

ارزیابی فنی و اقتصادی و تعیین بازه‌ی بهینه عملیاتی برای دو نانوغشای تجاری در تصفیه یک نمونه آب زیرزمینی

احمد رضا قهرمان فرد، مرتضی صادقی*⁺، احمد محب، مهرداد حسام پور

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده: تعیین بازه‌ی بهینه عملیاتی برای تمامی فرایندها به‌ویژه فرایندهای غشایی به‌منظور تصفیه آب تأثیر به‌سزایی در کاهش هزینه‌های این سامانه‌ها خواهد داشت. مهم‌ترین عامل عملیاتی که امکان تغییر در آن وجود دارد فشار خوراک ورودی به فرایند تصفیه می‌باشد. در این مطالعه توانایی دو نوع نانوغشای تجاری در کاهش املاح یک نمونه آب زیرزمینی بررسی شد و در ادامه بازه‌ی بهینه عملیاتی برای دو نانوغشای تجاری NF90 و NF270 تعیین شد. غشاهای استفاده شده ساخت شرکت FILMTEC آمریکا بوده و برای تعیین بازه‌ی بهینه از مدل اقتصادی وربرن استفاده شده است. نتیجه‌های به دست آمده از این بررسی نشان داد که نانوغشای تجاری NF90 دارای توانایی بالاتری در کاهش املاح از آب بوده (حدود ۳۰ درصد بیش‌تر) و در عوض میزان آب تصفیه شده خروجی از آن به تقریب ۵۰ درصد نانوغشای NF270 می‌باشد. همچنین بازه‌ی بهینه برای نانوغشای NF90 فشار خوراک ۸ بار و برای نانوغشای NF270 فشار خوراک ۶ بار می‌باشد. هزینه تولید هر متر مکعب آب در بازه‌ی بهینه ۰٫۱۴۴ دلار برای NF90 و ۰٫۱۲ دلار برای NF270 تخمین زده شد.

واژه‌های کلیدی: نانوغشا؛ بازه‌ی بهینه؛ مدل اقتصادی وربرن؛ هزینه سرمایه گذاری؛ هزینه عملیاتی.

KEYWORDS: Nanomembrane; Optimum Range; Verberne Economic Model; Investment cost; operational cost.

مقدمه

اشاره نمود [۳، ۲]. در بین روش‌های غشایی فرایند نانوتصفیه در تولید آب شرب به طور گسترده استفاده می‌شود. نانوفیلتراسیون یک فرایند غشایی است که ویژگی‌های جداسازی غشاهای آن بین فراتصفیه و اسمز معکوس قرار می‌گیرد [۴]. تاریخچه این غشاهای به دهه هفتاد میلادی باز می‌شود زمانی که غشاهای اسمز معکوس با فشارهای به نسبت پایین و شدت جریان فراورده‌ی بالاتر رشد کردند. مکانیسم جداسازی در نانوغشاهای شامل اثر اندازه مولکول (برای مواد غیر یونی)، اختلاف در نفوذپذیری و حلالیت اجزای خوراک و برهم کنش الکتریکی (پدیده دونان) بین سطح غشا و

امروزه با توجه به کاهش منابع آب قابل نوشیدن و وضع قانون‌های سختگیرانه از سوی سازمان‌های بهداشتی در مورد کیفیت مورد نیاز آب نوشیدنی، استفاده از یک فرایند تصفیه مناسب، ایمن و اقتصادی ضروری به نظر می‌رسد [۱]. از تازه‌ترین و مناسب‌ترین روش‌های تصفیه آب و پساب می‌توان به روش‌های غشایی اشاره نمود. از برتری‌های این روش‌ها می‌توان به صرفه جویی در مصرف انرژی، فناوری ساده و کاربرد آسان، سازگاری با محیط زیست، تولید فراورده‌ی با کیفیت مناسب، انعطاف‌پذیری بالا در طراحی سامانه، امکان ترکیب با سایر فرایندهای جداسازی و اشغال فضای کم

+E-mail: m-sadeghi@cc.iut.ac.i

*عهدہ دار مکاتبات

از یک واحد نیمه صنعتی استفاده شده است. در سال ۱۹۹۳ میلادی پیکربندی و همکاران^(۶) [۱۱] مدلی به نسبت جامع برای ارزیابی هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی فرایندهای غشایی میکروفیلتراسیون، فراتصفیه و نانوتصفیه در تصفیه آب ارائه نمودند. در این مدل بیش تر هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی لحاظ شده است. مبنای بسیاری از روابط این مدل سطح غشا مورد نیاز بوده که این سطح از طریق رابطه بین میزان فرآورده‌ی خروجی، میزان بازیافت خوراک و ظرفیت آن معین شده است. وربرن و همکاران^(۷) [۱۲] در سال ۱۹۹۳ میلادی یک مدل اقتصادی برای تخمین هزینه‌های یک فرایند غشایی نانوفیلتراسیون پیشنهاد کردند. مبنای این مدل اطلاعات به دست آمده از پروژه های صنعتی و پیشنهادهای شرکت‌های سازنده تجهیزات بوده است. ون در بروگن و همکاران^(۸) [۱۳] در سال ۲۰۰۱ میلادی با استفاده از مدل وربرن هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی را برای یک غشای تجاری نانوفیلتراسیون در فشارهای گوناگون محاسبه نموده و فشار بهینه ۸ بار را از نظر اقتصادی برای انجام عملیات تصفیه پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۰۴ میلادی نورا علی و همکاران [۱۴] با تلفیق دو مدل اقتصادی وربرن و مدل نظری DSPM، اثر تغییر عامل‌های مدل نظری را بر روی میزان هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی سامانه نانوفیلتراسیون بررسی نمودند. وهاب محمد و همکاران [۱۵]. در سال ۲۰۰۴ میلادی با استفاده هم‌زمان از مدل اقتصادی وربرن و مدل نظری DSPM، اثر تغییر عامل‌های مدل نظریه مانند اندازه روزنه غشا، دانسیته بار غشا، ضخامت مؤثر و عامل‌های عملیاتی فرایند مانند فشار و غلظت را بر روی هزینه‌های سامانه نانوفیلتراسیون بررسی نمودند. در پژوهشی دیگر از این گروه [۱۶] (در سال ۲۰۰۶ میلادی)، اثر تغییر عامل‌های مدل تصحیح شده DSPM-DE بر روی هزینه‌های یک سامانه غشایی نانوفیلتراسیون بررسی شد. در این مطالعه از نتیجه‌های به دست آمده از یک مطالعه تجربی که از دو نانوغشای تجاری برای زدودن یون نیترات از یک نمونه آب چاه استفاده کرده بود، استفاده شد و سپس با بهره مندی از مدل اقتصادی وربرن هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی دو سامانه غشایی در بازه فشار ۴ تا ۱۶ بار محاسبه شد و بازه‌ی بهینه (حداقل هزینه تولید هر متر مکعب آب) معرفی شد [۱۷]. در این پژوهش همچنین هزینه عملیاتی هر متر مکعب آ

یون‌های موجود در خوراک می‌باشد [۵]. اولین کاربردهای نانوغشاها در نیمه دوم دهه هشتاد میلادی گزارش شده است. بازار جهانی استفاده از نانوفیلترها بخصوص در زمینه تصفیه آب به سرعت در حال گسترش می‌باشد. یکی از مباحث‌های مطرح در استفاده از این سامانه‌ها به غیر از کیفیت پایانی آب تولیدی بحث اقتصادی (هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی) می‌باشد. پژوهش‌های کمی در زمینه ارزیابی اقتصادی سامانه های غشایی صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۹ میلادی تیلور و همکاران^(۱) [۶] یک مدل اقتصادی برای سختی زدایی و حذف مواد جانبی کلرزی توسط فرایندهای غشایی نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس ارائه نمودند. نتیجه‌های این مدل نشان داد که هزینه‌های فرایندهای غشایی یاد شده با فرایندهای موجود دیگر قابل مقایسه می باشد. دانکل برگر و همکاران^(۲) [۷] در سال ۱۹۹۱ میلادی مدلی برای ارزیابی هزینه‌های فرایندهای غشایی فراتصفیه و نانوتصفیه ارائه نمودند. رابطه‌های استفاده شده در این مدل نیمه تجربی بوده و همچنین از این مدل برای ارزیابی اثر فشار بر روی هزینه‌های فرایند بهره گرفته شده است. در همین سال، فوکوتا^(۳) و همکاران [۸] مدلی برای ارزیابی هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی تصفیه آب‌های لب شور توسط فرایند غشایی اسمز معکوس منتشر کردند. بر طبق این مدل هزینه‌های سرمایه گذاری تابعی خطی از ظرفیت نهایی تولید فرایند می‌باشد. همچنین هزینه‌های عملیاتی شامل نیروی انسانی، مواد شیمیایی مورد نیاز، تدارکات، تعمیر و نگهداری، انرژی برق مصرفی و جایگزینی المان‌های غشایی استفاده شده هر پنج سال یکبار می‌باشد. سورات^(۴) [۹] در همین سال مدلی را برای تصفیه آب‌های لب شور با ظرفیت ۱۵۷ تا ۹۵۴ متر مکعب در ساعت توسط فرایند غشایی اسمز معکوس ارائه نمود. رابطه‌های ارائه شده در این مدل نیمه تجربی بوده و هزینه های مدول های غشایی، سازه‌های عمرانی، تجهیزهای الکتریکی، پمپ و لوله کشی، ابزارها، مواد شیمیایی، جایگزینی مدول‌های غشایی، نیروی انسانی و برق مصرفی در نظر گرفته شده است. باز هم در این سال لویت ویلر^(۵) [۱۰] مدلی را برای تصفیه آب‌های زیرزمینی توسط فرایند غشایی فراتصفیه ارائه نمود. هزینه‌های سرمایه گذاری در این مدل چهار برابر هزینه مدول‌های غشایی در نظر گرفته شده است. همچنین برای تخمین شار آب تصفیه شده

(۱) Taylor et al.

(۲) Dunkleberger et al.

(۳) Fuquta et al.

(۴) Suratt et al.

(۵) Luitweiler et al.

(۶) Pickering et al.

(۷) Verberne et al.

(۸) van der Bruggen et al.

نتیجه‌های تجربی نشان می‌دهد که برای هر دو نوع نانوغشا با افزایش فشار، شدت جریان جریان فرآورده و میزان حذف جامدهای محلول در آب افزایش می‌یابد. همچنین نتیجه‌های میزان حذف نشان می‌دهد که برای آب‌های دارای املاح متوسط نانوغشاها به‌ویژه نوع NF90 امکان تامین استانداردهای آب شرب را دارا می‌باشند. میزان حذف جامدهای محلول در آب برای غشا NF90 در فشارهای یکسان حدود ۳۰ درصد بیش‌تر از نانوغشا دیگر بوده که این امر به دلیل ساختار غشا و چگونگی ساخت آن می‌باشد. از این نانوغشا می‌توان حتی برای حذف یون‌های تک ظرفیتی مانند نیترات نیز استفاده نمود در صورتی که نانوغشا NF270 در حذف یون‌های چندظرفیتی موثرتر عمل نموده و کارایی مناسبی در حذف یون‌های تک ظرفیتی مانند نیترات ندارد. نمونه آب استفاده شده دارای مقدار جامدهای محلول حدود ۱۴۰۰ میلی گرم بر لیتر می‌باشد در نتیجه برای تصفیه این نمونه آب و رسیدن به شرایط مناسب نوشیدن از نظر فنی نانوغشا NF90 مناسب‌تر می‌باشد. در ادامه یک مطالعه موردی برای راه اندازی یک تصفیه خانه بزرگ آب مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. برای محاسبه تعداد مدول غشایی مورد نیاز برای هر دو نانوغشا از اطلاعات شدت جریان فرآورده بر حسب فشار پژوهش *سانتافه* استفاده شده است. همچنین سطح هر مدول غشا تجاری مورد استفاده در تصفیه خانه های بزرگ آب ۳۷ متر مربع، شدت جریان خوراک ورودی ۱۰۰۰ متر مکعب بر ساعت و شدت جریان فرآورده پایانی ۸۰۰ متر مکعب بر ساعت در نظر گرفته شده است. نتیجه‌های غشاهای NF90 در جدول ۳ و غشای NF270 در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتیجه‌های به دست آمده از جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که با افزایش فشار تعداد مدول غشایی در هر دو سامانه کاهش یافته در سامانه غشایی NF90 از ۲۳۱۰ در فشار ۴ بار به ۶۶۷ مدول در فشار ۱۶ و در سامانه غشایی NF270 از ۱۰۶۳ به ۲۸۳ مدول در فشار پایانی ۱۶ بار رسیده است. افزایش فشار در هر دو سامانه غشایی باعث افزایش میزان فرآورده‌ی تراوش یافته شده که این موضوع امری واضح است. همچنین در یک فشار همانند تعداد مدول غشایی NF90 بیش از NF270 بوده که دلیل آن ساختار فشرده‌تر غشاهای NF90 می‌باشد.

اثر فشار بر هزینه‌های دو نانو غشا تجاری

با استفاده از مدل اقتصادی وربرن، نتیجه‌های آزمایشگاهی گرفته شده از پژوهش *سانتافه* موروس و همچنین فرضیه‌های یاد شده

آب تولیدی در بازه فشار اشاره شده تخمین زده شد. همچنین توزیع هزینه‌های عملیاتی در فشار بهینه برای دو سامانه غشایی محاسبه شده است.

بخش نظری

مدل اقتصادی وربرن در سال ۱۹۹۳ میلادی توسط وربرن و همکاران پیشنهاد شد. این مدل جامع‌ترین ارزیابی اقتصادی فرایند غشایی نانوفیلتراسیون را ارائه می‌دهد. با توجه به مرور مدل‌های موجود، جامع‌ترین مدل در زمینه ارزیابی فرایند غشایی نانوفیلتراسیون مدل اقتصادی وربرن به‌طور تخصصی برای فرایندهای غشایی نانوفیلتراسیون ارائه شده در صورتی که مدل‌های دیگر به صورت اختصاصی برای فرایندهای غشایی ارائه نشده‌اند و بازه‌ای از فرایندها را در بر می‌گیرند.

رابطه‌های استفاده شده در این مدل بر مبنای اطلاعات پروژه‌های صنعتی و پیشنهادهای شرکت‌های سازنده تجهیزات می‌باشد. در این مدل هزینه‌ها به دو قسمت سرمایه گذاری ثابت و عملیاتی تقسیم شده است. هزینه‌های سرمایه گذاری شامل سازه های عمرانی (سازه‌های مورد نیاز برای استقرار تجهیزات)، تجهیزهای مکانیکی مانند پمپ‌ها، فیلترها و لوله کشی، تجهیزهای الکتریکی مانند منبع انرژی و تجهیزات کنترلی و سرانجام هزینه تأمین مدول‌های غشایی می‌باشد. هزینه‌های عملیاتی شامل استهلاک، انرژی مصرفی پمپ‌ها، مواد شیمیایی مورد نیاز، تعمیر و نگهداری، کنترل کیفیت و عملیات نصب می‌شود. روابط استفاده شده در مدل اقتصادی وربرن در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

نتیجه‌ها و بحث

تعداد مدول غشایی مورد نیاز

سانتافه موروس و همکاران (۲۰۰۵ میلادی) با انجام پژوهشی در مقیاس آزمایشگاهی، با استفاده از دو غشا نانوفیلتر فرایند تصفیه را بر روی یک نمونه آب زیرزمینی در اسپانیا انجام دادند. فرایند در شرایط عملیاتی گوناگون فشار و pH انجام گرفته است [۱۷]. نتیجه‌های این پژوهش در جدول‌های ۳ و ۴ به‌طور اختصار آورده شده است. در مطالعه تجربی انجام شده توسط *سانتافه* و همکاران، هر سل تست غشا دارای چهار غشا با سطح فیلتراسیون ۳۰ سانتی متر مربع بوده است. دو غشای مورد استفاده تجاری و از جنس غشای کامپوزیتی پلی آمید ساخت شرکت Filmtec آمریکا بوده است. شمای فرایند نانوفیلتراسیون در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- روابط هزینه‌های سرمایه‌گذاری در مدل اقتصادی و برن.

شاخص‌های سرمایه‌گذاری	معادله‌های مرتبط با هزینه‌ها (دلار)	زمان استهلاک (سال)
عمرانی	$k_{civil}=862Q_F+1239n$	۳۰
مکانیکی	$k_{mech.}=3608Q_F^{0.85}+908n$	۱۵
الکتریکی	$k_{elec.}=1.4 \times 10^6+54PQ_F$	۱۵
غشایی	$k_{mem.}=mn$	۵

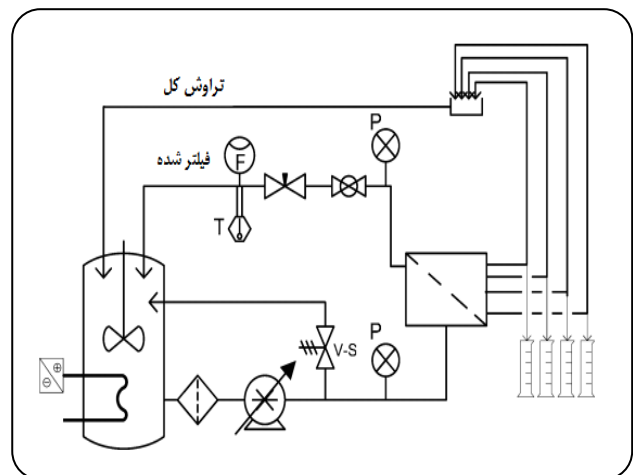
جدول ۲- روابط هزینه‌های عملیاتی در مدل اقتصادی و برن.

شاخص‌های هزینه‌های جاری	معادله‌های مرتبط با هزینه‌ها (دلار)
استهلاک	$k_{dep.}=\frac{k_{civil}}{30}+\frac{1}{15}(k_{mech.}+k_{elec.})+\frac{k_{mem.}}{5}$
انرژی	$k_{energy}=\frac{S.F.\Delta P.Q_F}{\eta}$
مواد شیمیایی	$k_{chem.}=0.023Q_F$
تعمیر و نگهداری	$k_{main.}=0.02k_{invest.}$
نصب و کنترل کیفیت	$k_{QC \& ins.}=0.04k_{invest.}$

جدول ۳- میزان حذف جامدهای محلول و تعداد مدول غشایی مورد نیاز در NF90 [۱۷].

تعداد مدول	RTDS(%)	شار تراوش ($m^3.m^{-2}.S^{-1}$)	فشار (بار)
۲۳۱۰	۹۳	۵.۲	۴
۱۵۷۲	۹۵	۷.۶۴	۶
۱۱۷۸	۹۶	۱۰.۲۰	۸
۱۰۱۲	۹۶	۱۱.۸۷	۱۰
۸۵۲	۹۷	۱۴.۱۰	۱۲
۷۴۶	۹۸	۱۶.۱۰	۱۴
۶۶۷	۹۸	۱۸	۱۶

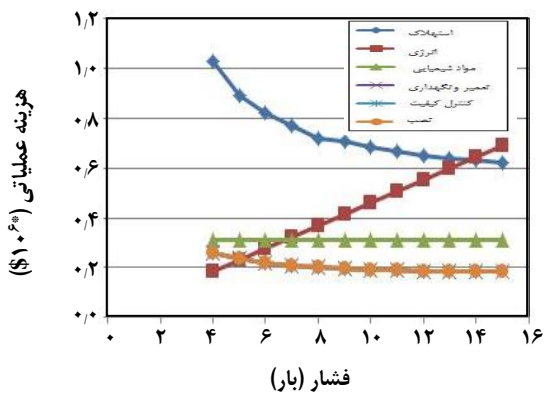
در مقاله هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی دو سامانه غشایی در بازه فشار ۴ تا ۱۶ بار محاسبه شد. نتیجه‌های به دست آمده در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است. شکل‌های ۲ و ۳ نشان دهنده آن است که در هر دو سامانه با افزایش فشار هزینه‌های عمرانی، مکانیکی و غشایی کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش تعداد سطح غشا مورد نیاز و در نتیجه کاهش تعداد مدول مورد نیاز می‌باشد. دلیل افزایش هزینه‌های الکتریکی نیز وابستگی آن به فشار می‌باشد. میزان تفاوت در هزینه‌های دو سامانه غشایی با افزایش فشار کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش تغییر سطح غشا مورد نیاز برای تصفیه خوراک ورودی و در نتیجه کوچک شدن سازه عمرانی مورد نیاز می‌باشد. هزینه تجهیزهای الکتریکی تابع فشار بوده و



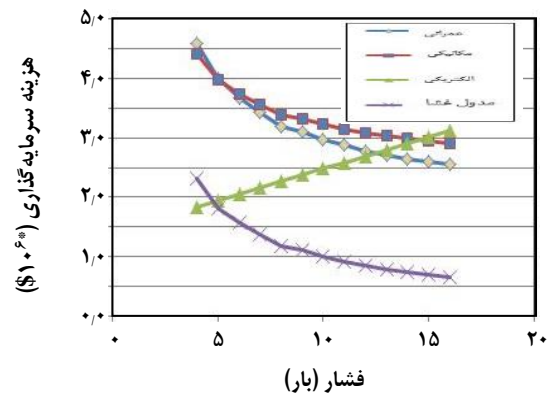
شکل ۱- شمای فرایند نانو تصفیه برای تصفیه آب زیرزمینی [۱۷].

جدول ۴- میزان حذف جامدهای محلول و تعداد مدول غشایی مورد نیاز در NF270 [۱۷].

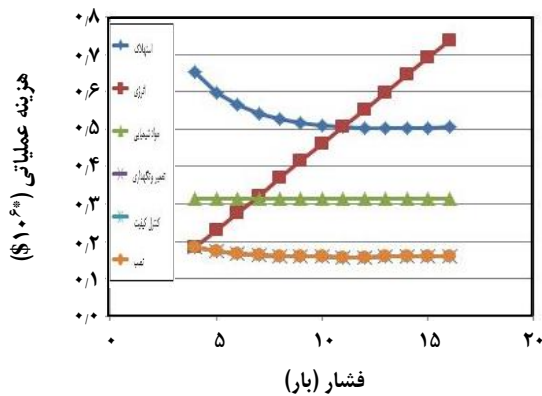
تعداد مدول	R _{TDS} (%)	شار تراوش (m ³ .m ⁻² .S ⁻¹)	فشار (بار)
۱۰۶۳	۵۱	۱۱.۳	۴
۷۱۹	۵۵	۱۶.۷۱	۶
۵۴۴	۶۰	۲۲.۱	۸
۴۴۵	۶۲	۲۷.۰۲	۱۰
۳۷۰	۶۵	۳۲.۵	۱۲
۳۲۲	۶۵	۳۷.۳۳	۱۴
۲۸۳	۶۶	۴۲.۴۸	۱۶



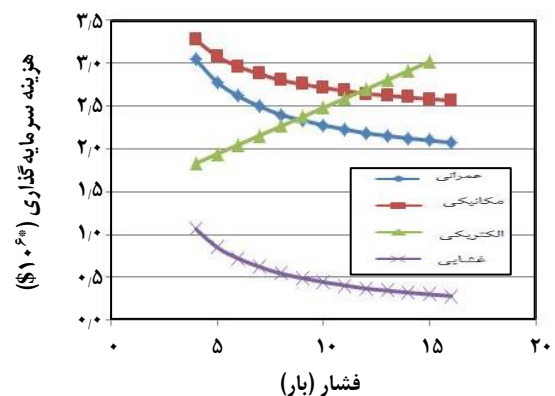
شکل ۴- تغییر هزینه‌های عملیاتی سامانه غشایی NF90 بر حسب فشار.



شکل ۲- تغییر هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت سامانه غشایی NF90 بر حسب فشار.



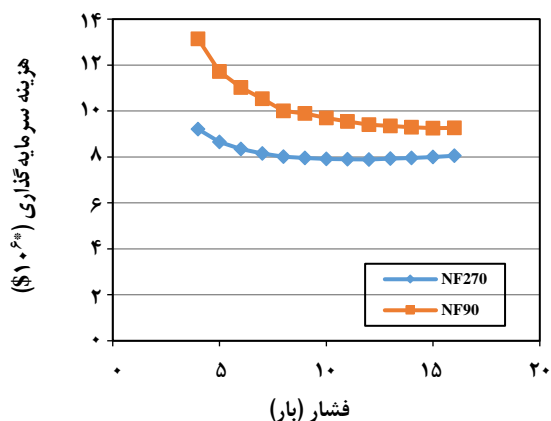
شکل ۵- تغییر هزینه‌های عملیاتی سامانه غشایی NF270 بر حسب فشار.



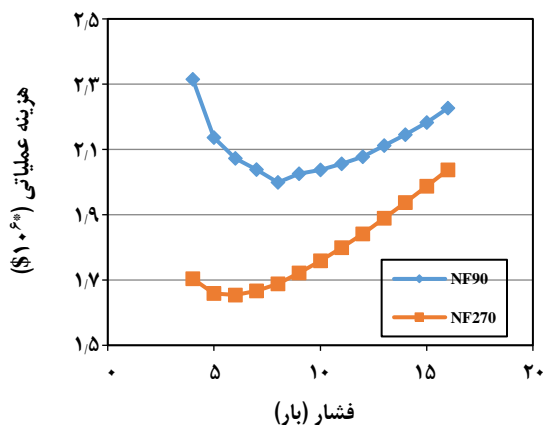
شکل ۳- تغییر هزینه‌های ثابت سامانه غشایی NF270 بر حسب فشار.

هزینه‌های استهلاک، تعمیر و نگهداری، کنترل کیفیت و نصب کاهش می‌یابد در صورتی که هزینه انرژی مصرفی پمپ به دلیل افزایش فشار، افزایش می‌یابد. همچنین هزینه مواد شیمیایی مصرفی به دلیل اینکه تابعی از شدت جریان خوراک ورودی است

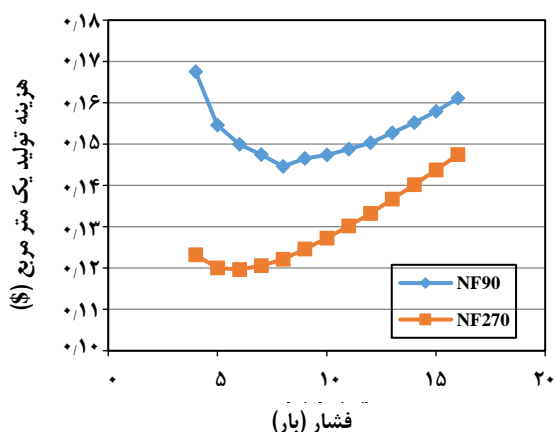
در نتیجه در یک فشار مشابه دو سامانه دارای هزینه‌های یکسانی هستند. همچنین نسبت هزینه‌های تامین مدول NF90 در همه‌ی فشارها نسبت به سامانه دیگر غشایی بیش‌تر است. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ برای هر دو سامانه با افزایش فشار



شکل ۶ - مقایسه هزینه های سرمایه گذاری دو سامانه غشایی NF270 و NF90.



شکل ۷ - مقایسه هزینه های عملیاتی دو سامانه غشایی NF90 و NF270.



شکل ۸ - مقایسه هزینه تولید یک مترمکعب آب در دو سامانه غشایی.

با تغییر فشار ثابت می ماند. با افزایش فشار تعداد مدول غشایی مورد نیاز کاهش می یابد در نتیجه هزینه های عمرانی و غشایی کاهش یافته که این امر خود باعث کاهش هزینه کلی استهلاک، کنترل کیفیت و عملیات نصب می شود. در بین هزینه های عملیاتی در دو نوع نانو غشا استهلاک دارای بیشترین اهمیت و مقدار می باشد.

مقایسه دو سامانه غشایی:

با توجه به شکل ۶ در فشار یکسان هزینه ثابت سامانه غشایی NF90 از سامانه NF270 بیش تر است. البته این اختلاف با افزایش فشار کاهش می یابد. از دلایل این تفاوت می توان به کم تر بودن شدت جریان فراورده ی خروجی NF90 نسبت به NF270 اشاره کرد که این کمبود را بایستی با افزودن تعداد بیش تری از مدول غشایی برطرف نمود. همچنین با افزایش فشار هزینه سرمایه گذاری کل در دو سامانه کاهش می یابد.

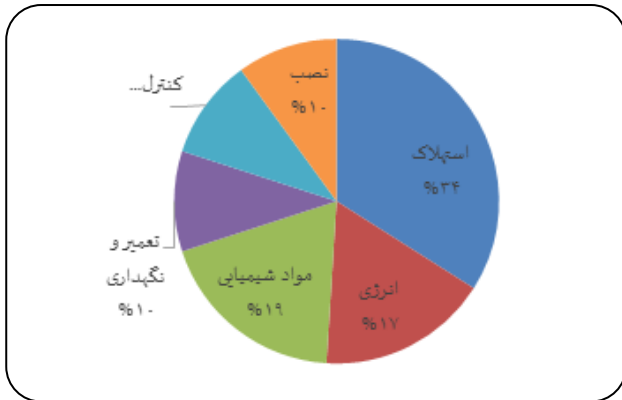
در مورد هزینه های عملیاتی نیز مانند هزینه های سرمایه گذاری، هزینه های سامانه غشایی NF90 از NF270 در بازه فشار مورد نظر بیش تر است. با توجه به شکل ۷ در سامانه غشایی NF90 تا فشار ۸ بار شاهد کاهش هزینه ها هستیم و بعد از این فشار دوباره هزینه ها افزایش می یابد در نتیجه فشار بهینه عملیاتی برای این سامانه ۸ بار می باشد. برای سامانه غشایی NF270 نیز با همین روند رو به رو هستیم با این تفاوت که حداقل هزینه ها در فشار ۶ بار رخ می دهد. همچنین اختلاف در هزینه های عملیاتی دو سامانه غشایی با افزایش فشار کاهش می یابد. این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است.

مقایسه هزینه تولید هر متر مکعب آب در دو سامانه غشایی

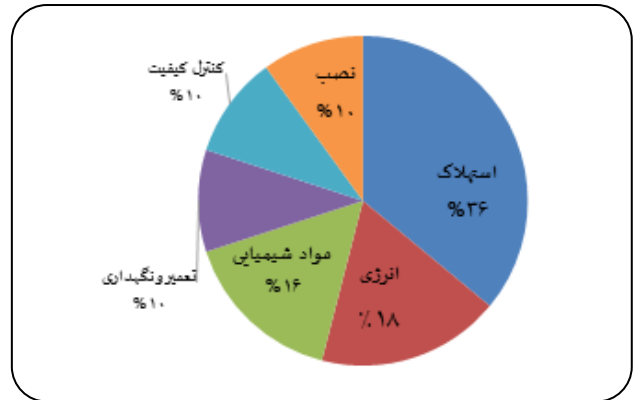
هزینه سالانه تولید هر متر مکعب آب در بازه فشار ۴ تا ۱۶ بار برای هر دو سامانه غشایی محاسبه شده و نتیجه های آن در شکل ۸ نشان داده شده است. هزینه تولید هر متر مکعب آب در سامانه غشایی NF90 بین ۰/۱۴ تا ۰/۱۷ دلار و در NF270 بین ۰/۱۲ تا ۰/۱۵ دلار تخمین زده شده است. دلیل این مسئله بالاتر بودن هزینه عملیاتی NF90 نسبت به NF270 می باشد. البته این اختلاف با افزایش فشار کاهش پیدا می کند.

توزیع هزینه های عملیاتی در فشار بهینه

با انتخاب فشار بهینه ۸ بار از لحاظ اقتصادی برای سامانه غشایی NF90 و فشار بهینه ۶ بار برای سامانه غشایی NF270،



شکل ۱۰ - توزیع هزینه‌های سامانه غشایی NF270 در فشار ۶ بار.



شکل ۹ - توزیع هزینه‌های سامانه غشایی NF90 در فشار ۸ بار.

و هزینه‌های مواد شیمیایی و انرژی برق در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. به عنوان یک نتیجه گیری کلی، از دیدگاه اقتصادی سامانه غشایی نانوتصفیه برای تولید آب شرب از آب خام با املاح متوسط از اولویت بالایی برخوردار می باشد.

قدردانی

از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان که از این مطالعه در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد حمایت نمودند تقدیر و تشکر می‌شود.

فهرست نمادها

TDS	مجموع املاح موجود در آب، mg/L
Qp	شدت جریان فراورده‌نهایی، m ³ /h
QF	شدت جریان خوراک ورودی به سامانه، m ³ /h
η	بازده پمپ، ۷۰ درصد
M	قیمت هر مدول غشایی، 1000\$
n	تعداد مدول غشایی
S	قیمت هر کیلووات ساعت برق مصرفی، 0.05kwh ⁻¹ \$
F	انرژی مصرفی پمپ، 0.04kwh m ³
P	فشار ورودی سامانه، بار
ΔP	اختلاف فشار دوسر پمپ، بار
Kcivil	هزینه‌های عمرانی، \$
Kelec	هزینه‌های الکتریکی، \$
Kmech	هزینه‌های مکانیکی، \$
Kmem	هزینه‌های غشایی، \$
Kinvest	هزینه سرمایه گذاری ثابت کل، \$
Kdep	هزینه استهلاک، \$

توزیع هزینه‌های عملیاتی برای دو سامانه غشایی در فشارهای یاد شده انجام شد که نتیجه‌های آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که در NF90 استهلاک با ۳۶ درصد، انرژی مصرفی با ۱۸ درصد و مواد شیمیایی با ۱۶ درصد از سهم چشمگیری در هزینه عملیاتی برخوردار است. ولی در سامانه غشایی NF270 استهلاک با ۳۴ درصد، مواد شیمیایی مصرفی با ۱۹ درصد و انرژی مصرفی با ۱۷ درصد سهم چشمگیری از هزینه‌های عملیاتی را شامل می‌شوند. همچنین با توجه به ارقام به دست آمده از مدل روبرن در هر دو سامانه غشایی بیش‌ترین هزینه مربوط به استهلاک می‌شود و هزینه‌های مواد شیمیایی و انرژی مصرفی برق در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند.

در این مطالعه میزان حذف جامدهای محلول و مقدار فراورده‌ی تراوش یافته ارایه شده در مقاله ساتن‌افه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که نانوغشا NF90 دارای توانایی بالاتری در کاهش املاح بوده و برای تصفیه این نمونه آب زیرزمینی از لحاظ فنی مناسب‌تر می‌باشد. همچنین هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی دو سامانه نانوغشایی محاسبه شد. همچنین هزینه هر متر مکعب آب تولیدی در بازه فشار ۴ تا ۱۶ بار برای هر دو سامانه غشایی تخمین زده شد. نتیجه‌ها نشان داد که در هر دو با افزایش فشار هزینه‌های عمرانی، مکانیکی و غشایی کاهش و هزینه‌های الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین در مورد هزینه‌های عملیاتی همه هزینه‌ها به جز مواد شیمیایی و انرژی مصرفی با کاهش روبه‌رو شد. به‌طور کلی در فشار همانند هزینه‌های سامانه غشایی NF90 از NF270 بیش‌تر بوده که البته این اختلاف با افزایش فشار کاهش می‌یابد. همچنین در مورد هزینه‌های عملیاتی در دو سامانه غشایی بیش‌ترین میزان (حدود ۳۷ درصد) مربوط به هزینه استهلاک بوده

Kmain	هزینه تعمیر و نگهداری، \$	Kenergy	هزینه انرژی، \$
		Kchem	هزینه مواد شیمیایی، \$
	تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۰	KQC&ins	هزینه کنترل کیفیت و نصب، \$

مراجع

- [1] Van der Bruggen B., Vandecasteele C., [Removal of Pollutants from Surface Water and Groundwater by Nanofiltration: Overview of Possible Applications in the Drinking Water Industry](#), *Environmental Pollution*, **122**: 435-445 (2003).
- [۲] مشتاق، بهاره؛ برقی، سید مهدی؛ شادبهر، جلیل؛ مقایسه عملکرد سامانه تلفیقی راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک مجهز به جدا کننده غشایی، با راکتور زیست فیلمی با بستر متحرک معمولی MBBR، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۳۲: ۸۳ تا ۹۱ (۱۳۹۲).
- [3] Yeh H.H., Tseng I.C., Kao S.J., Lai W.L., Chen J.J., Wang G.T., Lin S.H., [Comparison of the Finished Water Quality Among an Integrated Membrane Process, Conventional and other Advanced Treatment Processes](#), *Desalination*, **131**: 237-244 (2000).
- [۴] چوپانی، مرضیه؛ باقریان، فاطمه؛ کریمی، مرضیه؛ غفارزادگان، رضا؛ تغلیط عصاره بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla*) به وسیله غشای نانو فیلتراسیون، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۳۵: ۶۳ تا ۷۰ (۱۳۹۵).
- [5] Hilal N., Al-Zoub P. H., Darwish N.A., Mohammad A.W., Abu Arabi M., [A comprehensive Review of Nanofiltration Membranes: Treatment, Pretreatment, Modelling, and Atomic Force Microscopy](#), *Desalination*, **170**: 281-308 (2004).
- [6] Taylor J. S., Mulford L. A., Duranceau S.J., Barrett W.M., [Cost and Performance of a Membrane Pilot Plant](#), *Journal of American Water Works Association*, **81**: 52-60(1989).
- [7] Dunkelberger G. W., Taylor J. S., "Cost Optimization Model for Low Pressure Membrane Applications", *Proc. of the American Water Works Association Membrane Processes Conf.*, American Water Works Association, Orlando, Fla., pp. 63-78 (1991).
- [8] Fuqua T., Ortiz R., Bowen P., Creighton R., "Membrane Treatment and the use of the Floridan Aquifer in South Florida", *Proc. of the American Water Works Association Membrane Processes Conf.*, Orlando, Fla., pp. 649-663 (1991).
- [9] Suratt W. G., "Estimating the Costs of Membrane Water Treatment Plants", *Proceeding of the American Water Works Association Membrane Processes Conf.*, Orlando, Fla., pp. 631-647 (1991).
- [10] Luitweiler J.P., Yohe T.L., Crist E., Sun X., "Performance Testing Of Hollow Fiber Membranes on a Groundwater", *Proc. of the American Water Works Association Membrane Processes Conf.*, Orlando, Fla.(1991).

- [11] Pickering K., Wiesner M., [Cost Model for Low-Pressure Membrane Filtration](#), *J. Environmental Engineering*, **119**: 772-797 (1993).
- [12] Verberne A.J.P., Wouters J.W., [Membranfiltratie Voor de Drink Water be Reiding: Economische Optimalisatie Van Ontwerpparameters](#), *H₂O*, **26**: 383-387 (1993).
- [13] Van der Bruggen B., Everaert K., Wilms D., Vandecasteele C., [Application of Nanofiltration for Removal of Pesticides, Nitrate and Hardness from Ground Water: Rejection Properties and Economic Evaluation](#), *Journal of Membrane Science*, **193**: 239-248 (2001).
- [14] Nora'aini A., A. Wahab M., Ahmad A.L., [Use of Nanofiltration Predictive Model for Membrane Selection and System Cost Assessment](#), *Separation & Purification Technology*, **41**: 29-37 (2005).
- [15] Mohammad W., Nora'aini A., Ahmad A.L., Nidal H., [Optimized Nanofiltration Membranes: Relevance to Economic Assessment and Process Performance](#), *Desalination*, **165**: 243-250 (2004).
- [16] Mohammad A.W., Hilal N., H., Al-Zoubi Darwish N.A., Ali N., [Modelling the Effect of Nanofiltration Membrane Properties on System Cost Assessment for Desalination Applications](#), *Desalination*, **206**: 215-225 (2007).
- [17] Santafe-Moros J.M., Goza Ivez-Zafrilla J. Lora-Garcia, [Performance of Commercial Nanofiltration Membranes in the Removal of Nitrate Ions](#), *Desalination* **185**: 281-287 (2005).