

## بررسی تجربی و مدل سازی انتقال جرم و انتقال حرارت همزمان در کانال افقی همراه با اثرات دیواره

فاطمه کریمی زاد گوهری<sup>۱\*</sup>، اکبر شاهسوند<sup>۲</sup>، صادق علی خانی محمد آباد<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> انتقال جرم و انتقال حرارت همزمان، میعان، تبخیر، تجربی، مدل سازی، اثر دیواره.</p>	<p>در اکثر فرایندهای مهندسی شیمی، پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت جزو جدایی ناپذیر فرایندها می‌باشند. در این مقاله، با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی، به بررسی تجربی همزمان دو پدیده انتقال جرم و حرارت پرداخته شده است. در این دستگاه، وجود پدیده‌های چگالش و تبخیر که در اثر انتقال حرارت ایجاد می‌شوند، باعث به وجود آمدن انتقال جرم گردیده و در نهایت بر ضریب انتقال حرارت تأثیر می‌گذارند. همچنین وجود انتقال جرم، توزیع دما در پدیده انتقال حرارت را تغییر داده و باعث ایجاد تغییرات کلی در شار حرارتی می‌گردد. آزمایش‌های متعددی با تغییر پارامترهای مختلف مانند دما و دبی برای هر دو سیال آب و هوا انجام گرفته است. از مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها و نتایج حاصل از مدل‌سازی فرایند به وجود پدیده اثر دیواره و تأثیر آن بر دمای آب خروجی از سیستم پی برده شد و مجدداً مدل‌سازی فرایند با اعمال اثر مذکور تصحیح گردید. بررسی انجام شده در این پژوهش مبین تأثیر پارامترهای فرایندی بر تغییرات اثر دیواره بوده و در بین پارامترهای مذکور دما و دبی هوا بیشترین تأثیر را در وقوع این اثر خواهند داشت.</p>

### ۱- مقدمه

حرارت با حضور انتقال جرم افزایش می‌یابد. بالعکس، زمانی که انتقال جرم در جهت خلاف انتقال حرارت واقع شود، وقوع انتقال جرم باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. علاوه بر این، وجود پدیده‌های میعان و تبخیر که ناشی از انتقال جرم می‌باشند نیز می‌توانند باعث کاهش یا افزایش قابل توجه در شار حرارتی گردند.

بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال جرم و انتقال حرارت همزمان در حضور میعان و تبخیر شامل مطالعات عددی و آزمایشگاهی برای ترکیبات متفاوتی از گازها و مایعات می‌باشند. مطالعات مذکور در شرایط یک، دو و سه بعدی در حالت‌های جابجایی اجباری و آزاد انجام شده‌اند. انجام مطالعات عددی در این زمینه نیازمند داشتن مدل

انتقال جرم و انتقال حرارت پدیده‌هایی هستند که می‌توانند در حضور و در غیاب یکدیگر رخ دهند. نتایجی که این دو حالت در پی خواهند داشت بسیار با یکدیگر متفاوت است. انتقال جرم می‌تواند باعث کاهش یا افزایش ضریب انتقال حرارت گردد. هنگامی که پدیده انتقال جرم و حرارت در یک جهت انجام می‌گیرند، ضریب انتقال

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fkzg8@yahoo.com

۱. کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه فنی و مهندسی

۲. استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد

انجام شده است اشاره نمود. در این تحقیق، مدل دیفرانسیلی فرایند بر پایه موازنه جرم و انرژی ارائه گردید و سپس از طریق آن طول بهینه برای قسمت‌های عریان سازی و غنی سازی محاسبه شد.

در پژوهشی دیگر، گیری و همکاران [۸] روی انتقال جرم و حرارت در جابجایی طبیعی در طول پره‌های عمودی منظم به روش عددی کار کرده‌اند. در این بررسی‌ها، نحوه تغییرات عدد بدون بعد ناسلت، توزیع سرعت، ضرایب انتقال جرم و همچنین پروفایل‌های غلظت و دما در طول پره ارزیابی شده است.

از موارد دیگری که می‌توان به بررسی انتقال جرم و حرارت همزمان به صورت تجربی و در قالب ساخت یک دستگاه به آن اشاره داشت، تحقیقی است که در سال ۲۰۰۴ توسط جین تو<sup>۵</sup> و همکاران [۹] انجام شده است. در این تحقیق نیز به بررسی مدل ریاضی مربوط به این فرایند و نهایتاً اصلاح ضرایب انتقال جرم و حرارت همراه با تغییر فاز در سطح یک عایق از جنس فیبر پرداخته‌اند که در آن به انتقال رطوبت توسط گرادیان فشار و همچنین ایجاد حالت فوق اشباع در محل اصلی آزمون اشاره شده است.

در سال ۲۰۰۵ در یک مبدل لوله‌ای پره‌دار صنعتی، بررسی‌های عددی در زمینه انتقال جرم و حرارت همزمان انجام شده است. این نوع مبدل‌ها در طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی مثل دستگاه‌های تهویه مطبوع و فرایندهای گرمایش و سرمایش گاز کاربرد دارند [۱۰]. در زمینه میعان مخلوط آب و آمونیاک روی یک لوله مسطح افقی در یک دستگاه، در سال ۲۰۰۸ تحقیقی صورت گرفته است که در آن اثر حضور آمونیاک و انتقال جرم ناشی از آن را بر ضرایب کلی انتقال حرارت (HTCS) ارزیابی نموده‌اند [۱۱]. انتقال جرم و حرارت همزمان در جابجایی طبیعی پیرامون صفحه عمودی با دمای ثابت توسط خانی<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار

ریاضی مناسب بوده و مطالعات آزمایشگاهی و تجربی نیازمند صرف وقت و تأمین هزینه‌های مربوط به ساخت دستگاه و تهیه تجهیزات می‌باشد. همچنین می‌توان علاوه بر حالات فوق، وقوع همزمان این دو پدیده را در طبیعت و در کاربردهای صنعتی مختلف مانند برج‌های خنک کننده، فرایند رسوب گذاری بخارات شیمیایی و ارزیابی عملکرد مبدل‌های حرارتی بررسی نمود. از این رو، این موضوع توسط تعداد زیادی از پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است.

در تجزیه و تحلیل این کار، ناسلت<sup>۱</sup> پیش‌قدم بوده و رفتار فیلم میعان یافته از بخار اشباع شده در یک صفحه عمودی را بررسی نموده است [۱]. در سالیان بعد، این مدل توسط تعدادی از محققین در وضعیت‌های هندسی پیچیده‌تری مورد بررسی قرار گرفت [۲-۴]. در همین راستا، انتقال جرم و انتقال حرارت همزمان روی یک صفحه افقی توسط اسرپادا<sup>۲</sup> و آنجیراسا<sup>۳</sup> از حیث فرمولاسیون و حل عددی مورد بررسی قرار گرفت و در آن ماهیت جریان‌های ناپایدار گذرا با جزئیات کافی مطالعه شد و تأثیر نرخ نفوذ بر پراکندگی انرژی حرارتی و گونه نفوذ کننده، مورد ارزیابی قرار گرفت [۵].

همزمانی انتقال جرم و حرارت را می‌توان در قطرات در حال میعان نیز بررسی نمود. چندین دانشمند فنلاندی این کار را در قالب یک دستگاه آزمایشگاهی انجام داده‌اند و در نهایت نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها را با مدل عددی فرایند مقایسه نموده و دریافته‌اند که نتایج تئوری و تجربی با یکدیگر مطابقت داشته و مدل فرایند خطای کمتر از ۱٪ را دارا می‌باشد [۶].

وجود ناخالصی در سیستم‌های همراه انتقال حرارت و جرم می‌تواند تأثیر بسزایی در فرایند داشته باشد. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به سیستم سرد ساز جذبی آب- آمونیاک که توسط سیرا<sup>۴</sup> و همکاران [۷]

<sup>1</sup> Nusselt

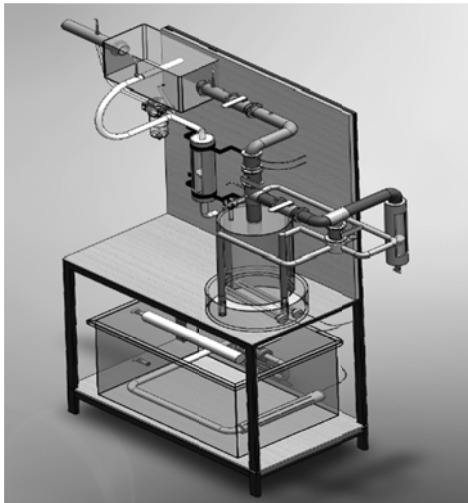
<sup>2</sup> Sripada

<sup>3</sup> Angirasa

<sup>4</sup> Seara

<sup>5</sup> Jintu

<sup>6</sup> Khani



شکل ۱- نمای کلی سیستم انتقال همزمان جرم و حرارت

در ساخت این دستگاه دو مسیر برای عبور سیالات آب و هوا تعبیه شده است. همچنین این سیستم شامل دو دبی‌سنج یکی برای تنظیم دبی هوا و دیگری برای تنظیم دبی آب است. در مسیر عبور هوا، هوای مورد نیاز این سیستم توسط یک کمپرسور تأمین می‌شود. پس از تنظیم دبی هوا توسط دبی‌سنج و ورود آن به سیستم، مسیر عبور هوا به دو قسمت تقسیم می‌شود، یکی مسیر افقی و دیگری مسیر رو به پایین.

انشعابی که به سمت پایین است ابتدا به یک شیر از نوع Global و سپس به یک چهار راه از جنس آلومینیوم وصل است که خروجی هر راه آن  $\frac{1}{4}$  in است. این خروجی‌ها توسط چهار شیلنگ پلاستیکی با طول متوسط ۷۰ cm به اشباع کننده متصل است. اشباع کننده از دو استوانه هم مرکز با قطرها و ارتفاع‌های متفاوت تشکیل شده است. در سطح بالای استوانه پایینی ۴ ورودی  $\frac{1}{4}$  in تعبیه شده که شیلنگ‌ها توسط چهار بست به آنها اتصال می‌یابند. در ادامه مسیر شیلنگ‌ها در داخل استوانه پایینی اشباع کننده، لوله‌هایی تعبیه شده که فاصله دهنه خروجی آنها با کف مخزن اشباع کننده ۲ cm است. علت استفاده از این لوله‌ها جلوگیری از تلاطم، خروج آب همراه با هوا و جلوگیری از خروج هوای اشباع نشده از اشباع کننده است.

گرفت، که در این تحقیق پس از فرمولاسیون سیستم، تأثیر اعداد بدون بعد پرانتل و اشمیت در توزیع دما، غلظت و سرعت در لایه‌های مرزی مربوطه بررسی شد [۱۲].

در سال ۲۰۱۰ توسط چندین محقق ژاپنی در زمینه شیرین سازی آب توسط یک دستگاه لوله‌ای خورشیدی تحقیقی صورت گرفته است که در آن ضرایب انتقال جرم و حرارت متفاوتی با در نظر گرفتن خصوصیات هوای مرطوب به دست آمده است. همچنین اثر آن بر محاسبات دمایی، دانسیته بخار آب، رطوبت نسبی هوای مرطوب و تخمین شار حرارتی و جرمی در نظر گرفته شده است [۱۳].

در این مقاله، ضمن مدل سازی ریاضی پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت همزمان، دستگاهی با قابلیت کار در آزمایشگاه ساخته شد که با تغییر پارامترهای فرایندی مختلف در آن مانند دما و دبی سیالات آب و هوا می‌توان آزمایش‌های متعددی انجام داد. مدل ریاضی فرایند با نرم‌افزار MATLAB و به روش سعی و خطا حل گردید و نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج مدل سازی مقایسه شد. در نهایت، با ارائه مفهومی به نام اثر دیواره، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مدل ریاضی مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲- شرح دستگاه

دستگاه نشان داده شده در شکل ۱ از یک بدنه فلزی با پوشش MDF ساخته شده است. قطعات و اتصالات موجود در سیستم همگی از جنس استیل بوده که بسته به نوع کاربرد آن دارای ضخامت‌های متفاوت می‌باشند.

است. در کف محفظه، یک خروجی به قطر 10 mm وجود دارد که قطرات حاصل از میعان هوای اشباع را به یک استوانه مدرج با قابلیت تخلیه آب هدایت می‌کند.

لازم به ذکر است که تمامی اتصالات مربوط به جریان هوا توسط فلنج به هم متصل شده است. در نتیجه دستگاه از لحاظ نشتی کاملاً عایق است. همچنین در صورت خرابی هر یک از قطعات، قطعه مورد نظر به راحتی قابلیت تعویض را دارد. از طرفی تمامی سیستم توسط عایق پشم شیشه کاملاً پوشیده شده است.

در مسیر عبور آب، جریان آب به صورت یک سیکل است که ابتدا از یک مخزن استیل با ضخامت ورق 2 mm به حجم 150 lit توسط یک پمپ به دبی سنج فرستاده می‌شود که این دبی سنج توانایی اندازه‌گیری حداکثر دبی  $\frac{3}{6} \frac{Nm^3}{hr}$  را دارد. سپس خروجی دبی سنج توسط یک شیلنگ 1 in به ورودی مسیر آب در محفظه وصل می‌شود و مسیر خروجی آب محفظه مجدداً توسط شیلنگ یک اینچی به مخزن باز می‌گردد.

به دلیل اینکه جریان آب به صورت سیکل است و پس از عبور از محفظه و تبادل حرارتی با هوا، دمای آن افزایش یافته و از سوپی برای این آزمایش‌ها نیاز به آب با دمای ثابت و بدون نوسان می‌باشد، لذا در دیواره مخزن یک شیر برای خروج آب تعبیه شده است. همچنین به منظور اضافه کردن آب به مخزن، یک دوش به صورت طولی در بالای مخزن نصب شده است تا آب ورودی را به سطح آب مخزن به صورت یکنواخت پاشیده و دمای آن را تا حد امکان کاهش دهد.

چون یکی از پارامترهای کنترلی، دمای آب ورودی به محفظه است، یک گرمکن المنتی با توان 4/5 kw در داخل مخزن آب نصب شده است. چون جریان آب در حال گردش است، برای داشتن دمای یکنواخت در ورودی محفظه یک غلاف دور گرمکن قرار گرفته است که روی آن شیارهایی تعبیه شده است. از انتهای غلاف لوله‌ای به خروجی مخزن که به پمپ وصل است کشیده شده است

در کف مخزن اشباع کننده یک شیر به منظور تخلیه آب داخل مخزن تعبیه شده است. همچنین در بالای مخزن اشباع کننده دو منفذ یکی جهت نصب سنسور فشار و دیگری جهت نصب فشارسنج در نظر گرفته شده که در صورت نیاز به کار در فشار غیر از اتمسفری، فشار به دو صورت قابل مشاهده باشد.

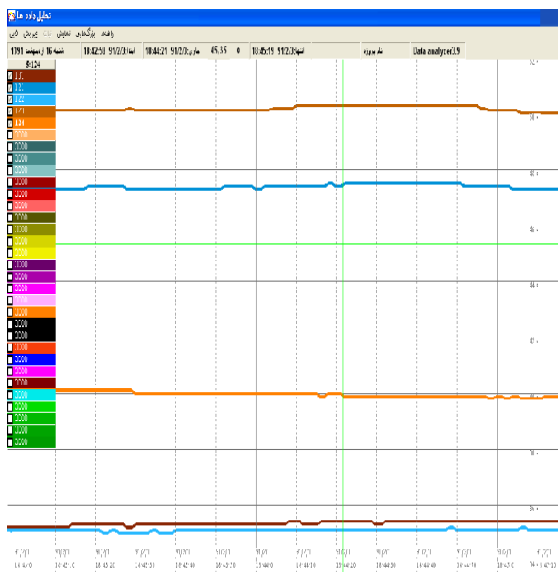
همچنین در استوانه پایینی اشباع کننده، دو گرمکن المنتی که هر کدام دارای توان 4/5 کیلو وات است وجود دارد که وظیفه آنها رساندن دمای آب داخل اشباع کننده به دمای مورد نظر می‌باشد. برای اتصال مخزن اشباع کننده به تجهیزات بعدی در سیستم، روی سطح بالایی مخزن سوراخی به قطر 2 اینچ تعبیه شده که محل قرار گیری یک لوله 2 اینچ به طول 10 cm می‌باشد.

مسیر افقی شامل لوله‌ای است که در سر راه عبور هوا در آن یک شیر از نوع Global تعبیه شده است که اصطلاحاً به این خط لوله کنارگذر (Bypass) گفته می‌شود. این خط لوله برای ایمنی بیشتر در سیستم در نظر گرفته شده است. انتهای مسیر کنارگذر و خروجی از اشباع کننده توسط یک سه راهی به یکدیگر متصل شده‌اند.

هوای خروجی از این اتصال در مسیر اصلی خط لوله سیستم، ابتدا از شیر Global و سپس از یک فیلتر عبور می‌کند. این امر به منظور جلوگیری از عبور احتمالی قطرات و با در نظر گرفتن اینکه افت فشار محسوسی ایجاد نکند، می‌باشد. سپس به سمت یک گرمکن با توان 2/5kw رفته که هدف از نصب این گرمکن رساندن دمای هوای اشباع شده به دمای مورد نظر و همچنین جلوگیری از عبور قطرات آبی که ممکن است همراه جریان آمده باشد، است.

در امتداد مسیر خط لوله یک محفظه به ابعاد 20 × 20 و طول 40 سانتی‌متر نصب شده است. همچنین خروجی هوا از این محفظه از سطح مقطع دیگر آن توسط یک لوله 2 اینچی به طول 30 cm می‌باشد. در داخل محفظه و در مسیر عمود بر جریان هوای ورودی یک لوله به قطر یک اینچ تعبیه شده است که در داخل این لوله، آب در جریان

می‌باشند و به کوچکترین تغییرات دمایی حساس بوده و در کسری از ثانیه تغییرات را نشان می‌دهند. از طرفی، Data Logger به یک کامپیوتر متصل است که این روند تغییر دما را توسط نرم‌افزار مربوطه در کامپیوتر نشان داده و ثبت می‌کند. این داده‌ها قابلیت بازخوانی به صورت فایل Excel را دارا می‌باشند و نیز می‌توان دماهای ثبت شده را به صورت نمودارهای جدا از هم و یا به صورت یک صفحه شامل چندین نمودار نمایش داد. در شکل ۲ نمایشی از این نمودارها نمایش داده شده است.



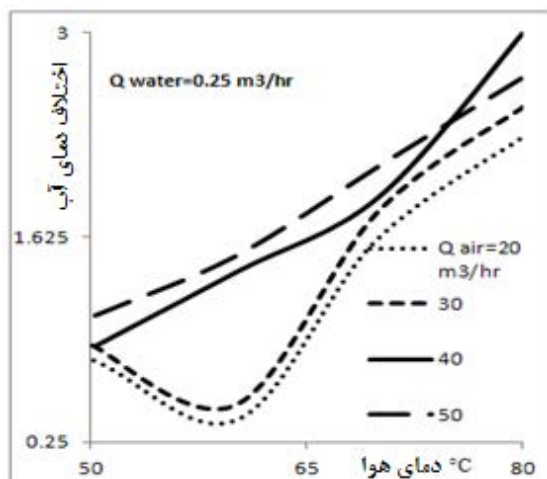
شکل ۲- نمایش چند نمودار ثبت شده توسط Data Logger

برای کنترل دبی آب و دبی هوا از دبی‌سنج و برای کنترل دمای هوا و آب از چندین گرمکن به همراه سیستم کنترلی در کل دستگاه استفاده شده است. محدوده دمایی مورد استفاده در این آزمون برای سیستم هوا بین  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $80^{\circ}\text{C}$ ، برای سیستم آب موجود در مخزن پایین دستگاه بین  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $35^{\circ}\text{C}$  و برای آب موجود در مخزن اشباع کننده بین  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $70^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. همچنین محدوده دبی مورد استفاده در این آزمون برای سیستم هوا بین  $20\text{ m}^3/\text{hr}$  تا  $50\text{ m}^3/\text{hr}$  و برای سیستم آب  $0.25\text{ m}^3/\text{hr}$  تا  $1\text{ m}^3/\text{hr}$  بوده و هر یک از این بازه‌های دمایی و حجمی به چهار قسمت تقسیم می‌شوند. همان طور که ملاحظه می‌شود پارامترهای متفاوت زیادی در

تا آب را به داخل لوله مکیده و با دمای ثابت و بدون نوسان دمایی، آن را به ورودی محفظه پمپاژ نماید. برای اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف دستگاه، شش سنسور نصب شده است. این سنسورها از نوع DS18B20 می‌باشند که قابلیت اندازه‌گیری دمای بین صفر تا  $140^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد را دارند و با خطای  $0.1^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد کار می‌کنند. سنسورها به یک Data logger وصل شده است که خود به طور مستقیم از طریق یک کابل USB به کامپیوتر وصل است و داده‌های دمای هر نقطه و زمان را به صورت Online از طریق مانیتور کامپیوتر نمایش می‌دهد و قابلیت رسم منحنی را دارد. لازم به ذکر است که برق Data logger از طریق کامپیوتر تأمین می‌شود. مکان‌هایی که در آن سنسور دما نصب شده است عبارتند از: ورودی هوا به سیستم، خروجی از اشباع کننده، ورودی هوا به محفظه، خروجی هوا از محفظه، ورودی آب به محفظه و خروجی آب از محفظه. در صورتی که نیاز به کار در فشار غیر اتمسفری باشد یک سنسور فشار در بالای مخزن اشباع کننده نصب شده که قابلیت اندازه‌گیری فشار تا حداکثر  $10\text{ bar}$  را دارد. میزان خطای این سنسور در حد  $0.1\text{ bar}$  است.

### ۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

برای انجام هر نوع آزمایشی ابتدا باید متغیرهای وابسته به فرایند در حال انجام برای سیستم تعریف گردد. سپس با تغییر هر یک از این متغیرها و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها آزمایش را انجام داد و سپس به بررسی اثرات متغیر مذکور در فرایند پرداخت. در این سیستم، با تغییر دبی و دما، تغییرات دمای خروجی فرایند بررسی می‌گردد. ثبت این تغییرات توسط پنج سنسور دمایی صورت می‌گیرد، که در مکان‌های مشخصی روی بدنه اصلی دستگاه نصب شده‌اند. این پنج سنسور به Data Logger متصل



شکل ۴- نمودار تجربی تغییرات اختلاف دمای آب ورودی و خروجی بر حسب دمای هوای ورودی

همان گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است، با افزایش دمای هوای ورودی، کاهش اختلاف دما بین آب ورودی و هوای ورودی را خواهیم داشت که این امر بر نیروی محرکه انتقال حرارت تأثیر گذاشته و باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود. از طرفی، با افزایش دمای آب ورودی به سیستم و به تبع آن کاهش اختلاف دمای آب ورودی به سیستم و خروجی از آن، میزان دمای فیلم میعان یافته موجود در سطح لوله داخل محفظه آزمون افزایش یافته و این افزایش دما منجر به افزایش فشار جزئی سیستم گردیده است. این افزایش فشار جزئی اختلاف فشار در سیستم را کاهش داده که منجر به کاهش نیروی محرکه انتقال جرم و نیز کاهش نیروی محرکه انتقال حرارت شده است. این روند در منحنی‌های موجود در شکل ۳ کاملاً مشهود است.

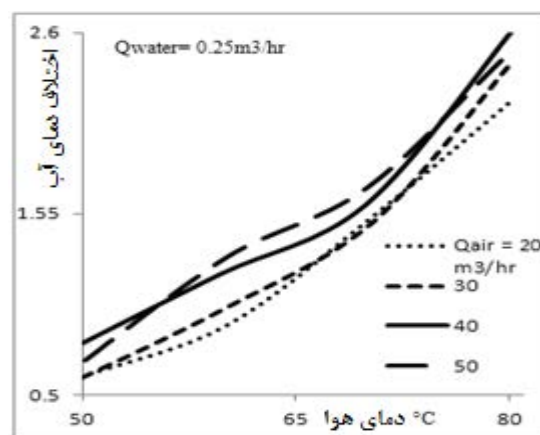
البته در شکل ۴ به علت خطاهای موجود در سیستم و یا خطاهای احتمالی موجود در انجام آزمایش‌ها تا حدودی نتایج دارای خطا است. زیرا در ابتدای کار در دبی‌های هوای ۲۰ و ۳۰  $m^3/hr$  یک روند نزولی دیده می‌شود. ولی با توجه به این موضوع، نمودارها تحلیل روند فوق را پاسخگو می‌باشند.

این سیستم وجود دارند که برای هر آزمون باید ۳ پارامتر را ثابت نگه داشته و پارامتر دیگر را تغییر داد. بنابراین با توجه به تقسیم بازه به چهار قسمت، برای هر پارامتر در حال تغییر، ۶۴ آزمون می‌توان انجام داد. به دلیل داشتن چهار پارامتر، ۲۵۶ آزمون خواهیم داشت.

#### ۴- تحلیل نتایج تجربی

نتایج تجربی به دست آمده از این آزمایش‌ها در شکل ۳ برای دمای آب ورودی ۲۵ درجه سانتیگراد و در شکل ۴ برای دمای آب ورودی ۲۰ درجه سانتیگراد موجود می‌باشد.

نمودارهای موجود در این شکل‌ها قابلیت رسم بر اساس پارامترهای مختلف را دارند. به عنوان مثال، می‌توان دمای آب خروجی را بر اساس دمای آب ورودی، دبی آب، دبی هوا و دمای هوا رسم نمود. ولی حتی‌الامکان سعی بر این است پارامتری که تأثیر بیشتری بر دمای آب خروجی را دارد، مورد بررسی قرار گیرد. از این رو خواهیم داشت:



شکل ۳- نمودار تجربی تغییرات اختلاف دمای آب ورودی و خروجی بر حسب دمای هوای ورودی

تشکیل می‌شود. فرضیاتی که در حل معادلات ریاضی این فرایند لحاظ شده است به قرار زیر است:

(۱) ضخامت لایه میعان یافته بر سطح خارجی لوله ثابت فرض می‌شود.

(۲) از تغییرات دمای هوا، لایه و دیواره لوله در جهت افقی صرف نظر می‌گردد.

(۳) تمامی خواص فیزیکی و انتقالی مورد نیاز ثابت در نظر گرفته شده است.

(۴) از ضخامت لایه مایع در محاسبات صرف نظر می‌شود.

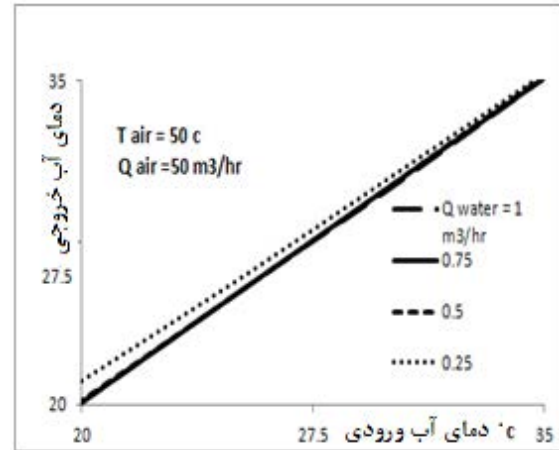
در مسیر مدل سازی این فرایند، با معادلات و مجهولات بسیاری مواجه می‌شویم. برای محاسبه مجهولات موجود در معادلات ابتدا نیاز است تعدادی از پارامترهای معلوم برای نرم‌افزار تعریف گردد، این پارامترهای عملیاتی عبارتند از فشار سیستم، دبی آب، دبی هوا، دمای آب ورودی به محفظه و دمای هوای ورودی به محفظه.

از طرفی باید اطلاعات مربوط به وضعیت هندسی مسئله نیز در ابتدای امر تعریف گردد. این اطلاعات شامل قطر داخلی و خارجی لوله آب عبوری، مساحت سطح لوله آب و مساحت سطح مقطع محفظه می‌باشد که با استفاده از این اطلاعات سرعت عبور آب و هوا در سیستم محاسبه می‌شود.

همچنین روابط تجربی و خصوصیات فیزیکی مربوط به مواد موجود در مسئله در شرایط فرایندی مختلف همانند جرم مولکولی، دانسیته، ظرفیت گرمایی، ظرفیت هدایت حرارتی، ضرایب آنتوان، اعداد بدون بعد رینولدز، پرانتل، ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی فیلم مربوط به رابطه مک آدامز نیز باید معلوم باشند [۱۴-۱۷].

معادلات مربوط به مدل‌سازی بر اساس جدول ۱ برای نرم‌افزار تعریف شده است و هدف از تعریف و حل این معادلات به دست آوردن دمای آب خروجی یا همان  $T_0$  می‌باشد. در ادامه نیاز است برای حل معادلات پارامتری به عنوان حدس اولیه انتخاب گردد.

در حالتی دیگر می‌توان تغییرات دمای آب خروجی را بر اساس دمای آب ورودی با ثابت نگه داشتن دمای هوا و دبی هوا مورد ارزیابی قرار داد.



شکل ۵- نمودار تجربی دمای آب خروجی بر حسب دمای آب ورودی

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود نمودارها خط راست و بدون شکست می‌باشند. اما به دلیل اینکه تمامی نمودارها روی هم منطبق بوده، نمی‌توان تحلیل مناسبی بر آنها داشت، این امر نشان می‌دهد که پارامتر دبی آب مستقلاً بر دمای آب خروجی تأثیر چندانی ندارد. چون در دبی‌های مختلف، تغییرات دمای آب خروجی بر حسب دمای آب ورودی در هر یک از دبی‌های آب دچار تغییر چندانی نشده است، بجز در حالتی که دبی آب برابر  $0.25 \text{ m}^3/\text{hr}$  باشد، که دلیل این امر کمتر بودن دبی آب عبوری از داخل لوله نسبت به سایر حالات و نیز بیشتر بودن زمان ماندن آب در داخل لوله می‌باشد.

## ۵- مدل سازی ریاضی فرایند

فرایندی که در این آزمایش‌ها اتفاق می‌افتد، شامل عبور هوای مرطوب و اشباع از بخار آب از روی سطح خارجی یک لوله محتوی آب سرد است. در طی این فرایند، روی سطح خارجی لوله آب، میعان اتفاق افتاده و یک لایه مایع

جدول ۱- معادلات مربوط به مدل‌سازی

معادله	مجهولات جدید	تعداد کل مجهولات	تعداد کل معادلات
$q_s = \hat{h}(T_a - T_1)$	$q_s, \hat{h}, T_1$	۳	۱
$\hat{h} = \frac{N_A M_A C_{PA}}{1 - e^{-\frac{N_A M_A C_{PA}}{h_0}}}$	$N_A, h_0$	۵	۲
$h_0 = f(Re_0, Pr_0)$	-	۵	۳
$NA = k_y(y_0 - y_1)$	$y_1, k_y$	۷	۴
$k_y = f(Re_0, Sc_0)$	-	۷	۵
$y_1 = \frac{P^* T_1}{P_1}$	-	۷	۶
$q_1 = q_s + N_A \lambda_A$	$q_1$	۸	۷
$q_t = h_f * (T_1 - T_2)$	$T_2, h_f$	۱۰	۸
$h_f = 1.51 * \left( \frac{kf^3 * \rho^2 * g}{4 * \mu * NA * MA * \pi * d_0} \right)^{1/3}$	-	۱۰	۹
$q = k_p \frac{(T_2 - T_3)}{r_o \ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right)}$	$T_3$	۱۱	۱۰
$q_t * \frac{r_o}{r_i} = h_i (T_3 - T_w)$	$T_w, h_i$	۱۳	۱۱
$h_i = f(Re_i, Pr_i)$	-	۱۳	۱۲
$T_w = \frac{T_i + T_0}{2}$	$T_0$	۱۴	۱۳
$q_t * \frac{r_o}{r_i} = m_w CP(T_\infty - T_i)$	-	۱۴	۱۴

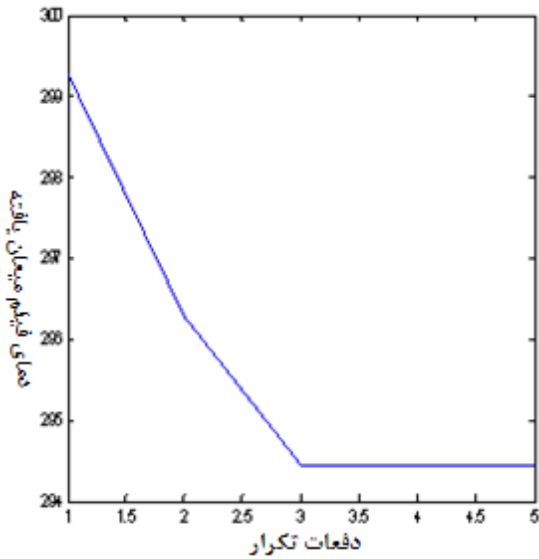
### ۵-۱- روش حل مدل ریاضی

مطابق شکل ۶، برای حل مجموعه معادلات فوق از یک روش سعی و خطا استفاده گردید. برای این منظور دمای فیلم میعان یافته  $T_1$ ، معلوم در نظر گرفته شد. در طی فرایند یک لایه فیلم مایع روی لوله آب عبوری از محفظه تشکیل می‌شود. دمای این لایه مایع جزو مواردی است که نمی‌توان در طی آزمایش توسط سنسورها مقدار آن را ثبت نمود زیرا در طی فرایند مقدار نرخ میعان متفاوت بوده و این نرخ وابسته است به دمای آب عبوری از داخل لوله و میزان بخار آب اشباع ورودی به محفظه. با توجه به جدول ۱ دمای فیلم میعان یافته  $T_1$  مستقیماً روی معادله (۶) و معادله (۱) تأثیر گذاشته و با معلوم فرض کردن این

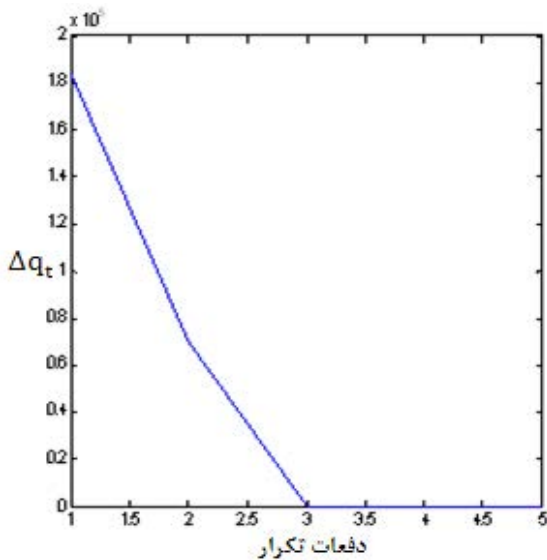
پارامتر دو مجهول  $q_s$  و  $y_1$  از کل معادلات به راحتی حذف می‌شوند. با نگاهی به جدول فوق درمی‌یابیم که انتخاب هر پارامتر دیگری به غیر از  $T_1$  امکان حذف دو مجهول همزمان را برای ما فراهم نمی‌کند. از طرفی  $T_1$  پارامتری است که فشار جزئی بخار آب به آن وابسته بوده و با افزایش و کاهش مقدار دمای  $T_1$  فشار جزئی نیز دچار تغییر خواهد شد و به تبع آن نیروی محرکه انتقال جرم و انتقال حرارت تغییر خواهد کرد، بنابراین با این تفصیل به اهمیت انتخاب این پارامتر به عنوان حدس اولیه پی خواهیم برد.

پس از حل معادلات مربوط به جدول ۱، مطابق شکل ۶ باید درستی فرض انتخاب  $T_1$  به عنوان یک مقدار معلوم کنترل شود. بدین منظور باید مقادیر  $q$  را از معادلات (۷)





شکل ۷- روند تصحیح  $T_1$  در دفعات تکرار



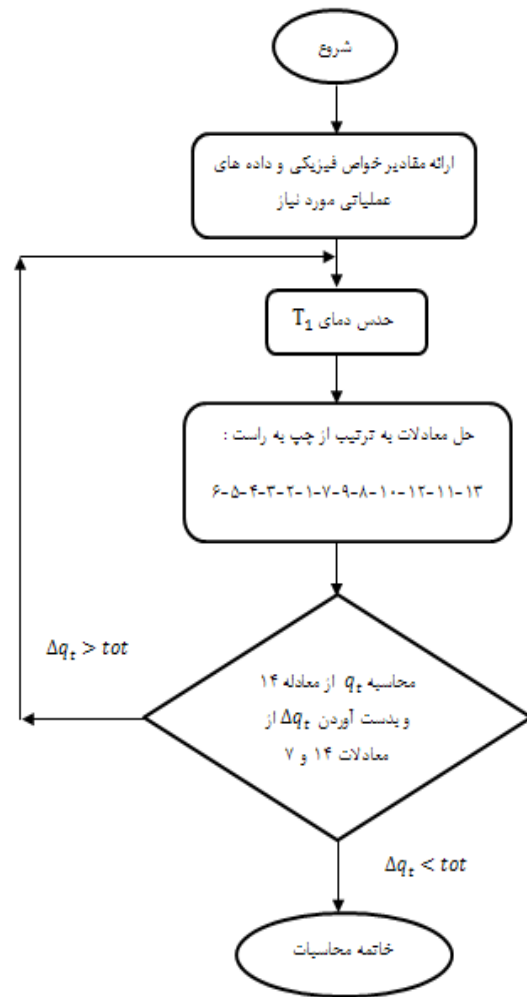
شکل ۸- روند تصحیح  $\Delta q_t$  در دفعات تکرار

### ۶- نتایج شبیه سازی

پس از تصحیح  $T_1$  و رسیدن به نتایج دلخواه در مورد  $\Delta q_t$ ، حال باید مقادیر دمای آب خروجی حاصل از مدل سازی فرایند را با مقادیر تجربی حاصل از آزمایش‌ها در قالب رسم نمودار مقایسه نمود.

قبل از رسم نمودار با توجه به اطلاعات تئوری حاکم بر مسئله انتظار می‌رود که داده‌ها پس از ترسیم در طرفین خط ۴۵ درجه تجمع یابند. ولی پس از رسم نمودار

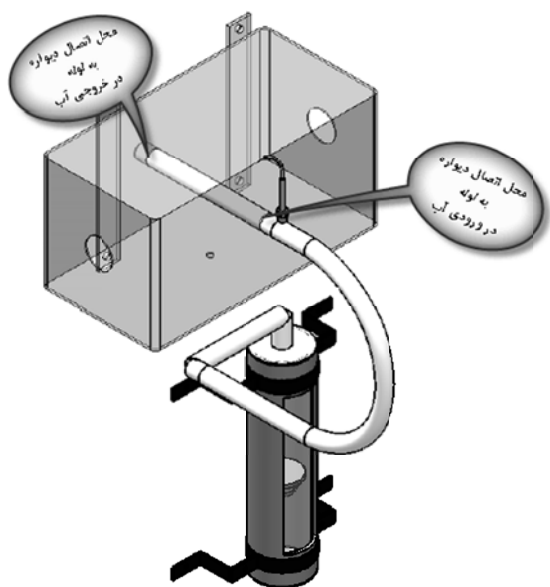
و (۱۴) محاسبه و تفاضل این دو را با مقدار تolerانس<sup>۱</sup> مقایسه نمود و در نهایت با سعی و خطا مقدار  $T_1$  مطلوب را به دست آورد. روند تصحیح  $T_1$  و  $\Delta q_t$  در دفعات تکرار در شکل‌های ۷ و ۸ موجود است.



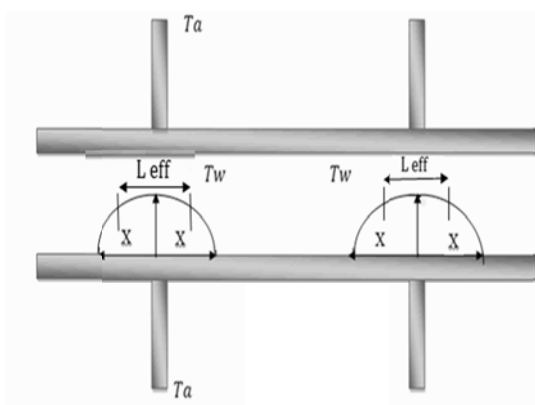
شکل ۶- الگوریتم محاسباتی برای حل مجموعه معادلات جدول ۱

<sup>۱</sup> Tolerance=  $e^{-3}$

لوله آب، یک تبادل حرارتی صورت گرفته که منجر به افزایش دمای لوله و متعاقباً دمای آب شده است. این افزایش دما بسته به شرایط مسئله در فواصل متفاوتی از دو طرف محل اتصال به وجود می‌آید.



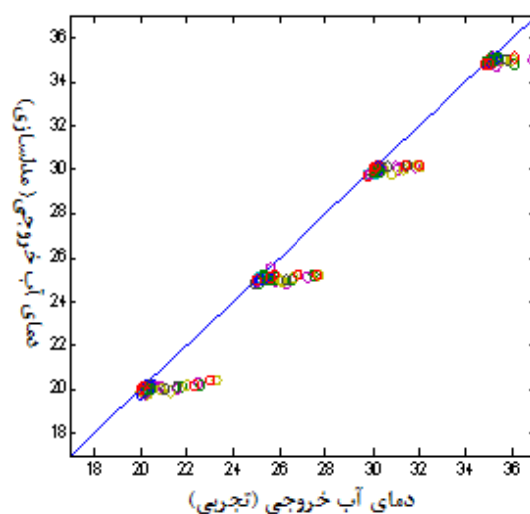
شکل ۱۰- نمای کلی اتصال دیواره محفظه به لوله



شکل ۱۱- نمای جزئی اتصال دیواره محفظه به لوله

آب با دمای  $T_w$  از داخل لوله و هوا با دمای  $T_a$  از سطح بیرونی لوله و از داخل محفظه عبور می‌کند. افزایش دمای هوا در جهت  $x$  در راستای طول لوله باعث افزایش دمای گوشت لوله شده، این افزایش دما در محل‌های اتصال محفظه به لوله همانند شکل ۱۱ قابل رؤیت است. از طرفی، طولی از این لوله ( $L_{eff}$ ) که افزایش دما بر آن تأثیر گذاشته نیز در شکل مشخص می‌باشد.

موجود در شکل ۹ این حالت اتفاق نیفتاده و نقاط ترسیم شده در زیر خط فوق واقع شده‌اند.



شکل ۹- مقایسه نتایج تجربی دمای آب خروجی با نتایج مدل سازی فرایند

با بررسی سیستم و تحقیق در مورد علت این اختلاف می‌توان به چندین عامل اشاره نمود:

- ۱) خطا دار بودن نتایج آزمایشگاهی ثبت شده
- ۲) دستگاه آزمایشگاهی دارای نقص فنی باشد
- ۳) نادرست بودن فرضیات به کار برده شده در مدل ریاضی فرایند
- ۴) نادرست بودن مدل ریاضی به کار برده شده

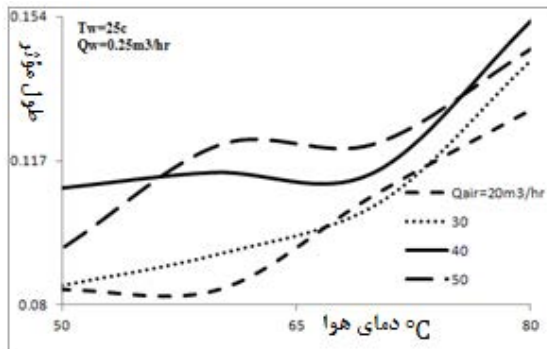
در اینجاست که باید علاوه بر موارد فوق به دنبال یک پارامتر تأثیرگذار در فرایند بوده، که توانسته چنین خطایی را در رسم نمودار شکل ۹ ایجاد نماید. علل بسیاری می‌تواند سبب به وجود آمدن این پدیده گردد. اما پس از بررسی‌های فراوان، مفهوم اثر دیواره برای بهبود نتایج شبیه سازی مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه گردید.

مطابق شکل ۱۰، پدیده اثر دیواره به دلیل افزایش دمای دیواره در هنگام عبور هوای گرم از داخل محفظه در محل اتصال دیواره به سطح بیرونی لوله آب به وجود آمده است. در این محل‌ها، در اثر تماس دو سطح به هم به دلیل تفاوت دمایی موجود بین دیواره محفظه و سطح بیرونی

## ۷- تصحیح مدل ریاضی فرایند

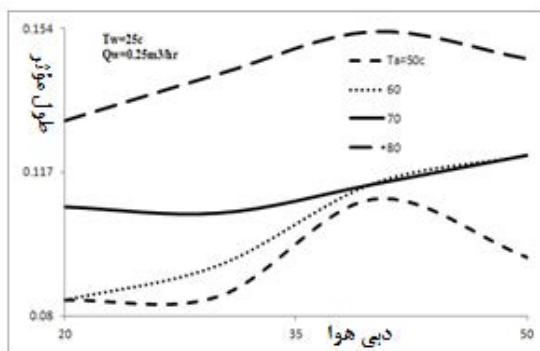
$$T_{owWE} = T_{iw} + (q_t * \pi * d_o * L + Q_{WE}) / (U_W * A * \rho_W * CP_W) \quad (19)$$

پس از تصحیح مدل ریاضی،  $L_{WE}$  برای ۲۵۶ آزمون به روش سعی و خطا محاسبه گردید و نهایتاً نحوه تغییرات طول تصحیح شده بر حسب پارامترهای فرایندی مختلف مطابق با شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۲- نحوه تغییرات طول مؤثر بر حسب دمای هوا

در بررسی نحوه تغییر طول مؤثر با تغییر دما و دبی هوا در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ انتظار می‌رود که مقدار طول مؤثر با افزایش دمای هوا و دبی هوا افزایش یابد. زیرا با افزایش این دو پارامتر دمای دیواره محفظه افزایش یافته و همچنین بر متوسط دمای هوایی که اثر دیواره از آن متأثر است، تأثیر گذاشته و باعث افزایش آن می‌گردد. بنابراین کار در دماها و دبی‌های کم هوا مقدار این اثر را به حداقل خواهد رساند. همچنین در این شکل‌ها به علت خطاهای موجود در سیستم و یا خطاهای احتمالی موجود در آزمایش‌ها، منحنی‌های ترسیم شده دارای انحنا و تداخل می‌باشند.



شکل ۱۳- نحوه تغییرات طول مؤثر بر حسب دبی هوا

پس از یافتن دلیل اصلی اختلاف نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل سازی و ارائه پدیده اثر دیواره، حال به تصحیح مدل ریاضی فرایند با در نظر گرفتن اثر مذکور پرداخته و با سعی و خطا مقدار طول بهینه این اثر را تعیین و با لحاظ نمودن طول به‌دست آمده در مدل سازی فرایند، می‌توان بر برابری نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مدل سازی دست یافت.

در تصحیح مدل ریاضی فرایند، دمای متوسط آب برابر است با:

$$T_{avW} = (T_{iw} + T_a) / 2 \quad (15)$$

بر اساس این دما ویسکوزیته سینماتیک آب، ویسکوزیته آب، عدد بدون بعد رینولدز، عدد بدون بعد پراکتل و عدد بدون بعد ناسلت را به‌دست آورده و پس از به‌دست آوردن این مقادیر می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی آب، که متأثر از اثر دیواره می‌باشد را از معادله (۱۶) تعیین کرد [۱۴-۱۶].

$$h_{wWE} = \frac{Nu_W * K_W}{d_i} \quad (16)$$

مقدار  $Q_{WE}$  نیز بر اساس معادله (۱۷) برابر است با:

$$Q_{WE} = h_{wWE} * A_{WE} * (T_a - T_{iw}) \quad (17)$$

در معادله فوق،  $A_{WE}$  برابر است با:

$$A_{WE} = \pi * d_o * L_{WE} \quad (18)$$

در معادله (۱۸) پارامتر  $L_{WE}$  برابر با طولی از لوله آب است که شامل اثر دیواره می‌شود. در تصحیح اثر مذکور ابتدا یک مقدار اولیه برای  $L_{WE}$  حدس زده، سپس با سعی و خطا مقدار بهینه آن از مقایسه نتایج تجربی دمای آب خروجی، با دمای خروجی آب که متأثر از اثر دیواره بوده، به‌دست خواهد آمد.

مطابق معادله (۱۹)، دمای خروجی آب متأثر از اثر دیواره برابر است با:

به دلیل برخی از خطاهای موجود در سیستم، خطاهای موجود در آزمایش‌ها و نوع خاص طراحی دستگاه، اختلافاتی مشاهده گردید.

در بررسی‌های انجام شده، علت اصلی اختلاف به وجود آمده در نتایج مدل سازی با نتایج تجربی وجود پدیده‌ای است به نام اثر دیواره.

در بین پارامترهای فرایندی موجود در انجام آزمایش‌ها، دما و دبی هوا بیشترین تأثیر را در وقوع پدیده اثر دیواره خواهند داشت.

سیستم بررسی شده در این مقاله قابلیت اعمال تغییرات مختلف را داشته و می‌توان به طرق مختلف کارایی آن را ارتقا بخشید. تعدادی از تغییراتی که با اعمال آن می‌توان موجب نوآوری و خلاقیت شد عبارت است از:

(۱) تصحیح فرم محفظه برای حالتی که اثر دیواره در آن به حداقل مقدار ممکن برسد.

(۲) بررسی اثر شکل هندسی سیستم: این کار را می‌توان با تعویض محفظه و جابجایی آن با محفظه‌هایی در اندازه‌های متفاوت انجام داد.

(۳) بررسی افزودن ناخالصی (مانند آمونیاک) در روند انتقال جرم و انتقال حرارت.

(۴) تغییر طراحی سیستم برای حالتی که بتوان نرخ میعان را اندازه‌گیری کرد.

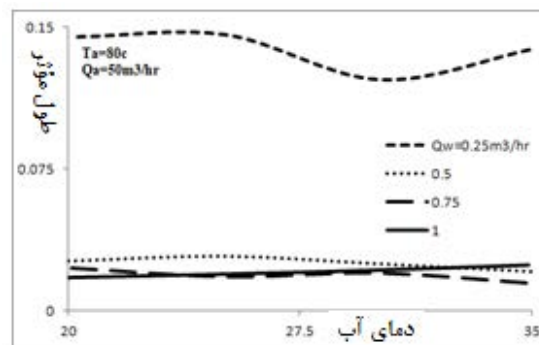
(۵) انجام آزمایش‌ها برای حالتی که بتوان سیستم را تحت فشار قرار داد و آزمایش‌ها را به غیر از حالت اتمسفری نیز انجام داد.

(۶) استفاده از ماده دیگری به جای آب در مخزن اشباع کننده.

(۷) استفاده از یک لوله نیمه متخلخل در داخل محفظه برای بررسی پدیده‌های همزمان تبخیر و میعان.

### تقدیر و تشکر

از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد جهت تأمین هزینه‌های انجام این تحقیق سپاسگزاریم.



شکل ۱۴- نحوه تغییرات طول مؤثر برحسب دمای آب

در شکل ۱۴ نیز به بررسی نحوه تغییرات طول مؤثر با دبی آب در بیشترین دما و دبی هوای ممکن پرداخته شده است. با توجه به شکل، با افزایش دمای آب در دبی‌های مختلف تغییر چندانی به وجود نیامده، بجز در حالتی که دبی آب  $0.25 \text{ m}^3/\text{hr}$  بوده است. دلیل این امر کم بودن زمان ماند آب در داخل لوله است. از این رو، تغییر دبی آب عامل تأثیرگذاری در افزایش طول مؤثر نبوده، مگر در حالتی که محدوده تغییرات این پارامتر کاهش یابد و حداکثر مقدار آن  $0.25 \text{ m}^3/\text{hr}$  باشد.

### ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دستگاهی با قابلیت انجام آزمایش‌های مربوط به انتقال همزمان جرم و حرارت ارائه شده است.

آزمایش‌های انجام شده توسط این دستگاه با تغییر پارامترهای فرایندی مانند دبی و دمای دو سیال آب و هوا صورت گرفته است.

بررسی نتایج تجربی مؤید این مسئله می‌باشد که افزایش دمای هوا بر نیروی محرکه انتقال حرارت تأثیر گذاشته و باعث کاهش آن می‌گردد.

افزایش دمای آب ورودی به سیستم موجب افزایش فشار جزئی سیستم شده که این امر موجب کاهش نیروی محرکه انتقال جرم و انتقال حرارت می‌گردد و میزان این دو پدیده را کاهش می‌دهد.

گام بعدی در این تحقیق، مدل سازی فرایند می‌باشد. از مقایسه نتایج تجربی با نتایج حاصل از مدل سازی فرایند،

## مراجع

- [1] Nusselt, W. (1916), "Die Oberfluchenkonedensation Wasserdampfes". Zeitscher. Ver Deutsch. Ing. 60, 569.
- [2] Carey, V.P. (1992), "Liquid-Vapor Phase Change Phenomena". Hemisphere, N. Y.
- [3] Collier, J.G., Thome, J.R. (1996), "Convective Boiling and Condensation". Oxford University Press, Oxford, England.
- [4] Al-Johani, M.S. (1996), "A three-dimensional mechanistic model of steam condensers using porous medium formulation". PhD Thesis, Georgia Institute of Technology.
- [5] Sripada, ??, Angirasa, ?? (2001), "Evaporation and condensation heat transfer performance of plate surface". Intl. J. Heat and Mass Trans., Vol. ??, pp. ??-??.
- [6] Smolik, J., Dzumbova, L., Schwarz, J., Kulmala, M. (2001), "Evaporation of ventilated water droplet: Connection between heat and mass transfer". J. Aerosol Sci., Vol. 32, pp. 739-748.
- [7] Seara, J.F., Sieres, J., Vázquez, M. (2002), "Simultaneous heat and mass transfer of a packed distillation column for ammonia-water absorption refrigeration systems", Intl. J. Thermal Sci., Vol. 41, pp. 927-935.
- [8] Giri, A., Narasimham, G.S.V.L., Krishna Murthy, M.V. (2003), "Combined natural convection heat and mass transfer from vertical fin arrays". Intl. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 24, pp. 100-113.
- [9] Fan, J., Cheng, X., Wen, X., Wei, W. (2004), "An improved model of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation and comparison with experimental results". Intl. J. Heat and Mass Trans., Vol. 47, pp. 2343-2352.
- [10] Bougriou, C., Bessa, R. (2005), "Determination of apparent heat transfer coefficient by condensation in an industrial finned-tube heat exchanger: Prediction". Appl. Thermal Eng., Vol. 25, pp. 1863-1870.
- [11] Seara, J.F., Uhia, F.J., Sieres, J. (2008), "Research on the condensation of the ammonia-water mixture on a horizontal smooth tube". Intl. J. Refriger., Vol. 31, pp. 304-314.
- [12] Khani, F., Aziz, A., Hamed-Nezhad, S. (2010), "Simultaneous heat and mass transfer in natural convection about an isothermal vertical plate". J. King Saud Univ. (Sci.), Vol. 24, No. 2, pp. 123-129.
- [13] Ahsan, A., Fukuhara, T. (2010), "Mass and heat transfer model of tubular solar still". Intl. J. Solar Energy, Vol. 84, pp. 1147-1156.
- [14] Perry, R.H., Chilton, C.H. (1973), "Chemical Engineers Handbook". 5<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill Co., N. Y.
- [15] Treybal, R.E. (2001), "Mass Transfer Operation". 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill, N. Y.
- [16] Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M. (2001), "Chemical Engineering Thermodynamics". 6<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, N. Y.
- [17] McAdams, W.H. (1954), "Heat Transmission". 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill, N. Y.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MODELING OF SIMULTANEOUS HEAT & MASS TRANSFER IN THE HORIZONTAL CHANNEL WITH THE WALL EFFECT

F. Karimizad Gohari<sup>1,\*</sup>, A. Shahsavand<sup>2</sup>, S. Alikhani Mohammad Abad<sup>3</sup>

1. M.Sc., Chemical Engineering Department, Islamic Azad University of shahrood. Department of Engineering
2. Faculty Member of Chemical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad
3. M.Sc., Chemical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

\*Corresponding Author: fkzg8@yahoo.com

---

### ARTICLE INFO

---

Keywords:

Simultaneous Heat &  
Mass Transfer,  
Condensation,  
Evaporation,  
Modeling,  
Experimental,  
Wall Effect.

### ABSTRACT

---

In most of the chemical engineering processes, the phenomena of mass and heat transfer are among their inseparable parts. In the present paper, simultaneous heat and mass transfer has been studied experimentally by a laboratory set up. In this apparatus, the existence of condensation and evaporation created due to heat transfer causes mass transfer and finally influences the coefficient of heat transfer. Also, mass transfer changes heat distribution in heat transfer phenomena that causes total change in heat flux. Thus, in this apparatus, some experiments have been carried out through changing different parameters such as temperature and flow rate for two fluids, water and air. Comparing the results obtained from these experiments and the ones gained from the process modeling, the existence of wall effect and its influence on the temperature of output water from the system were realized and process modeling was corrected again through applying wall effect. The studies conducted in the present research paper indicate that if the temperature and flow rate of air rises, the influence of wall effect increases and the change of wall effect has no significant change due to rise of the water temperature and flow rate, therefore, it is not an influential parameter.

---