

مدل‌های تخمین سطح تماس مؤثر در آکنه‌های ساختاریافته و مقایسه عملکرد آن‌ها

پریسا دانشگر^۱، مرتضی زیودار^{۲*}، رهبر رحیمی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۲ استاد گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

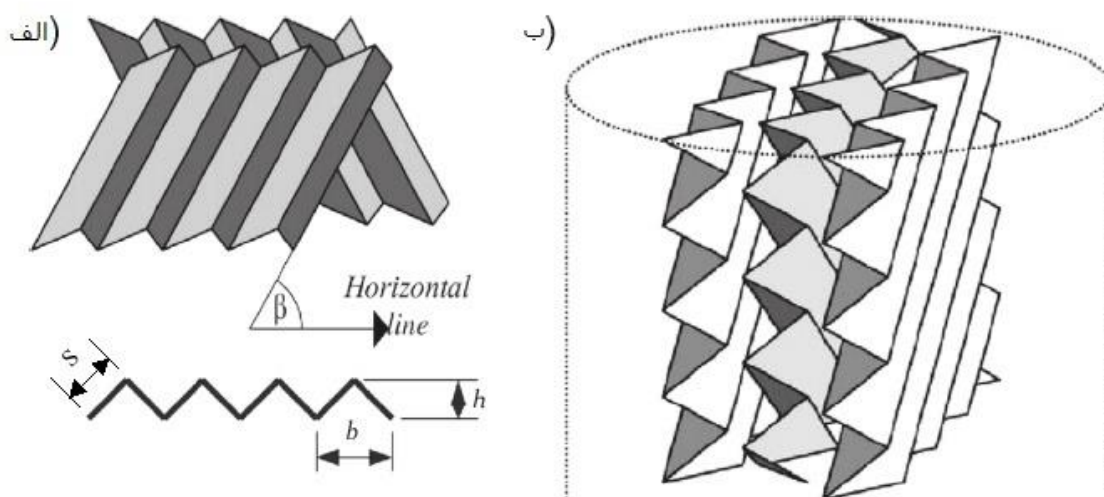
چکیده

آکنه‌های ساختاریافته با داشتن سطح تماس بالا در فرآیندهای انتقال جرم نظیر تقطیر، کاربرد وسیعی دارند. سطح تماس مشترک مؤثر پارامتر مهمی در تعیین بازده انتقال جرم و متفاوت از سطح هندسی آکنه است. در این پژوهش مدل‌های موجود برای پیش‌بینی سطح مؤثر در آکنه‌های ساختاریافته نظیر مدل ونگ، گوالیتو، اولیجیک و برونازی مورد بررسی و دقت آن‌ها در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی آکنه Mellapak 250Y، با تغییر پارامترهای فشار عملیاتی، کشش سطحی سیستم، برحسب دبی گاز و مایع مورد سنجش قرار گرفته است. مدل‌های ونگ و گوالیتو با تغییر فشار، خطای کم‌تری در مقایسه با سایر مدل‌ها داشته‌اند، خطای نسبی متوسط برای این دو مدل به ترتیب برابر ۳۱٪ و ۴۴٪ است. بنابراین به دلیل بالا بودن خطاها استفاده از این مدل‌ها توصیه نمی‌گردد. کم‌ترین خطای نسبی متوسط با تغییر کشش سطحی توسط مدل‌های برونازی و اولیجیک به دست آمده‌اند که به ترتیب برابر ۸٪ و ۷٪ است. نتایج این تحقیق می‌تواند در جهت‌گیری‌های آینده به منظور انتخاب مدل مناسب جهت محاسبه سطح مؤثر استفاده شود.

کلمات کلیدی: آکنه ساختاریافته، سطح مشترک مؤثر، فشار، کشش سطحی، Mellapak- 250Y.

۱- مقدمه

آکنه‌های ساختاریافته به‌طور گسترده در بسیاری از صنایع شیمیایی، به‌ویژه تقطیر و استخراج استفاده می‌شوند [۱]. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است؛ این آکنه‌ها از ورقه‌های فلزی موج‌دار ساخته شده‌اند که با کانال‌های خلاف جهت، کنار هم قرار می‌گیرند. کانال‌ها معمولاً با یک زاویه $\pm\beta$ نسبت به افق قرار می‌گیرند. آکنه‌های ۴۵ درجه در برج‌های گاز-مایع برای جداسازی متداول‌ترند، درحالی‌که آکنه‌های ۶۰ درجه به‌منظور افزایش ظرفیت ساخته شده‌اند و از بازده انتقال جرم کم‌تری نسبت به نوع ۴۵ درجه برخوردارند [۲].



شکل ۱- (الف) ورق موج‌دار آکنه، (ب) هندسه آکنه ساختاریافته [۱]

سطح مشترک پارامتر مهمی است که در بازده انتقال جرم تأثیر بسزایی دارد. تا آنجا که به برج‌های پر شده مربوط است، چندین تعریف در مورد سطح مشترک وجود دارد. دانستن مقدار سطح تر شده برای ملاحظات اساسی جریان دوفازی در آکنه ضروری است [۳]. سطح تر شده تقریباً مرتبط با سطح مشترک انتقال جرم تحت شرایط خاصی از جریان است زیرا تنها سطح تر شده می‌تواند برای انتقال جرم مؤثر باشد، ولی در اصل اختلاف میان سطح تر شده و سطح مشترک مؤثر، مساحت تر شده‌ای است که مایع در نواحی ساکن و نواحی مشترک مؤثر نظیر قطرات و افشانه‌ها قرار می‌گیرد. باوجود این اختلاف‌ها هر دو مساحت تر شده و مساحت مشترک مؤثر یکسان در نظر گرفته می‌شوند [۴].

در این مقاله سعی شده است، با بررسی مدل‌های سطح مشترک مؤثر در برج‌های آکنده و آکنه‌های ساختاریافته، معادلات و همچنین پارامترهای مربوط به مدل‌ها، مقایسه‌ای میان مقادیر پیش‌گویی شده و مقادیر تجربی ارائه گردد. این مهم باهدف دستیابی به بهترین انتخاب، جهت ارزیابی پارامتر سطح مؤثر آکنه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل‌های سطح مؤثر

برای نخستین بار اوندا^۱ و همکاران، در سال ۱۹۶۸ رابطه‌ای برای پیش‌بینی سطح مؤثر آکنه‌های نامنظم ارائه کردند که برای آکنه‌های ساختاریافته نیز مورد استفاده قرار گرفت. اساس این مدل بر مبنای مطالعات هیدرودینامیک و

¹ Kakusaburo Onda

خصوصیات فیزیکی مایع است. این مدل برای آکنه‌هایی نظیر حلقه راشیگ^۲، برل زین اسبی^۳، کره‌ای^۴ و حلقه پال^۵ به‌دست آمده و برای آکنه‌های نامنظم جدید کاربردی نیست. آن‌ها با فرض یکسان بودن سطح تر شونده با سطح مشترک گاز-مایع رابطه‌ای برای محاسبه ضرایب انتقال جرم گاز و مایع ارائه کردند [۵ و ۳]. در سال ۲۰۱۱ ولنز^۶ و همکاران مقایسه‌ای را بین مدل‌های سطح مؤثر برای آکنه‌های Mellapak Y سری ۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۲، ۵۰۰ انجام دادند [۱۸]. در سال ۲۰۲۱ فلاگیلو^۷ و همکاران مقاله‌ای ارائه کردند که جدیدترین مدل سطح مؤثر مدل هانلی و چن^۸ مربوط به سال ۲۰۱۲ است [۱۹]. با توجه به جستجوی انجام شده در تحقیقات مشابه، مدل جدیدتری تاکنون ارائه نشده است.

در میان مدل‌های موجود در مقالات برای آکنه‌های ساختاریافته مدل پیشنهادی شی^۹ و مرسمن^{۱۰} بر مبنای فرض جریان مایع به شکل آبراهه‌های یکنواخت بر روی سطح تخت شیب‌دار نسبت به افق، که تاندازه‌ای سطح آکنه تر می‌شود، بیان شده است. آبراهه، فیلم نازکی است که پهنای آن توسط تجهیزات تعیین نمی‌شود. اندازه آبراهه (پهنا و ضخامت) توسط روش‌های تئوری برای به‌دست آوردن مساحت تر شده محاسبه می‌شود [۳].

گزیده‌ای از روابط منتشر شده در مقالات، برای سطح مؤثر که در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است در جدول ۱ گردآوری شده است. انتخاب مدل‌ها بر اساس در دسترس بودن پارامترها بوده است.

جدول ۱- مدل‌های مربوط به سطح مشترک مؤثر در آکنه‌های ساختاریافته

مدل	رابطه
Onda et al. [۵] - 1968	$\frac{a_e}{a_p} = 1 - \exp \left[-1.45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right)^{0.75} \text{Re}_L^{0.1} \text{Fr}_L^{-0.05} \text{We}_L^{0.2} \right] \quad (۱)$
Shi and Mersmann [۳] - 1958	$\frac{a_e}{a_p} = \frac{0.76 m d_{pe}^{1.1} u_L^{0.4} v_L^{0.2}}{1 - 0.93 \cos \gamma} \left(\frac{\rho_L}{\sigma_L g} \right)^{0.15} \frac{a_p^{0.2}}{\varepsilon^{0.6}} \quad (۲)$
Billet and Schultes [۷]-1993	$\frac{a_e}{a_p} = 3\varepsilon^{0.5} \left(\frac{\rho_L u_L}{\mu_L a_p} \right)^{-0.2} \left(\frac{\rho_L u_L^2}{a_p \sigma_L} \right)^{0.75} \left(\frac{u_L^2 a_p}{g} \right)^{-0.45} \quad (۳)$
Brito et al. [۸]-1994	$\frac{a_e}{a_p} = 0.465 \left(\frac{\rho_L u_L}{\mu_L a_p} \right)^{0.3} \quad (۴)$

² Rashig Ring

³ Berl Saddle

⁴ Sphere

⁵ Pall Ring

⁶ L. Valenz

⁷ Domenico Flagiello

⁸ Hanley and Chen

⁹ Shi

¹⁰ Merssmann



Brunazzi et al. [۹]-1995	$\frac{a_e}{a_p} = \frac{d_{eq}}{4} \left(\frac{h_L}{\varepsilon} \right)^{1.5} \left[\frac{\rho_L g \varepsilon (\sin \alpha)^2}{3 \mu_L u_L} \right]^{0.5}$	(۵)
Rocha et al. [۶] -1996	$\frac{a_e}{a_p} = F_{se} \frac{29.12 u_L^{0.4} \nu_L^{0.2} s^{0.159} [\rho_L / \sigma_L g]^{0.15}}{(1 - 0.93 \cos \gamma)(\sin \alpha)^{0.3} \varepsilon^{0.6}},$ $\frac{a_e}{a_p} = \left[1 - 1.203 \left(\frac{u_L^2}{sg} \right)^{0.111} \right]$	برای آکنه ورقه‌ای (۱-۶) برای آکنه توری شکل (۲-۶)
Gualito et al. [۱۰] -1997	$\frac{a_e}{a_p} = \left(\frac{a_e}{a_p} \right)_{Rocha} \left[\frac{1.2}{1 + 0.2 \exp(15 u_L / u_G)} \right]$	(۷)
Olujic et al. [۱۱] -1997	$\frac{a_e}{a_p} = \frac{1 - \Omega}{1 + 2.143 \times 10^{-6} / u_L^{1.5}}$	(۸)
Siminiceanu et al. [۱۲] - 2002	$\frac{a_e}{a_p} = 0.1245 \left[\frac{6 \rho_L u_L (1 - \varepsilon)}{\mu_L a_p} \right]^{0.4}$	(۹)
Olujic (modified) [۱۳] - 2002	$\frac{a_e}{a_p} = \left(\frac{a_e}{a_p} \right)_{Onda} (1 - \Omega) \left(\frac{\sin 45}{\sin \alpha_{L,e}} \right)^n,$ $n = \left(1 - \frac{a_p}{250} \right) \left(1 - \frac{\alpha_{L,e}}{45} \right) + \ln \left(\frac{a_{e,Onda}}{250} \right) + \left(0.49 - \sqrt{\frac{0.101}{P}} \right) \left(1.2 - \frac{\alpha_{L,e}}{45} \right),$ $\alpha_{L,e} = \arctan \left(\frac{\cos(90 - \alpha)}{\sin(90 - \alpha) \cos \left[\arctan \left(\frac{b}{2h} \right) \right]} \right)$	(۱۰)
Wang et al. [۱۴] - 2006	$a_e = a_{e,Rocha} \times 0.17 \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.6} \exp \left(-\frac{0.15}{u_G} \right)$	(۱۱)
Tsai et al. [۱۵] - 2009	$\frac{a_e}{a_p} = 1.362 \left[We_L (Fr_L)^{-\frac{1}{3}} \right]^{0.122}$	(۱۲)

۳- مقایسه میان مدل‌های سطح مؤثر

مقایسه میان مدل‌ها شامل بررسی عملکرد آن‌ها با تغییرات فشار و کشش سطحی است. به منظور ارزیابی مدل‌های موجود برای پیش‌گویی سطح مشترک، از نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده توسط شرکت FRI [۱۶]، که ونگ^{۱۱} و همکاران [۱۴] برای به‌دست آوردن مدل خود از آن بهره بردند و همچنین یافته‌های تجربی سای^{۱۲} و همکاران [۱۷]، که اثر تغییر کشش سطحی را بررسی کردند، استفاده شده است. مشخصات آکنه بررسی شده در جدول ۲ آمده است.

^{۱۱} G.Q. Wang

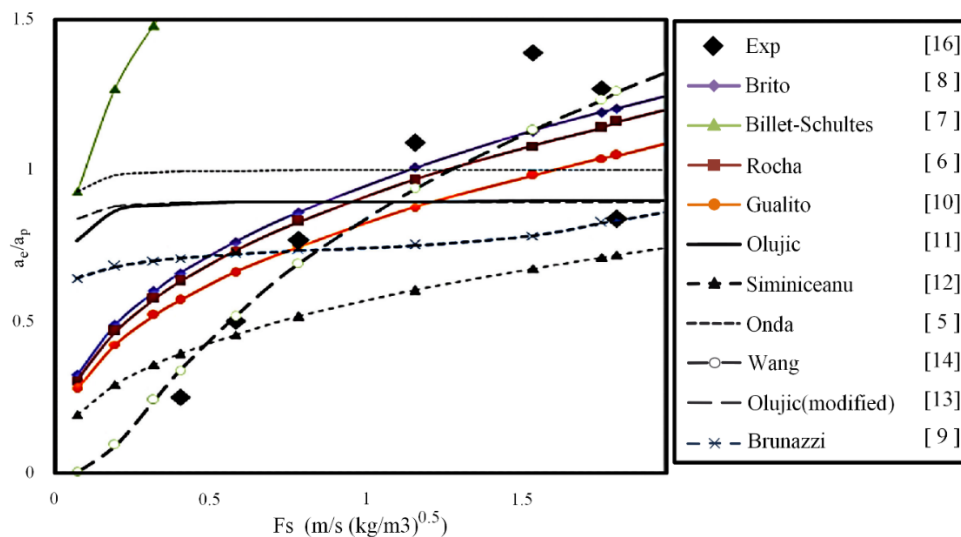
^{۱۲} Robert E. Tsai

جدول ۲- مشخصات هندسی آکنه

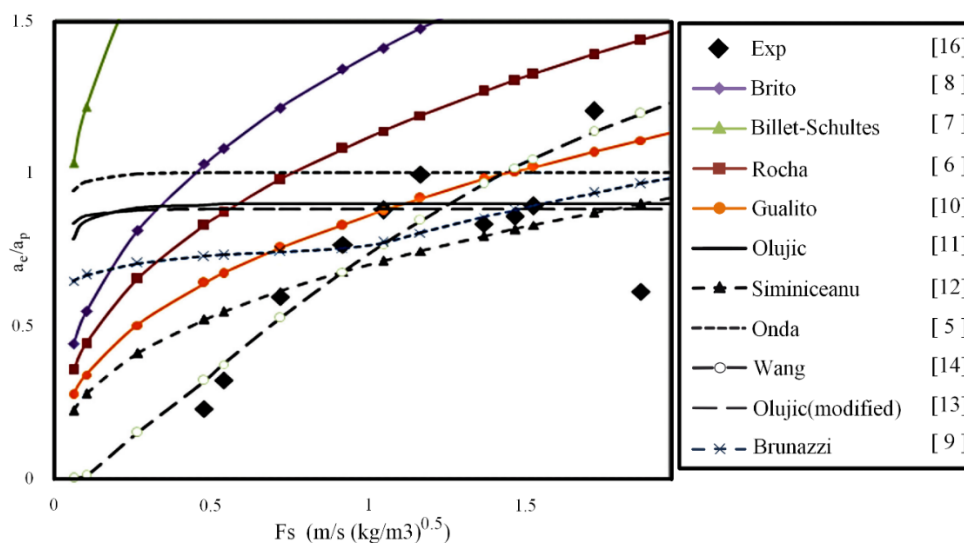
نوع آکنه	سطح ویژه (m ² /m ³)	تخلخل (%)	زاویه کانال (°)	ابعاد کانال (m)		
				S	b	h
Mellapak 250Y	۲۵۰	۹۵	۴۵	۰/۰۱۷	۰/۰۲۴۱	۰/۰۱۹

۳-۱- فشار

به منظور ارزیابی، داده‌های به دست آمده از شرکت FRI [۱۶]، که در یک برج تحقیقاتی در مقیاس تجاری با قطر m ۱/۲ و ارتفاع بستر m ۳/۷۸ از آکنه Mellapak 250Y و محدوده فشار عملیاتی ۶/۹-۲۷/۶ bar به دست آمده و توسط ونگ و همکاران [۱۴]، به کار گرفته شده، استفاده شده است. سیستم مورد آزمایش مخلوط ایزوبوتان/نرمال بوتان است. نتایج مقایسه میان مدل‌ها و داده‌های تجربی بر اساس سطح مؤثر آکنه برحسب فاکتور جریان^{۱۳} در شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

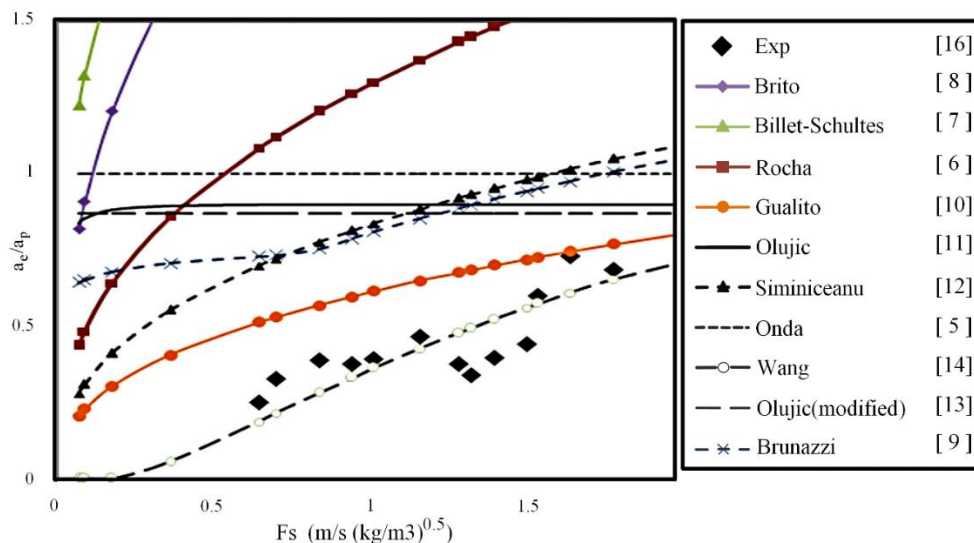


شکل ۲- مقایسه مدل‌های سطح مؤثر با نتایج تجربی در فشار ۶/۹ بار

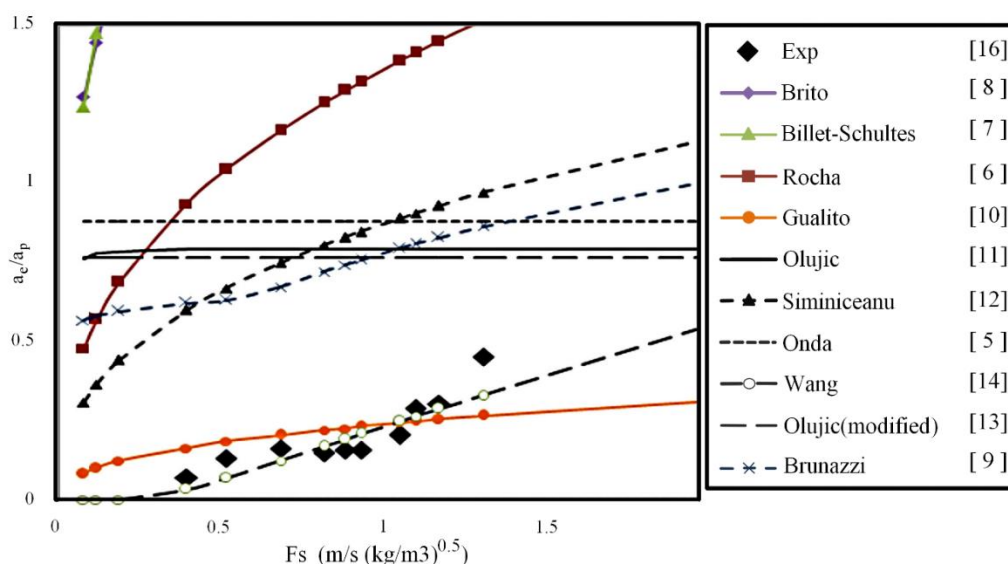


شکل ۳- مقایسه مدل‌های سطح مؤثر با نتایج تجربی در فشار ۱۱/۴ بار

¹³ $F_s = u_s \times \sqrt{\rho}$



شکل ۴- مقایسه مدل‌های سطح مؤثر با نتایج تجربی در فشار ۲۰/۷ بار



شکل ۵- مقایسه مدل‌های سطح مؤثر با نتایج تجربی در فشار ۲۷/۶ بار

همان‌گونه که در شکل‌های ۲ تا ۵ مشاهده شد، سطح مشترک محاسبه شده توسط مدل اوندا که برای آکنه‌های نامنظم و در شرایط اتمسفری به‌دست آمده است، به‌شدت از نتایج تجربی انحراف دارد و نتایج معتبری برای آکنه ساختاریافته ارائه نمی‌دهد. مدل‌های اولیجیک و اولیجیک تصحیح شده، که برای آکنه‌های ساختاریافته ولی در فشارهای پایین به‌دست آمده‌اند، نیز نتایجی مشابه مدل اوندا دارند. مساحت تخمین زده شده توسط مدل بیلت-شولتز با بالا رفتن فشار، انحراف بیشتری پیدا می‌کند. مدل بریتو در فشارهای بالاتر (شکل‌های ۴ و ۵) رفتاری مشابه مدل بیلت-شولتز دارد ولی در فشارهای پایین‌تر (شکل‌های ۲ و ۳) میزان اختلاف چندین برابر می‌شود. مدل روچا نیز مشابه آن دو عمل کرده، ولی روند افزایشی کم‌تری نسبت به آن دو دارد. با افزایش فشار از ۶/۹ تا ۲۷/۶ bar این مدل‌ها انحراف زیادی از مقادیر تجربی دارند. مدل برونازی در فشارهای کمتر رفتار خوبی نشان می‌دهد، ولی با بالا رفتن فشار، شروع به افزایش انحراف می‌کند. همچنین مدل سیمینیسانو در فشارهای پایین‌تر (شکل ۲) به سمت نتایج تجربی میل می‌کند ولی در مقادیر بالاتر فشار، انحراف زیادی پیدا می‌کند. مدل گوالیتو که با اضافه کردن یک

فاکتور تصحیح به مدل روچا به دست آمده [۱۰]، انطباق خوبی با داده‌های تجربی دارد. مدل پیشنهادی ونگ که بر مبنای تصحیح مدل روچا است [۱۳]، نتایج آزمایشگاهی را نسبت به سایر مدل‌ها با خطای خیلی کم‌تری پیش‌گویی کرده است. متوسط خطای نسبی محاسبه شده برای نتایج حاصل از مدل‌های سطح مؤثر در محدوده فشار ۲۷/۶ bar - ۶/۹، در جدول ۳ آمده است. همان‌طوری که قبلاً اشاره شد، مدل‌های ونگ و گوالیتو نسبت به سایر مدل‌ها خطای کم‌تری دارند ولی به دلیل بالا بودن خطاها هیچ‌کدام از این مدل‌ها پیشنهاد نمی‌شوند.

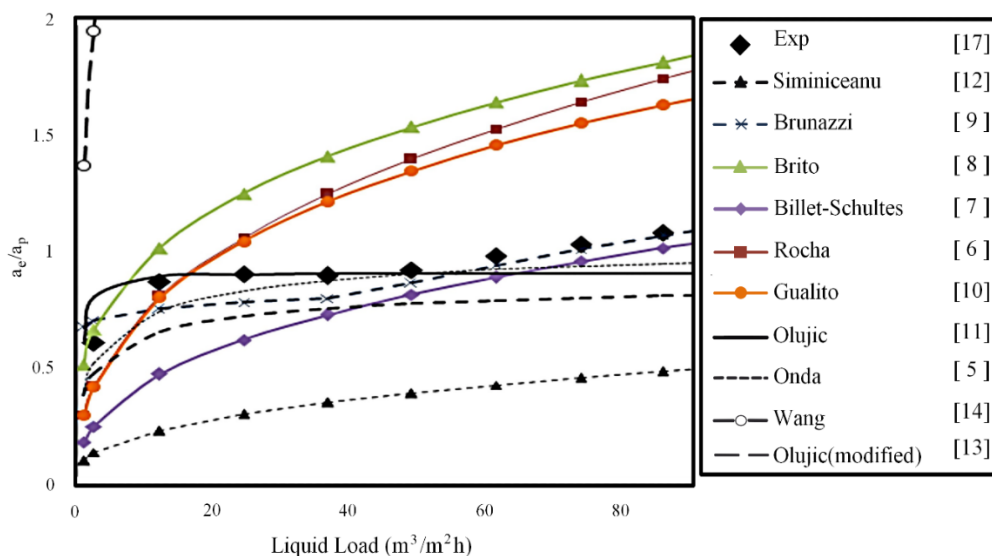
جدول ۳- خطای نسبی متوسط* میان مدل‌های سطح مؤثر و داده‌های آزمایشگاهی در محدوده فشار ۲۷/۶ bar - ۶/۹.

مدل	Bilet and Schultes	Brito	Rocha	Gualito	Olujic	Onda	Siminiceanu	Wang	Olujic (modified)	Brunnazi
خطای نسبی متوسط (%)	۶۲۷	۶۲۲	۲۴۱	۴۴	۱۵۵	۱۸۱	۱۳۶	۳۱	۱۴۹/۵	۷۲

$$MARE(\%) = 100 \frac{1}{N} \sum \left| 1 - \frac{Y_{Calc}}{Y_{EXP}} \right| *$$

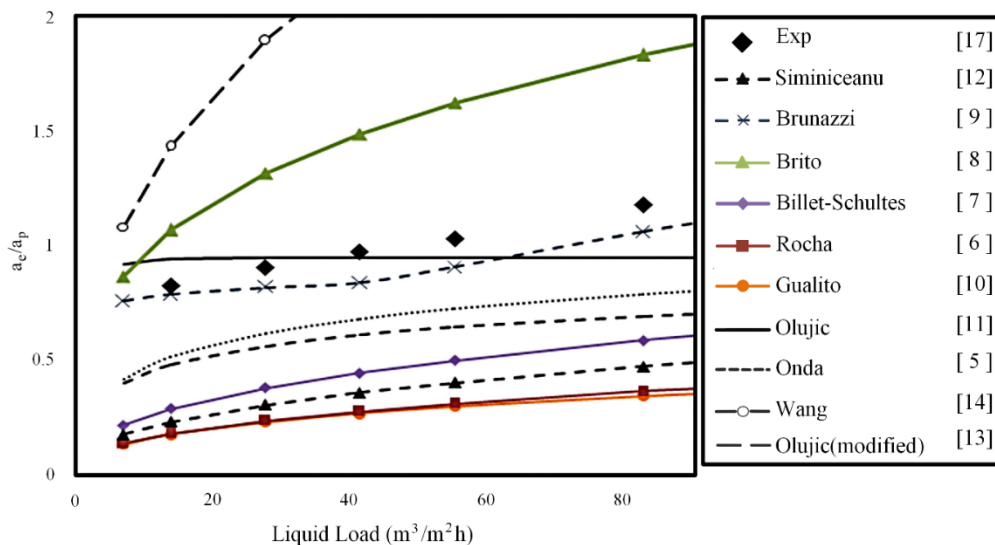
۲-۳- تغییر کشش سطحی

برای بررسی اثر تغییر کشش سطحی طبق نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی سای و همکاران [۱۷]، استفاده شده است. آزمایش در یک برج اتمسفری با قطر داخلی ۰/۴۲۷ m و ارتفاع بستر ۳ m روی آکنه Mellapak 250Y انجام شده و از روش جذب دی‌اکسید کربن از هوا درون محلول سود برای اندازه‌گیری استفاده شده است. سرعت هوای عبوری ثابت (۱ m/s)، و مقادیر کشش سطحی مورد آزمایش ۳۵ mN/m و ۷۲ mN/m است. نتایج مقایسه برحسب دبی مایع^{۱۴} و سطح مؤثر در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است.



شکل ۶- مقایسه مدل‌های سطح مؤثر با نتایج تجربی در کشش سطحی ۳۵ mN/m

¹⁴ Liquid Load



شکل ۷- مقایسه مدل‌های سطح مؤثر با نتایج تجربی در کشش سطحی ۷۲ mN/m

با توجه به شکل‌های بالا، مدل‌های پیشنهادی بریتو و سیمینیسیانو که فاقد پارامتر کشش سطحی هستند با تغییر کشش سطحی، مقادیر به ترتیب بیش‌تر و کم‌تری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کنند و تغییر کشش سطحی تأثیری روی مقادیر محاسبه شده ندارد. مدل روچا در کشش سطحی کم‌تر، مقادیر بیش‌تر، و با افزایش کشش سطحی مقادیر خیلی کم‌تری را نسبت به داده‌های تجربی ارائه می‌دهد.

علت این امر می‌تواند به دلیل وجود پارامتر $(1-0.93\cos\gamma)^{-1}$ در رابطه مربوط به این مدل باشد. در این مدل محدوده‌ای برای استفاده از زاویه تماس با توجه به کشش سطحی وجود دارد که به شرح زیر است؛

$$\cos\gamma = 5.211 \times 10^{-16.835\sigma} \quad , \quad \sigma > 0.055 \text{ N/m} \quad (13)$$

$$\cos\gamma = 0.9 \quad , \quad \sigma < 0.055 \text{ N/m} \quad (14)$$

عدم پیوستگی در این مقدار، نشان می‌دهد، رابطه میان زاویه تماس و کشش سطحی به‌درستی تعیین نشده است [۱۶]. نیکولایوسکی^{۱۵} نیز اشاره کرده است که زاویه تماس و خصوصیات سطح، تأثیر زیادی در میزان تر شوندگی و پهنای آبراه‌های روی سطح آکنه دارند [۴].

مدل اولیجیک داده‌های آزمایشگاهی را به‌خوبی پیش‌بینی کرده است. این مدل تنها تابع سرعت ظاهری مایع است و خطای ناشی از آن نیز ممکن است به همین دلیل باشد. مدل برونازی نسبت به مدل اولیجیک داده‌های آزمایشگاهی را با توجه به تغییر کشش سطحی، بهتر پیش‌بینی می‌کند. اساس این مدل بر مبنای محاسبه ماندگی و ضخامت فیلم مایع است. در روند این نمودار یک شکستگی دیده می‌شود که دلیل آن ناپیوستگی در معادله‌ای است که برای محاسبه ماندگی به کار گرفته می‌شود [۹]. مدل ونگ که بر مبنای مدل گوالیتو و با ارائه یک فاکتور تصحیح نشان‌دهنده اثر فشار، برای پیش‌بینی در فشارهای بالا به‌دست آمده [۱۳]، در شرایط تجربی مقادیر بیشتری را همراه با خطای بالاتری نشان داده است. مدل گوالیتو که به‌نوعی وابسته به مدل روچا است، نتایج مشابه آن را ارائه کرده است. با توجه به رابطه مربوط به مدل اوندا، بسیار به کشش سطحی حساس بوده و در کشش سطحی پایین‌تر مطابق داده‌های تجربی

¹⁵ Nicolaiewsky

بوده است ولی در کشش سطحی بالاتر مقادیر پایین‌تری را پیش‌گویی کرده است. مدل اولیجیک اصلاح شده، که وابسته به مدل اوندا است و مدل بیلت - شولتس نیز نتایج مشابه این مدل را ارائه کرده‌اند. یکی از اثرات مهم کاهش کشش سطحی، جلوگیری از پدیده مویینگی است. این رفتار باعث می‌شود که مساحت بیش‌تری برای بهبود سطح مؤثر در مقادیر پایین کشش سطحی برای آکنه فراهم شود [۱۷].

خطای ناشی از مدل‌های پیش‌گو در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با تغییر پارامتر کشش سطحی در جدول ۴ آمده است. مدل‌های اولیجیک و برونازی به ترتیب با ۷٪ و ۸٪ خطای کم‌تر و نتایج بهتری در مقایسه با سایر مدل‌ها ارائه کرده‌اند. مدل ونگ از بین مدل‌های موجود با ۲۰٪ خطا، بیش‌ترین انحراف را نسبت به مقادیر تجربی دارا است، از این جهت استفاده از آن در این شرایط عملیاتی مناسب نیست.

جدول ۴- خطای نسبی متوسط میان مدل‌های سطح مؤثر و داده‌های آزمایشگاهی در کشش سطحی ۳۵ و ۷۲ mN/m

مدل	Bilet and Schultes	Brito	Rocha	Gualito	Olujic	Onda	Siminiceanu	Wang	Olujic (modified)	Brunazzi
خطای نسبی متوسط (%)	۳۸	۳۶	۴۵/۸	۴۵/۶	۷	۱۸	۵۳	۲۰۰	۲۵	۸

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌های موجود برای محاسبه سطح مؤثر آکنه‌های ساختاریافته که پارامتر مهمی در انتقال جرم میان فازهاست، بررسی شد. نتایج مقایسه میان مدل‌های سطح مؤثر و داده‌های تجربی در فشارهای بالا برای آکنه Mellapak 250Y نشان داد که مدل‌های ونگ و گوالیتو نسبت به دیگر مدل‌ها خطای کم‌تری دارند و متوسط خطای نسبی برای این دو مدل به ترتیب برابر ۳۱٪ و ۴۴٪ است، به دلیل بالا بودن خطاهای به‌دست آمده هیچ‌کدام از این مدل‌ها پیشنهاد نمی‌گردند. مدل‌های برونازی و اولیجیک تغییر کشش سطحی را نسبت به سایر مدل‌ها بهتر پیش‌بینی کردند. مدل برونازی که برای آکنه Mellapak به‌دست آمده و در رابطه ارائه شده برای آن پارامتر کشش سطحی منظور نشده است، با این وجود تغییر کشش سطحی را به‌خوبی پیش‌بینی کرده است. مدل اولیجیک که تنها تابع شدت جریان مایع و حفره‌های روی سطح آکنه است و برای آکنه Montzpak B1-250 به‌دست آمده، در فشارهای بالا دارای خطای زیادی است ولی با تغییر پارامتر کشش سطحی، داده‌های آزمایشگاهی را با کم‌ترین میزان خطا نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی کرده است. خطای نسبی متوسط برای مدل‌های برونازی و اولیجیک با تغییر کشش سطحی به ترتیب برابر ۷٪ و ۸٪ است. مدل برونازی را می‌توان از میان مدل‌های مقایسه شده برای پیش‌بینی سطح مؤثر آکنه Mellapak 250Y با توجه به خطای نسبی متوسط محاسبه شده ناشی از تغییر فشار و کشش سطحی، جهت پیش‌بینی سطح مؤثر این نوع آکنه پیشنهاد کرد. انتخاب بهترین مدل سطح تماس مؤثر برای آکنه‌های ساختاریافته در نتایج این تحقیق می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



سطح مشترک مؤثر ایجاد شده توسط آکنه برای انتقال جرم میان فازها، m^2/m^3	a_e
سطح ویژه آکنه، m^2/m^3	a_p
قطر هیدرولیک آکنه، $4\varepsilon/a_p$	d_h
قطر معادل جریان کانال	d_{eq}
قطر المان آکنه	d_{pe}
فاکتور افزایش سطح برای آکنه‌های ورقه‌ای.	F_{se}
فاکتور جریان گاز، $[m/s (kg/m^3)0.5]$	F_S
ضلع کانال مثلثی در هندسه آکنه، m	S
ارتفاع کانال مثلثی در هندسه آکنه، m	h
قاعده کانال مثلثی در هندسه آکنه، m	b
عدد ثابت مربوط به نوع آکنه ساختار یافته.	m
تعداد فازها	n
سرعت، m/s	u
شتاب گرانش، m/s^2	g
تجمع و یا موجودی مایع	h_l
چگالی مایع	ρ_l
درصد تخلخل آکنه.	ε
کشش سطحی، N/m	σ
کشش سطحی بحرانی مواد پکینگ، N/m	σ_c
ویسکوزیته دینامیک، m^2/s	ϑ
ویسکوزیته، Pa.s	μ
زاویه تماس، deg	α
بخش خالی در سطح آکنه.	Ω
زاویه تماس استاتیک، deg	γ
عدد رینولدز، ud_h/ν	Re^{16}
عدد فرود، u^2/gd_h	Fr^{17}
عدد وبر، $u^2\rho d_h/\sigma$	We^{18}

¹⁶ Reynolds number¹⁷ Froude number¹⁸ Weber number

۵- منابع

- [1] Adisorn Aroonwilas, Paitoon Tontiwachwuthikul, Amit Chakma, "Effects of operating and design parameters on CO₂ absorption in columns with structured packings", Separation and Purification Technology 24, 2001, pp. 403-411.
- [2] Ludovic Raynal, Christophe Boyer, Jean-Pierre Ballaguet; "Liquid Holdup and Pressure Drop Determination in Structured Packing with CFD Simulations", the Canadian Journal of Chemical Engineering, 82, 2004, pp. 871-879.
- [3] Wang, G. Q.; Yuan, X. G.; Yu, K. T. (Review of Mass-Transfer Correlations for Packed Columns). Ind. Eng. Chem. Res. 44 (23), 2005, 8715.
- [4] Nicolaiewsky, E. M. A.; Tavares, F. W.; Rajagopal, K.; Fair, J. R. "Liquid Film Flow and Area Generation in Structured Packed Columns", Powder Technol. 1999, 104 (1), 84.
- [5] K. Onda, H. Takeuchi, Y. Okumoto, Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns, J Chem. Eng. Jpn. 1, 1968, pp. 56-62.
- [6] Rocha, J. A.; Bravo, J. L.; Fair, J. R. Distillation Columns Containing Structured Packings: A Comprehensive Model for Their Performance. 2. Mass-Transfer Model. Ind. Eng. Chem. Res., 1996, 35 (5), 1660.
- [7] Reinhard Billet and Michael Schultes, "Predicting Mass Transfer in Packed Columns", Chem. Eng. Technol. 16, 1993, pp. 1-9.
- [8] Henriques de Brito, M.; von Stockar, U.; Bangerter, A. M.; Bomio, P.; Laso, M. Effective Mass-Transfer Area in a Pilot Plant Column Equipped with Structured Packings and with Ceramic Rings. Ind. Eng. Chem. Res., 33 (3), 1994, 647.
- [9] Elisabetta Brunazzi, Giuiano Nardini, Aiessandro Paglianti and Luigi Petarca, "Interfacial Area of Mellapak Packing: Absorption of 1, 1, I-Trichloroethane by Genosorb 300", Chem. Eng. Technol. 18, 1995, pp. 248-255.
- [10] Gualito, J. J., Cerino, F. J., Cardenas, J. C., Rocha, J. A.; "Design Method for Distillation Columns Filled with Metallic, Ceramic, or Plastic Structured Packings", Ind. Eng. Chem. Res. 36, 1997, 1747.
- [11] Olujic, Z. "Development of a Complete Simulation Model for Predicting the Hydraulic and Separation Performance of Distillation Columns Equipped with Structured Packings", Chem. Biochem. Eng. Q., 11 (1), 1997, 31.
- [12] I. Siminiceanu, A. Friedl, M.A. Dragan, A Simple equation for the effective mass transfer area of the Mellapak750Y structured packing, in: Scientific Conference Meeting "35 Years of Petroleum-Gas University Activity", Ploiesti, 2002, November pp. 27-29.
- [13] Z. Olujic, "Delft model a comprehensive design tool for corrugated sheet structured packings", in: Proceedings of the Topical Conference Distillation Tools for the Practicing Engineer, AIChE Spring Meeting, New Orleans, LA, USA, March 10-14, 2002, pp. 142-152.
- [14] G.Q. Wang, X.G. Yuan, K.T. Yu; "A method for calculating effective interfacial area of structured packed distillation columns under elevated pressures", Chemical Engineering and Processing 45, 2006, pp. 691-697.
- [15] Robert E. Tsai, A. Frank Seibert, R. Bruce Eldridge and Gary T. Rochelle, "Influence of viscosity and Surface Tension on the Effective mass transfer area of structured packing", Energy Procedia 1, 2009, pp. 1197-1204.
- [16] C.W. Fitz, J.G. Kunesh, A. Shariat, "Performance of structured packing in a commercial-scale column at pressures of 0.02-27.6 bar", Ind. Eng. Chem. Res. 38, 1999, pp. 512-518.
- [17] Robert E. Tsai, Peter Schultheiss, Andreas Kettner, J. Christopher Lewis, A. Frank Seibert, R. Bruce Eldridge and Gary T. Rochelle, "Influence of Surface Tension on Effective Packing Area", Ind. Eng. Chem. Res., 47, 2008, pp. 1253-1260.
- [18] L. Valenz, F. J. Rejl, J. Síma, and V. Linek, Absorption Mass-Transfer Characteristics of Mellapak Packings Series, Ind. Eng. Chem. Res. 2011, 50, pp. 12134-12142.



[19] D. Flagiello, A.Parisi, A. Lancia, F. Di Natale, A Review on Gas-Liquid Mass Transfer Coefficients in Packed-Bed Columns, ChemEngineering 2021, 5, 43.