www.rifst.ac.ir/jrifst.aspx
نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی
سال 1393، جلد 3، شماره 3، صفحات 296-283
DOI: 10.22101/JRIFST.2014.10.23.337

JRIFST

مدلسازی شار تراوه فرآیند اولترافیلتراسیون شیر تحت شرایط عملیاتی و خصوصیات فیزیکو شیمیایی مختلف به روش نرو-فازی

مهناز شهیدی نوقابی[1]، سید محمد علی رضوی[2*]، مصطفی شهیدی نوقابی[3]

1. دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان
2. استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*نویسنده مسئول (s.razavi@um.ac.ir)

3. استادیار گروه شیمی مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد

تاریخ دریافت: 92/11/08
تاریخ پذیرش: 93/07/20

واژه‌های کلیدی
اولترافیلتراسیون
شار تراوه
شیر
مدلسازی نروفازی

چکیده

در این تحقیق از سیستم استنتاج فازی (ANFIS) جهت پیشگویی شار تراوه به عنوان تابعی از عوامل فیزیکوشیمیایی و پارامترهای عملیاتی در طی اولترافیلتراسیون شیر استفاده شده است. برای انجام آزمایشات از یک سیستم پایلوتی اولترافیلتراسیون مجهز به مدول فیبر توخالی با غشاء پلی‌اترسولفون و MWCO حدود 10 کیلو دالتون استفاده شد و شیر با خصوصیات فیزیکوشیمیایی مختلف شامل pH در پنج سطح (5/6، 6، 6/6، 6/9 و 7/6) و غلظت کلرید سدیم در سه سطح (0/03، 0/06 و 0/12) و تحت شرایط عملیاتی مختلف شامل فشار در عرض غشاء (TMP) در سه سطح (0/3 ، 0/6 و 1 اتمسفر)، دمای فرایند در سه سطح (30 ، 40 و50 درجه سانتی‌گراد)، و سرعت جریان در سه سطح (10 ، 30 و46 متر بر ثانیه) توسط این غشاء فراوری گردید. برای مدلسازی اثر پارامترهای عملیاتی و خصوصیات فیزیکوشیمیایی شیر بر شار تراوه اولترافیلتراسیون ابتدا داده‌های تجربی تصادفی شد. سپس 30 درصد داده‌ها برای یادگیری، 30 درصد داده‌ها برای ارزیابی و 40 درصد داده‌ها برای آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدلسازی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر نشان داد که روش مدلسازی نروفازی به خوبی قادر است شار تراوه را در شرایط عملیاتی و خصوصیات فیزیکوشیمیایی مختلف پیش‌بینی نماید و نتایج مدلسازی نشان داد که همبستگی خوبی (به طور متوسط R=0.93) بین داده‌های پیشگویی شده و داده‌های تجربی وجود دارد.

مقدمه

از آن جایی که در صنعت لبنیات خصوصاً در پنیرسازی، جداسازی ماکرومولکول‌ها (پروتئین و چربی) از سایر مولکول‌های کوچک (مثل آب و قندها) مد نظر می‌باشد، لذا در بین فرآیندهای غشایی، اولترافیلتراسیون از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و امروزه در اکثر کارخانجات لبنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مسأله مهم در زمینه بکارگیری این تکنولوژی در صنایع لبنی، حصول شار تراوه قابل‌قبول، گرفتگی پایین و کارایی جداسازی مطلوب می‌باشد. شار تراوه و گرفتگی از لحاظ صنعتی بسیار حائز اهمیت است زیرا تعیین‌کننده میزان تولید کارخانه در واحد زمان خواهد بود. گرفتگی هم بر روی شار تأثیر گذاشته و هم گاهاً باعث توقف خط تولید و تحمیل هزینه‌های مربوط به شستشو می‌گردد. در زمینه اولترافیلتراسیون شیر تحقیقات مختلفی انجام پذیرفته

است. به عنوان مثال Razavi و همکاران (2003، 2004، 2005 و 2006)، Pouliot (2008) و Rinaldoni و همکاران (2009) به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر کارایی و گرفتگی غشاء در طی فرآیند اولترافیلتراسیون پرداختند.

به طور کلی مدلسازی فرآیندها می‌توانند در کاهش کارهای آزمایشگاهی و پیش‌بینی عملکرد سیستم و طراحی فرآیند نقش مهمی ایفا کنند. بررسی منابع نشان می‌دهد که محققین توجه ویژه‌ای جهت مدلسازی فرآیندهای غشایی در صنایع مختلف نشان داده‌اند. برای این منظور از روش‌های مختلف مدلسازی از جمله روش‌های مدلسازی فیزیکی و روش‌های مدلسازی جعبه سیاه مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN)[1] و همچنین مدل‌های منطق فازی[2]، شبکه عصبی مصنوعی- فازی (FANN)[3] به نام نروفازی[4] (ANFIS)[5] و تلفیقی از مدل‌ها بصورت مدل‌های ترکیبی فیزیکی-تجربی (هیبریدی)[6] استفاده شده است (Hilal, *et al.*, 2004).

شبکه‌های عصبی ابزار محاسباتی ساده‌ای برای آزمون داده‌ها و ایجاد مدل از داده‌ها می‌باشند. داده‌هایی که برای ایجاد مدل‌ها استفاده می‌شوند، به داده‌های آموزشی معروف هستند. هر گاه شبکه عصبی از داده‌های آموزشی برای یادگیری الگوهای موجود در داده‌ها استفاده کند، می‌تواند آنها را برای دستیابی به خروجی‌ها و نتایج مختلف بکار بگیرد (Hertz *et al.*, 1991). برای مدلسازی سیستم‌های پیچیده، کاربرد سیستم‌های هوشمند و از جمله استفاده از منطق فازی در حال گسترش می‌باشد (Mohebbi *et al.*, 2008). سیستم‌های فازی می‌توانند روابط پیچیده و غیرخطی را به درستی با قوانین دقیق توصیف کنند. این سیستم‌ها در بهینه‌سازی فرمولاسیون مواد غذایی، توسعه ابزارهای اندازه‌گیری کیفیت و مدل‌سازی فرایندهای غذایی نقش مهمی دارند (Perrot *et al.*, 2006). منطق فازی ابزاری ارزشمند در برخورد با اطلاعات مبهم و ناقص است که همراه با دانش تخصصی انسان، در مدل‌سازی فرایندها نقش دارد (Eerikainen *et al.*, 1993). رمز موفقیت منطق فازی در امکان توصیف رفتار سیستم مورد نظر با دستورات و روابط ساده شرطی، اگر–آنگاه است که در بیشتر کاربردها راه حل ساده‌ای بوده و علاوه بر این، در این روش همه اطلاعات و دانش مربوط به چگونگی عملکرد سیستم برای بهینه‌سازی آن به طور مستقیم در دسترس و قابل تبدیل می‌باشد. این امکان جالب و قدرتمند منطق فازی، در عین حال یک محدودیت بزرگ برای آن محسوب می‌شود، زیرا در بسیاری از موارد کاربردی اطلاعات مربوط به توصیف سیستم، در خود مجموعه داده‌های آن مستتر است و برای به دست آوردن این اطلاعات روش‌های خاصی مورد نیاز است. یکی از این روش‌ها استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. وقتی که مجموعه‌ای از داده‌های عددی، شامل اطلاعاتی درباره چگونگی عملکرد سیستم موجود باشد، شبکه‌های عصبی مصنوعی به علت قابلیت یادگیری از داده‌ها می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. اما شبکه‌های عصبی به سه دلیل زیر کاربرد عملی کمتری نسبت به منطق فازی دارند (Mashrei *et al.*, 2010):

1. مدل‌های شبکه عصبی به صورت جعبه سیاه بوده و امکان تفسیر و یا تصحیح و تغییر یک رفتار مشخص از شبکه عصبی به صورت دستی وجود ندارد.
2. حجم محاسبات بالایی دارند.
3. انتخاب مدل شبکه‌ای مناسب و تنظیم پارامترهای یادگیری کار مشکلی می‌باشد و راه حل مشخص و مناسبی برای بهینه‌سازی شبکه عصبی وجود ندارد.

از طرف دیگر، در طراحی سیستم‌های فازی نیاز به فهم عمیقی از متغیرهای فازی و توابع عضویت، روابط ورودی-خروجی و به علاوه تشخیص درست در انتخاب قوانین فازی وجود دارد (Enchev *et al.*, 2007). بنابراین مشکلات و نقاط ضعف شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی با اعمال ترکیب مناسبی از این دو روش قابل حل است. به این صورت که منطق فازی به راحتی قابلیت اصلاح و بهینه‌سازی دارد و شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت یادگیری از

1 - Artifical Neural Network
2 - Fuzzy logic
3 - Fuzzy Artificial Neural Networks
4 - Neuro-Fuzzy
5 - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
6- Hybrid

روی داده‌های عددی را دارا می‌باشند. شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند یک تابع را تخمین بزنند، ولی نمی‌توانند نتایج را به زبان طبیعی تفسیر کنند. در مقابل منطق فازی وسیله‌ی مناسبی برای بیان نتایج به زبان معمولی می‌باشد (Mashrei *et al.*, 2010). می‌توان تصور کرد که ترکیب شبکه‌های عصبی و منطق فازی در مدل‌های نرو-فازی وسیله‌ای برای استفاده از خواص تخمینی شبکه‌های عصبی مصنوعی و خواص منطق فازی در استفاده از مفاهیم مبهم به صورت همزمان به وجود می‌آورد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون فرآیند اولترافیلتراسیون شیر به روش نرو-فازی مدلسازی نشده است. لذا با توجه به مزایای ذکر شده برای این نوع مدل‌سازی نسبت به هر یک از مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدلسازی فازی، در این تحقیق به مدلسازی شار تراوه فرآیند اولترافیلتراسیون شیر در شرایط مختلف عملیاتی (اختلاف فشار در عرض غشا، دما و سرعت جریان عرضی) و خصوصیات فیزیکوشیمیایی شیر (قدرت یونی و pH) به روش نرو-فازی پرداخته می‌شود و نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از شیرخشک کامل استفاده شد و در هر بار عملیات غشایی به گونه‌ای با آب مقطر بازسازی شد که به طور متوسط محتوی 3/5% پروتئین، 5/2٪ کربوهیدرات، 1/1٪ چربی، 0/6 میلی‌گرم بر یکصد گرم سدیم و 10/1٪ مواد جامد کل بود. همچنین در این تحقیق از یک سیستم پایلوت غشایی اولترافیلتراسیون مطابق شکل 1 استفاده شد. مشخصات این سیستم به صورت خلاصه در جدول 1 آورده شده است.

عملیات اولترافیلتراسیون شیر در 5 مرحله زیر انجام می‌شد:

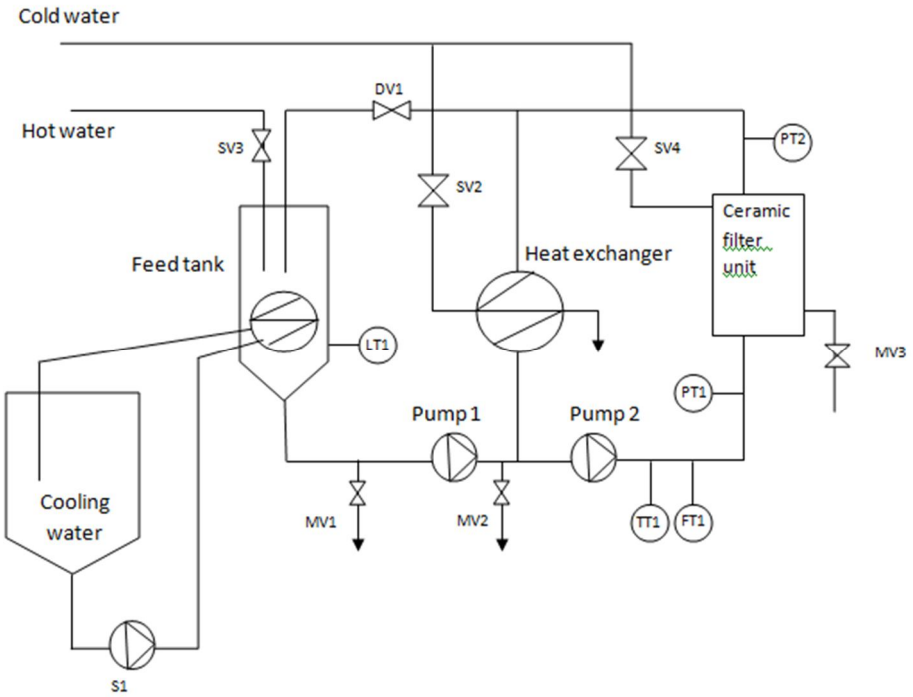
1ـ فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء تمیز برای مدت 10-15 دقیقه.

2ـ فیلتراسیون نمونه شیر از درون غشاء تمیز برای مدت 130 دقیقه .

3ـ فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء مسدودشده برای مدت 10-15 دقیقه.

4ـ سیکل CIP مطابق دستورالعمل شرکت تولیدکننده غشاء (در حداقل فشار و حداکثر سرعت جریان).

5ـ فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء شسته شده برای مدت 10-15 دقیقه.



شکل 1- شماتیک پایلوت اولترافیلتراسیون به کارگرفته شده برای شیر

در تمام مراحل بالا، فیلتراسیون آب مقطر در فشار 12 بار و دمای 30°C انجام شد. شار تراوه از طریق آزمایشات تجربی و بر اساس تغییرات وزن نیز گزارش شد. لذا در این تحقیق شار آب مقطر و جریان فاز تراوه شیر بر حسب $kgm^{-2}min^{-1}$ در فواصل زمانی 1 دقیقه‌ای و از طریق ثبت وزن آب مقطر/فاز تراوه توسط کامپیوتر متصل به یک ترازوی دیجیتالی و سپس جاگذاری مقادیر حاصل در رابطه 1 اندازه‌گیری شد (Decloux *et al.* 2000).

رابطه (1) $J = (W_2 - W_1) / (t \times A)$

W_1 و W_2، به ترتیب نشان‌دهنده وزن تراوه خوانده شده در زمان، t_1 و t_2 (kg)، t، فاصله زمانی بین خواندن دو وزن W_1 و W_2 (s) و A سطح غشاء (m^2) می‌باشد. هدف از مرحله اول و پنجم تعیین شار آب مقطر (J_w) و کنترل شار روزانه غشاء دستگاه بود. با توجه به داده‌های مرحله دوم، شار تراوه شیر (J_p) به دست می‌آید.

جدول 1- مشخصات فنی سیستم پایلوتی

نوع غشاء	اولترافیلتراسیون (UF)
جنس غشاء	پلی‌اترسولفون
اندازه منافذ	حدود 10 kDa
سطح موثر غشاء	26 ft^2
دامنه تحمل pH غشاء	1-13/5
دامنه تحمل دمای غشاء	تا 75 درجه سانتی‌گراد
حداکثراختلاف فشار قابل تحمل غشاء	0/5-1/2 اتمسفر
نوع مدول	فیبر توخالی، ساخت شرکت Romicon کشور امریکا

به منظور تنظیم شرایط فرآیند، ابتدا سیستم غشایی با آب مقطر تحت شرایط عملیاتی مورد آزمایش برای 10 دقیقه به گردش در آمده تا ضمن گرم کردن اجزاء پایلوت پلنت غشایی شار جریان آب مقطر نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. سپس تانک تغذیه سیستم غشایی با نمونه شیر پر می‌شد و عملیات اولترافیلتراسیون تحت شرایط عملیاتی مورد نظر برای 130 دقیقه ادامه می‌یافت. سرعت جریان خوراک در تمامی عملیات‌ها ثابت بود. در مرحله سوم آب مقطر با دبی بالا و فشار پایین وارد مدار سیستم می‌شد تا لایه ژلی (مقاومت برگشت‌پذیر) روی سطح غشاء برطرف گردد. در انتها به منظور بر طرف کردن گرفتگی برگشت‌پذیر و رساندن شار آب‌خالص به حالت شروع عملیات، سیکل شستشو به طور کامل برای مدت 2-1/5 ساعت انجام می‌گرفت. سیکل شستشو زمانی پایان می‌پذیرفت که اختلاف شار آب مقطر (یا مقاومت ذاتی غشاء) در ابتدا و انتهای هر بار عملیات اولترافیلتراسیون بیشتر از 5-3 درصد نباشد (Razavi, 2006)، در غیر این صورت گرفتگی غشاء برطرف نشده و می‌باید سیکل شستشو مجدداً تا حصول نتیجه تکرار گردد.

مراحل شستشوی غشاء بصورت ذیل بود:

1. شستشو با سود 0/1 نرمال به مدت 30 دقیقه در دمای 40 درجه سانتی‌گراد.
2. شستشو با آب مقطر به مدت 15 دقیقه در دمای 40 درجه سانتی‌گراد.
3. شستشو با HCL 0/1 نرمال به مدت 30 دقیقه در دمای 40 درجه سانتی‌گراد.
4. شستشو با آب مقطر تا حصول pH خنثی.

متغیرها و شرایط عملیاتی مورد استفاده

در این تحقیق غلظت نمک (در سه سطح 0/03، 0/06 و 0/12)، pH (در پنج سطح 5/6، 6، 6/6، 6/9 و 7/6)، فشار عملیاتی در سه سطح (0/3، 0/6 و 1 بار)، دما در سه سطح (30، 40 و 50 درجه سانتی‌گراد) و سرعت جریان در سه سطح (10، 30 و 46m/s) بر شار تراوه فرآیند اولترافیلتراسیون شیر مورد مطالعه قرار گرفت. نمودارها به وسیله نرم افزار Excel رسم گردید.

مدلسازی

برای مدلسازی شار فرآیند اولترافیلتراسیون شیر تحت شرایط عملیاتی مختلف و خصوصیات فیزیکوشیمیایی شیر از روش نرو-فازی استفاده شد. فشار، دما، سرعت جریان، غلظت و pH شیر به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته شدند. داده‌های آزمایشگاهی ابتدا کاملاً تصادفی شد و سپس 30 درصد داده‌ها (116 داده در مدلسازی اثر فشار، دما و سرعت جریان، 156 داده برای مدلسازی اثر قدرت یونی و 195 داده در مدلسازی اثر pH بر شار تراوه) برای تربیت، 30 درصد داده‌ها (116 عدد در مدلسازی اثر فشار، دما و سرعت جریان، 156 داده برای مدلسازی اثر قدرت یونی و 195 داده در مدلسازی اثر pH بر شار تراوه) برای ارزیابی و 40 درصد داده‌ها (156 عدد در مدلسازی اثر فشار، دما و سرعت جریان، 208 داده برای مدلسازی اثر قدرت یونی و 259 داده در مدلسازی اثر pH بر شار تراوه) برای آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفت. برای ایجاد FIS از پیش فرض Grid partition استفاده شد. تعداد تابع عضویت ورودی 2 و از نوع trapmf استفاده شد. تابع عضویت خروجی خطی در نظر گرفته شد.

روش بهینه‌سازی آموزش شبکه به صورت هیبرید مورد استفاده قرار گرفت. همچنین تولرانس خطا صفر و تعداد دوره‌های آموزش[1] 50 در نظر گرفته شد.

مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار مطلب[2] (نسخه 7) انجام پذیرفت. پس از مدلسازی برای ارزیابی توانایی مدل در پیش‌بینی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر داده‌هایی را که تا به حال در مراحل مدلسازی استفاده نشده بود را به مدل داده و پاسخ آنها با نتایج مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

اثر فشار

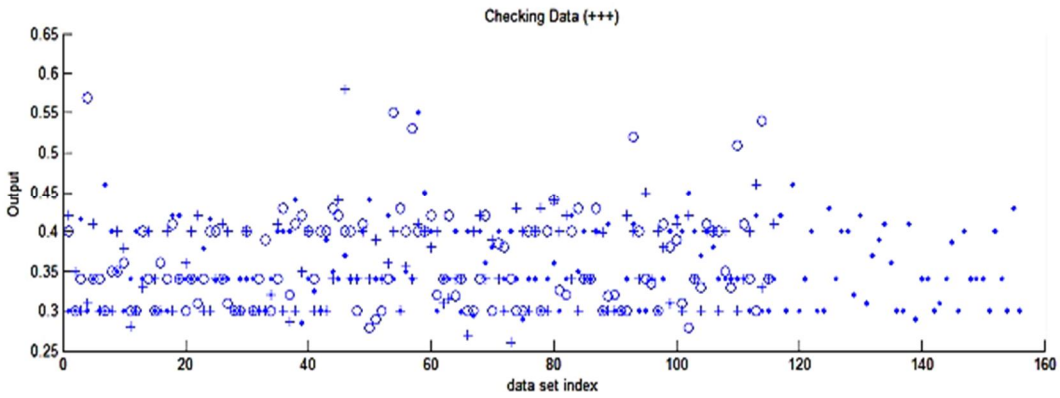
نتایج تجربی نشان داد که با افزایش فشار عملیاتی شار تراوه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج تجربی نشان دهنده این بود که در دقایق اولیه فرآیند شار تراوه با شدت بیشتری کاهش می‌یابد و بعد از آن نرخ کاهش شار بسیار ناچیز شده و در واقع به حالت پایا می‌رسد. برای مدلسازی اثر فشار بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر، 30 درصد داده‌ها (116 داده) برای آموزش، 30 درصد برای ارزیابی و 40 درصد (156 داده) برای آزمون مدل بکار گرفته شد (شکل 2).

بررسی خطا در اپوچ های مرحله تربیت نشان داد که از همان ابتدای شبکه مقدار خطا ثابت بوده و در حدود 0/020 است (شکل 3).

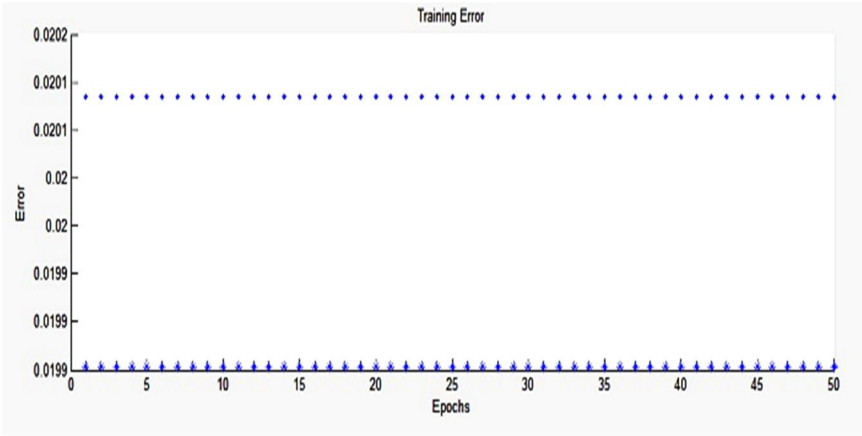
شکل 4 ساختار شبکه مورد استفاده برای مدلسازی اثر فشار بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی مدل، ضریب همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های تجربی محاسبه گردید. در شکل 5 داده‌های تجربی مربوط به شار تراوه در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده مدل نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود مدل نرو-فازی توانسته است با قدرت نسبتاً خوبی (R^2=0/83) شار تراوه اولترافیلتراسیون را در فشارهای عملیاتی مختلف پیش‌بینی نماید. با توجه به این که داده‌های مورد استفاده برای آزمون مدل، به هیچ عنوان در مرحله تربیت و ارزیابی مدل از آنها استفاده نشده است، بنابراین نتایج حاصل از آن معیار خوبی برای نشان دادن توانایی مدل در پیش‌بینی شار تراوه در مواجهه با ورودی‌هایی به غیر از ورودی‌های مورد استفاده در مراحل یادگیری و ارزیابی مدل می‌باشد.

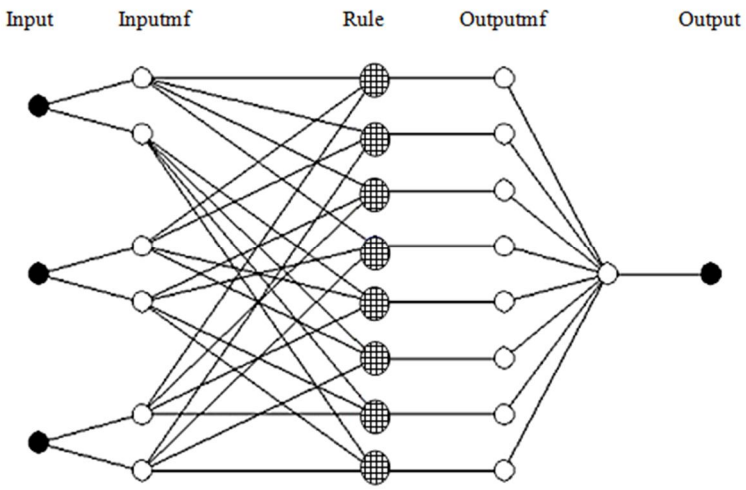
1- Epochs
2- MATLAB



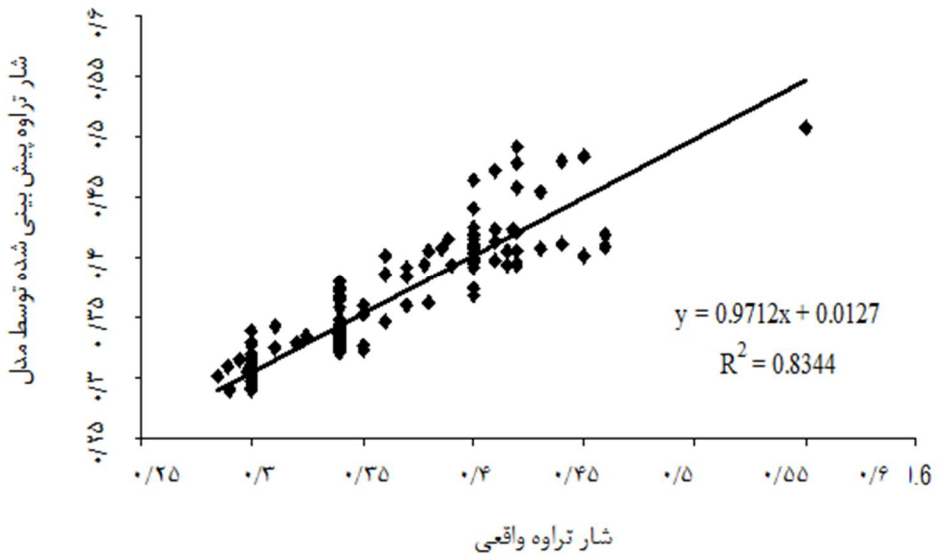
شکل 2- داده‌های مورد استفاده برای مدلسازی اثر فشار بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر (o : داده‌های مورد استفاده برای یادگیری مدل، ●: داده‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل، + : داده‌های مورد استفاده برای آزمون مدل)



شکل 3- نمودار خطا در مقابل اپوچ در طی مرحله آموزش مدل

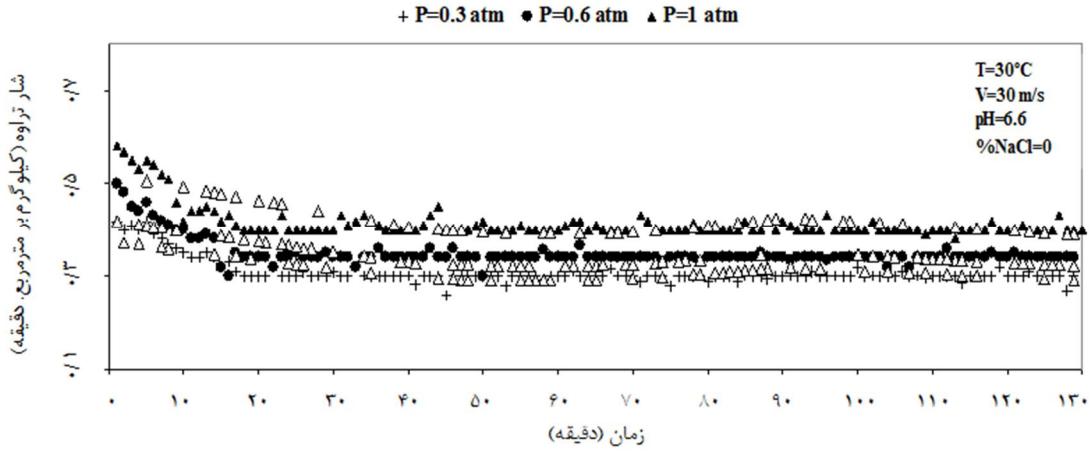


شکل 4- ساختار شبکه مورد استفاده برای مدلسازی اثر فشار بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر



شکل 5- مقادیر واقعی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در فشارهای مختلف در مقابل مقادیر پیشگویی شده شار تراوه توسط مدل نرو-فازی

برای نشان‌دادن بهتر توانایی مدل در پیش‌بینی شار تراوه در فشارهای عملیاتی مختلف، داده‌های تجربی مربوط به شار تراوه در فشارهای عملیاتی مختلف و شارهای پیش‌بینی شده توسط مدل نرو-فازی به صورت توأمان در شکل 6 به تصویر کشیده شده است. با ملاحظه شکل نه تنها قابلیت مناسب مدل در پیشگویی شار دینامیک تراوه مشخص است، بلکه اثر فشار بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر نیز به خوبی نشان داده شده است. اولترافیلتراسیون یک فرایند غشایی مبتنی بر نیروی محرکه فشار است و لذا افزایش نیروی محرکه باعث افزایش شار شده است. قابل ذکر است که افزایش فشار تا یک حدی (فشار حدی) باعث افزایش شار خواهد شد و بعد از آن فشار دیگر بر شار تراوه تأثیر نخواهد داشت. نتایج نشان می‌دهد که شار تراوه اولترافیلتراسیون در این تحقیق در دامنه مستقل از فشار قرار نگرفته است.



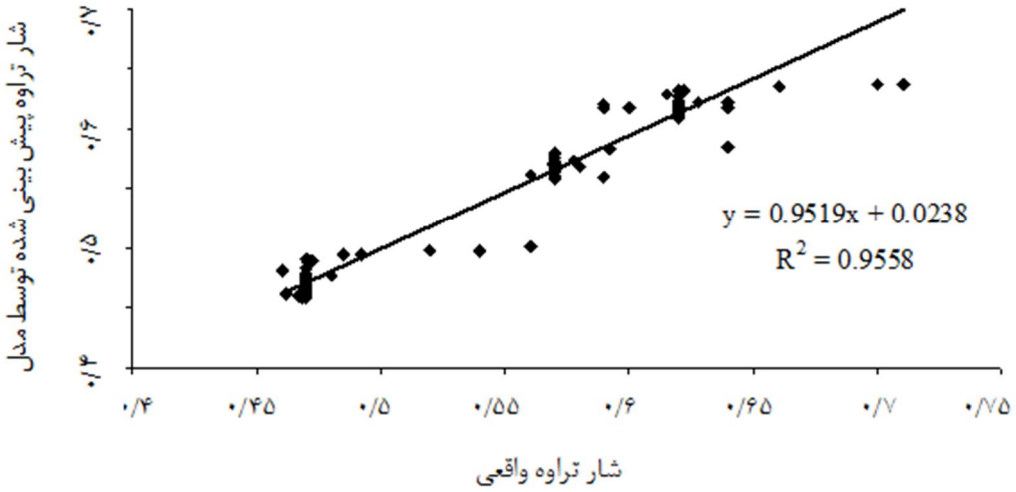
شکل 6- شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در فشار های عملیاتی مختلف (نمادهای توپر نشان دهنده داده های تجربی شار و نمادهای توخالی نشان دهنده شار پیش بینی شده توسط مدل نرو-فازی است)

اثر دما

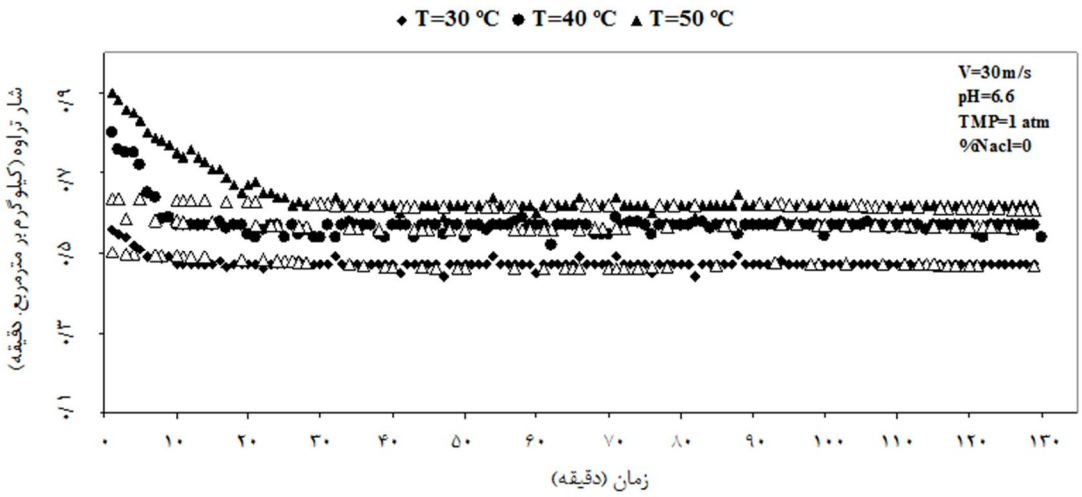
برای مدلسازی اثر دما بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر همانند مراحل مدلسازی اثر فشار، داده‌ها بصورت 30:30:40 (تربیت، ارزیابی و آزمون) تقسیم بندی و مورد استفاده قرار گرفت. برای ایجاد FIS از پیش‌فرض Grid partition استفاده شد و

تعداد تابع عضویت ورودی 2 و نوع آن trapmf و تابع عضویت خروجی خطی در نظر گرفته شد. همچنین تولرانس خطا صفر، اپوچ 50 و روش بهینه‌سازی آموزش شبکه هیبرید در نظر گرفته شد. بررسی خطا در اپوچ‌های مرحله تربیت نشان داد که از همان ابتدای شبکه مقدار خطا ثابت بوده و در حدود 0/014 است. با شرایط در نظر گرفته شده، مدل بهینه تعیین و داده‌های تجربی که تاکنون در مدلسازی بکار گرفته نشده بود جهت بررسی توانایی مدل در پیش بینی شار تراوه در ازاء ورودی های جدید مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور تیمارهای مربوط به عنوان ورودی به مدل داده شد و خروجی مدل (داده‌های پیش‌بینی شده مدل) با داده‌هایی که با اعمال همان تیمارها در آزمایشات تجربی بدست آمده بود مقایسه شد. شکل 7 نشان دهنده داده‌های تجربی مربوط به شار تراوه در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده مدل می‌باشد و بررسی‌ها حاکی از قدرت عالی مدل نرو-فازی (R^2=0/95) در پیش‌بینی شار تراوه اولترافیلتراسیون در دماهای مختلف است.

با افزایش دما، گرانروی محلول‌ها کاهش یافته و ضریب نفوذ آنها افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش شار تراوه فیلتراسیون‌های غشایی می‌گردد (Razavi, 2006). شکل 8 نشان دهنده داده‌های پیش بینی‌شده مدل برای شار تراوه در طی 130 دقیقه عملیات فیلتراسیون در دماهای مختلف (30، 40 و 50 درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، پیش‌بینی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در دماهای مختلف توسط مدل بهینه، سازگاری خوبی با نتایج تجربی در دماهای متناظر دارد. لذا می‌توان توسط مدل بهینه ارائه شده، شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر را در دماهای مختلف با تقریب مناسب پیش‌بینی نمود. همان طور که ملاحظه می شود افزایش شار در نتیجه افزایش دما از 30 به 40 درجه سانتی‌گراد بیشتر از مقدار افزایش شار ناشی از افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد است و شکل 5 نشان می‌دهد که مدل نرو-فازی بهینه شده به خوبی توانسته است این موضوع را پیش‌بینی نماید.



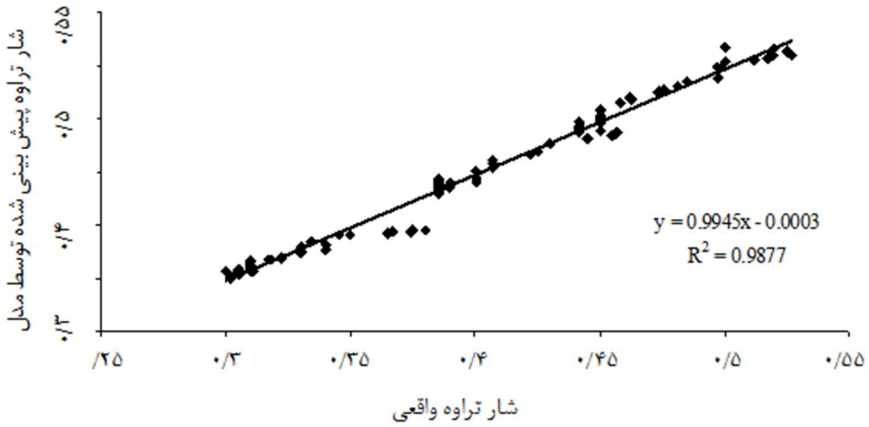
شکل 7- مقادیر واقعی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در دماهای مختلف درمقابل مقادیر پیشگویی شده شار تراوه توسط مدل نرو-فازی



شکل 8- شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در دماهای مختلف (نمادهای توپر نشان دهنده داده‌های تجربی شار و نمادهای توخالی نشان دهنده شار پیش بینی شده توسط مدل نرو-فازی است)

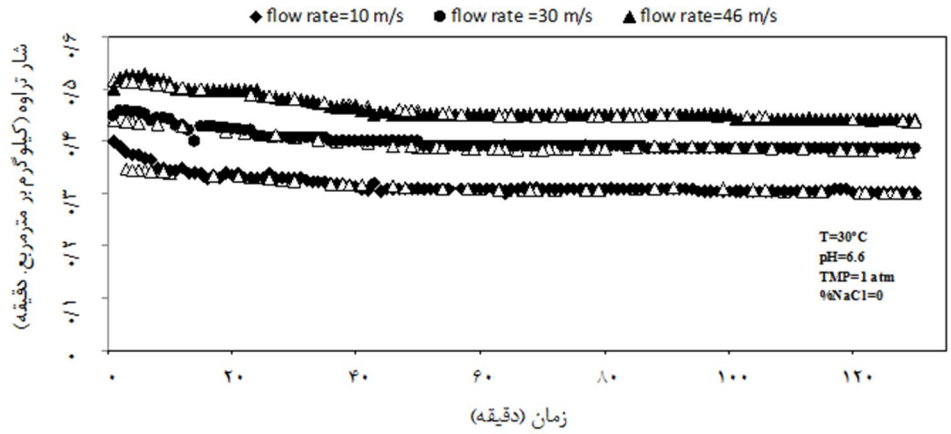
اثر سرعت جریان

نتایج تجربی اولترافیلتراسیون شیر در سرعت جریان‌های مختلف (10، 30 و 46m/s) نشان داد که با افزایش سرعت جریان، شار تراوه افزایش می‌یابد. برای مدلسازی روند مشاهده شده در آزمایشات تجربی از مدل نرو-فازی و منطبق بر مراحل ارائه شده در مواد و روش‌ها استفاده شد. بررسی خطا در اپوچ‌های مرحله تربیت مدلسازی اثر سرعت جریان عرضی بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر نشان داد که از همان ابتدای شبکه مقدار خطا ثابت بوده و در حدود 0/008 است. جهت ارزیابی توانایی مدل، داده‌های تجربی مربوط به شار تراوه در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده مدل رسم شده و ضریب همبستگی محاسبه گردید (شکل 9). ضریب همبستگی بین این دو دسته داده (R^2=0/99) حاکی از آن است که مدل نرو-فازی توانسته است با قدرت عالی شار تراوه اولترافیلتراسیون را در سرعت جریان‌های مختلف پیش‌بینی نماید.



شکل 9- مقادیر واقعی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در سرعت جریان های مختلف درمقابل مقادیر پیشگویی شده شار تراوه توسط مدل نرو-فازی

در نهایت پیش‌بینی‌های مدل بهینه در کنار داده‌های به دست آمده از عملیات آزمایشگاهی در سرعت جریان‌های مختلف (هر کدام به مدت 130 دقیقه) در شکل 10 آورده شده است و همان طور که ملاحظه می‌گردد مدل ارائه شده بخوبی توانسته است اثر افزایش شار دینامیک تراوه با افزایش سرعت جریان را پیش بینی نماید.

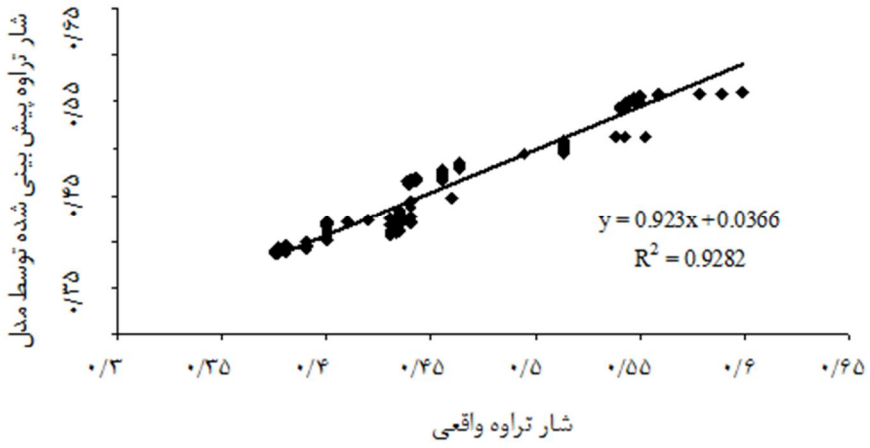


شکل 10- شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در سرعت جریان‌های مختلف (نمادهای توپر نشان دهنده مقادیر واقعی شار و نمادهای توخالی نشان دهنده شار پیش‌بینی شده توسط مدل نرو-فازی است)

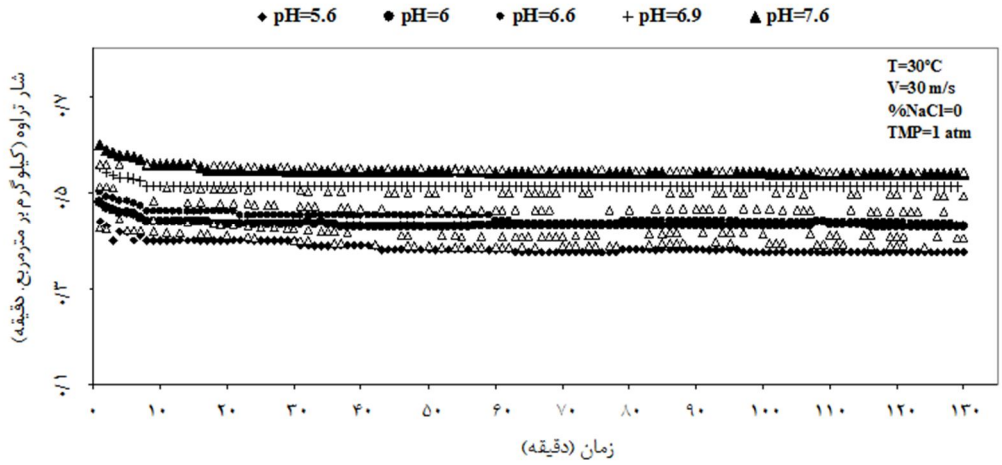
اثر pH

از آن جایی که بررسی منابع نشان دهنده تاثیر pH بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر می‌باشد (Razavi, 2005)، لذا در این تحقیق تاثیر pH بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر به صورت آزمایشگاهی بررسی و سپس مدلسازی آن بر اساس مدل‌های نروفازی انجام پذیرفت. تابع عضویت ورودی trapmf و تابع عضویت خروجی خطی و در نظر گرفته شد. بررسی خطا در اپوچ‌های مرحله تربیت مدلسازی نشان داد که از همان ابتدای شبکه مقدار خطا ثابت بوده و در حدود 0/015 است. نتایج نشان داد که با افزایش pH از 5/6 تا 7/6 شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر افزایش می‌یابد. در شکل 11 داده‌های تجربی مربوط به شار تراوه در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده مدل نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود مدل نرو-فازی توانسته است با قدرت نسبتاً خوبی (R^2=0/93) شار تراوه اولترافیلتراسیون را در pHهای مختلف پیش‌بینی نماید.

در شکل 12 داده‌هایی که توسط مدل پیش‌بینی شده است را روی نمودار شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در طی 130 دقیقه آزمایش تجربی توسط پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق رسم شده است. همان‌طور که از شکل بر می‌آید مدل مذکور شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر را در طی 130 دقیقه عملیات و در pHهای مختلف به خوبی پیش‌بینی نموده است. Patel و Reuter (1985) دریافتند که با کاهش pH شیر بویژه در pHهای پایین‌تر از 5/6 گرفتگی افزایش می‌یابد. آنها نتیجه گرفتند که گرفتگی در pHهای پایین‌تر ناشی از تجمع کازئین است. Eckner و Zottola (1992) نشان دادند با کاهش pH، شار به دلیل گرفتگی غشاء کاهش می‌یابد. آنها گزارش کردند که با تغییر pH، تعادل شیمیایی بین اجزای باردار و خنثی تغییر می‌کند. وقتی pH به 5/6 می‌رسد، بیشتر پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه باردار هستند. چون مولکول‌های باردار فعال‌ترند، لذا تشکیل ژل و گرفتگی را افزایش داده و شار را کاهش می‌دهند. به علاوه کاهش pH، غلظت کلسیم را به شکل یونی‌اش افزایش می‌دهد. این کلسیم یونی می‌تواند پل پیوند بین پروتئین‌های باردار باشد و چنین پروتئین‌هایی را به غشاء باردار منفی متصل نماید.



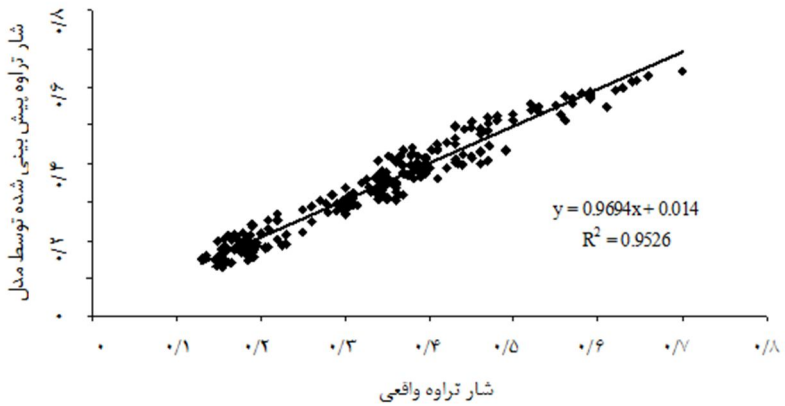
شکل 11- مقادیر واقعی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در pH های مختلف در مقابل مقادیر پیشگویی شده شار تراوه توسط مدل نرو-فازی



شکل 12- شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در pHهای مختلف (نمادهای توپر نشان دهنده داده‌های تجربی شار و نمادهای توخالی نشان‌دهنده شار پیش‌بینی شده توسط مدل نرو-فازی است)

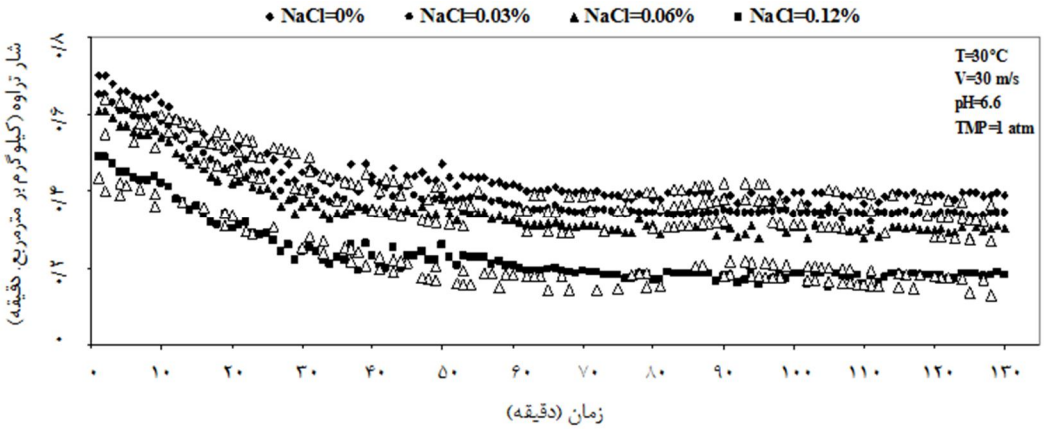
اثر نمک کلرید سدیم

نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمک کلرید سدیم یا به عبارتی افزایش قدرت یونی در محلول خوراک شار تراوه کاهش می‌یابد. جهت مدلسازی اثر قدرت یونی بر شار تراوه با استفاده از مدل‌های نروفازی مطابق آنچه پیش از این در مورد مدلسازی اثر فشار، دما و غیره بر شار تراوه عنوان شد از پیش‌فرض Grid partition، تعداد تابع عضویت ورودی 2 و نوع آن trapmf، تابع عضویت خروجی خطی، تولرانس خطا صفر، اپوچ 50 و روش بهینه‌سازی آموزش شبکه هیبرید استفاده شد. بررسی خطا در اپوچ‌های مرحله تربیت مدلسازی اثر قدرت یونی بر شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر نشان داد که از همان ابتدای شبکه مقدار خطا ثابت بوده و در حدود 0/028 است. همان طور که شکل 13 ملاحظه می‌شود همبستگی بسیار خوبی بین پیش‌بینی‌های شار تراوه اولترافیلتراسیون در غلظت‌های مختلف کلرید سدیم توسط مدل نرو-فازی و داده‌های حاصل از آزمایشات تجربی (R^2=0/95) وجود دارد.



شکل 13- مقادیر واقعی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در غلظت‌های مختلف کلرید سدیم در مقابل مقادیر پیشگویی شده شار تراوه توسط مدل نرو-فازی

در شکل 14 پیش‌بینی‌های شار توسط مدل نرو-فازی بهینه در طی 130 دقیقه عملیات اولترافیلتراسیون شیر (داده‌های بدست آمده در مرحله تست) در کنار داده‌های آزمایشگاهی به تصویر کشیده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود و در شکل 13 نیز همبستگی خوب بین داده‌های پیش بینی‌شده و داده‌های واقعی (تجربی) نشان داده شد، مدل ارائه شده با تقریب بسیار خوبی قادر به پیش‌بینی شار تراوه در زمان‌های مختلف و تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کلرید سدیم (به عبارتی قدرت‌های یونی مختلف) می‌باشد. به نظر می‌رسد با افزایش غلظت کلرید سدیم، قدرت یونی شیر افزایش یافته و پیرو آن فشار اسمزی در سمت خوراک غشاء افزایش می‌یابد. لذا در یک فرآیند غشایی مبتنی بر نیروی محرکه فشار با افزایش فشار اسمزی (که در خلاف جهت فشار عملیاتی سیستم عمل می‌کند) انتظار می‌رود شار تراوه کاهش یابد.



شکل 14- شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر در غلظت‌های مختلف کلرید سدیم مختلف (نمادهای توپر نشان دهنده داده‌های واقعی شار و نمادهای توخالی نشان دهنده شار پیش‌بینی شده توسط مدل نرو-فازی است)

نتیجه گیری

با توجه به این که با افزایش فشار، سرعت جریان، pH و دما، شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر افزایش می‌یابد. بهتر است از سرعت جریان، pH و دماهای بالاتر استفاده گردد. همچنین توصیه می‌شود قدرت یونی شیر برای حصول کارایی بیشتر کاهش داده شود که این کار را می‌توان به روش‌های مختلفی از جمله الکترولیز و سایر روش‌ها انجام داد. نتایج مدلسازی شار تراوه اولترافیلتراسیون شیر نشان داد که روش مدلسازی نرو-فازی به خوبی قادر است شار تراوه را در شرایط عملیاتی و خصوصیات فیزیکوشیمیایی مختلف پیش‌بینی نماید و داده‌های حاصل از مدلسازی همبستگی خوبی (بطور متوسط R^2=0/93) را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد.

منابع

1. Decloux, M., Tatoud, L., Mersad, A. 2000. Removal of colorants an polysaccharides from raw cane sugar remelts by ultrafiltration. Zuckerindustrie, 125: 106.
2. Eckner, K.F. & E.A. Zottola. 1992. Partitioning of skim milk components as a function of pH, acidulant and temperature during membrane processing. Journal of Dairy Science, 75(8): 2092-2097.
3. Eerikainen, T., Linko, P., Linko, C., Siimes, T., & Zhu, Y. H. 1993. Fuzzy logic and neural network applications in food science and technology. Trends in Food Science and Technology, 4: 237-242.
4. Entchev, E., & Yang, L. 2007. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system techniques and artificial neural networks to predict solid oxide fuel cell performance in residential microgeneration installation. Journal of Power Sources, 170: 122-129
5. Hertz, J., Krogh, A., & Palmer, R.G. 1991. Introduction to the Theory of Neural Computation. Addison-Wesley publisher.
6. Hilal, N., H. Al-Zoubi, N.A. Darwish, A.W. Mohammad, M. Abu Arabi. 2004. A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy. Desalination, 170: 281-308.
7. Mashrei, M. A., Abdulrazzaq, N. Andalla, T.Y. and Rahman, M.S., 2010. Neural net works model and adaptive neuro-fuzzy inference system for predicting the moment capacity of ferrocement members. Engineering Structures, 32: 1723-1734.
8. Mohebbi, M., Barouei, J., Akbarzadeh-T, M.R., Rowhanimanesh, A.R., Habibi-Najafi, M.B., & Yavarmanesh, M. 2008. Modeling and optimization of viscosity in enzyme-modified cheese by fuzzy and genetic algorithm. Computers and Electronics in Agriculture, 62: 260–265.
9. Patel, R.S. & H. Reuter. 1985. Fouling of hollow fiber membrane during ultrafiltration of skim milk. Milchwissenschaft, 40 (12): 731-733.
10. Perrot, N., Ioannou, I., Allais, I., Curt, C., Hossenlopp, J., & Trystram, G. 2006. Fuzzy concepts applied to food product quality control: a review. Fuzzy Sets and Systems, 157: 1145–1154.
11. Pouliot, 2008. Membrane processes in dairy technology- From a simple idea to world wide panacea. International Dairy Journal, 18: 735-740.
12. Razavi, S.M.A., 2005, The study of ultrafiltration performance as a function of milk pH, Iranian Journal of Agriculture Science, 36 (2): 415-424.
13. Razavi, M. A. 2006. Effect of process temperature on milk ultrafiltration performance. The Agricultural science, 16: 85-94.
14. Razavi, M.A., Mortazavi, A.& Mousavi, M. 2004. Application of neural networks for crossflow milk ultration sim uktration. International Dairy Journal, 14: 69-80.
15. Razavi, M.A., Mortazavi, A., Mousavi, M. 2003. Dynamic modeling of milk ultrafiltration by artifical neural networks. Journal of Membrane Science, 220: 47-58.
16. Rinaldoni, A., Tarazaga, C., Campderros, M.E. & Padilla, A. 2009. Assessing performance of skim milk ultrafiltration by using technical parameters. Journal of Food Engineering, 92: 226-232.

Modeling of milk ultrafiltration permeate flux under various operating conditions and physicochemical properties using Nero–Fuzzy method

Mahnaz Shahidi Noghabi[1], Seyed Mohammad Ali Razavi[2*], Mostafa Shahidi Noghabi[3]

1. MSc. Graduated Student, Department of Food Science and Technology, Islamic Azad University–Quchan Branch, Razavi Khorasan Province, Iran
2. Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.

*Corresponding author (s.razavi@um.ac.ir)

3. Assistant Professor, Department of Food Chemistry, Research Institute of Food Science and TechnologyMashhad, Iran

Abstract

In this study, an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) used for the prediction of permeate flux as a function of the physico-chemical and operating parameters during ultrafiltration of milk. An ultrafiltration pilot plant equipped with hollow fiber module and polyethersulfone membrane (MWCO 10 kDa) was used to do the milk ultrafiltration with various physico-chemical properties, consists of five levels of pH (5.6 , 6, 6.6, 6.9 and 7.6) and three levels of ionic strength (0.03, 0.06 and 0.12) and under different operating conditions including transmembrane pressure (TMP) at three levels (0.1, 0.3 and 1 atm), temperature at three levels (30 , 40 and 50 ° C) and the flow rate at three levels (10, 30 and 46 m/s). In order to model the effects of operating parameters and physicochemical properties of milk on permeate flux, the experimental data was randomized. 30 % of the data for learning, 30% of the data for evaluation and 40 % of the data was used to test the model. The results showed that the Nero–Fuzzy modeling approach is capable to predict the permeate flux under various operating conditions and physiochemical characteristics of milk, and modeling results represented there was an excellent correlation (average R = 0.93) between the predicted data and experimental data

Keywords: Flux, Milk, Nero–Fuzzy modeling, Ultrafiltration