

# مدلسازی غشای میکروفیلتراسیون جهت تصفیه فاضلاب نفتی با استفاده از مدل هرمیا و شبکه عصبی

هانیه شکرکار<sup>۱</sup>، نوراله کثیری<sup>۱\*</sup>، تورج محمدی<sup>۲</sup>

۱- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایشگاه تحقیقاتی مهندسی فرایند به کمک کامپیوتر

۲- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی فرایندهای جداسازی

پیام‌نگار: [capepub@cape.iust.ac.ir](mailto:capepub@cape.iust.ac.ir)

## چکیده

در این مقاله داده‌های حاصل از تصفیه فاضلاب‌های نفتی توسط غشاهای سرامیکی در فرایند میکروفیلتراسیون از طریق شبکه عصبی و مدل هرمیا شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی فرایند توسط شبکه عصبی، برنامه‌ای با استفاده از نرم‌افزار متلب نوشته شده است. غلظت روغن در فاضلاب سنتزی (Coil)، سرعت جریان عرضی (CFV)، دما (T)، اختلاف فشار اعمال شده در دو طرف غشاء (TMP) و زمان (t) به عنوان ورودی‌ها و شار تراوشی غشاء به عنوان خروجی شبکه می‌باشند. داده‌های عملیاتی در سه دسته تربیت، ارزیابی و آزمون شبکه تقسیم شده است. در این مطالعه سه حالت (۲۰-۲۰-۶۰ و ۱۵-۱۵-۷۰ و ۱۰-۱۰-۸۰) برای آموزش شبکه بررسی شده است. همچنین تشکیل رسوب با استفاده از مدل هرمیا که چهار رفتار متفاوت برای گرفتگی را بیان می‌کند مدل می‌شود. در تمام حالات مشاهده می‌شود مدل شبکه عصبی نسبت به مدل هرمیا پیش‌بینی بهتری برای شار تراوشی دارد.

**کلمات کلیدی:** مدلسازی، میکروفیلتراسیون، فاضلاب نفتی، مدل هرمیا، شبکه عصبی

## ۱- مقدمه

درشت مولکولهای موجود در محلول بر روی سطح غشاء ایجاد می‌شود و ادامه کاهش جریان به علت پدیده تشکیل لایه زلی و پلاریزاسیون غلظت می‌باشد [۱ و ۲]. شبکه‌های عصبی بدون هیچ پیش‌فرضی در مورد شکل تبعی مدل، به برقراری ارتباط بین داده‌ها و مدل‌سازی هر نوع ارتباط ناخطی می‌پردازند. در بسیاری از مسائل پیچیده ریاضی که به حل معادلات دشوار ناخطی منجر می‌شود، یک شبکه عصبی چند لایه می‌تواند به سادگی با تعریف اوزان و توابع مناسب مورد استفاده قرار گیرد. توابع فعالیت مختلفی به فراخور روش مسئله در نرون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع

یکی از روش‌های تصفیه فاضلاب‌های نفتی، فرایندهای غشایی می‌باشد. میکروفیلتراسیون از مهمترین فرایندهای غشایی است که تحقیقات بسیاری جهت کاربرد آن در تصفیه فاضلاب‌های نفتی انجام گرفته است. غشاهای سرامیکی و بسیاری از مهمترین غشاهای هستند که در فرایند میکروفیلتراسیون به کار می‌روند. در فرایندهای غشایی، کاهش شار تراوشی با زمان یک پدیده عادی می‌باشد. کاهش اولیه جریان در اثر گرفتگی غشاء اتفاق می‌افتد که با رسوب برگشت‌ناپذیر و مؤثر مواد در منافذ غشاء و جذب سطحی

متغیرهای ورودی تعریف شدند. با بررسی تاثیر هر یک از پارامترها بر شارعبوری از غشاء مشخص شد شار اولیه نفوذ مهمترین متغیر عملیاتی موثر در رسوب روی غشاء است و نرخ تنش برشی کمترین تاثیر در شار نفوذی و در نتیجه رسوب بر سطح غشاء وادارد [۹]. در سال ۲۰۰۹ لی<sup>۳</sup> یا<sup>۴</sup> و همکاران مدل شبکه عصبی را برای پیش‌بینی خصوصیات غشای میکروفیلتراسیون در تصفیه آب آشامیدنی به کار بردند. در این مطالعه تأثیر پارامترهای عملیاتی بر فشار انتقال از غشاء (TMP)<sup>۴</sup> به صورت تابعی از مدت فیلتراسیون بیان می‌شود. در این مدل، پنج متغیر ورودی به صورت شار، کدورت اب خوراک (Turf)، UV<sub>254</sub>، زمان و فرکانس موج می‌باشند و فشار انتقال از غشاء به عنوان خروجی پیش‌بینی می‌شود. مدل شبکه عصبی به خوبی تاثیر رفتار ناخطی و هیدرودینامیکی اندرکنشهای ذرات بر پدیده تشکیل رسوب را نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده بررسی می‌کند. کمترین خطا با تخمین شبکه به صورت ۲ لایه پنهان که ۵ نورون در لایه اول و ۸ نورون در دومین لایه است به دست آورده شد. [۱۰].

با وجود برتری‌هایی که شبکه‌های عصبی نسبت به سامانه‌های مرسوم دارند، معایبی نیز دارند که پژوهشگران این رشته تلاش دارند که آنها را به حداقل برسانند. در مدلسازی توسط شبکه‌های عصبی آموزش شبکه ممکن است مشکل و یا حتی ناممکن باشد. بدین معنی که پارامترهای شبکه پس از زمان‌های طولانی به مقدار مشخصی همگرا نشود. چنین مواردی ممکن است بر اثر ناکافی بودن داده‌های آموزشی و یا اصولاً نقص طراحی شبکه ایجاد شوند. همچنین وجو نداشتن قواعد یا دستورات مشخصی برای طراحی شبکه جهت یک کاربرد اختیاری، وابستگی نتایج به اندازه مجموعه آموزش، عدم وابستگی به فیزیک مساله، و به سادگی امکان پذیر نبودن پیش‌بینی عملکرد آینده شبکه از جمله این معایب می‌باشند. در فرایندهای غشایی، کاهش شار تراوشی با زمان یک پدیده عادی می‌باشد. کاهش اولیه جریان در اثر گرفتگی غشاء اتفاق می‌افتد که با رسوب برگشت ناپذیر و موثر مواد در منافذ غشاء و جذب سطحی درشت مولکول‌های موجود در محلول بر روی سطح غشاء ایجاد می‌شود و ادامه کاهش جریان به علت پدیده تشکیل لایه ژلی و پلاریزاسیون غلظت است. تعدادی مدل تجربی و نیمه تجربی تحت

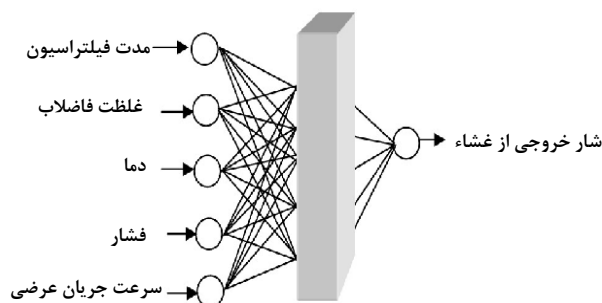
شبکه‌ها از یک لایه ورودی جهت اعمال ورودی‌های مسئله، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی که نهایتاً پاسخ‌های مسئله را ارائه می‌نمایند، استفاده می‌شود [۳].

شبکه‌های عصبی مصنوعی به طور موفقیت‌آمیزی به منظور پیشگویی گرفتگی غشاء در طی میکرو و اولترا فیلتراسیون ترکیبات کلئیدی، پروتئین‌ها و همچنین تصفیه آب‌های صنعتی و شهری [۴]، مدل 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 فرایند [۵]، پیشگویی شار در طی اولترافیلتراسیون فاضلاب صنعتی [۶]، پیشگویی گرفتگی غشای میکروفیلتراسیون جریان عرضی محلول‌های صمغ و شربت قند [۷] و پیشگویی موارد دیگر به کار گرفته شده است. در تمامی موارد ذکر شده نتایج قابل قبولی توسط محققان گزارش شده است.

در سال ۲۰۰۵ ایدینر<sup>۱</sup> و همکاران حذف فسفات توسط غشای میکروفیلتراسیون جریان متقاطع را توسط شبکه عصبی مدلسازی کردند. به منظور آنالیز داده‌ها و مدل کردن کاهش شار در طول میکروفیلتراسیون دو سبک متفاوت شبکه عصبی بنا نهاده شد. در هر یک از این روشها، هندسه شبکه عصبی از ۱ لایه پنهان تا ۴ لایه پنهان تغییر داده شد. برای هر لایه پنهان، ساختارهای متنوعی که سه تا صد نورون داشتند، آزمایش شد. در اولین مدل، ۴ نورون در لایه ورودی که مدت فیلتراسیون، فشار انتقال از غشاء، غلظت دو جزء خوراک و در دومین مدل بهینه، ۵ نورون در لایه ورودی که علاوه بر ۴ پارامتر قبلی، نوع غشاء نیز در نظر گرفته شده است. در این تحقیق شبکه عصبی با ۲ لایه پنهان که هر یک دارای ۵ نورون هستند، کمترین مربع متوسط خطا را ایجاد کردند [۸]. در سال ۲۰۰۵ شانکارامان<sup>۲</sup> با استفاده از شبکه عصبی کاهش شار نفوذی گذرا به علت تشکیل کلئیدها، در طول میکروفیلتراسیون با جریان عرضی را بررسی کرد. تفسیر وزنهای ارتباطی شبکه‌ای برای تعیین اهمیت غلظت خوراک، شار اولیه نفوذ، نرخ تنش برشی ورودی، فشار آبی انتقال از غشاء و مدت فیلتراسیون بر ایجاد رسوب در سطح غشاء نیز انجام گرفت. غلظت خوراک، شار اولیه نفوذی، نرخ تنش برشی ورودی، فشار انتقال از غشاء و مدت فیلتراسیون به عنوان

3. Liua  
4. Trans Membrane Pressure

1. Aydiner  
2. Shankararaman



شکل ۲- ساختمان شبکه عصبی

در پژوهش حاضر از شبکه عصبی انتشار برگشتی استفاده شده است. دانستن اینکه کدام الگوریتم برای آموزش یک مسئله خاص سریع تر کار می‌کند، کار مشکلی است. این موضوع به عوامل زیادی از جمله پیچیدگی مسئله، تعداد نقاط در مجموعه آموزشی تعداد وزنها و بایاسهای شبکه، خطای هدف و اینکه آیا شبکه برای طرح شناسایی (فرق گذاشتن) یا تقریب تابع استفاده می‌شود، بستگی دارد. شبکه انتشار برگشتی، همیشه نمی‌تواند وزنها را برای حل بهینه پیدا کند. برای رسیدن به بهترین جواب، بهتر است یک شبکه را چندین بار مقادری اولیه کرد و آن را آموزش داد. شبکه‌ها نسبت به تعداد نرونها در لایه‌های پنهان حساس هستند و نرونهای کم، می‌تواند برازش کمتری را حاصل نمایند. استفاده از نرونهای خیلی زیاد می‌تواند باعث بیش برازش شوند به طوری که همه نقاط آموزشی بخوبی برازش نشده و منحنی برازش بین این نقاط ارتعاش کند [۱۲].

سه تابع انتقال رایج در شبکه عصبی، تابع انتقال خطی (purelin)، تابع انتقال (log sigmoid) مطابق با معادله (۱)، تابع انتقال (tan sigmoid) مطابق معادله (۲) می‌باشد [۱۳].

$$F(x) = 1/(1 + e^{-x}) \quad (1)$$

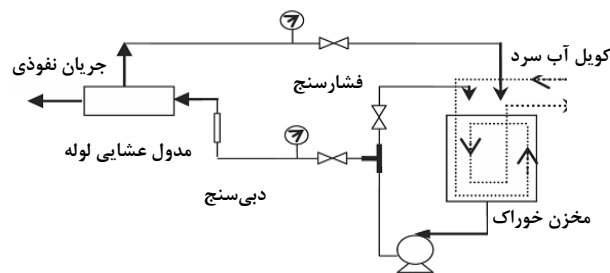
$$F(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}) \quad (2)$$

در این تحقیق از تابع تانژانت هیپربولیک (tansig) استفاده شده است. داده‌ها ابتدا با استفاده از تابع 'mapminmax' در نرم‌افزار متلب در بازه [-۱ و ۱] نرمال می‌شوند. با سعی و خطای انجام شده بهترین

عنوان مدل هر میا برای بیان رفتار شار در طول فرایند فیلتراسیون پیشنهاد شده است. این مدل‌ها چهار رفتار متفاوت برای گرفتگی غشاء را بیان کرده و شار را به صورت تابعی از مدت فیلتراسیون مدل می‌کنند که در ادامه به آنها اشاره شده است.

## ۲- بخش تجربی

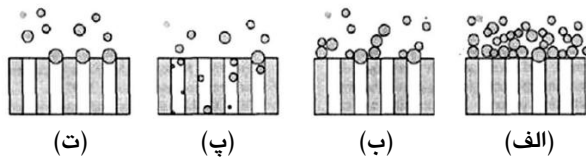
موادی که برای ساخت فاضلاب سنتزی استفاده شده اند عبارتند از: آب مقطر یکبار تقطیر، میعانات گازی چاه‌های گاز سراجیه قم و امولسیفایر (Triton X-100). در آزمایشات انجام شده فاضلاب‌های روغنی، محدوده تغییرات فشار عملیاتی بین ۰/۵-۴ bar، سرعت جریان عرضی بین ۰/۲-۲ m/s، دمای خوراک بین ۱۵-۵۵°C و غلظت روغن در پساب سنتزی بین ۲۵۰-۳۰۰۰ ppm در نظر گرفته شده است. تعداد کل داده‌ها ۳۴۷ داده و زمان انجام عمل فیلتراسیون در هر مرحله ۲ ساعت می‌باشد [۱۱]. سیستم میکروفیلتراسیون جهت ارزیابی غشاءها و تصفیه فاضلاب‌های روغنی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- سیستم میکروفیلتراسیون جهت ارزیابی غشاءها و تصفیه فاضلاب‌های روغنی [۱۱]

## ۳- مدلسازی فرایند

در این تحقیق برای پیشگویی میزان شار در هر لحظه، مدل شبکه عصبی به کار گرفته شده است و در این مدل می‌توان با تغییر تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها در هر لایه تغییر پاسخ‌دهی مدل را ارزیابی کرد. ورودی‌های شبکه عصبی شامل دما، فشار، مدت فیلتراسیون، سرعت جریان عرضی و غلظت فاضلاب می‌باشند. خروجی شبکه نیز شار خروجی از غشاء است که ساختار شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۳- چهار رفتار مدل هر میا (الف) تشکیل کیک، (ب) انسداد متوسط منافذ، (پ) انسداد استاندارد منافذ، (ت) انسداد کامل منافذ

معادله عمومی که در این مدل برای ارزیابی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر است:

$$d^2t/dV^2 = k(dt/dV)^n \quad (5)$$

در این معادله  $V$  حجم صاف کردن و  $t$  زمان صاف کردن است. ثابت‌های  $k$  و  $n$  تفاوت مدل‌های متفاوت کاهش شار را نشان می‌دهند و مقیاس مناسبی برای تشخیص مکانیسم واقعی کاهش شار می‌باشند. چهار رفتار مدل هر میا به صورت زیر بیان می‌شوند:

• مکانیسم انسداد کامل منافذ

در این مکانیسم فرض می‌شود تمام ذره‌ها در مسدود شدن حفره‌های غشاء سهیم هستند و هیچ ذره‌ای روی ذره دیگر نمی‌نشینند و در این حالت  $n=2$  است.

• انسداد استاندارد منافذ

در این مکانیسم فرض می‌شود حجم صاف کردن، متناسب با حجم حفراتی که مسدود می‌شوند کاهش می‌یابد و در این حالت  $n=1/5$  است.

• انسداد متوسط منافذ

در این مکانیسم فرض می‌شود تمام ذره‌ها به حفره‌ها نمی‌رسند ولی ممکن است برخی از ذره‌ها روی برخی دیگر انباشته شوند و در این حالت  $n=1$  است.

• مدل کیک

در این مکانیسم فرض می‌شود جریان تراوشی از غشاء با افزایش مقاومت در منطقه دیواره کاهش می‌یابد و در این حالت  $n=0$  است [۱۷-۱۴].

این مدلها ممکن است به صورت معادله‌های خطی ساده‌ای بر حسب شار، زمان و ثابت‌های صاف کردن برای هر مدل بیان شود که این معادله‌ها در جدول (۱) بیان شده‌اند.

الگوریتم آموزش، لونبرگ - مارکودت<sup>۱</sup> می‌باشد که کمترین خطای موجود را بدست می‌دهد.

همچنین جمعیت داده‌ها در سه حالت بررسی شده است. بدین صورت که در حالت اول، ۶۰٪ کل داده‌ها برای تربیت شبکه ۲۰٪ کل داده‌ها برای ارزیابی شبکه و ۲۰٪ کل داده‌ها برای آزمون شبکه، در حالت دوم، ۷۰٪ کل داده‌ها برای تربیت شبکه، ۱۵٪ کل داده‌ها برای ارزیابی شبکه و ۱۵٪ کل داده‌ها برای آزمون شبکه و در حالت سوم، ۸۰٪ کل داده‌ها برای تربیت شبکه، ۱۰٪ کل داده‌ها برای ارزیابی شبکه و ۱۰٪ کل داده‌ها برای آزمون شبکه استفاده می‌شوند. برای مقایسه آماری نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل از دو پارامتر آماری  $R^2$ ، مربع ضریب همبستگی و  $MSE$ ، میانگین مربع خطا استفاده شده است:

$$MSE = \frac{\sum (J_{model,i} - J_{exp,i})^2}{n} \quad (3)$$

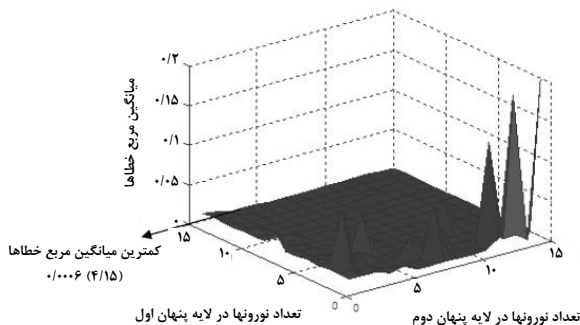
$$R^2 = \frac{\sum (J_{model,mean} - J_{exp,i})^2 - \sum (J_{model,i} - J_{exp,i})^2}{\sum (J_{model,mean} - J_{exp,i})^2} \quad (4)$$

که  $J_{model,i}$  مقدار شار مدل،  $J_{exp,i}$  مقدار تجربی شار،  $J_{model,mean}$  مقدار متوسط شار مدل،  $n$  تعداد کل داده‌ها و  $i$  شماره داده می‌باشد. برای یک مدل هر چه مقدار  $R^2$  به یک نزدیک تر و مقدار  $MSE$  به صفر نزدیکتر باشد، آن مدل بهتر است.

برای طراحی ساختمان شبکه، ابتدا شبکه با یک لایه پنهان شامل ۱ تا ۱۵ نورون مورد بررسی قرار گرفته و میانگین مربع خطاها ( $MSE$ ) اندازه گیری می‌شود. برای مشاهده اثر تعداد لایه‌های پنهان، لایه پنهان دوم شامل ۱ تا ۱۵ نورون اضافه شده و نتایج بررسی می‌شود. همچنین مدلسازی ریاضی کاهش شار در طول فیلتراسیون نقش مهمی را در مقیاس‌گذاری سیستم‌های غشایی و درک گرفتگی غشاء ایفا می‌کند. تشکیل رسوب با استفاده از مدل هر میا که چهار رفتار متفاوت برای گرفتگی را بیان می‌کند مدل می‌شود. انسداد کامل منافذ<sup>۲</sup>، انسداد استاندارد منافذ<sup>۳</sup>، انسداد متوسط منافذ<sup>۴</sup> و تشکیل کیک<sup>۵</sup> چهار رفتار مدل حاضر می‌باشند [۱۴ و ۱۵].

1. Levenberg-Marquardt  
2. Complete Blocking Filtration  
3. Standard pore blocking  
4. Intermediate Blocking Filtration  
5. Cake Filtration

در لایه دوم وجود دارد. کمترین MSE برابر  $0/0006$  و  $R^2$  برابر  $0/998$  است. نتایج حاصل در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- اثر تعداد نورونها در لایه‌های اول و دوم بر خطا

درصد خطای نسبی مدل در این حالت کمتر از ۲ درصد است. در شکل (۶) مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی در غلظت‌های مختلف روغن در فاضلاب سنتزی، سرعت جریان عرضی، دما، اختلاف فشار اعمال شده در دو طرف غشاء و زمان بر شار تراوشی بررسی شده است.

چنانکه در شکل (۶) مشاهده می‌شود با افزایش غلظت روغن در فاضلاب به دلیل تجمع ذرات روغن در نزدیک سطح غشاء و افزایش گرفتگی حفرات غشاء شار تراوشی از غشاء کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان عرضی، ضریب انتقال جرم در لایه پلاریزاسیون غلظتی و میزان آن، چنانکه در شکل (۶) مشاهده می‌شود با افزایش غلظت روغن در فاضلاب به دلیل تجمع ذرات روغن در نزدیک سطح غشاء و افزایش گرفتگی حفرات غشاء شار تراوشی از غشاء کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان عرضی، ضریب انتقال جرم در لایه پلاریزاسیون غلظتی و میزان اختلاط در نزدیکی سطح غشاء افزایش می‌یابد. بنابراین تجمع اجزاء موجود در خوراک در لایه ژل کاهش می‌یابد و در نتیجه مواد تجمع کرده روی سطح غشاء به درون توده مایع باز می‌گردد و پلاریزاسیون غلظتی کاهش و شار تراوشی از غشاء افزایش می‌یابد. با افزایش دمای خوراک ورودی، گرانشی کاهش و نفوذپذیری حلال و ماده حل شونده افزایش می‌یابد در نتیجه شار تراوشی از غشاء افزایش و درصد گرفتگی غشاء کاهش می‌یابد. با افزایش فشار، شار تراوشی شروع به افزایش شدید می‌کند و به تبع آن درصد گرفتگی غشاء نیز به آرامی شروع به افزایش

جدول ۱- انواع مدل و مکانیسم

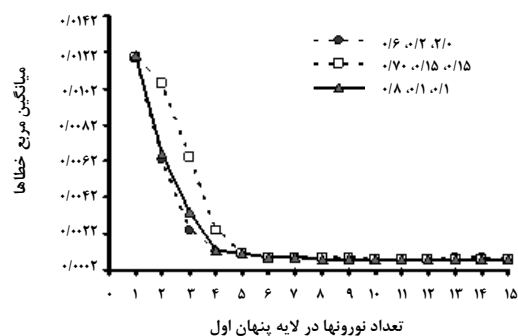
مدل	مکانیسم
$\ln(J)=\ln(J_0)-K_s t$	انسداد کامل منافذ
$1/J^{0.5}=1/J_0^{0.5}+K_s t$	انسداد استاندارد منافذ
$1/J=1/J_0+K_s At$	انسداد متوسط منافذ
$1/J^2=1/J_0^2+K_s t$	تشکیل کیک

در ادامه، داده‌های تجربی با مدل هرمیا مدل‌سازی شده و نتایج بهترین مکانیسم حاکم بر رفتار غشاء گزارش شده است.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

##### ۴-۱ نتایج مدل‌سازی شبکه عصبی

نتایج حاصل از وجود یک لایه پنهان با تغییر تعداد نورونها بین ۱ تا ۱۵ در سه حالت ذکر شده در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق نتایج، کمترین خطا در حالتی که ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش استفاده شده و با تعداد ۸ نورون در لایه پنهان اول مشاهده شده است در این حالت مربع ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برابر  $0/9969$  و میانگین مربع خطاها (MSE) برابر  $0/0008$  است.



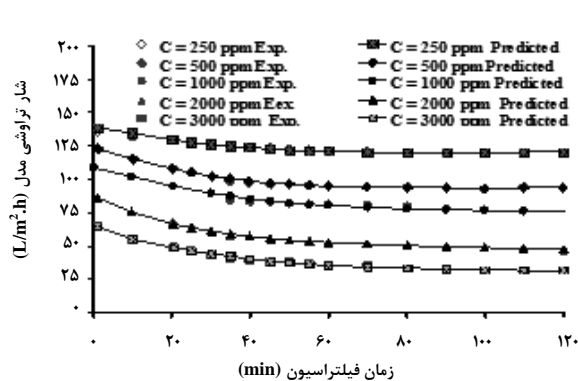
شکل ۴- اثر تعداد نورونها در لایه اول بر خطا در سه

حالت ۶۰ درصد، ۷۰ درصد و در نهایت ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه

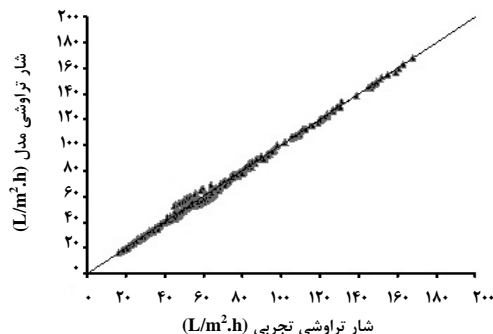
برای مشاهده اثر تعداد لایه‌های پنهان، لایه پنهان دوم اضافه شده و نتایج بررسی می‌شود. در این صورت زمانی که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش استفاده شده و تعداد ۴ نورون در لایه اول و ۱۵ نورون

غشای افزایش می‌یابد. در تمام منحنی‌ها شار حجمی از یک مقدار اولیه زیاد شروع شده و با گذشت زمان کاهش می‌یابد و در نهایت به ثابت پایایی می‌رسد. در تمام آزمایش‌ها مدل شبکه عصبی به خوبی این رفتار را نیز پیش‌بینی کرده است [۱۸-۲۴].

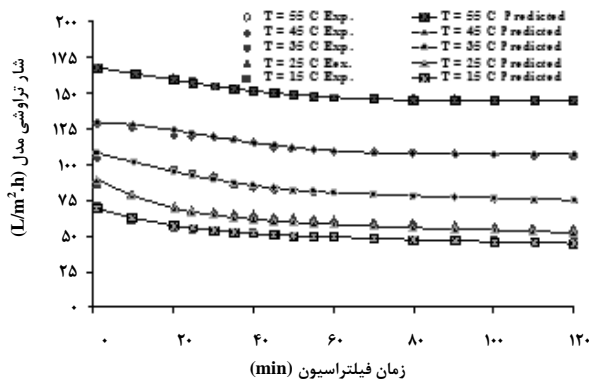
می‌کند. اما با افزایش فشار از ۲ bar به بعد، درصد گرفتگی غشای به شدت افزایش می‌یابد و به تبع آن افزایش شار تراوشی بسیار ناچیز می‌شود. در اثر افزایش فشار، ضخامت لایه کیک روی سطح غشای افزایش و تخلخل این لایه کاهش می‌یابد در نتیجه درصد گرفتگی



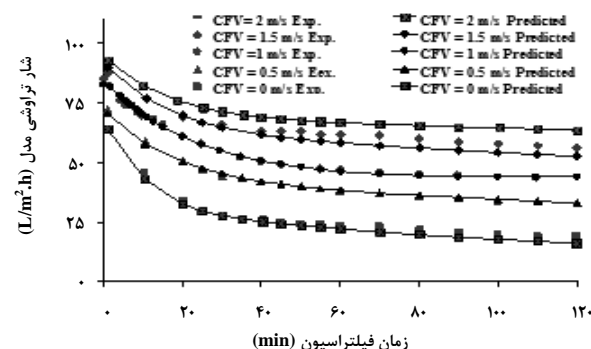
(ب)



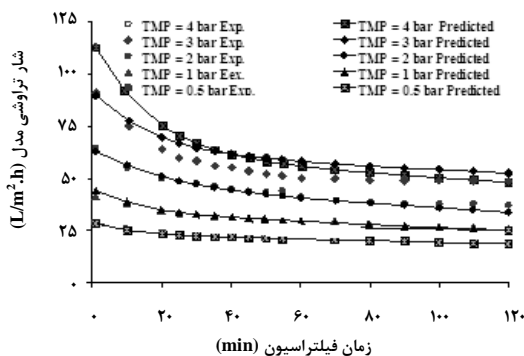
(الف)



(ت)



(پ)



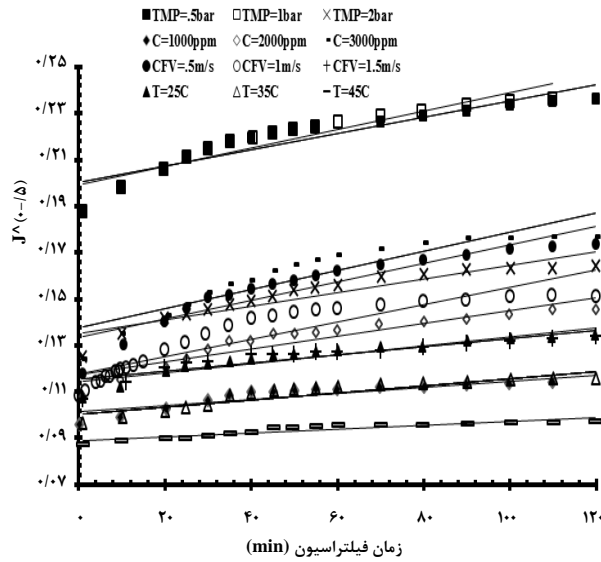
(ث)

شکل ۶- (الف) مقایسه مقادیر پیش‌بینی مدل ANN و مقادیر آزمایشگاهی، (ب-ث) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل بر اساس تابعی از زمان در غلظتهای روغن در فاضلاب سنتزی (C)، سرعت جریان عرضی (CFV)، دما (T)، اختلاف فشار اعمال شده در دو طرف غشای (TMP)

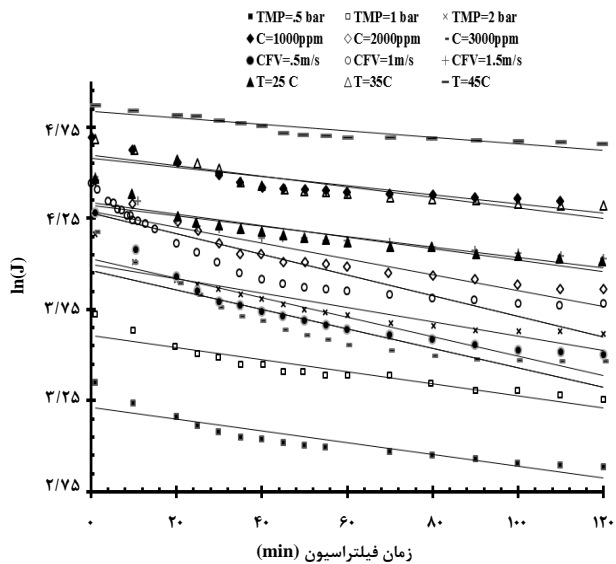
## ۲-۴ نتایج مدل‌سازی هرمیا

تعدادی از نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام گرفته در شکل (۷) گزارش شده است.

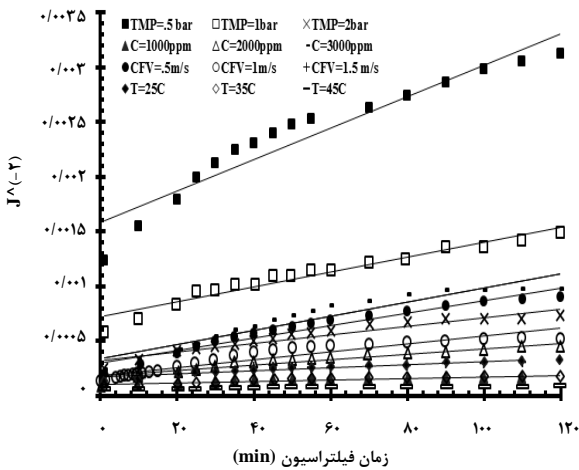
نتایج کامل مدل‌سازی در جدول (۲) گزارش شده است.



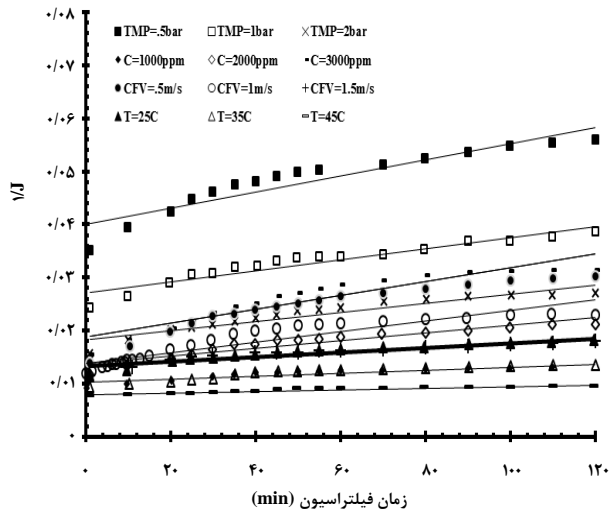
مدل انستداده استاندارد منافذ (ب)



مدل انستداده کامل منافذ (الف)



مدل تشکیل کیک (ت)



مدل انستداده متوسط منافذ (پ)

شکل ۷- چهار رفتار مدل هرمیا (الف) مدل انستداده کامل منافذ، (ب) انستداده استاندارد منافذ، (پ) انستداده متوسط منافذ، (ت) تشکیل کیک

جدول ۲- نتایج کامل مدلسازی هر میا

آزمایش	R <sup>2</sup> مدل انسداد استاندارد	R <sup>2</sup> مدل انسداد کامل	R <sup>2</sup> مدل انسداد متوسط منافذ	R <sup>2</sup> مدل تشکیل کیک
سرعت جریان خوراک (m/s)	۰/۸۳۱	۰/۸۱۷	۰/۸۶۳	۰/۹۱۸
	۰/۸۳۱	۰/۸۰۴	۰/۸۵۸	۰/۹۰۵
	۰/۸۷۵	۰/۸۵۴	۰/۸۹۴	۰/۹۲۹
	۰/۸۷۷	۰/۸۳۴	۰/۹۱۵	۰/۹۷۳
دمای جریان خوراک (°C)	۰/۸۹۹	۰/۸۹۴	۰/۹۰۵	۰/۹۱۵
	۰/۸۸۸	۰/۸۸۲	۰/۸۹۴	۰/۹۰۶
	۰/۸۶۷	۰/۸۵۲	۰/۸۸۱	۰/۹۰۷
	۰/۸۹۴	۰/۸۶۹	۰/۹۱۸	۰/۹۵۷
فشار جریان (bar)	۰/۸۴۷	۰/۸۲	۰/۸۶۲	۰/۹۰۶
	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۹۲۳	۰/۹۸۵
	۰/۸۸۶	۰/۸۸۳	۰/۸۸	۰/۰۹۸۶
	۰/۸۹۶	۰/۸۶۹	۰/۹۲	۰/۹۵۸
	۰/۹۱۱	۰/۸۸۸	۰/۹۳۳	۰/۹۶۷
غلظت‌های روغن در جریان خوراک (ppm)	۰/۸۸۴	۰/۸۵۹	۰/۹۰۷	۰/۹۳۷
	۰/۸۹۸	۰/۸۹۲	۰/۹۰۳	۰/۹۱۳
	۰/۸۸۵	۰/۸۷۳	۰/۸۹۷	۰/۹۲
	۰/۸۱۴	۰/۸۰	۰/۰۸۳	۰/۸۷۱
	۰/۸۸۱	۰/۸۵۱	۰/۹۰۸	۰/۹۵۴
۰/۸۶۹	۰/۸۳۷	۰/۸۹۷	۰/۹۴۱	

## ۵- نتیجه گیری

مدلسازی فرایند با استفاده از روشهای تکاملی با توجه به کارایی مناسب آن در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است، در حال حاضر نیز زمینه انجام کارهای بیشتر در سایر فرایندهای غشایی وجود دارد. با افزایش سرعت جریان عرضی و افزایش دمای خوراک ضخامت لایه پلاریزاسیون غلظتی کاهش و در نتیجه شار تراوشی از غشاء افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت روغن در فاضلاب سنتزی به دلیل تجمع ذرات روغن در نزدیک سطح غشاء و افزایش گرفتگی حفرات غشاء شار تراوشی از غشاء کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش اختلاف فشار و در نتیجه افزایش نیروی محرکه، شار تراوشی زیاد می‌شود. اما شیب اولیه کاهش شار در منحنی‌های فشار بالاتر، بیشتر از این شیب در منحنی‌های مربوط به فشارهای

پایین تر است و این مسئله به واسطه گرفتگی سریع تر در فشارهای بالاتر می‌باشد. در تحقیق حاضر شبکه عصبی به خوبی شار تراوشی از غشاء را بر اساس پارامترهای ورودی (دما، اختلاف فشار اعمال شده در دو طرف غشاء، سرعت جریان عرضی، غلظت روغن در فاضلاب سنتزی، زمان) پیش‌بینی می‌کند و درصد خطای نسبی مدل کمتر از ۲ درصد است. همچنین مقایسه داده‌های تجربی با مدل هر میا نشان داد که مدل کیک تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد و میانگین مربع ضریب همبستگی در این حالت برابر ۰/۹۳۳ می‌باشد. بر طبق نتایج بدست آمده در تمام آزمایشها مدل شبکه عصبی بهتر از مدل هر میا جواب داده است و مقادیر خطا برای آن کمتر است.



- [1] Mulder, M., "Basic Principles of Membrane Technology", Kluwer Academic Publishers, second edition, 21-102, (2002).
- [2] Ohya, H., Kim, J. J., Chinen, A., Alihara, M., Semonova, S. I., Negishi, Y., Mori, O., Yasuda, M., "Effect of pore size on separation of microfiltration of oily water using porous glass tubular membrane", *Journal of Membrane Science*, 145, 1 (1998).
- [3] Fu, R. Q., Xu, T. Wen., Pan, Z. X., "Modelling of the adsorption of bovine serum albumin on porous polyethylene membrane by back-propagation artificial neural network", *Journal of Membrane Science* 251, 137-144 (2005).
- [4] Delgrange, N., Cabassud, C., Cabassud, M., Durand-Bourlier, L., Lain, J. M., "Neural network for prediction of ultrafiltration transmembrane pressure—application to drink water", *Journal of Membrane Science*, 150, 111-123 (1998).
- [5] Razavi, S. M. A., Mortazavi, S. A., Mousavi, S. M., "Dynamic modeling of milk ultrafiltration by artificial neural network", *Journal of Membrane Science*, 220, 47-58 (2003).
- [6] Teodosiu, C., Pastravanu, D., Macoveanu, M., "Neural network model for ultrafiltration and backwashing", *Water Research*, 34, 4371-4380 (2000).
- [7] Dornier, M., Decloux, M., Trystram, G., Lebert, A., "Dynamic modeling of crossflow microfiltration using neural networks", *Journal of Membrane Science*, 98, 263-273 (1995).
- [8] Aydiner, C., Demir, I., Yildiz, E., "Modeling of flux decline in crossflow microfiltration using neural networks: the case of phosphate removal", *Journal of Membrane Science* 248, 53-62, (2005).
- [9] Chellam, S., "Artificial neural network model for transient crossflow microfiltration of polydispersed suspensions", *Journal of Membrane Science* 258, 35-42 (2005).
- [10] Liua, Qi-Feng., Kima, S., Lee, S., "Prediction of microfiltration membrane fouling using artificial neural network models", *Separation and Purification Technology*, 70, 1, 96-102 (2009).
- [11] Abbasi, M., Golshenas, M., Nikbakht, M., Golshenas, M., mohammadi, T., "Performance study of mullite and mullite - alumina ceramic MF membranes for oily wastewaters treatment", *Desalination* 259, 169-178 (2010).
- [12] Inar, O. C., Hasar, H., Kinaci, C., "Modeling of submerged membrane bioreactor treating cheese whey wastewater by artificial neural network", *Journal of Biotechnology* 123, 204-209 (2006).
- [13] Sahoo, G. B., Ray, C., "Predicting flux decline in crossflow membranes using artificial neural networks and genetic algorithms", *Journal of Membrane Science* 283 147-157 (2006).
- [14] Hermia, J., "Constant pressure blocking filtration laws-application to power-law non-newtonian fluids", *Trans. Inst. Chemical engineering*, 60, 183-187 (1982).
- [15] Wang, P., Xu, N., Shi, J., "A pilot study of the treatment of waste rolling emulsion using zirconia microfiltration membranes", *Journal of Membrane Science*, 173, p. 159 (2000).
- [16] Salahi, A., Abbasi, M., Mohammadi, T., "Permeate flux decline during UF of oily wastewater: Experimental and modeling", *Desalination* 251, 153-160 (2010).
- [17] Decloux, M., "Treatment of Acidic Wastewater Arising from the Refining of Vegetable Oil by Cross Flow Microfiltration at Very Low Transmembrane Pressure", *Process Biochemistry*, 42, 693 (2007).
- [18] Chakrabarty, B., Ghoshal, A. K., Purkait, M. K., "Ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion by polysulfone membrane", *Journal of Membrane Science*, 325, 427-437 (2008).
- [19] Mallada, R., Menendez, M., "Inorganic membranes synthesis, characterization and applications", *Membrane Science and Technology*, 13, 177-215 (2008).
- [20] Mohammadi, T., Esmaelifar, A., "Wastewater of a vegetable oil factory by a hybrid ultrafiltration-activated carbon process", *Journal of Membrane Science*, 254 129-137 (2005).
- [21] Mohammadi, T., Esmaelifar, A., "Wastewater treatment using ultrafiltration at a vegetable oil factory", *Desalination* 166, 329-337 (2004).
- [22] Abbasi, M., Salahi, A., Mirfendereski, M., Mohammadi, T., Pak, A., "Dimensional analysis of permeation flux for microfiltration of oily wastewaters using mullite ceramic membranes, *Desalination*", 252 113-119 (2010).
- [23] Elmaleh, S., Ghaffor, N., "Cross-flow ultrafiltration of hydrocarbon and biological solid mixed suspensions", *Journal of Membrane Science*, 118, 111 (1996).