

کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل‌سازی سامانه نمک‌زدایی فراصوت

بهنام حسینقلی لو^۱، احمد بناکار*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*مسئول مکاتبه: ah_banakar@modares.ac.ir

چکیده

به دلیل کاهش منابع آب شیرین، رشد روزافزون جمعیت، افزایش فعالیت‌های صنعتی و تغییر استانداردهای زندگی مردم، افزایش مصرف آب و به تبع آن، بحران آب به سرعت در جهان و به‌خصوص در ایران در حال رشد است. انواع سیستم‌های نمک‌زدایی از آب ساخته و استفاده شده است که هرکدام معایب و مزایای خاص خود را دارند که در اکثر این سیستم‌ها، میزان مصرف انرژی بالا مشکل اساسی به حساب می‌آید. ترکیب دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن با فناوری فراصوت، یکی از تکنولوژی‌های جدید برای بهبود وضعیت مصرف انرژی این دستگاه‌ها است. در این تحقیق شبیه‌سازی سیالاتی-دینامیکی سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت توسط نرم‌افزار ANSYS CFX انجام پذیرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌های تجربی صحت‌گذاری شدند. دو نوع سیال یکی هوای داغ ورودی به سامانه و دیگری سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl به عنوان ورودی‌های سامانه در شبیه‌سازی عددی تعریف شدند. هدف اصلی از این تحقیق بررسی میزان املاح موجود در خروجی سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت بود با توجه به نتایج عددی مقدار این املاح در خروجی تقریباً مقدار ۲٪ از کل املاح اولیه موجود در آب بود. همین‌طور نتیجه شد که به منظور عملکرد بهینه آب‌شیرین‌کن فراصوت باید مقدار سرعت هوای داغ ورودی به سامانه کاهش یابد. به‌منظور صحت‌گذاری از دماهای ورودی و خروجی سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl استفاده شد که اختلاف بین نتیجه حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتیجه حاصل از آزمایش تجربی، مقدار ۱۵٪ شد که این مقدار خطا نشان می‌دهد که می‌توان از نتایج شبیه‌سازی با اطمینان استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ANSYS CFX، تحلیل عددی، فراصوت، صحت‌گذاری، نمک‌زدایی

Computational Fluid Dynamics (CFD) Application for Ultrasonic Desalination System Modeling

Behnam Hosseingholilou^{1*} and Ahmad Benakar¹

Accepted: 8 Nov 2021 Received: 18 Jan 2022

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agricultural, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

*Corresponding author: ah_banakar@modares.ac.ir

Abstract

Due to the reduction of fresh water resources, increasing population growth, increasing industrial activities and changing people's living standards, water consumption increases consequently and water crisis is rapidly growing around the world, especially in Iran. A variety of desalination systems have been developed and used with their common advantages and disadvantages. High energy consumption is a major problem in most of the desalination systems. Linking desalination systems with ultrasound technology is one of the novel technologies to improve the energy consumption of these systems. In this research, fluid-dynamic simulation of ultrasound desalination system was performed by ANSYS CFX software. The results of numerical simulations were validated with the results of experimental tests. Two types of fluids: hot air entering the system and a mixture of vapor and NaCl were defined as the system inputs in the numerical simulation. Investigating the solutes amount in system's output of the ultrasound desalination system was the aim of this research. It was shown that according the numerical results, the amount of these solutes in the output was approximately 2% of the total primary solutes in the water. It was also concluded that in order to increase the efficiency of the system, the hot air amount entering the system should be decreased. In order to validate the inlet and outlet temperature, fluid containing a mixture of vapor and NaCl was used. The difference in results of the numerical simulation and the experimental tests was just 15%, which indicates that the simulation results are trustful.

Keywords: ANSYS CFX, CFD, Desalination, Ultrasound, Validation

How to cite:

Hosseingholilou., B. and Benakar, A. 2022. *Computational Fluid Dynamics (CFD) Application for Ultrasonic Desalination System Modeling*. Journal of Agricultural Mechanization 6 (4): 1-10.

۱- مقدمه

آب از مواد ضروری برای سیستم زندگی و بقای انسان روی کره زمین است. در سراسر دنیا حدود ۷۸۰ میلیون نفر از مردم به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند و کیفیت آب آشامیدنی ۲/۶ میلیارد نفر، پایین‌تر از استانداردهای بهداشتی بوده و همینطور تعداد ۱/۱ میلیارد نفر از مردم، امکانات لازم برای بهبود کیفیت آب آشامیدنی خود را ندارند (Hosseingholilou et al., 2019). بهره‌برداری از منابع آب شیرین طبیعی، آلودگی منابع سطحی و زیرزمینی آب توسط میکروآلاینده‌ها به دلیل افزایش فعالیت‌های انسانی در صنعت، محصولات مصرف کننده و کشاورزی، همینطور با وجود کمبود منابع آب شیرین و رشد روز افزون جمعیت جهان، افزایش تقاضا برای آب آشامیدنی سالم و پاک به دلیل تغییر شرایط و استانداردهای زندگی مردم، در میان مردم و ملل مختلف از لحاظ تامین آب آشامیدنی مورد نیاز مردم و پیدا کردن منابع جدید و جایگزین آب شیرین، نگرانی عمده‌ای را ایجاد کرده است (Al-Fulaij et al., 2011; Cárcel et al., 2012). پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۳۰ میلادی نشان می‌دهد که میزان تقاضا برای مصرف آب در کل جهان، حدود ۴۰٪ بیشتر از منابع موجود آب شیرین قابل دسترس حال حاضر می‌باشد که شدت مصرف آن را نشان می‌دهد (Congjie & Guohua, 2004). بنابراین انسان‌ها مجبور هستند که از فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا (به عنوان منبع جدید آب شیرین) به منظور تامین آب آشامیدنی مورد نیاز در حد کیفیت استاندارد آشامیدن استفاده کنند (Hosseingholilou et al., 2016). آب شیرین‌کن‌ها این امکان را برای تهیه آب شیرین فراهم می‌کنند، در غیر این صورت آب مورد نیاز کشاورزی، صنعتی، خدماتی و... در دسترس نخواهد بود (Das et al., 2014).

بر اساس مطالعات انجام شده توسط بانک جهانی آب^۱، نمک‌زدایی آب‌های شور در کنار صرفه‌جویی و کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع جدید آب در سال ۲۰۵۰ میلادی معرفی شده‌اند (Sing-Foong, 2004).

استفاده از آب شیرین‌کن در جهان و به‌خصوص در مناطق خشک حوزه مدیترانه که مردم در آن مکان‌ها به دلیل کمبود و فقدان آب تازه و یا وجود آب با غلظت بالای نمک رنج می‌برند، افزایش یافته است (Delyannis & Belessiotis, 2010). در دنیا دو روش نمک‌زدایی حرارتی و غشایی بیشتر توسعه یافته‌اند و استفاده از آن‌ها روزه‌روز در حال افزایش است. در فرایندهای گرمایی، تقطیر آب دریا با استفاده از منبع انرژی گرمایی انجام می‌شود که در این فرایندها از انرژی گرمایی به طور مستقیم استفاده می‌شود و محلول تغییر فاز می‌دهد که شامل روش‌هایی مانند تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)^۲، جوشیدن چند اثره (MEB)^۳، فشرده‌سازی بخار (VC)^۴ یا فشردن گرمایی بخار (TVC)^۵ و فشردن مکانیکی بخار (MVC)^۶

هستند (Kalogirou, 2009). نمک‌زدایی با فرایندهای غشایی روشی است که در آن تغییر فاز صورت نمی‌گیرد، که خود شامل روش‌های اسمز معکوس^۷ و الکترودیالیز^۸ است. در روش اول برای به راه انداختن پمپ نیاز به الکتریسیته است که فشار بر روی محلول را به میزان مورد نیاز افزایش دهد و میزان این فشار به غلظت آب شور بستگی دارد که اغلب در حدود ۷۰ bar است (García-Rodríguez, 2003). در حال حاضر سه نوع فرآیند نمک‌زدایی به صورت تجاری برای واحدهای نمک‌زدایی آب دریا در مقیاس بزرگ وجود دارد که شامل فرآیند چند مرحله‌ای با تبخیر ناگهانی (MSF)، فرآیند تقطیر چند مرحله‌ای (MED) و اسمز معکوس (RO) است. تفاوت عمده میان این روش‌ها شامل تفاوت در انرژی مورد نیاز ورودی این فرایندها می‌باشد، به این صورت که در فرآیند MED و MSF انرژی حرارتی و برای فرآیند RO انرژی الکتریکی مورد نیاز است.

جدا کردن نمک از آب یک فرآیند غیرخودبخودی است که نیاز به صرف انرژی زیادی دارد، مصرف انرژی زیاد باعث عدم توسعه و گسترش استفاده از آب شیرین‌کن‌ها شده است. یکی از روش‌ها برای کاهش انرژی مصرفی در فرآیند نمک‌زدایی، ترکیب آب شیرین‌کن با فراصوت است (Delyannis & Belessiotis, 2010).

در امواج فراصوت، انرژی به وسیله ارتعاش مولکول‌ها در محیطی که امواج در آن محیط منتشر شده‌اند، منتقل می‌شود (Bello et al., 2005). التراسوند توسط دو روش تولید می‌شود؛ روش اول مگنتواستریکتیو می‌باشد که انرژی توسط سیم پیچ مغناطیسی متصل به یک قطعه ارتعاشی (مثل نیکل) به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. شدت امواج تولید شده در این روش کم است و بیشتر کاربرد آزمایشگاهی دارد. روش دوم، پیزوالکتریک است که در این روش انرژی الکتریکی توسط کریستال پیزوالکتریک متصل به یک قطعه ارتعاشی (مثل پروپ)، به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود (Pilli et al., 2011).

کاویتاسیون پدیده شکل‌گیری، رشد و فروپاشی میکروحباب‌ها یا حفره‌ها در مدت زمان بسیار کم (میلی ثانیه)، در یک مایع است. کاویتاسیون اگر در اثر عبور امواج التراسونیک ایجاد شود، کاویتاسیون آکو ستیک و اگر ناشی از تغییرات فشار در مایع باشد، کاویتاسیون هیدرودینامیکی می‌گویند. با فروپاشی حفره‌ها، انرژی بسیار زیادی تولید می‌شود که با توجه به تئوری Hot spot، در این موقع فشار می‌تواند به ۵۰۰-۱۰۰۰۰ اتمسفر و دما به ۳۰۰۰-۵۰۰۰ درجه کلون برسد (Patist et al., 2008).

هنگامی که فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا به کمک تکنولوژی التراسوند انجام می‌گیرند، باعث تقویت بازده، کاهش انرژی کل مصرفی فرایندها و همچنین عدم ایجاد آلودگی زیست‌محیطی می‌شود. در فرایندهای نمک‌زدایی آب دریا به دلیل مصرف انرژی

^۵Thermal Vapor Compression^۶Mechanical Vapor Compression^۷Reverse Osmosis^۸Electro Dialysis^۱World Bank Water^۲Multi Stage Flash^۳Multiple Effect Boiling^۴Vapor compression

کننده که رشته‌های جدا کننده با زاویه‌های گوناگون نسبت به جریان ورودی تنظیم شده بودند، انجام شده است. نتایج نشان داد که تنظیم جدا کننده‌های کانال تغذیه با جهت جریان، تاثیر زیادی بر روی تولید الگوهای جریان ثانویه در میان کانال‌های دارای جدا کننده است. بهینه‌سازی جهت جدا کننده‌های تغذیه می‌تواند باعث تولید الگوی جریان مطلوب در غشا شود که افزایش عملکرد غشا را به همراه خواهد داشت (Kentish & Ashokkumar, 2011). محققان پژوهشی را با عنوان شبیه‌سازی CFD سیال و شدت قطبیت در کانال‌های دارای لایه جدا کننده که در آب شیرین‌کن‌ها استفاده می‌شوند، انجام دادند. شبیه‌سازی به منظور مطالعه علت افزایش تنش برشی بر روی سطح غشا، کاهش رسوب نمک بر روی سطح غشا و همچنین نظارت بر عملکرد انتقال جرم در سرتاسر غشا، انجام گرفت. نتایج نشان داد که لایه جدا کننده زیگزگی از لحاظ حذف رسوب نمک از سطح غشا و حفاظت از آن، نسبت به یک نوع غوطه‌ور، مقرون به صرفه بوده و همچنین باعث افزایش عملکرد دستگاه آب شیرین‌کن می‌شود (Li et al., 2016). مطالعه دیگری به منظور شبیه‌سازی الگوهای جریان در یک دستگاه تجاری حجم محدود دارای کانال حاوی جدا کننده که رشته‌های جدا کننده در سه ترتیب متفاوت تنظیم شده بودند، انجام گرفت. نتایج نشان داد که انتخاب دقیق و مناسب فاصله رشته‌های عرضی و محل آن‌ها، برای بهینه‌سازی جدا کننده بسیار مهم است. با توجه به شبیه‌سازی، هندسه مطلوب‌تر با قرار دادن جدا کننده‌های عرضی به صورت معلق در کانال و کاهش فاصله بین آنها است. کاهش فاصله بین آن‌ها باعث کاهش تنش برشی بیشینه شده و جریان مخالف فعال‌تری را ایجاد می‌کند که ممکن است باعث بهبود انتقال جرم از روی سطح غشاء شود. همین‌طور نتیجه شد که کاهش فاصله عرضی می‌تواند باعث افزایش قابل توجه افت فشار کانال و در نتیجه آن باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی شود (Noori Rahim Abadi & Koughikamali, 2016). پژوهشی تحت عنوان بررسی مدل ریاضی به دست آمده به کمک CFD برای پیش‌بینی عملکرد کمپرسور حرارتی بخار یک آب-شیرین‌کن تقطیری چند اثره (MED) در سال ۲۰۱۶ میلادی در دانشگاه گیلان انجام پذیرفت. اطلاعات به دست آمده از الگوریتم ریاضی با اطلاعات صنعتی اعتبارسنجی شدند. تاثیر پارامترهای عملکردی مختلف و پارامترهای هندسی در کارایی کمپرسور مورد مطالعه قرار گرفتند و نتایج حاصل شده از این قرار بودند که: (۱) رابطه‌ای برای محاسبه بازده مخلوط کردن بر پایه مدل‌سازی CFD به دست آمد، (۲) افزایش دمای تغذیه منجر به کاهش سرعت جریان بخار کل ورودی و همچنین کوچک‌تر شدن دهانه نازل به صورت خطی می‌شود، (۳) افزایش سرعت جریان محصول نهایی منجر به افزایش سرعت جریان بخار کل شده تا منبع حرارتی بالاتری آماده شود و در نتیجه باعث بالا رفتن سرعت جریان تقطیر می‌شود، (۴) دمای بخار محرک بالاتر کمپرسور حرارتی باعث بی‌نظمی (آنتالپی) بیشتر می‌شود و (۵) شبیه‌سازی CFD نشان داد که با وقوع فرآیند مرکزی در آغاز تزریق نازل، کسر جرمی مایع و شعاع قطرات تولیدی افزایش می‌یابد، همچنین فاز مایع در ناحیه مساحت ثابت کمپرسور حرارتی به‌طور کامل ناپدید می‌شود (Shirazi et al., 2016). مدل‌سازی دینامیکی

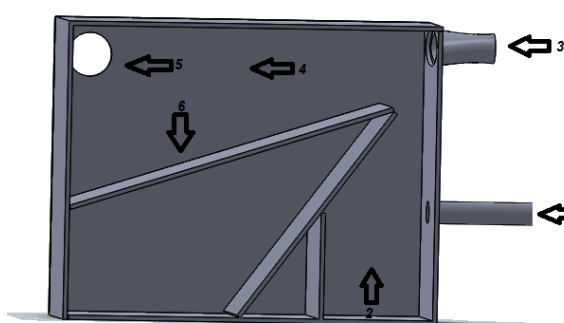
زیادی که دارند، تکنولوژی التراسوند به دلیل تقویت فرآیند تبخیر و تقطیر به وسیله تقویت انتقال جرم و حرارت، باعث سهولت استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع انرژی مصرفی فرایندهای نمک‌زدایی آب دریا شده و در نتیجه هزینه‌های آب شیرین‌کنی را کاهش می‌دهد (Fritzmann et al., 2007). با توجه بحران جهانی آب و قرار داشتن ایران در ناحیه نیمه‌خشک و خشک، اهمیت استفاده از آب شیرین‌کن و پژوهش بر روی آن بر همگان آشکار است (Hosseingholilou et al., 2019).

محققان پژوهش‌هایی را در زمینه تاثیر مثبت امواج فراصوت بر روی پارامترهای کیفی آب مثل رفع کدورت آب، کاهش ذرات جامد معلق در آب، غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها و باکتری‌های موجود در آب و ... انجام داده‌اند که همه این پژوهش‌ها نتایج مثبت و قابل قبول تاثیر امواج فراصوت بر روی بهبود کیفیت آب را برای پژوهشگران به دنبال داشته‌اند (Golmohamadi et al., 2013).

در سال ۲۰۱۱ میلادی، در مقیاس آزمایشگاهی، تاثیر دماهای مختلف آب بر روی میزان اتمیزه شدن آب دریا در شوری‌های متغیر به کمک امواج فراصوت در فرکانس ۱/۷ مگاهرتز مورد آزمایش قرار گرفت. نشان داد که دمای مناسب برای اتمیزه آب در محدوده شوری ۱۵ تا ۳۵، توسط امواج فراصوت در محدوده ۵۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس است (Zhang et al., 2011).

استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به منظور پیدا کردن راه حل برای رفع مشکلات غشای آب شیرین‌کن‌های غشایی (مثل دما، شدت قطبیت، افزایش شار تقطیر و...)، به شدت در حال افزایش است که بیشتر مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌هایی که با این روش روی سیستم‌های غشایی انجام گرفته است به وسیله مدل‌سازی شرایط هیدرودینامیکی، انتقال حرارت و به صورت جامع‌تر انتقال جرم می‌باشد (Sousa et al., 2014). پژوهشی با عنوان تجزیه و تحلیل سه بعدی CFD هیدرودینامیکی و شدت قطبیت در یک کانال تغذیه‌ای آب-شیرین‌کن اسمز معکوس صنعتی توسط محققان صورت گرفت. نتایج نشان داد که دینامیک سیالات و انتقال جرم در کانال‌های تغذیه‌ای آب شیرین‌کن اسمز معکوس نسبت به کانال‌های باز مسطح متفاوت بوده و این تفاوت به علت وجود قسمت‌های تحت فشار در کانال‌های تغذیه آب شیرین‌کن اسمز معکوس است. همچنین در این تحقیق افت فشار و انتقال جرم در کانال تغذیه اسمز معکوس بیان شده است (Wardeh & Morvan, 2008). در سال ۲۰۱۴، روش CFD به منظور مطالعه هیدرودینامیکی کانال تغذیه یک آب شیرین‌کن غشایی که با جدا کننده زیگزگی پر شده بود، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، اثر فاصله بین تارهای بیضوی در میدان سرعت، جریان‌ها، عوامل اصطکاک متوسط و موضعی، افت فشار و همچنین تنش برشی بر روی سطح غشا نشان داده شدند. همچنین نتایج اثبات کردند که کاهش فاصله بین تارهای بیضوی باعث افزایش الگوهای چرخشی و همین‌طور افزایش انتقال جرم بر روی سطح غشا می‌شود (Kargari & Shirazi, 2014). پژوهشی به منظور مطالعه تاثیر الگوهای جریان بر روی غشای اسمز معکوس حاوی جدا

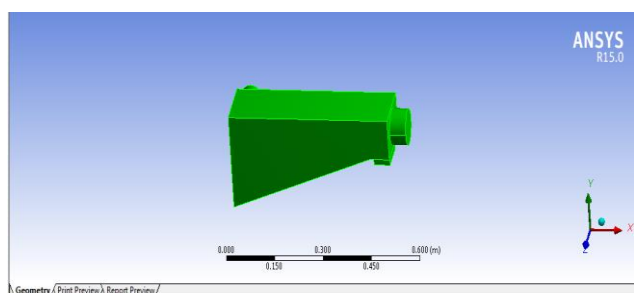
اولین مرحله در تحلیل عددی ایجاد هندسه سه بعدی از سامانه مورد نظر است. ابتدا هندسه سه بعدی برای سامانه آب شیرین کن فراصوت توسط نرم افزار SOLIDWORKS ایجاد شد (شکل ۱). هندسه سامانه مورد نظر به صورت مختصر توضیح داده می شود. با توجه به شکل ۱، تمامی قسمت ها از جنس شیشه ۱۰ میلی متر می باشند. ابعاد مکعب $15 \times 40 \times 50$ سانتی متر مکعب است. قسمت ۲ نشان داده شده در شکل، مخزن آب شیرین کن به ابعاد 15×15 سانتی متر مربع است. همینطور قسمت ۱، ورودی آب شور اولیه دایره ای به قطر $2/5$ سانتی متر، و قسمت ۳، ورودی هوای داغ به سامانه دایره ای به قطر ۹ سانتی متر و در نهایت خروجی بخار نهایی از سامانه، قسمت پنج، دایره ای به قطر شش سانتی متر است.



شکل ۱- سامانه طراحی شده آب شیرین کن فراصوت
Fig 1. Designed ultrasonic water desalination system

هندسه سامانه استفاده شده در شبیه سازی

به منظور راحتی فرآیند شبیه سازی، هندسه سامانه آب شیرین کن به صورت شکل (۲) توسط نرم افزار Solidworks طراحی شد که فقط نواحی ورودی ها و خروجی سامانه مورد نظر در قسمت شبیه سازی استفاده شود.



شکل ۲- سامانه آب شیرین کن فراصوت مورد استفاده در فرآیند شبیه سازی

Fig 2. Ultrasonic desalination system used in the simulation process

سیالاتی^۱ Demister یک آب شیرین کن تقطیری چند مرحله ای MSF طی پژوهشی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این پژوهش طراحی یک Demister جدید با افت فشار کم و عملکرد جداسازی بالا که بتواند باعث کاهش سطح مورد نیاز برای انتقال حرارت شود. پیش بینی شده که عملکرد دمیستر تابع طراحی (قطر سیم ها) و پارامترهای عملیاتی (دمای مراحل) است. رسیدن به این هدف با استفاده از مدلسازی CFD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله با توجه به آزمایشات تجربی و همینطور داده های به دست آمده از واحدهای MSF با مقیاس کار بزرگ، صحت سنجی شدند. نتیجه شد که مدلسازی CFD برای تمامی محدوده پارامترها معتبر است و پیش بینی خیلی نزدیک به واقعیت انجام داده است. Demister جدید با هندسه شبیه به قبلی ها ولی با قطر سیم های کوچکتر از حالت استاندارد طراحی و ساخته شد و عملکرد آن برای افت فشار و بازده جداسازی پیش بینی شد. در نهایت قطر سیم $0/24$ میلی متر به منظور کاهش افت فشار بدون تاثیر قابل ملاحظه بر روی بازده فرآیند جداسازی انتخاب شد (Zhao et al., 2007).

ترکیب جدید برای کاهش انرژی مصرفی آب شیرین کن ها، ترکیب تکنولوژی فراصوت و آب شیرین کن می باشد. بدین منظور آب شیرین کن فراصوتی در دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده است (Hosseingholilou et al., 2019).

با در نظر گرفتن اهدافی مانند، کاهش تعداد آزمایش ها و کاهش هزینه ها، بررسی میزان املاح خروجی از سامانه آب شیرین کن فراصوت و همینطور رسیدن به یک حالت بهینه برای بعضی پارامترها مثل سرعت ورودی هوای داغ و... به منظور بهبود عملکرد سامانه آب شیرین کن فراصوت، این سامانه مورد تحلیل دینامیکی سیالاتی قرار گرفت.

۲- مواد و روش ها

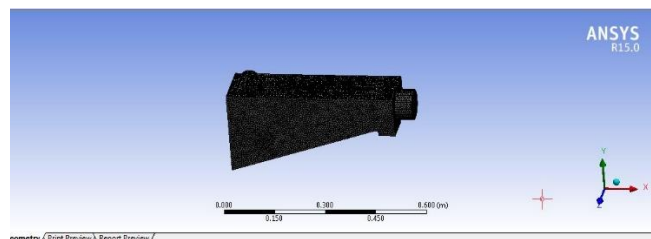
در این تحقیق از ماژول CFD نرم افزار قدرتمند ANSYS 15.0 ساخته شرکت ANSYS Inc. استفاده شده است. همچنین به منظور طراحی و ایجاد هندسه سامانه آب شیرین کن فراصوت از نرم افزار SOLIDWORKS 2016 edition 64x استفاده شده است. اولین مولفه مورد نیاز در شبیه سازی ساختن هندسه و شبکه بندی است. بعد از شبکه بندی باید شرایط مرزی و اولیه و همچنین توابع مورد نیاز جهت شبیه سازی لحاظ شود. سپس نرم افزار ANSYS CFX محاسبات را به منظور تحلیل مسئله انجام و نتایج حاصل از شبیه سازی در قسمت نتیجه نرم افزار قابل دسترسی است (Li et al., 2016). در تحقیق حاضر سامانه آب شیرین کن فراصوت به صورت عددی شبیه سازی شد.

ایجاد هندسه سامانه آب شیرین کن

¹Demister are used to remove entrained brine droplets from flashed off vapor within the flashing stages of the multi stage flash desalination process (MSF)

مش بندی

قبل از تجزیه و تحلیل مدل آب شیرین کن فراصوت ایجاد شده در قسمت حل گر ANSYS CFX ایجاد ساختار مش ضروری است. به منظور انجام شبیه سازی دقیق، کیفیت شبکه بندی خیلی مهم است. برای ایجاد تعادل بین دقت در شبیه سازی و زمان شبیه سازی باید شبکه بندی به صورت بهینه انجام بگیرد. در این تحقیق به دلیل منظم بودن هندسه سامانه، از المان نوع تترا هدرال^۱ استفاده شد، شکل (۱) به دلیل افزایش دقت، مقدار تراکم مش را به ۱۰۰٪ رساندیم. تعداد ۲۸۵۹۷۸ المان به وجود آمد.



شکل ۳- مش بندی سامانه آب شیرین کن فراصوت به منظور شبیه سازی

Fig 3. Meshing of ultrasonic desalination system for simulation

شرایط مرزی و خواص سیالات استفاده شده در تحلیل عددی در نرم افزار ANSYS CFX ماده ای به نام NaCl^2 مشخصات درج شده در جدول (۱) تعریف شد.

جدول ۱- خواص NaCl

Table 1- Properties of NaCl

نوع ماده	چگالی	جرم مولی	ظرفیت گرمایی ویژه
kind of Material	Density (g/cm ³)	Molar mass (g/m)	Specific heat capacity (J/kg.K)
نمک	2.165	58.44	629.53
NaCl			

سپس یک ماده دیگر که به صورت مخلوطی از بخار آب و NaCl هست، به عنوان یکی از ورودی های سامانه لحاظ شد. سیال دیگری که نیز به صورت هوای داغ می باشد، به عنوان ورودی دوم به سامانه اضافی گردید. شرایط سیال های ورودی به سامانه مورد نظر نیز به صورت جدول ۲ است.

جدول ۲- شرایط سیال های ورودی به سامانه آب شیرین کن فراصوت

Table 2- Conditions of fluids entering the ultrasonic desalination system

ورودی	سرعت	مقطع عبوری	دما
Input	Velocity (m/s)	Cross section (m ²)	Temperature (°C)
هوای داغ	3.5	0.0081	60
Hot air flow			
مخلوط بخار آب و NaCl	0.3	0.00495	30

¹Tetra hederal

²Sodium Chlorides

Water vapor and NaCl

همینطور شرایط آب شور اولیه قبل از امتیزه شدن به شکل جدول ۳ می باشد.

جدول ۳- شرایط آب شور اولیه قبل از ورود به سامانه

Table 3- Initial saline water conditions before entering the system

سیال	دما	میزان مواد محلول در آب
Fluid	Temperature (°C)	The amount of water soluble material (ppm)
آب شور اولیه	25	15000
Initial saline water		

با توجه به اینکه سرعت ورودی بخار آب و NaCl بسیار کمتر از سرعت ورودی هوای داغ به سامانه می باشد، هنگام برخورد دو جریان به هم، جریان ایجاد شده آشفته و به صورت آرام یا لایه ای می باشد.

فرضیات لحاظ شده در شبیه سازی

- جهت شبیه سازی دقیق تر سامانه آب شیرین کن فراصوت مورد استفاده در این پژوهش، فرضیاتی به صورت زیر در نظر گرفته شد:
- سطح بیرونی سامانه مورد نظر بی دررو فرض شد.
 - جریان آرام و لایه ای در ناحیه برخورد سیال مخلوط بخار آب و NaCl با سیال هوای داغ ورودی فرض شد.
 - فشار خروجی متصل به کندانسور، فشار هوای محیط فرض شد.

صحه گذاری نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه سازی عددی و تحلیل نتایج

دمای هوا در قسمت خروجی به منظور اعتبارسنجی داده های حاصل از شبیه سازی عددی توسط ANSYS CFX، انتخاب شد. دما در قسمت خروجی سامانه آب شیرین کن فراصوت که به کندانسور متصل می شود، یکبار توسط نرم افزار و بار دیگر حین آزمایش تجربی توسط دماسنج اندازه گیری شده و باهم مقایسه شدند.

۳- نتایج و بحث

همچنان که در بخش مواد و روش ها عنوان شد در این تحقیق سامانه آب شیرین کن فراصوت توسط ANSYS CFX مورد تحلیل دینامیکی سیالاتی واقع شد. نتایج حاصل از تحلیل عددی به صورت زیر می باشد:

توزیع دما

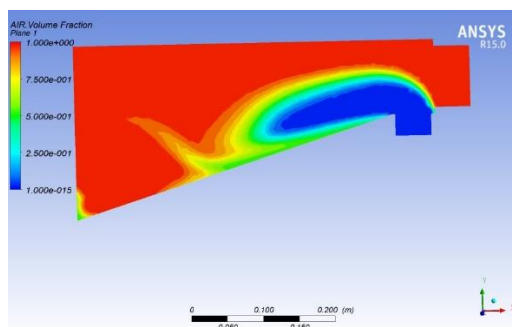
کسر حجمی

Fig 5. Inlet fluid temperature distribution of water vapor and NaCl mixture

کسر حجمی در شیمی برای بیان غلظت یک ماده در محلول استفاده می‌شود و عبارت است از حجم ماده مورد نظر به حجم کل محلول که کسر حجمی کمیتی بی بعد است (IUPAK). برای دو سیال ورودی به سامانه کسر حجمی به صورت زیر تغییر می‌کند.

کسر حجمی هوای داغ ورودی

کسر حجمی هوای داغ ورودی داغ سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از این شکل، کسر حجمی در نواحی که تداخل با سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl وجود ندارد در بیشینه مقدار خود بوده و برعکس در نواحی که این دو سیال ورودی باهم تداخل پیدا می‌کنند، غلظت هوای داغ ورودی به سامانه کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۶- کسر حجمی هوای داغ ورودی
Fig 6. Volume fraction of inlet hot air flow

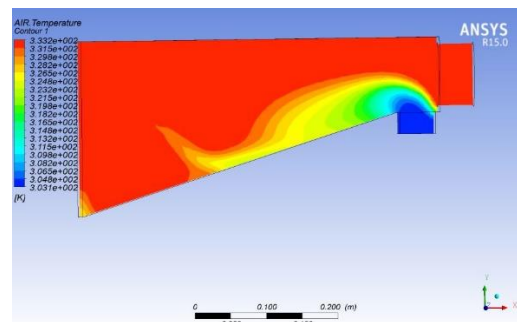
کسر حجمی سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl

کسر حجمی مربوط به سیال حاوی بخار آب و NaCl در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس شکل این نتیجه حاصل می‌شود که کسر حجمی سیال مورد نظر در نزدیکی ورودی خود به سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت بیشینه مقدار خود را داشته و بعد از بالا رفتن و تداخل با هوای داغ ورودی، به تدریج کم شده و در مرز بین دو سیال، کمترین غلظت خود را دارا است. پس وقتی دو سیال در نزدیکی هم قرار می‌گیرند تا به تعادل گرمایی برسند، از غلظت هر دو سیال کاسته می‌شود. این رابطه مستقیم برای هردو سیال صادق بوده که هنگام نزدیک شدن هر دو سیال به هم، از غلظت اولیه و ورودی سیال‌ها کاسته می‌شود.

برای تحلیل توزیع دمای سامانه، دمای هر دو ناحیه ورودی هوا به سامانه که یکی هوای داغ ورودی و دیگری سیال ورودی شامل بخار آب و NaCl است، به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

توزیع دمای هوای داغ ورودی

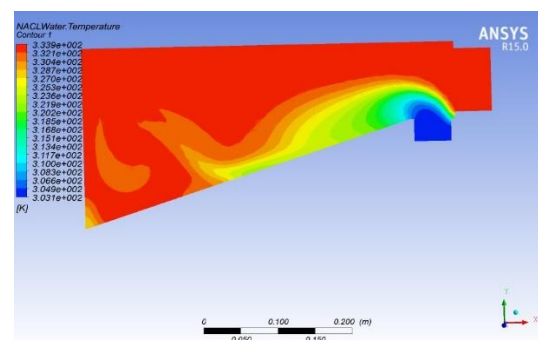
توزیع دمای هوای داغ ورودی به سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت که در قسمت ورودی به سامانه ۶۰ درجه سانتیگراد بود، در شکل (۴) در یک دبی حجمی ثابت نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در نواحی بالای سامانه که تداخلی بین این هوای ورودی و هوای مخلوط بخار آب و NaCl وجود ندارد، دمای ورودی به صورت ثابت می‌ماند. ولی در قسمتی که این دو هوای ورودی به سامانه باهم تداخل پیدا می‌کنند، دمای هوای داغ ورودی رفته رفته کم شده و در ناحیه پایین نزدیک ورودی هوای مخلوط بخار آب و NaCl تقریباً به پایین‌ترین حد خود می‌رسد.



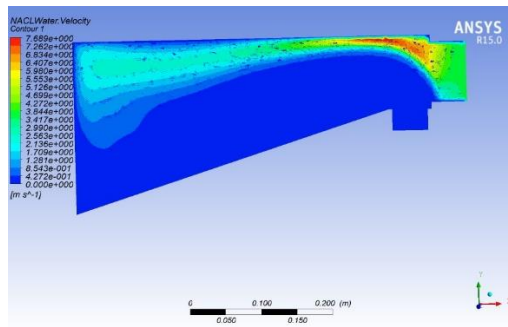
شکل ۴- توزیع دمای هوای داغ ورودی
Fig 4. Inlet hot air temperature distribution

توزیع دمای ورودی مخلوط بخار آب و NaCl

توزیع دمای ورودی سیالی که به صورت مخلوطی از بخار آب و NaCl می‌باشد در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل، مشاهده می‌شود که دمای این مخلوط قبل از برخورد با هوای داغ ورودی، تقریباً ثابت و برابر مقدار اولیه خود، ۳۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و بعد از نزدیک شدن و در نتیجه تداخل با قسمت هوای داغ ورودی، دمای این مخلوط بالا رفته و در مرز با این هوای داغ، دمای مخلوط به بیشینه مقدار خود یعنی نزدیک ۵۰ درجه سانتیگراد می‌رسد.



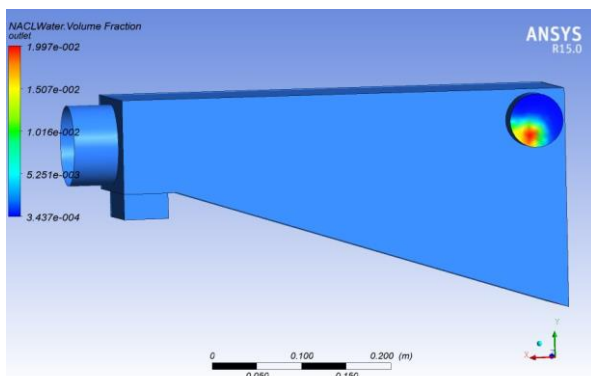
شکل ۵- توزیع دمای سیال ورودی مخلوط بخار آب و NaCl



شکل ۹- توزیع سرعت سیال مخلوط حاوی بخار آب و NaCl

Fig 9. Velocity distribution of mixed fluid containing water vapor and NaCl

با توجه به مقدار املاح موجود در داخل آب ورودی اولیه، که در این تحقیق ۱۵۰۰ ppm بود، تحلیل دینامیکی سیالاتی نشان داد که در خروجی مقدار ۲ درصد ماده‌ی NaCl وجود داشته و بقیه آن بخار هوا و یا بخار آب می‌باشد. که در مقایسه با مقدار املاح موجود داخل آب در ابتدا، تنها مقدار ۳۰۰ ppm املاح وارد خروجی می‌شوند. یعنی مقدار نزدیک به ۱۴۷۰۰ ppm املاح در مقایسه با میزان اولیه در داخل سامانه از آب جدا می‌شوند. شکل ۱۰ میزان کسر حجمی مخلوط بخار آب و NaCl را در خروجی نشان می‌دهد که در نتیجه‌ی این شکل، فقط مقدار بسیار ناچیزی از مخلوط بخار آب همراه با NaCl از خروجی سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت عبور کرده و وارد کندانسور می‌شود.

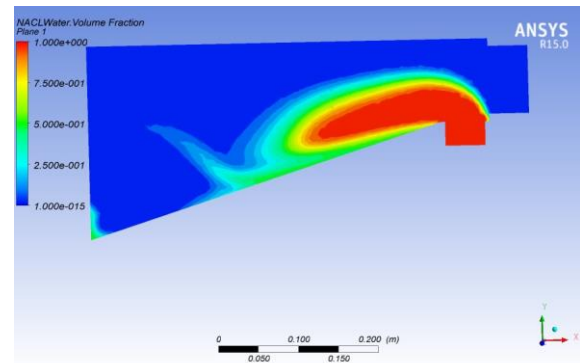


شکل ۱۰- میزان کسر حجمی مخلوط بخار آب و NaCl در خروجی سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت

Fig 10. Volumetric fraction of water vapor and NaCl mixture at the output of ultrasonic water-desalination system

دمای مخلوط بخار آب و NaCl در خروجی

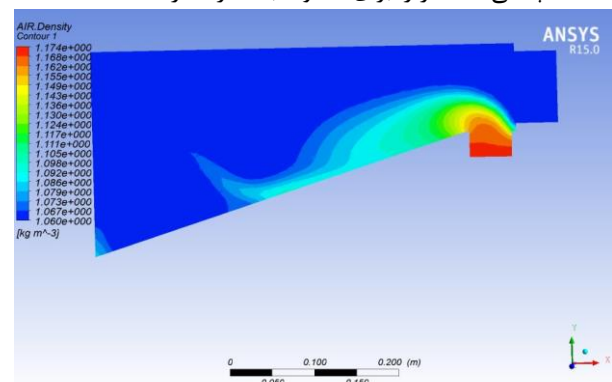
شکل ۱۱ میزان دمای سیال ورودی حاوی بخار آب و NaCl در قسمت خروجی سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت را نشان می‌دهد. بر این اساس دمای خروجی تقریباً نزدیک به دمای ورودی هوای داغ ورودی به سامانه بوده و عددی ما بین ۵۷ تا ۵۹ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. دمای خروجی اساس اعتبارسنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و



شکل ۷- کسر حجمی سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl چگالی هوا

Fig 7. The volume fraction of a fluid containing a mixture of water vapor and NaCl

شکل ۸ به صورت واضح چگالی هوای داخل سامانه را در تمامی نواحی سامانه نشان می‌دهد. در نواحی که بخار هوا تداخلی با نمک پیدا نمی‌کند داری کمترین چگالی خود می‌باشد. اما در نواحی که NaCl با هوا قاطی می‌شود، به دلیل چگالی بیشتر این ماده نسبت به بخار هوا، باعث بالا رفتن چگالی کل مخلوط شده و در نواحی با بیشترین مولکول‌های NaCl، چگالی حداکثر را برای مخلوط به همراه دارد.



شکل ۸- چگالی هوا داخل سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت سیال حاوی بخار آب و NaCl

Fig 8. The density of air inside the ultrasonic desalination system of a fluid containing water vapor and NaCl

در شکل ۹ نحوه توزیع سرعت مخلوط بخار آب و NaCl پس از ورود به سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، سرعت اولیه ورودی تا زمانی که اختلاطی بین سیال مدنظر و هوای داغ ورودی به وجود نیامده، ثابت می‌باشد. به تدریج که دو سیال به همدیگر نزدیک می‌شوند، سرعت سیال مورد نظر افزایش یافته و هنگام اختلاط کامل به بیشینه مقدار خود می‌رسد. این مقدار بیشینه در نزدیکی ورودی هوای داغ به سامانه اتفاق می‌افتد و رفته رفته که هر دو سیال از محل ورودی و ابتدایی دور می‌شوند، از سرعت بیشینه کاسته می‌شود. در نزدیک‌های خروجی تقریباً سرعت سیال حاوی بخار آب و NaCl به حالت ثابت و بیشتر از مقدار اولیه خود می‌رسد.

مشاهده می‌شود که کیفیت آب تولیدی دستگاه نم‌زدایی فراصوت نسبت به سیستم‌های تقطیری مرسوم کمتر می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند، اشتباه اپراتور نیز باشد. چون دستگاه در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شده بود (جنس شیشه)، باید در هر مرحله مخزن تبخیر و مجرای ورودی کندانسور شست‌شو داده می‌شد. اما بدلیل اینکه این کار به دلیل بسته بودن دستگاه، مشکل بود، به‌مین دلیل میزان شوری آب تولیدی مقداری زیاد آمد. اگر در مقیاس بزرگ ساخته شود، می‌توان مکانیزمی خودکار برای شستشوی داخلی دستگاه در نظر گرفت و کیفیت آب آشامیدنی را افزایش داد. با این حال، همین مقدار مواد جامد محلول در آب نیز، بر اساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی، در محدوده آب آشامیدنی قرار دارد. همینطور ملاحظه می‌شود میزان شوری آب تولیدی دستگاه‌های غشایی به عنوان مرسوم‌ترین دستگاه‌های موجود در صنعت نم‌زدایی آب‌های شور، با دستگاه حاضر در این تحقیق تقریباً یکسان می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به این دلایل اثبات شده است که می‌توان عملاً از امواج فراصوت برای نم‌زدایی آب‌های شور استفاده کرد:

(۱): پایین بودن هزینه‌های عملیاتی و انرژی در این سامانه (۲): عدم استفاده از مواد شیمیایی در فرآیند نم‌زدایی و در نتیجه عدم زیست‌تخریب‌پذیر بودن این تکنولوژی (۳): اثر مثبت بر روی حذف آلاینده‌های دیگر آب نظیر میکروارگانیسم‌ها (۴): سهولت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تامین انرژی مصرفی سامانه (۵): کار طولانی مدت و بدون وقفه با تنظیم عمق آب مخزن آب شور ورودی.

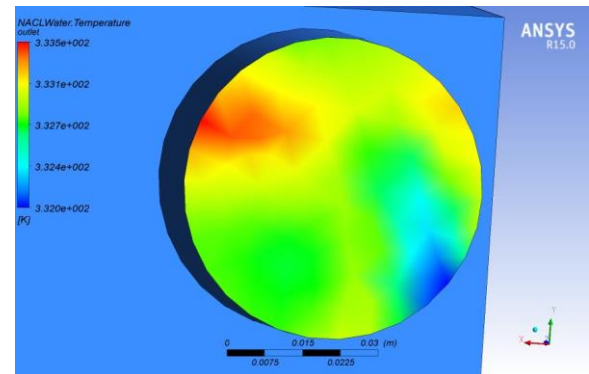
در پژوهش حاضر به‌منظور استفاده از پتانسیل زیاد امواج فراصوت، برای ارتقای عملکرد سامانه‌های نم‌زدایی، حفظ سلامت و رفع برخی نواقص دستگاه‌های نم‌زدایی موجود مانند مصرف بالای انرژی و ایجاد صرفه‌ی اقتصادی، سامانه نم‌زدایی فراصوت توسط ANSYS CFX مورد تحلیل سیالاتی دینامیکی قرار گرفت. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

۱- با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان به صورت قابل توجهی در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد و همچنین به نتایج قابل اعتماد و معتبری دست یافت.

۲- برای دمای ورودی و خروجی میزان اختلاف داده‌ی تجربی با شبیه‌سازی عددی تقریباً ۱۵٪ گزارش شد که این میزان خطا نشان می‌دهد که می‌توان از نتایج شبیه‌سازی عددی با اطمینان استفاده کرد.

۳- میزان املاح وجود در خروجی سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت حدود ۳۰۰ ppm گزارش شد که در مقایسه با املاح موجود در ورودی (۱۵۰۰۰ ppm)، میزان بسیار ناچیزی در حدود ۲٪ می‌باشد.

داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی بود. دمای خروجی در آزمایش‌های تجربی حدود ۴۸ تا ۵۰ درجه ثبت شده است. که خطای اندازه‌گیری بر اساس میانگین دماهای حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی، تقریباً ۱۵٪ می‌باشد. در فرآیندهای شبیه‌سازی خطا تا ۲۰٪ قابل چشم‌پوشی بوده و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی معتبر می‌باشند.



شکل ۱۱- دمای مخلوط بخار آب و NaCl در خروجی

Fig 11. The temperature of the mixture of water vapor and NaCl at the outlet

مقایسه با تحقیقات پیشین

جدول ۴، مقایسه کیفیت آب تولیدی سیستم‌های نم‌زدایی اصلی و دستگاه نم‌زدایی فراصوت (تحقیق حاضر در حالت بهینه پارامترهای عملیاتی) را نشان می‌دهد.

جدول ۴- کیفیت آب تولیدی توسط دستگاه‌های نم‌زدایی مرسوم

و مقایسه با سامانه مورد استفاده در این پژوهش

Table 4- Quality of water produced by conventional desalination devices and comparison with the system used in this research (Hosseingholilou et al., 2019)

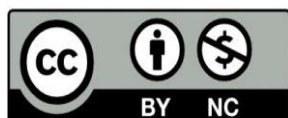
کیفیت آب تولیدی Production water quality (ppm)	دسته‌بندی Categories	نوع فرآیند Process type
500-550	فراصوت Ultrasound	پژوهش حاضر (USD)
2-50	تقطیری Distillation	current study MSF
2-50	تقطیری Distillation	MED
2-50	تقطیری Distillation	MVC
2-50	تقطیری Distillation	TVC
400-500	غشایی Membrane	SWRO
300-500	غشایی Membrane	SWRO
150-500	غشایی Membrane	ED

۵- سپاس‌گزاری

در این قسمت نویسندگان بر خود وظیفه می‌دانند تا از جناب آقای دکتر سید سالار حسینی و سرکار خانم هانیه صمدی به دلیل همکاری علمی در راستای انجام این پژوهش تشکر نمایند.

۶- منابع

- Al-Fulaij, H., Cipollina, A., Micale, G., Bogle, D. and Ettouney, H. (2011). *21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE21* S. Pierucci and G. Buzzi Ferraris (Editors) © 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.
- Bello, A. R. C., Angelis, D. F. and Domingos, R. N. (2005). *Ultrasound Efficiency in Relation to Sodium Hypochlorite and Filtration Adsorption in Microbial Elimination in a Water Treatment Plant*. Brazilian Archives of Biology and Technology, 48: 739-745.
- Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Benedito, J. and Mulet, A. (2012). *Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound*, *Journal of Food Engineering*, 110(2): 200–207.
- Congjie, G., and Guohua, C. (2004). *Desalination Engineering and Technical Manual [M]* Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- Das, R., Hamid, S. B. A., Ali, M. E., Ismail, A. F., Annuar, M. S. M. and Ramakrishna, S. (2014). *Multifunctional carbon nanotubes in water treatment: the present, past and future*, *Desalination* 354 (2014) 160–179.
- Delyannis, E. and Belessiotis, V. (2010). *Desalination: the recent development path*, *Desalination* 264 (2010) 206–213.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T. and Melin, T. (2007). *State-of-the-art of reverse osmosis desalination*, *Desalination* 216 (2007) 1–76.
- García-Rodríguez, L. (2003). *Renewable energy applications in desalination: state of the art*. *Solar Energy*, 2003. 75(5): 381-393.
- Golmohamadi, A., Möller, G., Powers, J. and Nindo, C. (2013). *Effect of ultrasound frequency on antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin content of red raspberry puree*, *Ultrasonics Sonochemistry*. Elsevier, 20(5): 1316–1323.
- Hosseingholilou, B., Banakar, A. and Mostafaei, M. (2016). *Study on water treatment and desalination of seawater using ultrasound technology*. 10th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran. Mashhad, Iran. (In persian).
- Hosseingholilou, B., Banakar, A. and Mostafaei, M. (2019). *Design and evaluation of a novel ultrasonic desalination system by response surface methodology*. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 164, 263-275.
- Kargari, A. and Shirazi, M. M. A. (2014). *Water desalination: solar-assisted membrane distillation*, 2nd ed., *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, 4, CRC Press, <http://dx.doi.org/10.1081/E-E.applied.to.the.membrane.distillation.process>: State-of-the-art and perspectives. *Desalination* 377 (2016) 73–90.
- Kentish, S. and Ashokkumar, M. (2011), *The physical and chemical effects of ultrasound*, *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. Springer, 1–12.
- Klogirou, S.A. (2009). *Solar energy engineering: Processes and Systems*. Academic Press. Technology & Engineering. 1st ed. 2009: 760 pages.
- Li, M., Bui, T., and Chao, S. (2016). *Three-dimensional CFD analysis of hydrodynamics and concentration polarization in an industrial RO feed channel*. *Desalination* 397 (2016) 194–204.
- Noori Rahim Abadi, S.M.A., and Kouhikamali, A. (2016). *CFD-aided mathematical modeling of thermal vapor compressors in multiple effects distillation units*. *Applied Mathematical Modelling* 40 (2016) 6850–6868.
- Patist, A. and Bates, D. (2008), *Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production*, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. Elsevier, 9(2): 147–154.
- Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., et al. (2011). *Ultrasonic pretreatment of sludge: A review*. *Ultrasonics Sonochemistry* 18: 1-18.
- Shirazi, M.M.A., Kargari, A., Fauzi, A., and Matsuura, T. (2016). *Computational Fluid Dynamic (CFD) opportunities applied to the membrane distillation process: State-of-the-art and perspectives*. *Desalination*, 377, 73-90.
- Sing-Foong, C. (2004). *PHOTOVOLTAIC REVERSE OSMOSIS DESALINATION SYSTEM*, *Desalination and Water Purification Research and Development Program Report*, 2004.104.
- Sousa, P., Soares, A., Monteiro, E. and Rouboa, A. (2014). *A CFD study of the hydrodynamics in a desalination membrane filled with spacers*. *Desalination* 349 (2014) 22–30.
- Wardeh, S. and Morvan HP. (2008). *CFD simulations of flow and concentration polarization in spacer-filled channels for application to water desalination*. *Chemical engineering research and design* 86 (2008) 1107–1116.
- Zhang, L., Dong, H. and Wang, X. (2011). *Temperature Response in the Process Seawater Desalination*. 978-1-4244-6255-1/11/\$26.00 ©2011 IEEE.
- Zhao, J., Jin, B. and Zhong, Z. (2007). *Study of separation efficiency of a demister vane with response surface methodology*. *Journal of Hazardous Materials*, 147, 363-369.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)