

# هیدرودینامیک و انتقال اکسیژن در راکتورهای ستونی حبابی با تأثیر آلاینده‌های نفتی و ماده فعال سطحی

مریم اصغرپور\*

رشت، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، گروه مهندسی محیط زیست

محمدرضا مهرنیا، نوید مستوفی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۳۶۵

**چکیده:** هدف از این پژوهش بررسی اثر آلاینده‌های نفتی و مواد فعال سطحی بر پارامترهای هیدرودینامیک و انتقال اکسیژن به عنوان پارامترهای کلیدی در فرآیندهای تصفیه زیستی هوازی آب‌های آلوده با روغن و نفت خام می‌باشد. نگهداشت کلی گاز ( $\varepsilon_g$ )، توزیع اندازه حباب و ضریب حجمی انتقال اکسیژن ( $k_L a$ ) برای آلاینده‌های نفتی شامل برش‌های نفتی  $C_{13}$  و  $C_{16}$  در آب با درصد‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۵ در بازه‌ی سرعت هوادهی  $u_g = 1.18 - 23.52 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  در یک راکتور ستونی حبابی ارزیابی شد. یک نوع ماده فعال سطحی آنیونی SDS در آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر مواد فعال سطحی بر روی پارامترهای تصفیه مورد استفاده قرار گرفت. با افزایش سرعت هوادهی توزیع اندازه حباب به صورت دو قله‌ای بوده و مقادیرهای نگهداشت گاز، قطر متوسط حباب و ضریب انتقال اکسیژن افزایش می‌یابند. آلاینده‌های نفتی و مواد فعال سطحی با کاهش کشش سطحی و جلوگیری از پدیده به هم پیوستن حباب‌ها باعث تأخیر در انتقال الگو از همگن به ناهمگن شده و همچنین قطر متوسط حباب با حضور آلاینده‌های نفتی کاهش می‌یابد. البته این تغییرات با حضور مواد فعال سطحی بیشتر است. همچنین آلاینده‌های نفتی باعث افزایش در نگهداشت گاز و ضریب انتقال اکسیژن به ویژه در سرعت‌های هوادهی بالاتر می‌شوند. در غلظت‌های بالاتر آلاینده‌ها، این افزایش بیشتر می‌شود. همچنین حضور مواد فعال سطحی بر روی سطح حباب، با افزایش مقاومت انتقال جرم، باعث کاهش در انتقال اکسیژن می‌شوند. بر اساس نتیجه‌های این پژوهش رابطه‌های تجربی برای پیشنهاد نگهداشت گاز و ضریب حجمی انتقال اکسیژن به عنوان تابعی از سرعت ظاهری هوادهی و کشش سطحی ارائه شد.

**واژه‌های کلیدی:** آلاینده‌های نفتی، بیوراکتور ستونی حبابی، توزیع اندازه حباب، ماده فعال سطحی، ضریب حجمی انتقال جرم، نگهداشت گاز.

**KEY WORDS:** Petroleum contaminants, Bubble column bioreactor, Bubble size distribution, Surfactants, Mass transfer coefficient, Gas holdup.

\*E-mail: maryam.asgharpour@gmail.com

\*عهده دار مکاتبات

## مقدمه

در محدوده ۱۵٪-۰ تغییر نمی‌کند. برعکس، توزیع اندازه قطرات زیادتر شده که باعث افزایش در قطرات اندازه کوچک‌تر می‌شود، که ممکن است بر روی شدت انتقال جرم تأثیر گذارد [۱۰]. هدف از این مطالعه، ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرمی در یک ستون حبایی با استفاده از امولسیون‌های مواد آلی در آب در سرعت‌های هوادهی گوناگون می‌باشد. یک نوع ماده فعال سطحی آنیونی برای بررسی تأثیر مواد فعال سطحی در مخلوط‌های آبی - آلی بر روی نگهداشت گاز و ضریب حجمی انتقال اکسیژن به کار رفته است. ماده فعال سطحی به کار رفته بر اساس ماهیت و کاربرد آن در تصفیه پساب انتخاب شده است. نتیجه‌های به دست آمده در توسعه تأثیر آلاینده‌های نفتی بر ویژگی‌های انتقال جرمی اکسیژن در تماس دهنده‌های گاز - مایع کاربرد دارد. این نتیجه‌ها به‌ویژه می‌تواند در تصفیه زیستی پساب‌های صنایع نفتی به کار رود. در این پساب‌ها، مقدار هیدروکربن‌های موجود به عنوان آلوده‌کننده در حدود ۱۰۰۰ ppm (vol% ۰/۱) می‌باشد.

## بخش تجربی

## دستگاه آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک بیوراکتور ستونی حبایی استوانه‌ای در دمای ۲۵°C انجام می‌شود (شکل ۱). ستون حبایی از جنس شیشه پیرکس با ارتفاع ۱/۱ متر، قطر داخلی ۰/۰۹۵ متر و حجم کارکرد  $۶۳ \times ۱۰^{-۳}$  متر مکعب ساخته شده است. اسپارژر به فاصله ۰/۰۷ متر از انتهای ستون قرار گرفته است. برای توزیع گاز از یک توزیع کننده صفحه سوراخدار دایره‌ای شکل از جنس استیل ضدزنگ به قطر ۰/۰۴۷ متر حاوی ۲۶ سوراخ به قطر ۰/۳ میلی‌متر استفاده شده است. شدت جریان گاز با استفاده از یک جریان‌سنج در بازه‌ی شدت جریان  $۰/۵-۱۵$  L/min (سرعت ظاهری هوادهی  $۱۰^{-۳} \times ۲۳/۵-۱/۱۸$ ) در ستون حبایی اندازه‌گیری می‌شود.

## مواد

سیال مورد آزمایش امولسیون برش‌های نفتی C<sub>13</sub> و C<sub>16</sub> در آب با درصدهای حجمی - حجمی ۰/۱ و ۰/۵ است. یک نوع ماده فعال سطحی آنیونیک به نام SDS (سدیم‌دودسیل سولفات) فرآورده‌ی شرکت Merck به مخلوط آب مقطر و C<sub>13</sub> در آب افزوده می‌شود.

پساب‌های صنعتی به‌ویژه پساب‌های نفتی دارای ترکیب‌های آلی هستند و باتوجه به اثرهای زیست‌محیطی این آلاینده‌ها، بررسی تاثیر آنها بر روی کیفیت آب و تعیین فناوری‌های برپایه آب در تصفیه آب‌های آلوده شده با نفت دارای اهمیت زیادی می‌باشد [۲، ۱]. در تصفیه زیستی آب با میکروارگانیسم‌های هوازی باید توجه داشت که مهمترین موضوع، نگهداری میزان اکسیژن در سطح مورد نیاز آنهاست. بنابراین در این‌گونه بیوراکتورها، هوادهی و انتقال اکسیژن از فاز گازی به فاز مایع یکی از مهمترین مسائلی است که باید مورد توجه قرار گیرد. همچنین انتقال جرم توسط سطح ویژه گاز - مایع کنترل می‌شود که برای دانستن این پارامتر نیاز به دانستن قطر متوسط و توزیع اندازه حباب می‌باشد. در نتیجه برای بهینه‌کردن استفاده از بیوراکتورهای ستونی حبایی برای تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی، شناخت دقیق عوامل مؤثر بر انتقال اکسیژن و هیدرودینامیک نیاز است [۵ - ۳].

پژوهش‌های اندکی در زمینه تأثیر یک فاز آلی امتزاج‌ناپذیر در محلول آبی - گاز (مخلوط‌های گاز - مایع - مایع) بر روی هیدرودینامیک و انتقال جرم انجام شده است. یوشیدا<sup>(۱)</sup> و همکاران [۶] نشان دادند که نفت سفید و n - پارافین شدت نفوذ اکسیژن بین قطره‌های روغن که بخشی از فیلم مایع را اشغال کرده کاهش داده بنابراین انتقال اکسیژن را کاهش می‌دهند. حسن و رابینسون<sup>(۲)</sup> [۷] نتیجه گرفتند که k<sub>L</sub>a با افزایش کسر حجمی روغن، در مورد n - هگزادکان افزایش و در مورد n - دودکان تا مقدار معینی از روغن کاهش می‌یابد. این تغییر در روند k<sub>L</sub>a مربوط به تغییرهای متضاد ضریب انتقال اکسیژن سمت مایع (k<sub>L</sub>) و a می‌باشد. کندو<sup>(۳)</sup> و همکاران [۸] نشان دادند که n - دکان، n - دودکان و n - هپتان در مخلوط هوا - آب، انتقال جرم از فاز گاز به فاز آبی پیوسته را افزایش داده، درحالی که آنیزول و ۲-اتیل-۱-هگزانول انتقال جرم را کاهش می‌دهند.

رولس و همکاران<sup>(۴)</sup> با اندازه‌گیری اندازه حباب به روش عکس‌برداری، نتیجه گرفتند که قطر متوسط حباب تا ۱۵٪ کاهش یافته و سطح مشترک گاز - مایع به نسبت افزایش می‌یابد [۹]. در مقابل مک میلان<sup>(۵)</sup> و همکاران نیز با استفاده از روش عکس‌برداری برای اندازه‌گیری توزیع اندازه حباب دریافتند که a با روغن

(۱) Yoshida

(۲) Hassan &amp; Robinson

(۳) Kundu

(۴) Rols

(۵) MacMillan

جدول ۱- ویژگی‌های مایع‌ها در ۲۵°C.

مایعات	علامت	کشش سطحی مخلوط $\sigma_m$ (mN/m)	کسر حجمی روغن در آب ( $\phi_{disp}$ )
آب مقطر	W	۷۴	٪۰
آب مقطر-SDS	W/SDS	۳۵	٪۰
آب-C <sub>13</sub>	C13/W 0.1%	۶۱	٪۰٫۱
آب-SDS-C <sub>13</sub>	C13/W 0.1%/SDS	۳۳	٪۰٫۱
آب-C <sub>16</sub>	C16/W 0.1% C16/W 0.5%	۶۴ ۶۰	٪۰٫۱ ٪۰٫۵

برای سنجش قطر حباب نیز از روش عکس‌برداری به وسیله یک دوربین دیجیتال با زوم بالا (Canon-PowerShot-S3IS) استفاده شده و در هر مورد در حدود ۲۰۰ الی ۲۵۰ حباب اندازه‌گیری می‌شود. حباب‌ها به صورت بیضی فرض می‌شوند. محورهای بزرگ و کوچک حباب‌ها به وسیله نرم‌افزار SigmaScan Pro. اندازه‌گیری شده و قطر کره با حجم معادل توسط معادله (۲) به دست می‌آید:

$$d = \sqrt[3]{E^2 e} \quad (2)$$

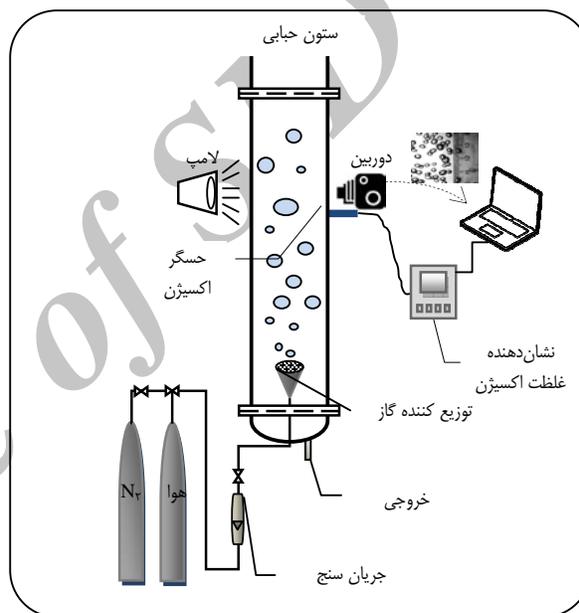
در این معادله E و e به ترتیب عبارتند از قطر بزرگ و کوچک حباب. قطر متوسط حباب  $d_{32}$  از رابطه زیر به دست می‌آید که در این رابطه،  $d_{vi}$  قطر معادل هریک از حباب‌ها می‌باشد:

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

ضریب انتقال اکسیژن به روش دینامیک اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور یک دستگاه اکسیژن متر شامل ترانس‌میتور DOMeterM300 و الکتروود Inpro6800/12/120 ساخت شرکت Mettler Toledo آلمان مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. برای حسگر اکسیژن دارای زمان پاسخگویی بزرگ،  $k_L a$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{C^* - C_L}{C^* - C_0} = \frac{k_p e^{(-k_L a \cdot t)} - k_L a e^{(-k_p \cdot t)}}{k_p - k_L a} \quad (4)$$

زمان پاسخگویی حسگر  $(\tau_p = 1/k_p)$  در این مطالعه، ۲۵ s در دمای ۲۵°C ارزیابی شد.



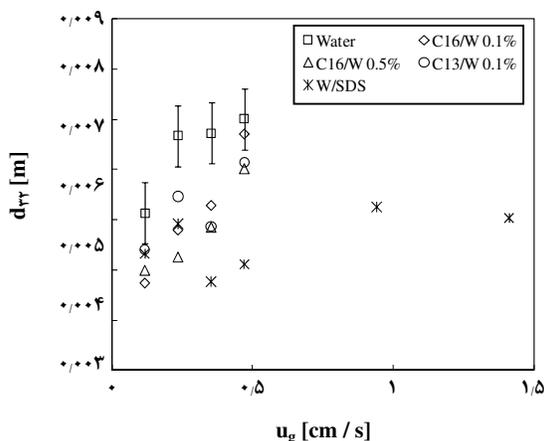
شکل ۱- طرح شمای دستگاه مورد استفاده در این مطالعه.

جدول ۱ خواص هیدروکربن‌های نفتی در آب را با غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. کشش سطحی توسط دستگاه Ring Tensiometer KRUSS-Nr.2215 اندازه‌گیری می‌شود.

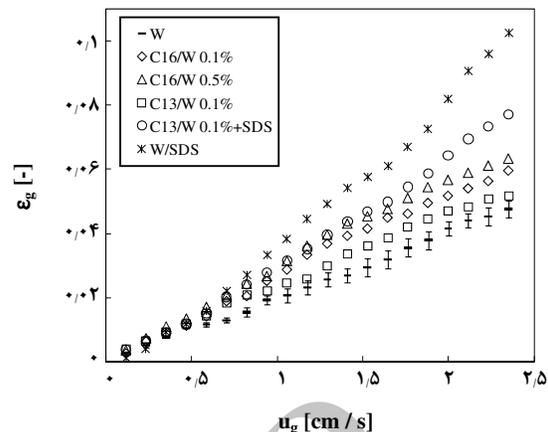
### روش انجام آزمایش‌ها

نگهداشت کلی گاز ( $\epsilon_g$ ) از روش انبساط حجمی یعنی اختلاف سطح مایع درون بیوراکتور قبل و بعد از هوادهی (H) به وسیله معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$\epsilon_g = \frac{H - H_0}{H} \quad (1)$$



شکل ۳- نمودار قطر متوسط حباب بر حسب سرعت ظاهری هوادهی برای آب و SDS/آب.



شکل ۴- نگهداشت کلی گاز برای مخلوط C<sub>16</sub> و C<sub>13</sub> با ۰.۱٪ و ۰.۵٪ در آب، با و بدون ماده فعال سطحی برحسب u<sub>g</sub>.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مواد فعال سطحی با کاهش بیشتر در اندازه حباب باعث تأثیر بیشتری در افزایش  $\epsilon_g$  می‌شوند. همچنین چنانچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود،  $\epsilon_g$  در مورد مخلوط C<sub>16</sub> در آب با ۰.۵ درصد حجمی بیشتر از مخلوط C<sub>16</sub> در آب با ۰.۱ درصد حجمی می‌باشد. با افزایش غلظت آلاینده‌ها بر روی سطح حباب، سرعت صعود حباب‌ها کاهش می‌یابد. به طور کلی این کاهش می‌تواند مربوط به کاهش درصد نسبی حباب‌ها در غلظت‌های بالاتر مولکول‌های آلوده کننده و کاهش کشش سطحی (جدول ۱) با افزایش غلظت هیدروکربن باشد [۱۲]. همچنین، افزایش غلظت آلاینده‌های هیدروکربنی، حباب‌های کوچکتری تولید کرده و در نتیجه  $\epsilon_g$  افزایش می‌یابد.

#### قطر متوسط حباب

شکل ۳ منحنی تغییرهای قطر متوسط حباب را بر حسب سرعت ظاهری هوادهی برای مخلوط برش‌های نفتی در آب و مخلوط ماده فعال سطحی در آب نشان می‌دهد. مقدارهای  $d_{32}$  در این مطالعه در بازه ۷-۴ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به شکل ۳ چنانچه دیده می‌شود، مقدارهای  $d_{32}$  با افزایش سرعت ظاهری هوادهی افزایش می‌یابد. در سرعت‌های هوادهی بالاتر، تلاطم و سرعت فاز مایع افزایش یافته و در نتیجه برخورد حباب‌ها به یکدیگر، پدیده به هم پیوستن حباب‌ها ایجاد شده و با افزایش سرعت ظاهری هوادهی، پدیده به هم پیوستن حباب‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه باعث افزایش در قطر متوسط حباب می‌شود.

#### نتیجه‌ها و بحث

##### نگهداشت کلی گاز

شکل ۲، نمودار نگهداشت کلی گاز را برای سیالات مختلف به کار رفته در این کار، به عنوان تابعی از سرعت ظاهری هوادهی ( $u_g$ ) نشان می‌دهد. بازه‌ی خطای نشان داده شده در شکل میزان انحراف معیار استاندارد مقدارهای ارزیابی شده می‌باشد. با توجه به نتیجه‌ها، مقدارهای  $\epsilon_g$  برای همه سیالات با افزایش  $u_g$  افزایش می‌یابد. با افزایش قدرت ورود گاز در واحد حجم، تعداد حباب‌های بیشتری وارد فاز مایع شده و در نتیجه نگهداشت گاز افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل ۲ دیده می‌شود که مقدارهای  $\epsilon_g$  برای سیال حاوی مخلوط آلاینده‌های نفتی در آب، بالاتر از آب مقطر می‌باشد. مطابق با مقدارهای تجربی کشش سطحی در جدول ۱، حضور آلاینده‌های نفتی در آب باعث کاهش در کشش سطحی محلول می‌شود. با کاهش کشش سطحی، حباب‌های کوچکتری تولید شده و حباب‌های کوچکتر دارای سرعت صعود کمتری می‌باشند، در نتیجه  $\epsilon_g$  با کاهش کشش سطحی افزایش می‌یابد.

چنانچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقدارهای نگهداشت گاز برای مخلوط ماده فعال سطحی در آب بیشتر از آب خالص و حتی برش‌های نفتی در آب می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۲ دیده می‌شود که، هنگامی که ماده فعال سطحی به مخلوط C<sub>13</sub> در آب با ۰.۱ درصد حجمی افزوده می‌شود،  $\epsilon_g$  افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۱، مواد فعال سطحی به علت حلالیتشان در آب در مقایسه با آلاینده‌های هیدروکربنی، کشش سطحی را بیشتر کاهش می‌دهند.

به هم پیوستن حباب و پدیده شکستن حباب پایین تر، انتقال الگو در  $u_g$  بالاتری دیده می شود.

### ضریب حجمی انتقال اکسیژن

شکل ۵ ضریب حجمی انتقال اکسیژن را برای مخلوط  $C_{13}$  و  $C_{16}$  با ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی در آب در مقایسه با آب مقطر در  $u_g$  مختلف نشان می دهد. چنانچه از این نمودار مشاهده می شود، مقادیر  $k_L a$  برای همه مایعات با افزایش  $u_g$  افزایش می یابد. همچنین شکل ۵ نشان می دهد که مقادیر  $k_L a$  برای مخلوط های آلاینده های نفتی در آب بالاتر از آب مقطر می باشد. این افزایش می تواند به علت کاهش در اندازه حباب برای مخلوط هیدروکربن در آب بخاطر کاهش در کشش سطحی در مقایسه با آب مقطر و در نتیجه افزایش سطح ویژه گاز - مایع باشد. همچنین به طور کلی، حلالیت اکسیژن در محلول های آبی کمتر از  $10 \text{ mg/L}$  می باشد [۱۳]. در حالی که حلالیت اکسیژن در هیدروکربن ها بیشتر از ۲۰ برابر حلالیت اکسیژن در آب است (نسبت حلالیت  $(m_g > 1)$ ) [۱۴]. با توجه به شکل ۵ دیده می شود که مقادیر ضریب حجمی انتقال اکسیژن در مورد مخلوط  $C_{16}$  با درصد حجمی ۰/۵٪، بالاتر از مخلوط  $C_{16}$  با درصد حجمی ۰/۱٪ می باشد. بنابراین با افزایش غلظت آلاینده های نفتی در آب، مقادیر  $k_L a$  افزایش می یابد. با افزایش غلظت هیدروکربن، حضور قطره های روغن در فیلم مایع اطراف حباب های گاز افزایش یافته و باعث کاهش گرایش حباب ها به بهم پیوستن می شود. در نتیجه، با افزایش غلظت هیدروکربن ها، اندازه حباب ها کاهش یافته و سطح ویژه گاز - مایع و در نتیجه  $k_L a$  افزایش می یابد. شکل ۶ تاثیر ماده فعال سطحی (SDS) بر روی  $k_L a$  در آب مقطر و مخلوط  $C_{13}$  در آب (۰/۱٪ حجمی - حجمی) را به عنوان تابعی از سرعت هوادهی نشان می دهد. با افزودن ماده فعال سطحی به مخلوط هیدروکربن در آب، ضریب انتقال جرم کاهش می یابد.

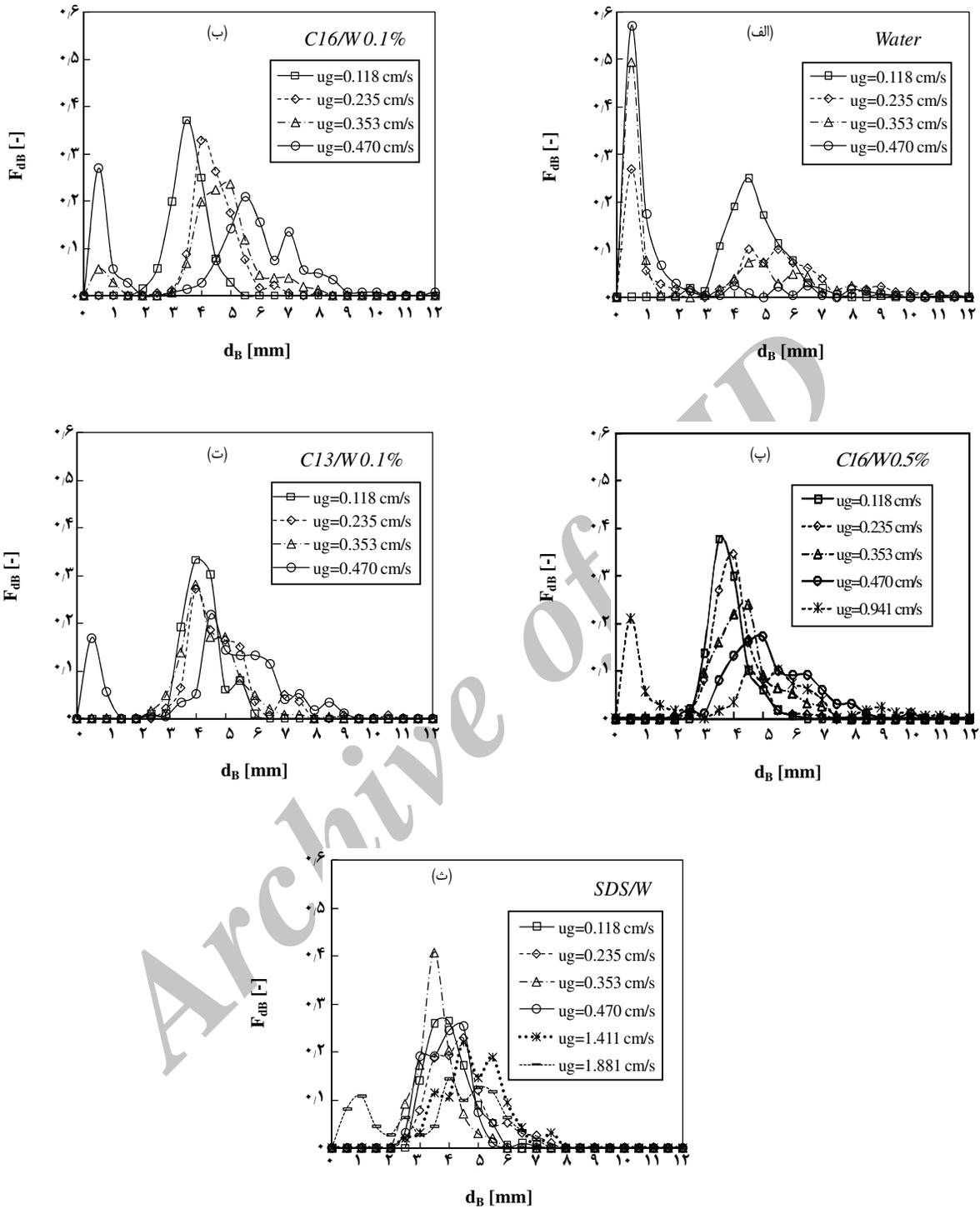
### روابط تجربی

به کمک نرم افزار DataFit و با استفاده از داده های تجربی به دست آمده در این مطالعه برای مخلوط های آب مقطر و برش های نفتی در آب روابطی برای نگهداشت کلی گاز و ضریب حجمی انتقال اکسیژن برحسب سرعت ظاهری هوادهی و کشش سطحی ارائه شده است:

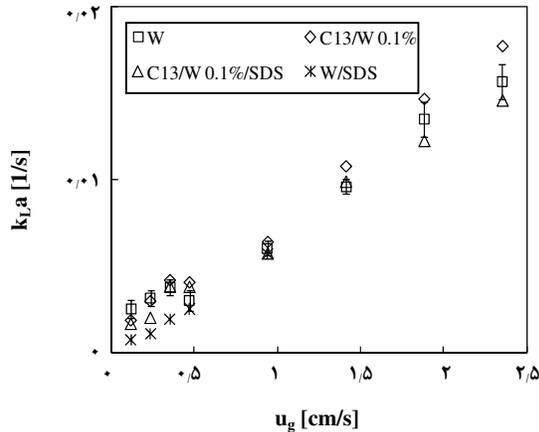
شکل ۳ همچنین نشان می دهد که حضور آلاینده های نفتی ( $C_{16}$  و  $C_{13}$ ) در آب، مقادیر قطر متوسط حباب را کاهش می دهد. کاهش در قطر متوسط حباب می تواند به این علت باشد که حضور مولکول های این ترکیبات آلی در فیلم مایع اطراف حباب و بر روی سطح حباب، باعث کاهش در کشش سطحی آب در مقایسه با آب مقطر شده و باعث افزایش در پیشگیری از پدیده بهم پیوستن حباب ها شده، سبب تأخیر در پیوستن حباب ها می شوند و در نتیجه قطر متوسط حباب ها در این مخلوط کوچکتر از آب مقطر می باشد. چنانچه در شکل ۳ دیده می شود، اندازه حباب با افزودن مواد فعال سطحی بیشتر از ترکیبات هیدروکربنی کاهش می یابد.

### توزیع اندازه حباب

شکل ۴ نمودار توزیع اندازه حباب را برای مخلوط آب مقطر، امولسیون های ترکیبات نفتی ( $C_{16}$  و  $C_{13}$ ) در آب و ماده فعال سطحی در آب در  $u_g$  مختلف نشان می دهد. در  $u_g$  پایین گاز، رژیم جریان هموزن حبابی دیده می شود. با افزایش  $u_g$  سرعت فاز مایع و در نتیجه میزان تلاطم در مایع بیشتر شده، و پدیده بهم پیوستن و شکستن حباب ها باعث می شود که دو نوع حباب های بزرگ و کوچک ایجاد شود. با توجه به نمودارهای توزیع اندازه حباب مربوط به مخلوط  $C_{16}$  و  $C_{13}$  در آب با ۰/۱٪ (شکل ۴ ب و ت) دیده می شود که آلاینده های نفتی با کاهش پدیده بهم پیوستن حباب، توزیع اندازه حباب را تغییر می دهند. انتقال از توزیع تک قله ای به دو قله ای در مورد آب مقطر در  $0.235 \text{ cm/s}$  اتفاق می افتد، در حالی که با حضور آلاینده های نفتی در مخلوط، در  $u_g$  بالاتری توزیع اندازه حباب دو قله ای دیده می شود. با توجه به نتیجه های توزیع اندازه حباب می توان دید که آلاینده ها در مقایسه با آب مقطر در سرعت های هوادهی یکسان، باعث افزایش تعداد حباب های بزرگ می شوند، از سوی دیگر، در حضور آلاینده ها، اندازه حباب ها در نوع حباب های بزرگ، کاهش می یابد. این کاهش در اندازه حباب، به طور کلی، باعث کاهش در قطر متوسط حباب و در نتیجه سطح ویژه گاز - مایع می شود. چنانچه دیده می شود، اندازه حباب در مورد مخلوط ماده فعال سطحی در آب کوچکتر از مخلوط هیدروکربن در آب می باشد. با مقایسه دو شکل (۴ - ب و پ) دیده می شود که با افزایش غلظت آلاینده های نفتی، به خاطر جلوگیری بیشتر پدیده



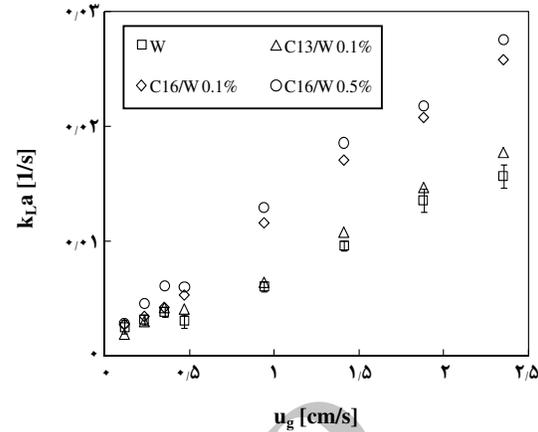
شکل ۴- نمودار توزیع اندازه حباب در سرعت‌های هوادهی مختلف برای مخلوط‌های الف) آب مقطر؛ ب) C<sub>16</sub> در آب با ۱٪ درصدجمی؛ ج) C<sub>16</sub> در آب با ۵٪ درصدجمی؛ د) C<sub>13</sub> در آب با ۱٪ درصدجمی و ه) ماده فعال سطحی SDS در آب.



شکل ۶- ضریب انتقال اکسیژن بر حسب  $u_g$  برای مخلوط  $C_{13}$  در آب (حجمی -حجمی ۱٪) با و بدون ماده فعال سطحی.

سطحی و همچنین به دلیل افزایش حلالیت اکسیژن در هیدروکربن‌ها، باعث افزایش در مقادیر نگهداشت گاز و همچنین افزایش در  $k_{La}$  به ویژه در سرعت‌های هوادهی بالاتر می‌شوند. حضور آلاینده‌های نفتی در فیلم مایع اطراف حباب و سطح مشترک گاز - مایع، با کاهش کشش سطحی و جلوگیری از پدیده به هم پیوستن حباب‌ها، قطر متوسط حباب را کاهش داده و باعث تأخیر در رژیم انتقالی می‌شوند. با افزایش غلظت آلاینده‌های نفتی، مقدارهای  $k_{La}$  و  $\varepsilon_g$  افزایش می‌یابد. همچنین حضور مواد فعال سطحی بر روی سطح حباب‌ها، با افزایش مقاومت در برابر انتقال اکسیژن، باعث کاهش در ضریب حجمی انتقال اکسیژن می‌شوند.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸، ۳، ۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹، ۱۱، ۲۵



شکل ۵ - ضریب انتقال اکسیژن برای مخلوط  $C_{16}$  و  $C_{13}$  با ۱٪ و ۰٫۵ درصد حجمی در آب بر حسب سرعت ظاهری هوادهی.

$$\varepsilon_g = 1,19 u_g^{1,01} \sigma^{-0,29} \quad (5)$$

$$k_{La} = 0,27 u_g^{0,89} \sigma^{-0,52} \quad (6)$$

در این رابطه  $\sigma$  بیانگر کشش سطحی مخلوط می‌باشد. مقدارهای  $R^2$  برای این معادله‌ها به ترتیب ۰٫۹۷ و ۰٫۹۵ می‌باشد. ۹۶٪ داده‌ها با خطای ۲۵٪ در محدوده این معادله‌ها قرار دارند.

### نتیجه‌گیری

ضریب حجمی انتقال اکسیژن و نگهداشت گاز با افزایش سرعت هوادهی، به علت افزایش تعداد حباب‌های کوچکتر در مایع و در نتیجه افزایش سطح مشترک گاز - مایع، افزایش می‌یابد. حضور آلاینده‌های هیدروکربنی در آب به‌خاطر کاهش در کشش

### مراجع

- [1] Jajuee B., Margaritis A., Karamanev D., Bergougnou M.A., Influence of Dissolved Hydrocarbons on Volumetric Oxygen Mass Transfer Coefficient in a Novel Airlift Contactor, *Chemical Engineering Science*, **61**, p. 4111 (2006).
- [2] Mehrnia M.R., Towfighi J., Bonakdarpour B., Akbarnegad M.M., Influence of Top Section Design and Draft-Tube Height on the Performance of Airlift Bioreactors Containing Water-in-Oil Microemulsion, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **79**, p. 260 (2004).

- [3] Bouaifi M., Hebrard G., Bastoul D., Roustan M., A Comparative Study of Gas Holdup, Bubble Size, Interfacial Area and Mass Transfer Coefficients in Stirred Gas-Liquid Reactors and Bubble Columns, *Chemical Engineering Processing*, **40**, p. 97 (2001).
- [4] Schafer R., Marten C., Eigenberger G., Bubble Size Distributions in a Bubble Column Reactor Under Industrial Conditions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **26**, p. 595 (2002).
- [5] Asgharpour M., Mehrnia M.R., Mostoufi N., Effect of Surface Contaminants on Oxygen Transfer in Bubble Column Reactors, *Biochemical Engineering Journal*, **49**, p. 351 (2010).
- [6] Yoshida F., Yamane T., Miyamoto Y., Oxygen Absorption Into Oil-in-Water Emulsions: a Study on Hydrocarbon Fermentors, *Industrial Engineering Chemistry Process Design & Development*, **9**, p. 570 (1970).
- [7] Hassan I.T.M., Robinson C.W., Oxygen Transfer in Mechanically Agitated Aqueous Systems Containing Dispersed Hydrocarbon, *Biotechnology and Bioengineering*, **19**, p. 661 (1977).
- [8] Kundu A., Dumont E., Duquenne A.M., Delmas H., Mass Transfer Characteristics in Gas-Liquid-Liquid System, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **81**, p. 640 (2003).
- [9] Rols J.L., Condoret J.S., Fonade C., Goma G., Mechanism of Enhanced Ooxygen Transfer in Fermentation Using Emulsified Oxygen-Vectors, *Biotechnology and Bioengineering*, **35**, p. 427 (1990).
- [10] MacMillan J.D., Wang D.I. C., Mechanisms of Oxygen Transfer Enhancement During Submerged Cultivation in Perfluorochemicalin-Water Dispersions, *Analns New York Academy of Sciences*, **589**, p. 283 (1990).
- [11] Painmanakul P., Loubière K., Hébrard G., Mietton-Peuchot M., Roustan M., Effect of Surfactants on Liquid-Side Mass Transfer Coefficients, *Chemical Engineering Science*, **60**, p. 6480 (2005).
- [12] Prakash A., Margaritis A., Li H., Hydrodynamics and Local Heat Transfer Measurements in a Bubble Column with Suspension of Yeast, *Biochemical Engineering Journal*, **9**, p. 155 (2001).
- [13] Ju L.K., Ho C.S., Oxygen Diffusion Coefficient and Solubility in N-Hexadecane, *Biotechnology and Bioengineering*, **34**, p. 1221 (1989).
- [14] Clarke K.G., Correia L.D.C., Oxygen Transfer in Hydrocarbon-Aqueous Dispersions and Its Applicability to Alkane Bioprocesses: A Review, *Biochemical Engineering Journal*, **39**, p. 405 (2008).