

## افزایش تراوش در میکروفیلتراسیون مخمر مبتنی بر اصلاح هیدرودینامیک جریان و اعمال جریان معکوس

حسین فدایی<sup>۱</sup>، روح اله طبایی، رضا روستاآزاد

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

E mail: hfadaai@yahoo.com

### چکیده

اثر تزریق گاز و اعمال جریان معکوس بر ازدیاد تراوش در میکروفیلتراسیون سوسپانسیون مخمر با استفاده از غشاء سرامیکی لوله‌ای بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بازدهی روشهای مذکور به میزان قابل توجهی تحت تاثیر اندازه حفره‌های غشاء و غلظت سوسپانسیون قرار دارد. جهت بررسی این تاثیر، اندازه حفره‌های غشا در دو سطح ۰٫۲ و ۱ میکرومتر و غلظت سوسپانسیون در دو سطح ۵ و ۲۵ گرم بر لیتر مورد مطالعه قرار گرفت. در فیلتراسیون سوسپانسیون ۲۵ گرم بر لیتر با استفاده از غشاء ۰٫۲ میکرومتر افزایش فلاکس تا حد ۵ برابر در اثر تزریق گاز مشاهده شد. در همین غلظت و با غشاء ۱ میکرومتر افزایشی به میزان ۳ برابر در اعمال جریان معکوس حاصل شد. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در غشاء با اندازه حفره‌های کوچکتر و سوسپانسیون با غلظت بالاتر روش تزریق گاز در افزایش نرخ تراوش مؤثرتر می‌باشد. این در حالیست که در غشاء با اندازه حفره‌های بزرگتر بازدهی اعمال جریان معکوس بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: میکروفیلتراسیون، جریان دوفازی گاز/ مایع، جریان معکوس، سوسپانسیون مخمر، غشاء سرامیکی

### مقدمه

می‌شود بنابر این تشکیل کیک و مسدود شدن حفره‌ها دو علت اصلی کاهش فلاکس در فرایند میکروفیلتراسیون غشایی می‌باشند.

دو روش عمده برای رفع این پدیده‌ها عبارتند از بهبود هیدرودینامیک جریان و اعمال جریان معکوس. در روش‌های هیدرودینامیکی با افزایش تنش برشی در سطح غشاء و همچنین افزایش تلاطم جریان در داخل غشاء تشکیل لایه کیک محدود می‌شود [۱]. از میان این روشها می‌توان به استفاده از جریان ضربه ای [۲] ایجاد جریان‌های گردابی [۳] استفاده از غشاء با سطح موج دار [۴] و روش تزریق گاز [۵] اشاره کرد.

از این روش در فرایند تولید آب آشامیدنی استفاده شده است [۹]. برای فیلتراسون سوسپانسیون باکتریها بوسیله میکروفیلتر سرامیکی ۰٫۲ میکرومتر و غشاء ۳۰۰ کیلودالتون

میکروفیلتراسیون غشایی عمدتاً برای جداکردن ذراتی در اندازه‌های ۱۰-۰٫۱ میکرومتر از سوسپانسیون‌ها بکار می‌رود. میکروفیلتراسیون با جریان عرضی (cross-flow) یک فرایند جداسازی مبتنی بر اعمال فشار می‌باشد که بطور گسترده برای تغلیظ، خالص‌سازی و همچنین جداسازی درشت‌مذلولها، ذرات کلوئیدی و ذرات معلق از محلولها استفاده می‌شود. به علت تجمع ذرات باقی‌مانده بر روی سطح و بدنه غشاء مقدار تراویده (permeate) در فرایند میکروفیلتراسیون با گذشت زمان کاهش می‌یابد. تجمع این ذرات روی سطح غشاء با تشکیل یک لایه کیک منجر به ایجاد نوعی گرفتگی خارجی می‌شود که معمولاً برگشت پذیر می‌باشد. از طرف دیگر جذب ذرات کوچکتر در بدنه و داخل حفره‌های غشاء باعث نوعی گرفتگی داخلی

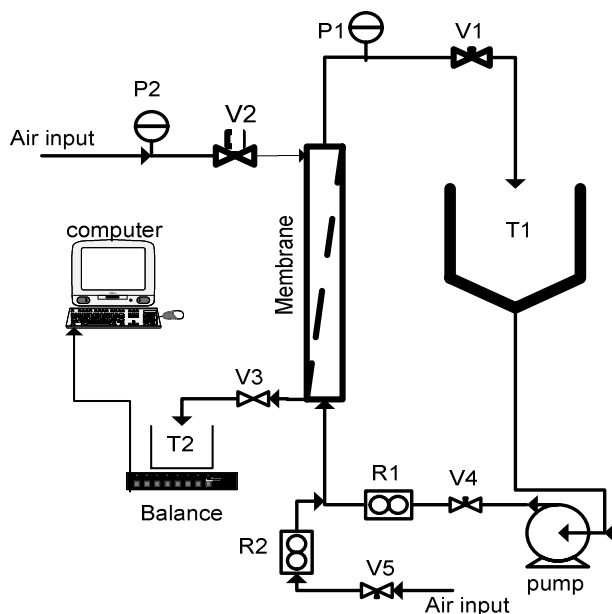
سیستم چندان مؤثر نیست و فشار عملیاتی نأثیر بیشتری دارد [۱۷].

در اولترافیلتراسیون با استفاده از غشاهای فیبر توخالی (hollow-fiber) کارآیی روش اعمال جریان معکوس به میزان بسیار زیادی متاثر از فرکانس گزارش شده است [۱۸ و ۱۹ و ۲۰].

در این مطالعه به مقایسه تزریق گاز و استفاده از جریان دو فازی به عنوان روشی مبتنی بر هیدرودینامیک جریان و جریان معکوس پرداخته شده است.

### مواد و روشها

مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۲) ارائه شده است. به عنوان خوراک از سوسپانسیون خمیر مایه تجاری با غلظت های ۵ و ۲۵ گرم در لیتر استفاده شد. سوسپانسیون میکروبی توسط یک پمپ سانتریفوژ از مخزن خوراک دریافت شده و پس از عبور از مدول میکرو فیلتراسیون به این مخزن بازگردانده شد.



شکل ۲- مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در میکروفیلتراسیون

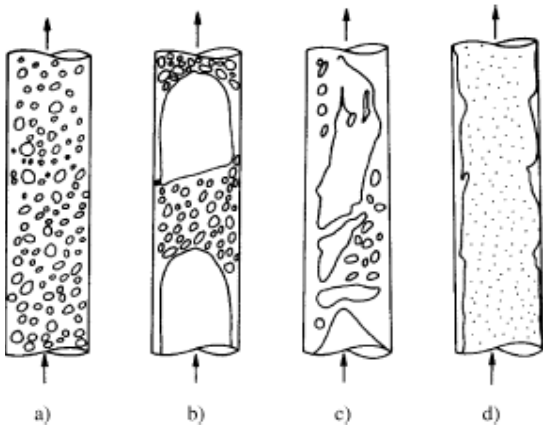
V1, V2, V3, V4 : valve  
P1, P2 : pressure gage  
R1, R2 : Flowmeter  
T1 : feed tank  
T2 : permeate tank

با استفاده تزریق گاز، ۲ تا ۳ برابر افزایش فلاکس بدست آمده است [۵]. همچنین با استفاده از جریان دوفازی گاز/مایع در فیلتراسیون سوسپانسیونهای بنتونیت و مخمر افزایش قابل ملاحظه‌ای (۲۰۰٪) در فلاکس مشاهده شده و اشاره شده که رژیم Slug بهترین حالت انجام فیلتراسیون می‌باشد [۱۰ و ۶]. در گزارشی دیگر فیلتراسون سوسپانسیون خاک رس همراه با تزریق گاز صورت گرفته و در شرایط ویژه‌ای ۱۵۵ درصد افزایش در فلاکس بدست آمده است [۹ و ۱۱]. تحقیقات قابل ملاحظه‌ای در زمینه فیلتراسیون پروتئینها با استفاده از جریان دوفازی برای غشاهای مختلف (صفحه‌ای و لوله‌ای سرامیکی) انجام شده است. مطالعات نشان می‌دهد که علاوه بر تأثیر مثبت تزریق گاز بر افزایش فلاکس، این روش بر انتخاب‌پذیری غشا نیز تأثیر می‌گذارد [۱۳ و ۱۲].

در روش دوم جریان تراویده با عبور از غشا به صورت معکوس به داخل جریان خوراک برگشت داده می‌شود. این امر باعث جدا شدن لایه کیک و باز شدن حفره‌ها می‌شود [۱]. در این روش با تغییر در فرکانس اعمال جریان معکوس میتوان به صورت بهینه با مشکل گرفتگی درونی مبارزه نمود. اعمال جریان معکوس روشی مؤثر در کاهش گرفتگی غشا و در نتیجه افزایش کارآیی غشاء می‌باشد. استفاده از این روش در غشاهای سرامیکی به علت مقاومت آنها در برابر تغییر شکل بسیار توسعه یافته است [۱۶].

تأثیر این روش بر اولترافیلتراسیون هموگلوبین و دکستران بررسی شده و ۲ برابر افزایش فلاکس مشاهده شده است [۱۵]. میکروفیلتراسیون آب حاصل از سشتسوی معکوس (Backwash) یک واحد تصفیه پساب نیز با این روش بررسی شده و این نتیجه حاصل شده است که این روش هم از نظر تکنولوژیکی و هم بازدهی بسیار مناسب می‌باشد [۱۴]. روش اعمال جریان معکوس در تصفیه آب بکار رفته و گزارش شده است که فرکانس عمل در کارآیی

می شود (slug flow) در این حالت با کاهش سطح مقطع جریان مایع، همواره یک لایه نازک مایع روی سطح غشاء وجود دارد که برخلاف جهت اصلی جریان حرکت می کند این پدیده بطور متناوب باعث ایجاد تنش برشی زیادی در سطح غشاء می شود. این ویژگی باعث می شود که این الگوی جریان بیشترین اثر را در افزایش فلاکس داشته باشد [۶].



شکل ۱- حالت‌های مختلف جریان در نسبت‌های مختلف گاز/مایع: a)  $r < 0.25$ ; b, c)  $0.25 < r < 0.9$ ; d)  $r > 0.9$

بررسی‌های اخیر نشان می دهد که جریان دوفازی گاز/مایع بخصوص وقتی رژیم جریان در حالت Slug باشد کارآیی فرایند فیلتراسیون را افزایش می دهد [۸].

اثر جریان دوفازی گاز/مایع در دو غلظت ۵ و ۲۵ گرم در لیتر مخمر بررسی شد. فیلتراسیون به مدت ۱۰۰ دقیقه در فشار ۱ بار، درجه حرارت ۳۰ درجه سانتیگراد، دبی مایع برابر ۰.۵ متر بر ثانیه، نسبت دبی گاز به مایع برابر با ۱.۸ انجام شد. نتایج در نمودارهای (۱ و ۲) آمده است. در غلظت ۵ گرم در لیتر تزریق گاز افزایش ۳.۵ برابر و در غلظت ۲۵ گرم در لیتر افزایش ۵ برابر مشاهده می شود.

جریان دوفازی باعث افزایش تنش برشی در سطح غشاء شده و این مستقیماً بر ویژگی‌های لایه کیک تشکیل شده بر سطح داخلی غشاء اثر می گذارد و موجب کاهش مقاومت

در ورودی مدول غشاء هوای فشرده از طریق یک نازل به سیستم تزریق شد. دبی جریانهای مایع و گاز بوسیله دو عدد رواتر اندازگی گیری گردید. درجه حرارت سوسپانسیون بوسیله یک مبدل حرارتی استیل روی ۳۰ درجه تنظیم شد.

برای اعمال جریان معکوس از فشار هوا استفاده شد. یک شیر سلونوئید و یک فشارسنج برای تنظیم شرایط عملیاتی بکار برده شد. طراحی سیستم به گونه‌ای بود که از نفوذ هوا به داخل غشاء جلوگیری شود. دو غشاء سرامیکی لوله ای از جنس آلومینا مورد استفاده قرار گرفت. یکی به طول ۱۰، قطر داخلی ۰.۹ و قطر خارجی ۱.۲ سانتیمتر به روش اکستروژن در آزمایشگاه ساخته شد و متوسط اندازه حفره ها ۱ میکرومتر و میزان تخلخل ۴۵ درصد تعیین گردید. دیگری به طول ۱۰، قطر داخلی ۰.۷ و قطر خارجی ۰.۹ سانتیمتر با متوسط اندازه حفره ها ۰.۲ میکرومتر ساخت شرکت pall.

## بحث نتایج

### ۱) اثر جریان دوفازی گاز/مایع بر افزایش فلاکس در غلظت‌های مختلف

وقتی مخلوط گاز و مایع در یک لوله عمودی به سمت بالا حرکت می کند. به تناسب نرخ جریان گاز و مایع ( $Q_G$ ,  $Q_L$ ) یا به تناسب سرعت جریان گاز و مایع ( $U_G$ ,  $U_L$ ) الگوهای هیدرودینامیکی متفاوتی ایجاد می شود [۶].

این الگوها را می توان به مقدار نسبت  $r = U_g / (U_g + U_L)$  مربوط دانست که در آن  $U_L$ ,  $U_g$  سرعت گاز و مایع در حالی است که هر کدام جداگانه در لوله جریان داشته باشند (superficial velocity). هرگاه سرعت مایع ثابت باشد با افزایش سرعت گاز به ترتیب الگوهای شکل (۱) ایجاد می شود [۷].

برای  $r < 0.25$  فاز گاز بصورت حبابهای ریزی بطور یکنواخت در فاز مایع پراکنده می شود. برای  $0.25 < r < 0.9$  حباب های بزرگی به اندازه قطر لوله ایجاد

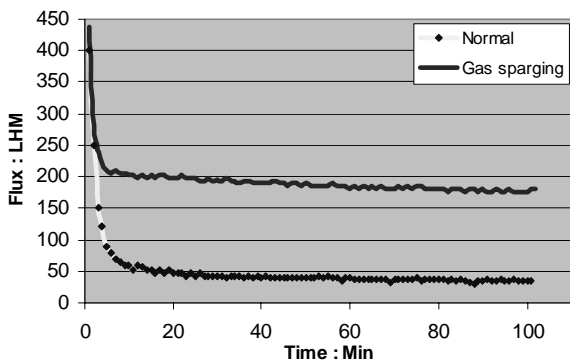
نتیجه بازدهی تزریق گاز بر افزایش فلاکس با افزایش غلظت بیشتر می‌شود. هر چند مقدار مطلق فلاکس با افزایش غلظت کم می‌شود.

## ۲) اثر اندازه حفره‌های غشاء بر بازدهی جریان دو فازی گاز/مایع

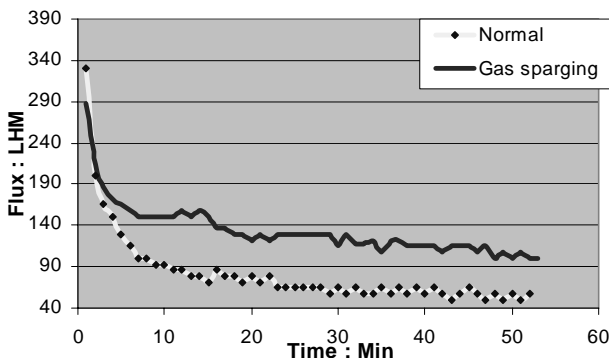
برای بررسی اثر اندازه حفره‌های غشاء بر بازدهی تزریق گاز، از دو غشاء با اندازه حفره‌های ۱ و ۰,۲ میکرومتر استفاده شد.

آزمایش در شرایط مشابه حالت قبل برای هر دو غشاء انجام شد. نتایج حاصل در نمودارهای (۳ و ۴) آمده است.

فلاکس حالت پایدار با تزریق گاز برای غشاء ۱ میکرومتر نسبت به حالت عادی ۱,۹ برابر افزایش و برای غشاء ۰,۲ میکرومتر این افزایش ۵ برابر می‌باشد.



نمودار ۳- تغییرات فلاکس در حالت تزریق گاز و حالت عادی در غشاء ۰,۲ میکرومتر



نمودار ۴- تغییرات فلاکس در حالت تزریق گاز و حالت عادی در غشاء ۱ میکرومتر

لایه کیک می‌شود. مقاومت لایه کیک (R) را می‌توان به دو ترم زیر مربوط دانست:

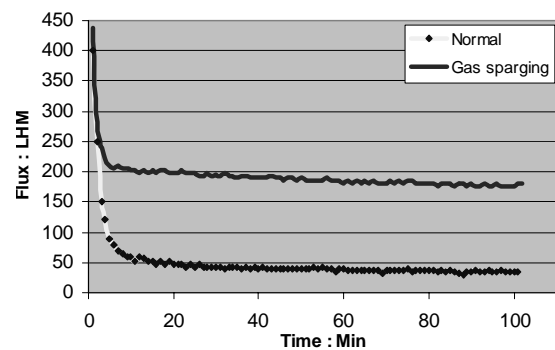
$$R = \phi * \delta$$

که در این رابطه:

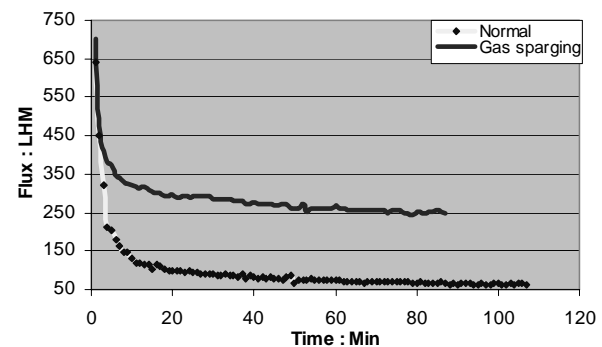
$\phi$ : مقاومت مخصوص

$\delta$ : ضخامت لایه کیک

بر اساس مطالعات انجام شده جریان دو فازی باعث افزایش تخلخل لایه کیک و در نتیجه کاهش مقاومت مخصوص آن می‌شود [۲۰]. همچنین تزریق گاز ضخامت لایه کیک را کاهش می‌دهد [۸]. به این ترتیب باعث کاهش مقاومت کیک می‌شود.

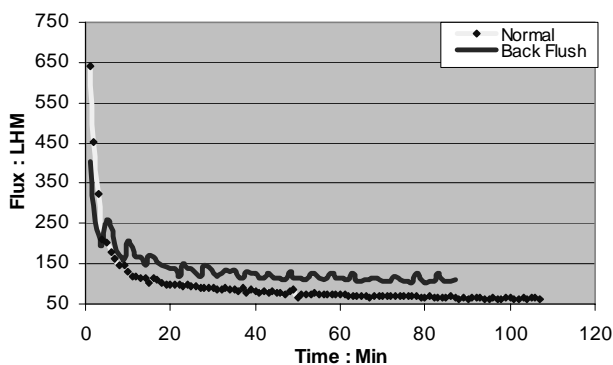


نمودار ۱- تغییرات فلاکس در حالت تزریق گاز و حالت عادی در غلظت ۲۵ گرم در لیتر

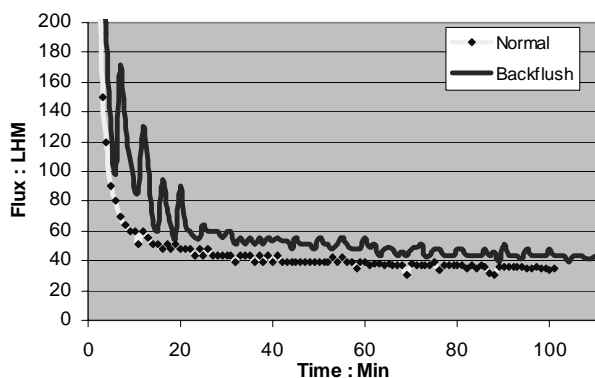


نمودار ۲- تغییرات فلاکس در حالت تزریق گاز و حالت عادی در غلظت ۵ گرم در لیتر

با افزایش غلظت سوسپانسیون تأثیر مقاومت لایه کیک بر کاهش فلاکس افزایش می‌یابد و گرفتگی بیشتر می‌شود در



نمودار ۵- تغییرات فلاکس در حالت جریان معکوس و حالت عادی در غلظت ۵ گرم در لیتر



نمودار ۶- تغییرات فلاکس در حالت جریان معکوس و حالت عادی در غلظت ۲۵ گرم در لیتر

#### ۴) اثر اندازه حفره‌های غشا بر بازدهی جریان معکوس

عملیات جریان معکوس به منظور کاهش گرفتگی در شرایطی مشابه حالت ۳ و در دو غشاء ۱ و ۰,۲ میکرومتر انجام شد. نمودارهای (۷ و ۸) نتایج فیلتراسیون را نشان می‌دهند. در غشاء ۱ میکرومتر مقدار متوسط فلاکس پس از گذشت ۵۰ دقیقه، نسبت به حالت عادی ۳ برابر افزایش و در غشاء ۰,۲ میکرومتر ۱,۴ برابر افزایش مشاهده می‌شود.

همانطور که در این نمودارها مشخص است، روند تغییرات فلاکس در غشاء ۱ میکرومتر به خوبی نشان دهنده باز شدن حفره‌ها در هنگام انجام جریان معکوس می‌باشد. این نتایج تاییدی است بر اینکه مکانیزم غالب در کاهش فلاکس در

کاهش فلاکس در میکروفیلتراسیون را می‌توان به دو پدیده گرفتگی داخلی و گرفتگی خارجی مربوط دانست. گرفتگی خارجی متأثر از تشکیل لایه کیک و یا ژل بر سطح غشاء می‌باشد.

در حالیکه گرفتگی داخلی ناشی از مسدود شدن حفره‌ها و نیز کاهش قطر حفره‌ها در اثر پدیده جذب سطحی می‌باشد. ذراتی که اندازه‌های بزرگتر از حفره‌ها دارند باعث ایجاد گرفتگی خارجی و ذراتی که دارای اندازه‌ای برابر و یا کمتر از قطر حفره‌ها باشند، باعث گرفتگی داخلی می‌شوند. سوسپانسیون مخمر دارای توزیع اندازه ذراتی با اندازه متوسط ۵ میکرومتر می‌باشد [۸]. بنابراین در غشاء ۰,۲ میکرومتر بخش اصلی گرفتگی از نوع خارجی است در حالیکه در غشاء ۱ میکرومتر عامل اصلی کاهش فلاکس مسدود شدن حفره‌ها می‌باشد. در غشاء ۱ میکرومتر اثر مقاومت لایه کیک در کاهش فلاکس کمتر است در نتیجه بازدهی جریان دو فازی در افزایش فلاکس محدودتر است.

#### ۳) اثر جریان معکوس بر افزایش فلاکس در غلظتهای مختلف

اثر جریان معکوس در دو غلظت ۵ و ۲۵ گرم در لیتر مخمر بررسی شد. فیلتراسیون در شرایط عملیاتی مشابه حالت ۱ انجام شد. جریان معکوس در فشار ۱,۴ بار و به مدت ۵ ثانیه در هر ۴ دقیقه انجام شد. نتایج بدست آمده در نمودارهای (۵ و ۶) نشان داده شده است. افزایش فلاکس نسبت به حالت عادی در غلظت ۵ گرم در لیتر، ۱,۷ برابر و در غلظت ۲۵ گرم در لیتر، ۱,۴ برابر می‌باشد.

همانطور که از نتایج حاصله مشاهده می‌شود در غلظت کمتر، در شرایط عملیاتی این آزمایش جریان معکوس نتایج بهتری داشته است.

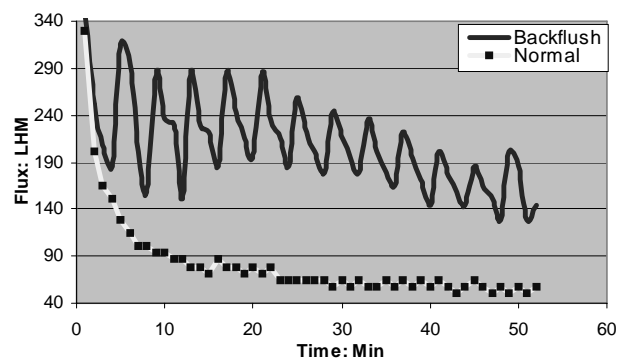
غشاء ۱ میکرومتر گرفتگی داخلی است. و به همین ترتیب در غشاء ۰,۲ میکرومتر که مکانیزم غالب گرفتگی از نوع خارجی است، جریان معکوس اثر قابل توجهی ندارد.

## مراجع

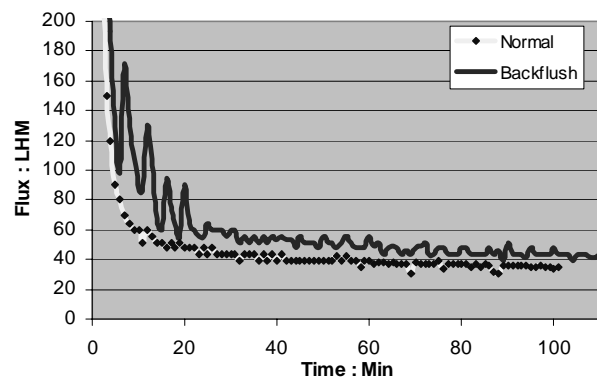
- [1] R.J. Wakemah, C. J. Williams : Additional techniques to improve microfiltration . separation and purification Technology 26 ( 2002) 3-18
- [2] S.M. Finning , J.A. Howell, The effect of pulsatile flow on ultrafiltration fluxes in a baffled tubular membrane system, chem. Eng. Res. Des. 67 (1989) 278.
- [3] B.J.Bellhouse, I.J. Sobey . Enhanced filtration using flat membrane and standing vortex waves, Bioseparation 4 (1994) 127.
- [4] I. G. Racz, J.G. wassink, R. Klassen , Mass transfer, fluid flow and membrane properties in flat and corrugated plate hyperfiltration modules Desalination 60 (1986) 213
- [5] Z.F. Cui, K.I.T. wright, flux enhancement with gas sparging in down wards cross flow ultrafiltration: performance and mechanism J. Membrane Sci, 117 (1996) 109.
- [6] M.Mercier, C. Fonade, C., Laffoegue-Delorme, How slug flow can Enhance the ultrafiltration Flux in mineral tubular membrane , J. Membrane Sci, 128(1997) 103-113.
- [7] L.Vera, R.villarrod, S. Delgado, S. Elmale. Enhancing microfiltration through an inorganic tubular membranes by gas sparging J. Membrane Sci, 165 (200) 47-57.
- [8] Muriel Mercier-Bonin, Christian Fonedra, Ari-sparged microfiltration of enzyme/yeast mixtures: determination of optimal condition for enzyme recovery, Desalination, 148 (2002) 171-176.
- [9] C. Cabassud, S. Laborie, J.M Laine, How slug flow can improve ultrafiltration flux in organic hollow fibers, J. Membrane Sci. 128 (1997) 93.
- [10] M.Mercier, C. Fonade, C., Laffoegue-Delorme, C., Biotechnol. Tech. 9 (1995) 853.
- [11] C. Cabassud, S. Laborie, C. Cabassud, Durand-Bourlier L. Laine, J. M., Filtration & Separation 34 (1997) 887.
- [12] Z.F. Cui, K.I.T. wright, Gas-Liquid tow-phase ultrafiltration of BSA and dextran solutions, J. Membrane Sci. 90 (1994) 183-189.
- [13] Z.F. Cui, S.R Bellara, P. Honewood, Airlift cross flow membrane filtration- A

## جمع بندی

نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می دهد که روشهای مبتنی بر بهبود هیدرودینامیک سیستم در شرایطی که مکانیزم اصلی کاهش فلاکس ، گرفتگی خارجی باشد مؤثرتر است. همچنین در سیستمهایی که مکانیزم اصلی کاهش فلاکس گرفتگی داخلی است، استفاده از روشهای جریان معکوس توصیه می شود.



نمودار ۷- تغییرات فلاکس در حالت جریان معکوس و حالت عادی در غشاء ۱ میکرومتر



نمودار ۸- تغییرات فلاکس در حالت جریان معکوس و حالت عادی در غشاء ۰,۲ میکرومتر

feseability study with dextran ultrafiltration, *J. Membrane Sci.* 128 (1997) 83-91.

[14] S. Vigeswaran, S. Boonthanon, H. Prasanthi, Filter backwash recycling using cross flow microfiltration, *Desalination* 106 (1996) 31-38.

[15] B.S. Kim, H.N. Chang, Effect of periodic backpulsing on ultrafiltration performance, *Bioseparation* 2 (1991) 23-29.

[16] R. Sondhi, Y.S. Lin, F. Alvarez, Cross flow filtration of chromium hydroxide suspension by ceramic membranes: fouling and its minimization by backpulsing, *J. Membrane Sci.* 174 (2000) 111-122.

[17] S. Natasuka, I. Nakata, T. Miyano, Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow fiber membranes, *Desalination* 106 (1996) 55-61.

[18] M. Kennedy, S.M Kim, I. Mutenyo, L. Brones, J. Schippers, Intermittent cross flow of hollow fiber ultrafiltration system, *Desalination* 118 (1998) 175-188.

[19] Y. Xu, J. Ddds, D. Llecler, Optimization of a discontinuous microfiltration backwash process. *Chem. Eng. J* 57 (1995) 247-251.

[20] P. Mikulasek, J Cakl, P. Pospisil, P. Doleceke, The use of flux enhancement methods for high flux cross flow membrane microfiltration system, *Chem. Biochem. Eng. Q.* 14 (4) 117-123 (2000)