

Experimental Investigation of Brackish-Water Desalination by Directional Solvent Extraction Using Octanoic Acid

Farzad Solbokhi¹, Zoha Azizi^{1*}, Mohsen Rezaeimanesh¹

¹ Department of Chemical Engineering, Mahs.C., Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

*Corresponding author email: zo.azizi@iau.ac.ir; azizi.zoha@gmail.com

Abstract

The thermodynamic limitations and elevated energy consumption associated with conventional desalination technologies have underscored the necessity for innovative methodologies, such as directed solvent extraction (DSE). This study investigates the desalination of brackish water utilizing octanoic acid as a solvent. Critical variables, including initial salt concentration, contact time, and the solvent-to-aqueous phase volume ratio (ranging from 0.5 to 1.5), were analyzed for their impact on extraction efficiency. The results demonstrate that the system approached quasi-equilibrium after 140 minutes, indicating that mass transfer may be predominantly influenced by molecular diffusion resistance. Furthermore, the increase in solvent ratio exhibited a nonlinear relationship with extraction efficiency. The optimal operational configuration was identified at a volume ratio of 0.5, which yielded the highest solvent consumption efficiency index. This research elucidates the mechanisms involved in the DSE process and establishes a framework for the design of energy-efficient desalination systems.

Keywords: Brackish water desalination, Directional solvent extraction, Octanoic acid, Mass transfer, Process optimization

بررسی تجربی نمک‌زدایی از آب لب‌شور به روش استخراج با حلال جهت‌دار با استفاده از اسید اکتانویک

فرزاد صلبوخی^۱، ضحی عزیزی^{۱*}، محسن رضائی منش^۱

(^۱) گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: zo.azizi@iau.ac.ir

چکیده

محدودیت‌های ترمودینامیکی و مصرف بالای انرژی در فناوری‌های متداول نمک‌زدایی، توسعه فرایندهای نوین مبتنی بر استخراج با حلال جهت‌دار (DSE) را ضروری ساخته است. در این پژوهش، نمک‌زدایی از آب لب‌شور با استفاده از حلال اسید اکتانویک به صورت تجربی ارزیابی شد. اثر متغیرهای کلیدی شامل غلظت اولیه نمک، زمان تماس و نسبت حجمی حلال به فاز آبی (در محدوده ۰/۵ الی ۱/۵) بر راندمان استخراج و بهره‌وری مصرف حلال پایش شد. یافته‌ها نشان داد که سیستم پس از ۱۴۰ دقیقه به یک شرایط شبه تعادل رسیده و به نظر می‌رسد انتقال جرم بین‌فازی تحت کنترل مقاومت نفوذ مولکولی است. افزایش نسبت حلال رابطه‌ای غیرخطی با بهبود راندمان نشان داد. نقطه بهینه عملیاتی در نسبت حجمی ۰/۵ حاصل شد که بیشترین شاخص بهره‌وری مصرف حلال را به همراه داشت. این مطالعه با تبیین مکانیسم‌های حاکم در فرآیند DSE، چارچوبی مهندسی برای طراحی و مقیاس‌پذیری سامانه‌های نمک‌زدایی با قابلیت کم مصرف بودن انرژی ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی : نمک‌زدایی آب شور، استخراج با حلال جهت‌دار، اسید اکتانویک، انتقال جرم، بهینه‌سازی فرایند

*. آدرس نویسنده مسئول: ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر، دانشکده معدن، نفت و انرژی، گروه مهندسی شیمی

۱- مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه فعالیت‌های صنعتی و تشدید تنش آبی، نیاز به توسعه فناوری‌های مؤثر و کم‌مصرف برای تولید آب شیرین را افزایش داده است [۵-۱]. در چنین شرایطی، نمک‌زدایی دیگر صرفاً یک گزینه فنی برای بهبود دسترسی به آب نیست، بلکه به‌مثابه یک ضرورت زیرساختی برای پایداری اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی مطرح است [۶]. اگرچه روش‌هایی مانند اسمز معکوس، تقطیر چندمرحله‌ای و تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای در مقیاس صنعتی توسعه یافته‌اند، مصرف انرژی، نیاز به پیش‌تصفیه، حساسیت غشا به گرفتگی و رسوب‌گذاری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، همچنان از چالش‌های مهم این فناوری‌ها به‌شمار می‌روند [۹-۷]. بر همین اساس، توسعه فناوری‌های نمک‌زدایی کم‌انرژی، کارآمد و سازگار با الزامات پایداری، به یکی از محورهای اصلی پژوهش و نوآوری در این حوزه تبدیل شده است [۱۰، ۱۱]. در زمینه به کارگیری غشاها در فرایند نمک‌زدایی، مطالعاتی به فناوری‌های نوین استفاده از غشاهای نانوکانال در هندسه‌های متنوع و انرژی اسمزی نانوسیالی پرداخته‌اند [۲۰-۱۲].

در پاسخ به این ضرورت، طی سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای به فرایندهای جایگزینی معطوف شده است که علاوه بر کاهش بار انرژی، از انعطاف‌پذیری عملیاتی، قابلیت کنترل و ظرفیت بهینه‌سازی بیشتری برخوردار باشند [۶، ۲۱]. در این میان، فناوری‌های مبتنی بر استخراج مایع-مایع به دلیل ماهیت انتخابی جداسازی، امکان تنظیم متغیرهای فرایندی و قابلیت طراحی در پیکربندی‌های متنوع، جایگاه قابل توجهی در میان گزینه‌های نوظهور یافته‌اند [۵، ۲۲]. پیشرفت در این دسته از فرایندها عمدتاً با تمرکز بر بهبود شرایط تماس بین فازها، ارتقای الگوی اختلاط، کنترل رفتار هیدرودینامیکی سامانه و کاهش مقاومت‌های انتقال جرم حاصل شده است [۱۱، ۲۳]. این تحولات نشان داده‌اند که عملکرد سامانه‌های استخراجی تنها تابع ویژگی‌های ترمودینامیکی اجزا نیست، بلکه به‌طور عمیق تحت تأثیر کیفیت برهم‌کنش بین‌فازی و نحوه سازمان‌دهی شرایط عملیاتی قرار دارد [۱۱]. از این منظر، طراحی هدفمند سامانه‌های استخراج می‌تواند زمینه را برای دستیابی به جداسازی مؤثرتر، بهره‌وری بالاتر و مصرف انرژی کمتر فراهم سازد [۲۲، ۲۳].

استخراج با حلال جهت‌دار (DSE^1) یکی از روش‌های نوین نمک‌زدایی است که بر تغییر حلالیت آب در یک حلال آلی در اثر تغییر دما استوار است [۲۴، ۲۵]. در این فرایند، حلال در دمای بالاتر با آب شور تماس داده می‌شود و مقدار مشخصی آب را در خود حل می‌کند، درحالی‌که بخش عمده نمک‌ها و یون‌های محلول در فاز آبی باقی می‌مانند. سپس با کاهش دما، حلالیت آب در فاز آلی کاهش یافته و آب استخراج‌شده از حلال جدا می‌شود. از این‌رو، این روش می‌تواند با استفاده از گرمای اتلاف صنعتی یا منابع حرارتی کم‌دما، جایگزینی برای برخی فرایندهای پرمصرف نمک‌زدایی باشد [۲۶]. افزون بر این، سادگی نسبی بازیابی حلال و قابلیت بالقوه یکپارچه‌سازی فرایند با منابع انرژی اتلافی یا کم‌کیفیت، جایگاه این روش را در میان فناوری‌های کم‌انرژی نمک‌زدایی تقویت کرده است [۲۵]. بنابراین، استخراج با حلال جهت‌دار به دلیل امکان بالقوه استفاده از منابع گرمایی با گرمای اتلافی، به‌عنوان یکی از روش‌های حرارتی قابل‌بررسی برای نمک‌زدایی مطرح شده است. با این حال، این ویژگی به‌تنهایی اثبات‌کننده پایین‌بودن مصرف

¹ Directional Solvent Extraction

کل انرژی فرآیند نیست؛ زیرا انرژی موردنیاز برای گرم کردن و سردسازی جریان‌ها، اختلاط، پمپاژ، جداسازی فازها و بازیابی حلال نیز باید در موازنه انرژی چرخه کامل منظور شود. بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون بیشتر بر معرفی حلال‌های مناسب، بررسی امکان‌پذیری کلی فرایند و ارزیابی کیفی عملکرد تمرکز داشته‌اند و ابعاد مهندسی رفتار سامانه، به‌ویژه از منظر اثرگذاری نظام‌مند پارامترهای عملیاتی، همچنان نیازمند بررسی عمیق‌تر است [۲۵، ۲۶].

عملکرد استخراج حلالی جهت‌دار به ویژگی‌های حلال وابسته است. یک حلال مناسب باید ظرفیت بالایی برای جذب آب داشته باشد، نمک‌ها را به مقدار ناچیز در خود حل کند، حلالیت کمی در فاز آبی داشته باشد، از پایداری حرارتی و شیمیایی مناسبی برخوردار باشد و پس از سرمایش به‌سرعت از آب استخراج‌شده جدا شود. در مطالعات اولیه، حلال‌هایی مانند روغن سویا، اسید هگزانوئیک^۱، اسید اکتانوئیک^۲ و اسید دکانوئیک^۳ بررسی شدند. در میان این ترکیبات، اسیدهای اکتانوئیک و دکانوئیک به دلیل تعادل مناسب میان آب‌دوستی گروه کربوکسیلیک^۴ و آب‌گریزی زنجیره هیدروکربنی، عملکرد مناسبی نشان دادند [۲۷].

نخستین جرقه‌های احیای فناوری DSE با معرفی اسیدهای چرب توسط [۲۸]. رقم خورد؛ آن‌ها نشان دادند که اسیدهای کربوکسیلیک زنجیره کوتاه و متوسط (به‌ویژه اکتانوئیک اسید و دکانوئیک اسید) به دلیل دارا بودن بخش هیدروفیل و هیدروفوب، قابلیت حل کردن آب بدون انتقال یون‌های نمک را در دماهای پایین‌تر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد دارند. باجپایی در رساله دکتری خود پتانسیل دفع نمک بالای ۹۵٪ را برای انواع آب‌های شور از آب دریا تا پساب‌های فوق‌شور (بیش از ۱۰۰۰۰۰ ppm^۵) به اثبات رساند [۲۹]. در ادامه، فاولر و همکاران نخستین نمونه اولیه^۶ عملیاتی DSE را با استفاده از اکتانوئیک اسید طراحی و راه‌اندازی نمودند که نقطه عطفی در ارزیابی‌های کاربردی این فناوری محسوب می‌شود [۳۰]. در زمینه تعادل فازی و رفتار مولکولی، بوث و و ریش و همکاران به بررسی ترمودینامیک استخراج مایع-مایع (LLE^۷) سیستم‌های سه‌تایی آب-نمک-اسید پرداختند و نشان دادند که طول زنجیره کربنی اسید مستقیماً بر میزان آب جذب‌شده و دمای تفکیک فاز اثرگذار است [۳۱، ۳۲]. همچنین، مک‌نالی و همکاران جابه‌جایی مولکول‌های حل‌شونده در فاز آبی و ساختار پیوندهای هیدروژنی در مخلوط‌های سه‌تایی را ارزیابی کرده و مبانی ترمودینامیکی جذب گزینشی آب را تشریح کردند [۳۳].

از منظر مهندسی فرایند، کارایی استخراج با حلال جهت‌دار حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای میان تعادل فازی، انتقال جرم بین‌فازی، ویژگی‌های فیزیکی سامانه و شرایط هیدرودینامیکی حاکم بر تماس دو فاز است [۱۱، ۲۳]. در این

^۱ Hexanoic Acid

^۲ Octanoic Acid

^۳ Decanoic Acid

^۴ Carboxyl group

^۵ Parts Per Million

^۶ prototype

^۷ Liquid liquid extraction

میان، نسبت حجمی حلال به آب، زمان تماس و غلظت اولیه نمک، از بنیادی‌ترین متغیرهایی هستند که می‌توانند به‌طور هم‌زمان بر ظرفیت استخراج، سرعت پیشرفت فرایند، میزان دستیابی به تعادل و بازده نهایی نمک‌زدایی اثر بگذارند [۲، ۲۱]. اهمیت این متغیرها از آن‌روست که عملکرد واقعی سامانه صرفاً تابع افزایش کمی یک پارامتر نیست، بلکه به نحوه اثر متقابل آن با سایر مؤلفه‌های فرایند وابسته است [۲۴]. به‌عنوان نمونه، افزایش نسبت حلال ممکن است در نگاه نخست ظرفیت جذب آب و سطح تماس مؤثر را افزایش دهد، اما این تغییر لزوماً به بهبود یکنواخت و پایدار عملکرد منجر نمی‌شود [۲۳]. در برخی شرایط، افزایش بیش از حد حلال می‌تواند با برهم زدن الگوی بهینه تماس، تشدید مقاومت مؤثر انتقال جرم و کاهش بهره‌وری مصرف حلال همراه شود [۱۱]. بنابراین، تعیین شرایطی که در آن بیشترین کاهش شوری با کمترین مصرف حلال و در مناسب‌ترین زمان تماس حاصل شود، نه‌تنها از نظر درک علمی رفتار سامانه، بلکه از حیث امکان‌پذیری اقتصادی و طراحی صنعتی فرایند، اهمیتی تعیین‌کننده دارد [۱۰].

با وجود اهمیت آشکار این موضوع، هنوز شناخت جامع و کمی از نحوه اثر هم‌زمان پارامترهای عملیاتی بر عملکرد فرایند استخراج با حلال جهت‌دار حاصل نشده است [۲۵، ۲۶]. بخش قابل توجهی از مطالعات موجود، یا معطوف به ارزیابی قابلیت یک حلال خاص بوده‌اند یا اثر متغیرهای عملیاتی را به‌صورت منفرد و محدود بررسی کرده‌اند [۲۶]. در نتیجه، همچنان خلأیی معنادار در تبیین تجربی رفتار زمانی سامانه، روند نزدیک‌شدن به تعادل، نقش مقاومت‌های انتقال جرم و رابطه میان نسبت فاز، زمان تماس و غلظت اولیه نمک با بازده واقعی نمک‌زدایی وجود دارد [۱۱، ۲۱]. این خلأ، فراتر از یک کاستی نظری، پیامدی مستقیم بر قابلیت طراحی، بهینه‌سازی و توسعه مقیاس صنعتی این فناوری دارد؛ زیرا بدون شناخت دقیق پاسخ سامانه به متغیرهای کلیدی، دستیابی به شرایط بهره‌برداری بهینه و ارزیابی واقع‌بینانه مزیت‌های فرایند ممکن نخواهد بود [۳۳]. از این‌رو، انجام مطالعات تجربی منسجم و هدفمند که بتوانند روابط میان متغیرهای عملیاتی و شاخص‌های عملکردی را روشن سازند، ضرورتی اساسی برای پیشبرد این فناوری به شمار می‌آید.

با وجود مزایای اسیدهای چرب، ظرفیت انتقال آب آن‌ها محدود است و برای دستیابی به بازیابی قابل توجه آب، ممکن است به اختلاف دمایی، حجم حلال و تعداد مراحل بیشتری نیاز باشد. همچنین، تلفات حلال در فاز آبی، زمان جدایش فاز، پایداری در چرخه‌های متوالی و احتمال تشکیل رسوب در خوراک‌های بسیار شور باید بررسی شود [۳۴].

برای رفع این محدودیت‌ها، در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به حلال‌های جدید، به‌ویژه مایعات یونی و حلال‌های آمینی، افزایش یافته است. گو و همکاران نشان دادند که مایع یونی [Tf2N][emim] می‌تواند در دماهای نسبتاً پایین، بازده انتقال آب و دفع یون بالاتری نسبت به دکانوئیک‌اسید فراهم کند. این نتیجه نشان می‌دهد که طراحی ساختار کاتیون و آنیون می‌تواند امکان تنظیم هم‌زمان حلالیت آب، دفع نمک، فراریت و دمای عملیاتی حلال را فراهم کند [۳۵].

همچنین، توسعه حلال‌های آمینی جهت‌دار مسیر دیگری برای بهبود عملکرد DSE است. این حلال‌ها با هدف افزایش بازیابی آب، جداسازی نمک و کنترل رسوب‌گذاری در آب‌شورهای فوق‌اشباع بررسی شده‌اند [۳۶]. با این حال،

پیش از کاربرد این حلال‌ها در مقیاس بزرگ، بررسی سمیت، هزینه، پایداری، قابلیت بازیافت، انتقال حلال به آب محصول و اثر ناخالصی‌های خوراک ضروری است.

با پیشرفت فناوری DSE، رویکرد پژوهش‌ها از ارزیابی‌های صرفاً تعادلی به سمت پایش دینامیکی و تحلیل انتقال جرم گرایش پیدا کرد. سانپ و همکاران [۳۷] برای نخستین بار مصرف انرژی و سینتیک نمک‌زدایی با اکتانویک اسید خالص را در مقیاس نیمه‌پیوسته تحلیل کرده و اثر شدت اختلاط و زمان تماس را بررسی نمودند. در حوزه مدلسازی و تحلیل انرژی، لوئو و همکاران [۳۳] به مدلسازی فرآیند پیوسته DSE پرداخته و تلفات انتقال حرارت در مبدل‌ها را مهم‌ترین عامل محدودکننده بازده انرژی دانستند. پیرو آن، العتیبی و همکاران [۳۸] با ارزیابی انرژی فرآیند DSE با اکتانویک اسید نشان دادند که بهینه‌سازی نسبت حلال به خوراک نقشی کلیدی در کاهش اتلاف انرژی دارد. از سوی دیگر، چنگ، و همکاران [۲۶]. توانایی فوق‌العاده حلال‌های جهت‌دار در دفع یون‌های چندظرفیتی و یک‌ظرفیتی را مدلسازی کرده و نشان دادند پدیده نمک‌رانی (Salting-out) چگونه بر ضریب نفوذ آب اثر می‌گذارد. همچنین گو و همکاران [۳۵] و ریش و همکاران [۲۷] بر رفتار گذرای شوری پساب و تعریف معیارهای بهره‌وری حلال ۱ تمرکز نموده و نشان دادند بخش اعظم انتقال جرم در دقایق اولیه فرآیند صورت می‌پذیرد. ژانگ و همکاران، امکان‌سنجی بازیابی همزمان آب، جداسازی نمک و رسوب‌زدایی مؤثر آب نمک فوق شور با استفاده از استخراج حلال جهت‌دار (DSE) مبتنی بر دی‌ایزوپروپیل‌آمین (DIPA) با استفاده از آب دریای رقیق/غلیظ در یک محدوده غلظت اولیه مشخص نمک و در دو دما گزارش کردند. این مطالعه یک رویکرد جدید برای ادغام بازیابی آب و جداسازی یون Cl^- از شورابه‌های با شوری فوق‌العاده بالا با رسوب رادیکالی یون‌های Mg^{+2} و Ca^{+2} در یک مرحله ارائه می‌دهد [۳۹].

با وجود این دستاوردها، اکثر مطالعات پیشین به ارائه داده‌های تعادلی در زمان‌های کوتاه یا نسبت‌های حلال محدود اکتفا کرده‌اند و ارزیابی جامع روند زمانی تغییرات شوری فاز آبی، بررسی سینتیک استخراج در زمان‌های طولانی‌تر و تعیین بهره‌وری اسید اکتانویک در غلظت‌های بالای نمک خوراک کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است؛ پژوهش حاضر درصدد پر کردن این خلأ پژوهشی است.

جدول ۱ به مقایسه بین مطالعات منتخب استخراج با حلال جهت‌دار در نمک‌زدایی آب می‌پردازد. این جدول اطلاعاتی درباره نوع حلال، نوع خوراک، دمای عملیاتی، شرایط تماس یا دبی، شاخص‌های عملکرد و مهم‌ترین نتایج هر مطالعه ارائه می‌کند.

جدول ۱. مقایسه مطالعات منتخب استخراج حلال جهت‌دار برای نمک‌زدایی آب

Table 1. Comparison of selective investigations on directional solvent extraction for water desalination

¹ Solvent Productivity

Reference	Solvent	Feed Type	Reported Operating Conditions	Performance Metric	Key Findings
[28]	Octanoic acid and Decanoic acid	Synthetic NaCl solution (3.5 wt% / seawater)	Batch laboratory system, temperature range: 40–60 °C	Salt rejection >98%, low-temperature phase separation	Primary demonstration of selective dissolution of water molecules in fatty acids without salt ion transport.
[31]	Short- and medium-chain fatty acids (C ₇ –C ₁₀ C ₇ –C ₁₀)	Brine solutions with various salinities	Liquid-liquid equilibrium (LLE) evaluation at 20–80 °C	Mutual solubility determination, high separation factor	Investigation of carbon chain length and functional groups on water absorption capacity and phase separation temperature.
[27]	Decanoic acid	Seawater (3.5 wt% salt solution)	DSE process with high-temperature water absorption and release upon cooling	Exceptional ion rejection (98–99%)	Production of potable water equivalent to top-tier reverse osmosis (RO) membranes.
[30]	Octanoic acid	Seawater and high-salinity brines (>35,000 ppm)	First semi-continuous DSE pilot, thermal recovery at 60 °C	Salinity reduction efficiency >90% with low thermal energy consumption	Design and operation of the first continuous laboratory prototype; energy consumption analysis.
[32]	Decanoic acid and branched-chain acids	Hypersaline wastewater (up to 100,000 ppm)	Ternary phase equilibrium under isothermal and non-isothermal conditions	Desalination efficiency >95% at extreme salinities	Comprehensive thermodynamic investigation of ternary phase equilibrium (water + salt + solvent) and micelle formation.
[26]	Octanoic acid and Decanoic acid	Ultra-high salinity waters (>100 g/L)	LLE evaluation at 20–70 °C	Salt rejection >98% under optimal conditions	Demonstration of DSE feasibility in salinity regimes where RO systems

					suffer severe fouling and scaling.
[37]	Octanoic acid	Synthetic NaCl solutions (1–5 wt%)	Mechanical extraction column, mixing intensity and contact time effects	High mass transfer efficiency in the initial minutes of mixing	Analysis of water and salt transport kinetics and the role of hydrodynamic intensity on equilibration rate.
[38]	Directional solvents, especially fatty acids	Saline feeds and seawater	Review and analysis of key operational parameters in DSE	Water transfer capacity, salt rejection, energy demand	Highlighting the roles of solvent type, extraction temperature, ΔT , solvent-to-feed ratio, and phase separation methods.
[33]	Organic carboxylic acids	Seawater and industrial wastewater	Multi-stage continuous process modeling and simulation	Water recovery >45% per cycle	Exergy and thermal loss modeling in heat exchangers as the primary process bottleneck.
[36]	Decanoic acid and linear acids	Synthetic brines at various concentrations	Optical spectroscopy and chemical equilibrium monitoring	Stable desalination performance across consecutive cycles	Characterization of microemulsion structures and minimization of solvent loss in the final effluent.
[35]	Ionic liquid [emim][Tf ₂ N Tf ₂ N]	NaCl solutions (0.3–3.8 wt%) and concentrated brines	Lower-temperature extraction (approx. 45–75 °C)	Water yield, ion rejection, and water solubility in solvent	Modeling viscosity and density effects on two-phase separation rate and entrapped solvent minimization.
[39]	Directional amine solvent	Hypersaline saturated brine	DSE focused on water recovery, salt crystallization, and scaling control	Water recovery, salt crystallization	Introducing amine-based directional solvents for hypersaline and highly scaling-prone feeds.

Present Study	Octanoic acid	Synthetic NaCl solutions (2.5 and 5.0 wt%)	Extraction temperature: 50 °C; solvent ratio (SR): 0.5, 0.64, 1.0, 1.5; low-speed agitation; time-resolved salinity monitoring	Aqueous phase salinity dynamics, extraction efficiency, and solvent utilization efficiency	Systematic assessment of initial salinity, solvent ratio, and contact time; evaluation of transient salinity behavior and approach to quasi-equilibrium.
---------------	---------------	--	---	--	--

باوجود پیشرفت‌های انجام‌شده، هنوز مقایسه مستقیمی میان اثر غلظت اولیه نمک، نسبت حلال به خوراک و زمان تماس بر عملکرد اسید اکتانویک در شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده به‌طور کامل ارائه نشده است. همچنین، بسیاری از مطالعات بر بازده آب یا دفع نمک تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که تحلیل هم‌زمان روند شوری-زمان و بهره‌وری مصرف حلال می‌تواند اطلاعات بیشتری درباره محدودیت‌های انتقال جرم و شرایط عملیاتی مناسب فراهم کند.

بر این مبنا، نوآوری اصلی این کار، بررسی تجربی سیستماتیک اثرات نسبت حجمی حلال به آب، زمان تماس، و غلظت اولیه نمک بر نمک‌زدایی با استفاده از اسید اکتانویک به عنوان یک حلال جهت‌دار است. این مطالعه علاوه بر گزارش عملکرد نمک‌زدایی، نسبت عملیاتی حلال به آب را شناسایی می‌کند که تعادل مطلوبی بین کاهش شوری و مصرف حلال ایجاد می‌کند، و نقطه بهینه عملیاتی را بر پایه توازن میان بیشینه‌سازی کاهش شوری و کمینه‌سازی مصرف حلال تعیین می‌کند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عمدتاً بر معرفی حلال، امکان‌سنجی فرایند یا گزارش شوری نهایی تمرکز کرده‌اند، پژوهش حاضر اثر هم‌زمان نسبت حلال به آب، غلظت اولیه نمک و زمان تماس را در نمک‌زدایی آب شور با استفاده از اسید اکتانویک بررسی می‌کند. نسبت حلال به آب در چهار سطح ۰/۵، ۰/۶۴، ۱/۰ و ۱/۵، و غلظت اولیه نمک در دو سطح ۲/۵٪ و ۵٪ مطالعه شد. اگرچه خواص فیزیکی سامانه در سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد، نتایج نمک‌زدایی فقط در ۵۰ درجه سانتی‌گراد از نظر تحلیلی معنادار بود و نتایج در سایر دماها در این مقاله گزارش نشده است. وجه تمایز دیگر این کار، تحلیل روند زمانی کاهش شوری تا حالت شبه‌تعادلی و برآورد آب استخراج‌شده از طریق موازنه جرم نمک است. ازاین‌رو، این مطالعه علاوه بر ارزیابی شوری نهایی، ارتباط میان شرایط عملیاتی، رفتار انتقال جرم و ظرفیت استخراج آب توسط حلال را بررسی می‌کند. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه، افزون بر تعمیق درک مهندسی از نقش انتقال جرم و رفتار تعادلی در این سامانه، مبنایی معتبر برای طراحی، بهینه‌سازی و توسعه سامانه‌هایی با قابلیت مصرف کمتر انرژی نمک‌زدایی مبتنی بر استخراج با حلال جهت‌دار فراهم آورد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، اسید اکتانویک ($C_8 H_{16} O_2$) به عنوان حلال جهت دار، کلرید سدیم (NaCl) به عنوان ماده مولد شوری هر دو از شرکت مرک آلمان^۱ (خلوص بیش از ۹۹٪) و آب مقطر از شرکت زلال طب شیمی به عنوان فاز آبی مورد استفاده قرار گرفتند. برخی خواص فیزیکی مؤثر بر رفتار انتقال جرم و هیدرودینامیک سامانه، شامل چگالی و گرانیوی فازهای آبی و آلی، در دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. این اندازه گیری ها با هدف درک بهتر رفتار سامانه و تحلیل دقیق تر اثر دما بر عملکرد فرایند انجام گرفت. مشخصات مواد مورد آزمایش در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. مشخصات و خواص ترموفیزیکی مواد و محلول های مورد استفاده در فرآیند DSE

Table 2. Characterization and thermophysical properties of materials and aqueous solutions used in the DSE experiments.

Material / Solution	Temp (°C)	Molar Mass (g/mol)	Density (g/cm ³)	Dynamic Viscosity (mPa·s)	Solubility in Water	Chemical Formula / ID
Octanoic acid	25	144.21	0.910	5.70	0.068 g/100g (acid in water)	$C_8 H_{16} O_2$ (CAS: 124-07-2)
	50	-	0.890	2.55	2.4–4.5 wt% (water in acid)	-
Distilled water	25	18.015	0.997	0.89	-	$H_2 O$ (pH: 6.5–7.5)
	50	-	0.988	0.55	-	-
Sodium chloride	25	58.44	2.165	-	36 g/100g	NaCl (CAS: 7647-14-5)

محلول های نمکی با دو غلظت اولیه مختلف (۲/۵٪ و ۵٪ وزنی) از طریق انحلال مقدار مشخصی از کلرید سدیم در آب مقطر تهیه شدند، پس از آن، شوری اولیه محلول به وسیله هدایت سنج اندازه گیری و ثبت گردید. انتخاب اسید اکتانویک به عنوان حلال جهت دار بر مبنای قابلیت آن در جذب انتخابی آب و محدود بودن انتقال نمک به فاز آلی انجام گرفت؛ ویژگی ای که آن را به گزینه ای مناسب برای کاربرد در فرایند استخراج با حلال جهت دار تبدیل می کند. اسید اکتانویک پیش از انجام آزمایش، با آب دیونیزه در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد تحت هم زدن به مدت ۲ ساعت به تعادل رسید تا پس از جداسازی کامل از فاز آبی، اکتانویک اسید اشباع از آب به عنوان فاز حلال در

^۱ Merck

آزمایش‌ها استفاده شود. به این ترتیب حلال اشباع از آب در حین آزمایش در دمای بالاتر آب را از فاز آبی جذب می نماید و سپس می تواند در دمای محیط آب را آزاد نماید، و به دلیل اشباع بودن از آب اطمینان حاصل می‌شد که آب استخراج شده در پایان آزمایش تنها به دلیل دمای بالاتر و در حین فرایند استخراج از محلول کلرید سدیم به حلال منتقل شده است.

آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از مجموعه‌ای از تجهیزات متداول شامل بشر، ارلن، دماسنج، ترازو، همزن حرارتی و دستگاه هدایت‌سنج انجام شدند. اختلاط و کنترل دمای سامانه به وسیله گرم‌کن همزن‌دار^۱ انجام گرفت و به منظور اندازه‌گیری شوری محلول از دستگاه هدایت‌سنج (کانداکتمتر^۲) مدل AZ8373 استفاده شد. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری شوری، دما و کل جامدات محلول را داشته و برای پایش تغییرات شوری در محدوده مورد نیاز این پژوهش مناسب بود. دقت اندازه‌گیری دستگاه معادل ۱ درصد کل مقیاس به علاوه یک رقم است. از آنجا که محدوده اندازه‌گیری شوری دستگاه تا ۱۰۰ ppt^۳ (۱۰۰۰۰۰ ppm) است برای محلول ۲/۵٪ خطای دستگاه حدود ± 250 ppm و برای محلول ۵/۰٪ خطای دستگاه حدود ± 500 ppm است. پیش از انجام آزمایش آزمون کالیبراسیون برای هدایت-سنج توسط محلول های استاندارد در غلظت‌های مشخص انجام شد و بر اساس نتایج آن نمودار کالیبراسیون رسم گردید (شکل ۱).

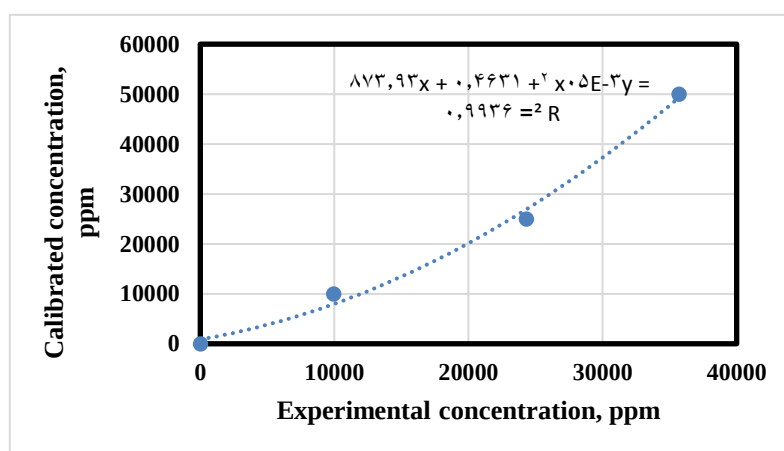
آزمایش‌ها در بشر ۵۰۰ mL انجام شدند. حجم فاز آبی در تمام آزمون‌ها ۱۰۰ mL بود و حجم اسید اکتانویک متناسب با نسبت حجمی حلال به آب، تنظیم شد. نسبت‌های حجمی حلال به آب در چهار سطح ۰/۵۰، ۰/۶۴، ۰/۱۰۰، و ۱/۵۰ انتخاب شد. آزمایش‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. دمای محلول با استفاده از هدایت‌سنج، کنترل و ثبت شد. دقت دمای دستگاه $\pm 0.5^\circ\text{C}$ و تفکیک پذیری آن 0.1°C است. آزمایش‌ها در فشار محیط انجام شدند. در تمام آزمایش‌ها، شرایط اختلاط فازهای آبی و آلی در بشر به صورت یکنواخت و با سرعت ثابت بسیار کم برقرار شد به طوری که فصل مشترک دو فاز بدون آشفتگی و مشخص باشد. پس از آغاز تماس بین فاز آبی و فاز آلی، در بازه‌های زمانی مشخص به مدت ۳۰ ثانیه عمل هم زدن متوقف شد تا اثر نوسانات ناشی از هم‌زدن بر نتایج به حداقل برسد، سپس شوری فاز آبی با استفاده از هدایت‌سنج اندازه‌گیری شد. روند تغییرات شوری در طول زمان برای هر یک از شرایط عملیاتی ثبت شد تا رفتار گذرای سامانه، نرخ تغییرات شوری و زمان رسیدن/نزدیک شدن به تعادل مشخص شود. هنگامی که تغییرات شوری در اندازه‌گیری‌های متوالی به مقدار ناچیز و تقریباً ثابت رسید، سامانه در حالت شبه تعادل در نظر گرفته شد. کل مدت زمان ثبت داده‌ها ۱۴۰ دقیقه بود. در انتهای ثبت داده‌های مربوط به شوری فاز آبی، با توقف هم‌زدن، فاز آلی جدا شد و تا دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) خنک شد تا مرحله آزادسازی آب استخراج شده آغاز شود. پس از خنک‌سازی، جدایش فاز مشخصی رخ داد و یک فاز محصول غنی از آب شفاف و متمایز از فاز حلال آلی ایجاد شد. در حالی که جداسازی فاز به صورت بصری تأیید شد، جرم آب بازیابی شده به روش مستقیم اندازه‌گیری نشد اما به صورت غیرمستقیم از طریق موازنه جرم نمک در خوراک آبی تعیین شد و بهره‌وری مصرف

¹ Heater-Stirrer

² Conductometer

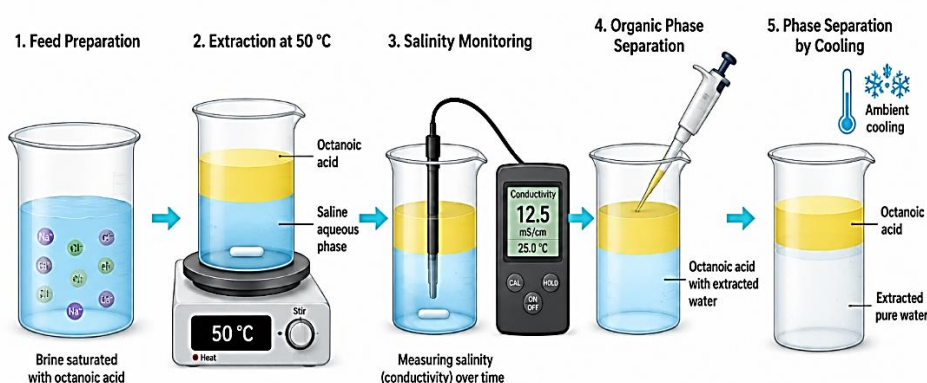
³ Parts Per Thousand

حلال به عنوان نسبت جرم آب استخراج شده به جرم حلال اسید اکتانویک محاسبه شد. حلالیت قطرات اکتانویک اسید در فاز آبی ناچیز و قابل صرف نظر بود و تاثیر آن بر داده های خوانده شده به دلیل تفاوت قابل ملاحظه چگالی اکتانویک اسید با فاز آبی و در نتیجه نجسبیدن آن به پراب^۱ دستگاه که در عمق محلول قرار دارد، همچنین وجود یونهای Na^+ و Cl^- و پدیده رانش نمک که از حلالیت اکتانویک اسید در فاز آبی جلوگیری می کند، قابل صرف نظر است. شکل ۲ شماتیکی از نحوه انجام آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۱. نمودار کالیبراسیون دستگاه هدایت سنج در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد

Figure 1. Calibration curve of the conductometer at 50 °C



شکل ۲. شماتیکی از سامانه آزمایشگاهی و روند مرحله به مرحله ی انجام آزمایش های استخراج با حلال جهت دار در نمکزدایی

Figure 2. Schematic diagram of the experimental setup and stepwise procedure for directional solvent extraction (DSE) desalination

^۱ Probe

در طراحی آزمایش، اثر سه پارامتر اصلی عملیاتی شامل نسبت حجمی حلال به فاز آبی، زمان تماس و غلظت اولیه نمک بر درصد افزایش شوری، راندمان استخراج آب، و بهره‌وری حلال مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب این متغیرها بر این مبنا صورت گرفت که آنها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رفتار تعادلی، نرخ انتقال جرم و کارایی نهایی فرایند در سامانه‌های استخراج مایع-مایع به شمار می‌روند. از این‌رو، بررسی هم‌زمان این متغیرها امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار سامانه و شناسایی شرایط بهینه عملیاتی را فراهم می‌سازد.

به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد داده‌ها، آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شدند و مقادیر ارائه شده در نتایج میانگین سه تکرار مستقل هستند و پراکندگی نسبی داده‌ها کمتر از ۳٪ است. از آنجا که در این مطالعه مجموعه داده مستقل برای آزمون مدل در نظر گرفته نشده بود، شاخص‌های آماری متداول مانند R^2 ، RMSE^۱، MAE^۲ و MAPE^۳ محاسبه نشدند.

۳- محاسبه جرم آب منتقل شده به حلال (آب مستخرج):

جرم آب باقی‌مانده در فاز آبی در زمان t:

$$m_{w,t} = m_{aq,t} - m_{salt} \quad (۱)$$

$$m_{aq,t} = \frac{m_{salt}}{C_t \times 10^{-6}} \quad (۲)$$

بنابراین:

$$m_{w,t} = \frac{m_{salt}}{C_t \times 10^{-6}} - m_{salt} \quad (۳)$$

جرم آب استخراج شده به حلال معادل تفاضل جرم آب اولیه در محلول و جرم آب باقی مانده در محلول فاز آبی در هر لحظه است:

$$m_{w,ext.t} = m_{w,init} - m_{w,t} = m_{w,init} - \left[\frac{m_{salt}}{C_t \times 10^{-6}} - m_{salt} \right] = m_{w,init} + m_{salt} - \frac{m_{salt}}{C_t \times 10^{-6}} \quad (۴)$$

اگر خوراک (محلول آبی اولیه) را با m_F نشان دهیم:

$$m_F = m_{w,init} + m_{salt} \quad (۵)$$

$$m_{w,ext.t} = m_F - \frac{m_{salt}}{C_t \times 10^{-6}} \quad (۶)$$

سپس می‌توان درصد استخراج آب و بهره‌وری مصرف حلال را نیز محاسبه نمود. همه‌ی روابط ریاضی حاصل که در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته اند در جدول ۳ معرفی شده است.

^۱ Root Mean Square Error

^۲ Mean Absolute Error

^۳ Mean Absolute Percentage Error

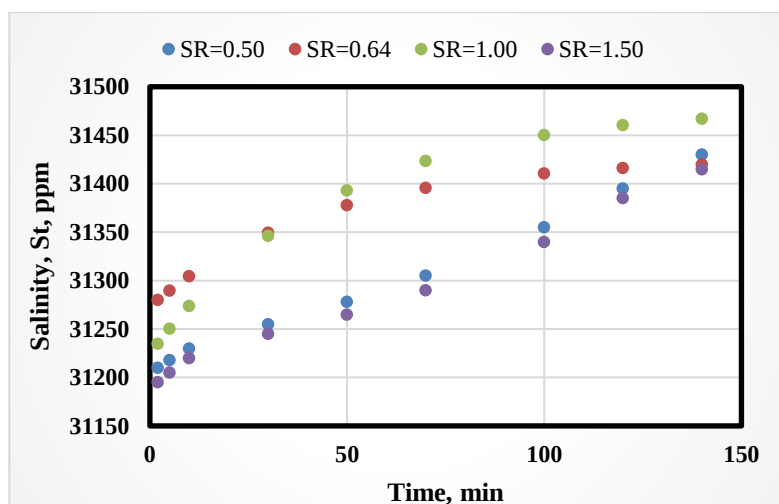
جدول ۳. روابط ریاضی استفاده شده در فرآیند اندازه گیری پارامترها

Table 1. Equations used in the parameter measurement process

Parameter	Equation	Description	No.
Mass of water extracted	$m_{w,ext.t} = m_{w,init} - \left[\frac{m_{salt}}{C_t \times 10^{-6}} - m_{salt} \right]$ $= m_F - \frac{m_{salt}}{C_t \times 10^{-6}}$	$m_{w,ext.t}$: Extracted water, $m_{w,init}$: Initial water C_t : Salt concentration m_F : Feed solution mass	(6)
Salinity enhancement	$E(\%) = \frac{S_t - S_0}{S_0} \times 100$	S_0 : Initial salinity of the feed S_t : Salinity at time t	(7)
Water extraction	$\eta(\%) = \frac{m_{w,ext.t}}{m_{w,init}} \times 100$		(8)
Solvent efficiency	$Y(\%) = \frac{m_{water,extracted}}{m_{solv}} \times 100$	m_{solv} : Mass of the solvent	(9)

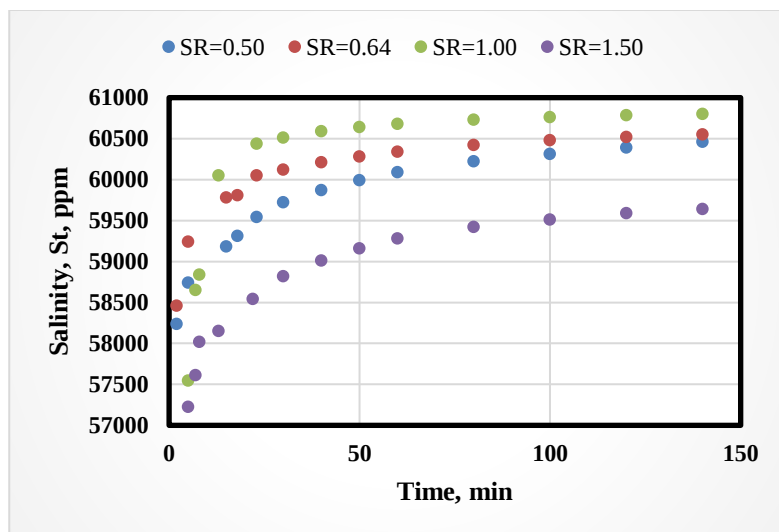
۴-نتایج و بحث

اعتبار داده‌ها علاوه بر تکرارپذیری آزمایش و کالیبراسیون دستگاه، بر اساس سازگاری روندهای مشاهده‌شده با رفتار مورد انتظار فرایند استخراج حلالی جهت‌دار بررسی شد. بر این اساس، شوری فاز آبی باید با افزایش زمان تماس افزایش یابد و در زمان‌های طولانی‌تر به یک حالت شبه‌تعادلی نزدیک شود. همچنین، در شرایط عملیاتی مشابه، شوری فاز آبی حاصل از محلول اولیه ۵٪ باید بیشتر از محلول اولیه ۲/۵٪ باشد.



شکل ۲-الف شوری بر حسب زمان در نسبت حلال‌های مختلف و غلظت اولیه ۲/۵ درصدوزنی کلرید سدیم

Figure 2-a. Salinity versus time at different solvent ratios and at an initial NaCl concentration of 2.5 wt%.

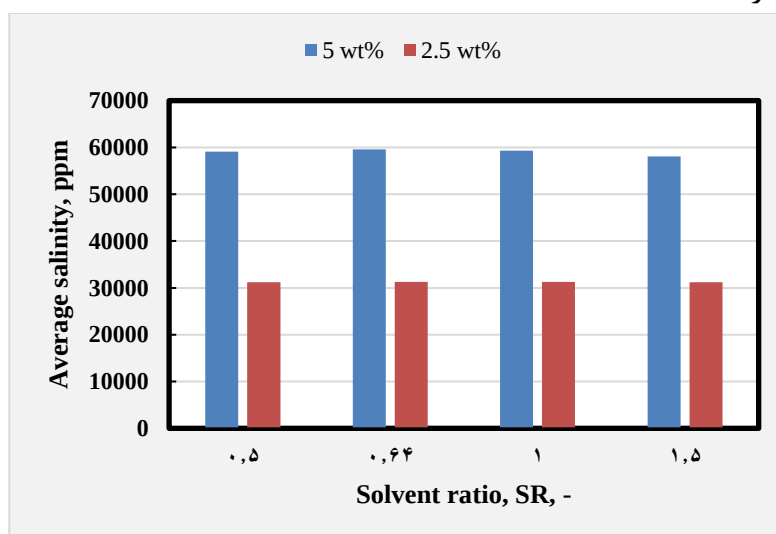


شکل ۲-ب. شوری بر حسب زمان در نسبت حلال‌های مختلف و غلظت اولیه ۵ درصدوزنی کلرید سدیم

Figure 2-b. Salinity versus time at different solvent ratios and at an initial NaCl concentration of 5 wt%.

نتایج آزمایش‌ها در شکل ۲ (الف و ب) نشان داد با افزایش زمان تماس بین فاز آبی و حلال جهت‌دار، انتقال تدریجی آب به فاز آلی رخ داده و شیب تغییرات شوری فاز آبی به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد تا سیستم به حالت تعادل نزدیک شود. با توجه به شکل ۲ مدت زمان رسیدن به تعادل به ویژه در غلظت ۲/۵ درصدوزنی تابع نسبت حجمی حلال است؛ به‌طوری که در بعضی موارد زمان رسیدن به تعادل در حدود ۵۰ دقیقه است، درحالی‌که در

نمودارهای دیگری، حتی تا زمان ۱۴۰ دقیقه هم شرایط تعادلی حاصل نشده است. در حالت کلی، در خوراک ۵٪ با حضور نمک بیشتر نسبت به خوراک ۲/۵٪، فعالیت آب کاهش یافته و فشار اسمزی فاز آبی بیشتر است، بنابراین حداکثر میزان جذب آب (تا رسیدن به تعادل) در فاز آلی کمتر است و سیستم زودتر به حالت تعادل می‌رسد، درحالی‌که در این مدت ۱۴۰ دقیقه، خوراک ۲/۵٪ به دلیل اختلاف پتانسیل بیشتر آب در فاز آبی، و ظرفیت جذب بیشتر، هنوز تا حالت تعادلی فاصله زیادی دارد.

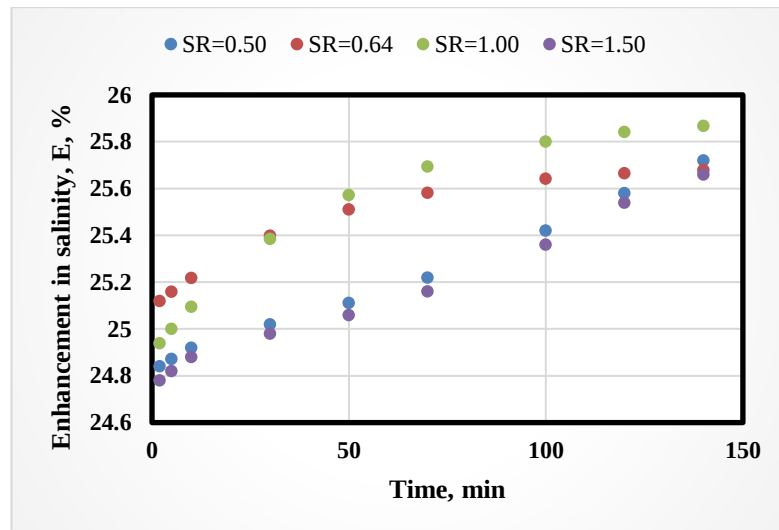


شکل ۳: شوری متوسط در ۳۰ دقیقه اول انجام آزمایش بر حسب نسبت حلال در دو غلظت متفاوت

Figure 3. Average salinity during the first 30 minutes of the experiment versus solvent ratio at two different concentrations

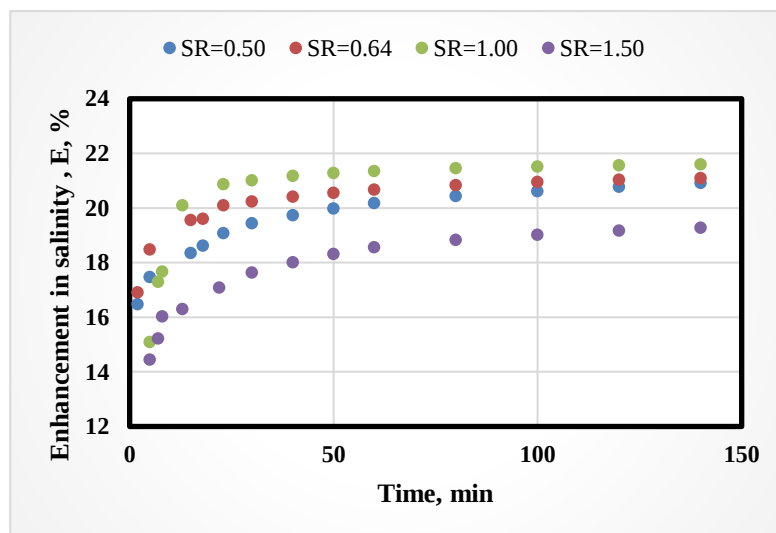
شکل ۳ میانگین شوری فاز آبی را در ۳۰ دقیقه نخست فرآیند برای نسبت‌های مختلف حلال به خوراک (SR^1) و دو غلظت اولیه ۲/۵ درصد وزنی (معادل ۲۵۰۰۰ ppm) و ۵ درصد وزنی (معادل ۵۰۰۰۰ ppm) نشان می‌دهد. افزایش شوری میانگین به بیش از ۳۱۰۰۰ ppm (برای خوراک ۲/۵٪) و حدود ۵۹۰۰۰ ppm (برای خوراک ۵٪) تأییدکننده جذب انتخابی آب توسط حلال اسید اکتانوئیک و تغلیظ نمک در فاز آبی باقیمانده است. بررسی اثر نسبت حلال نشان می‌دهد که افزایش SR از ۰/۵ به ۱/۵ تغییر محسوسی در میانگین شوری فاز آبی طی ۳۰ دقیقه اول ایجاد نکرده است. این رفتار حاکی از آن است که در دقایق آغازین فرآیند، سرعت انتقال آب عمدتاً توسط مقاومت‌های نفوذی فصل مشترک و سینتیک انتقال جرم کنترل می‌شود و افزایش حجم حلال به تنهایی نمی‌تواند نرخ استخراج آب را به‌طور خطی افزایش دهد. از این‌رو، نسبت $SR=0.5$ به دلیل دستیابی به سطح تغلیظ مشابه با حجم حلال کمتر، بالاترین بهره‌وری مصرف حلال را در مراحل اولیه استخراج آب نشان می‌دهد.

¹ Solvent Ratio



شکل ۴-الف. درصد افزایش شوری نسبت به غلظت اولیه ۲/۵ درصد وزنی بر حسب زمان در نسبت حلال‌های مختلف

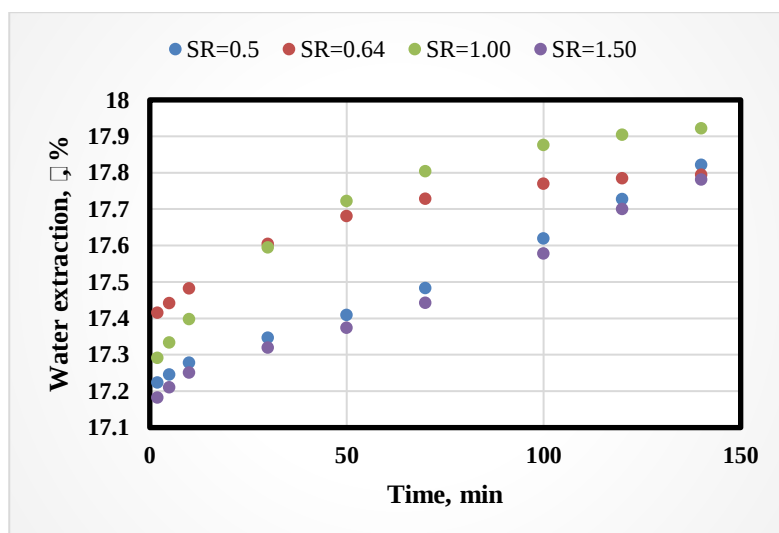
Figure 4-a. Enhancement in salinity relative to the initial NaCl concentration of 2.5 wt% versus time at different solvent ratios



شکل ۴-ب. درصد افزایش شوری نسبت به غلظت اولیه ۵ درصد وزنی بر حسب زمان در نسبت حلال‌های مختلف

Figure 4-b. Enhancement in salinity relative to the initial NaCl concentration of 5 wt% versus time at different solvent ratios

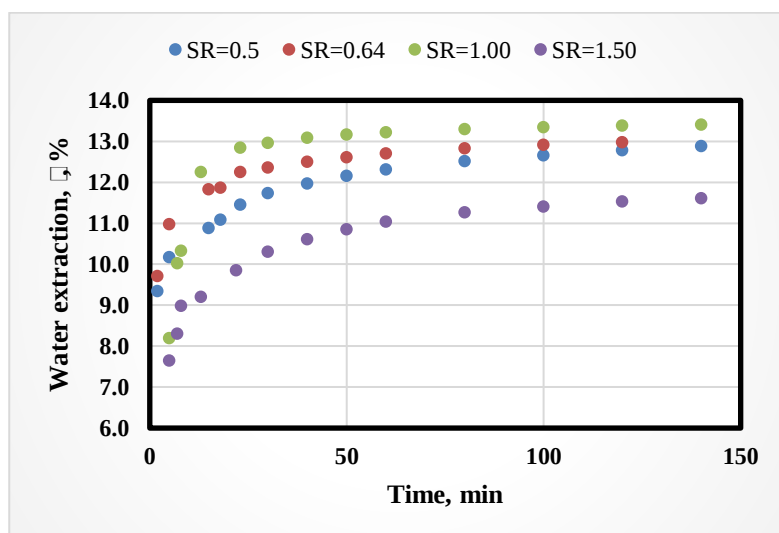
همچنین مشاهده شد که رابطه بین نسبت حجمی حلال و درصد افزایش شوری خطی و افزایشی نیست (شکل ۴-الف و ۴-ب). همراه با افزایش نسبت حلال تا $SR=1/0.0$ درصد افزایش شوری محلول نیز بیشتر می‌شود، اما پس از آن، افزایش بیشتر حلال منجر به افت افزایش شوری شد. این نتیجه نشان می‌دهد مصرف بیشتر حلال لزوماً به معنای عملکرد بهتر نیست و وجود یک نقطه بهینه عملیاتی برای طراحی فرآیند ضروری است.



شکل ۵-الف. راندمان استخراج آب بر حسب زمان برای نسبت حلال‌های مختلف و غلظت اولیه کلرید سدیم ۲/۵

درصدوزنی

Figure 5-a. Water extraction versus time at different solvent ratios and initial NaCl concentration of 2.5 wt%



شکل ۵-ب. راندمان استخراج آب بر حسب زمان برای نسبت حلال‌های مختلف و غلظت اولیه کلرید سدیم ۵

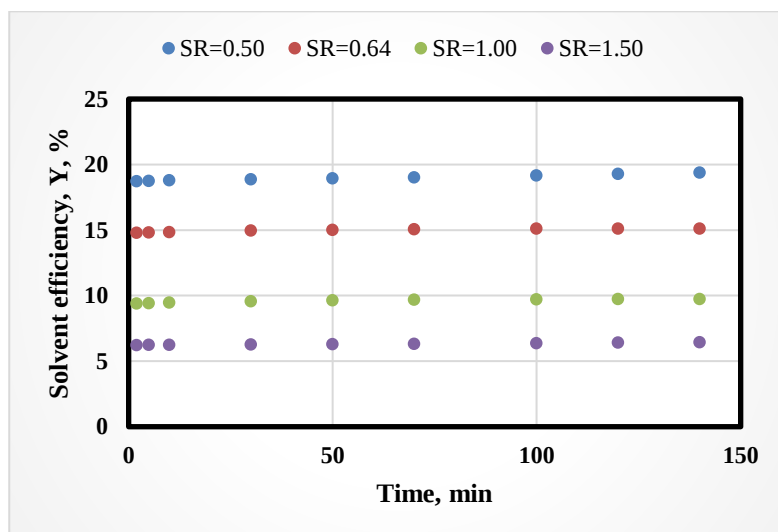
درصدوزنی

Figure 5-b . Water extraction versus time at different solvent ratios and initial NaCl concentration of 5 wt%

شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) درصد استخراج آب (η) را بر حسب زمان برای نسبت‌های مختلف حلال به خوراک (SR) در غلظت‌های اولیه ۲/۵ و ۵ درصد وزنی NaCl نشان می‌دهند. در تمامی آزمون‌ها، استخراج آب در دقایق ابتدایی با شیب تندی آغاز شده و پس از گذشت حدود ۱۰۰ دقیقه به حالت شبه تعادل نزدیک می‌شود.

مقایسه دو نمودار نشان می‌دهد که افزایش غلظت اولیه نمک از ۲/۵٪ به ۵٪ وزنی موجب کاهش راندمان نهایی استخراج آب از حدود ۱۷/۸٪ به بازه ۱۱/۵-۱۳/۴٪ شده است. این کاهش راندمان ناشی از افزایش فشار اسمزی محلول و کاهش فعالیت شیمیایی آب در حضور غلظت‌های بالاتر املاح است که نیروی محرکه انتقال آب به فاز آلی را تضعیف می‌کند.

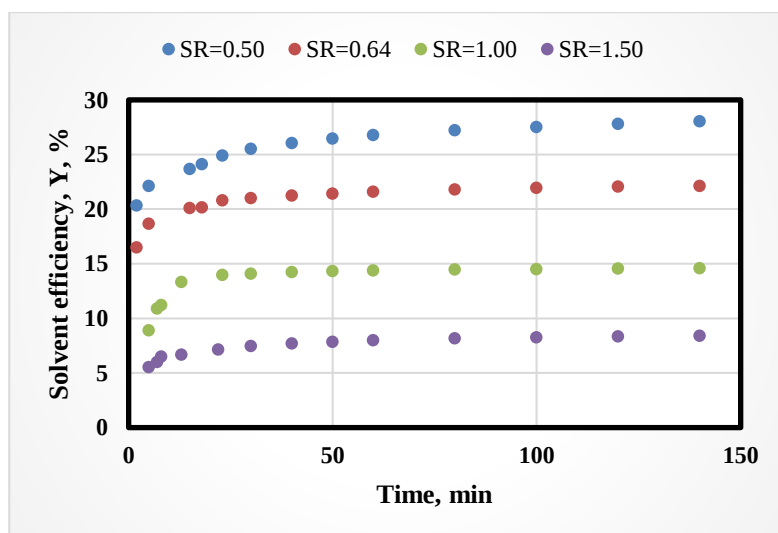
از منظر نسبت حلال، نسبت $SR = 1/0.0$ بالاترین درصد استخراج را در هر دو غلظت ثبت کرده است. با این حال، نسبت $SR = 0.50$ نیز با دستیابی به راندمانی نزدیک به نسبت‌های حجمی بالاتر در نقاط پایانی آزمایش، بالاترین بهره‌وری به ازای حجم حلال مصرفی را نشان می‌دهد. افت نسبی راندمان در نسبت $SR = 1/50$ می‌تواند به افزایش مقاومت نفوذی، افزایش ویسکوزیته و کاهش کارایی اختلاط در حجم‌های بالاتر فاز آلی مربوط باشد.



شکل ۶-الف. بازدهی مصرف حلال بر حسب زمان در نسبت حلال‌های مختلف و در غلظت اولیه ۲/۵ درصد وزنی

کلرید سدیم

Figure 6-a. Solvent efficiency versus time at different solvent ratios at initial NaCl concentration of 2.5 wt%



شکل ۶-ب. بازدهی مصرف حلال بر حسب زمان در نسبت حلال های مختلف و در غلظت اولیه ۵ درصد وزنی

کلرید سدیم

Figure 6-b. Solvent efficiency versus time at different solvent ratios at initial NaCl concentration of 5 wt%

نسبت جرم آب منتقل شده به جرم حلال مصرفی به عنوان شاخص بهره‌وری مصرف حلال در شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین بهره‌وری در نسبت حجمی حدود ۰/۵ مشاهده شد، به گونه‌ای که در این نقطه بیشترین آب تولیدی در برابر حداقل مصرف حلال حاصل گردید. با افزایش بیشتر حجم حلال، بهره‌وری کاهش یافت که بیانگر افزایش مقاومت مؤثر انتقال جرم و افت کارایی مصرف حلال است. رفتار مشاهده شده در تمامی SR ها بیانگر آن است که فرآیند استخراج احتمالاً تحت کنترل نفوذ مولکولی است و مقاومت‌های انتقال جرم در مرز دو فاز قرار دارد. افزایش بیش از حد حجم حلال، با وجود افزایش سطح تماس اسمی، می‌تواند منجر به افزایش مقاومت مؤثر انتقال جرم و کاهش بهره‌وری گردد. این نتایج نشان می‌دهد طراحی فرآیند باید بر پایه تعادل بین سطح تماس، اختلاط مناسب و حداقل مصرف حلال انجام گیرد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری مستقیم فاز غنی از آب بازیابی شده انجام نشده است، بلکه میزان آب منتقل شده توسط موازنه جرم (رابطه ی ۶) بدست آمد. همچنین از لحاظ تئوری، آلودگی آب بازیابی شده توسط اسید اکتانویک به حلالیت آبی آن محدود می‌شود که تقریباً ۰,۶۸ گرم در لیتر در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد است. در کاربردهای عملی، یک مرحله صیقل‌دهی (مثلاً جذب یا نانوفیلتراسیون) برای حذف این مواد آلی ناچیز قبل از قابل شرب بودن آب لازم است. از نظر تئوری، میزان دفع نمک نزدیک به ۱۰۰٪ است زیرا NaCl در فاز حلال آبگریز نامحلول است، به این معنی که تغییر شوری در خوراک مستقیماً با استخراج آب خالص مطابقت دارد.

در مقایسه با مطالعات قبلی که خلاصه‌ای از آنها در جدول ۱ نشان داده شده، هدف پژوهش حاضر توسعه یک حلال جدید یا گزارش بازده نهایی آب محصول نبوده است، بلکه تمرکز آن بر بررسی تجربی رفتار شوری-زمان در فاز آبی، اثر نسبت حلال به خوراک، اثر غلظت اولیه نمک و تحلیل بهره‌وری مصرف حلال در سامانه مبتنی بر اسید اکتانویک بوده است. این مقایسه نشان می‌دهد که اختلاف میان نتایج پژوهش حاضر و مطالعات پیشین می‌تواند به تفاوت در خواص حلال، ترکیب و شوری خوراک، نسبت حلال به محلول، دامنه دمایی، شدت اختلاط، زمان تماس و روش اندازه‌گیری آب استخراج‌شده مربوط باشد. همچنین، در برخی مطالعات ظرفیت حلال بر اساس حلالیت تعادلی آب گزارش شده است، در حالی که در پژوهش حاضر جرم آب منتقل‌شده در شرایط آزمایشگاهی و طی مرحله استخراج بررسی شده است.

در این مطالعه، سامانه در دمای 50°C و در نسبت‌های مختلف حلال به خوراک بررسی شد و روند داده‌ها نشان داد که سامانه در حدود ۱۴۰ دقیقه به حالت شبه تعادلی نزدیک می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزایش نسبت حلال الزاماً به بهبود خطی عملکرد منجر نمی‌شود و نسبت $SR=0.5$ از نظر بهره‌وری مصرف حلال مناسب‌تر بوده است. نتایج این مطالعه مستقیماً با بازده آب تولیدی یا دفع نمک مقالات دیگر یکسان نیستند. در حالی که بسیاری از مطالعات پیشین بر بهینه‌سازی بازده آب یا توسعه حلال‌های جدید متمرکز بوده‌اند، مطالعه حاضر با تمرکز بر تحلیل روند شوری-زمان، اثر نسبت حلال به خوراک و بهره‌وری مصرف حلال در سامانه مبتنی بر اسید اکتانویک، اطلاعات مکملی درباره رفتار عملیاتی این فرایند در مقیاس آزمایشگاهی ارائه می‌دهد.

از دیدگاه صنعتی، قابلیت استفاده از حلال در فرآیند DSE به عملکرد نمک‌زدایی آن محدود نمی‌شود و باید مجموعه‌ای از ویژگی‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ایمنی به‌طور هم‌زمان ارزیابی شود. قیمت، دسترسی پایدار، خلوص تجاری، پایداری حرارتی، ویسکوزیته، سمیت، زیست‌تخریب‌پذیری، خوردگی و قابلیت بازیابی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر انتخاب حلال هستند. اسیدهای چرب مورد استفاده در DSE، به دلیل تولید تجاری در مقیاس زیاد و فشار بخار نسبتاً پایین، از نظر تأمین و کاهش تلفات تبخیری می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای توسعه صنعتی باشند. فشار بخار پایین، به‌ویژه در مقایسه با حلال‌های آلی فرار، می‌تواند خطر انتشار ترکیبات آلی به محیط و نیاز به تجهیزات کنترل بخارات را کاهش دهد.

با وجود این مزایا، افزایش طول زنجیره کربنی حلال معمولاً با افزایش گرانشی همراه است. گرانشی بالا می‌تواند انتقال جرم بین فاز آب شور و حلال را محدود کرده و موجب افزایش زمان اختلاط و توان مصرفی شود. بنابراین، انتخاب حلال بهینه باید بر اساس یک موازنه میان حلالیت آب، میزان دفع نمک، گرانشی، سرعت جدایش فازی، پایداری چرخه‌ای و هزینه بازیابی انجام شود. در مقیاس صنعتی، فرآیند DSE باید در یک مدار بسته طراحی شود تا حلال پس از مرحله سرمایش و آزادسازی آب، به واحد استخراج بازگردانده شود. استفاده از مبدل‌های حرارتی برای بازیابی گرمای محسوس، تماس‌دهنده‌های پیوسته، تجهیزات جدایش سریع فازها و سامانه‌های پایش نشت و تلفات حلال می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و هزینه عملیاتی داشته باشد.

همچنین، حتی در صورت پایین بودن انحلال پذیری حلال در آب، انتقال جزئی حلال به جریان آب محصول یا آب شور اجتناب ناپذیر نیست و باید در طراحی صنعتی اندازه گیری و کنترل شود. بنابراین، آزمایش های آینده باید شامل بررسی تلفات حلال، خلوص آب تولیدی، تغییر خواص حلال پس از چندین چرخه استخراج-بازتولید، سمیت جریان های خروجی و ارزیابی چرخه عمر باشد. نتایج مطالعه حاضر در مقیاس آزمایشگاهی به دست آمده اند؛ از این رو، تأیید نهایی به آزمایش های پیوسته در مقیاس پایلوت و تحلیل فنی-اقتصادی نیاز دارد.

امکان صنعتی سازی حلال به ارزیابی کامل اقتصادی، زیست محیطی و ایمنی، شامل محاسبه مصرف انرژی، و برآورد هزینه تجهیزات و عملکرد در چرخه های طولانی در مقیاس پایلوت نیازمند است که در مطالعه حاضر انجام نشده است، و به عنوان زمینه های اصلی پژوهش های آینده پیشنهاد می شود.

۵- چشم انداز پژوهش های آینده و توسعه حلال ها

اسید اکتانویک در این مطالعه به عنوان یک حلال آلی جهت دار برای بررسی اولیه انتقال آب از فاز شور به فاز آلی استفاده شد. این حلال به دلیل قابلیت افزایش حلالیت آب در دماهای بالاتر، امکان آزادسازی آب در هنگام سرمایش، دسترسی تجاری، و فراریت پایین، گزینه ای مناسب برای مطالعات نمک زدایی محسوب می شود. با این حال، ظرفیت محدود انتقال آب، نیاز به اختلاف دمایی مشخص برای جذب و آزادسازی آب، احتمال انتقال بخشی از حلال به فاز آبی و ضرورت بررسی پایداری آن در چرخه های متوالی، از جمله چالش های مهم استفاده از اسیدهای چرب در مقیاس بزرگ تر هستند.

تحقیقات جدید نشان داده اند که توسعه حلال های جایگزین می تواند عملکرد فرایند استخراج حلالی جهت دار را بهبود دهد. برای مثال، استفاده از مایع یونی می تواند در مقایسه با اسیدهای چرب، ظرفیت انتقال آب و بازده نمک زدایی بیشتری ایجاد کند. مطالعات جدید نشان می دهد که با تنظیم ساختار کاتیون و آنیون، می توان حلال هایی با حلالیت آب بیشتر، حلالیت نمک کمتر، فراریت پایین و قابلیت عملکرد در دماهای عملیاتی پایین تر طراحی کرد [۳۵].

یکی دیگر از مسیرهای جدید، استفاده از حلال های آمینی جهت دار است. این حلال ها با هدف افزایش بازیابی آب، جداسازی نمک و کاهش رسوب گذاری در آب شورهای بسیار شور و فوق اشباع توسعه یافته اند. بنابراین، حلال های آمینی می توانند برای خوراک هایی که مستعد تشکیل رسوب و جرم گرفتگی هستند، گزینه ای قابل بررسی باشند [۳۹]. با این حال، ارزیابی سمیت، پایداری شیمیایی، قیمت، قابلیت جداسازی کامل از آب و امکان بازیافت این حلال ها باید پیش از هرگونه کاربرد عملیاتی به طور کامل انجام شود.

بر اساس این مطالعات، اهداف اصلی پژوهش های آینده عبارتند از:

۱. غربالگری حلال های جدید: شامل مایعات یونی، حلال های آمینی و حلال های آلی زیست پایه؛
۲. مقایسه مستقیم اسید اکتانویک با اسید دکانویک و حلال های یونی: از نظر ظرفیت انتقال آب، دفع نمک و مصرف انرژی؛
۳. بهینه سازی ساختار حلال: برای افزایش حلالیت آب و هم زمان کاهش حلالیت یون های نمک؛
۴. اندازه گیری کمی تلفات حلال: در فاز آبی و تعیین خلوص آب استخراج شده؛

۵. بررسی پایداری حلال در چرخه‌های متوالی استخراج-سرمايش-بازيافت؛
۶. مطالعه اثر ناخالصی‌های واقعی آب‌شور: از جمله یون‌های چندظرفیتی، مواد آلی و ذرات معلق؛
۷. بررسی انتقال جرم، اختلاط و زمان جدایش فازی: در سامانه‌های پیوسته و نیمه‌پیوسته؛
۸. ارزیابی انرژی و اقتصادی فرایند: با تمرکز بر استفاده از گرمای اتلاف صنعتی یا انرژی خورشیدی کم‌دما؛
۹. بررسی کنترل رسوب‌گذاری و جرم‌گرفتگی: در خوراک‌های با شوری بالا؛
۱۰. توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده: برای ارتباط دادن ساختار حلال، دما، نسبت حلال به خوراک و میزان بازیابی آب.

در نتیجه، مطالعه حاضر می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای ارزیابی اولیه عملکرد اسید اکتانوئیک در نمک‌زدایی به‌روش استخراج با حلال جهت‌دار در نظر گرفته شود. اندازه‌گیری موازنه جرم کامل، خلوص آب، تلفات حلال، مصرف انرژی و عملکرد چرخه‌ای، می‌توانند موضوعات مطالعات آینده باشند تا امکان انتقال این روش از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس نیمه‌صنعتی را ارزیابی کنند.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد فرایند نمک‌زدایی با استخراج حلال جهت‌دار (DSE) با استفاده از اکتانوئیک اسید به عنوان حلال جهت‌سازی آب از محلول‌های آب‌نمک با غلظت‌های ۲/۵ و ۵ درصد وزنی مورد ارزیابی تجربی قرار گرفت. اثر نسبت‌های مختلف حلال به خوراک و همچنین زمان اختلاط بر انتقال جرم آب، میزان افزایش شوری فاز آبی، بازده استخراج آب و بهره‌وری حلال در یک سیستم ناپیوسته بررسی شد. علاوه بر این، رفتار سامانه در دستیابی به شرایط شبه‌تعادلی در غلظت‌های مختلف خوراک مقایسه و تحلیل گردید. بررسی تغییرات شوری محلول در طول زمان نشان داد که فرآیند استخراج با حلال جهت‌دار دارای رفتار زمانی مشخصی است که با الگوی متداول فرآیندهای انتقال جرم در سیستم‌های مایع-مایع مطابقت دارد. در مراحل ابتدایی تماس دو فاز، کاهش شوری با سرعت قابل توجهی رخ می‌دهد؛ در حالی که با گذشت زمان، نرخ تغییرات به تدریج کاهش یافته و سیستم به سمت یک وضعیت شبه‌تعادلی حرکت می‌کند. این رفتار را می‌توان به کاهش تدریجی اختلاف پتانسیل شیمیایی و گرادیان غلظت بین دو فاز نسبت داد.

در ابتدای فرآیند، اختلاف غلظت بین فاز آبی و فاز حلال در بیشترین مقدار خود قرار دارد و در نتیجه نیروی محرکه انتقال جرم نیز حداکثر است. این شرایط موجب انتقال سریع‌تر مولکول‌های آب از فاز آبی به فاز آلی می‌شود و کاهش قابل توجهی در شوری محلول مشاهده می‌گردد. با پیشرفت فرآیند و انتقال بخشی از آب به فاز حلال، اختلاف غلظت بین دو فاز کاهش یافته و به تبع آن نیروی محرکه انتقال جرم نیز تضعیف می‌شود. در این مرحله، مقاومت‌های نفوذی در لایه مرزی بین دو فاز نقش غالب‌تری در کنترل فرآیند ایفا می‌کنند.

با افزایش شوری خوراک، و با توجه به عدم انتقال نمک به فاز آلی، می‌توان نتیجه گرفت که آب توسط حلال اکتانوئیک اسید استخراج شده است. خوراک ۵ درصد وزنی نمک در همه ی نسبت‌های حلال آزمایش شده پس از ۱۴۰ دقیقه

تقریباً به میزان ثابتی از شوری می رسد که می تواند بیانگر حالت شبه تعادلی باشد. اما خوراک ۲/۵ درصد وزنی، در این مدت زمان حالت تعادلی نشان نمی دهد، زیرا به دلیل بالاتر بودن میزان فعالیت آب و ظرفیت بیشتر جذب آب توسط حلال، رسیدن به حالت تعادل زمان بیشتری می برد.

تغییر نسبت حلال تاثیر چندانی بر افزایش استخراج آب توسط حلال در مراحل اولیه فرایند ندارد. بنابراین می توان در فرایندهای با مدت زمان های کوتاهتر، نسبت حلال ۰/۵ را به صرفه تر از سایر نسبت های حلال دانست. اگرچه با گذشت زمان تفاوت میزان استخراج در نسبت حلال مختلف مشخص است. با بررسی درصد افزایش شوری معلوم شد که افزایش نسبت حلال همواره به نفع افزایش درصد شوری نیست و در این شرایط بالا بردن نسبت حلال تا میزان بهینه $SR=1/00$ می تواند تاثیر مثبتی بر افزایش استخراج بگذارد. همچنین مشاهده شد که افزایش غلظت اولیه نمک از ۲/۵٪ به ۵٪ وزنی موجب کاهش راندمان نهایی استخراج آب از حدود ۱۷/۸٪ به بازه ۱۱/۵٪-۱۳/۴٪ شده است. این کاهش راندمان ناشی از افزایش فشار اسمزی محلول و کاهش فعالیت شیمیایی آب در حضور غلظت های بالاتر املاح است که نیروی محرکه انتقال آب به فاز آلی را تضعیف می کند. افت نسبی راندمان در نسبت $SR=1/50$ می تواند به افزایش مقاومت نفوذی، افزایش گرانی و کاهش کارایی اختلاط در حجم های بالاتر فاز آلی مربوط باشد. در نهایت، با بررسی درصد بهره وری حلال، مشاهده شد که از این منظر نسبت حلال برابر ۰/۵ می تواند با کمترین میزان مصرف حلال، بیشترین میزان استخراج آب را نشان دهد. افزایش بیش از حد حجم حلال، با وجود افزایش سطح تماس اسمی، می تواند منجر به کاهش شدت برهم کنش مؤثر میان دو فاز، افزایش ضخامت لایه مرزی بین فازی، افزایش مقاومت مؤثر انتقال جرم و کاهش بهره وری گردد. این نتیجه نشان می دهد که استفاده از مقادیر بسیار زیاد حلال لزوماً به افزایش کارایی فرایند منجر نمی شود و حتی می تواند از دیدگاه اقتصادی و عملیاتی نامطلوب باشد.

در مجموع، یافته های این مطالعه نشان می دهد که فرایند استخراج با حلال جهت دار دارای قابلیت قابل توجهی برای نمک زدایی از آب های شور است، مشروط بر آنکه شرایط عملیاتی به طور مناسب بهینه سازی شوند. همچنین نتایج تأکید می کند که ارزیابی عملکرد چنین فرایندهایی باید بر اساس ترکیب هم زمان راندمان استخراج و بهره وری مصرف حلال انجام گیرد، زیرا صرفاً تمرکز بر افزایش راندمان می تواند به انتخاب شرایطی منجر شود که از نظر اقتصادی و عملیاتی مطلوب نباشد.

در مطالعه حاضر، مصرف انرژی در مرحله استخراج و چرخه کامل DSE اندازه گیری یا محاسبه نشد. به طور مشخص، گرمای لازم برای افزایش دمای حلال و محلول، بار سرمایشی مرحله آزادسازی آب، انرژی اختلاط و پمپاژ، انرژی جداسازی فازها، بازیابی و بازچرخانی حلال و اتلاف های حرارتی تعیین نشدند. بنابراین، بر اساس نتایج این مطالعه نمی توان درباره مصرف ویژه انرژی DSE یا برتری انرژی آن نسبت به RO و MD^۱ نتیجه گیری کمی کرد. امکان استفاده از گرمای کم درجه یا اتلافی فقط یک مزیت بالقوه است و تحقق آن به بازیافت حرارت، طراحی چرخه، ظرفیت استخراج آب، میزان بازیابی حلال و شرایط عملیاتی وابسته خواهد بود.

^۱ Membrane Distillation

به منظور توسعه بیشتر این فناوری و افزایش کارایی آن در کاربردهای عملی، انجام مطالعات تکمیلی در زمینه‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

- بررسی دقیق تعادل فازي سامانه آب-نمک-حلال جهت‌دار و استخراج پارامترهای ترمودینامیکی مرتبط
- مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم به منظور پیش‌بینی رفتار زمانی فرآیند در شرایط عملیاتی مختلف
- بررسی آزمایشگاهی میزان باقی‌ماندن حلال در فازهای آبی، تغییر ظرفیت استخراج و خلوص آب تولیدی در هر چرخه و ارزیابی پایداری فیزیکی و شیمیایی حلال
- مطالعه اثر شرایط هیدرودینامیکی نظیر سرعت هم‌زدن و شدت اختلاط بر ضریب انتقال جرم بین فازها
- انجام تحلیل کامل انرژی و انرژی برای چرخه DSE و مقایسه آن با فناوری‌های متداول نمک‌زدایی
- ارزیابی عملکرد حلال‌های جهت‌دار با ساختارهای مولکولی متفاوت به منظور افزایش ظرفیت استخراج آب
- بررسی امکان بازیافت و استفاده مجدد از حلال در چرخه‌های متوالی استخراج
- انجام مطالعات مقیاس‌پذیری و طراحی پایلوت صنعتی برای ارزیابی قابلیت کاربرد فرآیند در مقیاس بزرگ

۷- مراجع

References

- [1] Agrahari, G. K., Vignesh, M. S., & Nigam, K. D. P. (2024). Novel devices for the extraction and recovery of rare-earth metals through recycling of waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(1), 109–137. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01862-x>
- [2] Alotaibi, S., Ibrahim, O. M., Luo, S., & Luo, T. (2017). Modeling of a continuous water desalination process using directional solvent extraction. *Desalination*, 420, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.004>
- [3] Angelakis, A. N., Valipour, M., Ahmed, A. T., Tzanakakis, V., Paranychianakis, N. V., Krasilnikoff, P., & Zheng, X. Y. (2021). Water conflicts: From ancient to modern times. *Water*, 13(16), 2222. <https://doi.org/10.3390/w13162222>
- [4] Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712–717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>

- [5] Mezher, T., Fath, H., Abbas, Z., & Khaled, N. (2011). Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *Desalination*, 266(1–3), 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.035>
- [6] Caldera, U., & Breyer, C. (2020). Strengthening the global water supply through a strategy combining seawater desalination and renewable energy. *Energy*, 200, 117507. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117507>
- [7] Mayor, B. (2019). The water–energy nexus in desalination: A review of energy consumption, costs and the potential for renewable energy. *Desalination*, 457, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.01.026>
- [8] Nair, M., & Kumar, D. (2013). Water desalination and challenges: The Indian scenario. *Desalination and Water Treatment*, 51(10–12), 2030–2040. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.734685>
- [9] Baniamerian, H., Shokrollahzadeh, S., & Safavi, M. (2019). Biofouling in seawater reverse osmosis desalination membranes: A review. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 18(104), 79–100 . [In Persian].
- [10] Zhao, S., Zou, L., & Mulcahy, D. (2012). Brackish water desalination by a hybrid forward osmosis–nanofiltration system with divalent draw solute. *Journal of Membrane Science*, 409–410, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.04.013>
- [11] Cheng, C., Li, P., & Wang, X. (2015). A novel membrane-free directional solvent extraction desalination process using octanoic acid: Thermal and economic assessment. *Desalination*, 372, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.06.012>
- [12] Nazari, A. A., Khatibi, M., Ashrafizadeh, S. N., & Duval, J. F. L. (2026). Electrohydrodynamic ion regulation in soft-coated nanochannels: A comparative assessment of geometry effects on desalination performance. *Chemical Engineering Journal Advances*, 26, 101071. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.101071>
- [13] Shahhoseini, P., Khatibi, M., & Ashrafizadeh, S. N. (2026). Ionic transport behavior in pH-responsive heterojunction nanofluidic membranes. *Chemical Engineering Science*, 325, 123446. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2026.123446>
- [14] Nazari, A. A., Khatibi, M., & Ashrafizadeh, S. N. (2026). Synergistic role of geometry and surface charge in bipolar nanochannels for efficient desalination. *Electrochimica Acta*, 549, 148020. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.148020>
- [15] Dolatshahi, R., Khatibi, M., & Ashrafizadeh, S. N. (2026). Smart nanofluidic transistors for high-efficiency blue energy harvesting: The hidden role of ion hydration. *Langmuir*, 42(4), 3656–3671. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c06294>

- [16] Dolatshahi, R., Khatibi, M., & Ashrafizadeh, S. N. (2025). Salinity gradient energy harvesting via tuned ionic nanotransistor geometries. *Physics of Fluids*, 37(10), 102009. <https://doi.org/10.1063/5.0294448>
- [17] Dartoomi, H., Khatibi, M., Duval, J. F. L., & Ashrafizadeh, S. N. (2025). Surface wrinkling and roughness engineering in polyelectrolyte-coated nanofluidic channels for enhanced osmotic energy harvesting. *Desalination*, 616, 119378. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119378>
- [18] Shahhoseini, P., Khatibi, M., Ashrafizadeh, S. N., & Duval, J. F. L. (2025). Joule heating in nanofluidic membranes: Influence of soft surface layer charge distribution and implications for ion selectivity, ionic current rectification and electroosmotic flow. *Electrochimica Acta*, 536, 146756. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146756>
- [19] Nazari, A. A., Khatibi, M., Yeh, L.-H., & Ashrafizadeh, S. N. (2025). Soft layer charge modulation in nanofluidic membranes: A pathway to enhanced desalination. *Desalination*, 614, 119153. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119153>
- [20] Treybal, R. E., (1980). “Mass-Transfer Operations”, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 800.
- [21] Pourtalebi, B., Abdoli, S. M., & Akbari, A. (2023). Modeling and simulation of Zn heavy metal removal from wastewater in hollow fiber membrane contactor. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 22(1), 105–117. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/ijche.2022.366584.1245>
- [22] Dadfarnia, S., & Shabani, A. M. H. (2010). Recent development in liquid phase microextraction for determination of trace level concentration of metals—A review. *Analytica Chimica Acta*, 658(2), 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.11.022>
- [23] Hellé, G., Mariet, C., & Cote, G. (2014). Microfluidic liquid–liquid extraction: From single drops to multiple droplets. *Microfluidics and Nanofluidics*, 17(6), 1113–1128. <https://doi.org/10.1007/s10404-014-1406-y>
- [24] Hellé, G., Mariet, C., & Cote, G. (2012). Microfluidic solvent extraction of actinides: A comparative study. *Procedia Chemistry*, 7, 679–684. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.10.103>
- [25] Geankoplis, C. J., (2003). “Transport Processes and Separation Process Principles: Includes Unit Operations”, 4th ed., Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1026.
- [26] Cheng, P., Guo, J., & Luo, T. (2015). Low-grade thermal energy driven desalination by directional solvent extraction: A simulation study. *Applied Energy*, 154, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.006>
- [27] Rish, D., Luo, K., Kurtz, B., & Luo, T. (2014). Exceptional ion rejection ability of directional solvent for non-membrane desalination process. *Applied Physics Letters*, 104(2), 024102. <https://doi.org/10.1063/1.4862324>

- [28] Bajpayee, A., Luo, T., Muto, A., & Chen, G. (2011). Very low temperature membrane-free desalination by directional solvent extraction. *Energy & Environmental Science*, 4(5), 1672–1675. <https://doi.org/10.1039/C1EE01027A>
- [29] Bajpayee, A. (2012). Directional solvent extraction desalination, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States.
- [30] Fowler, R., Rish, D., & Luo, T. (2012). Water desalination using directional solvent extraction with octanoic acid: An experimental study. *Desalination*, 295, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.03.021>
- [31] Booth, C. L., Rish, D., & Luo, T. (2011). Effect of fatty acid chain length on water solubility and desalination efficiency in directional solvent extraction. *Fluid Phase Equilibria*, 308(1–2), 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.06.017>
- [32] Rish, D., Booth, C. L., & Luo, T. (2014). Mutual solubility of decanoic acid and water mixtures under desalination conditions. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 74, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2014.02.015>
- [33] Luo, X., Guo, J., & Luo, T. (2017). Directional solvent extraction desalination driven by industrial waste heat: Experimental and modeling analysis. *Applied Thermal Engineering*, 124, 880–891. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.077>
- [34] Alotaibi, F. M., Ibrahim, O. M., & Luo, T. (2017). Energy optimization of a directional solvent extraction desalination plant. *Separation and Purification Technology*, 188, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.019>
- [35] Guo, J., Luo, X., & Luo, T. (2021). Ionic liquid-based directional solvent extraction for hypersaline brine desalination using [emim][Tf₂N]. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128601. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128601>
- [36] McNally, D. M., & McCutcheon, J. R. (2020). Directional solvent extraction desalination using decanoic acid: Process thermodynamics and salt partitioning. *Journal of Membrane Science*, 610, 118240. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118240>
- [37] Sanap, D. B., Kadam, K. D., Narayan, M., Kasthurirangan, S., Nemade, P. R., & Dalvi, V. H. (2015). Directional solvent extraction desalination: Role of solvent properties and phase behavior. *Desalination*, 357, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.023>
- [38] Alotaibi, S., Ibrahim, O. M., Luo, S., & Luo, T. (2017). Thermodynamic performance limit of directional solvent extraction desalination. *Desalination*, 426, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.038>
- [39] Zhang, Y., Jia, L., Zhao, J., Chen, L., & Wang, Y. (2024). Directional amine-based solvent extraction for simultaneous enhanced water recovery, salt separation and effective descaling from

hypersaline brines. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 18(3), 32.
<https://doi.org/10.1007/s11783-024-1792-7>