

ارائه یک رابطه تجربی برای ماکزیمم قطر ساطر قطره‌ها در یک ستون پاششی

*

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
^۲ دانشیار دانشکده مهندسی شیمی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
^۳ استاد دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(/ / / / / / / /)

چکیده

برای بررسی عوامل تأثیرگذار بر قطره‌ها و شناخت روابط بین این عوامل و قطره‌ها، یک سری آزمایش در یک ستون پاششی با جریان غیرهمسو و متشکل از دو سیستم شیمیایی مختلف انجام گرفت. توزیع‌کننده‌ها در این ستون پاششی از نوع مجموعه نازل‌ها (set of nozzles) هستند. پس از بررسی نقش عوامل مختلف بر اندازه قطره‌ها، توسط آخرین نسخه در دسترس نرم‌افزار Eviews، روابط متعددی تخمین زده شد و در نهایت از بین آنها بهترین رابطه برای ماکزیمم قطر ساطر قطره‌ها بر حسب اعداد بی‌بعد که کمترین خطا و بیشترین همپوشانی با داده‌های تجربی را داشتند، انتخاب شد. لازم به ذکر است که این اولین تحقیقی است که بر مدلسازی ماکزیمم قطر متوسط قطره‌ها در یک ستون پاششی انجام گرفته است. مقایسه رابطه نهایی و داده‌های تجربی نشان داده است که این رابطه، خطای حدود ۴/۲۲ درصد دارد که نشان از انطباق خوب داده‌های تجربی و رابطه مدل شده دارد.

واژه‌های کلیدی: استخراج مایع- مایع، ماکزیمم قطر ساطر قطره‌ها، مدلسازی، ستون پاششی

مقدمه

دهنده‌های ستونی هستند که به دلیل داشتن مزایای قابل توجه، مورد استفاده بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. در این ستون‌ها برای افزایش سطح تماس دو فاز و در نتیجه افزایش میزان انتقال جرم، فاز غیرپیوسته را به شکل قطره‌های کوچک، با استفاده از نازل یا صفحات سوراخدار، و بقیه فازها را به طور پیوسته وارد ستون می‌کنند [۹-۱۴]؛ اگر چه می‌توان با استفاده از عواملی چون ضربه، جهت اختلاط بیشتر دو فاز و پرکننده‌ها، برای افزایش بیشتر سطح انتقال جرم، به این فرآیند شدت بیشتری بخشید. محققان مختلف به بررسی نقش قطره‌ها در انواع ستون‌های استخراج دیگر از قبیل ستون‌های پرشده و ضربه‌ای نیز پرداخته‌اند [۱۴-۱۶].

البته محققان بسیاری نیز به بررسی عوامل هیدرودینامیکی مختلف و شناخت تأثیرات آنها بر ضرایب انتقال جرم به عنوان مهم‌ترین عامل در طراحی تجهیزات استخراج و سپس با استفاده از روش‌های ریاضی به مدلسازی این عامل مهم در انواع دستگاه‌های استخراج پرداخته‌اند [۱۷-۲۰]. با توجه به اینکه تماس بین فازها به

در استخراج مایع- مایع، یک خوراک مایع که باید اجزای آن از هم جدا شوند، با یک فاز مایع دیگر که حلال نامیده می‌شود در تماس قرار می‌گیرد. حلال با یکی یا شمار بیشتری از اجزای خوراک امتزاج ناپذیر است یا امتزاج پذیری اندکی دارد، اما به طور کامل یا جزئی با یکی یا شمار بیشتری از اجزای خوراک امتزاج‌پذیر است. از این رو، حلال که یک ماده یا مخلوط شیمیایی است، به طور جزئی اجزای خاصی از خوراک را در خود حل می‌کند و دست کم موجب جداسازی یک جزء خوراک مایع می‌شود [۱-۴].

برای جداسازی فاز پراکنده و حصول جداسازی مطلوب، از ستون‌های استخراج که نسبت به دیگر دستگاه‌های جداسازی مقرون به صرفه‌تر هستند، استفاده می‌شود. در ستون‌های استخراج، به طور معمول با دو فاز پیوسته و پراکنده سر و کار داریم و انتقال جرم می‌تواند نسبت به فرآیند مورد نظر از فاز پیوسته به پراکنده یا بر عکس باشد [۵-۸]. یکی از انواع مختلف ستون‌های استخراج، ستون‌های پاششی است که از ساده‌ترین تماس

آنها می‌توان به میزان همپوشانی تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل (R^2 آزمون و R^2_{adj}) و بررسی خودهمبستگی و همبستگی باقیمانده‌ها و متغیرهای مستقل (آزمون دوربین- واتسون) اشاره کرد.

دستگاه و مواد شیمیایی مورد استفاده

ستون پاششی مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس شیشه و به قطر ۱۵ و ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متر ساخته شده است که در قسمت پایین آن یک شیر تخلیه و یک ورودی برای اتصال توزیع‌کننده‌های مختلف برای ورود فاز پراکنده تعبیه شده است. توزیع‌کننده‌ها از نوع مجموعه نازل‌ها و از جنس شیشه (پیرکس) هستند. برای انجام آزمایش‌ها از توزیع‌کننده‌هایی با قطر داخلی ۱ و ۱/۳ میلی‌متر استفاده شده است. دبی حجمی فاز پراکنده توسط یک پمپ دیجیتالی قابل تنظیم است. برای عکسبرداری از قطره‌ها از دوربین عکاسی SONY مدل DSC-F828 استفاده شده است. این دوربین به گونه‌ای در کنار ستون نصب شد که بتواند از قسمت‌های مختلف برج عکسبرداری کند.

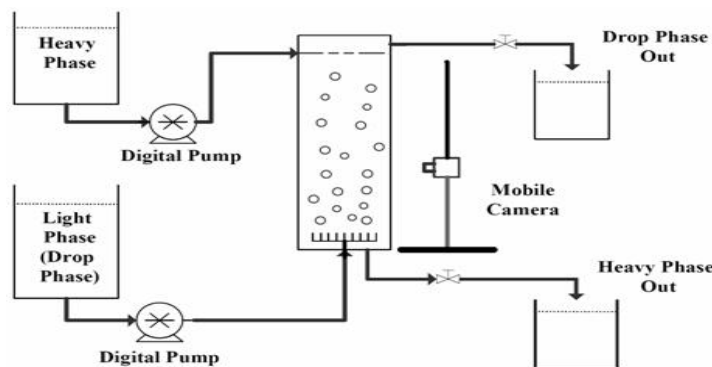
از دو سیستم شیمیایی تولوئن- آب- استن و نرمال بوتانل- آب- استن برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. همه مواد شیمیایی به کار گرفته شده در این تحقیق، محصول شرکت مرک (Merck) آلمان بوده و دارای درجه خلوص بالای ۹۹ درصد هستند. شمایی از دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها و همچنین خواص سیستم‌های شیمیایی مورد آزمایش، در واحد SI، به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) آورده شده است.

دلیل پراکنده شدن قطره‌ها انجام می‌گیرد، اطلاعات در ارتباط با پدیده‌های قطره‌ها حائز اهمیت خواهد بود. اغلب قطره‌ها بر سر نازل‌ها به شکل کروی رشد می‌کنند و با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده، شکل قطره‌ها به حالت بیضوی متقارن و در نهایت به حالت‌های نامنظم در می‌آید [۱۱ و ۱۲]. در ستون‌هایی که تعداد قطره‌ها زیاد است، به طور معمول با قطره‌هایی با قطرهای مختلف سر و کار خواهیم داشت. بنابراین لازم است قطر متوسط قطره‌ها (قطر حجمی- سطحی یا قطر ساتر) به دست آید. قطر متوسط قطره‌ها (قطر ساتر) توسط رابطه زیر به دست می‌آید.

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i d_i^2} \quad (1)$$

به طور کلی با داشتن اندازه قطره‌ها در شرایط عملیاتی مختلف می‌توان به کمک روش‌های موجود، یک مدل ریاضی مناسب برای محاسبه تغییرات قطر قطره‌ها ارائه کرد. بنابراین لزوم ساخت یک مدل آن است که علاوه بر پیروی از فرضیه‌های حاکم بر موضوع، فرض‌های اساسی مدلسازی را نیز به درستی رعایت کرده باشد. در این مقاله، مقادیر حداکثر قطر ساتر در هر آزمایش تعیین شده و سپس مقادیر متناظر با آنها برای عوامل دیگر به دست آمد. در نهایت رابطه‌ای برای پیش‌بینی حداکثر قطر ساتر قطره‌ها که در ستون‌های استخراج پاششی قابل استفاده باشد، ارائه شده است.

برای این منظور با استفاده از آخرین نسخه در دسترس نرم‌افزار Eviews [۲۱] مدلسازی انجام شد. سپس برای ارزیابی درستی آماری مدل از چند آزمون که در نرم‌افزار ذکر شده وجود دارد، استفاده شد که از میان



شکل ۱: نمای ساده‌ای از ستون پاششی مورد استفاده در آزمایش‌ها.

جدول ۱: خواص فیزیکی سیستم‌های شیمیایی مورد استفاده.

	ρ_c	ρ_d	μ_c	μ_d	σ	D_M
Butanol-Water	225.4E-05	995.9E-06	812.7	979.4	1.2E-03	4.56E-09
Toluene-Water	643.4E-06	930.7E-06	857.9	995.6	3.2E-03	2.27E-09

آزمایش‌های انجام شده

برای انجام هر آزمایش، ابتدا دو فاز پراکنده و پیوسته از یکدیگر به طور کامل اشباع شده و سپس ستون از فاز پیوسته پر می‌شود. به کمک پمپ، فاز پراکنده به داخل فاز پیوسته پمپاژ می‌شود. برای مدلسازی ماکزیم میانگین اندازه قطره‌ها، دو سری آزمایش انجام گرفته است و از نتایج این آزمایش‌ها روابط مورد نظر استخراج شده‌اند. سری اول آزمایش‌ها مربوط به سیستم شیمیایی بوتانول- آب است. قطر داخلی نازل برابر ۱ و ۱/۳ میلی‌متر بوده و در ۶ دبی حجمی مختلف فاز پراکنده و ۳ دبی حجمی مختلف فاز پیوسته، قطر متوسط قطره‌ها و سرعت حد به دست آمده‌اند. بدین ترتیب که در هر دبی حجمی توسط دوربین از قطره‌ها عکسبرداری شده و به کمک نرم‌افزار اتوکد^۱، اندازه قطره‌ها به دست آمده و به کمک رابطه (۱) قطر متوسط حجمی- سطحی محاسبه شده است. نمونه‌ای از عکس‌های گرفته شده توسط دوربین عکسبرداری در شکل (۲) آمده است.

رسیدن قطره به یک نقطه مشخص توسط کرومومتر اندازه-گیری شده و با داشتن طول طی شده توسط قطره و زمان آن، سرعت حد به دست آمده است. دقت اندازه‌گیری در مورد سرعت حد قطره برابر ۰/۰۱ است. به ازای هر قطر منفذ نازل تعداد ۱۸ آزمایش و در مجموع تعداد ۳۶ آزمایش در سری اول آزمایش‌ها انجام گرفته است.

در سری دوم آزمایش‌ها از سیستم شیمیایی تولوئن- آب استفاده شده است. قطر داخلی نازل برابر ۱ و ۱/۳ میلی‌متر بوده و در ۶ دبی حجمی مختلف فاز پراکنده و ۴ دبی حجمی مختلف فاز پیوسته، قطر متوسط قطره‌ها و سرعت حد به دست آمده‌اند. به ازای هر قطر نازل تعداد ۲۴ آزمایش و در مجموع تعداد ۴۸ آزمایش در سری دوم آزمایش‌ها انجام گرفته است. به ازای هر دبی حجمی فاز پیوسته، یک d_{32max} و یک u_T به دست آمد که مقادیر عوامل ذکر شده، به ترتیب بر حسب mm و cm/s، برای دو سیستم شیمیایی مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات آزمایش‌ها.

	$d_N = 1 \text{ mm}$		$d_N = 1.3 \text{ mm}$	
	d_{32max}	u_T	d_{32max}	u_T
Series 1	1.485	9.6	2.168	9.8
	1.843	10	4.989	16
	3.626	16.8	4.869	16.4
	2.327	10.6	4.361	12.3
Series 2	2.874	11.4	4.719	13
	3.944	14.8	4.966	13.7
	3.930	15.3	5.11	14.5

مدلسازی ماکزیم قطر ساتر قطره‌ها

در این کار تجربی، برای مدلسازی ماکزیم قطر متوسط قطره‌ها، از روش تحلیل ابعادی استفاده شده است.



شکل ۲: نمونه‌ای از عکس‌های گرفته شده از قطره‌ها.

لازم به ذکر است که دقت اندازه‌گیری توسط نرم افزار اتوکد برابر ۰/۰۰۰۱ سانتی‌متر یا ۰/۰۰۱ میلی‌متر است. همچنین سرعت حد قطره‌ها به این ترتیب اندازه‌گیری شده است که در فواصل مشخص از طول ستون، لحظه عبور قطره از فاصله ۱۰ سانتیمتری از بالای نازل تا

عوامل مؤثر بر قطر متوسط قطره عبارتند از کشش بین سطحی، سرعت حد قطره‌ها، دانسیته و ویسکوزیته هر دو فاز، قطر نازل و شتاب ثقل. به طور کلی رابطه زیر را می‌توان بین عوامل فوق بیان کرد:

$$f(d_{32\max}, \sigma, u_T, \rho_c, \rho_d, \Delta\rho, \mu_c, \mu_d, d_N, g) = 0 \quad (2)$$

این تابع ۱۰ متغیر دارد که می‌توان طبق قضیه π ، هفت گروه بدون بعد را در آن تعریف کرد:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0 \quad (3)$$

در نهایت به کمک آنالیز ابعادی می‌توان رابطه (۳) را به این ترتیب بیان کرد:

$$f(We, Re, Eo, \frac{d_{32\max}}{d_N}, \frac{\Delta\rho}{\rho_d}, \frac{\Delta\rho}{\rho_c}, \frac{\mu_d}{\mu_c}) = 0 \quad (4)$$

و در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\frac{d_{32\max}}{d_N} = kWe^a Re^b Eo^c \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_d}\right)^d \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^e \left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)^f \quad (5)$$

ضرایب ثابت k, a, b, c, d, e و f در حالت بهینه توسط روش‌های مختلف قابل محاسبه هستند. این مدل با تکیه بر مبانی آماری قوی به عنوان یکی از مناسبترین روش‌ها برای پیش‌بینی $d_{32\max}/d_N$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این مدل مبتنی بر متغیرهای بدون بعد نظیر We, Re, Eo و به پیش‌بینی عوامل $d_{32\max}$ می‌پردازد. در این مقاله، رفتار تابعی بین $d_{32\max}/d_N$ و متغیرهای مستقل بر اساس تحلیل رگرسیونی داده‌های سری زمانی و تئوری‌های علمی به دست آمده است.

همچنین نتایج بررسی‌ها بر روابط ریاضی استخراج‌شده از نرم‌افزار نشان می‌دهد که میزان تأثیر عوامل $(\frac{\mu_d}{\mu_c})$ ، $(\frac{\Delta\rho}{\rho_c})$ و $(\frac{\Delta\rho}{\rho_d})$ در تهیه مدل نهایی ناچیز بوده و حتی باعث افزایش میزان خطای مدل نیز می‌شوند. بنابراین این متغیرها در شکل کلی مدل نهایی وجود نداشته و حذف شده‌اند. در نتیجه رابطه‌ای برای $d_{32\max}$ و اعداد بدون بعد Reynolds، Weber و Eotvos به دست آمده است که شکل کلی آن به این

ترتیب است:

$$\frac{d_{32\max}}{d_N} = kWe^a Re^b Eo^c \quad (6)$$

طبق تعریف، اعداد بدون بعد استفاده شده عبارتند از:

$$We = \frac{\Delta\rho u_T^2 d_N}{\sigma_d} \quad (7)$$

$$Re = \frac{\Delta\rho u_T d_N}{\mu_d} \quad (8)$$

$$Eo = \frac{\Delta\rho g d_N^2}{\sigma_d} \quad (9)$$

با توجه به رابطه (۶) در می‌یابیم که تعداد هفت رابطه مستقل برای $d_{32\max}/d_N$ قابل بررسی است. مدلسازی داده‌ها به وسیله نرم‌افزار Eviews انجام شده و خروجی نرم‌افزار در هر هفت حالت قابل دسترسی است. لازم به ذکر است که دلیل بررسی هر گونه احتمال درباره شکل نهایی رابطه (۶) که شامل مقادیر عددی توان‌ها است، این است که در صورت امکان به رابطه‌ای کوتاه و در عین حال دقیق برای پیش‌بینی ماکزیمم میانگین اندازه قطره‌ها دست یابیم؛ زیرا در این صورت، از محاسبات وقتگیر و گاهی خطاساز برای جایگذاری و تخمین عوامل، بی‌نیاز خواهیم شد.

از طرفی می‌دانیم هر چه تعداد عوامل مستقل موجود در رابطه مدل‌شده بیشتر شود، دقت رابطه مورد نظر بیشتر می‌شود. بنابراین به عنوان اولین سعی، شکل کامل رابطه (۶) بررسی شد. در واقع خروجی نرم‌افزار در این حالت، بررسی ما را به سمت سعی بعدی پیش می‌برد. جدول (۳) همه حالت‌های محتمل برای رابطه (۶) را نشان می‌دهد. در ادامه، به تفصیل درباره روابط به دست آمده از مدلسازی داده‌ها خواهیم پرداخت.

از نقطه نظر آماری، رابطه‌ای ارزشمند است که عامل مدل‌شده را با حداقل خطا پیش‌بینی کرده و ضرایب موجود در آن به بهترین نحو بهینه شده باشند. برای این هدف، آزمون‌های مختلفی روی هر رابطه انجام گرفت که توضیحات لازم در مورد هر یک از آنها داده شده و نتایج آن در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول ۳: روابط به دست آمده از مدلسازی رابطه (۶).

No.	Correlation	R- Squared(R ²)	Adjusted R ²	Durbin-Watson Statistics
1	$\frac{d_{32max}}{d_N} = 1.026 We^{0.487} Re^{0.445} Eo^{-0.298}$	0.98	0.97	2.34
2	$\frac{d_{32max}}{d_N} = 1.078 We^{0.299} Re^{0.544}$	0.90	0.89	1.73
3	$\frac{d_{32max}}{d_N} = 2.079 We^{0.549} Eo^{-0.621}$	0.64	0.58	0.78
4	$\frac{d_{32max}}{d_N} = 1.139 Re^{0.512} Eo^{0.226}$	0.64	0.58	0.62
5	$\frac{d_{32max}}{d_N} = 3.735 We^{0.087}$	0.05	-0.03	0.14
6	$\frac{d_{32max}}{d_N} = 1.084 Re^{0.349}$	0.52	0.48	0.27
7	$\frac{d_{32max}}{d_N} = 2.361 Eo^{-0.118}$	0.07	0	0.14

در مورد آزمون R_{adj}^2 در می‌یابیم که چهار رابطه اول، به ترتیب مقادیر قابل قبولی دارند.

یکی از آزمون‌های مهمی که روی رابطه ریاضی به دست آمده بررسی شده است، آزمون دوربین- واتسون^۴ است. این آزمون متداول‌ترین روش برای تشخیص خودهمبستگی باقیمانده‌ها است. پس از تعیین رابطه توسط نرم‌افزار Eviwes، نتیجه این آزمون بر اساس یک آماره گزارش می‌شود. هر چه مقدار این آماره بزرگ‌تر از $1/0$ باشد، احتمال وجود خودهمبستگی باقیمانده‌ها کاهش می‌یابد.

آزمون خودهمبستگی باقیمانده‌ها یا آزمون دوربین- واتسون یکی از آزمون‌هایی است که می‌تواند در انتخاب بهترین رابطه به ما کمک کند. طبق تعریف نرم-افزار، رابطه‌ای از نقطه نظر این آزمون قابل قبول است که مقدار این عامل در آن، بالاتر از یک باشد. مقادیر بالای $1/2$ نشان‌دهنده خودهمبستگی خوب و مقادیر بالاتر از $1/7$ نشان‌دهنده خودهمبستگی عالی باقیمانده‌ها در مورد رابطه موردنظر است. همان طور که از جدول (۳) برمی‌آید، تنها دو رابطه اولی از این منظر قابل قبول بوده و دارای خودهمبستگی بسیار خوب بین باقیمانده‌ها هستند. همچنین برای بررسی دقیق‌تر رابطه به دست آمده، مقدار درصد خطای مطلق متوسط نسبی (AARD%) به کمک رابطه زیر تعیین شد.

یکی از معیارهای خوب و با ارزشی که برای برازش و مقایسه اعتبار نتایج الگوهای رگرسیونی دارای متغیرهای مستقل به کار می‌رود، عامل R^2 است. با داشتن این عامل می‌توان تعیین کرد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده شده است. در حالت کلی، مقدار این عامل بین صفر و یک قرار دارد و هر چه به یک نزدیکتر باشد، مطلوبتر خواهد بود.

هنگامی که تعداد متغیرهای مستقل افزایش پیدا کند، مقدار ضریب R^2 افزایش پیدا می‌کند و هر چه R^2 افزایش می‌یابد، مقدار واریانس بزرگ‌تر می‌شود و این مطلوب نیست. اما با استفاده از R_{adj}^2 به جای انحراف‌ها، واریانس‌ها در محاسبه میزان انطباق مدل و نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از رشد کاذب R^2 جلوگیری می‌شود.

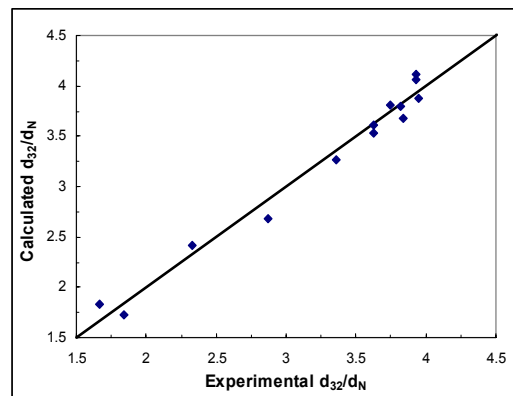
همان طور که می‌دانیم با نزدیک شدن مقدار R^2 به یک، می‌توان گفت متغیرهای مستقل به نحو مطلوبی تغییرات متغیر وابسته را بیان می‌کنند. طبق استاندارد نرم‌افزار، $R^2 > 0/4$ قابل قبول، $R^2 > 0/94$ خوب و $R^2 > 0/97$ برای ارزیابی میزان همپوشانی تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل، عالی است. طبق جدول (۳) می‌توان دریافت که غیر از روابط (۵) و (۷)، بقیه روابط از نقطه نظر این آزمون قابل قبول بوده و روابط (۱) و (۲) رتبه بالایی دارند. از طرفی با مقایسه روابط به دست آمده

$$AARD\% = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \left| \frac{d_{32max,actual_i} - d_{32max,model_i}}{d_{32max,actual_i}} \right| \right) \times 100 \quad (10)$$

در حالت کلی، رابطه‌ای می‌تواند قابل قبول باشد که عامل مورد نظر را با درصد خطای (AARD%) کمتر از ۱۰ پیش‌بینی کند. مقادیر درصد خطای مطلق متوسط نسبی (AARD%) برای روابط ارائه‌شده در جدول (۳) در جدول (۴) گزارش شده‌اند. در ضمن شکل (۳) میزان انطباق داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از رابطه (۱) جدول (۳) را برای ماکزیمم قطر متوسط قطره‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقادیر درصد خطای روابط بدست آمده.

Correlation No.	AARD%	Correlation No.	AARD%
1	4.22	5	30.74
2	8.31	6	19.21
3	17.99	7	31.59
4	16.80		



شکل ۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از رابطه (۱) برای d_{32max} .

بحث و نتیجه‌گیری

همان طور که در بخش قبل مشاهده شد، در مجموع هفت رابطه برای پیش‌بینی ماکزیمم میانگین قطر قطره‌ها، d_{32max} ، محتمل بود که این روابط توسط نرم‌افزار Eviews مدل شده و از نقطه نظر آماری مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. در تشکیل همه روابط، رابطه (۶) به عنوان مبنا قرار گرفت و حالات مختلف آن بررسی شد.

آزمون‌های انجام‌گرفته توسط نرم‌افزار برای درک هر چه بیشتر درستی و اطمینان روابط ارائه‌شده، همگی

در بخش قبلی معرفی شده و مقادیر حاصل از آنها در جدول (۳) آمده است. همچنین تحلیل مختصری از مقادیر به دست آمده از آزمون‌های ذکرشده، برای مقایسه روابط ارائه‌شده نیز به عمل آمد.

در نهایت، میزان AARD% در مورد روابط به دست آمده، محاسبه شده و در جدول (۴) مرتب شد. همان طور که ذکر شد، به طور معمول روابط دارای خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد را از نظر دقت قابل قبول می‌دانند و در تعیین متغیر وابسته مورد نظر به کار می‌برند. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که مقدار این عامل به جز در مورد دو رابطه اولی، در بقیه روابط بیشتر از ۱۰ بوده و در نتیجه آنها را غیر قابل اعتماد می‌نماید. کمترین درصد خطا متعلق به رابطه اول بوده و برابر $\frac{4}{22}$ است که نشان از دقت بسیار بالای این رابطه و هم‌پوشانی بسیار خوب آن با نتایج آزمایشگاهی دارد.

پس از بررسی‌های همه‌جانبه در مورد حالات مختلف رابطه (۶) به این نتیجه رسیدیم که شکل کامل این رابطه، بهترین و دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی حداکثر قطر متوسط قطره‌ها در ستون پاششی مورد نظر است. البته با حذف عدد بدون بعد Eo از این رابطه، به رابطه دیگری دست یافتیم که آن هم دقت بالایی داشته و می‌تواند با خطای حدود ۸ درصد، مقادیر d_{32max} را نتیجه دهد. با این کار به این نتیجه نیز رسیدیم که میزان تأثیر اعداد بدون بعد We و Re نسبت به Eo در ستون پاششی بیشتر بوده و طبق جداول (۳) و (۴) به میزان بیشتری عوامل ارزیابی مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از طرفی، با توجه به توان‌های اعداد بدون بعد که در رابطه (۱) جدول (۳) هست، می‌توان حساسیت قطر متوسط حجمی-سطحی را نسبت به عوامل تشکیل‌دهنده این اعداد بدون بعد، بررسی کرد.

با توجه به توان‌های اعداد بدون بعد رابطه (۱) جدول (۳)، می‌توان دریافت سرعت حد قطره‌ها با توان $\frac{1}{419}$ بیشترین تأثیر را بر قطر ساتر قطره‌ها دارد. این توان نشان از رابطه مستقیم این عامل با قطر متوسط حجمی-سطحی قطره‌ها دارد. اختلاف دانسیته از نظر تأثیر در درجه دوم، با توان $\frac{0}{634}$ ، قرار دارد. ویسکوزیته فاز پراکنده، قطر نازل و شتاب ثقل به ترتیب دارای بیشترین تأثیر منفی بوده و در نهایت، کمترین تأثیر مربوط به کشش سطحی فاز پراکنده را دارد.

فهرست علائم

حروف لاتین

n_i : تعداد قطره‌ها با قطر d_i

d_i : قطر قطره i ام

N : تعداد کل قطره‌ها

d_{32} : قطر متوسط حجمی-سطحی

D_M : ضریب نفوذ فاز قطره

u_T : سرعت حد قطره‌ها

d_N : قطر نازل

g : شتاب جاذبه

Re: عدد رینولدز

Eo : عدد ایوتوس

We : عدد وبر

حروف یونانی

μ_d : ویسکوزیته فاز پراکنده

μ_c : ویسکوزیته فاز پیوسته

ρ_d : دانسیته فاز پراکنده

ρ_c : دانسیته فاز پیوسته

σ : کشش سطحی فاز پراکنده

$\Delta\rho$: اختلاف دانسیته دو فاز

مراجع

- 1- Thornton, J. D. (1992). *Science and practice of liquid-liquid extraction*. Ed. Oxford University Press, Oxford.
- 2- Godfrey, J. C. and Slater, M. J. (1994). *Liquid-liquid extraction equipment*. Eds. J. Wiley and Sons, Chichester.
- 3- Steiner, L. and Hartland, S. (1983). "Unsteady state extraction." *Handbook of Solvent Extraction*. John Wiley and Sons Inc., PP. 249-264.
- 4- Robbins, L. A. and Cussack, R. W. (1997). *Liquid-liquid extraction, operations and equipment*. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th. Ed. Section 15, McGraw-Hill, New York.
- 5- Bart, H. J. (2005). "Extraction columns in hydrometallurgy." *Hydrometallurgy*, Vol. 78, PP. 21-29.
- 6- Mohanty, S. (2000). "Modeling of liquid-liquid extraction column: A review." *Reviews in Chem. Eng.*, Vol. 16, No. 3, PP. 199-248.
- 7- Tang, X., Luo, G., Li, H. and Wang, J. (2006). "A dynamic interaction mass transfer model for simulating the mass transfer process in extraction columns." *Computers and Chem. Eng.*, Vol. 30, PP. 978-988.
- 8- Housseine, A., Menai, A. H., Lehocine, M. B. and Bart, H. J. (2005). "Comparison of the influence of drop coalescence and break-up models. Assessment for different types of extraction columns." *Chem. Eng. Technol.*, Vol. 28, PP. 552-560.
- 9- Chen, L. H. and Lee, Y. L. (1999). "The effects of a surfactant on the mass transfer in spray-tower extraction column." *Chem. Eng. J.*, Vol. 73, No. 1, PP. 77-81.
- 10- Steiner, L., Horvath, M. and Hartland, S. (1978). "Mass transfer between two liquid phases in a spray column at the unsteady state." *Ind. and Eng. Chem. Process Design and Development*, Vol. 17, PP. 175-182.
- 11- McCreery, G. E. and Stoots, C. M. (1996). "Drop formation mechanisms and size distributions from spray plate nozzles." *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 3, PP. 431-452.
- 12- Sudheer, K. P. and Panda, R. K. (2000). "Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles." *Agricultural Water Management*, Vol. 45, No. 2, PP. 159-167.
- 13- Ettouney, R. S., El-Rifai, M. A. and Ghallab, A. O. (2007). "Steady state modeling of perforated plate extraction columns." *Chem. Eng. and Processing*, Vol. 46, PP. 713-720.

-
- 14- Lim, J. S., Lee, Y. W., Kim, J. D., Lee, Y. Y. and Chen, H. S. (1995). "Mass-transfer and hydraulic characteristics in spray and packed extraction columns for supercritical carbon-ethanol-water system." *J. of Supercritical Fluids*, Vol. 8, No. 2, PP. 127-137.
 - 15- Morales, C., Elman, H. and Perez, A. (2007). "Modeling and simulation of a liquid extraction column with structured packing." *Computers and Chem. Eng.*, Vol. 31, PP. 1694-1701.
 - 16- Tang, X. J., Luo, G. S., Li, H. B. and Wang, J. D. (2004). "Two-phase flow characteristics in a coalescence-dispersion pulsed-sieve-plate extraction column." *Chinese J. of Chem. Eng.*, Vol. 12, PP. 1-6.
 - 17- Attarakih, M. M., Bart, H. J. and Faqir, N. M. (2006). "Numerical solution of the bivariate population balance equation for the interacting hydrodynamics and mass transfer in liquid-liquid extraction columns." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 61, No. 1, PP. 113-123.
 - 18- Zhang, S. H., Yu, S. C., Zhou, Y. C. and Su, Y. F. (1985). "A model for liquid-liquid extraction column performance-the influence of drop size distribution on extraction efficiency." *Canadian J. of Chem. Eng.*, Vol. 63, PP. 212-226.
 - 19- Tang, X. J., Luo, G. S., Li, H. B. and Wang, J. D. (2005). "An improved dynamic combined model for evaluating the mass transfer performances in extraction columns." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 60, PP. 4409-4421.
 - 20- Tang, X. J., Luo, G. S., Li, H. B. and Wang, J. D. (2006). "A dynamic interaction mass transfer model for simulating the mass transfer process in extraction columns." *Computers and Chem. Eng.*, Vol. 30, PP. 978-988.
 - 21-Quantitative Micro Software LLC. (2002). *EViews 4 User's Guide*, ISBN 1-880411-28-8.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن:

- 1- AutoCAD
- 2- R- Squared
- 3- Adjusted R-Squared
- 4- Durbin - Watson Test