

مدلسازی آب شیرین کن فراصوت به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

بهنام حسینقلی لو^۱، احمد بناکار^{*۲}

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس (Behnam.h@modares.ac.ir)
۲. عضو هیئت علمی مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس (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 به خصوص در ایران در حال رشد است. انواع سیستم‌های نمک‌زدایی ساخته و استفاده شده است. هر کدام معایب و مزایای خاص خود را دارند که در اکثر این سیستم‌ها، میزان مصرف انرژی بالا مشکل اساسی به حساب می‌آید. ترکیب دستگاه‌های آب شیرین کن با فناوری فراصوت، یکی از تکنولوژی‌های جدید برای بهبود وضعیت مصرف انرژی این دستگاه‌ها می‌باشد. در این تحقیق شبیه‌سازی سیالاتی - دینامیکی سامانه آب شیرین کن 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 آب شیرین کن فراصوت بود که 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 آب شیرین کن فراصوت باید مقدار سرعت هوای داغ ورودی به سامانه کاهش یابد. به منظور 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.

کلمات کلیدی: نمک‌زدایی، فراصوت، تحلیل عددی، ANSYS-CFX، صحت‌گذاری

*احمد بناکار (نویسنده مسئول)

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، پایین تر از استانداردهای بهداشتی بوده و همینطور تعداد ۱/۱ میلیارد نفر از مردم، امکانات لازم برای بهبود کیفیت آب آشامیدنی خود را ندارند [1]. 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 [2-3]. 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 [4]. بنابراین انسان‌ها مجبور هستند که از فرآیندهای تصفیه آب و نمک-زدایی آب دریا (به عنوان منبع جدید آب شیرین) به منظور تامین آب آشامیدنی مورد نیاز در حد کیفیت استاندارد آشامیدن استفاده کنند (حسینقلی لو و همکاران، ۱۳۹۵). آب شیرین کن‌ها این امکان را برای تهیه آب شیرین فراهم می‌کنند، در غیر این صورت آب مورد نیاز کشاورزی، صنعتی، خدماتی و... در دسترس نخواهد بود [5]. جدا کردن نمک از آب یک فرآیند غیر خودبخودی است که نیاز به صرف انرژی زیادی دارد، مصرف انرژی زیاد باعث عدم توسعه و گسترش استفاده از آب شیرین کن‌ها شده است. یکی از روش‌ها برای کاهش انرژی مصرفی در فرآیند نمک-زدایی، ترکیب آب شیرین کن با فراصوت می‌باشد [6]. هنگامی که فرآیندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا به کمک تکنولوژی التراسوند انجام می‌گیرند، باعث تقویت بازده، کاهش انرژی کل مصرفی فرآیندها و همچنین عدم ایجاد آلودگی زیست محیطی می‌شود. در فرآیندهای نمک‌زدایی آب دریا به دلیل مصرف انرژی 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 فرآیندهای نمک‌زدایی آب دریا شده و در نتیجه هزینه‌های آب شیرین کنی را کاهش می‌دهد [7]. با توجه بحران جهانی آب و قرار داشتن ایران در ناحیه نیمه خشک و خشک، اهمیت استفاده از آب شیرین کن و پژوهش بر روی آن بر همگان آشکار است.

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 داده شد که دمای مناسب برای اتمیزه آب در محدوده‌ی شوری ۱۵ تا ۳۵، توسط امواج فراصوت در محدوده‌ی ۵۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس می‌باشد [9].

استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به منظور پیدا کردن راه حل برای رفع مشکلات غشای آب شیرین کن‌های 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 جامع تر انتقال جرم می‌باشد. پژوهشی با عنوان تجزیه و تحلیل سه بعدی CFD هیدرودینامیکی و شدت قطبیت در یک کانال تغذیه‌ی آب شیرین کن اسمز معکوس صنعتی توسط محققان در

سال ۲۰۱۶ میلادی صورت گرفت. نتایج نشان داد که دینامیک سیالات و انتقال جرم در کانال‌های تغذیه‌ی آب-شیرین کن اسمز معکوس نسبت به کانال‌های باز مسطح متفاوت بوده و این تفاوت به علت وجود قسمت‌های تحت فشار در کانال‌های تغذیه‌ی آب‌شیرین کن اسمز معکوس است. همچنین در این تحقیق افت فشار و انتقال جرم در کانال تغذیه‌ی اسمز معکوس بیان شده است [10]. در سال ۲۰۱۴، روش CFD به منظور مطالعه هیدرودینامیکی کانال تغذیه یک آب‌شیرین کن غشایی که با جداکننده‌ی زیگزاگی 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 [11]. پژوهشی به منظور مطالعه‌ی تاثیر الگوهای جریان بر روی غشای اسمز معکوس حاوی جداکننده که رشته‌های جداکننده با زاویه‌های گوناگون نسبت به جریان ورودی تنظیم شده بودند، در سال ۲۰۱۲ انجام شده است. نتایج نشان داد که تنظیم جداکننده‌های کانال تغذیه با جهت جریان، تاثیر زیادی بر روی تولید الگوهای جریان ثانویه در میان کانال‌های دارای جداکننده است. بهینه‌سازی جهت جداکننده‌های تغذیه می‌تواند باعث تولید الگوی جریان مطلوب در غشا شود که افزایش عملکرد غشا را به همراه خواهد داشت [12]. در سال ۲۰۰۸ میلادی، محققان پژوهشی را با عنوان شبیه‌سازی CFD سیال و شدت قطبیت در کانال‌های دارای لایه‌ی جداکننده که در آب‌شیرین کن‌ها استفاده می‌شوند، انجام دادند. شبیه‌سازی به منظور مطالعه‌ی 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 جداکننده‌ی زیگزاگی از لحاظ حذف رسوب نمک از سطح غشا و حفاظت از آن، نسبت به یک نوع غوطه‌ور، مقرون-به‌صرفه بوده و همچنین باعث افزایش عملکرد دستگاه آب‌شیرین کن می‌شود [13]. مطالعه‌ی دیگری به منظور شبیه‌سازی الگوهای جریان در یک دستگاه تجاری حجم محدود دارای کانال حاوی جداکننده که رشته‌های جداکننده در سه ترتیب متفاوت تنظیم شده بودند، انجام گرفت. نتایج نشان داد که انتخاب دقیق و مناسب فاصله‌ی رشته‌های عرضی و محل آن‌ها، برای بهینه‌سازی جداکننده بسیار مهم است. با توجه به شبیه‌سازی، هندسه مطلوب‌تر با قرار دادن جداکننده‌های عرضی به صورت معلق در کانال و کاهش فاصله‌ی بین آنها است. کاهش فاصله‌ی بین آن‌ها باعث کاهش تنش برشی بیشینه شده و جریان مخالف فعال تری 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 نتیجه‌ی آن باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی شود [14]. پژوهشی تحت عنوان بررسی مدل ریاضی به‌دست آمده به کمک CFD برای پیش‌بینی عملکرد کمپرسور حرارتی بخار یک آب‌شیرین کن تقطیری چند اثره (MED) در سال ۲۰۱۶ میلادی توسط نوری رحیم‌آبادی و کوهی کمالی در دانشگاه گیلان انجام پذیرفت. اطلاعات به‌دست 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 پایه‌ی مدل‌سازی CFD به دست آمد، (۲) افزایش دمای تغذیه منجر به کاهش سرعت جریان بخار کل ورودی و همچنین کوچک‌تر شدن دهانه‌ی 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 [15]. مدلسازی دینامیکی سیالاتی¹ Demister یک آب‌شیرین‌کن تقطیری چند مرحله‌ای 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. پیش‌بینی شده که عملکرد دمیستر تابع طراحی (قطر سیم‌ها) 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 داده‌های به‌دست آمده از واحدهای MSF با مقیاس کار بزرگ، صحت‌سنجی شدند. نتیجه شد که مدلسازی CFD برای تمامی محدوده پارامترها معتبر است و پیش‌بینی خیلی نزدیک به واقعیت انجام داده است. Demister جدید با هندسه شبیه به قبلی‌ها ولی با قطر سیم‌های کوچکتر از حالت استاندارد طراحی و ساخته شد و عملکرد آن برای افت فشار و بازده جداسازی پیش‌بینی شد. در نهایت قطر سیم ۰/۲۴ میلی‌متر به منظور کاهش افت فشار بدون تاثیر قابل‌ملاحظه بر روی بازده فرآیند جداسازی انتخاب شد [16].

ترکیب جدید برای کاهش انرژی مصرفی آب‌شیرین‌کن‌ها، ترکیب تکنولوژی فراصوت و آب‌شیرین‌کن می‌باشد. بدین‌منظور آب‌شیرین‌کن فراصوتی در دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده است [17].
با در نظر گرفتن اهدافی مانند، کاهش تعداد آزمایش‌ها و کاهش هزینه‌ها، بررسی میزان املاح خروجی از سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت و همینطور رسیدن به یک حالت بهینه برای بعضی پارامترها مثل سرعت ورودی هوای داغ و... به منظور بهبود عملکرد سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت، این سامانه مورد تحلیل دینامیکی سیالاتی قرار گرفت.

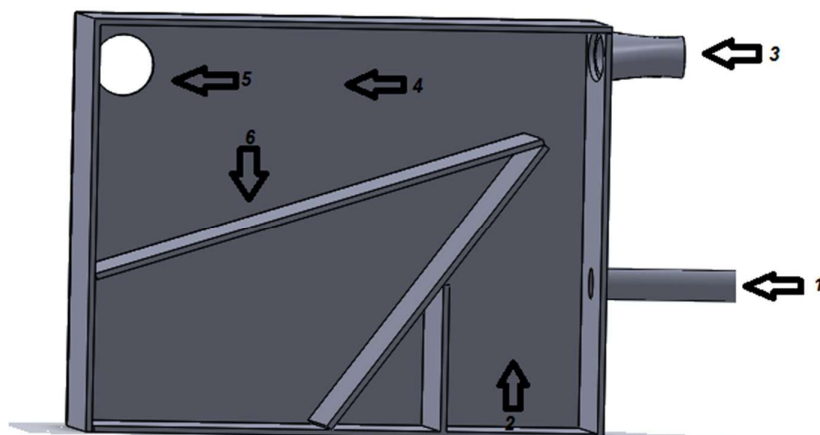
مواد و روش‌ها

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

ایجاد هندسه سامانه آب‌شیرین‌کن

اولین مرحله در تحلیل عددی ایجاد هندسه سه بعدی از سامانه مورد نظر است. ابتدا هندسه سه بعدی برای سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت توسط نرم‌افزار SOLIDWORKS ایجاد شد، (شکل ۱). هندسه سامانه مورد نظر به صورت مختصر توضیح داده می‌شود. با توجه به شکل (۱)، تمامی قسمت‌ها از جنس شیشه ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. ابعاد مکعب ۱۵*۴۰*۵۰ سانتی‌متر مکعب است. قسمت ۲ نشان داده شده در شکل، مخزن آب‌شیرین‌کن به ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی‌متر مربع می‌باشد. همینطور قسمت ۱، ورودی آب‌شور اولیه دایره‌ای به قطر ۲/۵ سانتی‌متر، همینطور قسمت ۳، ورودی هوای داغ به سامانه دایره‌ای به قطر ۹ سانتی‌متر و در نهایت خروجی بخار نهایی از سامانه، قسمت ۵، دایره‌ای به قطر ۶ سانتی‌متر می‌باشد.

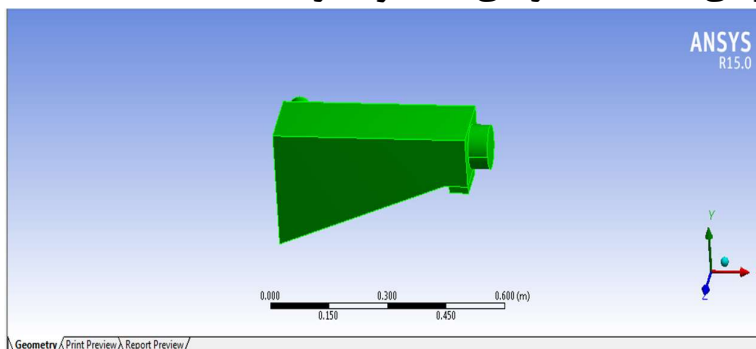
¹- Demister are used to remove entrained brine droplets from flashed off vapor within the flashing stages of the multi stage flash desalination process (MSF)



شکل ۱: سامانه طراحی شده‌ی آب‌شیرین‌کن فراصوت

هندسه سامانه استفاده شده در شبیه‌سازی:

به منظور راحتی فرآیند شبیه‌سازی، هندسه سامانه آب‌شیرین‌کن به صورت شکل (۲) توسط نرم‌افزار solidworks طراحی شد که فقط نواحی ورودی و خروجی و خروجی سامانه مورد نظر در قسمت شبیه‌سازی استفاده شود.

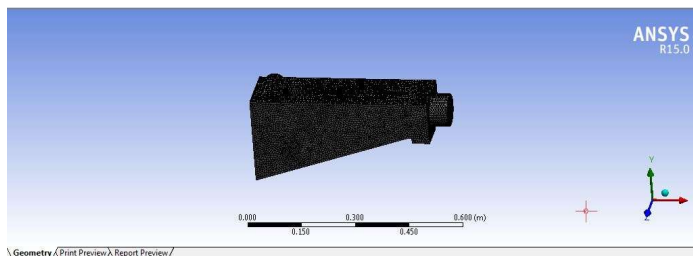


شکل ۲: سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت مورد استفاده در فرآیند شبیه‌سازی

مش بندی

قبل از تجزیه و تحلیل مدل آب‌شیرین‌کن فراصوت ایجاد شده در قسمت حل‌گر ANSYS CFX ایجاد ساختار مش ضروری است. به منظور انجام شبیه‌سازی دقیق، کیفیت شبکه‌بندی خیلی مهم است. برای ایجاد تعادل بین دقت در شبیه‌سازی و زمان شبیه‌سازی باید شبکه‌بندی به صورت بهینه انجام بگیرد. در این تحقیق به دلیل منظم بودن هندسه سامانه، از المان نوع تتراهدرال^۱ استفاده شد شکل (۳). به دلیل افزایش دقت، مقدار تراکم مش را به ۱۰۰٪ رساندیم. تعداد ۲۸۵۹۷۸ المان به وجود آمد.

^۱- Tetra hederal



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

شرایط مرزی و خواص سیالات استفاده شده در تحلیل عددی

در نرم افزار ANSYS CFX ماده ای به نام NaCl¹ مشخصات درج شده در جدول (۱) تعریف شد.

جدول ۱: خواص NaCl

نوع ماده	چگالی (g/cm ³)	جرم مولی (g/m)	ظرفیت گرمایی ویژه (j/kg.k)
NaCl	۲/۱۶۵	۵۸/۴۴	۶۲۹/۵۳

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) می باشد.

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

ورودی	سرعت (m/s)	مقطع عبوری (m ²)	دما (°C)
هوای داغ	۳/۵	۰/۰۰۸۱	۶۰
مخلوط بخار آب و NaCl	۰/۳	۰/۰۰۴۹۵	۳۰

همینطور شرایط آب شور اولیه قبل از اتمیزه شدن به شکل جدول (۳) می باشد.

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

سیال	دما (°C)	میزان مواد محلول در آب (ppm)
آب شور اولیه	۲۵	۱۵۰۰۰

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 آشفتگی نداشته 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.

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

¹ - sodium chlorides

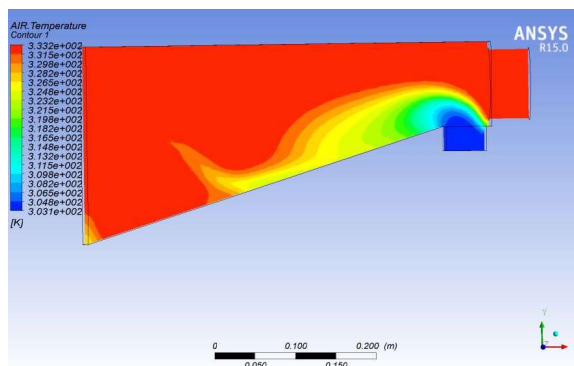
دمای هوا در قسمت خروجی به منظور اعتبارسنجی داده‌های حاصل از شبیه سازی عددی توسط ANSYS CFX، انتخاب شد. دما در قسمت خروجی سامانه آب شیرین کن فراصوت که به کندانسور متصل می‌شود، یکبار توسط نرم‌افزار و بار دیگر حین آزمایش تجربی توسط دماسنج اندازه‌گیری شده و باهم مقایسه شدند.

نتایج و بحث

همچنان که در بخش مواد و روش‌ها 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 می‌باشند:

توزیع دما
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 می‌باشد، به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

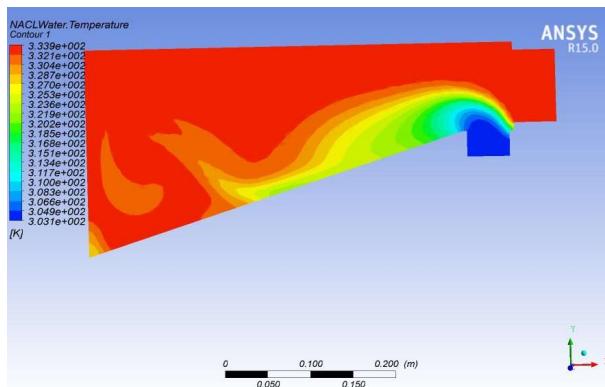
توزیع دمای هوای داغ ورودی
توزیع دمای هوای داغ ورودی به سامانه آب شیرین کن فراصوت که در قسمت ورودی به سامانه ۶۰ درجه سانتیگراد بود، در شکل (۴) در یک دیب جرمی ثابت نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در نواحی بالای سامانه که تداخلی بین این هوای ورودی و هوای مخلوط بخار آب و NaCl وجود ندارد، دمای 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

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.



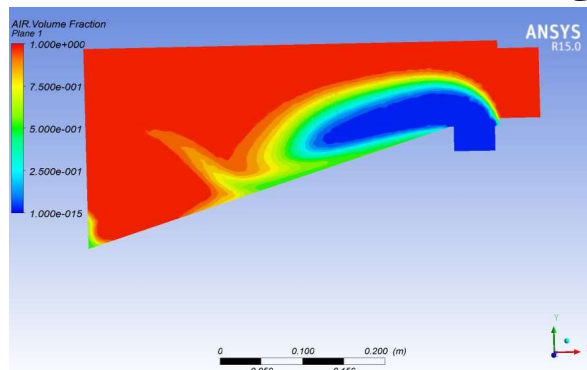
شکل ۵: توزیع دمای سیال ورودی مخلوط بخار آب و NaCl

کسر حجمی

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

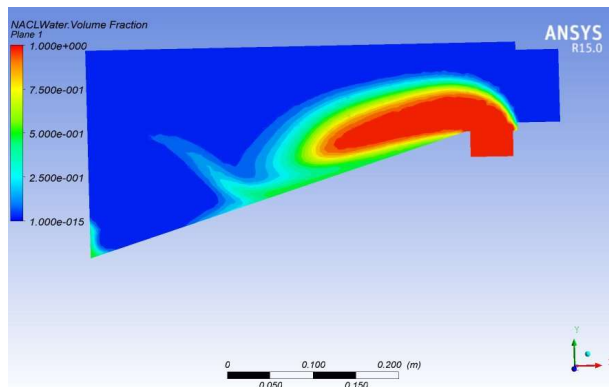
کسر حجمی هوای داغ ورودی داغ سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از این شکل، کسر حجمی در نواحی که تداخل با سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl وجود ندارد در بیشینه مقدار خود بوده و برعکس در نواحی که این دو سیال ورودی باهم تداخل پیدا می‌کنند، غلظت هوای داغ ورودی به سامانه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



شکل ۶: کسر حجمی هوای داغ ورودی

کسر حجمی سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl

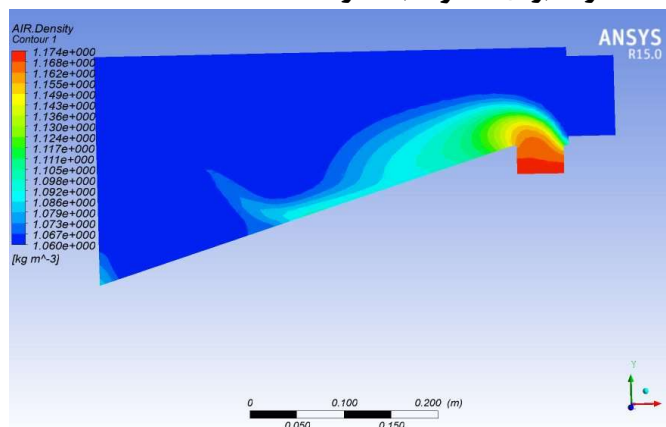
کسر حجمی مربوط به سیال حاوی بخار آب و NaCl در شکل (۷) نشان داده شده است. بر اساس شکل این نتیجه حاصل می‌شود که کسر حجمی سیال مورد نظر در نزدیکی ورودی خود به سامانه آب‌شیرین‌کن فراصوت بیشینه مقدار خود را داشته و بعد از بالا رفتن و تداخل با هوای داغ ورودی، به تدریج کم شده و در مرز بین دو سیال، کمترین غلظت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



شکل ۷: کسر حجمی سیال حاوی مخلوط بخار آب و NaCl

چگالی هوا

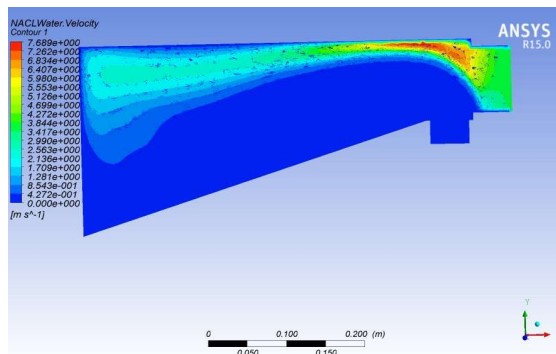
شکل (۸) به صورت واضح چگالی هوای داخل سامانه را در تمامی نواحی سامانه نشان می‌دهد. در نواحی که بخار هوا تداخلی با نمک پیدا نمی‌کند داری کمترین چگالی خود می‌باشد. اما در نواحی که NaCl با هوا قاطی می‌شود، به دلیل چگالی بیشتر این ماده نسبت به بخار هوا، باعث بالا رفتن چگالی کل مخلوط شده و در نواحی با بیشترین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



شکل ۸: چگالی هوا داخل سامانه آب‌شیرین کن فراصوت

سرعت سیال حاوی بخار آب و NaCl

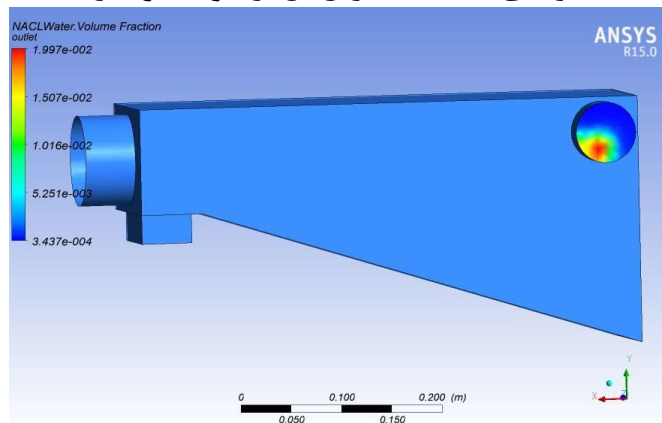
در شکل (۹) نحوه توزیع سرعت مخلوط بخار آب و NaCl پس از ورود به سامانه آب‌شیرین کن فراصوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، سرعت اولیه ورودی تا زمانی که اختلاطی بین سیال مدنظر و هوای داغ ورودی به وجود نیامده، ثابت می‌باشد. به تدریج که دو سیال به همدیگر نزدیک می‌شوند، سرعت سیال مورد نظر افزایش یافته و هنگام 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.



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

کسر حجمی مخلوط بخار آب و NaCl در خروجی

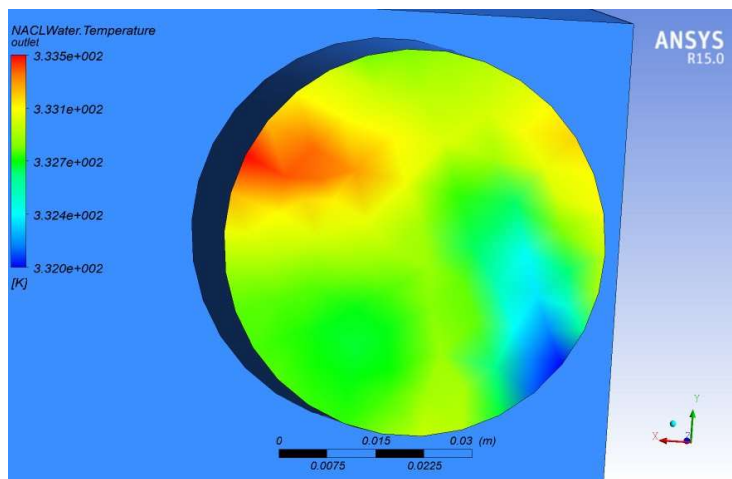
با توجه به مقدار املاح موجود در داخل آب ورودی اولیه، که در این تحقیق ۱۵۰۰۰ ppm بود، تحلیل دینامیکی سیالاتی نشان داد که در خروجی مقدار ۲ درصد ماده‌ی NaCl وجود داشته و بقیه آن بخار هوا و یا بخار آب می‌باشد. که در مقایسه با مقدار املاح موجود داخل آب در ابتدا، تنها مقدار ۳۰۰ ppm املاح وارد خروجی می‌شوند. 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

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 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

مقایسه با تحقیقات پیشین

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

جدول ۴: کیفیت آب تولیدی توسط دستگاه‌های نمک‌زدایی مرسوم و مقایسه با سامانه مورد استفاده در این پژوهش [10].

Process	USD (present work)	MSF	MED	MVC	TVC	SWRO	BWRO	ED
Classification	Ultrasonic	Distillation	Distillation	Distillation	Distillation	Membrane	Membrane	Membrane
Product water quality (ppm)	500-550	2-50	2-50	2-50	2-50	400-50	300-500	150-500

مشاهده می‌شود که کیفیت آب تولیدی دستگاه نمک‌زدایی 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 شست شو داده میشد. اما بدلیل اینکه این کار به دلیل بسته بودن دستگاه، مشکل بود، به همین 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، باز همین مقدار مواد جامد محلول در آب نیز، در محدوده‌ی آب آشامیدنی قرار دارد. همینطور ملاحظه میشود میزان شوری آب تولیدی دستگاه‌های غشایی، با دستگاه حاضر در این تحقیق تقریباً یکسان می‌باشد.

نتیجه گیری و بحث

در این تحقیق تحلیل سیالاتی دینامیکی آب شیرین کن فراصوت توسط ANSYS CFX انجام داده شد. نتایج حاصل به شرح زیر می باشد:

- ❖ با استفاده از شبیه سازی می توان به صورت قابل توجهی در زمان و هزینه صرفه جویی کرد و همچنین به نتایج قابل اعتماد و معتبری دست یافت.
- ❖ برای دمای ورودی و خروجی میزان اختلاف داده ی تجربی با شبیه سازی عددی تقریباً ۱۵٪ گزارش شد که این میزان خطا نشان می دهد که می توان از نتایج شبیه سازی عددی با اطمینان استفاده کرد.
- ❖ میزان املاح وجود در خروجی سامانه آب شیرین کن فراصوت حدود ۳۰۰ ppm گزارش شد که در مقایسه با املاح موجود در ورودی (۱۵۰۰۰ ppm)، میزان بسیار ناچیزی در حدود ۲٪ می باشد.
- ❖ نتایج حاصل نشان داد که برای عملکرد بهتر سامانه آب شیرین کن فراصوت، باید سرعت هوای داغ ورودی را کاهش داد تا فرصت برای اختلاط بیشتر با سیال حاوی بخار آب و NaCl ایجاد شود و سرعت زیاد باعث کاهش عملکرد سامانه نشود.

منابع

[1] حسینقلی لو، ب.، بناکار، ا.، مصطفایی، م. (۱۳۹۵). مطالعه بر روی تصفیه آب و نمزدایی آب دریا با استفاده از تکنولوژی التراسوند، دهمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Chua SY, Adul Latif P, Ibrahim Sh., (2010). Effect of ultrasonic irradiation on COD and TSS in raw rubber mill effluent. Environment Asia, 3(special issue): 32-35.
- [5] Congjie, G., and Guohua, C. (2004). “Desalination Engineering and Technical Manual[M],” Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [6] 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.
- [7] Delyannis, E., and Belessiotis, V. (2010). Desalination: the recent development path, Desalination 264 (2010) 206–213.
- [8] Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., and Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination, Desalination 216 (2007) 1–76.
- [9] 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.
- [10] Hosseingholilou, B., Banakar, A., & Mostafaei, M. (2019). Design and evaluation of a novel ultrasonic desalination system by response surface methodology. DESALINATION AND WATER TREATMENT, 164, 263-275.
- [11] Kargari, A., 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>.
- [12] Kentish, S. and Ashokkumar, M. (2011), The physical and chemical effects of ultrasound, Ultrasound Technologies For Food And Bioprocessing. Springer, 1–12.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] Saeed, A., Vuthaluru, R., Yang, Y. and Vuthaluru, H.B. (2012) Effect of feed spacer arrangement on flow dynamics through spacer filled membranes, *Desalination* 285 (2012) 163–169.
- [16] 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 (2016) 73–90.
- [17] 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.
- [18] Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics— The Finite Volume Method*, Longman Scientific & Technical, 1995.
- [19] Wardeh S, 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 (2 0 0 8) 1107–1116.
- [20] 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.
- [21] Zhang, W. J., Jiang, F. B. and Ou, J. F. (2011). Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 1(2): 125-144.
- [22] 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.

**Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis on Ultrasonic Desalination system
Behnam hosseingholilu¹, Ahmad banakar^{1*}**

1. Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Due to the reduction of fresh water resources, increasing population growth, increasing industrial activities and changing people's living standards, water consumption and need increase and consequently, the 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 the 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 system inputs in 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 result of the numerical simulation and the experimental tests difference was just 15%, which indicates that Simulation results are trustful.

Key words: ANSYSCFX, CFD, Desalination, Ultrasound, Validation.

* Ahmad banakar

E-mail: ah_banakar@modares.ac.ir