



مدل‌سازی نمک‌زدایی از آب لب‌شور به روش الکترودیالیز، با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی GMDH

مریم شرفی^۱ و محمود اکبری^{۲*}

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
(۲) استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط‌زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: m-akbarii@araku.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: نمک‌زدایی از آب شور و لب‌شور، به عنوان یک منبع نسبتاً دائمی، راه حلی مطمئن برای جبران کمبود آب است. فرآیند الکترودیالیز به عنوان یکی از روش‌های نمک‌زدایی، تقریباً آب بدون املاح را از آب شور جدا می‌کند و در حال تبدیل شدن به یک راه‌حل برای کمبود آب در سراسر جهان است. روش‌های مدل‌سازی، امکان بررسی کم‌هزینه نمک‌زدایی از آب شور و لب‌شور به روش الکترودیالیز و همچنین پیش‌بینی رفتارها و الگوهای فرآیندی این سیستم‌ها را فراهم می‌کنند. هدف این تحقیق، مدل‌سازی فرآیند الکترودیالیز با طراحی آزمایش‌ها و ارزیابی روش شبکه عصبی GMDH، در تخمین درصد جداسازی و میزان شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور است.

روش پژوهش: مقادیر جریان حجمی در شش سطح (۱، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌لیتر در دقیقه)، غلظت املاح در سه سطح (۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، دما در سه سطح (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد)، ولتاژ در سه سطح (۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت) و فشار در سه سطح (۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ پاسکال) استخراج گردید. به‌منظور مدل‌سازی میزان تأثیر هر یک از ورودی‌های مذکور بر درصد جداسازی و میزان شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور، از طرح فاکتوریل کامل و شبکه عصبی GMDH استفاده شد. در مدل‌سازی خروجی سلول الکترودیالیز با استفاده از شبکه عصبی GMDH، پس از تعیین متغیرهای ورودی، تصادفی‌سازی، نرمال‌سازی و تقسیم‌بندی متغیرهای ورودی و خروجی انجام شد. برای مدل‌سازی، ۹۰ درصد داده‌ها (۴۳۷ نمونه) بطور تصادفی به‌منظور آموزش و ۱۰ درصد داده‌ها (۴۹ نمونه) برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. از طرفی با توجه به دارا بودن سطوح مشخص برای هر یک از ورودی‌ها، امکان استفاده از طرح آزمایشی فاکتوریل کامل نیز فراهم بود.

یافته‌ها: نتایج جدول تجزیه رگرسیون خطی نشان داد بین کلیه اثرات ساده و متقابل تیمارها برای متغیرهای پاسخ درصد جداسازی و شار، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود دارد. با کاهش جریان حجمی و غلظت املاح و افزایش دما، ولتاژ و فشار، درصد جداسازی و شار خروجی افزایش معنی‌داری نشان دادند. نتایج مدل‌سازی با شبکه عصبی GMDH نیز در مرحله آموزش، دقت پیش‌بینی درصد جداسازی ($R^2=0/90$ ، $MBE=-0/16$ و $RMSE=7/48$) و میزان شار خروجی ($R^2=0/79$ ، $MBE=0/01$ و $RMSE=0/08$) را نشان داد. همین شاخص‌ها در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب $0/85$ ، -3 و $9/37$ برای درصد جداسازی و $0/78$ ، $-0/08$ و $0/07$ برای میزان شار خروجی هستند. تطابق داده‌های هدف و خروجی، نزدیکی مقادیر هدف و خروجی به نمودار $y=x$ ، تخطی کم مقادیر خطا از مقدار صفر و نزدیکی توزیع (هیستوگرام) خطا به توزیع نرمال، حاصل شدند.

نتایج: پس از مشخص شدن اختلاف بسیار معنی‌دار کلیه اثرات ساده و متقابل تیمارها برای متغیرهای پاسخ، مقایسه میانگین‌ها صورت گرفت. بیشتر بودن هر دو متغیر پاسخ درصد جداسازی و شار خروجی، ایده‌آل هست. لذا نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد بهترین سطح جریان حجمی برابر با ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه، غلظت جریان ورودی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، ولتاژ ورودی ۳۰ ولت و فشار ۸۰۰ پاسکال، منجر به بیشترین درصد جداسازی و شار خروجی می‌شوند. ضمن این‌که با کاهش جریان حجمی و غلظت املاح، و افزایش دما، ولتاژ و فشار، درصد جداسازی و شار خروجی افزایش معنی‌داری نشان دادند. همچنین با توجه به شاخص‌های آماری برای کل داده‌ها، همبستگی مناسب، اندکی کم‌برآورد و خطای اندک به دست آمد. بنابراین استفاده از طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی GMDH، در مدل‌سازی نمک‌زدایی از آب لب‌شور با استفاده از فرآیند الکترودیالیز، کارایی مناسبی دارد.

کلیدواژه‌ها: پایداری، روش‌های داده‌مینا، شوری آب، غشای تبادل یونی



نمک‌زدایی الکترودیالیز استفاده می‌شود و این سامانه به انرژی خارجی نیاز نخواهد داشت.

اما کاربرد EFD علاوه بر نیاز به آزمایشگاه‌های مجهز با صرف وقت و هزینه فراوان، برای استفاده صنعتی نیاز به افزایش مقیاس دارد. لذا یکی از روش‌های بررسی نمک‌زدایی از آب شور و لب‌شور به روش الکترودیالیز، استفاده از روش‌های مدل‌سازی می‌باشد که امکان بررسی و تحلیل کم‌هزینه این سیستم‌ها و هم‌چنین پیش‌بینی رفتارها و الگوهای فرآیندی این سیستم‌ها را فراهم می‌کند. مدل‌سازی با استفاده از دینامیک سیالات تحلیلی (AFD)، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و روش‌های داده‌کاوی انجام می‌شود. روش AFD تحت شرایط خاص و محدود، جواب تحلیلی سامانه را ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی CFD از حل همزمان معادلات پیوستگی، انتقال مومنتوم (ناویر-استوکس و برینکمن) و انتقال جرم (نرنست-پلانک) توسط ابزارهایی نظیر نرم‌افزار COMSOL انجام می‌شود. روش‌های داده‌کاوی و طراحی آزمایش‌ها نیز تأثیر پارامترهایی نظیر دما، غلظت خوراک، ولتاژ و فشار را بر جداسازی مطالعه می‌کنند. در پژوهشی برای بررسی تأثیر پارامترهای میزان جریان (در ۵ سطح از ۰/۰۵ تا ۱ میلی‌لیتر بر ثانیه)، غلظت خوراک (در ۳ سطح از ۲ تا ۸ ولت)، دمای واکنش (در ۶ سطح از ۲۰ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد) و ولتاژ اعمال شده (در ۳ سطح از ۰/۰۵ تا ۱ میلی‌لیتر بر ثانیه) در جداسازی محلول NaCl توسط الکترودیالیز، از شبکه‌های عصبی استفاده شد. آنها نتیجه گرفتند در دما و ولتاژ زیادتر، شبکه‌های عصبی عملکردهای جداسازی بیشتری نشان می‌دهند (Jing et al., 2012). در پژوهشی دیگر، عوامل مؤثر برای بهینه‌سازی طراحی و شرایط عملیاتی سامانه‌های الکترودیالیز برای نمک‌زدایی از آب لب‌شور و شور مطالعه گردید. در این مطالعه، از نظر اقتصادی تأثیر و به‌گزینی عواملی هم‌چون اندازه سامانه، طول و عرض کانال‌های جریان و سرعت جریان بر هزینه مصرفی مطالعه گردید (Chehayeb et al., 2017).

یکی از راه‌های مقابله با کمبود آب، نمک‌زدایی از آب شور و لب‌شور است. بدین منظور، روش‌های حرارتی (نظیر تبخیر و کریستال کردن)، تجدیدپذیر (نظیر انرژی خورشیدی و انرژی بادی) و غیرحرارتی (نظیر تقطیر غشایی، تبادل یونی و فرآیندهای غشایی) وجود دارد (Amshawee et al., 2020). فن‌آوری الکترودیالیز در کنار روش‌های اسمز معکوس و فیلتراسیون، از جمله فرآیندهای غشایی در این حوزه می‌باشد. در روش‌های غشایی از خواص منحصربه‌فرد غشا نظیر خاصیت گزینش یون و یا عبوردهی مولکول‌های آب و دفع ذرات نمک استفاده می‌شود. فن‌آوری الکترودیالیز علاوه بر نمک‌زدایی از آب شور و لب‌شور، قادر به تصفیه پساب صنعتی و خانگی و تولید آب‌های مختلف آشامیدنی و صنعتی می‌باشد. الکترودیالیز با داشتن مزایایی نظیر عدم تغییر فاز، عدم واکنش شیمیایی، مصرف کم انرژی، بهره‌برداری آسان، عمر طولانی غشا، عدم نیاز به پیش‌تصفیه و پس‌تصفیه، کارایی در دمای بالا و نرخ زیاد حذف نمک، روشی مطلوب در مقایسه با دیگر روش‌های سنتی مانند روش‌های گرمایی به حساب می‌آید. البته هدر رفت انرژی و هزینه زیاد نیز در این روش به‌عنوان نقاط ضعف مطرح است (Zhao et al., 2019).

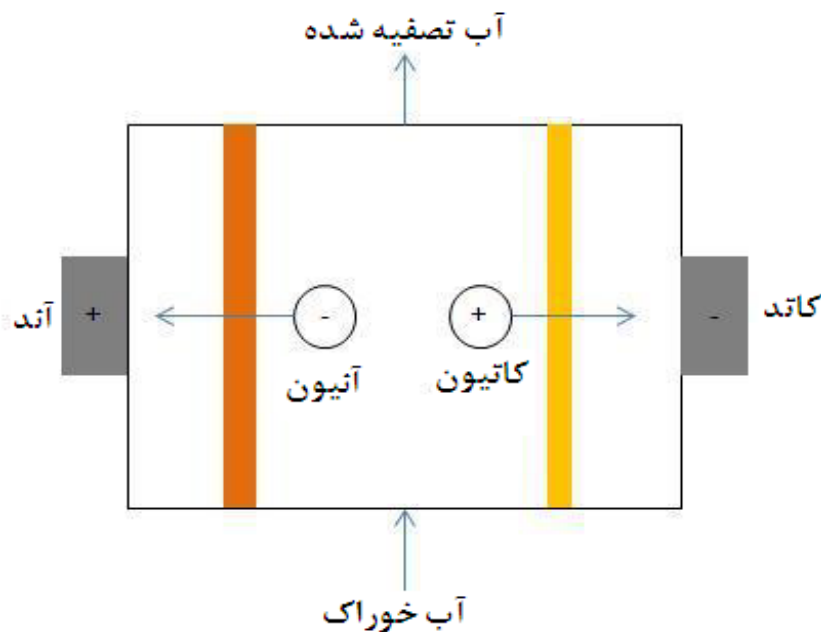
تحقیقات زیادی درباره نمک‌زدایی از آب شور و لب‌شور به روش الکترودیالیز انجام شده است. این تحقیقات را می‌توان به دو گروه تجربی و مدل‌سازی تقسیم نمود. در کاربرد روش‌های تجربی، می‌توان از دینامیک سیالات آزمایشگاهی (EFD) بهره گرفت. لاسروا و همکاران (۲۰۱۹) شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی (میزان صرفه‌جویی در هزینه) دو سامانه الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس به‌عنوان فرآیندهای پیش‌آوری در ترکیب با اسمز معکوس را بررسی کرده و کاهش انرژی مصرفی اسمز معکوس را گزارش نمودند. می و همکاران (۲۰۲۰) ترکیب سامانه ED-EDR (الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس) را بررسی و گزارش کردند انرژی تولیدی در سیستم EDR در

مواد و روش‌ها

فرآیند الکترودیالیز

الکترودیالیز یکی از فرآیندهای غشایی می‌باشد که برای تصفیه آب شور و لب‌شور استفاده می‌شود و برای اولین بار در سال ۱۸۹۰ توسط مایگروت و سابتیس پیشنهاد شد. در این فرآیند از جریان الکتریکی مستقیم به‌منظور حذف نمک‌ها و یون‌ها از طریق غشاهای انتخاب‌پذیر آنیونی و کاتیونی استفاده می‌شود. در الکترودیالیز، محلول خوراک از محفظه‌ای بسته بین غشاهای تبادل یونی عبور داده می‌شود. به فاصله‌ی دو غشای مجاور یک سلول گفته می‌شود. ضخامت غشاها در حدود ۰/۵ میلی‌متر بوده که به‌وسیله فضاهای متخلخلی با عرض حدود یک میلی‌متر از یکدیگر جدا شده‌اند. به دو طرف این محفظه، یک میدان الکتریکی اعمال می‌شود. یون‌های موجود در محلول، تحت نیروی میدان الکتریکی به سمت الکترودها کشیده می‌شوند. سر راه آنیون‌ها و کاتیون‌ها به سمت الکترودها، به‌ترتیب از غشاهای تبادل آنیونی و تبادل کاتیونی استفاده می‌شود. بنابراین یون‌ها با

طراحی، ساخت و بهره‌برداری از واحدهای الکترودیالیز، نیاز به شناخت کافی و امکان پیش‌بینی رفتار جداسازی در این واحدها دارد. با توجه به وسعت کاربری این فن‌آوری، آگاهی از سازوکارهای جداسازی و امکان پیش‌بینی رفتار فرآیندهای مختلف، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در این نوع فن‌آوری می‌باشد. نوع یون‌های موجود در آب شور و لب‌شور، غلظت این یون‌ها، میزان تصفیه مورد نظر، شدت ولتاژ، سرعت جریان خوراک، عملکرد و نوع غشاها، دما و دیگر پارامترها اثر زیادی در عملکرد این فرآیند دارند که لازم است رفتار منفرد و توأم این پارامترها شناسایی و امکان پیش‌بینی رفتار آن‌ها فراهم شود. لذا هدف از این تحقیق، درک بهتر فرآیند الکترودیالیز با استفاده از اصول طراحی آزمایش‌ها و ارزیابی دقت و صحت روش شبکه عصبی GMDH، در تخمین درصد جداسازی و میزان شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور است. این مهم کمک شایانی به کاهش هزینه این فرآیندها و همچنین توان انتخاب و بکارگیری این فرآیند در صنایع مختلف خواهد نمود.



شکل ۱. شماتیک جداسازی در فرآیند الکترودیالیز

$$G(X_i, X_j) = a_0 + a_1X_i + a_2X_j + a_3X_i^2 + a_4X_j^2 + a_5X_iX_j \quad (1)$$

که در این رابطه G تابع تبدیل، x پارامترهای ورودی و a ضرایب مجهول معادله می‌باشند. شبکه‌های عصبی GMDH جلوه‌ای از الگوریتم GMDH می‌باشند که به فرم و سبک ساختار شبکه‌ای بیان شده‌اند. به‌طور کلی به کار بردن شبکه‌ها در این الگوریتم، باعث ساده‌تر و منطقی شدن و تحلیل مدل‌ها و یا توابع جزئی به روش‌های گوناگون شده که این امر منجر به تنوع در انتخاب مدل بهینه در راستای کاهش میزان خطای مدل و نیز حجم و محتوای تابع ریاضی مدل می‌شود. شبکه عصبی GMDH متشکل از تعدادی نرون می‌باشد که نرون‌های هر لایه به‌صورت غیرخطی با یکدیگر ترکیب شده و نرون‌های جدیدی را تولید می‌نمایند که این نرون‌های جدید، لایه بعدی مدل را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش، پارامترهای ورودی‌های مدل، نرون‌های لایه اول را تشکیل می‌دهند و خروجی مدل (نرون لایه آخر) مقادیر درصد جداسازی و میزان شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور بودند. دستگاه معادله ایجاد شده با استفاده از نرم‌افزار Matlab و کد شبکه عصبی نوع GMDH حل شد. در این پژوهش در طراحی شبکه عصبی GMDH، از طراحی تکاملی ساختار شبکه عصبی ED توسط الگوریتم ژنتیک برای هم‌گرایی شبکه‌های عصبی استفاده شد. در روش طراحی تکاملی، محدودیت ناشی از قرار دادن خطا به‌عنوان معیار تعیین ساختار شبکه برداشته می‌شود و برای تمام نرون‌ها شانس یکسانی برای مشارکت در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌سازی درصد جداسازی و شار با طرح فاکتوریل کامل و

شبکه عصبی GMDH

در این پژوهش، متغیرهای ورودی شامل مقادیر جریان حجمی (F) در شش سطح ۱، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌لیتر در دقیقه، غلظت املاح (C) در سه سطح ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، دما (T) در سه سطح ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، ولتاژ (V) در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت و فشار (P) در سه سطح ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ پاسکال از مرجع

عبور از این غشاها از محفظه‌ی خوراک جدا شده و خوراک، عاری از یون می‌شود. بر اساس خاصیت انتخابی غشاها در دستگاه الکترودیالیز از یون‌های بعضی از سلول‌ها کاسته شده (آب تصفیه شده)، ولی در سلول مجاور به یون‌های آب خام افزوده می‌شود و محلول غلیظی از یون‌ها حاصل می‌شود (فاضلاب). از آنجا که ضریب هدایت الکتریکی آب شور به ازای افزایش هر درجه سانتی‌گراد دما، حدود ۲-۳٪ افزایش می‌یابد، در نتیجه مقاومت و توان مصرفی در این فناوری کاهش می‌یابد. همچنین مقدار بهینه جریان در دماهای بالاتر افزایش یافته و باعث کاهش سرمایه‌گذاری اولیه و جاری می‌شود. لذا الکترودیالیز در دماهای بیشتر، کاراتر می‌باشد (Ho and Sirkar, 2012). این فن‌آوری در بسیاری از صنایع برای تصفیه آب شور و لب‌شور و یا بازیابی یون‌های با ارزش مورد استفاده قرار می‌گیرد. شماتیک ساده‌ای از این فن‌آوری در شکل ۱ نشان داده شده است.

شبکه عصبی GMDH

روش دسته‌بندی گروهی داده‌های عددی (Group Method of Data Handling, GMDH)، یک فرآیند منظم برای غلبه بر ضعف‌های آماری و شبکه‌های عصبی می‌باشد (Ivakhnenko and Ivakhnenko, 1995). در الگوریتم GMDH اطلاعات مستقیماً از داده‌های ورودی به دست می‌آید. به‌طوری که ساختار مدل شامل متغیرهای مؤثر ورودی، تعداد لایه‌ها و نرون‌های لایه‌های پنهان و ضرایب بهینه مدل به‌صورت خودکار بر اساس حداقل‌سازی یک معیار خارجی (برای نمونه شاخص‌های آماری) در حین کامل‌شدن ساختار تعیین می‌شوند. به‌طور کلی الگوریتم GMDH را از دو دیدگاه مبنای ریاضی و تئوری و تحلیل مدل‌سازی سیستم مورد بحث و بررسی قرار می‌دهند. مبنای ریاضی الگوریتم GMDH بر اساس تجزیه سری توابع ولترا (یک سری برای شبیه‌سازی یک سیستم غیرخطی حافظه‌دار) به چند جمله‌ای‌های دو متغیره درجه دوم پایه‌ریزی شده است.

(RMSE)، میانگین خطای اریبی (Mean Bias Error, MBE) و ضریب تبیین (R^2) (Coefficient of Determination) به ترتیب برای بررسی مقادیر خطای برآورد، کم یا بیش برآورد و همبستگی بر اساس روابط (۲) تا (۴) بررسی شد.

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{k=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{k=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{k=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \right)^2 \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i}{n} \quad (4)$$

در روابط (۲) تا (۴)، P_i و O_i به ترتیب درصد جداسازی و شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده و \bar{P} و \bar{O} به ترتیب میانگین درصد جداسازی و شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در نمونه‌های مختلف و n تعداد مشاهدات می‌باشد. بر اساس رابطه (۴)، مقادیر منفی و مثبت معیار MBE به ترتیب نشان‌دهنده کم برآورد و بیش برآورد در نتایج مدل می‌باشد. ضریب تبیین، مربع ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد و نسبت واریانس کل در داده‌های مشاهده‌ای به داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل را توصیف می‌کند. این شاخص از صفر تا یک تغییر می‌کند. مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده تطابق بهتر داده‌های شبیه‌سازی شده می‌باشد. همچنین شاخص RMSE نیز باید به صفر نزدیک باشد تا تخمین مناسبی صورت گیرد. لذا بهترین مقادیر معیارهای RMSE، MBE و R^2 در صورت برابر بودن مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به ترتیب برابر صفر، صفر و یک می‌باشد (Akbari et al., 2018).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه رگرسیون خطی با طرح آزمایشی فاکتوریل کامل نتایج جدول تجزیه رگرسیون خطی نشان داد بین کلیه اثرات ساده و متقابل دوگانه، سه‌گانه، چهارگانه و پنج‌گانه تیمارها برای متغیرهای پاسخ درصد جداسازی و شار، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود دارد (جدول ۱).

(Al-Amshawee et al., 2020) استخراج گردید. متغیرهای خروجی نیز شامل مقادیر درصد جداسازی و شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور لحاظ شدند. در این مطالعه، از سدیم کلرید (NaCl) با خلوص بیش از ۹۹ درصد برای تهیه محلول‌های نمکی استفاده شده است. کلریدهای آهن، اسید هیدروکلریدریک و پتاسیم هگزامتاسیانوفرات از شرکت مرک برای تهیه محلول‌های الکترودی استفاده شده‌اند. محلول‌سازی‌ها با استفاده از آب یون‌زدایی شده با فرایند اسمز معکوس انجام گرفته است. در گام بعد به‌منظور مدل‌سازی خروجی سلول الکترودیالیز، از شبکه عصبی GMDH استفاده شد. پس از تعیین متغیرهای ورودی، تصادفی‌سازی، نرمال‌سازی و تقسیم‌بندی متغیرهای ورودی و خروجی انجام شد. برای مدل‌سازی، ۹۰ درصد داده‌ها (۴۳۷ نمونه) به‌طور تصادفی به‌منظور آموزش و ۱۰ درصد داده‌ها (۴۹ نمونه) برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد.

از طرفی با توجه به دارا بودن سطوح مشخص برای هر یک از ورودی‌ها، امکان استفاده از طرح آزمایشی فاکتوریل کامل نیز فراهم بود. در واقع ورودی‌ها یا ویژگی‌ها از دیدگاه مدل‌سازی (با شبکه عصبی GMDH)، همان فاکتورها یا تیمارها از دیدگاه طرح آزمایش‌ها (با طرح آزمایشی فاکتوریل کامل) بودند. همچنین خروجی‌ها از دیدگاه مدل‌سازی، همان صفات یا متغیرهای پاسخ از دیدگاه طرح آزمایش‌ها بودند. با این توضیحات، تجزیه و تحلیل آماری (رگرسیون خطی) داده‌های حاصل از اطلاعات تجربی، با استفاده از برنامه آماری SAS نسخه ۹/۳ انجام شد (SAS, 2013). مقایسه میانگین صفات مورد نظر نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد صورت پذیرفت.

معیارهای ارزیابی

دقت پیش‌بینی درصد جداسازی و شار خروجی سلول الکترودیالیز آب لب‌شور با توجه به سه معیار آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Squared Error,)

جدول ۱. نتایج تجزیه رگرسیون خطی درصد جداسازی و شار

شار	درصد جداسازی	درجه آزادی	منبع تغییر
۱/۷۹۶**	۳۹۸۵۲/۶۲**	۵	F
۰/۳۱۸**	۵۳۴۴/۰۵**	۲	C
۰/۷۹۳**	۱۲۹۴۲/۵۲**	۲	T
۰/۰۵۷**	۱۳۲۳/۱۳**	۲	V
۰/۰۸۷**	۱۴۹۷/۵۷**	۲	P
۰/۰۳۵**	۲۹۱/۴۴**	۱۰	F×C
۰/۰۷**	۸۱۶/۹۶**	۱۰	F×T
۰/۰۱۲**	۱۲۴/۳۲**	۱۰	F×V
۰/۰۱**	۷۵/۴۵**	۱۰	F×P
۰/۰۵۲**	۹۱۴/۵۳**	۴	C×T
۰/۰۲۶**	۴۰۷/۵۸**	۴	C×V
۰/۰۰۴۹**	۴۵/۸۲**	۴	C×P
۰/۰۲۷**	۳۸۸/۰۶**	۴	T×V
۰/۰۱۹**	۲۰۲/۹۹**	۴	T×P
۰/۰۰۴**	۱۲/۱**	۴	V×P
۰/۰۰۵۱**	۴۷/۴۳**	۲۰	F×C×T
۰/۰۰۵۲**	۲۳/۸**	۲۰	F×C×V
۰/۰۰۵۲**	۳/۲۳**	۲۰	F×C×P
۰/۰۰۳۳**	۲۴/۷۵**	۲۰	F×T×V
۰/۰۰۳۹**	۱۱/۸۳**	۲۰	F×T×P
۰/۰۰۴۱**	۴/۸**	۲۰	F×V×P
۰/۰۱۶۳**	۲۶۹/۸۸**	۸	C×T×V
۰/۰۰۸۴**	۶۵/۲۴**	۸	C×T×P
۰/۰۰۵۱**	۱۰/۶۷**	۸	C×V×P
۰/۰۰۶۸**	۲۷/۶۴**	۸	T×V×P
۰/۰۰۴۶**	۱۷/۵۳**	۴۰	F×C×T×V
۰/۰۰۴۲**	۷/۳۵**	۴۰	F×C×T×P
۰/۰۰۲۳**	۲/۹۸**	۴۰	F×C×V×P
۰/۰۰۴۳**	۴/۳۶**	۴۰	F×T×V×P
۰/۰۰۳۹**	۱۶/۹۲**	۱۶	C×T×V×P
۰/۰۰۲۷**	۴/۱۳**	۸۰	F×C×T×V×P

^{n,s}، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح کمتر از ۵ و ۱ درصد ورودی‌های آزمایش شامل؛ جریان حجمی آب (F)، غلظت (C)، دما (T)، ولتاژ (V) و فشار (P) می‌باشند.

مقادیر درصد جداسازی به ترتیب برابر با ۶۰/۶۴، ۶۰/۶۵ و ۵۸/۹۳ درصد گزارش گردید. نتایج تیمار غلظت نشان داد با افزایش غلظت جریان ورودی، مقادیر درصد جداسازی

نتایج مقایسه میانگین‌ها برای درصد جداسازی (جدول ۲) نشان داد که در تیمار جریان حجمی، تفاوت معنی‌داری بین سطوح ۱، ۲/۵ و ۵ میلی‌لیتر بر دقیقه مشاهده نشد و

به‌شدت کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که با افزایش ۲/۵ برابری غلظت جریان ورودی (از ۲۰۰ به ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، درصد جداسازی حدود ۱۳/۷۹ درصد کاهش یافت. بنابراین بهترین غلظت جریان ورودی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش گردید و در چنین شرایطی ۷۰/۸۸ درصد جداسازی رخ خواهد داد. با افزایش دما، درصد جداسازی افزایش معنی‌داری نشان داد. بیشترین درصد جداسازی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (۵۴/۹۳ درصد). با افزایش ولتاژ جریان الکتریسیته، درصد جداسازی افزایش یافت. هر چند این افزایش در ولتاژهای ۲۰ تا ۳۰ ولت

تأثیر معنی‌داری بر درصد جداسازی نداشت. با افزایش ولتاژ ورودی از ۱۰ به ۳۰ ولت، تنها ۶/۱۴ درصد به مقدار درصد جداسازی مواد اضافه شد که با توجه به ارزش ریالی بهای برق، این مقدار قابل چشم‌پوشی خواهد بود. این نتایج در رابطه با تیمار فشار جریان ورودی قابل مشاهده بود. بر همین اساس با افزایش ۴ برابری فشار جریان ورودی (از ۲۰۰ به ۸۰۰ پاسکال) تنها ۴۷/۸۷ درصد مواد قابل جداسازی بودند که افزایش ۶/۰۸ درصدی را نشان داد.

جدول ۲. نتایج مقایسه میانگین‌های درصد جداسازی و شار

تیمارها	سطح	درصد جداسازی (%)			شار (kg m ⁻² h ⁻¹)		
		کمینه	بیشینه	میانگین	کمینه	بیشینه	میانگین
F	۱	۳۵/۶۶	۹۷/۲۳	۶۰/۶۵ a	۰/۱۹۶	۰/۶۵۲	۰/۴۱۸ a
	۲/۵	۳۵/۳۵	۹۱/۰۲	۶۰/۶۴ a	۰/۰۳۱	۰/۶۸۹	۰/۳۹۶ ab
	۵	۳۷/۰۲	۹۰/۳۳	۵۸/۹۳ ab	۰/۱۶۵	۰/۶۲۳	۰/۳۵ b
	۱۰	۳۱/۲۱	۸۴/۱۶	۵۴/۳۹ b	۰/۱۷۵	۰/۵۷۱	۰/۲۸۵ c
	۱۵	۱۶/۲۷	۳۵/۸۵	۲۵/۰۵ c	۰/۰۱۲	۰/۰۸۹	۰/۱۴۸ d
C	۲۰	۵/۹۶	۱۲/۴۵	۹/۰۷ d	۰/۰۲	۰/۲۲	۰/۰۴۲ e
	۲۰۰	۲۱/۲	۹۷/۲۳	۷۰/۸۸ a	۰/۰۲۱	۰/۶۸۹	۰/۳۲۲ a
	۵۰۰	۱۸/۸۸	۸۵/۶۳	۵۷/۰۹ b	۰/۰۲	۰/۸۵۹	۰/۲۶۳ b
T	۱۰۰۰	۵/۹۶	۸۱/۰۲	۵۳/۹۷ b	۰/۰۱۲	۰/۸۹۹	۰/۲۳۵ c
	۵۰	۵/۹۶	۸۵/۲۵	۳۷/۰۸ c	۰/۰۲	۰/۵۸۴	۰/۲۱۸ c
V	۶۰	۷/۰۶	۸۳/۱۷	۴۱/۳۵ b	۰/۰۱۲	۰/۸۹۹	۰/۲۵ bc
	۷۰	۷/۷۷	۹۷/۲۳	۵۴/۹۳ a	۰/۰۲۳	۰/۶۸۹	۰/۳۵۴ a
	۱۰	۷/۱	۸۵/۶۳	۴۲/۷۱ b	۰/۰۲	۰/۸۵۹	۰/۲۵۸ b
P	۲۰	۶/۱۲	۸۳/۳۲	۴۳/۱۳ ab	۰/۰۱۲	۰/۸۹۹	۰/۲۶۸ b
	۳۰	۶/۳۹	۹۷/۲۴	۴۸/۸۳ a	۰/۰۱۴	۰/۶۸۹	۰/۲۹۴ ab
P	۲۰۰	۶/۳۹	۸۱/۲۹	۴۱/۷۹ b	۰/۰۲	۰/۸۹۹	۰/۲۵۱ b
	۴۰۰	۵/۹۶	۹۱/۳۸	۴۴/۹۳ ab	۰/۰۲	۰/۸۵۹	۰/۲۷۴ ab
	۸۰۰	۶/۱۹	۹۷/۲۳	۴۷/۸۷ a	۰/۰۱۲۶	۰/۶۸۹	۰/۲۹۴ a

ورودی‌های آزمایش شامل؛ جریان حجمی آب (F)، غلظت (C)، دما (T)، ولتاژ (V) و فشار (P) می‌باشند میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، در سطح احتمال پنج درصد از نظر آماری تفاوت معنی‌داری ندارند

گردید. با افزایش ولتاژ جریان الکتریسیته، میزان شار خروجی افزایش یافت. هر چند این افزایش در ولتاژهای ۲۰ تا ۳۰ ولت اختلاف معنی‌داری در ولتاژ نداشت. با افزایش ولتاژ ورودی از ۱۰ به ۳۰ ولت تنها ۱۲/۲۴ درصد به مقدار شار خروجی آب اضافه شد که با توجه به ارزش ریالی بهای برق این مقدار قابل چشم‌پوشی خواهد بود. این نتایج در رابطه با تیمار فشار جریان ورودی (پاسکال) نیز قابل مشاهده بود. بر همین اساس با افزایش ۴ برابری فشار جریان ورودی (از ۲۰۰ به ۸۰۰ پاسکال) میزان شار خروجی تنها ۰/۴۳ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت افزایش یافت که افزایش ۱۴/۶۲ درصدی را در پی داشت.

نتایج مدل‌سازی درصد جداسازی با شبکه عصبی GMDH
مقادیر آماره‌های R^2 ، RMSE و MBE مدل GMDH در مراحل آموزش، آزمون و کل برای مدل‌سازی درصد جداسازی در جدول ۳ ارائه شده است.

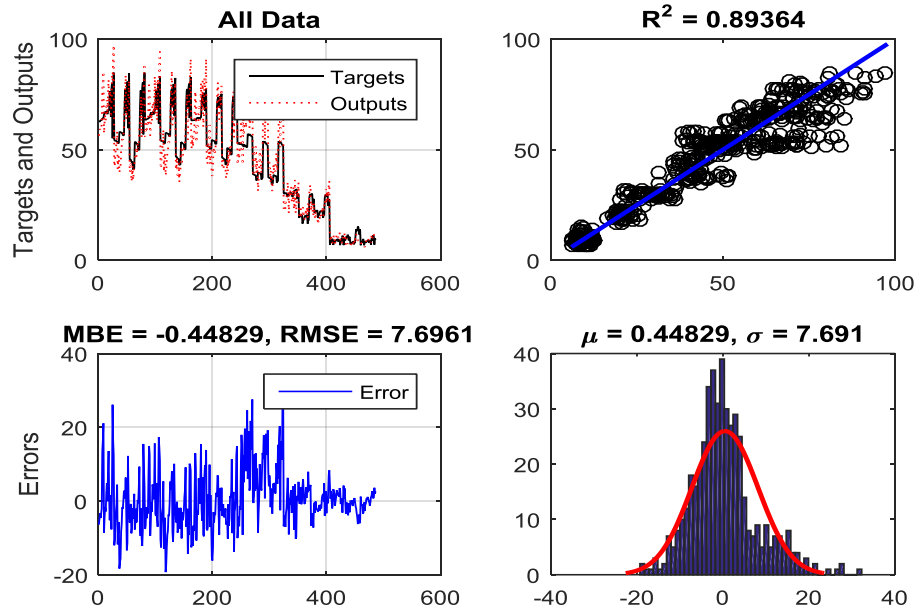
جدول ۳. نتایج مدل GMDH برای مدل‌سازی درصد جداسازی

R^2		RMSE		MBE	
All	Train Test	All	Train Test	All	Train Test
0.89	0.90	0.85	7.70	7.48	9.37
-0.45	-0.16	-3			

هرچه آماره‌های خطا به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده خطای کمتر مدل نسبت به واقعیت بوده و افزایش ضریب تبیین نشان از کاهش خطا و منطبق بودن مدل بر واقعیت بیرونی است. ضریب تبیین، میانگین خطای اریبی و ریشه میانگین مربعات خطا برای کل داده‌ها به ترتیب برابر با ۰/۸۹، ۰/۴۵- و ۷/۷۰ است که نشان‌دهنده همبستگی مناسب، اندکی کم برآورد و خطای اندک بود. به‌عنوان نمونه در شکل ۲ مقادیر درصد جداسازی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل GMDH برای کل داده‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، تطابق داده‌های هدف و خروجی، نزدیکی مقادیر هدف و خروجی به نمودار $y=x$ ، تخطی کم مقادیر خطا از مقدار صفر و نزدیکی توزیع (هیستوگرام) خطا به توزیع نرمال، در این شکل قابل مشاهده است.

در جریان حجمی آب کمتر، میزان جداسازی بیشتر است. چراکه با افزایش جریان حجمی آب، سرعت حرکت سیال افزایش و زمان ماند و نمک محلول در آن کاهش می‌یابد و نمک‌ها فرصت کافی برای عبور از غشا پیدا نمی‌کنند. با افزایش غلظت، هدایت‌پذیری خوراک افزایش یافته و مقاومت آن در مقابل عبور جریان کاهش می‌یابد. لذا اختلاف بین هدایت‌پذیری محصول با هدایت‌پذیری خوراک افزایش یافته و تعداد یون‌های عبوری افزایش می‌یابد. در نتیجه نمک‌ها تحت تأثیر شدت جریان بیشتری قرار گرفته و راحت‌تر از غشا عبور می‌کنند؛ اما درصد جداسازی و راندمان (تعداد یون‌های عبوری به تعداد کل یون‌ها) کاهش می‌یابد. افزایش دما باعث بهبود عملکرد سامانه و افزایش میزان جداسازی می‌شود. چرا که ضریب هدایت الکتریکی آب شور به‌طور خطی با افزایش دما افزایش می‌یابد و مقاومت و توان مصرفی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ولتاژ به خاطر افزایش تعداد یون عبوری از غشا در واحد سطح، باعث افزایش معنی‌دار درصد جداسازی می‌شود. در نهایت با افزایش فشار، درصد جداسازی افزایش معنی‌دار دارد. زیرا در این شرایط، مقاومت مخلول‌ها کمتر است.

نتایج مقایسه میانگین‌های شار خروجی (جدول ۲) نشان داد که در تیمار جریان حجمی، تفاوت معنی‌داری بین سطوح ۱ و ۲/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه مشاهده نشد و مقادیر شار برابر با ۰/۴۱۸ و ۰/۳۹۶ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت گزارش گردید. نتایج تیمار غلظت نشان داد که با افزایش غلظت جریان ورودی، مقادیر شار خروجی به‌شدت کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که با افزایش ۲/۵ برابری غلظت جریان ورودی (از ۲۰۰ به ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، میزان شار خروجی حدود ۲۷/۰۱ درصد کاهش یافت. بنابراین بهترین غلظت جریان ورودی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش گردید و در چنین شرایطی میزان شار خروجی ۰/۳۲۲ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت خواهد بود. از طرف دیگر نتایج آزمایش تجربی تأیید کردند که با افزایش دما، میزان شار خروجی کاهش معنی‌داری نشان داد. بیشترین شار خروجی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (۰/۳۵۴ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت). با افزایش دما از ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ۷۰ درجه سانتی‌گراد منجر به افزایش ۳۸/۴۱ درصدی در شار خروجی



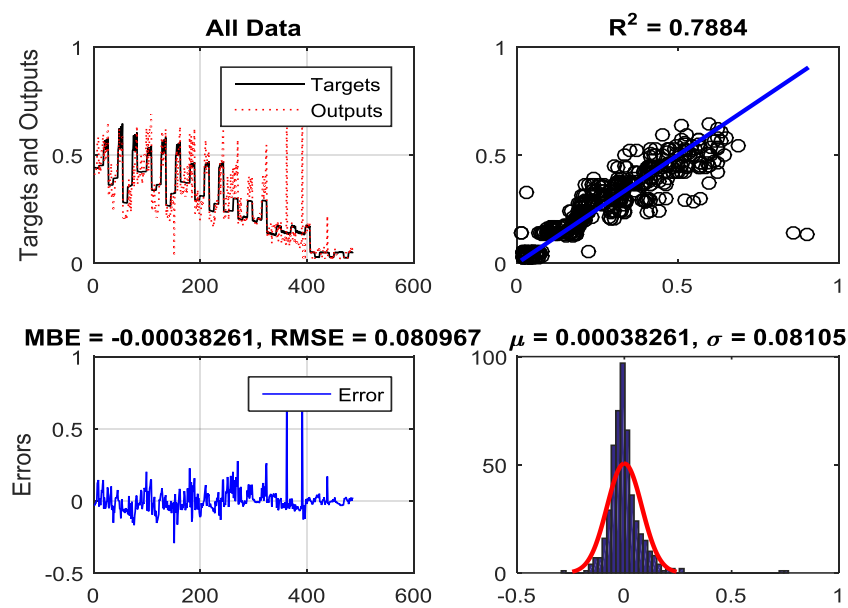
شکل ۲. مقادیر و توزیع خطاها در برآورد مقادیر درصد جداسازی توسط مدل GMDH برای کل داده‌ها

خطای اندک بود. به‌عنوان نمونه در شکل ۳ مقادیر شار خروجی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل GMDH برای کل داده‌ها نشان داده شده است.

نتایج مدلسازی شار خروجی با شبکه عصبی GMDH مقادیر آماره‌های R^2 , RMSE و MBE مدل GMDH در مراحل آموزش، آزمون و کل برای مدلسازی شار خروجی در جدول ۴ ارائه شده است. ضریب تبیین، میانگین خطای اربیبی و ریشه میانگین مربعات خطا برای کل داده‌ها به ترتیب برابر با ۰/۷۹، ۰/۰۰۰۴- و ۰/۰۸ است که نشان‌دهنده همبستگی مناسب، اندکی کم برآورد و

جدول ۴. نتایج مدل GMDH برای مدلسازی شار خروجی

R^2			RMSE			MBE		
All	Train	Test	All	Train	Test	All	Train	Test
0.79	0.79	0.78	0.08	0.08	0.07	-0.0004	0.001	-0.008



شکل ۳. مقادیر و توزیع خطاها در برآورد مقادیر شار خروجی توسط مدل GMDH برای کل داده‌ها

نتیجه گیری

نگارندگان این تحقیق در حال کاربرد بهینه‌سازی طرح آزمایش‌ها به منظور اعمال رویکرد پیوسته به سطوح هر یک از فاکتورها هستند. به عبارت دیگر، با برازش منحنی می‌توان سطوحی از هر فاکتور را به‌عنوان بهینه گزارش نمود که جزو سطوح اولیه آزمایش شده نباشند. همچنین با توجه به ضریب تبیین، میانگین خطای اریبی و ریشه میانگین مربعات خطا برای کل داده‌ها، همبستگی مناسب، اندکی کم‌برآورد و خطای اندک به دست آمد. در مجموع استفاده از طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی GMDH، در مدل‌سازی نمک‌زدایی از آب لب‌شور با استفاده از فرآیند الکترودیالیز، نتایج مناسبی را نشان داد.

پس از مشخص شدن اختلاف بسیار معنی‌دار کلیه اثرات ساده و متقابل تیمارها برای متغیرهای پاسخ، مقایسه میانگین‌ها صورت گرفت. بیشتر بودن هر دو متغیر پاسخ درصد جداسازی و شار خروجی، ایده‌آل بود. لذا نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد بهترین سطح جریان حجمی برابر با ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه، غلظت جریان ورودی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، ولتاژ ورودی ۳۰ ولت و فشار ۸۰۰ پاسکال، منجر به بیشترین درصد جداسازی و شار خروجی می‌شوند. ضمن این‌که با کاهش جریان حجمی، کاهش غلظت املاح، افزایش دما، افزایش ولتاژ و افزایش فشار، درصد جداسازی و شار خروجی افزایش معنی‌داری نشان دادند.

Reference:

- Akbari, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B. and Shayannejad, M., 2018. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural water management*, 201, pp.46-57.
- Al-Amshawee, S., Yunus, M.Y.B.M., Azoddein, A.A.M., Hassell, D.G., Dakhil, I.H. and Hasan, H.A. 2020. Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal*, 380:122231.
- Chehayeb, K.M., Farhat, D.M. and Nayar, K.G., 2017. Optimal design and operation of electrodialysis for brackish-water desalination and for high-salinity brine concentration. *Desalination*, 420: 167-182.
- Ho, W. and Sirkar, K., 2012. *Membrane handbook*. Springer Science & Business Media.
- Ivakhnenko, A.G. and Ivakhnenko, G.A., 1995. The review of problems solvable by algorithms of the group method of data handling (GMDH). *Pattern Recognition And Image Analysis C/C Of Raspoznavaniye Obrazov I Analiz Izobrazhenii*, 5, pp.527-535.
- Jing, G., Du, W. and Guo, Y. 2012. Studies on prediction of separation percent in electrodialysis process via BP neural networks and improved BP algorithms, *Desalination* 291: 78-93, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.02.002>.
- La Cerva, M., Gurreri, L., Cipollina, A., Tamburini, A., Ciofalo, M. and Micale, G., 2019. Modelling and cost analysis of hybrid systems for seawater desalination: Electromembrane pre-treatments for Reverse Osmosis. *Desalination*, 467: 175-195.
- Mei, Y., Li, X., Yao, Z., Qing, W., Fane, A.G. and Tang, C.Y., 2020. Simulation of an energy self-sufficient electrodialysis desalination stack for salt removal efficiency and fresh water recovery. *Journal of Membrane Science*, 598: 117771.
- SAS Institute. 2013. *The SAS system for Windows Release 9.3*. SAS Institute, Cary NC.
- Zhao, D., Lee, L.Y., Ong, S.L., Chowdhury, P., Siah, K.B. and Ng, H.Y., 2019. Electrodialysis reversal for industrial reverse osmosis brine treatment. *Separation and Purification Technology*, 213: 339-347.



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 12
No. 2 (46)
Winter 2023**

Received:
2022-03-06

Accepted:
2022-05-22

Pages: 1-12



 10.30495/WSRCJ.2022.20322

Modeling of Desalination of Brackish Water with the Electro Dialysis Method, Using the Design of Experiments and the GMDH neural Neural Network

Maryam Sharafi¹ and Mahmood Akbari^{2*}

- 1) M.Sc. of Chemical Engineering, Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Industrial University of Malek Ashtar, Tehran, Iran.
 - 2) Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Water Institute, Arak University, Arak, Iran.
- *Corresponding author email: m-akbarii@araku.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Desalination of saline and brackish water as a relatively permanent resource is a reliable solution to compensate for water shortages. The Electrodialysis process, as one of the desalination methods, separates almost unsalted water from saline water and is becoming a solution for water scarcity all over the world worldwide. Modeling methods allow provide the study of desalination of saline and brackish water by the Electro Dialysisdialysis, as well as predicting the behaviors and process patterns of these systems. The purpose of this study is to model the Electrodialysis process by Design of Experiments and to evaluateing the GMDH neural network method in estimating the separation percentage and the output flux of the brackish water Electrodialysis cell.

Method: The volumetric flow values in six levels (1, 2.5, 5, 10, 15, and 20 mL min⁻¹), solute concentration in three levels (200, 500, and 1000 mg L⁻¹), temperature in three levels (50 , 60, and 70°C), voltage at three levels (10, 20, and 30 V) and pressure at three levels (200, 400, and 800 Pa) were extracted. In order to model the effect of each above inputs on the separation percentage and output flux of brackish water Electrodialysis cells, The full factorial design and the GMDH neural network were are used to model the effect of each above inputs on the separation percentage and output flux of brackish water Electrodialysis cells. In modeling the output of the Electrodialysis cell output using the GMDH neural network, after determining the input variables, randomization, normalization and segmentation of input and output variables were performeddone. For modeling, 90% of the data (437 samples) were randomly assigned for training and 10% of the data (49 samples) were are used for validation. On the other hand, due to having specific levels for each of the inputs, it was possible to use a Full Factorial experimental design.

Results: The linear results of statistical regression analysis table results showeshowd that there is a significant difference between all simple and interaction effects of the treatments for the response variable of separation percentage and flux at the one percent level. With decreasing volume flow and solute concentration, and increasing temperature, voltage, and pressure, the separation percentage and output flux showed a significant increase. The results of modeling with the GMDH neural network showed demonstrates that in the training step, the prediction accuracy of separation percentage ($R^2=0.90$, $MBE=-0.16$ and $RMSE=7.48$) and flux ($R^2=0.79$, $MBE=0.001$ and $RMSE=0.08$). These criteria same values in the testing step were are 0.85, -3, and 9.37 for separation percentage and 0.78, -0.008, and 0.07 for flux. Correlation of target and output data, proximity of target and output values to $y = x$ diagram, low transgression of error values from zero value and proximity of error distribution (histogram) to normal distribution were obtained .

Conclusion: After determining the significant differences of all simple and interaction effects of treatments for response variables, the means were compared. It is ideal to Hhaving more separation percentage and output flux response variables was ideal. Therefore, the results of comparing the means showed illustrate that the best volumetric flow level equal to 1 ml / min, input flow concentration of 200 mg / l, temperature of 70 ° C, input voltage of 30 volts and pressure of 800 Pascals, lead to the highest separation percentage and output flux. In addition, with decreasing volumetric flow, and decreasing solute concentration, and increasing temperature, increasing voltage and increasing pressure, separation percentage and output flux showed a significant increaserise. Also, according to the statistical indicators for the whole data, appropriate correlation, slightly underestimation, and small error were are obtained. ThereforeThus, using the Design of Experiments and GMDH neural network has suitable accuracy for modeling desalination of brackish water using the Electrodialysis process.

Keywords: Sustainability, Data-driven methods, Water salinity, Ion exchange membrane