان ماند مربوط به الگوی جریان پیوستونی بر تعداد سلول‌ها تقسیم می‌شود. یعنی طبق رابطه ۱۴ به صورت $\tau' = \frac{\tau}{Z}$ محاسبه می‌شود. به همین دلیل همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود هر چه تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد، ارتفاع تابع توزیع زمان ماند افزایش پیدا کرده و واریانس آن، یعنی انحراف از میانگین آن کاهش پیدا می‌کند.

۹۴ درصد بازیابی در صورت استفاده از سلول‌های با حجم ۶۰ متر مکعب یک خط فلوتاسیون با سه سلول بطور سری مورد نیاز است. در صورت استفاده از سلول‌های با حجم ۱۰ متر مکعب در یک خط فلوتاسیون نیاز به هشت سلول سری است. در صورت افزایش تعداد خطوط موازی به سه خط و کاهش دبی ورودی به یک سوم می‌توان با ۷ سلول چهار متر مکعبی بطور سری در هر خط و جمعا ۲۱ سلول به بازیابی کلی مورد نظر دست یافت.

انتخاب سناریوی مناسب مستلزم انجام بررسی‌های دقیق اقتصادی و فنی است. در این مرحله با توجه به وسعت معدن، ظرفیت کارخانه و لزوم استفاده از توانمندی‌های داخلی در ساخت سلول‌های فلوتاسیون سناریوی سوم یعنی چیدمان سه خط موازی با استفاده از هفت سلول چهار متر مکعبی در هر خط انتخاب شد. (شکل ۲)

برای کنترل مفید بودن عملیات و نشان دادن صحت آن، بر طبق رابطه ۷، تابع توزیع زمان ماند برای تعداد سلول‌های مختلف ترسیم شد. در شکل‌های ۳ و ۴ تابع توزیع زمان ماند برای Z های مختلف ترسیم شده است. در شکل ۳ زمان ماند تمام سلول‌ها با یکدیگر یکسان و برابر با ۴ دقیقه است. با وجود اینکه با افزایش تعداد سلول بازیابی نیز افزایش یافته است ولی با ازدیاد سلول‌ها توزیع زمان ماند از الگوی جریان پیوستونی دورتر می‌شود. در شکل ۴، در هر یک از حالات سلول‌ها زمان

پیستونی نزدیک می‌شود.

۵- منابع

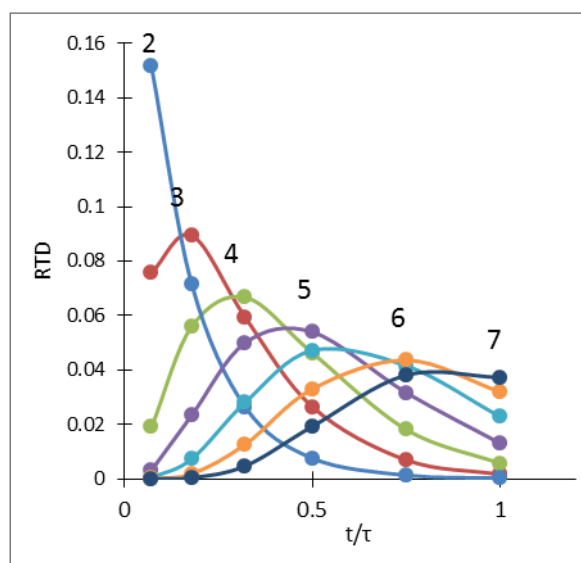
- [1] King, R. P. (2012). "Modelling and Simulation of Mineral Processing Systems". Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- [2] Yianatos, J., Bergh, L., Vinnett, L., Panire, I., and Díaz, F. (2015). "Modelling of Residence Time Distribution of Liquid and Solid In Mechanical Flotation Cells". Minerals Engineering, 78: 69-73.
- [3] Lelinski, D., Allen, J., Redden, L., and Weber, A. (2002). "Analysis of the Residence Time Distribution in Large Flotation Machines". Minerals Engineering, 15: 499-505.
- [4] Wills, Barry A, and Hopkins, D. W. (2006). "Mineral Processing Technology". 7th Edition, Elsevier Science & Technology Books.
- [5] Vinnett, L., Alvarez-Silva, M., Jaques, A., Hinojosa, F., and Yianatos, J. (2015). "Batch Flotation Kinetics: Fractional Calculus Approach". Minerals Engineering, 77: 167-171.
- [6] Ofori, P., O'Brien, G., Hapugoda, P., and Bruce, F. (2014). "Distributed Flotation Kinetics Models – A New Implementation Approach for Coal Flotation". Minerals Engineering, 66-68: 77-83.
- [7] Niemi, Antti J. (1995). "Role of kinetics in modelling and control of flotation plants". Powder Technology, 82: 69-77.
- [8] Polat, M., and Chander, S. (2000). "First-Order Flotation Kinetics Models and Methods for Estimation of the True Distribution of Flotation Rate Constants". International Journal of Mineral Processing, 58: 145-166.

[۹] نعمت‌اللهی، ح؛ ۱۳۸۴؛ "کانه آرایی"، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۷۲۶-۷۱۳.

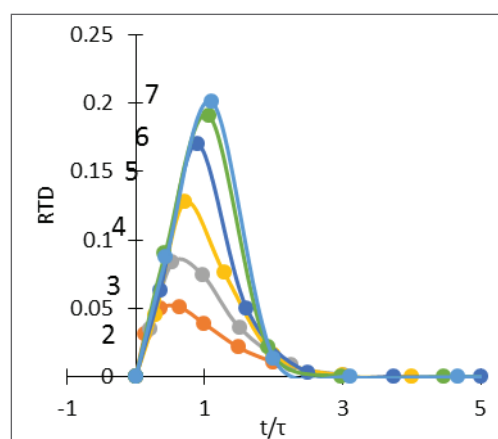
[۱۰] بنیسی، ص؛ ۱۳۸۸؛ "مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی"، جلد دوم، انتشارات دانشگاه هرمزگان، ص ۴۲۶-۴۲۳.

[11] Levenspiel, O. (1999). "Chemical Reaction Engineering". Third Edition, John Wiley and Sons, New York.

[12] Barbary, G. (1984). "Engineering aspects of flotation in the minerals industry: flotation machines, circuits and their simulation". The Scientific Basis of Flotation. Springer Netherlands, 289-348.



شکل ۳: توزیع زمان ماند برای ۲ تا ۷ سلول



شکل ۴: تاثیر تعداد سلول سری در توزیع زمان ماند

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی بر آن شده که بر اساس الگوی جریان پیستونی تعداد سلول‌های اختلاط کامل را در حالت‌های سری و موازی به دست آورد. با توجه به مشخصات کانه مس نوچون در این تحقیق تعداد سلول‌ها در جهت سری برای دستیابی به بازیابی حداکثر ۷ عدد و در جهت موازی برای دستیابی به آهنگ ورودی خوراک ۳ عدد به دست آمد. یعنی ۲۱ سلول با زمان ماند هر کدام ۴ دقیقه و بازیابی نهایی ۹۴٫۶ درصد است. همانگونه که از شکل ۴ نیز مشخص است، با افزایش تعداد سلول با زمان ماند یکسان و در حالتی که مجموع زمان ماند آن‌ها با زمان ماند حاصل از جریان پیستونی برابر باشد، الگوی جریان به دست آمده از این تعداد سلول به الگوی جریان