

## عوامل مؤثر بر گرفتگی غشاء در راکتور زیستی غشایی

پروین ناهید<sup>۱</sup>، حمیدرضا کریمی نیا<sup>۲</sup> احسان بنایان اصفهانی<sup>۳</sup>، محدثه خراسانی زاده<sup>۴</sup>

۱- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران  
(نویسنده مسئول) nahid@sharif.edu

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

(دریافت ۹۴/۱۱/۱ پذیرش ۹۵/۴/۱۹)

### چکیده

در بین روش‌های تصفیه فاضلاب، روش‌های بیولوژیکی به دلیل هزینه‌های پایین‌تر و راندمان مناسب‌تر، کاربرد گسترده‌تری دارند. راکتورهای زیستی غشایی در برخی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به کار می‌روند که گرفتگی غشاء آنها موضوع بسیار مهمی است. در میان کمیت‌های مؤثر در کنترل گرفتگی غشاء، تأثیر شار بحرانی اثبات شده است. شار بحرانی تحت تأثیر سه گروه اصلی متغیر شامل متغیرهای لجن، متغیرهای عملیاتی و نوع غشاء است. در این تحقیق اثرات برخی فاکتورها روی شار بحرانی در یک بیوراکتور غشایی مستغرق آزمایش شد. متغیرهای اختلاف فشار دو سر غشاء، میزان غلظت پروتئین و کربوهیدرات موجود در ترکیبات پلیمری خارج سلولی و تولیدات میکربی محلول، همچنین تأثیر بعضی از متغیرهای عملیاتی مانند حالت مکش متناوب و مکش پیوسته در دو محدوده از غلظت لجن که مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش میزان شار، نرخ گرفتگی غشاء افزایش می‌یابد. نتایج اثرات EPS روی CF نیز نشان می‌دهد که هیچ رابطه‌ای بین این دو دیده نمی‌شود، شاید به این دلیل که EPS بیشتر به صورت فلاک‌ها یا لخته‌های بزرگ‌تر موجود است. همچنین نتایج حاکی از ارتباط معکوس شار بحرانی با غلظت بخش کربوهیدرات از تولیدات میکربی محلول می‌باشد و به‌عنوان نتیجه اصلی، اثر مثبت حالت‌های استراحت در مکش متناوب روی کنترل گرفتگی غشاء نیز مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** گرفتگی غشاء، شار بحرانی، تولیدات میکربی محلول

### ۱- مقدمه

مستقل از زمان ماند هیدرولیکی تنظیم می‌کنند، توانایی حفظ غلظت لجن در مقادیر بالا را دارند و بعضی در مقیاس‌های بزرگ مثل واحدهای با دبی  $10-50000 \text{ m}^3/\text{day}$  مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (Judd 2006). سیستم‌های غشایی مستغرق انرژی کمتری نسبت به سیستم‌های کنارگذار مصرف می‌کنند، هوادهی جهت تمیز کردن غشاء نیز استفاده می‌شود و نیازی به پمپ بازگردانی نیست. مصرف انرژی در این سیستم‌ها  $0.4-2 \text{ kwh/m}^3$  گزارش شده که بیش از ۸۰ درصد آن مربوط به هوادهی است (Churchous 2002).

در بین روش‌های تصفیه فاضلاب، روش‌های بیولوژیکی به دلیل هزینه پایین و راندمان مناسب از اهمیت بیشتری برخوردارند (Alexandria 2010). راکتورهای زیستی غشایی که از یک راکتور زیستی و یک واحد فیلتراسیون تشکیل شده‌اند از جدیدترین روش‌های بیولوژیکی هستند و با بهره‌مندی از انواع غشاها دارای مزایایی چون کوچک‌تر بودن راکتور، تولید لجن کمتر و خروجی با کیفیت بهتر می‌باشند (Namburha et al. 2013; Kateef et al. 2008; Drews & Kraume 2005; Zhichao et al. 2008). این راکتورهای زیستی به‌علت اینکه زمان ماند لجن را به‌طور

پیوسته بود که از طریق مقایسه شار بحرانی توسط آزمایش شار پلکانی انجام شد (Saroj et al. 2008; Chen & Fane 2006).

## ۲- مواد و روش‌ها

راکتور طراحی شده از جنس پلکسی گلس<sup>۱</sup> با حجم ۲۴ لیتر با ابعاد ۲۰×۲۰×۶۰ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر بود و ۴ عدد هواده حباب ریز و ۱ عدد هواده حباب درشت داشت. خوراک به صورت ملاس چغندر (منبع کربن)، پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات (منبع فسفر) و اوره (منبع ازت) با نسبت ۱۰۰/۵/۱ تهیه شد (Borghei et al. 2008).

مواد استفاده شده در این پژوهش و ترکیب درصد خوراک ورودی در جدول ۱ نشان داده شده است. ملاس با غلظت ۱ گرم در لیتر، COD برابر ۷۵۰ میلی‌گرم در لیتر فراهم می‌کند. بنابراین با توجه به نسبت در نظر گرفته شده یعنی COD/N/P هر بار مقادیر مواد محاسبه و به کار رفت. خوراک با غلظت مشخص در تانک خوراک تهیه و سپس به صورت ثقلی وارد تانک متعادل‌ساز مجهز به یک شناور شد که سطح مایع درون آن همواره ثابت باشد. به این ترتیب نوسان جریان خوراک، حداقل بود. سپس با تنظیم دقیق دبی، بارگذاری مورد نظر حاصل شد (شکل ۱). هوای مورد نیاز از سیستم کمپرسور مرکزی و هواده‌ی از طریق چهار عدد سنگ هوای ۱۰ سانتی‌متر حباب ریز (برای میزان انتقال اکسیژن بیشتر) و یک هواده حباب درشت از یک سرشیر آبپاش زیرغشاء تأمین شد تا با ایجاد حباب‌های درشت به طرف بالا به سطح راکتور، موجب ایجاد تنش‌های برشی بر روی سطح غشاء شود و فلاک‌های ایجاد شده روی سطح کنده شده گرفتگی کاهش یابد.

جدول ۱- ترکیب درصد خوراک ورودی

Table 1. Feed composition

Chemical Materials	Concentration (mg/L)
CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	5.125
NaHCO <sub>3</sub>	2.3
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	6
ZnCl <sub>2</sub>	0.0625
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.052
MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	0.012
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	3
NiSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.02075
Ammonia-Nitrogen	3.8125
Ammonium Phosphate	4.3375
Urea	20.0375
COD	188

<sup>1</sup> Plexiglass

با وجود همه مزایا، سیستم‌های غشایی مشکلاتی مانند گرفتگی غشا دارند که سبب افزایش مقاومت هیدرولیکی می‌شود و به صورت کاهش شار در فرایندهای فشار ثابت یا افزایش فشار دو سر غشاء در فرایندهای شار ثابت مشاهده می‌شود. در نتیجه مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری افزایش، و تولید آب تمیز و عمر مدول غشایی کاهش می‌یابد (Judd 2003, 2011). از جمله مکانیسم‌های گرفتگی می‌توان به جذب مولکول‌های درشت، بسته شدن حفرات و تشکیل لایه کپک اشاره نمود. مایعات مخلوط راکتور زیستی غشایی مانند لجن فعال و فلاک‌های بیولوژیک شامل میکروارگانیسم‌های زنده همراه با مواد کلونیدی و ترکیبات محلولی هستند که در طی مرگ میکروب‌ها آزاد شده و از غشاء سلول‌ها خارج می‌شوند. این مایعات به دو بخش عمده ترکیبات پلیمری خارج سلولی EPS و تولیدات میکربی محلول SMP تقسیم می‌شوند. این ویژگی‌های فیزیولوژیک زیست توده با تغییر شرایط عملیاتی تغییر می‌کند. در نتیجه میزان گرفتگی به شدت غیرقابل پیش‌بینی است. کمیت شار بحرانی به عنوان متغیر قابل قبولی در بررسی گرفتگی غشاء شناخته می‌شود. این شار، شاری است که در مقادیر کمتر از آن هیچ‌گونه گرفتگی ناشی از تجمع کلئیدها اتفاق نمی‌افتد و به عملیات آن عملیات بی‌گرفتگی نیز گفته می‌شود. هرچند در مطالعات برخی از پژوهشگران گرفتگی غشاء در شارهای کمتر از بحرانی هم مشاهده شده است (Le-clech et al. 2003). شار بحرانی به طرق دیگر نیز تعریف می‌شود: الف) موقعی که رابطه بین شار در مقادیر کمتر از بحرانی و اختلاف فشار ( $\Delta p$ ) دو سر غشاء خطی است و شیبی برابر با میزان آن برای آب خالص دارد. ب) موقعی که این رابطه خطی است ولی شیب آن مشابه میزان آن برای آب خالص نیست (Tiranuntakul & Jegatheesan 2011). به‌طور کلی بسیاری آن را به عنوان اولین شاری که در آن رابطه بین شار و  $\Delta p$  دوسر غشاء از حالت خطی خارج می‌شود و ناگهان افزایش می‌یابد، می‌شناسند (Jefferson et al. 2004; Le-clech 2003).

شار بحرانی تحت تأثیر سه گروه متغیر است جنس و شکل غشاء، متغیرهای لجن و متغیرهای عملیاتی. هدف این پروژه بررسی متغیرهایی مانند  $\Delta p$  دوسر غشاء، غلظت پروتئین و کربوهیدرات موجود در مواد پلیمری خارج سلولی و تولیدات میکربی محلول و تأثیر برخی از متغیرهای عملیاتی مانند مکش حالت متناوت و

سپس با آب شیر آبکشی می‌شد. پنل شامل شش عدد شیربرقی، یک پمپ پرستالتیک و یک خلاء سنج دیجیتال بود.



Fig. 2. Propylene membrane used in the system

شکل ۲- غشای پلی پروپیلن مورد استفاده

## ۲-۲- بهره‌برداری از بیوراکتور به‌طور متناوب و پیوسته

به‌منظور راه‌اندازی بیوراکتور، از لجن برگشتی، تانک لجن فعال تصفیه‌خانه جنوب تهران استفاده شد. این لجن بسیار غلیظ بود. بعد از خوراک‌دهی بر اساس نسبت غذا به میکروارگانیسم‌ها (F/M) در حالت متناوب شروع به کار کرد ولی افزایش شدید غلظت میکروارگانیسم‌ها مشاهده شد، پس لجن برای بارهای آلی کمتر ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در روز رقیق شد. سپس راکتور به‌طور متناوب مورد بهره‌برداری قرار گرفت، سیستم به صورت پیوسته نیز مورد آزمایش قرار گرفت و به توده سلولی اجازه رشد داده می‌شد. این موضوع سبب تغییر غلظت توده سلولی در طول آزمایش‌های می‌شد، در نتیجه غلظت‌های لجن مختلف هر بار باید مورد آزمایش قرار می‌گرفت. مشابه این موضوع در تحقیقات قبلی نیز دیده شده است (Howell HCS & Arnot 2004). در طول بهره‌برداری زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت، و زمان ماند لجن زیاد بود و در حدود یک ماه در نظر گرفته شد. ابتدا بار آلی ثابت ورودی  $752 \text{ g COD/m}^3 \cdot \text{day}$  به سیستم وارد و نسبت F/M تنظیم شد. در انتها مقدار کلی آن بین  $0.18 \text{ gCOD/gMLSS} \cdot \text{day}$  -  $0.08$  برای غلظت لجن  $4/2$  تا  $9/5$  گرم در لیتر متغیر بود. شرایط عملکرد سیستم به‌صورت Steady-State بود و همچنین دمای عملیاتی سیستم برای رشد هرچه بهتر میکروارگانیسم‌ها در حدود  $20$  تا  $25$  درجه سلسیوس در نظر گرفته شد.

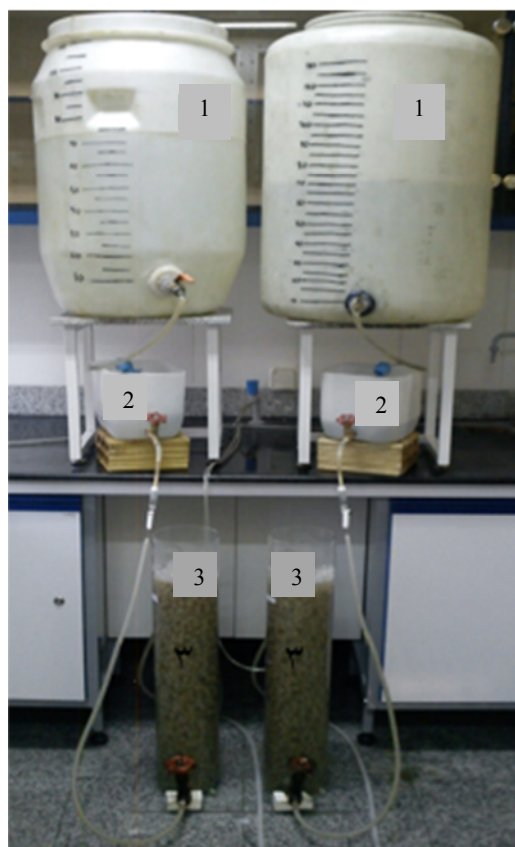


Fig. 1. A view of the feeding system: 1) Feed tank, 2) flow equalizer, 3) membrane bioreactor

شکل ۱- نمایشی از سیستم خوراک‌دهی

۱- بشکه خوراک‌دهی، ۲- متعادل‌ساز جریان ۳- راکتور زیستی غشایی

## ۲-۱- اطلاعات غشاء و پنل کنترلی

غشاء مورد استفاده از جنس پلی پروپیلن، از نوع الیاف میان تهی بود و به‌صورت مستغرق داخل راکتور قرار گرفت (شکل ۲). اندازه حفرات این غشاء  $100$  نانومتر و سطح کلی  $0.2$  مترمربع بود. طول الیاف غشاء  $30$  سانتی‌متر و ساخت شرکت پویا پلیمر صنعت اصفهان بود. پنل کنترلی برای کنترل سه بخش جریان عبوری از غشاء (برقراری جریان مستقیم، برعکس به معنای شستشوی معکوس و توقف) به‌کار رفت، به‌طور معمول غشاء  $15$  دقیقه به‌صورت مستقیم کار کرد، سپس  $5$  دقیقه توقف و بعد از هر بار شستشوی شیمیایی غشاء و قبل از آزمایش شار پلکانی عمل شستشوی فیزیکی غشاء به‌کمک آب صورت می‌گرفت. برای شستشوی شیمیایی، غشاء از راکتور جدا شده و سطح آن با آب شیر شستشو و در محلول هیپوکلریت سدیم به‌مدت  $2$  ساعت نگهداری و

## ۳-۲- آنالیزها و آزمایش‌های شار بحرانی

برای اندازه‌گیری COD, MLSS, MLVSS, دما، پروتئین و کربوهیدرات (پس از استخراج از EPS) از روش‌های استاندارد استفاده شد (APHA & WEF 1999; Adav 2008). آزمایش شار بحرانی با شروع از دبی ۱۵ لیتر بر مترمربع در ساعت (LMH) و با پله‌های افزایشی ۵ لیتر بر مترمربع در ساعت (LMH) انجام شد. ابتدا با ثابت نگهداشتن شار در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای  $\Delta p$  دوسر غشاء ثبت شد و چهار داده فشار، در فاصله‌های زمانی ۵ دقیقه اندازه‌گیری شد.  $\Delta p$  دوسر غشاء،  $\Delta p_0$  اختلاف فشار اولیه و نهایی هر پله،  $P_{ave}$  فشار میانگین و  $dp/dt$  مشتق این داده‌ها محاسبه شد. بعد از اندازه‌گیری دما، همه شارهای بحرانی با استفاده از رابطه  $J_{e,20} = J_C \times 1.025^{(T-20)}$  برای دمای ۲۰ درجه سلسیوس تصحیح شد. با افزایش میزان شار و عبور از شار بحرانی،  $\Delta p$  دوسر غشاء به شدت افزایش یافت به طوری که پمپ پرستالتیک قادر نبود به اندازه دلخواه از سیستم خروجی بگیرد. به همین خاطر یک فشار ویژه معادل ۳۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد و در این فشار افزودن شار قطع شد و شار به صورت پلکانی کاهش یافت. زمان پله‌ها ۵ دقیقه بود و میانگین ابتدا و انتهای هر بازه زمانی به عنوان  $\Delta p$  دوسر غشاء در نظر گرفته شد (Le-clech et al. 2003). شکل ۲ داده‌های خام  $\Delta p$  دوسر غشاء را نسبت به شار پلکانی نشان می‌دهد.

## ۳- نتایج و بحث

داده‌های  $dp/dt$ ,  $P_{ave}$ ,  $\Delta p_0$  معرف‌های خوبی از گرفتگی غشاء هستند و هر سه مقدار شاری که گرفتگی غشاء در آن قابل توجه می‌شود را به طور مشابه معرفی می‌کنند (شکل‌های ۳ تا ۵). شکل ۳ باتوجه به داده‌های آزمایشی در غلظت لجن ۴۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، نرخ هوادهی ۱۰ لیتر در دقیقه و در هر پله زمانی، ۵ دقیقه استراحت رسم شده است و نشان می‌دهد که گرفتگی سریع که وابسته به تجمع در سطح غشاء در شروع شار پلکانی است در شارهای بالا اتفاق می‌افتد و شاری که در آن  $\Delta p_0$  شروع به افزایش می‌کند را می‌توان شار بحرانی در نظر گرفت. شکل ۴ تغییرات  $dp/dt$  بر حسب شار را نشان می‌دهد، برخلاف نتیجه به دست آمده در برخی تحقیقات گذشته، مقادیر  $dp/dt$  در شارهای کمتر از

## ۳-۱- تأثیر شرایط استراحت بر شار بحرانی

آزمایش‌ها در دو محدوده غلظت لجن (MLSS) ۶۶۰۰-۴۲۰۰ و ۹۵۰۰-۷۸۰۰ و زمان استراحت (خاموشی پمپ) ۵ دقیقه بود. نتایج در هر دو محدوده غلظت لجن مشابه بود و مشاهده شد که زمان رسیدن به فشار بیشینه دوسر غشاء در حالت مکش پیوسته کمتر از مکش متناوب بود یعنی نرخ افزایش  $\Delta p$  دوسر غشاء با زمان (مفهوم گرفتگی) در حالت پیوسته بیش از حالت متناوب بود و زودتر گرفتگی آغاز می‌شد (شکل ۶). شار بحرانی در حالت مکش پیوسته ۳۰-۴۰ LMH و مکش متناوب LMH ۴۰-۵۰ اندازه‌گیری شد.

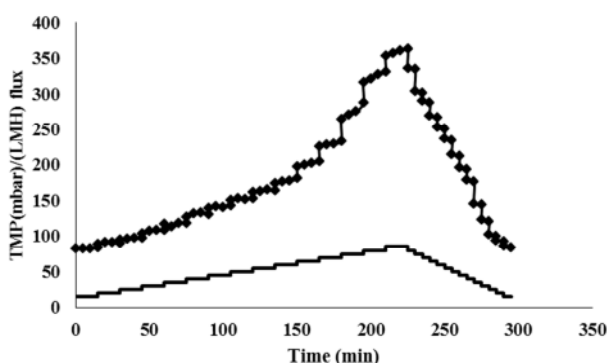


Fig. 3. Stepwise flux test  
شکل ۳- آزمایش شار پلکانی

دموکلوئیدی است که هرکدام به نوعی در مکانیسم گرفتگی مؤثراند (Fengshen & Husain 2006). حتی اگر از منبع کربن ساده‌ای مانند چون ملاس استفاده شود که انتظار می‌رود باقیمانده‌ای از سویسترا داخل راکتور وجود نداشته باشد و فقط مواد حاصل از تجزیه سلولی باشد، باز هم گرفتگی اتفاق می‌افتد. شکل ۷ تأثیر SMP بر شار بحرانی را نشان می‌دهد. در مورد دو بخش پروتئین و کربوهیدرات در SMP هم هر دو مسئول گرفتگی هستند (شکل‌های ۸ و ۹). اما بخش کربوهیدرات SMP-C در توافق با مطالعات پیشین (Lesjean et al. 2005)، تأثیر بیشتری نشان داده است (شکل ۱۰).

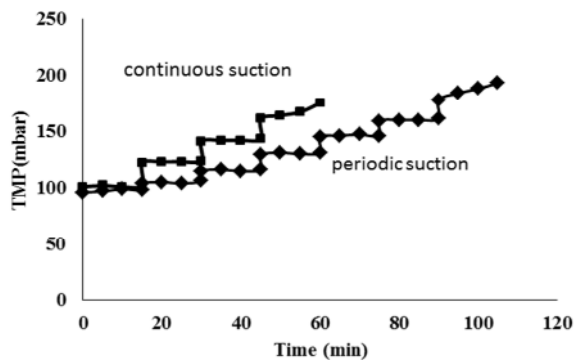


Fig. 7. Variation of TMP with time at the higher range of sludge concentrations for the two suction states  
شکل ۷- نمودار تغییرات TMP با زمان در غلظت لجن محدودی بالا در دو حالت مکش

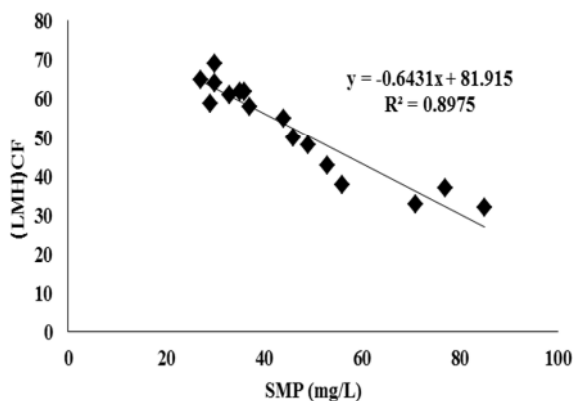


Fig. 8. Effects of SMP on critical flux  
شکل ۸- تأثیر SMP بر شار بحرانی

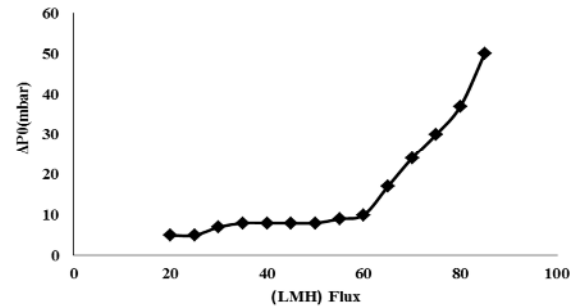


Fig. 4. Variation of  $\Delta P_0$  with changes in flux  
شکل ۴- نمودار تغییرات  $\Delta P_0$  با شار

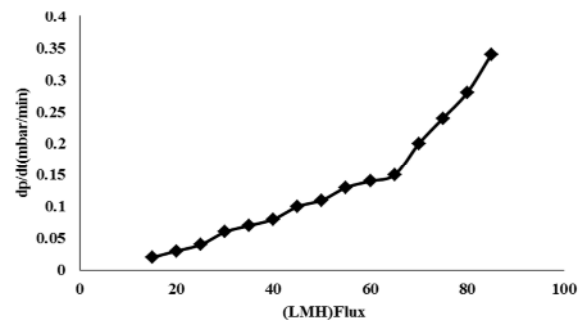


Fig. 5. Variation of  $dp/dt$  with changes in flux  
شکل ۵- نمودار تغییرات  $dp/dt$  با شار

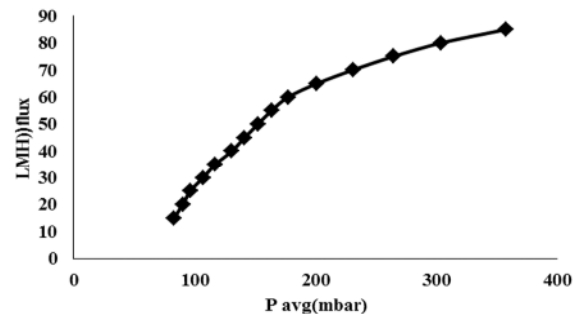


Fig. 6. Variation of flux with mean pressure  
شکل ۶- نمودار تغییرات شار بر حسب فشار میانگین در هر پله زمانی

### ۳-۲- تأثیرات EPS و SMP بر شار بحرانی

در بررسی تأثیر EPS بر شار بحرانی، رابطه‌ای بین آن‌ها مشاهده نشد که می‌تواند به دلیل این باشد که EPS به‌طور عمده به‌صورت فلاک‌های بزرگ‌تر وجود دارد. SMP با خوراک هم می‌تواند وارد سیستم شود و بر سطح غشاء جذب شده و حفره‌ها را پر کند و به‌صورت ژل مانند، شرایط مناسب از نظر مواد مغذی برای رشد بیوفیلم روی غشاء را سبب شود، این ژل شامل مواد محلول

نتایج حاصل تشابه بالایی دارند. پروفایل تغییرات  $\Delta p_0$  برحسب شار در ابتدا مقادیر کمی را برای این متغیر نشان می‌دهد و در شار بحرانی این مقدار شروع به افزایش می‌کند. مقدار متغیر  $dp/dt$  در شارهای کمتر از بحرانی عملاً صفر نیست و نمی‌توان شار بحرانی را بر این مبنا تعریف نمود. در نمودارهای شار برحسب فشار میانگین، گذار از شارهای وابسته به  $\Delta p$  دوسر غشاء به شارهای مستقل از آن را می‌توان شار بحرانی دانست. در این مطالعه این مقدار برابر  $0.15 \text{ mbar/min}$  در نظر گرفته شد. به‌طور کلی باتوجه به نتایج هر سری آزمایش، محدوده‌ای برای شار بحرانی به‌دست می‌آید و با در نظر گرفتن سایر متغیرها میزان گرفتگی را می‌توان کنترل نمود. نتیجه دیگر اینکه زمان رسیدن به بیشینه  $\Delta p$  دو سر غشاء در حالت مکش پیوسته (بدون استراحت) کمتر از مقدار آن در مکش متناوب است یعنی فشار بیشینه و گرفتگی زیاد، زودتر حاصل می‌شود. بنابراین استراحت تأثیر مثبتی در برطرف کردن لایه کپک و کم کردن گرفتگی غشاء دارد. همچنین بررسی‌ها حاکی از آن است که فاکتور SMP بیش از EPS بر شار بحرانی اثر می‌گذارد. دلیل این امر تأثیر بیشتر ذرات کلئیدی در SMP نسبت به فلاک‌های درشت میکروارگانیسم‌ها در EPS بر گرفتگی غشاء است. از دو بخش پروتئین و کربوهیدرات در SMP نیز بخش کربوهیدرات تأثیر بیشتری بر گرفتگی غشاء دارد. متغیرهای آزمایش شده در این پژوهش پایه و اساس بررسی چگونگی کاربرد غشاء در این راکتور زیستی غشایی است و با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان راندمان غشاء را بالا برد. برای تحقیقات آینده مقایسه غشاهایی با اندازه حفرات، جنس و اندازه متفاوت و تعیین بهترین نوع غشاء، پیشنهاد می‌شود.

## References

- Alexandria, V.A., 2010, *Design of municipal wastewater treatment plants*, 5<sup>th</sup> Ed., Water Environment Federation Press, USA.
- Adav, S.S.L.D., 2008, "Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure", *Journal of Hazardous Materials*, 154, 1120-1126.
- APHA. and WEF., 1999, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20<sup>th</sup> Ed., American Public Health Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Borghai, S.M., Sharbatmaleki, M., Pour rezaie, P. & Borgahei, G., 2008, "Kinetics of organic removal in fixed-bed aerobic biological reactor", *Bioresource Technology*, 99(5), 1118-1124.
- Chen Y.V., & Fane, A.G., 2006, "Modeling long term subcritical filtration of model EPS solutions", *Desalination*, 191, 318-327.

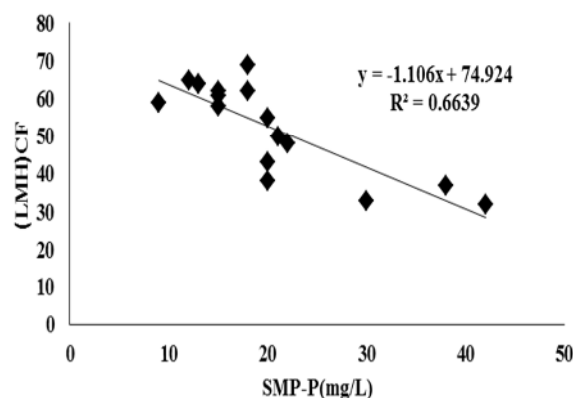


Fig. 9. Effects of protein concentration in SMP on critical flux

شکل ۹- تأثیر بخش پروتئین SMP بر شار بحرانی

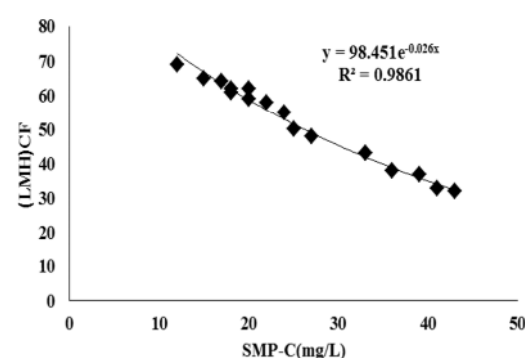


Fig. 10. Effects of carbohydrate concentration in SMP on critical flux

شکل ۱۰- تأثیر بخش کربوهیدرات SMP بر شار بحرانی

## ۴- نتیجه‌گیری

هر سه متغیر بررسی شده  $\Delta p_0$ ،  $P_{ave}$  و  $dp/dt$  می‌توانند در تعیین شار بحرانی در آزمایش‌ها شار پلکانی مورد استفاده قرار گیرند و

- Cho AGF, B.D., 2002, "Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 209, 391-403.
- Churchouse, S., 2002, "Membrane bioreactors: Going from laboratory to large scale- problems to clear solutions. Membrane and the Environment", University of Oxford, UK.
- Dimuth Navaratna, V.J., 2011, "Implications of short term and long term critical flux experiments for laboratory-scale MBR operations", *Bioresource Technology*, 102, 5361-5369.
- Drews, A. & Kraume, M., 2005, "Process improvement by application of membrane bioreactors", *Chemical Engineering Research and Design*, 83, 267-284.
- Fengshen Fan, H.Z. & Husain, H., 2006, "Identification of wastewater sludge characteristics to predict critical flux for membrane bioreactor processes", *Water Research*, 40, 205-212.
- Howell HCS, J.A., & Arnot, T.C., 2004, "In situ manipulation of critical flux in a submerged membrane bioreactor using variable aeration rates, and effects of membrane history", *Journal of Membrane Science*, 242, 13-19.
- Jefferson, A.B., Le-Clech, P. & Judd, S.J., 2004, "Methods for understanding organic fouling in MBRs", *Water Sci. Technol.*, 49, 237-244.
- Judd, S. J., 2011, *The MBR book, principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment*, 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier, MA.
- Judd, S. J., 2003, *Membrane for industrial wastewater recovery and reuse*, Elsevier, MA.
- Judd, S.J., 2006, *The MBR book: Principle and application in water and wastewater treatment*, 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier, MA.
- Lateef, Sh.Kh., Soh, B.Zh., & Kimura, K., 2013, "Direct membrane filtration of municipal wastewater with chemically enhanced backwash for recovery of organic matter", *Bioresource Technology*, 150, 149-155.
- Le Clech, B.J., Chang, I.S. & Judd, S.J., 2003, "Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 227, 81-93.
- Le-clech, P., Jefferson, B. & Judd, S.J., 2003, "Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 218, 117-129.
- Lesjean, B. S.R., Laabs, C., Jekel, M., Gnirss, R. & Amy, G., 2005, "Correlation between membrane fouling and soluble/collidal organic substances in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment", *Water Sci. Technol.*, 51, 1-8.
- Madaeni, A.G.F. & Wiley, D.E., 1999, "Factors influencing critical flux in membrane filtration of activated sludge", *Journal of Chem. Technol., Biotechnol.*, 74, 539-543.
- Namburah, M., Joshi, G., Cholemani, M., & Shet, Ch., 2015, "Feasibility study of indigenously developed fly ash membrane in municipal wastewater treatment", *Aquatic Procedia*, 4, 1492-1499.
- Saroj, D.P., Guglielmi, G. D. & Andreottola, G., 2008, "Subcritical fouling behaviour modelling of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: The prediction of the time to reach critical operating condition", *Desalination*, 231, 175- 181.
- Tiranuntakul PAS, M. & Jegatheesan, V., 2011, "Assesment of critical flux in a pilot- scale membrane bioreactor", *Bioresource Technology*, 102, 5370-5374.
- Zhichao Wu, Z.W., Haunh, Sh., Mai, S., Yang, C., Wang, X. & Zhou, Zh., 2008, "Effects of various factors on critical flux in submerged membrane bioreactors for municipal wastewater treatment", *Separation and Purification Technology*, 62, 56-63.