تعیین توزیع زمان ماند مواد در مدارهای آسیاکنی و فلوتاسیون با استفاده از نرم‌افزارهای صفحه گسترده

علیرضا فرمد[۱]؛ محسن یحیائی[۲]؛ صمد بنیسی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر farmad_alireza@yahoo.com
۲. دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان yahyaei@graduate.uk.ac.ir
۳. استاد بخش مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان banisi@mail.uk.ac.ir

چکیده

بررسی الگوی اختلاط و تعیین زمان ماند مواد در فرآیندهایی که در صنعت فرآوری مواد بکار گرفته می‌شوند، نقش مهمی در انتخاب تجهیزات، کنترل و بهینه‌سازی عملیات دارد. در این تحقیق از نرم‌افزار صفحه گسترده Microsoft Excel استفاده شده است تا الگوی اختلاط در فرآیندهای فرآوری مواد بوسیله دو مدل Weller و N-Mixer مدل‌سازی شود. مدل‌سازی فرآیندهایی که در آنها بخشی از خروجی فرآیند به عنوان جریان برگشتی دوباره به فرآیند بر می‌گردد، تاحدی مشکل بوده است و نیاز به محاسبات ویژه‌ای دارد. دلیل این امر، تغییر غلظت نشانه در ورودی مدار در طول زمان است. در نرم‌افزار تهیه شده با محاسبه غلظت نشانه در جریان خروجی، تاثیر آن از ورودی ظرف حذف و الگوی اختلاط واقعی ظرف محاسبه شده است. در بررسی زمان ماند مواد در یک سلول در دو حالت مدار باز و مدار بسته، برای دبی ورودی ۱۰ لیتر بر دقیقه، متوسط زمان ماند برای دو حالت، به ترتیب ۳/۷ و ۳/۶ دقیقه بدست آمد که نشان دهنده صحت محاسبات در نرم‌افزار برای مدارهای با جریان برگشتی بود.

واژه های کلیدی: مدل‌سازی، توزیع زمان ماند، نرم‌افزار

••• مقدمه

به طور کلی در هر ظرفی که یک واکنش اتفاق می‌افتد، الگوی اختلاط مواد و توزیع زمان ماند آنها دارای اهمیت است، [۱].

یک روش مناسب برای اندازه‌گیری توزیع زمان ماند، تزریق ضربه‌ای یک ماده ردیاب در خوراک ورودی به ظرف و اندازه‌گیری تغییرات آن در خروجی در طول زمان است. برای بررسی توزیع زمان ماند، از دو الگوی ایده‌آل استفاده می‌شود، که عبارتند از: جریان پیستونی(Plug flow) و جریان کاملاً مخلوط (Perfectly mixed flow) در عمل هر رآکتور واقعی با ترکیبی از الگوهای جریان ایده‌آل مدل‌سازی می‌شود[۲].

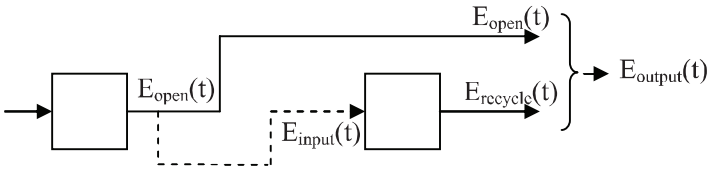
••••• توزیع زمان ماند در مدار بسته

در مدارهای بسته اگر ماده ردیاب در یک لحظه به جریان ورودی ظرف اضافه شود، به دلیل وجود جریان برگشتی، مقداری از ردیاب دوباره به ظرف باز می گردد و در نتیجه اعمال ماده ردیاب به صورت ضربه نخواهد بود. در صنعت تقریباً هیچگاه امکان خارج نمودن چنین ظروفی از مدار بسته وجود ندارد. (برای مثال یک آسیای گلوله‌ای در حال کار) به همین دلیل زمان ماند واقعی ظرف (مربوط به مدار باز) را باید از روی اطلاعات بدست آمده در مدار بسته محاسبه کرد.

در یک مدار بسته می‌توان غلظت ردیاب خروجی از ظرف را به دو دسته تقسیم کرد: قسمت اول ناشی از ماده ردیاب اولیه است، که به صورت لحظه‌ای در ورودی ظرف اعمال شده است، بخش دوم حاصل از تحریک‌های پیوسته‌ای است که جریان برگشتی به ورودی

اعمال می‌کند. اگر تغییرات غلظت در خروجی، که مربوط به ردیاب اولیه است، به صورت $E_{open}(t)$ نشان داده شود و مجموع پاسخ به تحریک‌های بعدی، $E_{recycle}(t)$ نامیده شود، تغییرات غلظت در خروجی ظرف، $E_{output}(t)$ ، برابر است با:

$$E_{output}(t) = E_{open}(t) + E_{recycle}(t) \quad (۱)$$



شکل (۱): مدل‌سازی مدار بسته با دوظرف سری

این حالت بسیار شبیه دوظرف متوالی کاملاً مشابه است؛ پس برای اینکه تابع توزیع زمان ماند مواد در خروجی از ظرف دوم درست محاسبه شود، باید توزیع غلظت در ورودی به ظرف دوم به طور مستقل اندازه‌گیری شود. با توجه به این نکته که ورودی ظرف دوم در مدل در واقع همان ورودی ظرف اصلی می‌باشد، ضرورت اندازه‌گیری غلظت‌ها وتعیین الگوی جریان در ورودی مشخص می‌شود.

با توجه به تشابه الگوی جریان در مدار بسته با الگوی جریان در دو ظرف سری کاملاً مشابه، می‌توان نوشت:

$$E_{recycle}(t) = \int_0^t E_{input}(t') \times E_{open}(t-t')dt' \quad (۲)$$

بنابراین اگر تابع RTD ورودی به صورت مجموعه‌ای از تحریک‌های لحظه‌ای در نظر گرفته شود، که هر یک در فاصله زمانی بسیار کوتاه dt و در لحظه t به ورودی ظرف اعمال می‌شود، پاسخ خروجی مدار بسته نسبت به یک تحریک اولیه لحظه‌ای در زمان t، برابر است با پاسخ مدار به تحریک اولیه بعلاوه مجموع پاسخ‌های مدار باز نسبت به تحریک‌های لحظه‌ای جریان برگشتی از زمان صفر تا زمان t است (رابطه۳).

$$E_{output}(t) = E_{open}(t) + \int_0^t E_{input}(t') \times E_{open}(t-t')dt' \quad (۳)$$

اگر غلظت‌های خروجی و ورودی به ترتیب $C_{output}(t)$ و $C_{input}(t)$ باشند و سطح زیر این منحنی‌ها را به ترتیب با S_{output} و S_{input} نشان دهیم، خواهیم داشت :

$$S_{input} = \int_0^{+\infty} C_{input}(t)dt \quad (۴)$$

$$S_{output} = \int_0^{+\infty} C_{output}(t)dt \quad (۵)$$

بر اساس قانون بقای جرم، مقدار ردیاب اولیه، (ورودی به مدار) برابر مقدار ردیابی است که از مدار خارج می‌شود، با توجه به اینکه سطح زیر منحنی غلظت زمان متناسب با مقدار ردیاب می‌باشد، داریم: [۲]

$$S_{open} = S_{output} - S_{input} \quad (۶)$$

که در آن S_{open} سطح زیر منحنی غلظت-زمان در مدار باز است. با جایگذاری پارامترها در رابطه (۳) می‌توان نوشت:

$$C_{output}(t) = S_{output} \times E_{output}(t) = S_{open} \times E_{open}(t) + \int_0^t S_{input} \times E_{input}(t') \times E_{open}(t-t')dt'$$

••••• مدل‌سازی ریاضی

اگر غلظت و زمان‌های اندازه‌گیری شده در جریان ورودی با $(t_{input_i}, C_{input_i})$ و در جریان خروجی با $(t_{input_i}, C_{output_i})$ نشان داده شوند، می‌توان رابطه (۷) را به صورت تقریبی زیر نوشت:

$$\times E_{open}(t_{output_i}) + C_{input_1} \times (t_{input_2} - t_{input_1}) \times E_{open}(t_{output_i} - t_{input_1}) \quad (7)$$
$$+ C_{input_2} \times (t_{input_3} - t_{input_2}) \times E_{open}(t_{output_i} - t_{input_2})$$
$$+ C_{input_3} \times (t_{input_4} - t_{input_3}) \times E_{open}(t_{output_i} - t_{input_3})$$
$$+ \ldots.$$

متناسب با مقدار ردیاب اعمال شده بین زمان‌های t_{input_j} و $t_{input_{j-1}}$ است و حاصل ضرب آن در $E(t_{output_i} - t_{input_j})$، برابر پاسخ ردیاب اعمال شده در زمان t_{output_i} در خروجی ظرف است. بنابراین جمع کل جملات برابر پاسخ ظرف به کل ردیاب بازگشتی است. برای همین اگر این مجموع را با پاسخ ظرف به تحریک ضربه‌ای اولیه ($S_{open} \times E_{open}(t)$) جمع کنیم، حاصل می‌بایست با غلظت‌های اندازه‌گیری شده در خروجی برابر باشد یعنی:

$$(t_{output_i}) + \sum_{j=1}^{m} C_{input_j} \times \Delta t_{input_j} \times E_{open}(t_{output_i} - t_{input_j}) \quad (8)$$

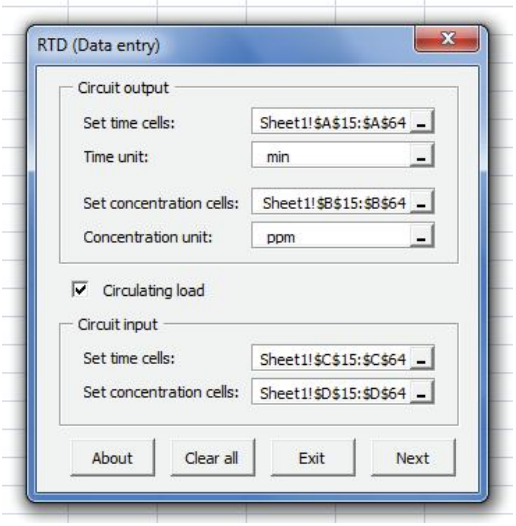
در این حالت منحنی $E(t)$ به نقاط برازش داده نمی‌شود؛ زیرا نقاط موجود مربوط به غلظت در مدار بسته هستند. به همین دلیل منحنی $C_{output}(t)$ به نقاط مربوطه برازش داده می‌شود. البته این کار $E_{open}(t)$ همان اثر ردیاب در مدار باز است که باید محاسبه شود. اگر مجموع تحریک‌های ثانویه، یعنی توزیع غلظت ورودی با $E_{input}(t)$ نمایش داده شود، می‌توان مدار بسته را با مدل نشان داده شده در شکل(۱۲)، شبیه‌سازی کرد.

با تغییر پارامترهای تابع $E(t)$ انجام می‌شودکه، مربوط به یکی از دو مدل N مخلوط کننده کامل و یک ظرف واکنش پیستونی یا مدل Weller می‌باشد.

••••• نرم‌افزار محاسبه الگوی زمان ماند

با توجه به سادگی و دسترس بودن برنامه صفحه گسترده Microsoft Excel، نرم‌افزار محاسبه زمان ماند تحت این برنامه آماده شد.

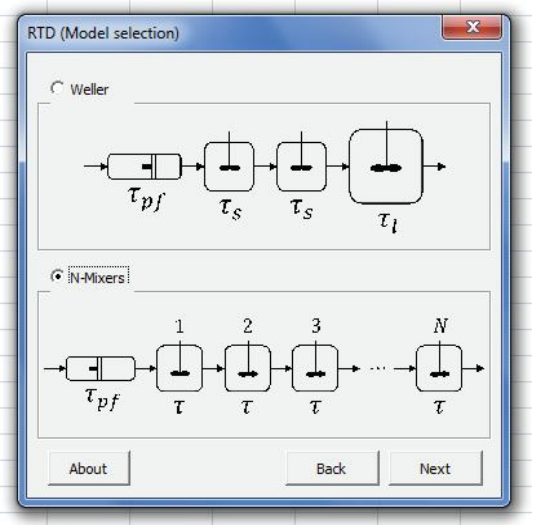
پس از اجرای Setup برنامه، نرم‌افزار به صورت Add-Ins به Microsoft Excel، با نام RTD اضافه خواهد شد. برای کار با نرم‌افزار باید ابتدا اطلاعات زمان و غلظت اندازه‌گیری شده در محیط صفحه گسترده وارد شود. با اجرای برنامه RTD پنجره نشان داده شده در شکل (۲)، نمایش داده خواهد شد.



شکل(۲): پنجره ورود اطلاعات غلظت و زمان

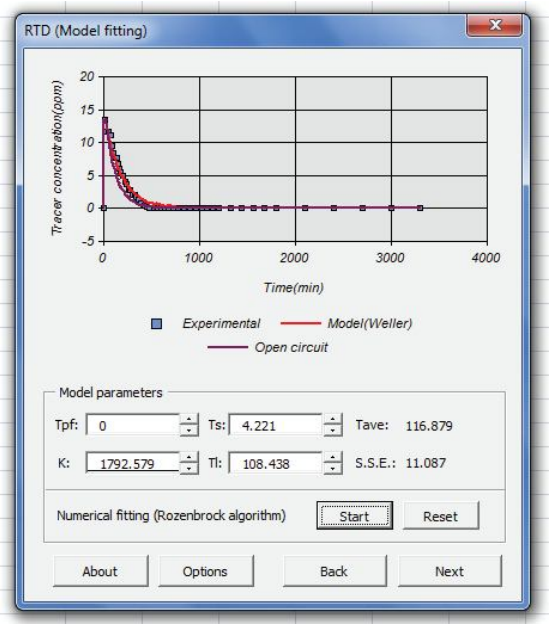
در این پنجره، کاربر می‌تواند محدود اعداد زمان و غلظت متناظر با آن ها و همچنین واحد اندازه‌گیری زمان و غلظت را مشخص کند. اگر ظرف مورد آزمایش بسته باشد، با انتخاب حالت مدار بسته، کاربر می‌تواند اطلاعات غلظت و زمان مربوط به جریان برگشتی را نیز مشخص کند.

با زدن دکمه Next، نرم‌افزار پردازش‌های اولیه روی داده‌ها انجام داده و در صورتی که خطایی در اطلاعات ورودی وجود نداشته باشد، غلظت پایه را از تمام غلظت‌های اندازه‌گیری شده، کم می‌کند. سپس به مرحله انتخاب مدل می‌رود (شکل۳). غلظت پایه به معنی غلظتی از ماده معرف است که، در جریان مواد ورودی به ظرف قبل از اضافه کردن معرف وجود داشته‌است. (برای مثال غلظت نمک موجود در آب) دلیل کم کردن مقدار غلظت پایه از کل غلظت‌ها به محاسبه سطح زیر منحنی تغییرات غلظت زمان برمی‌گردد؛ زیرا سطح زیر منحنی باید تنها ناشی از مقدار ماده معرفی باشد که به صورت ضربه وارد سیستم شده است، تا نتایج محاسبات مدلسازی صحیح باشد.



شکل (۳): پنجره انتخاب مدل

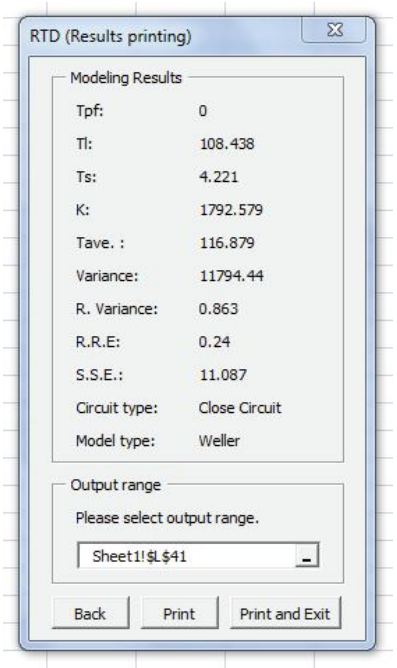
در این پنجره، کاربر می‌تواند مدل مورد نظر برای برازش به داده‌ها را انتخاب کند. بعد از انتخاب مدل مورد نظر، و فشردن دکمه Next، با توجه به اینکه برای شروع عمل برازش باید حدس‌های اولیه برای پارامترهای مدل وجود داشته باشد یا به عبارت دیگر می‌بایست مقادیری را برای پارامترهای مدل در نظر بگیریم که با بهینه کردن این مقادیر به منحنی برازش یافته برسیم نرم‌افزار با استفاده از داده‌های غلظت و زمان ورودی، مقادیر اولیه‌ای برای پارامترهای مدل انتخاب شده (k ، τ ، N ، τ_{pf} برای N-Mixer و k ، τ_{pf} ، τ_l ، τ_s برای Weller) در نظر می‌گیرد. بعد از مشخص شدن مقادیر اولیه پارامترها منحنی مدل مورد نظر همراه نقاط بدست آمده از آزمایش نمایش داده می‌شود (شکل ۴).



شکل (۴): پنجره تنظیم پارامترها

در این مرحله کاربر می‌تواند با توجه به منحنی حاصل از مدل و نقاط آزمایشی مقادیر پارامترهای مدل را به صورت دستی تغییر دهد، تا به نتیجه مطلوب‌تری دست پیدا کند. در غیر این صورت با فشار دادن دکمه Start برنامه با استفاده از الگوریتم جستجوی رزنبراک،[1] اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای مدل بر مبنای مجموع مربعات خطا می‌کند. پیشنهاد می‌شود که کاربر با تغییر حدس‌های اولیه منحنی را به نقاط اندازه‌گیری شده در آزمایش نزدیک کند. البته شاخص برای مناسب بودن جهت تغییرات، می‌تواند مجموع مربعات خطا باشد که در این فرم به صورت زنده نمایش داده می‌شود؛ زیرا این کار کمک می‌کند تا بهینه‌سازی با الگوریتم روزنبراک در زمان کوتاه‌تری انجام شود.

بعد از پایان مرحله برازش و رسیدن به جواب بهینه، با کلیک روی دکمه Next فرم نمایش نتایج فعال می‌شود. در این فرم همان طور که در شکل(۵) نشان داده شده است علاوه بر مشاهده نتایج تمام پارامترهای محاسبه شده، می‌توان با انتخاب یک سلول از صفحه گسترده، نتایج محاسبات و نمودارهای مربوطه رادر این صفحه ذخیره کرد.

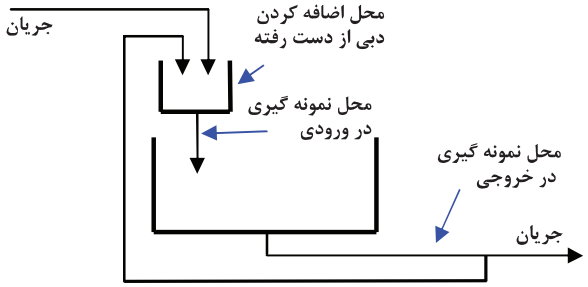


شکل(۵): پنجره نمایش و ذخیره کردن نتایج

••• بررسی الگوی اختلاط مواد در یک ظرف در دو حالت مدار باز و بسته

برای حصول اطمینان از صحت کار نرم‌افزار در مدلسازی الگوی اختلاط، یک ظرف در دو حالت مدار باز و مدار بسته، از نتایج آزمایش انجام شده توسط جوادی و بنیسی (۱۳۷۹) استفاده شد. در آزمایش ردیابی انجام شده، از نمک طعام به عنوان ردیاب استفاده و معیار سنجش غلظت، هدایت الکتریکی محلول انتخاب شد. این پارامتر توسط دستگاه هدایت سنج و برحسب واحد میلی زیمنس (ms) اندازه‌گیری می‌شود.

انجام آزمایش با استفاده از یک مخزن با حجم ۴۰ لیتر، یک بار با دبی ورودی و خروجی یکسان به میزان ۲۰ لیتر بر دقیقه، بار دیگر با دبی ورودی و خروجی به میزان ۱۰/۰۹ لیتر بر دقیقه در دو حالت باز و بسته، صورت گرفت. شکل (۶) سیستم بکار رفته برای این آزمایش‌ها در مدار بسته را نشان می‌دهد.



شکل(۶): طرح کلی سیستم آزمایش برای تعیین الگوی اختلاط یک ظرف در دو حالت مدار بسته

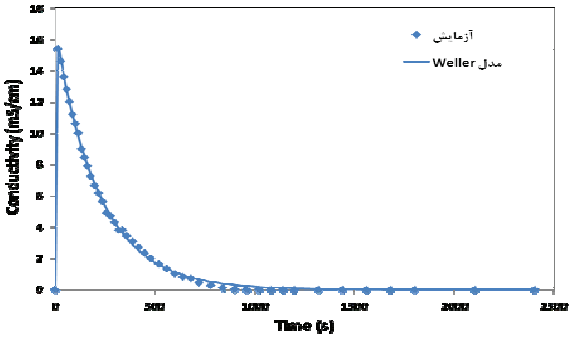
••• بررسی و تحلیل نتایج

در جدول(۱) نتایج مدل‌سازی برای دو حالت مدار باز و مدار بسته با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه، ارائه شده است.

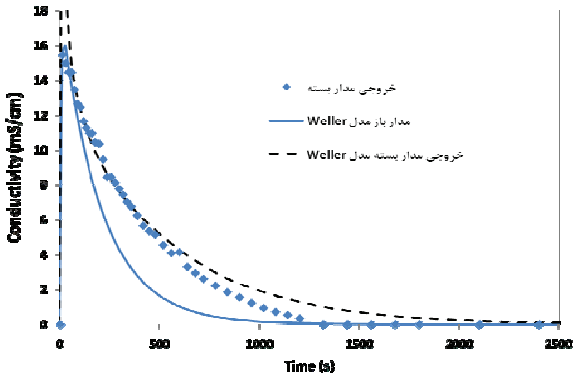
جدول (۱): نتایج محاسبات مدار باز و بسته توسط نرم افزار با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه

مدار بسته	مدار باز	نوع مدار	
۰/۰	۰/۱	τ_{pf} =	(زمان جریان پیستونی)
۱/۰	۱/۰	N =	(تعداد)
۳/۴	۳/۶	τ =	(زمان متوسط کاملاً مخلوط)
۶۵/۲	۵۹/۴	k =	(سطح زیر منحنی)
۳/۶	۳/۷	$\tau_{avreage}$ =	(زمان ماند متوسط)
۲/۷	۰/۷۸	$S.S.E$ =	(مجموع مربعات خطا)

[1] Rosenbrock•••



مدار باز



مدار بسته

شکل (۷): منحنی توزیع زمان ماند مواد برای ظرف با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه

با توجه به یکسان بودن دبی‌ها و ثابت بودن مشخصات ظرف، میانگین زمان ماند در مدار باز و بسته باید یکسان باشد. با توجه به جدول(۱) متوسط زمان ماند در مدار بسته ۳/۶ دقیقه و در مدار باز ۳/۷ دقیقه بدست آمده‌است که نشان دهنده صحت روش محاسبه ترم‌افزار در مدلسازی الگوی اختلاط ظروف با جریان برگشتی است.

همانطور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، الگوی اختلاط واقعی ظرف (مدار باز) در هر دو حالتی که ظرف در مدار باز و مدار بسته بوده است، یکسان می‌باشد در حالی که تغییرات غلظت- زمان برای دو ظرف با یکدیگر متفاوت است.

••• نتیجه‌گیری

۱- روشی جهت شبیه‌سازی زمان ماند مواد در سیستم‌های با جریان برگشتی، با بکارگیری الگوهای مخازن متداول ارائه گردید.

۲- برنامه‌ای برای تعیین الگوی و محاسبه زمان ماند مواد در ظروف واکنش در مدار باز یا بسته بر پایه نرم‌افزارهای صفحه گسترده با قابلیت کاربری بسیار ساده تهیه شد.

۳- متوسط زمان ماند برای یک ظرف با دبی ورودی ۱۰ لیتر بر دقیقه در حالت مدار باز و بسته، به ترتیب ۳/۷ دقیقه و ۳/۶ دقیقه بدست آمد، که صحت روش مورد استفاده برای تعیین الگوی اختلاط ظروف واکنش مدار بسته را تایید کرد.

••• مراجع

[۱] لونشپیل، ترجمه:سهرابی، م.، طراحی راکتورهای شیمیایی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ص.ص.۳۷۱-۲۹۵، ۱۳۷۱.

[۲] جوادی، فرهاد، بنیسی، صمد، نرم‌افزاری برای محاسبه زمان ماند مواد در سلول‌های فلوتاسیون، پروژه تخصصی دوره کارشناسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۷۵.

[۳] بنیسی، صمد، کنترل و مدلسازی سیستم‌های فرآوری مواد معدنی، جزوه درسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بهمن ۱۳۸۷.

[۴] جوادی، فرهاد، بنیسی، صمد، شبیه سازی توزیع زمان ماند مواد در مدارهایی با جریان برگشتی، دومین کنگره متالوژی فلزات غیر آهنی ایران، اردیبهشت ۱۳۷۹.