



## مطالعه و بررسی پارامتر هیدرودینامیکی سرعت لغزشی در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی دار جهت استخراج اورانیوم از محلول فروشویی بندرعباس

فرشته خان‌رمکی

پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران-ایران

### چکیده

فرآیند خالص‌سازی اورانیوم یکی از فرآیندهای اصلی و حائز اهمیت در حلقه‌های تولید کیک زرد و فرآوری اورانیوم می‌باشد. برای خالص‌سازی اورانیوم روش‌های متعددی وجود دارد که یکی از مهمترین روش‌ها، روش استخراج با حلال می‌باشد. بنابراین، استخراج مایع-مایع یکی از فنون مهم جداسازی است. ستون‌های ضربه‌ای به عنوان یک تماس دهنده دیفرانسیلی بدلیل داشتن راندمان بالا و فضای کم یکی از مهمترین دستگاه‌های مورد استفاده در صنعت می‌باشند. با توجه به ساختار ستون‌های ضربه‌ای افقی، نیاز به ساختمان‌هایی با سقف‌های بلند در مقایسه با نوع عمودی آن نیست و همین امر منجر به کاهش هزینه‌ها مخصوصاً هزینه‌های مربوط به حفاظت در برابر تشعشعات می‌شود. برای شناخت کارکرد و افزایش مقیاس این ستون‌های استخراج، مطالعه پارامترهای هیدرودینامیکی امری ضروریست که در این مقاله به بررسی اجمالی سرعت لغزشی در ستون‌های ضربه‌ای افقی نوع سینی دار به منظور استخراج اورانیوم که نقش مهمی را در طراحی ستون‌های فوق دارا می‌باشند به روش طراحی آزمایش، پرداخته شده است.

کلیدواژه‌ها: استخراج مایع-مایع، ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی دار، سرعت لغزشی، اورانیوم، طراحی آزمایش

## Study and Investigation of Slip Velocity as Hydrodynamic Parameter in Horizontal Pulsed Sieve-Plate Column for Uranium Extraction from sulfate leach liquor of Bandar Abbas

Fereshte Khanramaki\*

Nuclear Materials and Fuel Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran-Iran

### Abstract

The uranium purification process is one of the main and important processes in yellow cake production and uranium processing. There are several methods for purifying uranium, one of the most important of which is solvent extraction. Therefore, liquid-liquid extraction is one of the important separation techniques. Pulsed columns are one of the most important devices used in the industry as a differential contactor due to their high efficiency and low space. Due to the structure of the horizontal pulsed columns, there is no need for buildings with high roofs compared to the vertical type, and this leads to a reduction in costs, especially the costs related to radiation protection. The study of hydrodynamic parameters is necessary to understand the function and scale of these extraction columns. In this paper, an overview of slip velocity in horizontal pulsed sieve-plate columns in order to extract uranium, which play an important role in the design of the above columns, has been investigated by experimental design method.

**Keywords:** Liquid-Liquid Extraction, Horizontal Pulsed Sieve-Plate Column, Slip Velocity, Uranium, Design Expert

\* Email: fkhanramaki@aeoi.org.ir

**۱- مقدمه**

سرعت لغزشی از جمله مهمترین پارامترهای هیدرودینامیکی در طراحی ستون‌های ضربه‌ای می‌باشند [۱]. بنابراین یکی از مهمترین پارامتر کنترل‌کننده ضریب انتقال جرم در ستون‌های استخراج مایع-مایع، سرعت لغزشی می‌باشد و این پارامتر در محاسبه عدد رینولدز بکار می‌رود. بطور کلی سرعت لغزشی تعیین‌کننده رفتار هیدرودینامیکی ستون‌های استخراج مایع-مایع می‌باشد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری مستقیم سرعت لغزشی در سیستم‌های استخراج مایع-مایع کار دشواری می‌باشد، اغلب این پارامتر با استفاده از سرعت ظاهری فازها و موجودی فاز پراکنده محاسبه می‌شود. برای جریان متقابل از دو فاز غیر قابل امتزاج در یک ستون استخراج بدون پراکنده، سرعت لغزشی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{slip} = \frac{V_d}{\phi} + \frac{V_c}{(1-\phi)} \quad (1)$$

در صورتی که از ستون پر شده استفاده شود، سرعت لغزشی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$V_{slip} = \frac{V_d}{e\phi} + \frac{V_c}{e(1-\phi)} \quad (2)$$

در صورت تاثیر اجزاء درونی سیستم استخراج مایع-مایع، این اثر بوسیله یک ضریب انقباض (CR) بصورت رابطه کلی زیر قابل بیان می‌باشد:

$$V_{slip} = \frac{1}{C_R} \left( \frac{V_d}{\phi} + \frac{V_c}{(1-\phi)} \right) \quad (3)$$

بطور کلی می‌توان گفت که سرعت لغزشی، سرعت قطرات نسبت به فاز پیوسته (سرعت دو فاز نسبت به هم) است که به قطر قطره و مشخصات فیزیکی سیستم‌ها بستگی دارد [۲]. لازم به ذکر است که در رابطه فوق، با فرض عدم تغییر اندازه قطره، سرعت فازها را ثابت در نظر گرفته و از اثرات چرخشی قطرات و همچنین موجودی استاتیکی فاز پراکنده صرف نظر شده است. همچنین رابطه (۵) برای سرعت ظاهری هر فاز برقرار می‌باشد:

$$V_i = \frac{Q_i}{A} \quad (4)$$

که در رابطه فوق،  $Q_i$  دبی حجمی فاز  $i$  و  $A$  سطح مقطع عبور جریان می‌باشد.

برای پیش‌بینی سرعت لغزشی در ستون ضربه‌ای سینی‌دار روابط متعددی بصورت نیمه تجربی ارائه شده است که در جدول (۱) بصورت خلاصه به مهمترین آنها اشاره شده است.

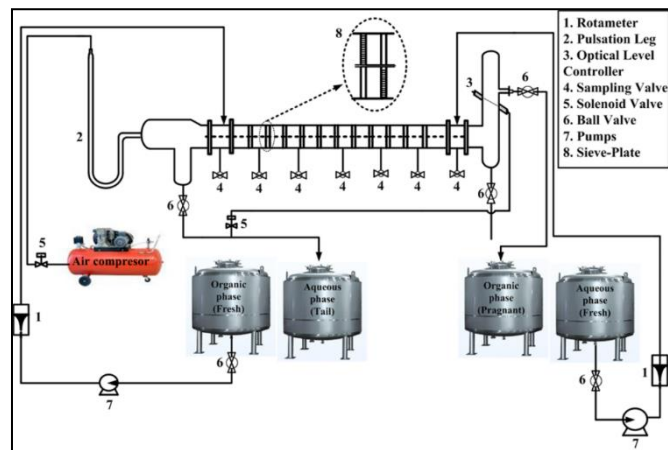
**جدول ۱- روابط ارائه شده توسط محققین برای تعیین سرعت لغزشی در ستون‌های ضربه‌ای سینی‌دار**

مرجع	رابطه تجربی
	برای ستون‌های عمودی و بدون واکنش شیمیایی
Kumar et al. [3]	$V_{slip} = 6.84 \times 10^{-6} \exp[-36.80 af - (af)_m ] \times \Delta\rho^{0.29} \rho_d^{0.67} \mu_d^{-0.66} \alpha^{0.44} h_c^{0.43}$
Venkatanarasaiah et al. [4]	$V_{slip} = 1.65 \times 10^{-2} \exp[-29.6 af - (af)_m ] \times \Delta\rho^{0.22} d^{0.22} \mu_d^{-0.38} \alpha^{0.32} h_c^{0.31}$
	برای ستون‌های افقی و بدون واکنش شیمیایی
Khajenoori et al. [5]	$V_{slip} = 0.088 \left(\frac{af}{V_d}\right)^{-0.568} \left(1 + \frac{V_c}{V_d}\right)^{0.374} \left(\frac{\rho_d}{\rho_c}\right)^{0.053} \left(\frac{\mu_d V_d}{\sigma}\right)^{0.06}$

با توجه به مطالعات انجام شده، مشاهده می‌شود تاکنون به منظور پیش‌بینی سرعت لغزشی در شرایط با انتقال جرم و در صورت وجود واکنش شیمیایی در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار برای سیستم استخراج اورانیوم از محیط سولفات به روش طراحی آزمایش مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

**۲. روش انجام آزمایش‌ها در مقیاس پیوسته در ستون نیمه‌صنعتی**

استخراج اورانیوم از محلول فروشویی بندرعباس در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار با استخراج‌کننده آلومین ۳۳۶ انجام شد. در آزمایش‌ها، فاز پیوسته محلول فروشویی بندرعباس با غلظت ۰/۲۲ M سولفات و حاوی اورانیوم با غلظت ۲۵۰ ppm بود و از فاز آلی آلومین ۳۳۶ با غلظت ۰/۱۲۵ M، ۵٪ حجمی ایزودکانول بعنوان اصلاح‌کننده و کروزن بعنوان رقیق‌کننده بعنوان فاز پراکنده استفاده شد. خواص فیزیکی محلول‌های استفاده شد در جدول (۲) گزارش شده است. همچنین، نمایی از ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار همراه با اجزاء جانبی آن در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمایی از ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار و تجهیزات جانبی آن

جدول ۲- خواص فیزیکی سیستم به کار رفته در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار

فاز	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	گرانروی ( $\times 10^{-2} \text{ kg/m.s}$ )	کشش بین فازی ( $\times 10^{-2} \text{ N/m}$ )
پیوسته	۱۰۵۸	۰٫۸۶۱	۹٫۹
پراکنده	۸۲۰	۱٫۸۴۱	

پس از کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری و رسیدن سیستم به شرایط پایا، پارامترهای موجودی فاز پراکنده به روش تجربی جابجایی سطح مشترک، دبی فازهای سبک و سنگین، فرکانس و دامنه ضربه اندازه‌گیری شدند.

بطور کلی رابطه‌های نیمه نظری برای پیش‌بینی سرعت‌های طغیان از مدل‌های موجودی فاز پراکنده مشتق می‌شوند و بسیاری از چنین روابط براساس سرعت لغزشی ( $V_{slip}$ ) هستند. اگر دو فاز در ستون در خلاف جهت هم حرکت کنند، رابطه زیر برای تعیین سرعت لغزشی صادق می‌باشد:

$$V_{slip} = \frac{V_d}{\phi} + \frac{V_c}{(1-\phi)} \quad (5)$$

بطوریکه در رابطه فوق  $V_c$  و  $V_d$  به ترتیب سرعت ظاهری فازهای پیوسته و پراکنده می‌باشند و  $\phi$  موجودی فاز پراکنده در طول ستون را نشان می‌دهد.

### ۳. یافته‌ها و نتایج

یکی از مهم‌ترین مباحثی است که امروزه در فعالیتهای آزمایشگاهی به منظور تحلیل نتایج و توجیه رفتار فرایند و بهینه سازی آن مطرح می‌گردد، بکارگیری نرم افزارهای تحلیل آماری است که معروفترین آنها Minitab و Design Expert می‌باشند. روش پاسخ سطح\* یک راهکار پیشنهادی آماری است که می‌تواند اثر تقابل فاکتورهای مختلف را نشان دهد [۶، ۷].

تاثیر پارامترهای عملیاتی مانند شدت ضربه ( $0.8 - 1.2 \text{ cm/sec}$ )، دبی فاز پیوسته ( $1 - 5 \text{ l/h}$ ) و دبی فاز پراکنده ( $1 - 5 \text{ l/h}$ ) مورد بررسی قرار گرفتند. محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی بر اساس شرایط کاری ستون در حالت پراکندگی و دور از نقطه طغیان در نظر گرفته شد و نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌ها تعیین شده توسط نرم افزار در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات آزمایش‌های طراحی شده با نرم افزار و نتایج بدست آمده

شماره آزمایش	شدت ضربه ( $\text{cm/sec}$ )	پارامترهای عملیاتی	
		دبی فاز پیوسته ( $\text{l/h}$ )	دبی فاز پراکنده ( $\text{l/h}$ )
۱	۰٫۹۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰
۲	۱٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰
۳	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۳٫۰۰

\* Response Surface Method

۰,۲۶۵	۲,۰۰	۲,۰۰	۱,۱۰	۴
۰,۱۹۶	۴,۰۰	۲,۰۰	۱,۱۰	۵
۰,۱۷۱	۲,۰۰	۴,۰۰	۰,۹۰	۶
۰,۲۰۱	۳,۰۰	۵,۰۰	۱,۰۰	۷
۰,۱۹۲	۳,۰۰	۳,۰۰	۰,۸۰	۸
۰,۲۵۰	۴,۰۰	۲,۰۰	۰,۹۰	۹
۰,۲۲۲	۲,۰۰	۴,۰۰	۱,۱۰	۱۰
۰,۱۰۶	۱,۰۰	۳,۰۰	۱,۰۰	۱۱
۰,۱۷۴	۵,۰۰	۳,۰۰	۱,۰۰	۱۲
۰,۱۰۰	۳,۰۰	۳,۰۰	۱,۰۰	۱۳
۰,۱۳۴	۴,۰۰	۴,۰۰	۰,۹۰	۱۴
۰,۲۰۹	۳,۰۰	۳,۰۰	۱,۲۰	۱۵
۰,۱۶۸	۴,۰۰	۴,۰۰	۱,۱۰	۱۶
۰,۲۰۰	۳,۰۰	۳,۰۰	۱,۰۰	۱۷

### ۳-۱- بررسی سرعت لغزشی

نتایج صحت مدل و تحلیل واریانس با بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر سرعت لغزشی (Vs) به روش پاسخ سطح بعنوان یکی از پارامترهای هیدرودینامیکی مهم در ستون ضربه‌ای افقی نوع سینی‌دار در شرایط با انتقال جرم در جدول‌های (۴) و (۵) آورده شده است.

جدول ۴- خروجی نرم‌افزار Design Expert به منظور بررسی صحت مدل برای سرعت لغزشی

R-Squared	0.96
Adj R-Squared	0.91
Pred R-Squared	0.81

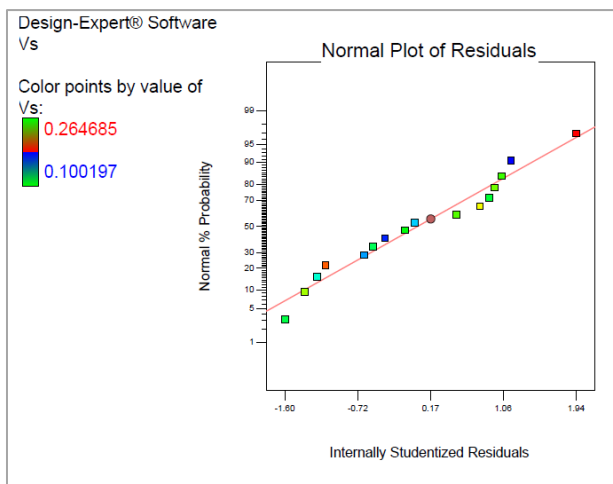
جدول ۵- تحلیل واریانس اثر متغیرهای عملیاتی بر سرعت لغزشی با نرم‌افزار Design Expert

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value	
Model	0.032356	9	0.003595	17.24602	0.0013	significant
A-af	0.013234	1	0.013234	63.48472	0.0002	
B-Qc	0.000282	1	0.000282	1.35161	0.2891	
C-Qd	0.015641	1	0.015641	75.03167	0.0001	
AB	0.001148	1	0.001148	5.506525	0.0573	
AC	5.38E-05	1	5.38E-05	0.258084	0.6296	
BC	8.48E-05	1	8.48E-05	0.406732	0.5472	
A^2	3.87E-07	1	3.87E-07	0.001856	0.9670	
B^2	0.000243	1	0.000243	1.165114	0.3219	
C^2	0.001398	1	0.001398	6.707936	0.0412	
Residual	0.001251	6	0.000208			
Lack of Fit	0.001238	5	0.000248	19.9406	0.1683	not significant
Pure Error	1.24E-05	1	1.24E-05			
Cor Total	0.033606	15				

با توجه به مقادیر موجود در ستون p-value می‌توان گفت پارامترهای عملیاتی شدت ضربه، دبی فاز پراکنده، اثر متقابل شدت ضربه و دبی فاز پیوسته و اثر غیر خطی بودن دبی فاز پراکنده مهم‌ترین فاکتورهای اثرگذار بر پارامتر سرعت لغزشی می‌باشند. همچنین می‌توان گفت که مدل پیشنهادی با نرم‌افزار صحت قابل ملاحظه‌ای برای برازش داده‌ها دارد. بنابراین رابطه زیر برای تعیین سرعت لغزشی بر اساس ترم‌های عملیاتی واقعی توسط نرم‌افزار پیشنهاد گردید:

$$V_{slip} = -0.593 + 0.53805(af) + 0.1487(Q_c) + 0.071119(Q_d) - 0.1198(af \times Q_c) + 0.02593(af \times Q_d) - 0.00326(Q_c \times Q_d) + 0.01555(af^2) - 0.003896(Q_c^2) - 0.00935Q_d^2$$

با توجه به شکل (۱) بصورت چشمی می‌توان نتیجه گرفت باقیمانده‌ها نسبتاً از توزیع نرمال پیروی می‌کنند.

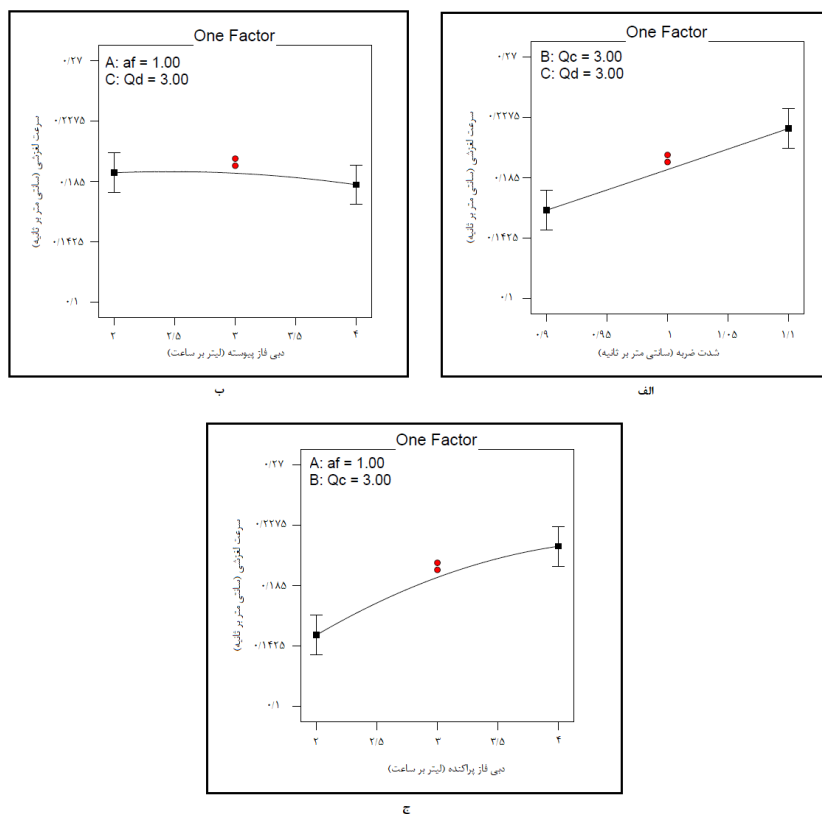


شکل ۱- نمودار بررسی فرض نرمال بودن داده‌ها برای پارامتر سرعت لغزشی

### ۲-۳- بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی (شدت ضربه، دبی فاز پیوسته و پراکنده) بر سرعت لغزشی

اثر پارامترهای عملیاتی ستون بر روی سرعت لغزشی در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲-الف، با افزایش شدت ضربه ( $af$ )، تنش برشی افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش شکست قطرات شده و در نتیجه سرعت نسبی بین فاز پیوسته و قطرات افزایش می‌یابد. بنابراین، با افزایش شدت ضربه روند افزایشی در سرعت لغزشی مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۲-ب، با افزایش دبی حجمی فاز پیوسته ( $Q_c$ )، افزایش ناچیزی در سرعت لغزشی مشاهده شد که دلیل آن می‌تواند اینگونه بیان شود که سرعت ظاهری فاز پیوسته با افزایش دبی فاز پیوسته نیز افزایش می‌یابد و از طرفی تراکم قطرات فاز پراکنده روند افزایش سرعت لغزشی را کاهش می‌دهد. همچنین از شکل ۲-ج می‌توان مشاهده کرد که افزایش در سرعت لغزشی با افزایش دبی فاز پراکنده ( $Q_d$ ) می‌تواند به این دلیل باشد که سرعت ظاهری فاز پراکنده افزایش می‌یابد.



شکل ۲- اثر تغییرات پارامترهای عملیاتی بر سرعت لغزشی

با توجه به شکل‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات شدت ضربه و دبی فاز پراکنده بر سرعت لغزشی نسبت به دبی فاز پیوسته از تاثیر بالاتری برخوردار می‌باشند.

### ۳- بهینه‌سازی مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار Design Expert

بهینه‌سازی مدل برای تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی سرعت لغزشی انجام پذیرفت و خطای مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل و مقادیر بدست آمده در آزمایش واقعی در جدول (۶) آورده شده است. می‌توان گفت، مدل ارائه شده بوسیله نرم‌افزار دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی سرعت لغزشی با مقادیر واقعی بدست آمده در ستون دارد.

جدول ۶- تعیین خطای مقادیر پیش‌بینی شده با مدل و مقادیر بدست آمده برای سرعت لغزشی در آزمایش

سرعت لغزشی (cm/sec)	دبی فاز پیوسته (l/h)	دبی فاز پراکنده (l/h)	شدت ضربه (cm/sec)
0.148963	واقعی		
0.150741	پیش‌بینی شده	۲	۱.۱
۱.۲	خطا (%)		

### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی پارامترهای عملیاتی ستون استخراج ضربه‌ای نوع سینی‌دار به منظور استخراج اورانیوم از محلول فروشویی بندرعباس با استخراج‌کننده آلومین ۳۳۶ بر پارامتر هیدرودینامیکی سرعت لغزشی به روش طراحی آزمایش انجام شد. نتایج بررسی پارامترهای عملیاتی نشان داد که با افزایش شدت ضربه و دبی فاز پراکنده، روند افزایشی در سرعت لغزشی مشاهده می‌گردد. همچنین به منظور پیش‌بینی پارامتر سرعت لغزشی در شرایط مورد بررسی بر حسب پارامترهای عملیاتی ستون رابطه تجربی توسط نرم‌افزار Design Expert ارائه گردید که این رابطه از صحت قابل ملاحظه‌ای برای برازش داده‌ها برخوردار می‌باشد.



#### ۵- مراجع

1. E. Bender, P. Berger, W. Leuckel, and D. Wolf, "studies on the operating characteristics of pulsed packed columns for Liquid-liquid extraction," Chem. Eng., vol. 21, pp. 29-38, 1981.
2. J. C. Godfrey and M. J. Slater, "Slip velocity relationships for liquid-liquid extraction columns," Trans IChemE, vol. 69, pp. 130-141, 1991.
3. A. Kumar and S. Hartland, Liquid- Liquid Extraction Equipment. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1994.
4. D. Venkatanarasaiah and Y. B. G. Varma, "Dispersed phase holdup and mass transfer in liquid pulsed column," Bioprocess Engineering, vol. 18, pp. 119-126, 1998.
5. M. Khajenoori, J. Safdari, A. Haghghi-Asl, and M. H. Mallah, "Slip and Characteristic Velocities in a Horizontal Pulsed-Plate Extraction Column," Chem. Eng. Technol., vol. 38, pp. 1783-1792, 2015.
6. D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
7. A. Ozer, G. Gurbuz, A. Calimli, and B. K. Kobahti, "Biosorption of copper(II) ions on Enteromorpha prolifera: application of response surface methodology (RSM)," Chem. Eng., vol. 146, pp. 373-387, 2009.