

## بکارگیری مدل سازی الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی جهت پیشگویی شار تراوه، دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل در فرآیند نانوفیلتراسیون\*

فخرالدین صالحی<sup>(۱)</sup>سید محمد علی رضوی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در این پژوهش اثر پارامترهای عملیاتی (دما و فشار) و خصوصیات خوراک (غلظت خوراک و pH) بر کارایی فرآیند نانوفیلتراسیون (شار تراوه، دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل) مورد بررسی قرار گرفته و روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی برای مدل سازی این پارامترها در طی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب حاصل از احیاء رزین های تبادل یونی ستون های رنگبری صنعت قند مورد استفاده قرار گرفته است. جهت انجام آزمایشات از غشاء لوله ای پلی آمیدی مدل AFC80 ساخت شرکت PCI استفاده گردید. به منظور پیشگویی شار تراوه، دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه پیشخور با ۴ ورودی و ۳ خروجی استفاده شد. از روش الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی تعداد نرون ها در لایه مخفی شبکه عصبی مصنوعی استفاده گردید. نتایج نشان داد با افزایش اختلاف فشار عرضی و غلظت خوراک مقاومت هیدرولیکی کل افزایش می یابد. همچنین با افزایش دمای فرآیند و pH خوراک، شار تراوه افزایش پیدا می کند، در حالی که مقاومت هیدرولیکی کل کاهش می یابد. میانگین شار تراوه  $7.7 \pm 3.7 \text{ kg/m}^2\text{h}$  به دست آمد. درصد دفع کلرید سدیم بین ۱۶ تا ۴۲٪ بود. نتایج مدل سازی به روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که ترکیب شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم ژنتیک نتیجه بهتری را ارائه می کند و با ترکیب آن ها سرعت تحلیل و دقت مدل سازی افزایش می یابد. با استفاده از شبکه ای با تعداد ۲۴ نرون در یک لایه پنهان، تابع فعال سازی سیگموئیدی و درصد داده های به کار رفته برای تربیت/آزمون /ارزیابی برابر  $50/20/30$  می توان به خوبی شار تراوه ( $r=0.98$ )، دفع کلرید سدیم ( $r=0.94$ ) و مقاومت هیدرولیکی کل ( $r=0.96$ ) در طی نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری را پیشگویی نمود.

**واژه های کلیدی** الگوریتم ژنتیک؛ شار؛ دفع؛ مقاومت هیدرولیکی کل؛ مدل سازی.

### Applying the Genetic Algorithm- Artificial Neural Network Modeling for Prediction of Permeate Flux, NaCl Rejection and Total Hydraulic Resistance of Nanofiltration Process

F. Salehi

S.M.A Razavi

**Abstract** In this study, the effect of operating parameters (temperature and pressure) and feed properties (feed concentration and pH) on performance of nanofiltration process (permeate flux, NaCl rejection and total hydraulic resistance) was investigated and genetic algorithm-artificial neural network (GA-ANN) method was used to model these parameters during the nanofiltration of wastewater obtained from ion-exchange resins regeneration in decolorizing columns of sugar industry. The polyamide tubular AFC80 membrane provided by PCI Company was used for experiments. In order to predict the permeate flux, NaCl rejection and total hydraulic resistance, multi-layer perceptron neural network with 4 inputs and 3 outputs was used. Genetic algorithm method was used to optimize the number of neurons in ANN hidden layer. The results showed that the total hydraulic resistance increases with increase in transmembrane pressure and feed concentration. The permeate flux increases with increasing the temperature and pH, whereas the total hydraulic resistance declines. Average permeate flux was found to be  $7.7 \pm 3.7 \text{ kg/m}^2\text{h}$ . The rejection of sodium chloride was between 16% and 42.7%. The results of GA-ANN modeling method showed that the combination of ANN and GA gives better results and by combining these methods, analysis rate and precision of modeling increases. By using a network with 24 neurons in one hidden layer, the sigmoid transfer function and 30%/20%/50% of data for training/testing/validating process, the permeate flux (0.98), NaCl rejection (0.94) and total hydraulic resistance (0.96) can be well predicted in the nanofiltration of decolorization column wastewater.

**Key Words** Genetic Algorithm; Flux; Rejection; Total Hydraulic Resistance; Modeling.

\* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۴/۲۳ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۹۰/۶/۲۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول: دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) استاد، گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

مورد بررسی قرار گرفته است [6-8]. روش دیگر استفاده از تکنیک های غشایی می باشد. ویلسون و پرسیوال در سال ۱۹۹۰ به بررسی استفاده از سیستم غشایی اولترافیلتراسیون (Ultrafiltration (UF)) جهت تصفیه این فاضلاب پرداختند. این محققان گزارش کردند با استفاده از سیستم غشایی اولترافیلتراسیون می توان تا حدود ۴۵٪ از مواد آلی را حذف نمود [9]. با توجه به راندمان پایین غشاء اولترافیلتراسیون در رنگبری این فاضلاب، سایر محققان به فکر بررسی کارآیی سیستم غشایی نانوفیلتراسیون (Nanofiltration (NF)) جهت تصفیه این فاضلاب افتادند (شکل ۱) [5,10].



شکل ۱ شماتیک فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری

مطالعات و تحقیقات نشان می دهند که استفاده از نانوفیلتراسیون برای جداسازی رنگ از فاضلاب ستون های رنگبری رزینی در صنعت قند بسیار موثر است و باعث کاهش مصرف آب و نمک می شود. همچنین با کاهش فاضلاب تولیدی در طی احیاء رزین، مشکلات محیط زیستی کارخانه های قند و بسیاری از تصفیه خانه های کوچک و بزرگ تصفیه شکر خام نیز کاهش می یابد [4-5,10-13]. فرآیند بازیافت بر اساس توانایی غشاء نانوفیلتر در تغلیظ مواد رنگی در ناتراوه و عبور کلرید سدیم، هیدروکسید سدیم و آب از غشاء می باشد.

در تمامی گزارشات موجود، مطالعات انجام شده

## مقدمه

فرآیندهای غشایی. فرآیندهای غشایی به دلیل مزایای فراوان از قبیل هزینه سرمایه گذاری پایین، کاهش مصرف انرژی، افزایش راندمان استحصال حل شونده ها و تسهیل در امر تصفیه پسابها و بهبود کیفیت محصولات، مورد توجه صنایع مصرف کننده قرار گرفته اند [1]. در فرآیندهای غشایی، جزئی از خوراک که از غشاء عبور می کند تراوه (Permeate) و بخشی که از غشاء عبور نمی کند و یا به عبارتی توسط غشاء نگه داشته می شود، ناتراوه (Retentate) نامیده می شود [2,3].

یکی از روش های کاهش رنگ شربت در کارخانجات قند استفاده از رزین های رنگبری می باشد. ستون های رنگبری عموماً در مسیر شربت رقیق قرار می گیرند تا ترکیبات رنگی موجود در شربت را جدا نمایند. ترکیبات رنگی در مرحله اول جذب رزین شده و از شربت حذف می شوند. به منظور احیاء رزین های رنگبری اشباع شده با ترکیبات رنگی شربت از محلول قلیایی ۱۰٪ کلرید سدیم استفاده می شود که یک پساب با غلظت نمک بالا، مقدار مواد آلی رنگی زیاد و COD بالا (حدود ۱۳۰۰۰ mg/L) ایجاد می کند. در نتیجه فاضلاب حاصل از ستون های رزینی رنگبری به عنوان یکی از مهمترین مشکلات محیط زیستی کارخانه های قند چغندری و نیشکری و همچنین تصفیه خانه های شکر خام محسوب می شود [4,5]. برآورد تقریبی که از کارخانه قند شیرین مشهد شده است نشان می دهد به ازای رنگبری هر ۶۰۰ متر مکعب شربت با بریکس ۶۵، در حدود ۱ تن نمک صاف شده استفاده می شود.

روش های مختلفی از جمله اکسیداسیون ترکیبات رنگی توسط هیپوکلریت کلسیم، گاز کلرین و ازن و یا ترسیب ترکیبات رنگی توسط آهک بوسیله محققان جهت تصفیه این فاضلاب در مقیاس آزمایشگاهی

سازی دینامیکی اولترافیلتراسیون جریان عرضی شیر به منظور پیشگویی شار، مقاومت هیدرولیکی کل و دفع ترکیبات شیر (پروتئین، چربی، لاکتوز، خاکستر و مواد جامد کل) به عنوان تابعی از فشار و زمان فرآیند [15]، پیشگویی شار در طی اولترافیلتراسیون پساب صنعتی [16]، پیشگویی گرفتگی غشای میکروفیلتر جریان عرضی محلول های صمغ و شربت قند [17] و ... به کار گرفته شده است. در تمامی موارد ذکر شده نتایج قابل قبولی توسط محققان گزارش شده است.

**الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی.** توانایی پیشگویی یک شبکه عصبی به ساختار آن (نوع تابع انتقال، تعداد لایه ها و تعداد نرون های لایه پنهان) وابستگی کامل دارد. تخمین تعداد نرون های لایه پنهان عموماً به وسیله آزمون و خطا انجام می شود که وقت گیر بوده و دارای خطا می باشد. لذا روش های بهینه سازی از قبیل الگوریتم ژنتیک (Algorithm Genetic (GA)) در جهت غلبه بر این مشکل ذاتی شبکه های عصبی و به دست آوردن تعداد بهینه نرون ها در لایه پنهان مورد استفاده قرار می گیرند. الگوریتم ژنتیک الهام گرفته از طبیعت است و اساس شکل گیری آن در این است که بهترین ها حق بقا دارند. مفاهیم اصلی الگوریتم ژنتیک شامل عملگرهای سه گانه انتخاب (Selection)، آمیزش (Crossover) و جهش (Mutation) است که در مورد سیستم های مصنوعی بکار می روند. در فرآیند تکثیر، کروموزوم هایی با شایستگی بالا شانس تکرار بیشتر در جمعیت منتخب را پیدا می کنند که این کار توسط فرآیند انتخاب صورت می پذیرد. پس از تکمیل فرآیند انتخاب، نوبت به اعمال عملگر بر روی جهت منتخب به منظور تولید جمعیت فرزندان می رسد. در انجام فرآیند پیوند، با انتخاب مقدار ثابت نرخ پیوند، به ترتیب برای هر کروموزوم یک عدد

بر روی فاضلاب خروجی از ستون های رنگبری کارخانه قند نیشکری می باشد؛ بنابراین با توجه به این که کارخانجات تولید قند کشور از چغندر قند به عنوان ماده اولیه استفاده می کنند، تحقیق بر روی بازیافت فاضلاب این کارخانه ها که منجر به کاهش حجم فاضلاب خروجی و مشکلات ناشی از آن برای محیط زیست می شود، امری ضروری است. لذا در این مطالعه به بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی و خصوصیات خوراک بر رفتار شار، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل غشاء در فرآیند نانوفیلتراسیون پرداخته شد.

**شبکه عصبی مصنوعی.** تلاش های اولیه به منظور مدل سازی مغز و شبکه عصبی انسان منجر به ارائه مدل هایی برای عملکرد یک واحد پردازش مغز یعنی نرون شده است. یک شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network (ANN)) از ترکیب واحدهایی به نام نرون تشکیل شده است. ورودی این نرون در وزن ها (Weights) ضرب شده و سپس با یک عدد ثابت که بایاس (Bias) نامیده می شود جمع می گردد؛ نتیجه نیز از یک تابع غیرخطی عبور می کند تا خروجی ساخته شود. تعداد نرون های لایه مخفی یک شبکه عصبی تاثیر بسزایی در عملکرد آن دارد. انتخاب تعداد نرون ها در واقع مصالحه ای بین همگرایی و قابلیت تعمیم شبکه می باشد. شبکه های عصبی قادر به مدل سازی سیستم های غیر خطی و پیچیده با تعداد زیادی داده ورودی و خروجی می باشند.

شبکه های عصبی مصنوعی به طور موفقیت آمیزی به منظور پیشگویی گرفتگی غشا در طی میکرو و اولترا فیلتراسیون ترکیبات کلوئیدی، پروتئین ها و همچنین تصفیه آب های صنعتی و شهری [14]، مدل

گردید (شکل ۲) فاضلاب تهیه شده از کارخانه، تا شروع آزمایشات در ظروف ۲۰ لیتری در سردخانه با دمای ۴°C نگهداری شد. برای انجام هر بار عملیات نانوفیلتراسیون، ابتدا حدود ۴/۵ لیتر از فاضلاب توسط صافی پارچه ای چهار لایه جهت حذف ذرات درشت موجود در آن صاف می شد و سپس به عنوان خوراک سیستم پایلوت نانوفیلتراسیون داخل تانک تغذیه سیستم ریخته می شد. در این پژوهش اثر فشار در سه سطح ۱، ۱/۵ و ۲ مگا پاسکال، دما در سه سطح ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، غلظت خوراک در سطوح ۸۰ و ۱۰۰ گرم بر لیتر و pH در دو سطح ۸ و ۹ بر روی کارایی فرآیند غشایی در دو تکرار مورد بررسی قرار گرفت. کنترل فشار توسط دو فشار سنج عقربه ای که در قسمت ورودی خوراک به مدول و خروجی ناتراوه از مدول قرار گرفته است، انجام گرفت. دما نیز توسط یک مبدل دمایی که در مسیر عبور خوراک قرار داشت کنترل می شد.

**شار تراوه.** ظرف جمع آوری تراوه بر روی یک ترازوی دیجیتالی (با دقت  $\pm 0.05$  g) با قابلیت اتصال به کامپیوتر قرار گرفته بود و وزن آب مقطر و تراوه در فواصل زمانی ۱ دقیقه ای توسط کامپیوتر ثبت می شد و سپس با جاگذاری مقادیر حاصل در رابطه (۱) شار مربوطه بر حسب  $kg/m^2.h$  محاسبه و گزارش شد:

$$J = \frac{W_2 - W_1}{t \times A} \quad (1)$$

در این رابطه  $W_1$  و  $W_2$  به ترتیب وزن خوانده شده در زمان  $t_1$  و  $t_2$  (kg)،  $t$  فاصله زمانی بین خواندن دو وزن  $W_1$  و  $W_2$  (h) و  $A$  سطح غشاء ( $m^2$ ) است. نتایج آزمایشات اولیه نشان داد که شار فرآیند از همان لحظات اولیه به صورت پایا در می آید. لذا با توجه به این که شار در طول فرآیند پایا بود، زمان عملیات فیلتراسیون ۷۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

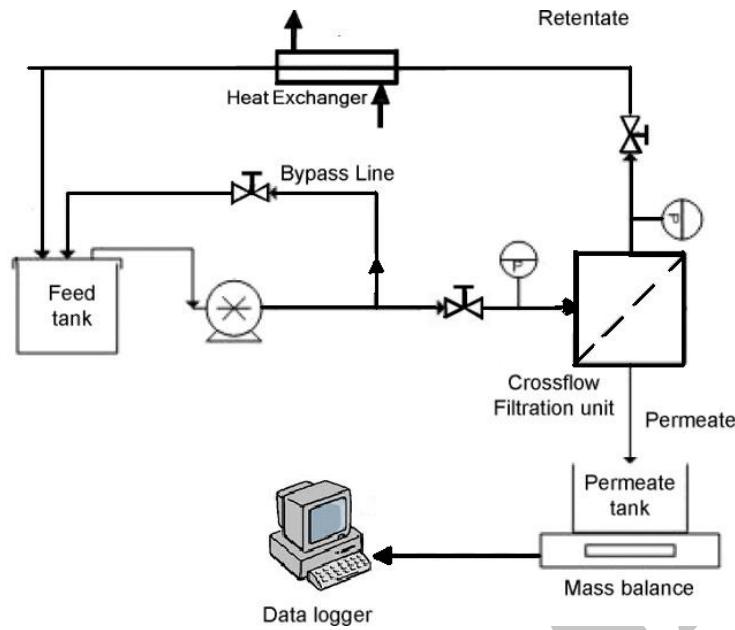
تصادفی تولید می شود. اگر عدد تصادفی تولید شده از نرخ پیوند کمتر باشد، این کروموزوم انتخاب می شود تا با کروموزوم های بعدی که شرایط فوق را دارد آمیزش نماید. در انجام فرآیند جهش، با انتخاب مقدار ثابت نرخ جهش، برای کلیه بیت های کروموزوم های جمعیت عدد تصادفی تولید می شود. اگر عدد تصادفی تولید شده از نرخ جهش کوچکتر باشد، مقدار آن بیت عوض می گردد، یعنی مقدار صفر به یک و یا بالعکس تبدیل می شود. هنگامی که برخی ضوابط مانند تعداد معینی تولید نسل و یا میانگین انحراف معیار عملکرد اشخاص جمعیت تامین شود، الگوریتم ژنتیک به پایان می رسد [18-21].

تعداد مطالعات محدودی در خصوص مدل سازی الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی برای مدل سازی و کنترل فرآیندهای نانوفیلتراسیون گزارش شده است. لذا در این پژوهش به مدل سازی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین های رنگبری با استفاده از مدل سازی الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شده است.

### مواد و روش ها

**مواد.** در این تحقیق، از غشاء لوله ای (Tubular) AFC80 ساخت شرکت PCI (انگلستان) استفاده گردید. جنس غشاء از فیلم پلی آمید (Polyamide film) با سطح موثر  $240 \text{ cm}^2$ ، دامنه تحمل pH برابر ۱/۵-۱۰/۵ و دامنه تحمل دما تا ۷۰ درجه سلسیوس بود که قادر به تحمل ۶۰ بار فشار است. فاضلاب حاصل از احیاء ستون های رنگبری کارخانه تولید کله قند سپیده مهر نیشابور برای انجام این پروژه بکار رفت.

**روش انجام آزمایش.** در این پژوهش، از یک سیستم پایلوت غشایی نانوفیلتراسیون جریان عرضی استفاده



شکل ۲ سیستم نانوفیلتراسیون بکارگرفته شده جهت نانوفیلتراسیون فاضلاب ستونهای رنگبری

مجموع مقاومت ذاتی غشاء و مقاومت گرفتگی کل (Overall fouling resistance) می باشد. مقاومت هیدرولیکی کل ( $R_T$ ) از طریق معادله زیر محاسبه شد:

$$R_T = \frac{TMP - \Delta\pi}{\mu_p J_p} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $R_T$ ،  $J_p$  و  $\mu_p$  به ترتیب نشان دهنده مقاومت هیدرولیکی کل غشاء ( $m^{-1}$ )، شار تراوه ( $m/s$ ) و ویسکوزیته خوراک (Pa.s) می باشند. اختلاف فشار اسمزی در سمت خوراک و تراوه می باشد. فشار اسمزی  $\pi$  یک محلول را می توان از رابطه گیبس (Gibbs) (معادله ۴) که در محدوده وسیعی از غلظت ماده حل شونده به کار می رود، به دست آورد.

$$\pi = - \frac{RT \ln X_A}{V_m} \quad (4)$$

در رابطه گیبس،  $\pi$  فشار اسمزی (Pa)،  $T$  دمای مطلق (k)،  $R$  ثابت گازها ( $8.314 \text{ m}^3 \text{ kPa} / (\text{mol K})$ )،

درصد دفع کلرید سدیم. به منظور بررسی غلظت کلرید سدیم، هدایت الکتریکی نمونه ها توسط دستگاه هدایت سنج (مدل ۴۰۱۰ جن وی (Jenway 4010, Bibby Scientific Limited, UK)، انگلستان) در دمای  $20^\circ\text{C}$  اندازه گیری شد. با توجه با اینکه هدایت الکتریکی یک محلول شدیداً به دمای محیط وابسته است، ابتدا تمامی نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ثابت  $20^\circ\text{C}$  نگهداری شدند و سپس اندازه گیری انجام شد. در نهایت درصد دفع کلرید سدیم و ترکیبات رنگی (R) توسط معادله زیر محاسبه گردید:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100\% \quad (2)$$

در این رابطه،  $C_p$  و  $C_f$  به ترتیب غلظت نمک در تراوه و خوراک می باشد [5].

مقاومت هیدرولیکی کل. مقاومت هیدرولیکی کل،

متغیرهای خروجی مورد نظر تعیین می شود. در این تحقیق چهار ورودی شامل اختلاف فشار، دما، غلظت خوراک و pH و سه خروجی شامل شار تراوه، درصد دفع نمک و مقاومت هیدرولیکی کل در نظر گرفته شد. تعداد نرون های لایه پنهان وابسته به کاربرد شبکه و شرایط تعیین پارامترهای شبکه داد. برای رسیدن به ترکیبی مناسب از تعداد نرون ها در لایه پنهان که حداقل خطا را در بر داشته باشد، فرآیند بهینه سازی تعداد نرون ها در لایه پنهان شبکه عصبی به روش الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. جمعیت اولیه برای تولید نسل ها ۱۰۰ و حداکثر تعداد نسل ها نیز ۵۰ نسل در نظر گرفته شده است. احتمال آمیزش و جهش بر اساس توصیه راهنمای نرم افزار، ۰/۹ و ۰/۰۱، و تعداد نرون ها جهت بهینه سازی برابر با ۱ تا ۳۰ عدد در نظر گرفته شد. از توابع فعال سازی (Activation function) خطی، سیگموئیدی و تانژانت هیپربولیک (Hyperbolic tangent function) که متداول ترین نوع توابع فعال سازی هستند، در لایه پنهان و خروجی استفاده گردید [23-25].

به منظور مدل سازی توسط شبکه عصبی مصنوعی، داده ها به سه دسته داده های آموزش، آزمون و ارزیابی تقسیم شدند. به منظور ارزیابی شبکه های عصبی و انتخاب بهترین توپولوژی شبکه برای پیشگویی پارامترهای مورد بررسی، از ضریب همبستگی (Correlation coefficient) (r) استفاده گردید. نرم افزار نروسولوشن (Neurosolution) نسخه ۶/۰۱ جهت مدل سازی شبکه عصبی نانوفیلتراسیون فاضلاب خروجی از ستون رنگبری استفاده گردید. در این نرم افزار با تغییر نوع تابع فعال سازی (تانژانت هیپربولیک، سیگموئیدی و خطی)، تعداد داده های استفاده شده جهت یادگیری، آزمون و ارزیابی و با بکارگیری قاعده یادگیری لیونبرگ-

$V_m$  حجم مولی مایع خالص و  $X_A$  جزء مولی مایع خالص می باشد.

TMP (Transmembrane pressure) اختلاف فشار در عرض غشاء (kPa) می باشد که بر اساس معادله ۵ محاسبه گردید [1].

$$TMP = \frac{P_i - P_0}{2} - P_p \quad (5)$$

که  $P_i$  فشار محلول در حین ورود به غشاء (kPa)،  $P_0$  فشار محلول هنگام خروج از غشاء (kPa) و  $P_p$  فشار در سمت تراوه (kPa) است.

### مدل سازی به روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی

مدل سازی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب حاصل از احیاء رزین های تبادل یونی در صنعت قند جهت پیشگویی شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل به روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی، توسط شبکه های عصبی چند لایه پرسپترون پیشخور که یکی از پرکاربردترین شبکه های عصبی می باشد، انجام پذیرفت. در این پژوهش از شبکه های عصبی ۳ لایه استفاده گردید. نرون ها در این نوع شبکه در سه لایه ورودی، پنهان و خروجی دسته بندی می شوند. خروجی نرون های لایه پنهان و خروجی (y) از طریق افزایش بایاس به مجموع ورودی های وزن دار شده با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می شود [22].

$$y_j = \sum_{i=1}^p W_{ij} X_i + b_j \quad (6)$$

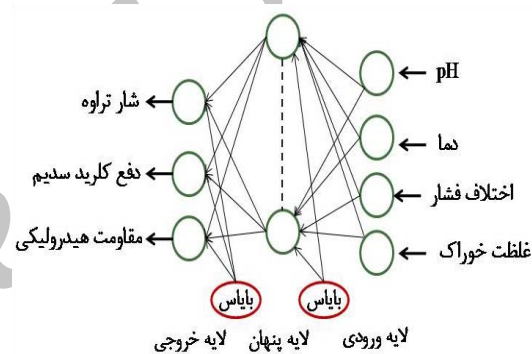
$y_j = \sum_{i=1}^p f(W_{ij} x_i) + b_j$  در معادله فوق  $W_{ij}$  ضریب وزنی نرون شماره i که به نرون شماره j متصل است، می باشد. p تعداد ورودی های هر نرون و  $b_j$  بردار بایاس نرون j است.

تعداد نرون های لایه های ورودی و خروجی براساس تعداد متغیرهای ورودی به شبکه و تعداد

اختلاف فشار، دما، سرعت جریان و ترکیبات موجود در خوراک تحت تاثیر قرار می‌گیرد. لذا در این پژوهش شار تراوه فرآیند نانوفیلتراسیون پساب ستون رنگبری کارخانه قند در شرایط مختلف اختلاف فشار، دما، غلظت های متفاوت خوراک و pH اندازه گیری شد و مورد بررسی قرار گرفت.

**اثر زمان بر شار تراوه.** نتایج شار تراوه فرآیند نانوفیلتراسیون نشان داد که شار تراوه در شرایط مختلف آزمایشی از همان دقایق اولیه فرآیند به حالت پایا می‌رسد و کاهش اولیه ای که در نمودار دینامیکی شار تراوه در اکثر فرآیندها مشاهده می‌شود، در اینجا به چشم نمی‌خورد (شکل ۴). محققان عنوان کرده‌اند که کاهش اولیه در شار تراوه احتمالاً به خاطر تشکیل لایه پلاریزاسیون غلظت در نزدیکی سطح غشاء است که به عنوان مقاومت ثانویه باعث کاهش شار فاز تراوه می‌گردد. بدیهی است سرعت و ضخامت تشکیل این لایه تحت تاثیر عواملی نظیر اختلاف فشار، سرعت جریان و دما می‌باشد [26]. کارتیر و همکاران در سال ۱۹۹۷ در هنگام تصفیه فاضلاب رزین رنگبری توسط نانوفیلتراسیون مشاهده کردند که شار فرآیند در مدت زمان ۱۷۰ دقیقه از  $70 \text{ L/m}^2\text{h}$  به  $55 \text{ L/m}^2\text{h}$  کاهش پیدا می‌کند [5]. مقدار گرفتگی و کاهش شار در غشاهای آب دوست نسبت به غشاهای آب گریز کم‌تر می‌باشد. جنس غشاء مورد استفاده در تحقیق حاضر، پلی‌آمید است. این غشاء ها ذاتاً آب دوست می‌باشند [27] و یکی از دلایل عدم افت شار در طول فرآیند می‌تواند انتخاب نوع غشاء مناسب جهت نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری باشد.

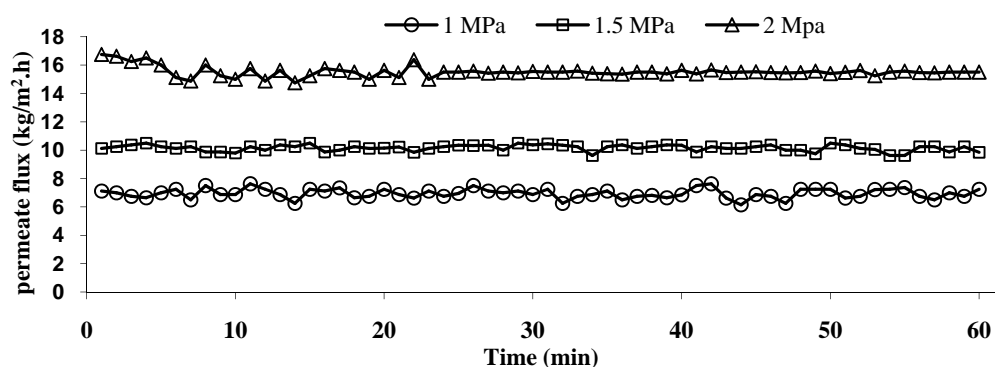
مارکت (Levenberg-Marquardt (LM)، توپولوژی شبکه جهت دست یابی به شبکه بهینه بررسی شد. با توجه به پایا بودن شار تراوه، از میانگین داده‌ها طی ۷۰ دقیقه فرآیند نانوفیلتراسیون جهت مدل‌سازی شبکه استفاده شد. به طور کلی، ۳۲۴ داده جهت مدل‌سازی شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری جمع آوری شد. غلظت خوراک (در سه سطح)، دمای فرآیند (در سه سطح)، اختلاف فشار (در سه سطح)، pH (در دو سطح) و در دو تکرار به عنوان ورودی های شبکه مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳).



شکل ۳ ساختار شماتیک ورودی و خروجی های شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون سه لایه  $(4/3/n)$  به منظور پیشگویی میانگین شار، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل فرآیند نانوفیلتراسیون

## نتایج و بحث شار تراوه

در فرآیندهای غشایی، شار تراوه جزء پارامترهای کلیدی در انتخاب نوع فرآیند فیلتراسیون و نوع غشاء می‌باشد. شار تراوه فرآیندهای غشایی به وسیله



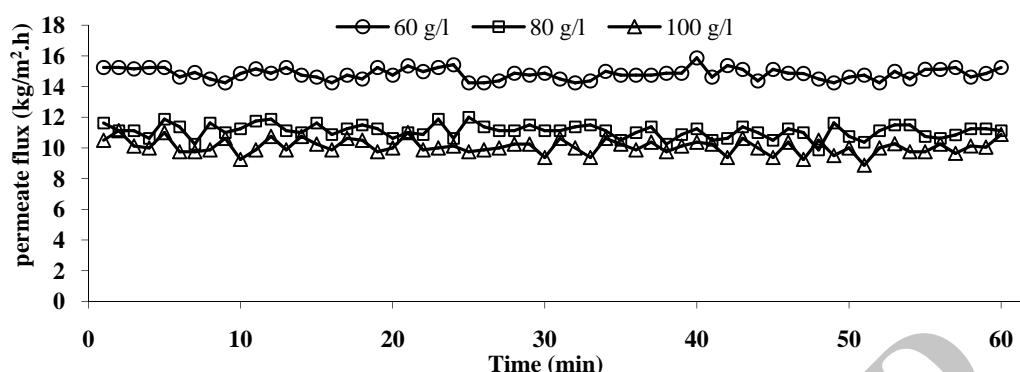
شکل ۴ شار دینامیکی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری در اختلاف فشارهای مختلف (۶۰g/l، T=۵۰°C و pH=۸).

نمک به دلیل افزایش فشار اسمزی در سمت خوراک شار کاهش می یابد [29]. شار دینامیکی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری در غلظت‌های مختلف در شکل (۵) به نمایش در آمده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش غلظت خوراک، شار تراوه به طور محسوسی کاهش یافته است. همچنین با گذشت زمان در غلظت های مختلف خوراک، شار تراوه تغییر چندانی نکرده است به طوری که از همان لحظات اولیه به حالت پایا رسید. نتایج نشان داد با افزایش غلظت خوراک از ۶۰ به ۱۰۰ گرم بر لیتر در دما ۵۰°C، pH=۸ و فشار ۲ MPa، شار تراوه فرآیند از ۱۵/۲ kg/m<sup>2</sup>h به ۱۰/۳ kg/m<sup>2</sup>h کاهش می یابد. محققان دیگر نیز در هنگام جداسازی رنگ، ساکاروز و اسید آمینه از محلول های کلرید سدیم با استفاده از غشاء های نانوفیلتراسیون، گزارش دادند که با افزایش غلظت NaCl به دلیل افزایش فشار اسمزی شار تراوه کاهش یافت [13] به طوری که نتایج بدست آمده در این پژوهش را تایید می کند. نتایج کار این پژوهشگران نشان داد با افزایش غلظت NaCl از ۰/۱ به ۰/۵ مولار، فشار اسمزی از ۰/۱ به ۲/۳ بار افزایش یافته و نیروی محرکه از ۴/۷ به ۲/۵ بار (با اعمال فشار برابر ۴/۸ بار) کاهش یافت [13].

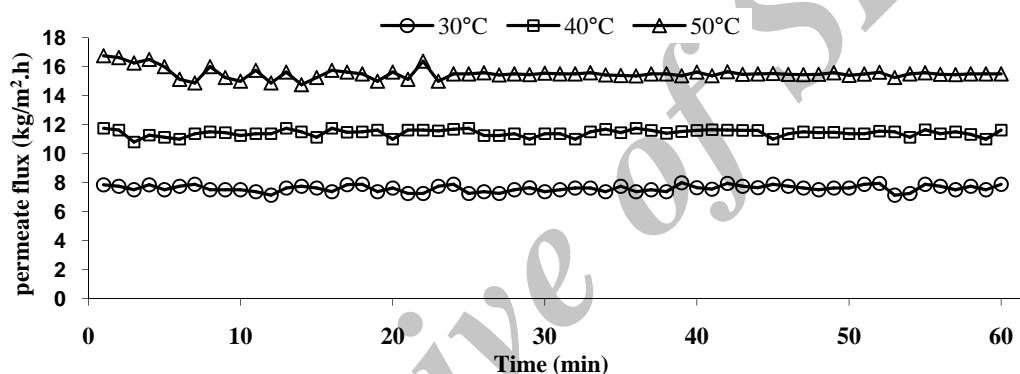
**اثر اختلاف فشار بر شار تراوه.** شار تراوه به طور مستقیم با اختلاف فشار در عرض غشاء رابطه دارد [28]. شکل (۴) رابطه بین میانگین شار تراوه نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری را به عنوان تابعی از زمان در فشارهای مختلف در عرض غشاء نشان می دهد. نتایج نشان داد با افزایش نیروی محرکه فرآیند، شار تراوه افزایش می یابد. با افزایش اختلاف فشار از ۱ به ۲ مگاپاسکال، شار فرآیند در دمای ۵۰°C، غلظت ۸۰g/l و pH=۸ از ۵/۰۵ kg/m<sup>2</sup>h به ۱۱/۵kg/2mh افزایش یافت. عباس و الباستاکی (۲۰۰۵) نیز مشاهده کردند در یک غلظت و دمای ثابت با افزایش فشار فرآیند اسمز معکوس از ۲۰ به ۶۰ بار شار تراوه افزایش می یابد (از ۱۲/۹ به ۳۴ لیتر در ساعت) [28]. میانگین شار تراوه در pH=۸ به ازاء ۰/۱ مگاپاسکال افزایش در اختلاف فشار هنگامی که فشار از ۱ به ۱/۵ مگا پاسکال و از ۱/۵ به ۲ مگا پاسکال افزایش می یابد، به ترتیب ۱۱/۷٪ و ۷/۸٪ افزایش یافت. افزایش شار تراوه با افزایش اختلاف فشار نشان دهنده این است که شار تراوه در شرایط عملیاتی به کار گرفته شده در این پروژه در محدوده وابسته به فشار است.

**اثر غلظت خوراک بر شار تراوه.** با افزایش غلظت





شکل ۵ شار دینامیکی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری در غلظت های مختلف خوراک ( $pH=8$  و  $TMP=2$  MPa,  $T=50^{\circ}C$ )



شکل ۶ شار دینامیکی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری در دماهای مختلف ( $pH=8$  و  $TMP=2$  MPa,  $60$  g/l) اثر  $pH$

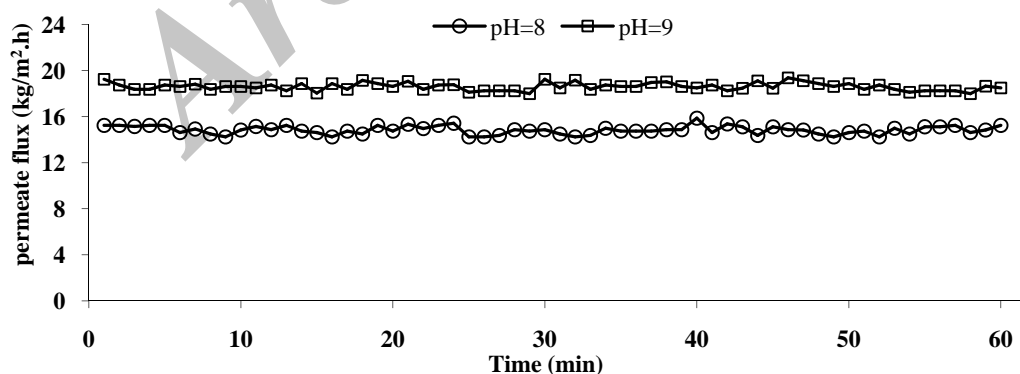
افزایش تحرک زنجیره‌های پلیمری در غشاهای پلیمری نیز ذکر کرد که باعث کاهش مقاومت غشاء در برابر انتقال جرم می‌گردد. عباس و الباستاکی (۲۰۰۵) گزارش دادند که مقدار شار فرآیند نانوفیلتراسیون با افزایش دما و اختلاف فشار افزایش می‌یابد ولی با افزایش غلظت خوراک کاهش می‌یابد [28].

**اثر  $pH$  بر شار تراوه.** غشاهای نانوفیلتراسیون دارای گروه‌های عاملی هستند که می‌توانند بر اساس  $pH$  محلول در تماس با سطح غشاء، باردار شوند. اکثر

**اثر دما بر شار تراوه.** با ملاحظه شکل (۶) نیز می‌توان دریافت که در یک غلظت ثابت، افزایش دمای فرآیند، شار تراوه را افزایش می‌دهد. میانگین شار تراوه در  $pH=8$  به ازاء ۱ درجه سلسیوس افزایش در دمای فرآیند هنگامی که دمای سیستم را از ۳۰ به ۴۰ درجه سلسیوس و از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس افزایش می‌دهیم، به ترتیب ۳/۵٪ و ۴/۵٪ افزایش می‌یابد. افزایش شار تراوه در اثر افزایش دما در نتیجه کاهش ویسکوزیته خوراک و افزایش ضریب نفوذ مولکولی است. افزایش شار با افزایش دما را می‌توان ناشی از

احتمالاً منجر به رسوب بخشی از ترکیبات آلی شده و این ترکیبات سهم کمتری در کاهش شار تراوه خواهند داشت. آدیکان و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به بررسی اثر عوامل مختلف شامل pH و اندازه منافذ غشاء بر دفع قند و رنگ هنگام فیلتراسیون مایع سیاه پرداختند [30]. نتایج مطالعات این محققان نشان داد که با افزایش pH، گرفتگی غشاء کاهش می‌یابد و همچنین pH بر تغییر شار تراوه اثر معنی داری دارد. این پژوهشگران هنگام استفاده از غشایی با (Molecular Weight Cut off) MWCO برابر ۱۰۰۰۰۰ مشاهده کردند با افزایش pH از ۶ به ۱۱، شار تراوه به میزان ۴۳/۶٪ افزایش یافته که این موضوع بیانگر کاهش گرفتگی در pH=۱۱ است. قابل ذکر است که میزان فشار عملیاتی بر میزان تاثیر pH بر شار تراوه تاثیر گذار است. به عنوان مثال کایونکو و همکارانش در سال ۲۰۰۴ در طی نانوفیلتراسیون محلول‌های حاوی نمک و رنگ گزارش دادند در فشار ۸ بار اثر تغییر pH (pH برابر ۵، ۷ و ۹) بر شار تراوه چندان محسوس نمی‌باشد اما در فشارهای بالاتر (۱۶ و ۲۴ بار) pH اثر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار شار تراوه دارد [29].

غشاء های نانوفیلتراسیون موجود، با pH ایزوالکتریک برابر ۳-۴، در pH های خنثی دارای بار منفی می‌باشند [2]. pH بر آبدوستی غشاء، بار غشاء و مقدار درصد دفع غشای نانوفیلتراسیون اثر گذار می‌باشد که آنها هم بر کارایی غشاء اثر گذار هستند. تغییراتی که در pH در ساختار غشاء ایجاد می‌کند عموماً برگشت پذیر می‌باشند. در حالی که شار به مقدار آبدوستی غشاء وابسته است، مقدار درصد دفع با بار سطحی غشاء نانوفیلتراسیون رابطه دارد. در pH های بالا درصد دفع و شار افزایش پیدا می‌کنند [27]. شار دینامیکی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری در pH=۸ و pH=۹ در شکل (۷) به نمایش در آمده است. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش pH، شار تراوه به طور محسوسی افزایش یافته است. همچنین با گذشت زمان در هر دو pH تغییر چندانی نکرده است و از همان لحظات اولیه به حالت پایا رسید. با افزایش pH خوراک از ۸ به ۹ میانگین شار تراوه فرآیند از ۶/۶ kg/m<sup>2</sup>h به ۸/۸ kg/m<sup>2</sup>h افزایش پیدا کرد. در این پژوهش همچنین مشاهده شد که در انتهای فرآیند فیلتراسیون، ترکیبات رنگی نمونه‌هایی که pH آنها افزایش پیدا کرده بود، در تانک خوراک رسوب کرده بودند. در نتیجه افزایش pH



شکل ۷ شار دینامیکی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری در pH های مختلف (TMP=۲ MPa ، T=۵۰°C ، ۶۰g/l)

### درصد دفع کلرید سدیم

دفع عبارتست از بخشی از جزء محلول خوراک که قادر به عبور از درون حفرات غشاء نیست. درصد دفع بر اساس غلظت جزء محلول در تراوه در مقایسه با غلظت آن در خوراک بیان می شود. میانگین درصد دفع کلرید سدیم توسط غشاء نانوفیلتراسیون در هنگام تصفیه فاضلاب ستون رنگبری ۲۸/۷٪ به دست آمد. بالاترین درصد دفع نمک در شرایط عملیاتی دمای  $30^{\circ}\text{C}$ ، غلظت  $60\text{g/l}$ ، اختلاف فشار  $2\text{MPa}$  و  $\text{pH}=9$  بود که برابر با ۴۲/۷ درصد به دست آمد و همچنین کمترین درصد دفع برای کلرید سدیم در  $50^{\circ}\text{C}$ ، غلظت  $100\text{g/l}$ ، اختلاف فشار  $1\text{MPa}$  و  $\text{pH}=8$  ثبت شد که برابر با ۱۵/۹ درصد بود (جدول ۱).

**اثر اختلاف فشار بر درصد دفع.** اختلاف فشار بین فازهای موجود در دو طرف غشاء، باعث ایجاد شار حجمی می گردد. در صورتی که اجزاء مختلف دارای نفوذ پذیری های متفاوتی در ضخامت غشاء باشند، از یکدیگر جدا می شوند [1]. با افزایش اختلاف فشار

عرضی مقدار عبور آب و نمک از عرض غشاء افزایش می یابد اما نه به یک میزان. با افزایش اختلاف فشار مقدار عبور آب از سطح غشاء بیشتر از نمک می باشد، لذا هنگام محاسبه درصد دفع متوجه میشویم که درصد دفع نمک افزایش یافته است. نتایج تغییرات فشار نشان داد که با افزایش اختلاف فشار درصد دفع کلرید سدیم افزایش می یابد که مطابق با نتایج به دست آمده توسط سایر محققانی است که به بررسی اثر اختلاف فشار بر درصد دفع نمک در طی نانوفیلتراسیون محلول های نمکی پرداخته اند. به عنوان مثال با افزایش فشار از ۱ به ۲ مگاپاسکال، درصد دفع کلرید سدیم در دمای  $50^{\circ}\text{C}$ ، غلظت  $60\text{g/l}$  و  $\text{pH}=8$  از ۶/۵٪ به ۱۵/۲٪ افزایش می یابد. میانگین درصد دفع کلرید سدیم در  $\text{pH}=8$  به ازاء ۰/۱ مگاپاسکال افزایش در اختلاف فشار هنگامی که فشار از ۱ به ۱/۵ مگا پاسکال افزایش یافته است، ۲/۲٪ و هنگامی که فشار از ۱/۵ به ۲ مگا پاسکال افزایش یافته است، ۳/۴٪ افزایش یافت (جدول ۱).

جدول ۱ اثر تغییرات دما، اختلاف فشار، غلظت خوراک و pH بر میانگین درصد دفع کلرید سدیم در طی نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری (هر داده میانگین حداقل ۳۶ عدد است).

اثر pH		اثر غلظت		اثر اختلاف فشار (TMP)		اثر دما	
دفع (%)	pH	دفع (%)	غلظت (g/l)	دفع (%)	اختلاف فشار (MPa)	دفع (%)	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
۲۶/۷	۸	۳۲/۷	۶۰	۲۶/۳	۱	۳۳/۱	۳۰
۳۰/۴	۹	۲۸/۶	۸۰	۲۷/۷	۱/۵	۲۸/۳	۴۰
		۲۴/۵	۱۰۰	۳۱/۸	۲	۲۴/۵	۵۰

(جدول ۱). در تأیید نتایج به دست آمده در این تحقیق، نیلسون و همکارانش که در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثر pH، کلرید پتاسیم و دما بر کارایی غشای نانوفیلتراسیون پرداخته بودند، به این نتیجه رسیدند که دفع کلرید پتاسیم با افزایش دما کاهش می‌یابد [۳۴]. میانگین درصد دفع در ازا ۱ درجه سلسیوس افزایش در دمای فرآیند هنگامی که دمای سیستم را از ۳۰ به ۴۰ درجه سلسیوس افزایش می‌دهیم، ۱/۷۴٪ کاهش می‌یابد و هنگامی که از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس افزایش می‌دهیم، ۱/۶۴٪ کاهش می‌یابد (جدول ۱).

**اثر pH بر درصد دفع.** محققین بر این اعتقادند که افزایش pH محلول خوراک به بالاتر از نقطه ایزوالکتریک غشاء، باعث افزایش تراوش پذیری و افزایش درصد دفع NaCl توسط آن غشاء خواهد شد. کیلدف و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به بررسی کاهش شار در طی نانوفیلتراسیون مواد آلی حل شده و اثر فشار اسمزی، تراوش پذیری غشاء و تشکیل لایه کیک پرداختند. نتایج این محققین نشان داد با افزایش pH از ۴ (نزدیک pH ایزوالکتریک غشاء) به ۱۰، تراوش پذیری غشاء و درصد دفع NaCl افزایش می‌یابد. با افزایش pH خوراک از ۸ به ۹ درصد دفع کلرید سدیم از ۲۶/۷ به ۳۰/۶ افزایش پیدا کرد. به دلیل بار دار بودن غشاء، افزایش درصد دفع کلرید سدیم با افزایش pH پیش بینی می‌گردد که مطابق با نتایج سایر محققان در این زمینه می‌باشد. در تأیید نتایج به دست آمده، چیلدرس و الیملیچ که در سال ۲۰۰۰ به بررسی کارایی غشای پلی آمیدی نانوفیلتراسیون (شامل شار و دفع ذرات) و رابطه بین آنها با بار سطحی غشاء پرداخته بودند، گزارش دادند دفع یونها رابطه مستقیمی با بار سطحی غشاء دارد و در نقطه ایزوالکتریک غشاء مورد استفاده توسط این محققین (pH=۵) شار تراوه و عبور نمک حداکثر بوده و با افزایش pH عبور نمک کاهش یافت (افزایش درصد دفع) [35].

**اثر غلظت خوراک بر درصد دفع.** نتایج نشان داد با افزایش غلظت کلرید سدیم در محلول خوراک درصد دفع کاهش می‌یابد (جدول ۱). به عبارت دیگر عبور کلرید سدیم از عرض غشاء با افزایش غلظت آن افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت خوراک از ۶۰ به ۱۰۰ گرم بر لیتر درصد دفع کلرید سدیم در دمای ۵۰°C، اختلاف فشار ۲ مگاپاسکال و pH=۸ از ۳۰/۳٪ به ۲۱/۶٪ کاهش یافت. لیند و جانسون (۱۹۹۵) با استفاده از غشای نانوفیلتر AFC30 و AFC40 ساخت شرکت PCI گزارش دادند دفع NaCl کاملاً به غلظت نمک وابسته بوده و درصد دفع نمک با افزایش غلظت محلول از ۰/۰۵ به ۱ مولار، از ۴۵٪ به ۷٪ کاهش یافت [31]. هی و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که یون ها در محلول های آبی با غلظت الکترولیت بالا نسبت به الکترولیت های با غلظت پایین، راحت تر از عرض غشای باردار عبور می‌کنند [32]. تقابل الکتروستاتیکی بین غشای باردار و یون ها، با افزایش غلظت الکترولیت ضعیفتر می‌گردد. همچنین در غلظت های بالای نمک، بار سطحی غشاء تضعیف شده و لایه هیدراسیون روی آن نازکتر شده، لذا درصد دفع کاهش می‌یابد. نتایج بررسی درصد دفع نشان داد با افزایش غلظت خوراک از ۶۰ به ۸۰ گرم بر لیتر و از ۸۰ به ۱۰۰ گرم بر لیتر (pH=۸)، درصد دفع کلرید سدیم به ازا هر ۱g/l افزایش در غلظت خوراک ۰/۷۳٪ و ۰/۴۸٪ کاهش پیدا می‌کند (جدول ۱). مقدار درصد دفع کلرید سدیم بین ۱۱ تا ۳۴٪ و ۲۸ تا ۵۴٪ به ترتیب برای محلول های حاوی ۰/۶۲ گرم بر لیتر و ۰/۳۱ گرم بر لیتر سدیم کلرید توسط کایا و همکاران (۲۰۱۱) گزارش شده است [33].

**اثر دما بر درصد دفع.** نتایج نشان داد که میانگین درصد دفع کلرید سدیم با افزایش دما از ۳۰ به ۵۰ درجه سلسیوس از ۳۱/۷٪ به ۲۲٪ کاهش یافت

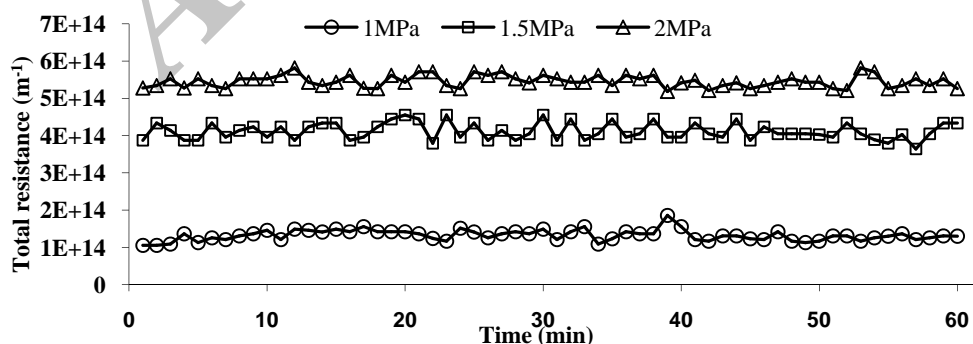
### مقاومت هیدرولیکی کل

کاهش شار در طی فیلتراسیون های غشایی به چند دلیل از جمله تشکیل لایه ژل و گرفتگی حفرات غشاء و تشکیل لایه پلاریزاسیون غلظتی اتفاق می افتد. این عوامل باعث افزایش مقاومت در برابر عبور مواد از غشاء در سمت خوراک می شوند [36]. پروفیل مقاومت هیدرولیکی کل-زمان فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری نشان داد که مقاومت هیدرولیکی کل در طول زمان ثابت باقی می ماند و تغییر چندانی نمی کند (شکل ۸).

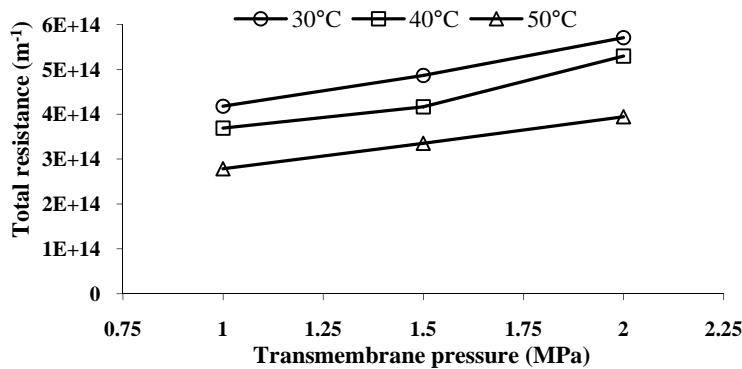
نشان می دهد. میانگین مقاومت هیدرولیکی کل در pH=۸ به ازاء ۰/۱ مگاپاسکال افزایش در اختلاف فشار هنگامی که اختلاف فشار از ۱ به ۱/۵ مگاپاسکال و از ۱/۵ به ۲ مگاپاسکال افزایش می یابد، به ترتیب ۱/۹٪ و ۳/۹٪ افزایش یافت. کایا و همکاران (۲۰۱۱) مشاهده کردند در یک غلظت ثابت با افزایش اختلاف فشار فرآیند نانوفیلتراسیون از ۸ به ۲۰ بار مقاومت کل غشاء از  $3/68 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  به  $4/64 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  افزایش یافت [33].

**اثر اختلاف فشار بر مقاومت هیدرولیکی کل.** در فرآیندهای غشایی افزایش فشار منجر به افزایش گرفتگی غشاء می شود. معمولاً فشار در ابتدا اثر مثبتی را از خود نشان می دهد ولی در حین حرکت اجزاء موجود در سیال به طرف غشاء و جسیبیدن آنها به غشاء، باعث تشکیل لایه ای بر سطح غشاء و متراکم شدن آن لایه نیز می شود. تشکیل لایه و تراکم آن در اثر فشار افزایش می یابد، لذا مقاومت کلی غشاء در فشارهای بالاتر بیشتر است. شکل (۹) میانگین مقاومت هیدرولیکی کل غشاء نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری را به عنوان تابعی از اختلاف فشار در عرض غشاء و در دماهای مختلف خوراک ورودی به سیستم

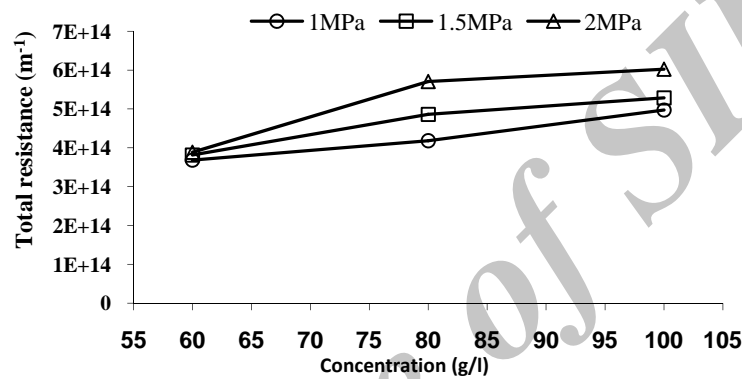
**اثر غلظت خوراک بر مقاومت هیدرولیکی کل.** همان طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می شود افزایش غلظت خوراک سبب افزایش مقاومت هیدرولیکی کل شده است. با افزایش غلظت خوراک از ۶۰ به ۸۰ گرم بر لیتر و از ۸۰ به ۱۰۰ گرم بر لیتر، مقاومت هیدرولیکی کل به ازاء هر  $1 \text{ g/l}$  افزایش در غلظت خوراک ۰/۴۸٪ و ۰/۳۲٪ افزایش پیدا می کند. کایا و همکاران (۲۰۱۱) گزارش دادند با دو برابر شدن غلظت خوراک در طی فرآیند نانوفیلتراسیون، مقاومت کلی غشاء در یک اختلاف فشار ثابت از  $3/2 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  به  $3/5 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  افزایش یافت [33].



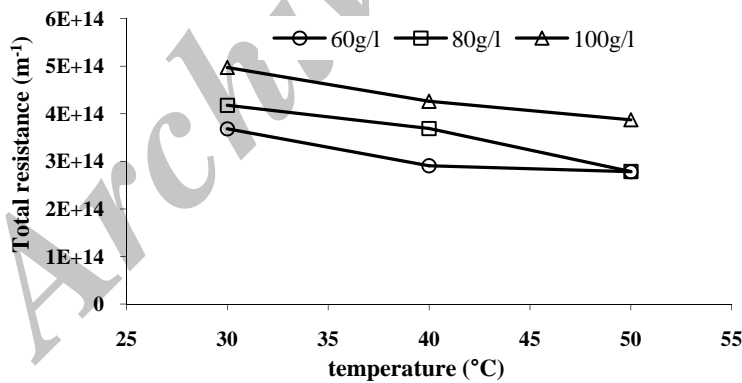
شکل ۸ پروفیل مقاومت کل- زمان فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب رزین رنگبری در دماهای مختلف (T=۳۰°C و pH=۸)



شکل ۹ اثر اختلاف فشار و دمای خوراک ورودی به سیستم بر مقاومت کلی غشاء در طی فرآیند نانوفیلتراسیون (pH=۸ و ۸۰g/l)



شکل ۱۰ اثر اختلاف فشار و غلظت خوراک ورودی به سیستم بر مقاومت کلی غشاء در طی فرآیند نانوفیلتراسیون (pH=۸ و T=۵۰°C)



شکل ۱۱ اثر غلظت و دمای خوراک ورودی به سیستم بر مقاومت کلی غشاء در طی فرآیند نانوفیلتراسیون (pH=۸ و TMP=۱ MPa)

مقاومت هیدرولیکی کل شده است. میانگین مقاومت هیدرولیکی کل به ازاء ۱ درجه سلسیوس افزایش در دمای فرآیند هنگامی که دمای سیستم را از ۳۰ به ۴۰

اثر دمای فرآیند بر مقاومت هیدرولیکی کل. با ملاحظه شکل (۱۱) نیز می توان دریافت که در یک غلظت ثابت، افزایش دمای فرآیند، منجر به کاهش

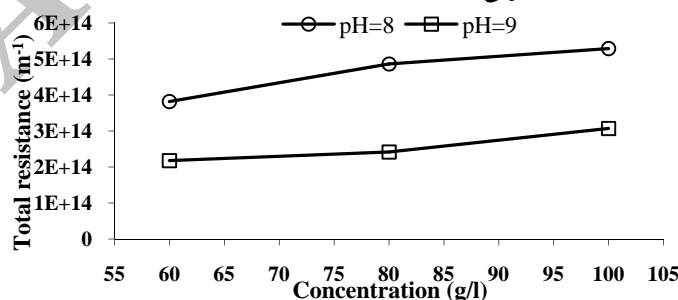
یادگیری روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشد. هم چنین از ۲۰ درصد داده‌ها برای آزمون شبکه آموزش دیده استفاده گردید. به منظور ارزیابی شبکه نیز از باقی مانده داده‌ها (۵۰ درصد) استفاده گردید. در جدول (۲)، مقادیر بهینه پارامترهای شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده جهت پیشگویی شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل در فرآیند نانوفیلتراسیون به طور خلاصه گزارش شده است. مقدار میانگین مربعات خطا در طی فرآیند یادگیری و آزمون در برابر سیکل‌های یادگیری شبکه بهینه در شکل (۱۳) به نمایش در آمده است. کاهش سریع در نمودار میانگین مربعات خطا در سیکل‌های اولیه آموزش نشان از یادگیری سریع شبکه می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی دارای ۲۴ نرون در لایه پنهان می‌تواند به خوبی شار تراوه ( $r=0/98$ )، درصد دفع کلرید سدیم ( $r=0/94$ ) و مقاومت هیدرولیکی کل ( $r=0/96$ ) در طی نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری را پیشگویی نماید. در جدول ۳ مقادیر وزن‌ها و بایاس‌های متناظر با هر نرون برای شبکه عصبی دارای ۲۴ نرون در لایه پنهان آورده شده است که با استفاده از یک برنامه کامپیوتری مناسب می‌توان از آنها جهت تخمین شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل استفاده نمود.

درجه سلسیوس افزایش می‌دهیم ۱/۶۶٪ کاهش می‌یابد و هنگامی که دما را از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس افزایش می‌دهیم، ۰/۹۹٪ کاهش می‌یابد.

**اثر pH بر مقاومت هیدرولیکی کل.** شکل (۱۲) تاثیر pH بر مقاومت هیدرولیکی کل را در غلظت‌های مختلف خوراک نشان می‌دهد. با افزایش pH خوراک از ۸ به ۹ مقاومت هیدرولیکی کل غشاء ۳۳/۹ درصد کاهش پیدا کرد.

### نتایج مدل سازی الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی

به منظور پیشگویی شار تراوه و درصد دفع کلرید سدیم در طی نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری از مدل سازی الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی استفاده گردید. اختلاف فشار، دما و pH به عنوان ورودی‌های شبکه در نظر گرفته شدند و شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل به عنوان خروجی‌های شبکه انتخاب گردیدند. با توجه به مقدار خطای کمتری که با استفاده تابع فعال سازی سیگموئیدی به دست می‌آمد، این نوع تابع به عنوان تابع فعال سازی در لایه پنهان و خروجی انتخاب گردید. بر اساس روش آزمون و خطا مشخص شد در صورتی که ۳۰ درصد داده‌ها برای آموزش استفاده گردد، شبکه به خوبی قادر به



شکل ۱۲ اثر pH و غلظت خوراک ورودی به سیستم نانوفیلتراسیون بر مقاومت کل غشاء در طی فرآیند نانوفیلتراسیون (T=۵۰°C و TMP=۱/۵ MPa).

جدول ۲ مقادیر بهینه پارامترهای شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده جهت پیشگویی شار تراوه، درصد

دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل در فرآیند نانوفیلتراسیون

تعداد لایه‌های پنهان	قاعده یادگیری	نوع تابع فعال سازی	تعداد نرون لایه پنهان	درصد داده‌های یادگیری	درصد داده‌های آزمون	درصد داده‌های ارزیابی
۱	لیونبرگ-مارکت	سیگموئیدی	۲۴	۳۰	۲۰	۵۰

جدول ۳ مقادیر وزن ها و بایاس های متناظر با هر نرون به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی بهینه (دارای ۹ نرون در لایه پنهان) برای

پیشگویی شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل

تعداد نرون لایه پنهان	بایاس	نرون های ورودی				نرون های خروجی	
		دما	اختلاف فشار	pH	غلظت خوراک	شار تراوه	مقاومت هیدرولیکی کل
۱	-۰/۲۲۷	۰/۱۸۲	-۰/۳۹۵	۰/۳۳۹	-۰/۷۰۹	۰/۴۲۵	-۰/۷۵۲
۲	-۰/۱۵۱	۰/۶۵۶	-۱/۶۲۹	-۰/۷۲۴	۰/۳۹۲	۰/۸۸۴	۰/۱۴۹
۳	۰/۲۱۶	۰/۰۵۵	-۰/۹۱۴	-۰/۶۶	-۰/۵۰۵	۱/۶۱۷	۰/۱۲۶
۴	۰/۱۶۶	-۱/۳۷۵	-۰/۳۸۰	-۳/۰۸۶	۰/۱۶۷	۰/۶۹۲	-۰/۹۳۹
۵	۰/۷۳۹	-۲/۰۱۹	-۳/۶۴۸	۱/۶۵۴	۲/۰۲۴	۰/۸۹۴	۲/۳۳
۶	۰/۳۲۸	۱/۸۲۹	-۱/۰۳۱	۲/۲۳۱	۱/۷۱۵	۰/۰۹	-۰/۱۹۸
۷	۱/۲۴۷	۰/۰۸۴	۰/۸۷۹	۱/۲۴۹	-۱/۶۷۲	۰/۷۸۷	-۱/۱۷۸
۸	-۰/۱۹۱	-۱/۲۲۵	۰/۱۷۴	-۱/۵۲۴	-۰/۰۲۶	۰/۵۹۵	-۰/۰۷
۹	-۰/۴۴۱	-۰/۴۷۶	-۰/۲۴۸	-۰/۰۲۵	-۱/۲۹۷	۰/۴۸۳	-۰/۴۳
۱۰	۲/۳۹۴	-۴/۰۵۴	۰/۱۴۷	-۴/۲۶۳	۳/۴۹۳	۰/۸۴۲	-۱/۳۵۴
۱۱	-۰/۴۵۲	-۱/۱۰۳	-۰/۰۷۳	-۱/۵۸۴	-۰/۸۴۹	-۰/۱۸۲	۰/۶۷۷
۱۲	-۲/۲۰۹	-۲/۱۳۹	-۲/۱۷۲	۱/۲۴۸	۱/۰۸۸	-۲/۸۳۶	۱/۰۱۸
۱۳	-۰/۴۵۸	-۰/۵۵۹	۱/۸۶۳	۰/۲۶	۰/۱۷۸	۲/۵۸۰	-۰/۴۱۶
۱۴	۱/۵۶۸	-۱/۵۱	-۰/۵۳۹	-۰/۴۱۵	۰/۳۸۷	۱/۱۵۴	-۰/۸۳۹
۱۵	-۰/۶۸۷	۱/۶۰۱	۰/۰۷۲	۰/۱۵۴	-۰/۱۱۵	۰/۴۵۹	-۱/۰۲۱
۱۶	-۰/۰۱۹	-۱/۰۷۴	-۰/۳۹۴	-۰/۳۷۱	-۱/۲۵۴	۰/۶۸۴	-۰/۸۰۹
۱۷	-۰/۶۳۶	-۱/۷۷۱	-۱/۷۷۵	۰/۹۷۵	۰/۱۳۷	۰/۱۱۷	-۰/۱۱۸
۱۸	۰/۲۲۷	۲/۱۹۱	۱/۹۹۷	۰/۳۰۷	-۲/۲۷۶	-۲/۲۰۱	۲/۴۷۳
۱۹	۰/۱۵۷	۰/۵۲۸	-۰/۰۵۹	۰/۰۶۸	۰/۰۷۹	-۱/۴۱۴	-۰/۱۴
۲۰	-۱/۰۱۷	۱/۹۲۶	-۰/۰۱۷	۲/۴۲۹	-۰/۸۹۸	-۲/۱۳۵	۲/۸۳۸
۲۱	۰/۷۲۷	۲/۴۰۰	۱/۸۸۴	۰/۱۸۸	-۱/۲۳۱	-۰/۲۷۸	-۰/۶۵۵
۲۲	۱/۳۲۴	-۰/۵۷۷	۱/۱۹۹	۱/۲۱	-۰/۰۶۶	-۰/۲۸۱	-۲/۱۱۹
۲۳	۰/۴۷۵	-۱/۹۸۲	-۰/۶۲۷	۰/۳۶۷	۰/۵۴۶	-۰/۱۸۸	-۱/۰۴۲
۲۴	-۰/۶۸۵	۰/۵۰۰	-۲/۰۴۹	-۱/۶۱۲	-۰/۷۱۴	۰/۰۶۷	۱/۶۸۲
بایاس						-۱/۰۱۴	-۰/۰۰۲



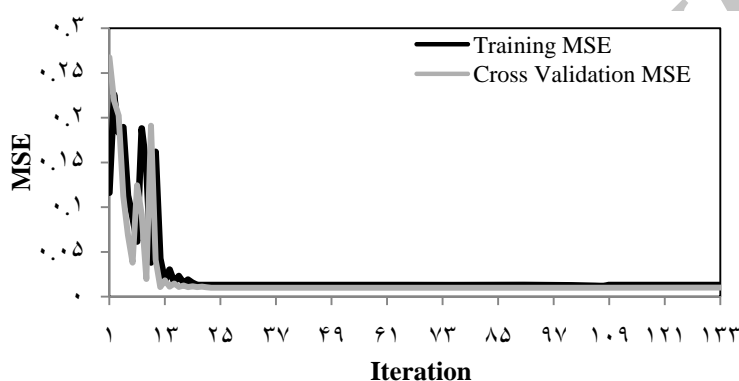
جدول ۴ مقادیر تجربی میانگین شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل فرآیند نانوفیلتراسیون (داده های ارزیابی) در برابر مقادیر پیشگویی شده توسط روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی

مقاومت هیدرولیکی کل (1/m)		دفع نمک (%)		شار (kg/m <sup>2</sup> h)		دما (°C)	فشار (MPa)	غلظت (g/l)	pH
خروجی شبکه	تجربی	خروجی شبکه	تجربی	خروجی شبکه	تجربی				
۲/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۵/۷	۲۶/۷	۴/۶	۴/۵	۴۰	۱	۶۰	۸
۴/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۱/۲	۳۰/۸	۴/۸	۸/۶	۳۰	۱/۸	۶۰	۸
۳/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۰/۳	۲۹/۲	۷/۱	۸/۲	۴۰	۱/۸	۶۰	۸
۸/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۸/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴۰/۷	۴۱/۸	۷/۰	۶/۹	۳۰	۲	۶۰	۸
۴/۴×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۷/۷	۳۸/۰	۱۰/۲	۱۰/۸	۴۰	۲	۶۰	۸
۴/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۱/۶	۳۲/۸	۱۲/۹	۱۴/۸	۵۰	۲	۶۰	۸
۲/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۰/۴	۳۲/۶	۳/۱	۳/۱	۳۰	۱	۶۰	۸
۳/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۷/۷	۳۸/۲	۷/۰	۷/۶	۳۰	۲	۶۰	۸
۴/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۴/۷	۳۸/۲	۱۰/۲	۱۱/۴	۴۰	۲	۶۰	۸
۳/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۹/۲	۳۰/۷	۳/۰	۲/۴	۳۰	۱	۸۰	۸
۳/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۲/۴	۲۱/۱	۴/۱	۳/۶	۴۰	۱	۸۰	۸
۸/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۸/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۰/۱	۳۲/۶	۴/۰	۳/۹	۳۰	۱/۸	۸۰	۸
۴/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۴×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۲/۸	۲۲/۹	۶/۰	۸/۹	۴۰	۱/۸	۸۰	۸
۴/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۰/۸	۲۰/۳	۸/۴	۸/۶	۴۰	۱/۸	۸۰	۸
۸/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۸/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۷/۸	۲۳/۳	۱۱/۹	۱۱/۱	۵۰	۲	۸۰	۸
۲/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۹/۸	۳۰/۳	۳/۱	۲/۲	۳۰	۱	۱۰۰	۸
۲/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۱۶/۶	۱۶/۸	۴/۱	۳/۷	۴۰	۱	۱۰۰	۸
۸/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۸/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۱۸/۶	۱۶/۸	۴/۸	۴/۷	۵۰	۱	۱۰۰	۸
۴/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۱۱/۶	۱۸/۳	۴/۸	۸/۲	۵۰	۱	۱۰۰	۸
۴/۴×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۶/۸	۳۲/۲	۳/۸	۳/۳	۳۰	۱/۸	۱۰۰	۸
۳/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۱/۱	۲۳/۷	۸/۴	۸/۵	۴۰	۱/۸	۱۰۰	۸
۸/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۱۶/۶	۱۸/۱	۶/۹	۸/۰	۵۰	۱/۸	۱۰۰	۸
۸/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۸/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۹/۹	۲۷/۹	۸/۲	۸/۵	۳۰	۲	۱۰۰	۸
۴/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۵×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۶/۰	۲۵/۸	۷/۷	۷/۷	۴۰	۲	۱۰۰	۸
۸/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۶/۰	۲۷/۷	۷/۷	۷/۰	۴۰	۲	۱۰۰	۸
۸/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۰/۹	۲۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۴	۵۰	۲	۱۰۰	۸
۶/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۶/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۳/۹	۲۲/۹	۱۰/۳	۱۰/۱	۵۰	۲	۱۰۰	۸
۲/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۹/۷	۳۸/۸	۶/۰	۶/۰	۳۰	۱/۸	۶۰	۹
۲/۴×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۴/۶	۳۰/۸	۱۳/۶	۱۳/۳	۵۰	۱/۸	۶۰	۹
۳/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴۱/۵	۴۱/۴	۹/۳	۹/۲	۳۰	۲	۶۰	۹
۷/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۷/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۷/۲	۳۳/۶	۳/۸	۴/۰	۳۰	۱	۶۰	۹
۲/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۹/۷	۳۹/۳	۶/۰	۸/۸	۳۰	۱/۸	۶۰	۹
۲/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۷/۰	۳۰/۴	۱۰/۶	۹/۹	۴۰	۱/۸	۶۰	۹
۲/۴×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۴/۶	۲۸/۸	۱۳/۶	۱۳/۰	۵۰	۱/۸	۶۰	۹
۳/۴×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۳/۷	۳۸/۱	۳/۲	۳/۱	۳۰	۱	۸۰	۹
۸/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۷/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۹/۸	۳۰/۷	۸/۶	۸/۶	۴۰	۱	۸۰	۹
۱/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۱/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۷/۱	۲۷/۷	۸/۸	۷/۷	۵۰	۱	۸۰	۹
۹/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۹/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۰/۲	۳۱/۷	۴/۸	۸/۸	۳۰	۱/۸	۸۰	۹
۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۹/۰	۲۸/۷	۹/۰	۸/۴	۴۰	۱/۸	۸۰	۹
۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۳/۰	۳۰/۳	۹/۰	۸/۸	۴۰	۱/۸	۸۰	۹
۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۸/۰	۲۷/۷	۱۲/۸	۱۱/۱	۵۰	۱/۸	۸۰	۹
۳/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۸/۷	۴۰/۳	۷/۷	۸/۱	۳۰	۲	۸۰	۹
۳/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۸/۷	۳۷/۹	۷/۷	۷/۸	۳۰	۲	۸۰	۹
۳/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۶/۴	۳۴/۸	۱۲/۸	۱۲/۰	۴۰	۲	۸۰	۹
۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۱/۴	۳۰/۷	۱۸/۶	۱۶/۹	۵۰	۲	۸۰	۹
۳/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۴/۴	۳۱/۳	۱۸/۶	۱۶/۴	۵۰	۲	۸۰	۹
۳/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۹×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۹/۹	۳۰/۳	۴/۸	۴/۶	۴۰	۱	۱۰۰	۹
۲/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۲×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۷/۲	۲۶/۴	۳/۹	۴/۹	۳۰	۱/۸	۱۰۰	۹
۲/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳۲/۲	۲۶/۷	۳/۹	۸/۲	۳۰	۱/۸	۱۰۰	۹
۱/۳×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۱/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۸/۶	۲۴/۶	۷/۱	۷/۷	۴۰	۱/۸	۱۰۰	۹
۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۰×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۱۹/۸	۱۸/۸	۱۰/۹	۱۰/۶	۵۰	۱/۸	۱۰۰	۹
۲/۸×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۱/۸	۲۱/۱	۱۰/۹	۱۰/۸	۵۰	۱/۸	۱۰۰	۹
۳/۷×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۴/۱×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۱/۰	۲۱/۸	۱۰/۸	۱۰/۶	۴۰	۲	۱۰۰	۹
۳/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۳/۶×۱۰ <sup>۱۴</sup>	۲۶/۶	۲۶/۹	۱۴/۶	۱۵/۲	۵۰	۲	۱۰۰	۹

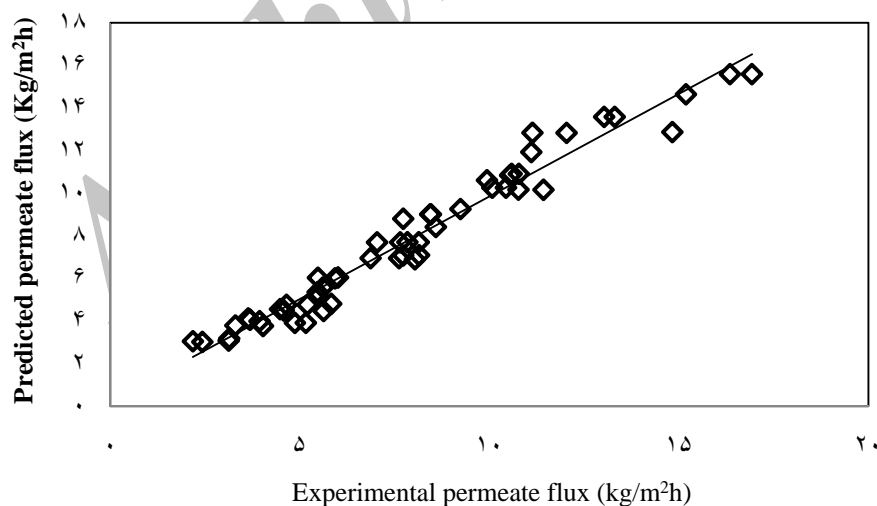
کارایی بالای این نوع مدل سازی می باشد. نتایج به دست آمده گویای این مطلب است که مدل سازی الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی می تواند به عنوان یک روش مناسب جهت پیشگویی شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل در فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب های نمکی با غلظت بالای نمک از جمله فاضلاب ستون رنگبری به کار گرفته شود.

مقادیر آزمایشگاهی داده های ارزیابی (۵۰٪) مربوط به شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل در برابر مقادیر پیشگویی شده به روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی در جدول (۴) به نمایش در آمده است.

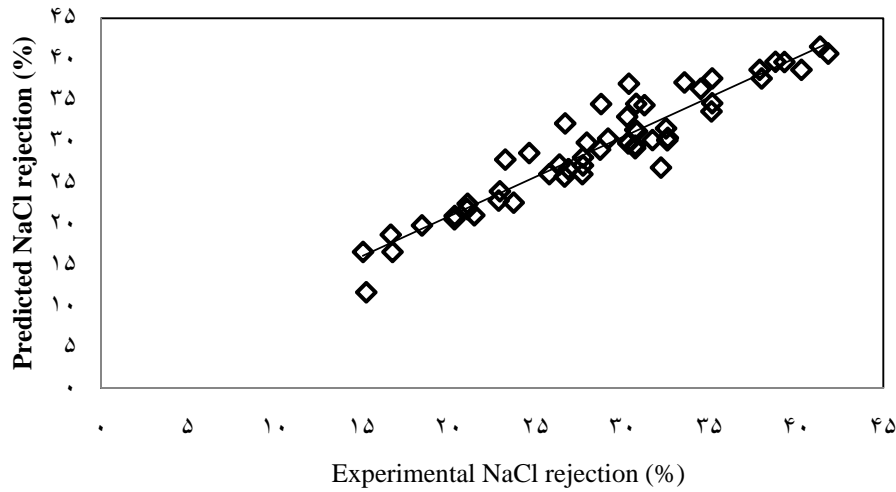
همانطور که در شکل های (۱۴، ۱۵ و ۱۶) نشان داده شده است، مقادیر بالای ضریب همبستگی (به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۴ و ۰/۹۶ برای شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل) نشان دهنده



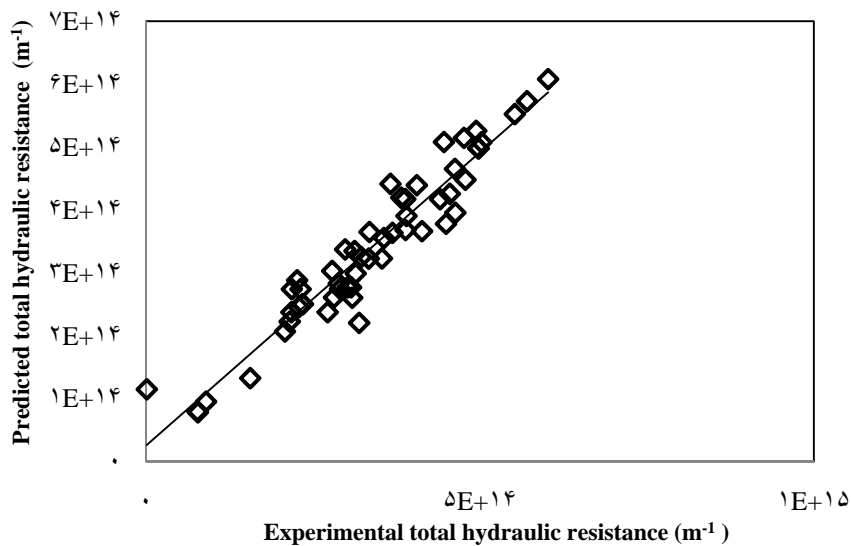
شکل ۱۳ مقادیر میانگین مربعات خطا به عنوان تابعی از تعداد سیکل های یادگیری طی فرآیند یادگیری و آزمون شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۱۴ مقادیر آزمایشگاهی میانگین شار تراوه فرآیند نانوفیلتراسیون (داده های ارزیابی) در برابر مقادیر پیشگویی شده توسط روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی (R=۰/۹۸)



شکل ۱۵ مقادیر آزمایشگاهی درصد دفع کلرید سدیم در فرآیند نانوفیلتراسیون (داده های ارزیابی) در برابر مقادیر پیشگویی شده توسط روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی ( $r=0.94$ )



شکل ۱۶ مقادیر آزمایشگاهی مقاومت هیدرولیکی کل فرآیند نانوفیلتراسیون (داده های ارزیابی) در برابر مقادیر پیشگویی شده توسط روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی ( $r=0.96$ )

یافت. شار تراوه فرآیند در طول زمان فیلتراسیون ثابت بود و با گذشت زمان کاهش چشمگیری پیدا نکرد. با افزایش pH و اختلاف فشار، درصد دفع کلرید سدیم افزایش یافت اما با افزایش غلظت خوراک و دمای سیستم درصد دفع کلرید سدیم کاهش یافت. مقاومت

### نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که با افزایش pH، دما و اختلاف فشار شار تراوه فرآیند نانوفیلتراسیون افزایش یافت اما با افزایش غلظت خوراک به دلیل افزایش فشار اسمزی شار تراوه کاهش

خوراک، اختلاف فشار و دما (ورودی های شبکه) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از ۲۴ نرون در یک لایه پنهان و تابع انتقال سیگموئیدی در لایه پنهان و خروجی، شبکه به خوبی قادر به پیشگویی پارامترهای شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل با ضریب همبستگی بالا (به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۴ و ۰/۹۶) می باشد.

هیدرولیکی کل با افزایش pH و دمای خوراک فرآیند نانوفیلتراسیون کاهش و با افزایش غلظت خوراک و افزایش فشار افزایش یافت.

در این مقاله، ضمن معرفی و بررسی شبکه های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، کاربرد و کارایی این روشها در مدل سازی فرآیند نانوفیلتراسیون فاضلاب ستون رنگبری به روش الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مصنوعی جهت پیشگویی شار تراوه، درصد دفع کلرید سدیم و مقاومت هیدرولیکی کل (خروجی های شبکه) به عنوان تابعی از pH، غلظت

### مراجع

1. Pabby, A.K., Rizvi, S.S.H., and Sastre, A.M., "Handbook of Membrane; Separations Chemical, Pharmaceutical, Food, and Biotechnological Applications", Taylor & Francis Group, New York, (2009).
2. Norman, N.L., Anthony, G.F., Winston, W.S.H., and Matsuura, T., "Advanced membrane technology and applications". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada (2008).
3. Baker, R.W.. "Membrane technology and applications. second edition", John Wiley & Sons Ltd, England, (2004).
4. Hinkova, A., Bubn'k, Z., Kadlec, and Pridal, P. J., "Potentials of separation membranes in the sugar industry". Separation and Purification Technology, 26 ,pp. 101-110, (2002).
5. Cartier, S., Theoleyre, M.A., and Decloux, M., "Treatment of sugar decolorizing regeneration waste using nanofiltration". Desalination, 113 , pp. 7-17, (1997).
6. Cox, M., "Technical Sugar Refinery Research". In Proc., pp. 212-221, (1980).
7. Bento, L., "Technical Sugar Refinery Research". In: Proc., 99-115, (1990).
8. Bento, L., Santos, J.M., and Herve, D., Ind. Alim. Agric. 573, (1989).
9. Wilson, R.J., and Percival, R.W., "Technical Sugar Refinery Research", In: Proc., 116-125, (1990).
10. Wadley, S., Brouckaert, C.J., Baddock, L.A.D., and Buckley, C.A., "Modelling of nanofiltration applied to the recovery of salt from waste brine at a sugar decolorisation plant". *Journal of Membrane Science*, 102 , pp. 163-175, (1995).
11. Koekoek, P.J.W., Nispen, J., and Vermeulen, D. P., "Nanofiltration of thin juice for improvement of juice. Purification", *Zuckerindustrie*, 123 , pp. 122-127, (1998).

12. Chou, C.C., "Handbook of Sugar Refining". John Wiley & Sons. Inc. Canada, (2000).
13. Hong, S., Miller, M.D., and Bruening, M.L., "Removal of Dyes, Sugars, and Amino Acids from NaCl Solutions Using Multilayer Polyelectrolyte Nanofiltration Membranes", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45 , pp. 6284-6288, (2006).
14. Delgrange, N., Cabassud, C., Cabassud, M., Durand-Bourlier, L., and Lain, J.M., "Neural network for prediction of ultrafiltration transmembrane pressure—application to drink water". *Journal of Membrane Science*, 150 , pp. 111–123, (1998).
15. Razavi, S.M.A., Mortazavi, S.A. Mousavi, S.M., "Dynamic modeling of milk ultrafiltration by artificial neural network". *Journal of Membrane Science*, 220, pp. 47–58, (2003).
16. Teodosiu, C., Pastravanu, D., and Macoveanu, M., "Neural network model for ultrafiltration and backwashing". *Water Research*, 34 , pp. 4371–4380, (2000).
17. Dornier, M., Decloux, M., Trystram, G., and Lebert, A., "Dynamic modeling of crossflow microfiltration using neural networks", *Journal of Membrane Science*, 98 , pp. 263–273, (1995).
18. Rajeev, S., and Krishnamoorthy, S. C., "Discrete optimization of structure using genetic algorithms." *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 118(5) , pp. 1233-1250, (1992).
19. Hayalioglu M. S., "Optimum load and resistance factor design of steel space frames using genetic algorithm" *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(4) 292-299, (2004).
20. Morimoto, T. "Genetic algorithm. In Handbook of Food and bioprocess modeling techniques", (S.S. Sablani, M.S. Rahman, A.K. Datta, and A.S. Mujumdar, eds.), CRC Press, New York. 405-434. (2006).
21. Neurosolution., "Neurosolution software User's Guide": (Version 6.01). NeuroDimension, Inc., USA, (2010).
22. Liu, Q., Kim, S., and Lee, S., "Prediction of microfiltration membrane fouling using artificial neural network models." *Separation and Purification Technology*, 70 , pp. 96–102, (2009).
23. Darwish, N.A., N. Hilal, Al-Zoubi, H., and Mohammad, A.W., "Neural networks simulation of the filtration of sodium chloride and magnesium chloride solutions using nanofiltration membranes." *Institution of Chemical Engineers*, 85(A4) , pp. 417-430, (2007).
24. Rapetto, M.P. Almqvist, A. Larsson, R. Lugt, P.M., "On the influence of surface roughness on real area of contact in normal, dry, friction free, rough contact by using a neural network" *Wear*, 266 , pp. 592-595, (2009).
25. Yangali-Quintanilla, V., Verliefe, A., Kime, T.U., Sadmania, A., Kennedy, M., and Amya, G., "Artificial neural network models based on QSAR for predicting rejection of neutral organic

- compounds by polyamide nanofiltration and reverse osmosis membranes". *Journal of Membrane Science*, 342 , pp. 251–262, (2009).
26. Rice, G., Barber, A., A, O'Connor., Stevens, G., Kentish, S., "Fouling of NF membranes by dairy ultrafiltration permeates". *Journal of Membrane Science*, 330 , pp. 117–126, (2009).
27. Nanda, D., Tung, K., Li, Y., Lin, N., and Chuang, C., "Effect of pH on membrane morphology, fouling potential, and filtration performance of nanofiltration membrane for water softening". *Journal of Membrane Science*, 349 , pp. 411–420, (2010).
28. Abbas, A., and Al-Bastaki, N., "Modeling of an RO water desalination unit using neural networks." *Chemical Engineering Journal*, 114 , pp. 139-143, (2005).
29. Koyuncua, I., Topacika, D., and Wiesne, M.R., "Factors influencing flux decline during nanofiltration of solutions containing dyes and salts." *Water Research*, 38 , pp. 432–440, (2004).
30. Adikane, H.V., Thakar, D.M., and Nene, S.N., "Optimisation of colour and sugar rejection of black liquor using membranes." *Separation and Purification Technology*, 36(3) , pp. 229-234, (2004).
31. Linde, K., Jonsson, A., "Nanofiltration of salt solutions and landfill leachate". *Desalination*, 103 , pp. 223-232, (1995).
32. He, Y., Li, G., Wang, H., Jiang, Z., Zhao, J., Su, H., and Huang, Q., "Experimental study on the rejection of salt and dye with cellulose acetate nanofiltration membrane." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40 , pp. 289–295, (2009).
33. Kaya, Y., Barlas, H., and Arayici, S., "Evaluation of fouling mechanisms in the nanofiltration of solutions with high anionic and nonionic surfactant contents using a resistance-in-series model." *Journal of Membrane Science*, 367 , pp. 45-54, (2011).
34. Nilsson, M., Traˆgaˆrdh, G., and Oˆ stergren, K., "The influence of pH, salt and temperature on nanofiltration performance." *Journal of Membrane Science*, 312 , pp. 97–106, (2008).
35. Childress, E., Elimelech, M., "Relating Nanofiltration Membrane Performance to Membrane Charge (Electrokinetic)." *Characteristics Science Technology*, 34 , pp. 3710–3716, (2000).
36. Tu, S.C., Ravindran, V., and Pirbazari, M., "A pore diffusion transport model for forecasting the performance of membrane processes." *Journal of Membrane Science*, 265 , pp. 9–50, (2005).