

## بررسی تصفیه فاضلاب در بیوراکتور غشایی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

میترا بیات<sup>۱</sup>، محمدرضا مهرنیا<sup>۲\*</sup>، نوید مستوفی<sup>۳</sup>، مهدی رجبی‌هامانه<sup>۴</sup>

mitra.bayat@ut.ac.ir

۱. کارشناس ارشد گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

mostoufi@ut.ac.ir

۳. استاد گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

rajabi@ut.ac.ir

۴. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۶/۲۶

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۷

### چکیده

بیوراکتور غشایی یکی از فناوری‌های پیشرفته مورد توجه برای تصفیه فاضلاب و بازیافت آب است که با ترکیب فرایند تصفیه بیولوژیکی لجن فعال و فیلتراسیون غشایی صورت می‌گیرد. بیوراکتور غشایی در مقایسه با فرایندهای متداول تصفیه فاضلاب دارای مزایایی از جمله بازدهی بالای تصفیه است و به فضای کمتری نیاز دارد. از مهم‌ترین مشکلاتی که فرایندهای غشایی با آن مواجه‌اند، گرفتگی غشاست که کارایی فرایند را کاهش و هزینه‌های آن را افزایش می‌دهد. بنابراین، شناسایی ویژگی‌های مؤثر در این پدیده و از جمله هیدرودینامیک سامانه از موضوعات مهم پژوهش است. دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری قدرتمند برای درک ارتباط بین مکانیک سیالات و گرفتگی در بیوراکتورهای غشایی است. در این تحقیق اثر هیدرودینامیکی جریان چندفازی در گرفتگی غشا در یک بیوراکتور غشایی هواگرد با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در شرایط عملیاتی مختلف شامل چهار نرخ هوادهی و قطر حباب مربوطه و دو غلظت توده زیستی مطالعه شد. شبیه‌سازی سه‌بعدی بیوراکتور غشایی به صورت دو و سه‌فازی با استفاده از مدل چندفازی اولرین و مدل اغتشاش  $k-\varepsilon$  انجام شده است. نتایج نشان داد با افزایش دبی هوادهی و غلظت توده زیستی، تنش برشی گاز و مایع بر سطح غشا افزایش و در نتیجه گرفتگی غشا کاهش می‌یابد. همچنین، اثر توزیع و رفتار حباب بر نتایج بررسی شد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که استفاده از معادلات گرانبولی اولر در شبیه‌سازی سه‌فازی سامانه با در نظر گرفتن اندازه لخته‌ها، سبب نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی به حالت واقعی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به خوبی با داده‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد که تأییدی بر صحت شبیه‌سازی و مدل موازنه جمعیتی مورد استفاده است.

### کلیدواژه

بازیافت آب، بیوراکتور غشایی، تصفیه فاضلاب، دینامیک سیالات محاسباتی، گرفتگی.

### ۱. سرآغاز

معمول لجن فعال و جداسازی غشایی است. بهره‌گیری از فرایندهای جداسازی غشایی در کنار فرایندهای مفید بیولوژیکی و متناسب‌بودن این فرایندها با الزامات محیط‌زیستی، سبب برتری‌های متعددی در این روش تصفیه در مقایسه با سایر روش‌های معمول تصفیه فاضلاب شده است. مزایا و معایب بیوراکتور غشایی به اختصار در جدول ۱ ارائه شده است (Pajoum Shariati et al., 2013).

با توجه به اهمیت روزافزون مسائل محیط‌زیستی و استانداردهای وضع‌شده از سوی سازمان جهانی محیط‌زیست در خصوص کیفیت آب و هوا و شاخص‌های بیولوژیکی و از طرفی توسعه روزافزون صنایع، تصفیه فاضلاب و بازیافت آب اهمیت ویژه‌ای یافته است. یکی از روش‌های پیشرفته تصفیه فاضلاب و بازیافت آب، بیوراکتورهای غشایی (MBR)<sup>۱</sup> است که ترکیبی از فرایند

## جدول ۱. مزایا و معایب بیوراکتور غشایی

مزایا	معایب
توانایی بهتر در نگهداری مواد معلق جامد و مواد حل شده	هزینه بالای سرمایه‌گذاری
توانایی حذف تمام باکتری‌ها و ویروس‌ها	
امکان کنترل جمعیت میکروبی و انعطاف‌پذیری طی فرایند	
نیاز کم به فضا و سطح	
قدرت تحمل بالا در مقابل تنش‌های فاضلاب‌های مختلف	

شناسایی پروفایل‌های جریان‌ی بهینه برای کاهش گرفتگی را دنبال کرده‌اند. مشخص شده است که گرفتگی غشا با افزایش دبی هوادهی تا حدی مشخص کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش دبی هوادهی بهبود بیشتری در کاهش گرفتگی حاصل نمی‌شود.

برای مدول‌های صفحه تخت بسیاری از متغیرهای طراحی، عملیاتی و هندسی مانند قطر حباب، فاصله غشاها و حضور بافل‌ها و دیواره‌ها نیاز به بررسی و بهینه‌شدن دارند (Bohm et al., 2012). در تحقیق Khalili-Garakani و همکاران (۲۰۱۱) اثر شدت هوادهی، تنش، سطح مایع و زاویه بافل روی سرعت چرخش سیال و گرفتگی در بیوراکتور غشایی هواگرد به کمک دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است. آن‌ها از مدل اولرین دوفازی و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تغییر زاویه بافل از ۹۰ به ۸۵ درجه سبب افزایش سرعت چرخش سیال و در نتیجه موجب افزایش میزان تنش روی غشا می‌شود. با محاسبه مقاومت‌های سری تشکیل شده روی غشا و نتایج تنش حاصل از شبیه‌سازی یک رابطه بین مقاومت کل و تنش هر سیال به دست آمد.

در شبیه‌سازی‌های پیشین انجام شده روی بیوراکتورهای غشایی صفحه تخت، غشا به صورت صفحه‌ای صلب و فاقد مایع خروجی در نظر گرفته شده است. در مقاله پیش رو اثر تخلخل غشا و خروج مایع تصفیه شده از سطح غشا در مدل وارد شده است که موجب نزدیک‌تر شدن نتایج

گرفتگی غشا به منزله مهم ترین محدودیت توسعه این فناوری از موضوعات مورد توجه محققان در سال‌های اخیر است (Nouri et al., 2014; Meng et al., 2009; Hosseinzadeh et al., 2013). برای کاهش گرفتگی غشا از روش‌های مختلفی استفاده و مرتباً راهکارهای جدید پیشنهاد و به کار گرفته می‌شود (Drews, 2010). در میان متغیرهای مختلف عملیاتی هوادهی مهم ترین عامل مؤثر در کاهش گرفتگی غشا و افزایش کارایی فرایند تصفیه است (Zhang et al., 2011; Cui et al., 2003). با وجود نقش عمده هوادهی در کاهش گرفتگی غشا، انرژی مصرفی برای هوادهی بیوراکتور بیشترین سهم هزینه عملیاتی را تشکیل می‌دهد به طوری که در حدود ۳۰-۵۰ درصد از انرژی مصرفی برای تصفیه فاضلاب با استفاده از بیوراکتور غشایی به هوادهی اختصاص دارد (Judd, 2008). بنابراین، بهبود عملکرد بیوراکتور غشایی از طریق بهینه‌سازی شرایط عملیاتی از اهمیت فراوانی برخوردار است.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزاری قدرتمند برای درک ارتباط بین مکانیک سیالات و گرفتگی در بیوراکتورهای غشایی است و در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی با بهره‌گیری از آن به بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی و طراحی در هیدرودینامیک و گرفتگی در بیوراکتورهای غشایی پرداخته‌اند (Amini et al., 2013; Buetchorn et al., 2011). Ndinisa و همکاران (2006a) به بررسی خصوصیات جریان دو فازی در بیوراکتور غشایی غوطه‌ور با مدول صفحه تخت پرداخته و هدف

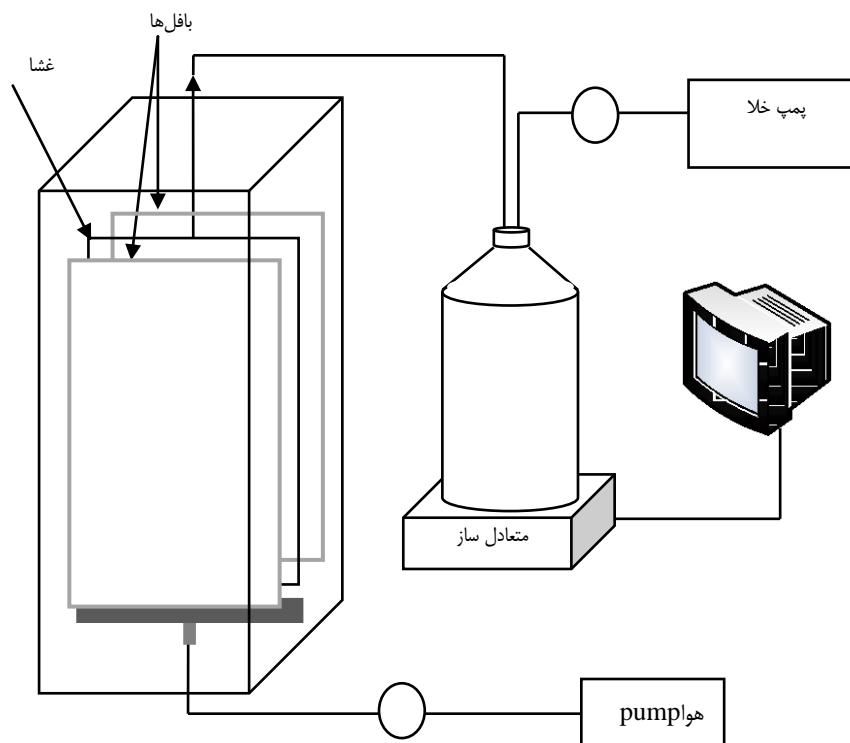
طریق ترازو سنجیده می‌شود. شکل ۱ نمایی از دستگاه را نشان می‌دهد که اجزای آن در ادامه شرح داده خواهند شد. شکل ۲ بیوراکتور غشایی تحت بررسی را نشان می‌دهد. این بیوراکتور دارای ابعادی برابر با طول ۲۳ cm، عرض ۱۷ cm و ارتفاع ۷۰ cm و ارتفاع مایع داخل آن برابر با ۵۵ cm است. در قسمت میانی بیوراکتور یک مدول غشایی صفحه‌ای به صورت عمودی قرار می‌گیرد. مدول غشا درون شیارهایی از پلکسی‌گلاس قرار گرفته است که به وسیله آن خارج کردن غشا از داخل بیوراکتور به سهولت انجام می‌شود. دو بافل به طول ۳۱/۵ cm به موازات و در دو سمت غشا سبب ایجاد مناطق بالابرف و ناودانی در بیوراکتور شده است که با کاربرد این دو بافل یک بیوراکتور هواگرد با گردش داخلی شکل می‌گیرد. در این سامانه چرخش سیال به کمک پمپ هوادهی ایجاد شده است.

شبه‌سازی به حالت تجربی می‌شود. در این مقاله تأثیر تغییرات دبی هوادهی و غلظت توده زیستی لجن (MLSS) روی هیدرودینامیک و عملکرد فیلتراسیون و گرفتگی غشا در بیوراکتور غشایی هواگرد بررسی شده است. در این راستا شبه‌سازی دوفازی لجن فعال و هوا و سه‌فازی آب-لجن فعال-هوا انجام شده است. همچنین، با بهره‌گیری از مدل موازنه جمعیتی، توزیعی از اندازه حباب‌ها در نظر گرفته شده است تا الگوی رفتاری حباب‌های هوا و تأثیرش بر هیدرودینامیک و عملکرد فیلتراسیون بررسی شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه آزمایشگاهی استفاده شده متشکل از یک بیوراکتور هواگرد ۲۵ لیتری با غشای مسطح غوطه‌ور محتوی لجن فعال است و وزن خروجی جریان برای محاسبه دبی از



شکل ۱. طرح دستگاه آزمایشگاهی

## جدول ۲. ترکیبات فاضلاب استفاده شده

غلظت (mg/L)	ترکیبات
۱۳۵۰	گلوکز
۲۱۵	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
۳۸	(NH <sub>4</sub> )H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
۲۷/۵	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
۲۰	KCl
۲/۵	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
۵۵۷/۷	NaHCO <sub>3</sub>



شکل ۲. بیوراکتور غشایی مورد مطالعه

آزمایش‌ها با هدف بررسی اثر متغیرهای مهم عملیاتی از جمله هوادهی و غلظت توده زیستی در گرفتگی غشا انجام شده است. هوادهی در مقادیر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ متر مکعب بر ساعت تنظیم و در تمام مقادیر غلظت توده زیستی ۸ و ۱۲ گرم بر لیتر، آزمایش‌ها انجام و میزان دبی عبوری از غشا، غلظت زیست‌توده، مقاومت غشا و نگهداشت گاز اندازه‌گیری شد.

## ۲.۲. مدل‌سازی سامانه

دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی بیوراکتور غشایی به صورت سه‌بعدی به کار رفته است. به علت متقارن بودن مخزن تصفیه و مدول غشا، از دو محور تقارن استفاده و تنها یک چهارم سامانه شبیه‌سازی شده است. صفحه بالایی بیوراکتور به منزله خروجی فشار تعریف شده است تا هوای خروجی از بیوراکتور وارد اتمسفر شود. توزیع‌کننده گاز به صورت یک صفحه ورودی برای گاز با سرعتی برابر سرعت ظاهری حباب‌ها در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی دو و سه‌فازی، با توجه به کارهای انجام‌شده محققان دیگر از معادله اولرین استفاده شده است (Wang et al., 2010; Kang et al., 2008; Brannock et al., 2009). ویسکوزیته و دانسیته سیالات در معادلات شبیه‌سازی نقشی مؤثر دارند و به طور معمول مقدار ثابتی برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق نیز شبیه‌سازی با ثابت در نظر گرفتن ویسکوزیته و دانسیته برای هوا و لجن فعال انجام شده است (Khalili-

برای توزیع هوا از یک توزیع‌کننده حباب ریز به شکل مستطیل که جنس چارچوب آن از تفلون و سطح آن از جنس لاستیک با منافذی به اندازه حداکثر ۱ میلی‌متر است استفاده شده است. برای غشای بیوراکتور از مدول‌های استاندارد آزمایشگاهی مسطح شرکت کوبوتا به طول ۳۰ و عرض ۲۱ سانتی‌متر که حدود ۰/۱۱۶ متر مربع مفید برای فیلتراسیون داشت، استفاده شده است. فشار عملیاتی در بیوراکتورهای غشایی معمولاً در محدوده ۰/۱ تا ۰/۴ بار است که با هدف دستیابی به بیشترین میزان شار مایع خروجی از غشا، این آزمایش‌ها در فشار ۰/۴ بار انجام شدند.

فاضلاب از تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران تهیه شد. پرورش آن برای سازگاری با محیط و رشد تا غلظت مناسب، حدود ۲ ماه طول کشید. ترکیبات فاضلاب در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. گلوکز، (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> و (NH<sub>4</sub>)H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> به ترتیب به منزله منبع کربن، نیتروژن و فسفر استفاده شدند. دیگر مواد مغذی و ترکیبات قلیایی (مانند NaHCO<sub>3</sub>) نیز به راکتور اضافه می‌شدند. محدوده غلظت توده زیستی در بیوراکتورهای غشایی بین ۶ تا ۲۰ گرم بر لیتر و در بیشتر موارد در محدوده ۸ تا ۱۲ گرم بر لیتر است (Judd, 2006) که در این تحقیق غلظت‌های ۸ و ۱۲ به منزله غلظت‌های پایین و بالای توده زیستی در نظر گرفته شده‌اند.

است (خلیلی گرکانی، ۱۳۸۸). داده‌های تجربی در مدل موازنه جمعیتی وارد شده‌اند تا الگوی رفتاری توزیع حباب‌ها بررسی شود. ده کلاس حباب با امکان اجتماع و شکست حباب‌ها در غلظت توده زیستی ۸ g/L و در چهار دبی هوادهی مطالعه شده است.

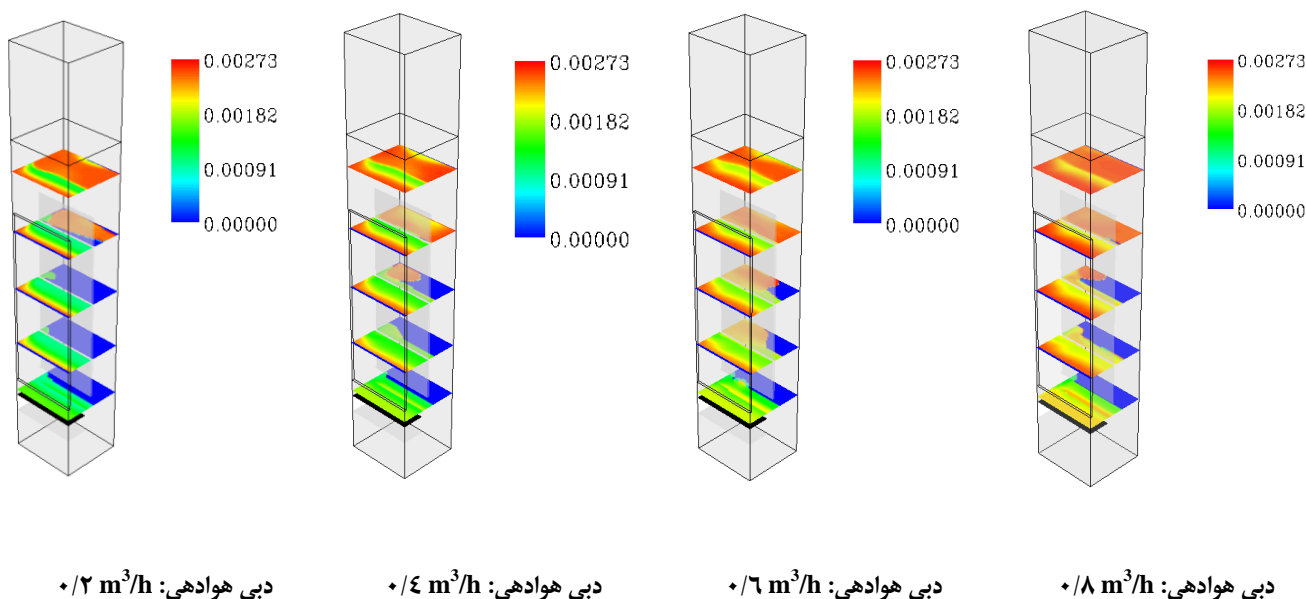
شکل ۳ بیانگر تغییرات قطر حباب در چهار دبی هوادهی مختلف در ۵ مقطع از بیوراکتور است که این مقاطع توزیع اندازه حباب‌ها را از بالای صفحه توزیع‌کننده هوا تا صفحه‌ای در نزدیکی سطح آزاد مایع نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش دبی هوادهی، سهم حباب‌های بزرگ‌تر در سامانه افزایش می‌یابد. پس از ورود حباب‌های هوا از توزیع‌کننده، اجتماع و شکست حباب‌ها طی مسیر حرکت آن‌ها به سمت سطح آزاد مایع روی می‌دهد و افزایش تدریجی قطر حباب در این مسیر مشاهده می‌شود. حباب‌هایی با قطر بزرگ عموماً در ارتفاع بالا و نزدیکی صفحه غشا و دیواره بیوراکتور دیده می‌شوند و در کنار بافل‌ها و بالای آن‌ها عمدتاً حباب‌های کوچک‌تری ایجاد شده است.

(Garakani et al., 2009). از مدل اغتشاش  $k-\varepsilon$  برای بیان اغتشاش سامانه استفاده شده که مناسب‌ترین و پرکاربردترین مدل برای شبیه‌سازی سامانه‌های متوسط و بزرگ است و بین صحت محاسبات و بازدهی آن تناسب خوبی برقرار می‌کند (Ndinisa et al., 2006b; Khalili-Garakani et al., 2011). همچنین، توزیعی از اندازه حباب‌ها بر اساس نتایج تجربی و با استفاده از مدل موازنه جمعیتی در مدل‌سازی وارد شده است.

### ۳. نتایج

#### ۱.۳. بررسی وضعیت حباب‌ها در سامانه تصفیه فاضلاب لجن فعال - هوا

با توجه به اهمیت حباب‌ها و توزیع آن‌ها در بیوراکتور در این قسمت ابتدا به بررسی صحت استفاده از قطر متوسط حباب در شبیه‌سازی پرداخته شد. مدل موازنه جمعیتی امکان تعریف توزیعی از اندازه حباب‌ها در سامانه فراهم و مطالعه دقیق‌تر فاز گاز را میسر می‌کند. در تحقیق پیشین در شرایط مشابه، توزیع اندازه حباب‌ها در دبی‌های مختلف هوادهی در نزدیکی توزیع‌کننده هوا تعیین شده



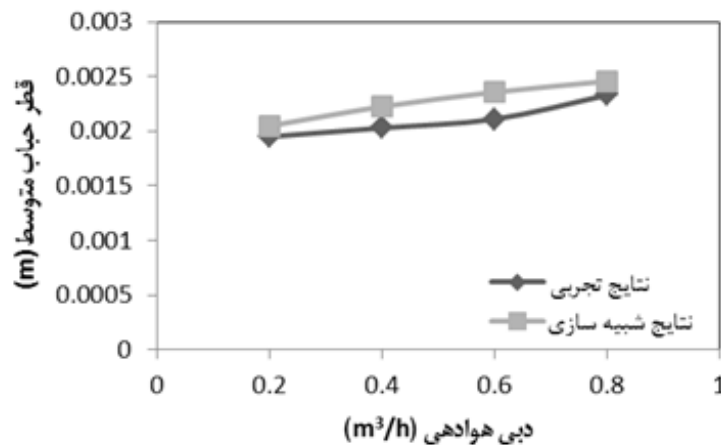
شکل ۳. تغییرات قطر حباب در چهار دبی هوادهی مختلف در پنج مقطع از بیوراکتور (نمای متقارن)

زیستی متفاوت انجام شد. نتایج شبیه‌سازی برای نگهداشت گاز در دو غلظت توده زیستی ۸ و ۱۲ g/L و چهار دبی هوادهی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ m<sup>3</sup>/h در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، افزایش دبی هوادهی و قطر حباب متناظر با آن، موجب افزایش نگهداشت گاز در بیوراکتور می‌شود. افزایش قطر حباب به علت افزایش سرعت صعود اثر معکوس در نگهداشت دارد، اما افزایش دبی هوا و رشد قطر حباب در مجموع به افزایش نگهداشت گاز می‌انجامند. همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت توده زیستی و در نتیجه افزایش ویسکوزیته فاز مایع، حباب‌های بیشتری در بالابر به دام می‌افتند که به افزایش نگهداشت گاز منجر می‌شود.

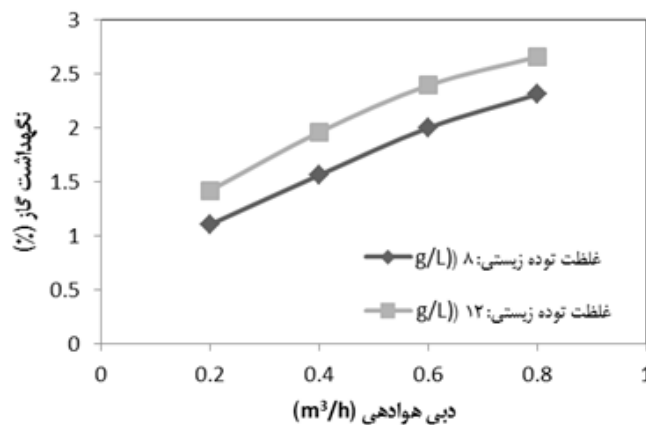
در شکل ۴ قطر حباب متوسط شبیه‌سازی با قطر متوسط نتایج تجربی مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی به خوبی با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارد که تأییدی بر صحت شبیه‌سازی و مدل موازنه جمعیتی استفاده شده است. بنابراین، در ادامه از قطر متوسط حباب برای شبیه‌سازی استفاده شد.

### ۲.۳. بررسی اثر تغییرات دبی هوادهی و غلظت توده زیستی در سامانه تصفیه فاضلاب لجن فعال - هوا

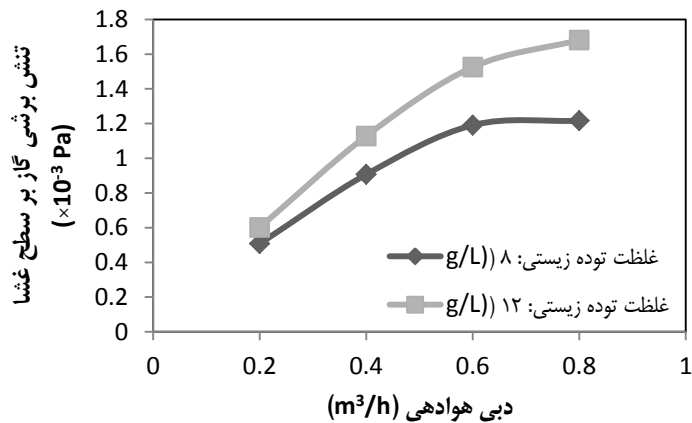
به منظور بررسی تأثیر تغییرات دبی هوادهی و غلظت توده زیستی در گرفتگی غشا و بازدهی فرایند تصفیه، شبیه‌سازی دوفازی بیوراکتور در چهار دبی هوادهی و دو غلظت توده



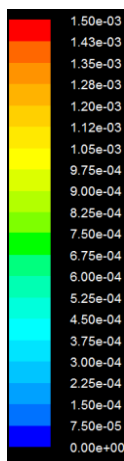
شکل ۴. مقایسه قطر حباب متوسط تجربی و شبیه‌سازی



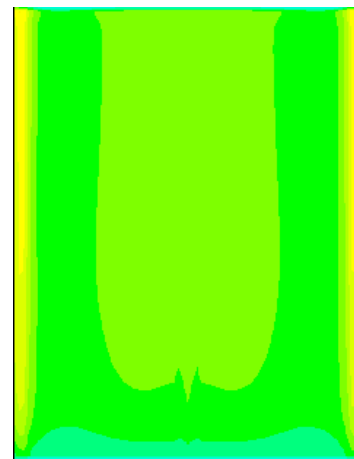
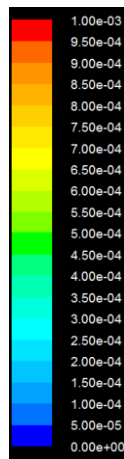
شکل ۵. تأثیر دبی هوادهی در نگهداشت گاز در غلظت‌های مختلف توده زیستی



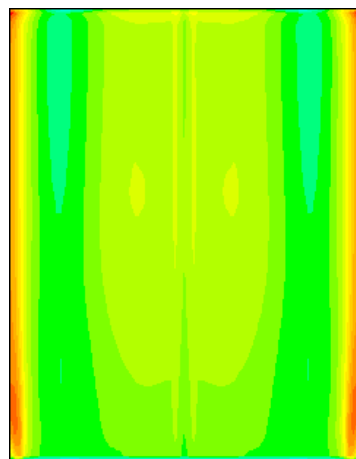
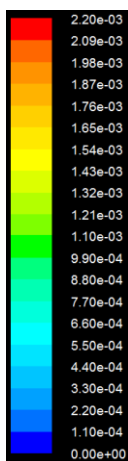
شکل ۶. تغییرات تنش برشی گاز بر سطح غشا با تغییر دبی هوادهی در غلظت‌های توده زیستی مختلف



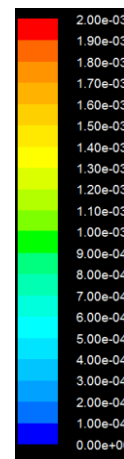
دبی هوادهی:  $0.4 m^3/h$



دبی هوادهی:  $0.2 m^3/h$



دبی هوادهی:  $0.8 m^3/h$



دبی هوادهی:  $0.6 m^3/h$

شکل ۷. کانتورهای تنش برشی گاز بر سطح غشا (Pa)

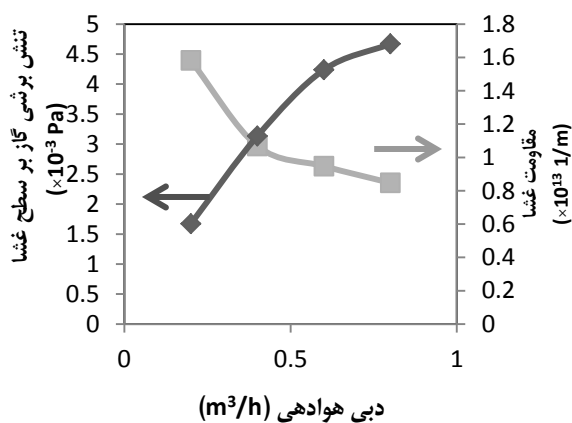
اغتشاش بیشتر مخلوط گاز و مایع در این ناحیه است. همچنین، مشاهده می‌شود در دبی هوادهی  $0/2 \text{ m}^3/\text{h}$  تنش برشی بیشینه به درصد کمی از سطح غشا وارد شده است در حالی که با افزایش سرعت هوادهی سطح بیشتری از غشا در معرض تنش برشی بیشینه قرار گرفته است. در تحقیق پیشین Khalili-Garakani و همکاران (۲۰۱۱) که غشا به صورت صلب و فاقد جریان خروجی مایع شبیه‌سازی شده بود، ملاحظه شد که با افزایش شدت هوادهی، تنش برشی بر سطح غشا و سطح غشای در معرض تنش افزایش می‌یابد که در نهایت موجب کاهش گرفتگی غشا می‌شود.

### ۳.۳. بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی

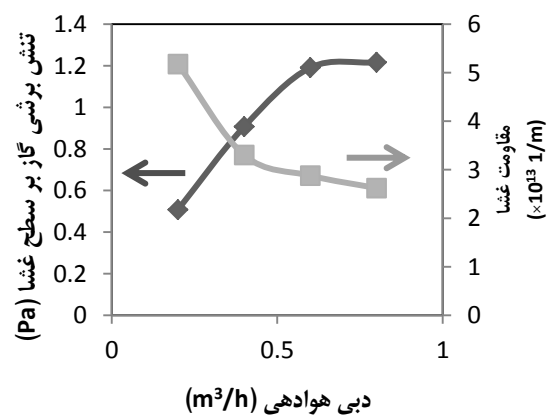
به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی، تنش برشی حاصل از جریان گاز و اثر آن در عملکرد بیوراکتور غشایی هواگرد و مقاومت غشا در شرایط عملیاتی مختلف بررسی شده است. در شکل‌های ۸ (الف) و ۸ (ب) تغییرات تنش برشی فاز گاز بر سطح غشا و مقاومت غشا به ترتیب در غلظت توده زیستی  $8 \text{ g/L}$  و  $12$  نشان داده شده است.

شکل ۶ تغییرات تنش برشی ناشی از جریان گاز بر سطح غشا را در دو غلظت توده زیستی متفاوت نشان می‌دهد. از آنجا که در راکتورهای هواگرد جریان هوا عامل ایجاد حرکت در فاز مایع و چرخش آن است، با افزایش میزان شدت هوادهی سرعت مایع نیز درون بالابر و ناودان افزایش می‌یابد که موجب افزایش تنش برشی هوا بر سطح غشا می‌شود. Prieske و همکاران (۲۰۰۸) نیز با افزایش شدت هوادهی روند مشابهی را در بیوراکتور غشایی مشاهده کردند. همچنین، با افزایش غلظت توده زیستی و در نتیجه ویسکوزیته لجن، تنش برشی بیشتری بر سطح غشا وارد می‌شود (White et al., 1986). همان‌گونه که در شکل پیداست، در هوادهی‌های پایین، اثر تغییر غلظت چندان مشهود نیست، زیرا این مقدار هوادهی توانسته نیروی لازم برای حرکت ذرات در راستای قائم را فراهم آورد.

در شکل ۷ کانتورهای تنش برشی فاز گاز بر سطح غشا در دبی‌های هوادهی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در وسط و نیمه بالایی غشا تنش بیشتری بر سطح وارد می‌شود که به علت سرعت و



(ب)



(الف)

شکل ۸. تغییرات تنش برشی گاز بر سطح غشا و مقاومت غشا در غلظت توده زیستی  $8 \text{ g/L}$  و  $12$



### ۴.۳. بررسی رفتار ذرات در سامانه سه فاز آبی-

#### لجن فعال - هوا

شبیه‌سازی سه فاز آبی به منظور نزدیک‌تر کردن شرایط شبیه‌سازی بیوراکتورهای غشایی به واقعیت و شناسایی مکان‌های تجمع ذرات جامد انجام می‌شود. شبیه‌سازی سه‌فازی بیوراکتورهای غشایی تنها در دو تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است (Amini et al., 2013; Kang, 2008) که لزوم بررسی‌های بیشتر را نشان می‌دهد.

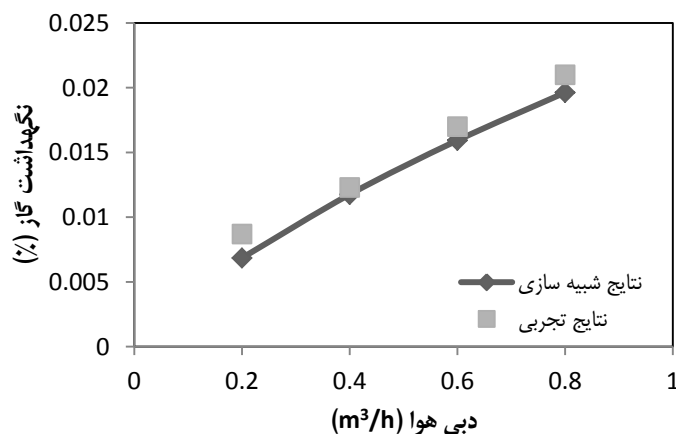
شبیه‌سازی سه‌فازی در دبی هوادهی  $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$  و غلظت زیست‌توده  $8 \text{ g/L}$  انجام شد. شار خروجی مایع در این حالت  $0.1356 \text{ L/m}^2 \cdot \text{s}$  است. قطر متوسط ذرات با بهره‌گیری از تصاویر میکروسکوپی لجن فعال و روش آنالیز عکس برابر با ۶ میکرون انتخاب شده است (خلیلی‌گرکانی، ۱۳۸۸). برای شبیه‌سازی سه فاز آبی- لجن فعال- هوا از مدل چندفازی اولرین استفاده شده است.

نتایج توزیع جزء حجمی فازهای ذرات جامد لجن، مایع و هوا در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نزدیکی غشا به دلیل هوادهی بیشتر در این ناحیه و اطراف بافل‌ها به دلیل چرخش مایع، ذرات جامد تجمع کمتری داشته و عمدتاً در پایین بیوراکتور تجمع یافته‌اند. برای دستیابی به توزیع یکنواخت‌تری از ذرات جامد، می‌توان توزیع‌کننده هوا را به کف بیوراکتور منتقل کرد تا از تجمع ذرات در آن ناحیه جلوگیری شود.

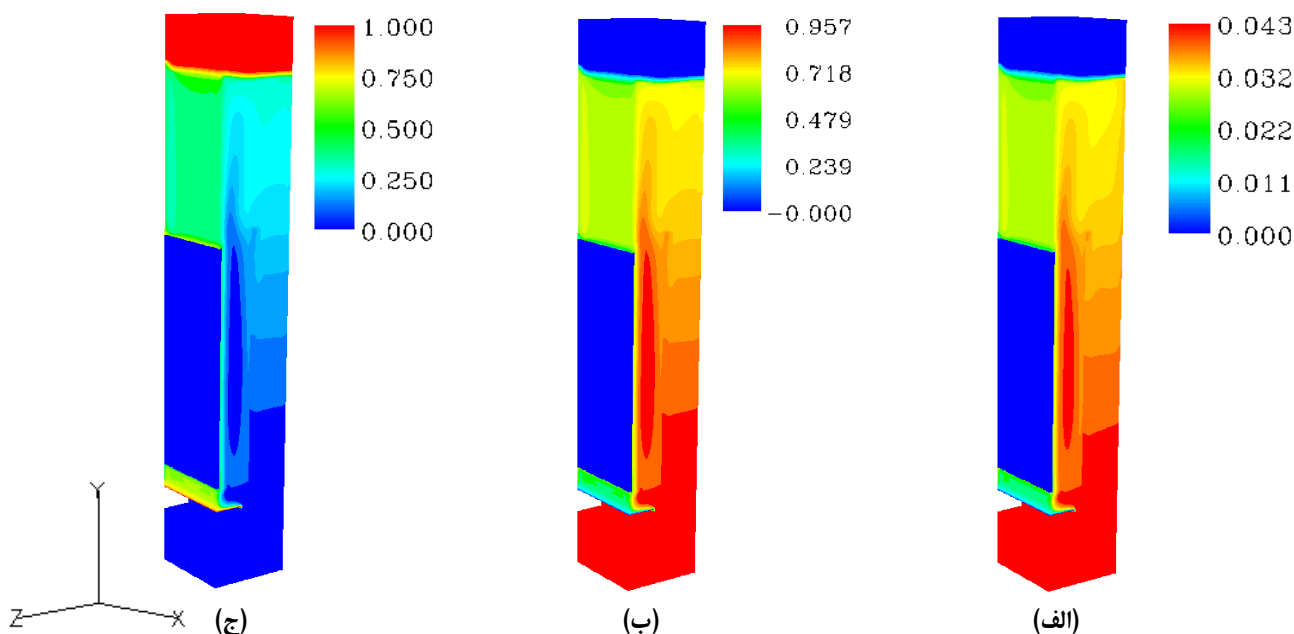
همان‌گونه که در شکل ۸ الف و ب دیده می‌شود، با افزایش دبی هوادهی میزان مقاومت به حداقل خود در محدوده مورد مطالعه رسیده است. روند تغییرات تنش حاصل از گاز و مایع روندی صعودی را با افزایش شدت هوادهی طی می‌کند. این نکته حائز اهمیت است که هر دو تنش در چگونگی تولید کیک و مقاومت کل ایجادشده روی سطح غشا تأثیرگذارند، اما به طور خاص نمی‌توان گفت که تأثیر کدامیک بیشتر است.

در واقع هوادهی عامل ایجاد جریان متقاطع روی غشا در راکتور هواگرد است و هرچه میزان آن بالاتر باشد، سرعت جریان چرخش بیشتر می‌شود و به تناسب نیروی بالابرنده وارده بر ذرات در مقایسه با نیروی جریان به سمت غشا بیشتر می‌شود که همین امر کاهش مقاومت ایجادشده را توجیه می‌کند. شایان یادآوری است که طبق نمودار، تغییرات تنش برشی مایع بر سطح غشا در دبی‌های هوادهی مختلف نیز، روندی مشابه تنش برشی گاز طی می‌کنند.

همچنین، محاسبه نگهداشت کلی گاز از طریق انبساط بستر به صورت تجربی اندازه‌گیری و در شکل ۹ با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. تطابق نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی بیانگر صحت مدل و توانایی دینامیک سیالات محاسباتی در بررسی و پیش‌بینی هیدرودینامیک بیوراکتور در فرایند تصفیه است.



شکل ۹. مقایسه نتایج نگهداشت گاز به صورت تجربی و شبیه‌سازی



شکل ۱۰. توزیع جزء حجمی (الف) ذرات جامد؛ (ب) مایع و (ج) هوا در بیوراکتور (نمای مقارن)

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق هیدرودینامیک یک بیوراکتور غشایی هواگرد در شرایط عملیاتی مختلف شامل چهار نرخ هوادهی و قطر حباب مربوطه و دو غلظت توده زیستی بررسی و نتایج زیر حاصل شده است:

۱. استفاده از معادله چندفازی اولرین و معادله آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد، به داده‌هایی با تطابق مناسب در شبیه‌سازی بیوراکتورهای غشایی هواگرد منجر می‌شود.

۲. با بهره‌گیری از مدل موازنه جمعیتی و تعریف توزیعی از حباب‌ها می‌توان رفتار حباب‌ها را طی حرکت آن‌ها در سامانه بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند که اندازه حباب‌ها طی مسیر حرکت خود از توزیع‌کننده تا سطح آزاد مایع رشد کرده است و حباب‌های بزرگ‌تر تمایل به تجمع در نزدیکی صفحه غشا و نزدیک دیواره‌های سامانه دارند. همچنین، تطابق مناسبی بین قطر حباب متوسط حاصل از نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مشاهده شد که صحت مدل را بیان می‌دارد.

۳. با افزایش دبی هوادهی و غلظت توده زیستی در سامانه، میزان تنش حاصل از جریان مایع بر سطح غشا افزایش می‌یابد. در خصوص تنش حاصل از جریان هوا نیز روندی کاملاً صعودی مشاهده شد که به کاهش گرفتگی سطح غشا و بهبود عملکرد تصفیه فاضلاب منجر می‌شود.

۴. استفاده از معادلات گرانولی اوپلر در شبیه‌سازی سه‌فازی سامانه با در نظر گرفتن اندازه لخته‌ها، سبب نزدیک‌شدن شرایط راکتور در شبیه‌سازی سامانه به حالت واقعی می‌شود. نتایج نشان داد که ذرات جامد به تجمع در پایین بیوراکتور تمایل دارند و در نزدیکی غشا و اطراف بافل‌ها تجمع کمتری دیده می‌شود.

#### یادداشت‌ها

1. Membrane Bioreactor
2. Computational Fluid Dynamics
3. Mixed Liquor Suspended Solid

## منابع

- خلیلی گرکانی، ا. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی بیوراکتورهای غشایی در تصفیه پساب‌های صنعتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران.
- Amini, E., Mehrnia, M.R., Mousavi, S.M., Mostoufi, N. 2013. Experimental study and computational fluid dynamics simulation of a full-scale membrane bioreactor for municipal waste water treatment application, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52: 9930-9939.
- Bohm, L., Drews, A., Prieske, H., Berube, P.R., Kraume, M. 2012. The importance of fluid dynamics for MBR fouling mitigation, *Bioresource Technology*, 122: 50-61.
- Brannock, M.W.D., Wever, H.D., Wang, Y., Leslie, G. 2009. Computational fluid dynamics simulations of MBRs: Inside submerged versus outside submerged membranes, *Desalination*, 236: 244-251.
- Buethorn, S., Volmering, D., Vossenkaul, K., Wintgens, T., Wessling, M., Melin T. 2011. CFD simulation of single- and multi-phase flows through submerged membrane units with irregular fiber arrangement, *Journal of Membrane Science*, 384: 184-197.
- Cui, Z.F., Chang, S., Fane, A.G. 2003. The use of gas bubbling to enhance membrane processes, *Journal of Membrane Science*, 221: 1-35.
- Drews, A., Prieske, H., Meyer, E.L., Senger, G., Kraume, M. 2010. Advantageous and detrimental effects of air sparging in membrane filtration: Bubble movement, exerted shear and particle classification, *Desalination*, 250: 1083-1086.
- Hosseinzadeh, M., Mehrnia, M.R., Mostoufi, N. 2013. Experimental study and modeling of fouling in immersed membrane bioreactors operating in constant pressure, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013: 1-7.
- Judd, S., 2006. *The MBR Book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*, 1st ed.; Elsevier.
- Judd, S. 2008. The status of membrane bioreactor technology, *Trends in Biotechnology*, 26: 109-116.
- Kang, C.W., Hua, J., Lou, J., Liu, W., Jordan, E. 2008. Bridging the gap between membrane bio-reactor (MBR) pilot and plant studies, *Journal of Membrane Science*, 325: 861-871.
- Khalili-Garakani, A., Mehrnia, M.R., Mostoufi, N., Sarrafzadeh, M.H. 2009. Flow characteristics in an airlift membrane bioreactor, *Chemical Product and Process Modeling*, 4: Art. 18.
- Khalili-Garakani, A., Mehrnia, M.R., Mostoufi, N., Sarrafzadeh, M.H. 2011. Analyze and control fouling in an airlift membrane bioreactor: CFD simulation and experimental studies, *Process Biochemistry*, 46: 1138-1145.
- Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., Yang, F. 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material, *Water Research*, 43: 1489-1512.
- Ndinisa, N.V., Fane, A.G., Wiley, D.E. 2006. Fouling control in a submerged flat sheet membrane system: Part I-Bubbling and hydrodynamic effects, *Separation Science and Technology*, 41: 1383-1409.
- Ndinisa, N.V., Fane, A.G., Wiley, D.E., Fletcher D.F. 2006. Fouling control in a submerged flat sheet membrane system: Part II-Two-phase flow characterization and CFD simulations, *Separation Science and Technology*, 41: 1411-1445.
- Nouri, N., Mehrnia, M.R., Sarrafzadeh, M.H., Nabizadeh, R. 2014. Performance of membrane bioreactor in presence of flocculants, *Desalination and Water Treatment*, 52: 2933-2938.
- Pajoum Shariati, F., Mehrnia, M.R., Sarrafzadeh, M.H., Rezaee, S., Grasmick, A., Heran, M. 2013. Fouling in a novel airlift oxidation ditch membrane bioreactor (AOXMBR) at different high organic loading rate, *Separation and Purification Technology*, 105: 69-78.
- Prieske, H., Drews, A., Kraume, M. 2008. Prediction of the circulation velocity in a membrane bioreactor, *Desalination*, 231: 219-226.
- Wang, Y., Brannock, M., Cox, S., Leslie, G. 2010. CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fibre membrane bioreactor using a porous media approach, *Journal of Membrane Science*, 363: 57-66.
- White, F.M. 1986. *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, Inc., New York.

Zhang, K., Wei, P., Yao, M., Field, R. W., Cui, Z. 2011. Effect of the bubbling regimes on the performance and energy cost of flat sheet MBRs, Desalination 283: 221-226.