

## کاربرد یک ضریب انتقال جرم تلفیقی برای سیستم مایع-مایع با کشش - بین سطحی پائین

جواد صاین و حسن بارانی

دانشگاه بوعلی سینا، همدان

saien@basu.ac.ir

### چکیده

در این کار اثر توام آلودگی و همزدن با بکار بردن یک ستون استخراج در حضور آلاینده بررسی گردیده و تعداد ۱۲۰ آزمایش متنوع انجام شده است. یک تصحیح روی یک مدل تلفیقی انتقال جرم انجام داده تا کاربرد آن برای محدوده وسیعی از عوامل میسر باشد. فقط یک ضریب در این مدل بکار رفته که در انطباق با نتایج تجربی معلوم می گردد. با معلوم شدن تغییرات منطقی این ضریب، مدل ریاضی مربوطه ارائه گردیده و محاسبه ضریب کلی انتقال جرم بر مبنای مدل جدید حداکثر خطای  $\pm 13\%$  را در مقایسه با نتایج تجربی فراهم نموده است.

### واژه های کلیدی: انتقال جرم؛ آلودگی؛ اختلاط؛ مدل تلفیقی

#### مقدمه

سرعت انتقال جرم درون فازهای مایع-مایع متاثر از عوامل متعددی مانند اندازه قطرات، زمان اقامت، خواص فیزیکی فازها، غلظت مواد آلاینده و نحوه اختلاط فازها می باشد. روابط زیادی در متون [۲۱] برای ضرایب انتقال جرم محلی و کلی یافت می شود، اما در رابطه با تاثیر آلاینده ها دو رویه نسبتاً مهمتر بکار گرفته شده است که ذیلاً شرح داده می شود:  
**مدل کلاهدک ساکن:** در این مدل ساویک (Savic) [۳] مدلی پیشنهاد نمود که در آن مواد آلاینده در اثر حرکت قطرات درون محیط آلوده، ابتدا در جلوی قطرات ظاهر شده و سپس به عقب رانده شده و یک حجم ساکن کلاهدکی شکل از حجم قطره را بوجود می آورند. این حجم ساکن موجب کاهش انتقال جرم در اثر جلوگیری از حرکت گردابی و چرخشی درون قطره می شود. فرم اصلاح شده این مدل توسط

اسلیتر (Slater) و همکاران [۴]، همچنین بهمینار و همکاران [۵] در رابطه با نتایج تجربی بکار برده شده و در آن دو ضریب تصحیح بطور همزمان در انطباق با نتایج حاصل گردیده است.

**مدل تغییر در کشش بین سطحی:** در این مدل که توسط لاکیل (Lochiel) [۶] پایه گذاری شده، یک شیب مداوم برای کشش بین سطحی در اطراف قطره و در حضور مواد آلاینده در نظر گرفته شده است. در این مدل کشش بین سطحی و غلظت ماده فعال سطحی (بعنوان آلاینده) در نظر گرفته شده و معادله ای برای متوسط مولفه مماسی سرعت در فصل مشترک حاصل گردیده است. این سرعت مماسی در تعیین عدد شروود جهت فاز مداوم بکار می رود. در این عدد کمیتی بنام ضریب آلودگی (contamination factor) بکار رفته که معرف میزان آلودگی در محیط است و تعیین

### ضرایب انتقال جرم در فازهای مداوم و پراکنده

ضریب انتقال جرم بستگی به اندازه قطرات و شرایط سیالات دارد. بعنوان دو حد شناخته شده میتوان قطرات دارای رفتار صلب (rigid) و نوسانی (oscillating) را نام برد که برای اولی عدد رینولدز بر مبنای حرکت قطرات معمولاً کمتر از ۱۰ و برای دومی بیش از ۲۰۰ می باشد. قطرات با رفتار بین این دو حد بعنوان قطرات چرخشی (circulating) شناخته میشوند - [۹]. از مهمترین عواملی که در این دسته بندی دخالت دارند نسبت ویسکوزیته فازها ( $\mu_d/\mu_c$ ) و نیز وجود آلودگی در محیط است.

برای فاز مداوم و برای سیستم شیمیائی تمیز، بر مبنای روابط پیوستگی برای فاز مداوم و برای جزء انتقال یابنده در اطراف قطرات کروی شکل، با فرض عدد اشمیت بزرگ  $Sc \gg 1$  معادله زیر حاصل گردیده است [۱۰]:

$$Sh = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ 1 - \frac{2 + 3 \frac{\mu_d}{\mu_c}}{1 + \left( \frac{\rho_d \mu_d}{\rho_c \mu_c} \right)^{0.5}} \times \frac{1.45}{Re^{0.5}} \right] Re^{0.5} Sc^{0.5} \quad (1)$$

که در آن:  $Sh = k_c d / D_c$ ،  $Re = \rho_c V_t d / \mu_c$  و  $Sc = \mu_c / \rho_c D_c$  می باشند. در این رابطه عبارت داخل کروشه در حقیقت نسبت سرعت متوسط مماسی سیال در فصل مشترک به نسبت سرعت حد (terminal velocity) می باشد ( $\alpha = V_i / V_t$ ).

از طرفی جذب مواد آلاینده روی فصل مشترک بین قطرات و محیط مداوم میتواند موجب یک شیب در غلظت آن در این ناحیه گردد که نتیجتاً موجب تغییر در سرعتهای مماسی بر مبنای مختصات کروی می گردد. بر این اساس لاکیل [۶] رابطه ای بدست آورده است که مشابه رابطه فوق بوده ولی اثر آلودگی بصورت کمی در آن ظاهر شده است:

$$Sh = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \alpha^{0.5} Re^{0.5} Sc^{0.5} \quad (2)$$

مقدار آن غالباً بروش انطباق با ضرایب انتقال جرم حاصل از نتایج تجربی بوده است.

تأثیر آلودگی بر روی هر یک از ضرایب محلی، می تواند با کمیتهای متفاوت ظاهر شود. در حالیکه از دید گاه صنعتی، معرفی میزان آلودگی با یک معیار واحد مطلوب است که از آن برآورد کلی میزان آلودگی و نیز تأثیر بر کاهش انتقال جرم سنجیده شود. در این رابطه اسلیتر (Slater) [۷] یک مدل تلفیقی ارائه نموده که در آن تأثیر آلودگی در کاهش سرعتهای مماسی در ناحیه فصل مشترک مطابق با مدل لاکیل، عیناً به کاهش ضریب نفوذ گردابی  $D_e$  در داخل قطرات ارتباط داده شده و بدین ترتیب یک تلفیق برای بدست آوردن ضریب کلی انتقال جرم حاصل گردیده است. در این تلفیق برای آلودگی فقط یک کمیت بکار می رود. کاربرد این مدل در ارتباط با نتایج تجربی دارای این اشکال بوده که برای قطرات کوچک (عدد رینولدز با بزرگی حدود ۱۰) اعداد منفی برای عدد شروود حاصل شده و لذا در این رابطه، اسلیتر - [۷] یک اصلاح ریاضی ارائه نمود تا کاربرد بیشتری برای آن فراهم گردد. اطلاعات تجربی گزارش شده توسط اشتینر - (Steiner) [۸] نیز در رابطه با این مدل بکار رفته و مقادیر ضریب آلودگی برای آن بدست آمده است.

در این کار در نظر است از یک مدل تلفیقی جدید که در آن ضریب انتقال جرم در فاز مداوم بر مبنای روابط ارائه شده برای سیستم شیمیائی تمیز باشد، استفاده گردد. انحراف از رفتار سیستم تمیز در اثر حضور آلاینده و نیز در اثر همزدن محیط می تواند توسط یک ضریب که مقدار آن از انطباق با نتایج تجربی حاصل می گردد تعیین گردیده و در صورت داشتن تغییرات منطقی، یک مدل ریاضی برای آن ارائه گردد تا در ارتباط با مدل تلفیقی مورد استفاده قرار گیرد. مزیت این کار آن است که فرض ساده کننده ریاضی که قبلاً اعمال شده وجود نداشته، اثر همزدن محیط در مجاورت آلاینده نیز مد نظر قرار می گیرد تا عملکرد توأم این دو عامل مورد بررسی قرارگیرد. تا کنون این کار توسط سایر محققین صورت نگرفته است.

هر دو فاز تماس گیرنده با یک پارامتر توصیف گردد. این موضوع در مواردی که مقاومت انتقال جرم در هر دو فاز قابل ملاحظه باشد اهمیت بیشتری دارد. در این رابطه اسلیتر [۷]، مشارکت ضریب نفوذ کلی را بر مبنای رابطه هندلوس و بارون (Handlos and Baron) [۱۲] بفرم:

$$D_e = \frac{dV_t}{2048(1+\kappa)} \quad (5)$$

که در آن:  $\kappa = \mu_d / \mu_c$  بوده بکار برده و به آن ضریب نفوذ مولکولی را افزوده تا ضریب نفوذ کلی موثر بفرم زیر حاصل گردد:

$$D_{oe} = D + \alpha D_e \quad (6)$$

این ضریب نفوذ کلی در رابطه (۴) بجای ضریب نفوذ مولکولی جایگزین می گردد. بنابراین کمیت  $\alpha$  که معرف شیب کشش بین سطحی و همچنین اثر بازدارندگی آلودگی است، در ضریب انتقال جرم سمت داخل قطره نیز بکار برده می شود و اثر آلودگی عاملی برای ارتباط و تلفیق هر دو ضریب در دو فاز می شود. البته کمیت  $\alpha$  پس از اصلاح توسط معادله (۴) استفاده شده است. توری دو فیلمی ویتمن (Whitman) برای برقراری ارتباط بین دو ضریب انتقال جرم بکار رفته تا ضریب کلی بر مبنای فاز پراکنده حاصل گردد:

$$\frac{1}{K_{od}} = \frac{\phi}{k_c} + \frac{1}{k_d} \quad (7)$$

کمیت  $m$  در این مدل در انطباق با نتایج تجربی حاصل میشود.

### کارهای تجربی

**دستگاه:** یک ستون مجهز به دیسکهای گردان از جنس شیشه پیرکس برای انجام آزمایشات استفاده شده است. در این ستون یک همزدن یکنواخت در طول ستون فراهم می گردد. همچنین امکان عبور آزاد قطرات وجود دارد. قطر ستون ۱۱۴ میلیمتر و دارای ۷ مرحله است. هر مرحله دارای ۴۵ میلیمتر ارتفاع، با قطر دیسک ۶۷ میلیمتر و قطر حلقه ۸۹ میلیمتر میباشد. قطر محور نگهدارنده دیسکها ۱۶ میلیمتر و ضخامت دیسک و حلقه ۳ میلیمتر است. محور نگهدارنده دیسکها به

$$\alpha = \frac{V_i}{V_t} = 1 - \frac{2 + 3 \frac{\mu_d}{\mu_c} + m}{1 + \left( \frac{\rho_d \mu_d}{\rho_c \mu_c} \right)^{0.5}} \times \frac{1.45}{\text{Re}^{0.5}} \quad (3)$$

که در آن  $m$  یک کمیت بدون بعد مثبت می باشد و بعنوان فاکتور آلودگی نامیده می شود.

رابطه (۳) برای اعداد رینولدز بالا و مقادیر کم  $m$  مناسب است و هرگاه قطرات دارای اعداد رینولدز پائین (با بزرگی حدود ۱۰) باشند مقادیر منفی خواهد داد که قابل قبول نخواهد بود. در این رابطه اسلیتر [۷] پیشنهاد یک تغییر در رابطه (۳) را نمود که موجب کاربری عمومی این رابطه برای محدوده وسیعی از اعداد رینولدز، حدود:  $1 < \text{Re} < 1000$  گردد. این پیشنهاد شامل بکار بردن تقریب:  $\alpha = 1 - x \cong (1 + x)^{-1}$  می گردد که برای مقادیر کم  $x$  صادق است که در رابطه فوق اعمال گردد. کمیت  $m$  بایستی از روی نتایج تجربی تعیین گردد. در این رابطه اطلاعات تجربی فراهم شده توسط اشتینر [۸] با این رابطه منطبق گردیده و مقدار متوسطی حدود ۲۲ برای  $m$  بدست آمده است.

برای انتقال جرم درون قطرات، بر اساس رابطه نفوذ درون قطرات کرووی و همچنین تحت مختصات کرووی معمولاً معادله معروف نیومن (Newman) بکار می رود:

$$k_d = \frac{-d}{6t} \ln \left[ \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \frac{-4\pi^2 n^2 Dt}{d^2} \right] \quad (4)$$

برای قطرات غیر صلب، یک ضریب نفوذ کلی که شامل اثر نفوذ گردابی و نفوذ مولکولی باشد را میتوان جایگزین ضریب نفوذ مولکولی در رابطه نیومن نمود. این ایده قبلاً سابقه کار برد داشته است. بعنوان مثال کالدرا بانک و کورچینسکی [۱۱] - [ نشان داده اند که هرگاه یک ضریب نفوذ کلی بمقدار  $D_{oe} = 2.25D$  در رابطه نیومن قرار داده شود، نتایج قابل قبولی حاصل خواهد شد.

### مدل تلفیقی

از دیدگاه کاربردی و صنعتی مطلوب است که اثر آلودگی در

یک الکترو موتور دور متغیر متصل است که از طریق تبدیل دهنده الکتریکی امکان تنظیم سرعت همزدن را فراهم می نماید. تجهیزات داخل ستون از جنس فولاد ضد زنگ؛ رابطها، لوله ها و شیرها از جنس فولاد ضد زنگ و تفلن می باشند.

**مواد شیمیایی:** سیستم شیمیایی مورد استفاده عبارت از: بوتانل، اسید سوکسینیک و آب می باشد که مهمترین مشخصه آن کشش بین سطحی کم می باشد. آب مقطر اشباع شده با بوتانل (این سیستم دارای حلالیت جزئی است) بعنوان فاز مداوم و بوتانل اشباع از آب بعنوان فاز پراکنده استفاده شده است. متوسط مقادیر خواص فیزیکی (با توجه به غلظت حل شونده) در جدول ۱ آمده است.

### جدول ۱- خواص فیزیکی فازها

خواص فیزیکی	فاز مداوم	فاز پراکنده
دانسیته	$\rho [kg/m^3]$	۸۵۰
ویسکوزیته	$\mu [kg/m.s]$	$2/23 \times 10^{-3}$
ضریب نفوذ	$D [m^2/s]$	$0/22 \times 10^{-9}$
کشش بین سطحی	$\gamma [mN/m]$	۲/۰۲-۲/۱۲۲

خواص فیزیکی با استفاده از پیکنومتر برای اندازه گیری دانسیته، لزجت سنج استوالد برای اندازه گیری لزجت بوده است. برای اندازه گیری کشش سطحی از روش وزن قطره استفاده شده که یک روش راحت و تکرار پذیر است. در این روش یک نازل که به انتهای یک پمپ سرنگ استفاده شده و حجم قطرات هنگام جدا شدن از انتهای نازل مورد اندازه گیری قرار می گیرند. شدت جریان تخلیه توسط پمپ بسیار کند است (یک میلی لیتر در مدت ۴۷ دقیقه) تا قطرات بطور آهسته شکل گرفته و سپس رها شوند. ضریب نفوذ در دو فاز توسط میشک (Misek) [۱۳] گزارش شده است. مقادیر تعادلی غلظت اسید سوکسینیک در دو فاز توسط رابطه زیر ارائه می شود:

$$C_d^* = 1.086C_c - 0.849 \times 10^{-3} C_c^2 - 0.162 \times 10^{-4} C_c^3 \quad (8)$$

**روش:** انتقال جرم در جهت فاز پراکنده به فاز مداوم انجام شده است  $d \rightarrow c$ . غلظت اولیه اسید سوکسینیک در قطرات بین ۱۸/۸ تا ۲۰/۶ گرم در لیتر بوده است. آلاینده سدیم دو دسیل سولفات (SDS) با مقادیر معینی از ۶/۲۵ تا ۵۰ میلی گرم در لیتر به فاز مداوم افزوده شده است. ستون با ظرفیت حدود ۴۲۶۵ میلی لیتر از فاز مداوم پر شده و قطرات از نوک نازل توسط یک سرنگ شیشه ای که توسط یک پمپ سرنگ به حرکت در می آید درون ستون تشکیل گردیده اند. با دانستن شدت جریان فاز مداوم و شمردن تعداد قطرات در یک محدوده زمانی معین، اندازه قطرات قابل محاسبه می باشند. اندازه قطرات حاصله حدود ۱/۲۱ تا ۲/۱۷ میلیمتر بوده است. فاصله قطرات متوالی بیش از ۵۰ میلیمتر بوده است که این فاصله بلحاظ عدم وجود تاثیر متقابل بین قطرات مناسب است [۱۴]. تغییر در اندازه قطرات با تعویض نازلها صورت گرفته، البته اندازه قطرات و همچنین سرعت حد با غلظت آلاینده که موجب تغییر در کشش بین سطحی می شود تغییر می کند. بنابراین هر بار با افزودن مقداری از آلاینده SDS اندازه قطرات و سرعت حد آنها اندازه گیری شده است.

حداکثر سرعت همزن بکار رفته ۴۰ دور در دقیقه بوده است که این مقدار در ناحیه جریان آرام قرار می گیرد  $Re_N < 1.6 \times 10^4$  [۱۵]. سرعتهای بیشتر همزن موجب حرکت شعاعی قطرات و مشکلاتی در نمونه گیری در بالای ستون می شود.

نازلها در یک موقعیت شعاعی در فضای بین دیسک و حلقه در کف ستون قرار گرفته اند و بمنظور جلوگیری از اثر همزدن روی جدا شدن قطرات، نازلها درون یک لوله شیشه توخالی با قطر حدود ۲ سانتیمتر و با ارتفاع حدود ۲ سانتیمتر بیش از ارتفاع نازل قرار داده شده اند. قطرات از فضای بین دیسکها و حلقه ها عبور کرده و در بالای ستون توسط یک قیف وارونه که به یک پیست مجهز به لاستیک مکنده متصل است، جمع آوری گردیده اند. نمونه توسط پیست از قیف جدا و به ظرف آنالیز منتقل گردیده اند.

محدوده اندازه قطرات تولید شده توسط ۵ عدد نازل بکار رفته در این کار در جدول ۲ آمده است:

**جدول ۲- محدوده قطرات برای نازل‌های مختلف**

نازل	اندازه قطرات (میلی‌متر)
۱	۱/۲۵-۱/۲۲
۲	۱/۴۲-۱/۳۹
۳	۱/۹۰-۱/۸۷
۴	۲/۰۷-۲/۰۳
۵	۲/۱۷-۲/۱۱

آنالیز اسید سوکسینیک بروش تیتراسیون در حضور مقدار قابل ملاحظه‌ای آب اضافی توسط محلول سود سوز آور انجام شده است. غلظت اسید سوکسینیک در خروج به ۱/۴ تا ۱۱/۹ گرم بر لیتر رسیده است.

زمان تماس قطرات بین نوک نازل تا نقطه جمع آوری چند بار اندازه‌گیری و متوسط آن منظور گردیده است. کل زمان تشکیل و زمان حرکت درون ستون بعنوان زمان تماس منظور شده است. البته زمان تشکیل قطرات در مقایسه با زمان تماس در طول ناچیز بوده است (حداکثر زمان تشکیل ۰/۷ ثانیه در مقایسه با حداقل زمان تماس ۵/۲ ثانیه).

فاز مداوم هر چند گاه عوض شده است تا از تغییر در غلظت حل شونده درون آن جلوگیری شود. هنگام تعویض نازلها نیز فاز مداوم تعویض شده است. در این مواقع تمام ستون چند بار مورد شستشو قرار می‌گرفت.

### نتایج و بحث

۱۲۰ سری آزمایش تجربی مختلف شامل غلظت‌های ورودی - خروجی، اندازه قطرات، سرعت همزدن، غلظت آلاینده و زمان تماس تحت شرایط عملیاتی مختلف حاصل گردیده است. مقادیر  $K_{od}$  برای هر سری از طریق روابط زیر تعیین گردیده است:

$$K_{od} = -\frac{d}{6t} \ln(1 - E) \quad (9)$$

$$E = \frac{C_{din} - C_{dout}}{C_{din} - C_d^*} \quad (10)$$

که در آنها  $t$  زمان تماس،  $E$  کسر استخراج،  $C_{din}$  غلظت درون قطرات ورودی و  $C_{dout}$  غلظت درون قطرات در خروج است. در رابطه فوق  $C_d^*$  صفر است.

مقادیر سرعت‌های حد اندازه‌گیری شده با رابطه ارائه شده توسط گریس (Grace) و همکاران [۱۶] مقایسه و تطبیق قابل قبولی مشاهده گردیده است. برای استفاده از رابطه سرعت حد، کشش بین سطحی برابر مقدار اندازه‌گیری شده بروشی که در بالا ارائه گردید منظور گردیده است.

در شکل‌های ۱ تا ۳ تغییرات ضریب کلی انتقال جرم بر حسب متغیرها برای موارد نمونه آمده است. ضریب انتقال جرم با اندازه قطره افزایش می‌یابد و با افزایش آن گرایش به یک حد ثابت مشاهده می‌شود. بررسی مقاومتها بر اساس تئوری فیلمی ویتمن و با عنایت به اینکه ضریب توزیع تعادلی  $\Phi$  حل شونده نزدیک ۱ است، معلوم می‌دارد که مقاومت در هر دو فاز قابل ملاحظه و در فاز قطره بیشتر است. اطلاعات بدست آمده همچنین نشان می‌دهد که ضریب انتقال جرم مقدار زیادی با غلظت آلاینده کاهش می‌یابد. همچنین ضریب انتقال جرم با افزایش همزدن ابتدا یک کاهش ملایم و سپس افزایش می‌یابد. حداقل ضریب انتقال جرم در سرعت همزدن حدود ۲۰ دور در دقیقه مشاهده شده است. توجه اینگونه تغییرات ضریب کلی انتقال جرم با همزدن مشکل است. یک علت این تغییرات می‌تواند بخاطر افزایش زمان اقامت در سرعت‌های کم همزدن و سپس افزایش شدت انتقال جرم در اثر همزدن در محیط مداوم حتی در حضور آلاینده باشد.

بمنظور استفاده از مدل تلفیقی ارائه شده توسط اسلیتر (Slater) ابتدا مقادیر  $\alpha$  از رابطه (۳) محاسبه گردید که معلوم شد مقادیر آن در محدوده ۰/۲۴۵-۰/۵۷۸ قرار می‌گیرند. هر گاه مقدار مثبتی برای اثر آلودگی  $m$  در این رابطه بکار رود، مقدار  $\alpha$  از این مقادیر نیز کمتر خواهد بود. بنابراین پیشنهاد اسلیتر برای اصلاح رابطه (۳) با شرح ارائه

شده در فوق برای نتایج تجربی حاصل در این کار قابل استفاده نیست. محدوده اعداد رینولدز در این کار بین ۱۶۹-۴۵/۹ می باشد که نشان می دهد قطرات دارای مقداری چرخش درونی هستند.

در اینجا بمنظور اینکه مقادیر صحیح تر و عملی تری از  $\alpha$  قابل محاسبه باشد، پیشنهاد می شود یک ضریب تصحیح  $F$  در معادله لاکیل و کالدربانک (رابطه ۱) بفرم زیر بکار رود:

$$\alpha = F \left[ 1 - \frac{2 + 3\kappa}{1 + (\rho_d \mu_d / \rho_c \mu_c)^{0.5}} \times \frac{1.45}{\text{Re}^{0.5}} \right] \quad (11)$$

بنابراین با حفظ رابطه اصلی لاکیل و کالدربانک برای سیستمهای تمیز با اعمال یک ضریب تصحیح آنرا برای سیستمهای آلوده بکار برده و بجای تعیین  $m$ ، از این ضریب تجربی استفاده می شود. این ضریب معرف تغییرات نسبت سرعت سطحی به سرعت حد با میزان آلودگی و با سرعت همزدن است. رابطه (۱۱) جایگزین عبارت درون کرشه در رابطه (۱) شده و در مدل تلفیقی که در بالا توصیف گردید بکار می رود. برای تعیین  $F$  از روش تکرار بمنظور برابر نمودن ضریب کلی انتقال جرم تجربی و محاسباتی استفاده می شود. میزان دقت در این تساوی برابر  $\pm 0.1 \mu m/s$  قرار داده می شود.

یک حد پایین برای ضریب انتقال جرم فاز مداوم وجود دارد که برای قطرات صلب توسط اشتینر [۸] پیشنهاد گردیده است. از این رابطه برای تعیین اینکه آیا قطرات به حد رفتار صلب می رسند یاخیر استفاده می شود. در این صورت از این رابطه برای محاسبه ضریب انتقال جرم در فاز مداوم استفاده می شود:

$$Sh_r = 2.43 + 0.775 \text{Re}^{0.5} Sc^{0.33} + 0.0103 \text{Re} Sc^{0.33} \quad (12)$$

همچنین در اینصورت ضریب نفوذ مولکولی در رابطه نیومن استفاده می شود. برای همه نتایج تجربی بدست آمده در این کار عدد شروود بیش از مقدار بیش بینی شده در رابطه فوق است.

در شکل ۴ مقادیر  $\alpha$  بدست آمده بر مبنای مدل تلفیقی جدید و منطبق با نتایج تجربی ارائه شده است. ابتدا مقادیر  $F$  مربوطه مورد بررسی قرار می گیرند. در این جهت انتقال جرم مقادیر  $F$  در مقایسه با جهت دیگر انتقال جرم که از فاز پیوسته به فاز مداوم  $c \rightarrow d$  منتقل می شود [۱۷] به عدد ۱ نزدیکتر است که این موضوع برای سیستم شیمیائی تمیز نیز صادق است. با توجه به این موضوع میتوان نتیجه گرفت که مدل تلفیقی جدید برای جهت انتقال از فاز پیوسته به مداوم تطبیق بهتری دارد. برای تعدادی از آزمایشات (قطرات کوچک تولید شده از نازلهای ۱ و ۲) مقدار  $F$  از یک تجاوز می کند (حداکثر ۱/۲۳). این بدین معناست که مدل تلفیقی مقدار ضریب کلی انتقال جرم کمی را برای این قطرات پیش بینی می کند و مقدار  $\alpha$  برای آنها باستی بیشتر باشد. البته این موضوع می تواند در ارتباط با سایر قسمتهای مدل باشد. بعنوان مثال بیتل و هایدگر (Beitel and Heideger) [۱۸] نشان داده اند که ضریب انتقال جرم می تواند از آنچه توسط هندلوس و بارون پیش بینی شده بیشتر باشد، حتی اگر مواد فعال سطحی نیز در محیط حضور داشته باشند.

با در نظر گرفتن مقادیر  $F$  بدست آمده معلوم می شود که این ضریب با غلظت آلاینده، اندازه قطره و سرعت همزن تغییر می یابد. از آنجا که با افزایش همزدن قطرات مسیر طولانی تر (یا زمان تماس بیشتری) در پیش می گیرند. بنابراین وابسته بودن این ضریب به سرعت همزدن می تواند به زمان تماس ارتباط یابد که در طول آن جذب مواد آلاینده بر روی سطح ادامه می یابد. لی (Lee) و همکاران - [۱۹] و چن (Chen) و لی [۲۰] رفتار جذبی سه نوع ماده فعال سطحی را بررسی و سینتیک جذب آنها را مقایسه نموده اند. لازم به ذکر است که تغییرات  $F$  ممکن است نواقصی که در مدل وجود دارد را در انطباق با مقادیر تجربی پوشش دهد، اما از نقطه نظر کاربردی دارای مزیت فراگیر بودن در انطباق با مشاهدات تجربی است.

۲۰ دور در دقیقه معادل  $Re_N \approx 1580$  این ضریب به یک حداقل می رسد.

یک رگرسیون بر مبنای تغییرات حاصل از نتایج بدست آمده انجام گردیده و رابطه زیر حاصل گردیده است:

$$F = 26.63 Re_d^{-0.658} + (2.71 \times 10^{-4} Re_N - 0.414)^2 + 0.87 \left( 1 + \frac{C_s}{C_s^*} \right) - 0.172 \quad (14)$$

حداکثر خطای نسبی از این رابطه در رابطه در مقایسه با مقادیر تجربی  $\pm 15\%$  است. با منظور نمودن رابطه فوق در مدل تلفیقی و کاربرد آن در محاسبه ضریب کلی انتقال جرم مطابق شرایط عملیاتی مربوط به آزمایشهای تجربی، مقدار حداکثر خطای  $\pm 13\%$  در مقایسه با مقدار اندازه گیری فراهم می شود که معرف قابلیت کاربرد مدل برای پیش بینی ضریب کلی انتقال جرم می باشد. از این مدل در مواردی که هر دو اثر آلودگی و همزدن محیط مطرح باشد، میتوان استفاده نمود. این اثر توأم قبلاً در مدلها بکار نرفته است.

### نتیجه گیری

یک اصلاح مفید روی مدل تلفیقی انتقال جرم انجام شده است که در آن ضرایب انتقال جرم در فازهای قطره و مداوم توسط عاملی که شامل اثر آلودگی می باشد، به یکدیگر ارتباط می یابند. در این کار فرض ساده کردن ریاضی بکار نرفته و تاثیر همزمان آلودگی و همزدن ملحوظ شده است. بر اساس این مدل، محاسبه ضریب کلی انتقال جرم با بکار بردن یک ضریب تجربی انجام میشود که با استفاده از آن، نحوه تغییرات نتایج تجربی با موفقیت پیش بینی گردیده است. انطباق بهتری برای انتقال جرم از فاز پراکنده به فاز مداوم با فراهم نمودن ضریب نزدیک به ۱ مشاهده می شود. بر اساس آزمایشات انجام شده برای محدوده وسیعی از عدد رینولدز (۱۷۰-۴۶)، تحت یک غلظت متوسط از آلاینده و

ضریب بدون بعد  $F$  بعنوان تابعی از اعداد بدون بعد رینولدز بر مبنای اندازه قطره ( $Re = \rho_c V_i d / \mu_c$ )، رینولدز بر مبنای سرعت همزن ( $Re_N = \rho_c D_r^2 N / \mu_c$ ) و میزان پوشش سطحی توسط آلاینده ( $C_s / C_s^*$ ) در نظر گرفته شود. ترم اخیر نسبت غلظت سطحی آلاینده به مقدار اشباع آن می باشد که مقدار آن از روی منحنی تغییرات کشش بین سطحی با غلظت آلاینده مطابق رابطه جذب گیس بدست می آید:

$$C_s = \frac{-d\gamma / d \ln C_B}{2RT} \quad (13)$$

که در آن  $C_B$  و  $C_s$  بترتیب غلظتهای سطحی و توده ای آلاینده می باشند. حداکثر شبیهی که از رسم نمودار  $\gamma$  بر حسب  $\ln C_B$  بدست می آید را میتوان بعنوان مقدار غلظت اشباع سطحی در نظر گرفت [۴]. شکل ۵ تغییرات کشش بین سطحی اندازه گیری شده را بر حسب غلظت توده ای آلاینده SDS نمایش می دهد. شرایط اشباع در غلظت توده ای حدود ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر از SDS حاصل می شود. خواص حلال بر این میزان اشباع تاثیر می گذارند. تشکیل میسل (Micelle) برای SDS در غلظت حدود ۲۹۰۰ میلی گرم در لیتر ظاهر می شود [۲۱]، که از شرایط بکار رفته بسیار دورتر است.

همانطور که شکل ۶ نشان می دهد  $F$  با اندازه قطره کاهش می یابد، بدین معنی که مدل تلفیقی بدون این ضریب شدت انتقال جرم بالایی را با افزایش اندازه قطرات پیش بینی می کند. اندازه قطره و سرعت حد آن در روابط (۳)، (۴)، (۵) و (۱۱) ظاهر شده اند. نحوه تغییرات  $F$  با غلظت آلاینده و سرعت همزن (شکلهای ۷ و ۸) مشابه تغییرات ضریب کلی انتقال جرم تجربی با این متغیرها میباشد. دلیل این امر آنست که اثر آلودگی از طریق ضریب  $F$  ظاهر می شود و افزایش همزدن باعث افزایش زمان تماس  $t$  نیز شده که این متغیر نیز به سهم خود باعث کاهش  $k_d$  می شود. با این وجود تغییرات  $F$  مشابه تغییرات  $K_{od}$  با سرعت همزدن است. در سرعت همزدن

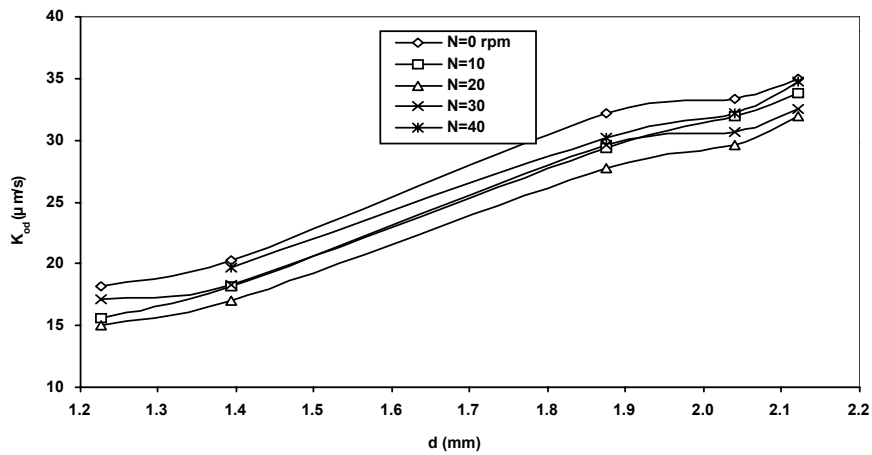
- Revolution”, Chem. Eng. Sci. **19**, 471- 484 (1964)
11. Calderbank, P. H. and I. J. O. Korchinski, “Circulation in Liquid Drops (A Heat Transfer Study)”, Chem. Eng. Sci. **6**, 65-78 (1956).
  12. Handlos, A. S. E. and T. Baron, “Mass and Heat Transfer from Drops in Liquid-Liquid Extraction”, AIChE J., **3**, 127-136 (1957).
  13. Misek, T., “Recommended Systems for Liquid Extraction Studies”, Pub. Instn. Chem. Eng. for EFCE (1978)
  14. Skelland, A. H. P. and N. C. Vasti, “Effects of Interaction Between Circulating or Oscillating Droplets on Drop Formation, Free Fall and Mass Transfer”, Can. J. Chem. Eng. **63**, 390-398 (1985)
  15. Cauwenberg, V., J. Degreve and M. J. Slater, “The Interaction of Solute Transfer, Contaminants and Drop Break-up in Rotating Disc Contactors: Part 1. Correlation of Drop Breakage Probabilities”, Can. J. Chem. Eng. **75**, 1046-1055 (1997)
  16. Grace, J. R., T. Wairegi and T. H. Nguyen, “Shapes and Velocities of Single Drops and Bubbles Moving Freely Through Immiscible Liquids”, Trnas. Inst. Chem. Eng. **54**, 167-174 (1976)
  17. Saien, J. and M. H. Barani, “A Mass Transfer Coefficient Model for Contaminated Liquid-Liquid Systems”, Seventh National Iranian Chemical Engineering Congress, University of Tehran, (2002) Vol. 1, pp:317-322
  18. Beitel, A. and W. J. Heideger, “Surfactant Effects on Mass Transfer from Drops Subject to Interfacial Instability”, Chem. Eng. Sci. **26**, 711-717 (1971)
  19. Lee, Y. L., J. R. Maa, and Y. M. Yang. “The Effects of Surfactant on the Mass Transfer in Extraction Column”, J. Chem. Eng. Jpn. **31**(3), 340-346 (1998)
  20. Chen, L. H. and Y. L. Lee, “Adsorption Behavior of Surfactants and Mass Transfer in Single-Drop Extraction”, AIChE J. **46**(1), 160-168 (2000)
  21. Kale, K. M., E. L. Cussler and D. F. Evans, “Characterization of Micellar Solutions Using Surfactant Ion Electrodes”, J. Phys. Chem. **84**, 593-598 (1980).

همزدن ملایم، رابطه ای برای ضریب بکار رفته ارائه شده است که در مدل تلفیقی جدید بکار می رود.

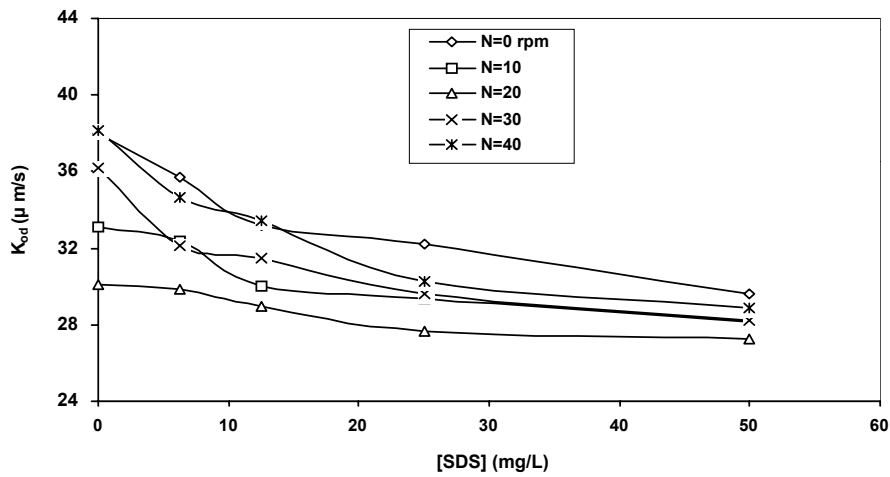
#### مراجع

1. Pratt, H. R. C., “Interphase Mass Transfer”, in “Handbook of Solvent Extraction”, T. C. Lo, M. H. I. Baird and C. Hanson, Eds., Wiley, New York (1983) pp. 91-124
2. Slater, M. J., “Rate Coefficients in Liquid-Liquid Extraction Systems”, in “Liquid-Liquid Extraction Equipment”, eds. J. C. Godfrey and M. J. Slater, Pub. J. Wiley and Sons (1994), Ch. 4, pp: 47-94
3. Savic, P., “Circulation and Distortion of Liquid Drops Falling Through a Viscous Medium”, National Research Laboratories Report MT-22, NRC, Ottawa, Canada (1953)
4. Slater, M. J., M. H. I. Baird, and T-B. Liang, “Drop Phase Mass Transfer Coefficients for Liquid-Liquid Systems and the Influence of Packings”, Chem. Eng. Sci. **43**. 233-245 (1988)
5. Bahmanyar, H., D.K. Chang-Kakoti, L. Garro, T-B. Liang and M. J. Slater, “Mass Transfer from Single Drops in Rotating Disc, Pulsed Sieve Plate and Packed Liquid-Liquid Extraction Columns”, Trans IChemE, **68**(A), 74-83 (1990)
6. Lochiel, A. C., “The Influence of Surfactants on Mass Transfer Around Spheres”, Can. J. Chem. Eng., **43**, 40-44 (1965)
7. Slater, M. J., “A Combined Model of Mass Transfer Coefficients for Contaminated Drop Liquid-Liquid Systems”, Can. J. Chem. Eng., **73**, 462-469 (1995)
8. Steiner, L., “Mass Transfer Rates from Spherical Drops and Drop Swarms”, Chem. Eng. Sci. **41**, 1979-1986 (1986).
9. Al-Aswad, K. K., C. J. Mumford and G. V. Jeffreys, “The application of Drop Size Distribution and Discrete Drop Mass Transfer Models to Assess the Performance of a Rotating Disc Contactor”, AIChE J. **31**, 9, 1488-1497 (1985)
10. Lochiel, A. C., and P. H. Calderbank, “Mass Transfer in the Continuous Phase Around Axisymmetric Bodies of

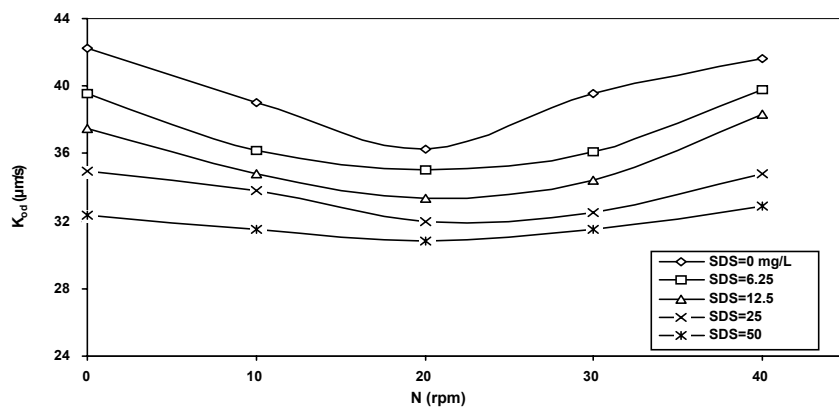




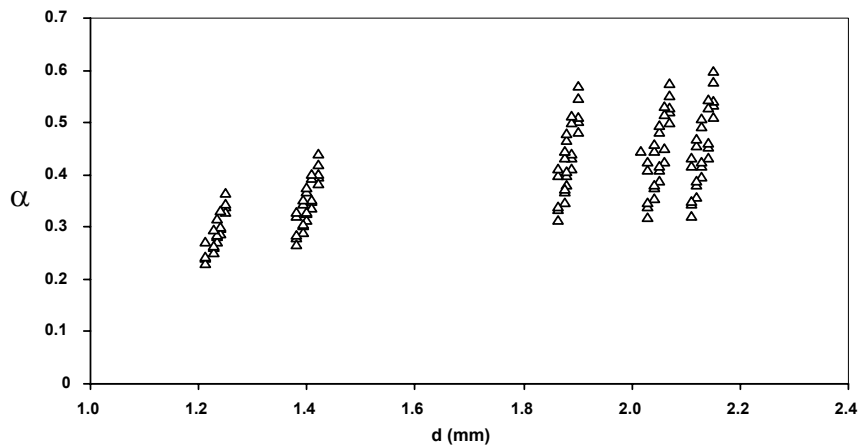
شکل ۱- تغییرات ضریب کلی انتقال جرم با اندازه قطره در غلظت آلاینده ۲۵ میلی گرم بر لیتر



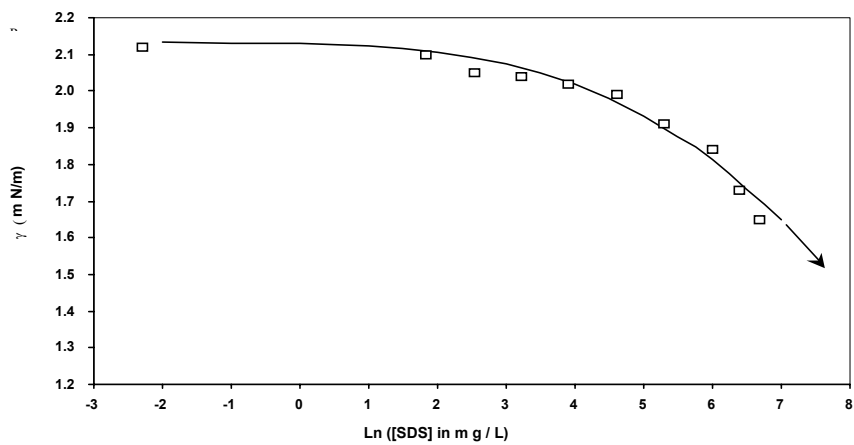
شکل ۲- تغییرات ضریب کلی انتقال جرم با غلظت آلاینده برای نازل شماره ۳



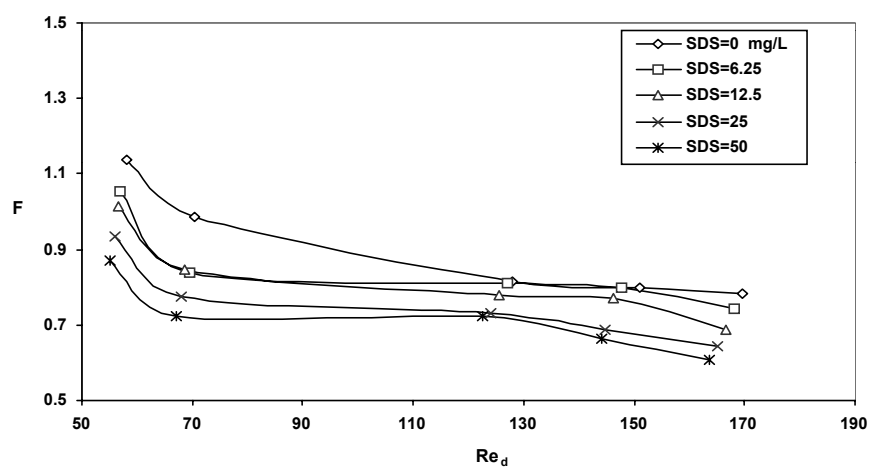
شکل ۳- تغییرات ضریب کلی انتقال جرم با سرعت همزن برای نازل شماره ۵



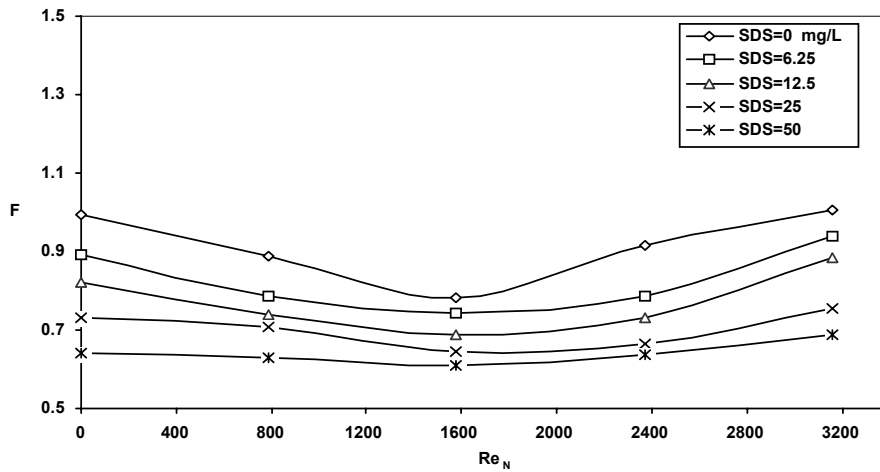
شکل ۴- مقادیر  $\alpha$  بدست آمده از مدل تلفیقی در انطباق با اطلاعات تجربی



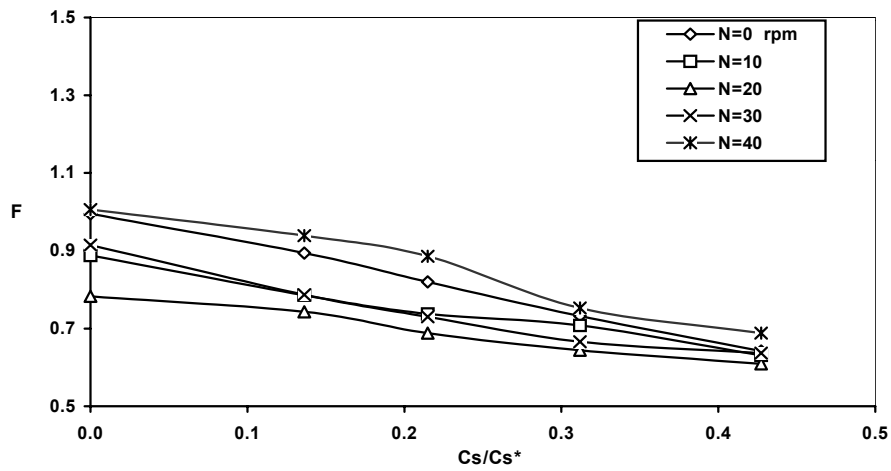
شکل ۵- تغییرات کشش بین سطحی با غلظت آلاینده



شکل ۶- تغییرات ضریب F با عدد رینولدز قطرات تحت سرعت همزن ۲۰ دور در دقیقه



شکل ۷- تغییرات ضریب  $F$  با عدد رینولدز دیسک برای نازل شماره ۵



شکل ۸- تغییرات ضریب  $F$  با غلظت سطحی آلاینده برای نازل شماره ۵