

# اثرات هیدروترمودینامیک و هندسه مجرای آب خنک‌کن بر جذب بخار در یک فیلم محلول لیتیوم بروماید ریزان

دانشجوی دکتری، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
h.nourshad@ut.ac.ir

**حسین نورشاد**

استادیار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، mas.mohammadi@ut.ac.ir

**مسعود محمدی**

دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
rasoul.rahmati@ut.ac.ir

**رسول رحمتی**

دانشیار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، vakilipour@ut.ac.ir

**شیدوش وکیلی‌پور\***

## چکیده

در پژوهش حاضر، تاثیر دبی جرمی، دما، شکل دیواره خنک‌کاری و هندسه مجرای خنک‌کن بر پدیده جذب بخار آب در فیلم ریزان لیتیوم بروماید بررسی می‌شود. مدل‌سازی عددی فرآیند جذب با استفاده از یک الگوریتم تعقیب سطح‌فاصل کاملاً همگیر در چارچوب رهیافت اولبری-لاگرانژی اختیاری انجام شده‌است. مجرای آب خنک‌کن با سه سطح مقطع ثابت، همگرا و واگرا و دیواره خنک‌کاری با دو شکل صاف و سینوسی در نظر گرفته شده و تاثیر آنها بر خنک‌کاری فیلم ریزان و جذب بخار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که دیواره خنک‌کاری سینوسی به دلیل ایجاد سطح‌فاصل موجی و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی، منجر به بهبود انتقال جرم و گرما نسبت به دیواره خنک‌کاری صاف می‌شود. در مجرای همگرا، به دلیل افزایش سرعت جریان، بیشترین آهنگ جذب بخار و شار گرمایی در فیلم جاذب محاسبه می‌شود. از طرف دیگر، خنک‌کاری فیلم لیتیوم بروماید صرفاً در نزدیکی خروجی یک مجرای خنک‌کن واگرا بیشینه خواهد بود. نتایج این پژوهش می‌تواند فرآیند طراحی و بهینه‌سازی عملکرد دستگاه‌های جذب بخار را تسهیل کند.

**واژه‌های کلیدی:** فیلم ریزان لیتیوم بروماید، جذب بخار آب، روش تعقیب سطح‌فاصل، الگوریتم کاملاً همگیر، سطح‌فاصل موجی، دیواره خنک‌کاری سینوسی.

## Effects of the coolant water hydrothermodynamics and channel geometry on the vapor absorption in a falling lithium bromide solution film

**H. Nourshad**  
**M. Mohammadi**  
**R. Rahmati**  
**Sh. Vakilipour**

Collage of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran  
Collage of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran  
Collage of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran  
Collage of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

This study investigates the effects of mass flow rate, temperature, cooling wall configuration, and cooling channel geometry on water vapor absorption in a lithium bromide falling film. The numerical modeling of the absorption process is performed using a fully coupled interface-tracking algorithm within an arbitrary Eulerian-Lagrangian framework. Three cross-sectional configurations for the cooling water channel (constant, convergent, and divergent) alongside two cooling wall configurations (flat and sinusoidal) are considered, and their effects on falling film cooling and vapor absorption are studied. The results reveal that the sinusoidal cooling wall enhances mass and heat transfer compared to the flat cooling wall due to the formation of wavy interface and hydrodynamic instabilities. In the convergent channel, the elevated flow velocity results in the highest vapor absorption rate and heat flux within the absorbent film. Conversely, the cooling of the lithium bromide film reaches its maximum only near the outlet of a divergent cooling channel. These findings can facilitate the design and optimization process of vapor absorption systems.

**Keywords:** Lithium Bromide Falling Film, Water Vapor Absorption, Interface Tracking Method, Fully Coupled Algorithm, Wavy Interface, Sinusoidal Cooling Wall.

### ۱- مقدمه

فرآیندهای جذب در بخش‌های متنوعی از جمله سامانه‌های سرمایشی، تهویه هوا، سامانه‌های خنک‌کننده رآکتورهای هسته‌ای، مبادله‌کن‌های گرمایی، صنایع شیمیایی و غذایی، پالایشگاه‌های نفت و سامانه‌های نمک‌زدایی گرمایی کاربردهای گسترده‌ای دارند. به منظور جستجوی راهکارهایی برای بهبود کارایی سامانه‌های جذبی، در

پژوهش‌های اخیر تمرکز ویژه‌ای بر استفاده از جریان‌های فیلم ریزان<sup>۱</sup> مشاهده می‌شود. این نوع از جریان‌ها که در گروه جریان‌های سطح آزاد قرار می‌گیرند، به دلیل وجود فاز گاز در کنار فاز مایع به عنوان جریان‌های دوفازی دسته‌بندی می‌شوند. با تحلیل این نوع از جریان‌ها و ارائه تدابیری در فیزیک میدان، علاوه بر بهبود قابلیت‌های انتقال گرما در سامانه‌های جذبی، پتانسیل افزایش آهنگ انتقال جرم را نیز می‌توان مشاهده کرد. جذب‌کننده‌های فیلم ریزان، که سطوح تماس بالایی برای

<sup>1</sup> Falling film flows

انتقال جرم دارند، اغلب حاوی محلولی به عنوان جاذب بوده که با تشدید فعل و انفعالات ریزمقیاس در فیلم ریزان، قادر به افزایش میزان جذب خواهند بود. در یک فرآیند جذب فیزیکی، فاز گاز تحت تأثیر گرادیان فشار و غلظت بین دو فاز، به داخل فاز مایع نفوذ می‌کند. این پدیده فیزیکی با قرار گرفتن دو فاز در مجاورت یکدیگر آغاز شده و در طی آن، فاز گاز به داخل فاز مایع نفوذ می‌کند. این فرآیند تا زمانی که غلظت دو فاز در مجاورت سطح فاصل مایع و گاز به حالت تعادل برسد، ادامه می‌یابد.

مطالعات متعددی درباره پدیده جذب بخار آب در فیلم‌های ریزان انجام شده است. وکیلی‌پور و حکمت‌خواه [۱ و ۲]، با استفاده از الگوریتم تعقیب سطح فاصل کاملاً همگیر<sup>۱</sup>، اثرات امواج و شکل دیواره خنک‌کاری را بر آهنگ جذب بخار آب به صورت پایا و ناپایا بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که امواج ریز<sup>۲</sup> و تکین<sup>۳</sup> در سطح مایع و همچنین کاهش دمای دیواره خنک‌کاری، آهنگ جذب را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، تغییر شکل دیواره خنک‌کاری به صورت سینوسی و مثلثی نسبت به دیواره خنک‌کاری صاف، اثرات مثبت بر انتقال جرم و گرما داشته و می‌تواند کارایی جذب را بهبود بخشد. در پژوهشی دیگر، وانگ و همکاران [۳] با استفاده از مدل‌های ریاضی مبتنی بر اصل بقای انرژی و جرم، اثر نانوذرات بر انتقال جرم در جذب فیلم ریزان محلول لیتیم بروماید را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که افزودن نانوذرات، آهنگ جذب بخار آب را افزایش می‌دهد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات به ۰/۰۵٪ و ۰/۰۱٪، ضریب انتقال جرم به ترتیب ۱/۲۸ و ۱/۴۱ برابر بیشتر می‌شود. گانگ و همکاران [۴] نیز تأیید کردند که با افزایش میزان نانوذرات، ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. در چندین پژوهش دیگر، عوامل مؤثر بر جذب بخار آب و آمونیاک در سامانه‌های فیلم ریزان مورد بررسی قرار گرفته است. جانگ و همکاران [۵] با استفاده از روش شبکه بولتزمن<sup>۴</sup>، تأثیر امواج سطحی و ارتعاشات بر جذب بخار آب در سامانه‌های تبرید جذبی لیتیم بروماید آب را بررسی کردند و نشان دادند که این عوامل می‌توانند فرآیند جذب را بهبود دهند، اگرچه افزایش عدد رینولدز اثر این امواج را کاهش می‌دهد. آرمو و همکاران [۶] نشان دادند که افزودن نانوذرات نقره به محلول لیتیم بروماید باعث افزایش آهنگ جذب بخار آب و ضریب انتقال جرم می‌شود. ون و همکاران [۷] در مرور جامعی بر شبیه‌سازی‌های عددی در سامانه‌های فیلم ریزان، نتایج مشابهی درباره تأثیر امواج و ارتعاشات بر بهبود جذب ارائه دادند. تریکه و همکاران [۸] نیز در مطالعه‌ای تجربی و عددی، جذب بخار آمونیاک در یک جذب‌کننده فیلم ریزان با صفحات موج‌دار را بررسی کردند و نشان دادند که افزایش اختلاف دما بین بخار و دیواره و استفاده از خنک‌کاری با جریان مخالف می‌تواند آهنگ جذب را بهبود بخشد. گارسیا و همکاران [۹] در پژوهشی به بررسی عددی و تجربی جذب فیلم ریزی لیتیم بروماید با در نظر گرفتن رژیم‌های موجی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش عدد رینولدز باعث افزایش آهنگ جذب

می‌شود. به طور کلی این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که امواج سطحی، ارتعاشات، افزودن نانوذرات، و بهینه‌سازی شرایط خنک‌کاری، نقش مهمی در افزایش کارایی جذب در سامانه‌های فیلم ریزان دارند. هوستینی و اورمیستون [۱۰ و ۱۱] با استفاده شبیه‌سازی عددی مبتنی بر یک الگوریتم همگیر دوفازی، جذب بخار آب در محلول لیتیم بروماید روی صفحه‌ای عمودی را بررسی کردند. ایشان نشان دادند که افزایش عدد رینولدز فاز گاز، فشار ورودی و اختلاف دما باعث کاهش ضخامت فیلم مایع و افزایش آهنگ جذب می‌شود. همچنین، تغییرات در ضریب انتشار جرم در سطح فاصل بهبود قابل توجهی در انتقال جرم ایجاد می‌کند. این مطالعات بر اهمیت پارامترهای جریان و دما در بهبود عملکرد سامانه‌های جذب لیتیم بروماید تأکید دارند.

پژوهش‌های متعددی به بررسی بهبود انتقال جرم و گرما در فرآیندهای جذب و رطوبت‌زدایی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پرداخته‌اند. لی و همکاران [۱۲] مدلی ریاضی برای جذب در سامانه‌های تبرید آمونیاک-آب توسعه دادند که نتایج آن تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت و نشان داد که تغییر پارامترهایی مانند دما و غلظت محلول می‌تواند عملکرد جذب‌کننده را بهبود بخشد. چن و همکاران [۱۳] و لو و همکاران [۱۴]، با استفاده از روش حجم سیال<sup>۵</sup> نشان دادند که نوسانات سطح فیلم مایع و استفاده از صفحات سوراخ‌دار می‌تواند با ایجاد جریان‌های گردابی و افزایش سطح فاصل گاز-مایع، بهبود قابل توجهی در انتقال جرم و عملکرد رطوبت‌زدایی ایجاد کند. دیتزه و همکاران [۱۵] نیز با بررسی تأثیر چین‌خوردگی‌های دیواره در فیلم‌های ریزی موج‌دار، دریافتند که این چین‌خوردگی‌ها، به‌ویژه برآمدگی‌های نیم‌دایره‌ای، با افزایش تلاطم سطحی، بهبود قابل ملاحظه‌ای در انتقال جرم و گرما فراهم می‌کنند. این مطالعات نشان می‌دهند که بهینه‌سازی هندسه و شرایط جریان می‌تواند به طور چشمگیری کارایی فرآیندهای جذب و رطوبت‌زدایی را افزایش دهد.

وکیلی‌پور و همکاران [۱۶] یک روش تعقیب سطح فاصل کاملاً همگیر (FCIT) را بر اساس رویکرد اولبری-لاگرانژی اختیاری<sup>۶</sup> برای حلگر حجم محدود توسعه دادند. این روش برای شبیه‌سازی جریان‌های دو فازی با تنش برشی و کشش سطحی بالا استفاده شد و در مقایسه با روش نیمه همگیر<sup>۷</sup>، دقت، پایداری و سرعت همگرایی بهتری ارائه کرد. روش FCIT در شبیه‌سازی‌های مختلف از جمله فیلم ریزان و حباب صعودی عملکرد موفق‌تری نشان داد. محمدی و همکاران [۱۷] خطی‌سازی نیوتنی<sup>۸</sup> را برای حل معادلات مومنوم به کار گرفتند و یک الگوریتم اصلاح‌شده را توسعه دادند که به صورت ضمنی بقای جرم را در فرآیند خطی‌سازی در نظر می‌گیرد. این الگوریتم از لحاظ پایداری، همگرایی، و دقت ارزیابی شده و با حل مسائل استاندارد جریان سیال با استفاده از یک حل‌گر حجم محدود کاملاً همگیر مبتنی بر فشار، مقایسه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم خطی‌سازی نیوتنی اصلاح‌شده تا ۲۲ برابر سریع‌تر از الگوریتم خطی‌سازی پیکارد<sup>۹</sup> در

<sup>5</sup> Volume of fluid

<sup>6</sup> Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

<sup>7</sup> Partially-coupled interface tracking

<sup>8</sup> Newton linearization

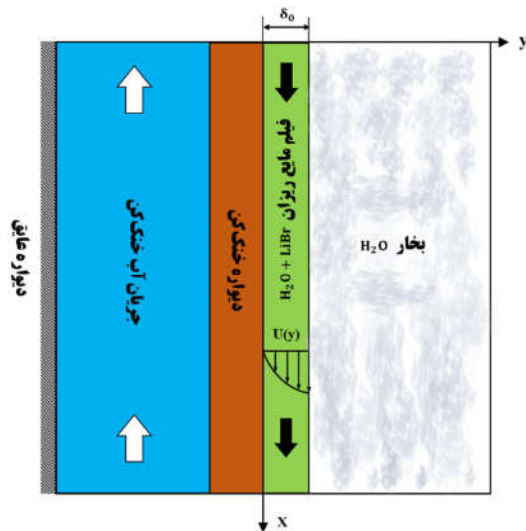
<sup>9</sup> Picard linearization

<sup>1</sup> Fully-coupled interface tracking (FCIT)

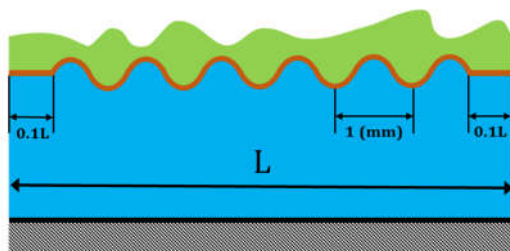
<sup>2</sup> Capillary

<sup>3</sup> Solitary

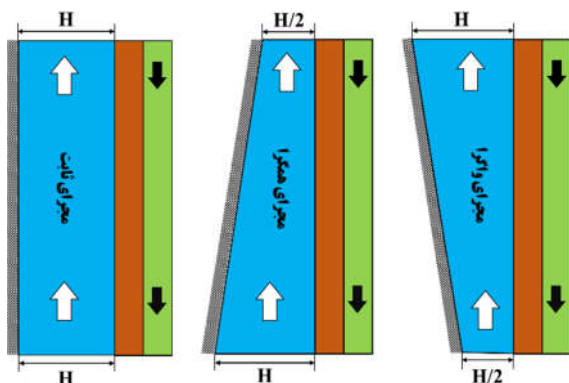
<sup>4</sup> Lattice-Boltzman method



شکل ۱- مدل دو بعدی از فرآیند جذب



شکل ۲- مدل دو بعدی از هندسه‌های مجرای خنک‌کاری ثابت، همگرا و واگرا



شکل ۳- مدل دو بعدی از هندسه‌های مجرای خنک‌کاری ثابت، همگرا و واگرا

## ۲-۱- معادلات حاکم

در پژوهش حاضر، معادلات حاکم بر جریان دوفازی برای سیال تراکم‌ناپذیر، شامل بقای فضا، بقای جرم، بقای مومنتوم، بقای انرژی و بقای گونه‌هاست که به ترتیب با معادلات (۲) تا (۶) بیان شده است

[۱]

مسائل جریان پایدار مانند حفره با درپوش محرک<sup>۱</sup> همگرا می‌شود و تعداد تکرارهای مورد نیاز را تا ۱۰ برابر در مسئله جریان پله رو به عقب<sup>۲</sup> کاهش می‌دهد. همچنین، در مسائل جریان ناپایدار مانند جریان اطراف استوانه، این الگوریتم با تعداد تکرار کمتر و حفظ دقت جواب نسبت به الگوریتم پیکارد عمل می‌کند.

اگرچه تأثیرات امواج سطحی، ارتعاشات، و نانوذرات بر بهبود انتقال جرم و گرما بررسی شده، اما اثرات همزمان شکل دیواره خنک‌کاری و هندسه مجرای آب خنک‌کن بر جذب بخار آب به‌طور جامع مطالعه نشده است. علاوه بر این، اثرات این عوامل در اندرکنش با اثرات هیدروترمودینامیک (دمای ورودی و دبی جرمی) جریان مخالف<sup>۳</sup> خنک‌کاری، مورد توجه قرار نگرفته است. در این مطالعه، جذب بخار آب در فشار بسیار پایین (نزدیک به خلاء) به درون فیلم محلول لیتیوم بروماید ریزان، با در نظر گرفتن تأثیرات شکل دیواره خنک‌کاری و هندسه مجرای آب خنک‌کن بررسی می‌شود. دیواره خنک‌کاری در دو شکل صاف و سینوسی و هندسه مجرای آب خنک‌کن در سه حالت ثابت، همگرا، و واگرا در نظر گرفته می‌شود. ویژگی‌های ترموفیزیکی فیلم مایع ثابت فرض شده و اثرات دمای ورودی و دبی جرمی آب خنک‌کن بر انتقال جرم و انتقال گرمای فیلم مورد بررسی قرار می‌گیرد. میدان جریان فیلم ریزان با استفاده از یک حلگر حجم محدود کاملاً هم‌گیر صورت گرفته که بر اساس یک الگوریتم تعقیب سطح‌فاصل و رهیافت اولبری-لاگرانژی اختیاری توسعه داده شده است.

## ۲- بیان فیزیک مسئله

در پژوهش حاضر، میدان دوبعدی جریان شامل یک فیلم مایع جاذب ریزان پایا از محلول لیتیوم بروماید بر روی صفحه‌ای به طول ۰٫۲ متر است (شکل ۱). محلول جاذب تحت تأثیر نیروی جاذبه با بردار شتاب گرانش  $\mathbf{g} = g_x \mathbf{i} + g_y \mathbf{j}$  در امتداد دیواره خنک‌کاری به سمت پایین جریان یافته و بخار آب را جذب می‌کند. جذب بخار آب باعث آزاد شدن گرما و در نتیجه افزایش دمای فیلم مایع می‌شود. جهت ادامه روند جذب، برای خنک‌کاری فیلم مایع ریزان، آب در خلاف جهت ریزش فیلم در مجرای با عرض ۵ میلی‌متر جریان دارد. ضخامت دیواره خنک‌کاری که فیلم مایع روی آن جریان دارد ۱ میلی‌متر و از جنس مس تعیین شده است. در مطالعه حاضر، ضخامت فیلم با استفاده از روابط نظری ناسلت طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$\delta_0 = \left( \frac{3\Gamma\mu}{\rho g} \right)^{1/3} \quad (1)$$

در این معادله، پارامترهای  $\Gamma$ ،  $\mu$ ،  $\rho$  به ترتیب دبی جرمی، لزجت و چگالی می‌باشند. به منظور بررسی اثر شکل دیواره و هندسه مجرای آب خنک‌کن روی پدیده جذب بخار توسط فیلم مایع ریزان و انتقال گرما بین فیلم و جریان آب خنک‌کن از دیواره‌ای با شکل سینوسی (شکل ۲) و مجرای خنک‌کاری با سه مقطع ثابت، همگرا و واگرا (شکل ۳) استفاده شده است.

<sup>1</sup> Lid-driven cavity

<sup>2</sup> Backward facing step

<sup>3</sup> Counter-current flow

$$T_{i,L} = T_i(W_{i,L}, P_i) \quad (12)$$

$$Q_{i,L} = Q_{i,G} - Q_{fg} \quad (13)$$

در معادلات فوق  $Q_i$  بیانگر آهنگ انتقال گرمای قابل سنجش در سطح فاصل،  $Q_{fg}$  آهنگ انتقال گرمای نهان جذب است. این پارامترها با روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$Q_i = A_i \left( k \frac{\partial T}{\partial n} \right)_i \quad (14)$$

$$Q_{fg} = \dot{m}_{i,L} H_a = \dot{m}_{i,G} H_a \quad (15)$$

در معادله (۱۵)،  $H_a$  گرمای نهان تغییر فاز و  $\dot{m}_i$  شار جرمی خالص عبوری از سطح فاصل است. در معادله (۱۱)،  $T_{i,L}$  دمای فاز مایع در سطح فاصل است که خود تابعی از غلظت مایع  $(W_{i,L})$  و فشار  $(P_i)$  در سطح فاصل می‌باشد. دمای فاز مایع در سطح فاصل با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده در مرجع [۱۸] تعیین می‌شود. شار جرمی خالص عبوری از سطح فاصل با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_i = [\rho(\mathbf{u} - \mathbf{u}_b) \cdot \mathbf{n}]_i \quad (16)$$

شار بوجود آمده از حرکت سطح فاصل را می‌توان با حجم جاروب شده توسط سطح فاصل  $(\Omega)$  محاسبه کرد [۱۹].

$$\dot{m}_i = [\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} - \rho \dot{\Omega}]_i \quad (17)$$

شرط مرزی سینماتیکی در سطح فاصل نقش اساسی در تعیین موقعیت سطح فاصل دارد. در این شرط (معادله (۱۸))، دبی جرمی عبوری از سطح فاصل به خواص ترموفیزیکی هر یک از فازها در سطح فاصل مرتبط می‌شود.

$$\dot{m}_{i,L} = \dot{m}_i(\theta_L, \theta_G) \quad (18)$$

در معادله (۱۸)،  $\theta_L$  و  $\theta_G$  می‌توانند سرعت، فشار، دما و یا سایر پارامترهای مرتبط با فاز سیال باشند. معادله (۱۸) نقش کلیدی در دستیابی به یک الگوریتم کاملاً کوپل ایفا می‌کند. با جای‌گذاری معادلات (۱۷) و (۱۵) در معادله سینماتیکی، یک همگیری بین میدان سرعت، هندسه سطح فاصل و میدان دما ایجاد می‌گردد [۱]. مدل ریاضیاتی مناسب برای تعیین جرم عبوری از سطح فاصل بر اساس فیزیک مسئله (مثل چگالش، تبخیر، جذب) تعیین می‌شود. شرایط مرزی مرتبط با گونه‌ها نیز شامل عدم نفوذ مایع در فاز گاز است که به صورت معادله (۱۹) تعریف می‌شود.

$$(\rho D)_{i,L} A_i \frac{\partial W_i}{\partial n} \Big|_{i,L} = \dot{m}_i (W_i - 1) \quad (19)$$

$$W_{i,G} = 0 \quad (20)$$

جهت بسته‌شدن دستگاه معادلات و کالیبره کردن میدان فشار در هر دو فاز، شرط ثابت بودن گرادینت فشار در راستای عمود بر سطح فاصل اعمال می‌شود.

$$\left( \frac{\partial^2 p}{\partial n^2} \right)_i = 0 \quad (21)$$

سرعت ورودی فیلم مایع در راستای  $y$  به صورت  $v = 0$  و در راستای  $x$  یک توزیع سهمی اعمال شد [۴].

$$u = \frac{3}{2} u_n \left( 2 \frac{y}{\delta_0} - \left( \frac{y}{\delta_0} \right)^2 \right) \quad (22)$$

در معادله (۲۲)،  $\delta_0$  ضخامت فیلم، و  $u_n$  به عنوان سرعت ناسلت از طریق معادله (۲۳) حساب می‌شود.

$$\int_{\Omega} d\Omega - \int_s V_b \cdot \mathbf{n} ds = 0 \quad (2)$$

$$\int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_s \rho(V - V_b) \cdot \mathbf{n} ds = 0 \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} \rho V d\Omega + \int_s \rho V(V - V_b) \cdot \mathbf{n} ds = \int_s T \cdot \mathbf{n} ds + \int_{\Omega} \rho g d\Omega \quad (4)$$

$$\int_{\Omega} \rho C_p T d\Omega + \int_s \rho(C_p T + W(\bar{h}_{H_2O} - \bar{h}_{LiBr})) (V - V_b) \cdot \mathbf{n} ds = \int_s k \nabla T \cdot \mathbf{n} ds + \int_s \rho D(\bar{h}_{H_2O} - \bar{h}_{LiBr}) \nabla W \cdot \mathbf{n} ds \quad (5)$$

$$\int_{\Omega} \rho W d\Omega + \int_s \rho W(V - V_b) \cdot \mathbf{n} ds = \int_s \rho D \nabla W \cdot \mathbf{n} ds \quad (6)$$

در معادلات فوق  $\rho$  چگالی سیال،  $\mathbf{u} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$  بردار سرعت،  $\mathbf{u}_b = u_b\mathbf{i} + v_b\mathbf{j}$  بردار سرعت سطح کنترل،  $\mathbf{n} = n_x\mathbf{i} + n_y\mathbf{j}$  بردار یکه عمود بر سطح کنترل است.

## ۲-۲- شرایط مرزی

به طور کلی، شرایط مرزی شامل شرایط ورودی و خروجی جریان فیلم و جریان خنک‌کاری، شرایط دیواره‌ها و شرایط سطح مشترک بین دو فاز گاز و مایع و همچنین انتقال گرما بین فیلم مایع ریزان و جریان خنک‌کاری است. برای تمامی دیواره‌ها شرط عدم لغزش برقرار است. برای یک جریان دوفازی، شرایط حاکم بر سطح فاصل شامل شرط مرزی دینامیکی، شرط پیوستگی و شرط سینماتیکی است. شرط مرزی دینامیکی بیانگر تعادل نیروی‌های عمودی و مماسی روی سطح مشترک فاز گاز-مایع است که با معادلات (۷) و (۸) مشخص می‌شوند.

$$\mathbf{n} \cdot T_{i,L} \cdot \mathbf{n} - \sigma K = \mathbf{n} \cdot T_{i,G} \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

$$\mathbf{n} \cdot T_{i,L} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{n} \cdot T_{i,G} \cdot \mathbf{t} \quad (8)$$

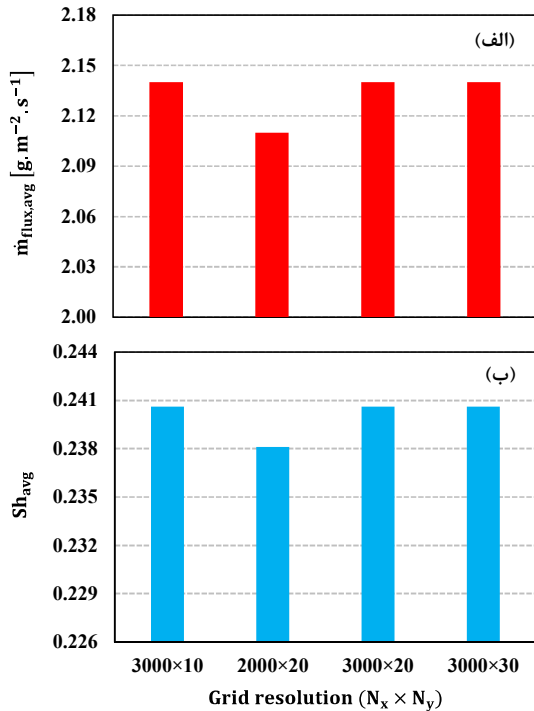
در معادلات (۷) و (۸) اندیس‌های  $i$ ،  $L$  و  $G$  به ترتیب به سطح فاصل، فاز مایع و فاز گاز اشاره دارند. همچنین پارامترهای  $K$  و  $\sigma$  به ترتیب بیانگر کشش سطحی و انحناى سطح می‌باشند [۱۶].  $\mathbf{t} = t_x\mathbf{i} + t_y\mathbf{j}$  بردار یکه مماس به سطح است. شرایط پیوستگی در سطح فاصل شامل برابری سرعت‌های مماسی، برابری شار جرمی، برابری دما، برابری شار گرمایی در دو طرف سطح فاصل است. این شرایط به ترتیب در معادلات (۹) تا (۱۳) ارائه شده است.

$$V_{i,L} \cdot \mathbf{t} = V_{i,G} \cdot \mathbf{t} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{i,L} = \dot{m}_{i,G} \quad (10)$$

$$T_{i,L} = T_{i,G} \quad (11)$$

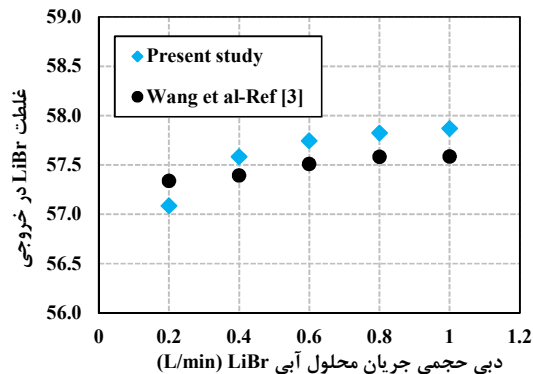
گرادیان‌های جریان و انتقال جرم و گرما مناسب می‌باشد. بر این اساس، شبکه با تقسیم‌بندی  $3000 \times 20$  در میدان فیلم ریزان جهت انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب می‌شود. بیشینه عدد رینولدز جریان آب خنک‌کن در شبیه‌سازی‌ها برابر با ۶۰۰ بوده و در گسسته‌سازی میدان جریان آب خنک‌کن از شبکه با تقسیم‌بندی  $3000 \times 20$  استفاده شده‌است.



شکل ۴- شار جرمی و عدد شروود متوسط بر روی شبکه‌های مکانی با تقسیم‌بندی متفاوت

### ۲-۳- صحت‌سنجی

به منظور بررسی صحت‌سنجی حل عددی، نتایج کار حاضر با مرجع [۳] در شکل ۵ ارائه شده‌است. متغیر غلظت در خروجی فیلم در شرایط بدون وجود نانوذره با شرایط مشابه در مرجع [۴] مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که بیشینه خطای نسبی کمتر از ۰٫۵٪ است.



شکل ۵- اعتبارسنجی پژوهش حاضر با نتایج تجربی مرجع [۳]

$$u_n = \frac{\Gamma}{\rho \delta_0} \quad (23)$$

در معادله (۲۳)،  $\Gamma$  آهنگ جریان فیلم و  $\rho$  چگالی فیلم است. سرعت ناسلت، سرعت متوسط فیلم مایع در حالت توسعه‌یافته است که از تعادل نیروهای گرانشی و لزجی در جریان لایه‌ای روی سطح عمودی حاصل می‌شود و به عنوان یک معیار استاندارد در مطالعات فیلم‌های ریزان به کار می‌رود.

### ۳- الگوریتم حل عددی

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش حجم محدود مرکز-سلولی معادلات حاکم بر روی یک شبکه با سلول‌های چهاروجهی گسسته می‌شود. برای تخمین شارهای جابه‌جاشده در معادلات مومنوم، انرژی و گونه‌ها از روش بالادست متأثر از فیزیک<sup>۱</sup> استفاده شده است [۲۰]. روی سطوح کنترلی، مشتقات فشار و عبارات نفوذ در معادلات بقاء و میان‌یابی‌ها به ترتیب به روش تفاضل مرکزی و با توابع توزیع وزنی تخمین زده می‌شود. همگرایی میدان‌های فشار و سرعت با روش میان‌یابی وزنی فشار<sup>۲</sup> ایجاد و معادلات حاکم بر جریان و انتقال گرما با یک روش ضمنی و تمام‌همگیر گسسته و حل می‌شوند [۲۱]. جهت پیاده‌سازی الگوریتم حل عددی از زبان برنامه نویسی فرترن استفاده شده‌است.

تخمین انحناي سطح‌فاصل بر توازن نیروهای عمودی در آن و دینامیک جریان و در نتیجه، تخمین تبادل جرم و گرما در سطح‌فاصل و شارگرمایی بین دیواره خنک‌کاری و فیلم مایع ریزان نقش کلیدی را ایفا می‌کند. از این رو، تعیین دقیق موقعیت سطح‌فاصل در دقت نتایج عددی و هزینه محاسباتی بسیار مهم است [۱۶]. از این رو، با بهره‌گیری از توسعه یک روش تعقیب سطح‌فاصل لاگرانژی-اوپلری اختیاری در بستر یک الگوریتم تمام همگیر محل دقیق مرز دوفاز برای یک شبکه جابه‌جا شونده، مشخص می‌شود. جزئیات گسسته‌سازی و الگوریتم حل میدان جریان، انتقال گرما، جرم و تعقیب در مراجع [۱] و [۱۶ و ۲۰ و ۲۱] ارائه شده‌است.

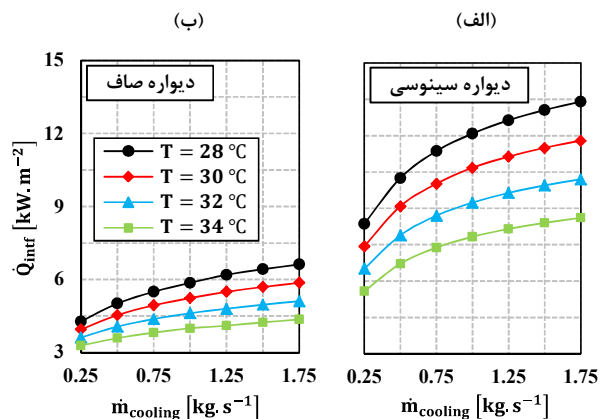
### ۳-۱- اعتبارسنجی

جهت انتخاب شبکه محاسباتی مناسب برای حل میدان جریان، نتایج عددی بدست‌آمده بر روی شبکه با تراکم مختلف در شکل ۴ ارائه شده‌است. در این شکل، دو کمیت شار جرمی بخار جذب‌شده و عدد شروود<sup>۳</sup> متوسط بر روی شبکه با تعداد تقسیم‌بندی‌های متفاوت در راستاهای  $x$  و  $y$  ( $N_x \times N_y$ ) محاسبه و ارائه شده‌است. طبق رابطه ارائه‌شده در مرجع [۲۰]، خطای نسبی کمیت‌های محاسبه‌شده در شبکه با  $3000 \times 20$  سلول محاسباتی نسبت به شبکه با تقسیم‌بندی  $3000 \times 10$  کمتر از ۱٪ محاسبه شده‌است. با توجه به وجود گرادیان‌های شدید در راستای عرضی فیلم و اهمیت محاسبات در نزدیکی دیواره و سطح مشترک دو فاز، تعداد نقاط شبکه در راستای  $x$  برابر ۲۰ انتخاب شده‌است. این تعداد نقاط برای محاسبه دقیق

<sup>1</sup> Physical influence upwind scheme

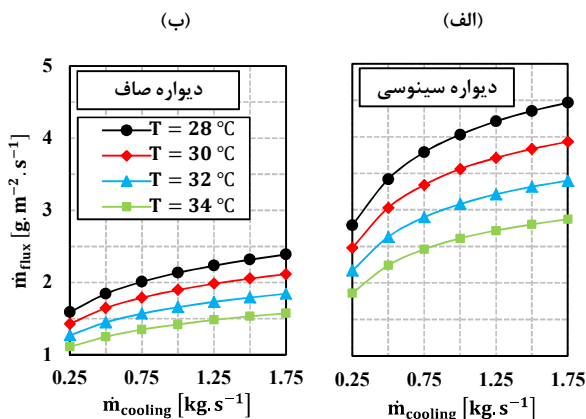
<sup>2</sup> Pressure weighted interpolation Method

<sup>3</sup> Sherwood number



شکل ۷- تغییرات شار گرمایی در:

(الف) دیواره خنک کاری سینوسی ، (ب) دیواره خنک کاری صاف



شکل ۶- تغییرات شار جرمی در:

(الف) دیواره خنک کاری سینوسی ، (ب) دیواره خنک کاری صاف

#### ۴- نتایج

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی پدیده جذب بخار آب در فیلم محلول لیتیم بروماید ریزان بر روی دیواره خنک کاری با شکل‌های صاف و سینوسی و در دماهای آب خنک‌کن مختلف انجام شد. در این راستا، اثرات دمای خنک‌کاری در چهار حالت ۲۸، ۳۰، ۳۲ و ۳۴ درجه سلسیوس و دبی جریان آب خنک‌کن از مقدار ۰.۲۵ تا ۱.۷۵ کیلوگرم بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، تاثیر شکل دیواره خنک کاری (صاف و سینوسی) و هندسه مجرای آب خنک‌کن (ثابت، همگرا و واگرا) بر فرآیند جذب بخار آب مورد تحلیل قرار گرفت. این تحلیل‌ها به منظور ارزیابی دقیق اثرات هیدروترمودینامیکی و هندسه مجرای آب خنک‌کن بر میزان جذب بخار آب در فیلم محلول لیتیم بروماید ریزان انجام شده‌است.

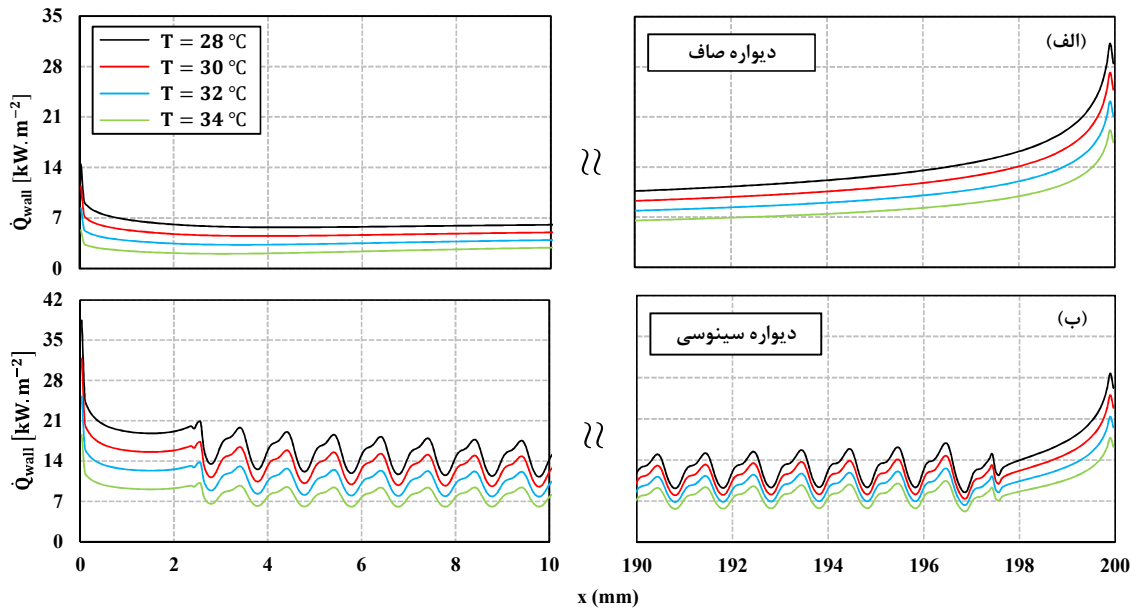
#### ۴-۱- بررسی اثر دمای آب خنک‌کن

جهت بررسی اثر دمای جریان خنک‌کاری روی میزان جذب، دو پارامتر کلیدی شار جرمی جذب شده و شار گرمایی در مجرای ثابت و در دو حالت دیواره خنک‌کاری صاف و سینوسی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود، در دمای ۲۸ درجه سلسیوس، با افزایش دبی جریان آب خنک‌کن از ۰.۲۵ به ۱.۷۵ کیلوگرم بر ثانیه، شار جرمی بخار جذب‌شده به طور پیوسته افزایش می‌یابد. این روند در دماهای دیگر نیز مشابه است، هرچند مقدار مطلق شار بخار جذب‌شده در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد. در شکل ۶ (ب) و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، با افزایش دبی جریان آب خنک‌کن، شار جرمی بخار جذب‌شده افزایش می‌یابد. اما آهنگ افزایش شار بخار جذب‌شده روی دیواره خنک‌کاری سینوسی بیشتر از دیواره صاف است. این الگو در دماهای مختلف نیز مشاهده می‌شود، اگرچه شار جذب شده در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد، اما در مقایسه دو دیواره خنک‌کاری، مشاهده می‌شود که در تمامی دماها و دبی‌های انتخاب‌شده، شار جرمی بخار جذب‌شده در فیلم ریزان روی دیواره سینوسی از دیواره صاف بیشتر است. این نتایج با نتایج بدست‌آمده در پژوهش حکمت‌خواه و وکیلی‌پور [۲] که در آن نیز اثرات مشابهی از شکل دیواره خنک‌کاری بر

روی آهنگ جذب بخار آب بررسی شده، هم‌خوانی دارد. در آن مطالعه، نشان داده شد که تغییر شکل سطح دیواره به حالت سینوسی به دلیل افزایش سطح‌فاصل و ایجاد ناپایداری‌های هیدرودینامیکی، منجر به افزایش آهنگ جذب می‌شود. این تغییرات هندسی باعث تغییر در میدان سرعت و فشار در نزدیکی سطح‌فاصل شده و در نتیجه شدت تغییرات فشار و سرعت در این ناحیه افزایش یافته و موجب بهبود انتقال جرم و گرما از سطح‌فاصل می‌شود. همچنین با کاهش دمای دیواره خنک‌کاری و افزایش اختلاف آن بین فیلم مایع و دیواره، آهنگ انتقال گرما از فیلم مایع به دیواره بیشتر شده که در نتیجه جذب بخار آب را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

تحلیل داده‌های شار گرمایی در سطح‌فاصل برای دو دیواره خنک‌کاری صاف و سینوسی (شکل ۸) در دماهای ۲۸ تا ۳۴ درجه سلسیوس و دبی‌های ۰.۲۵ تا ۱.۷۵ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد که شار گرمایی گذرنده از هر دو دیواره صاف و سینوسی با افزایش دبی جریان آب خنک‌کن افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش دما، مقدار مطلق شار گرمایی کاهش می‌یابد. این الگو مشابه با نتایج شار جرمی است. داده‌های شار گرمایی در سطح‌فاصل برای دو دیواره خنک‌کاری صاف و سینوسی نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان خنک‌کاری، شار گرمایی در هر دو حالت افزایش می‌یابد، اما میزان این افزایش در دیواره سینوسی بیشتر است. به عنوان مثال، در دبی ۰.۲۵ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۲۸ درجه سلسیوس، شار گرمایی برای دیواره خنک‌کاری صاف ۴.۲۸ کیلووات بر متر مربع است، در حالی که در همان شرایط برای دیواره خنک‌کاری سینوسی این مقدار به ۷.۷۰ کیلووات بر متر مربع می‌رسد.

با افزایش دبی آب خنک‌کن به ۱.۷۵ کیلوگرم بر ثانیه، شار گرمایی برای دیواره خنک‌کاری صاف به ۶.۶۲ کیلووات بر متر مربع و برای دیواره خنک‌کاری سینوسی به ۱۲.۳۲ کیلووات بر متر مربع افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آب خنک‌کن، شار گرمایی در هر دو شکل از دیواره خنک‌کاری کاهش می‌یابد، اما در دیواره سینوسی همچنان مقادیر بالاتری نسبت به دیواره صاف مشاهده می‌شود.



شکل ۸- تغییرات شار گرمایی در طول دیواره خنک‌کاری (الف) صاف و (ب) سینوسی

میدان جریان، آهنگ انتقال گرمای بالاتری نسبت به دیواره صاف دارد.

#### ۲-۴- بررسی اثر شکل دیواره

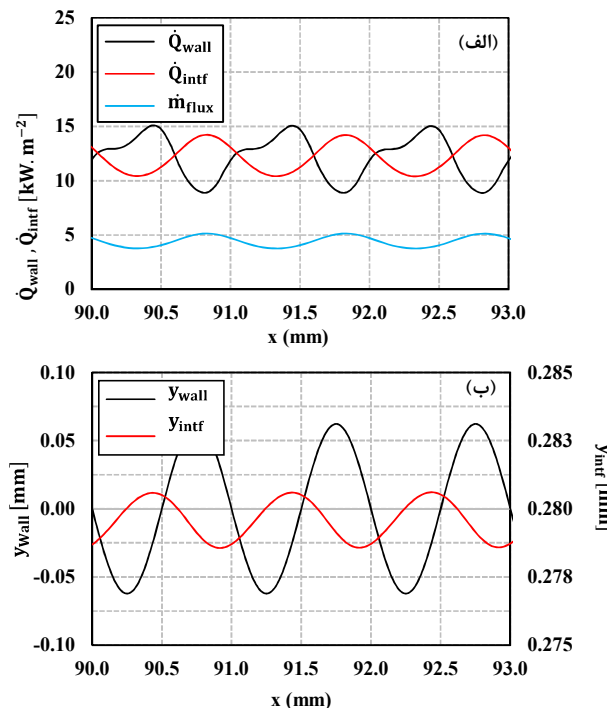
داده‌های شکل ۹ (ب) نشان می‌دهند که موقعیت سطح‌فاصل و دیواره سینوسی در طول مجرا تقریباً ثابت است. در ابتدای مجرا، سطح‌فاصل در حدود  $0.273$  میلی‌متر قرار دارد و با پیشروی در مجرا، تغییرات اندکی در آن مشاهده می‌شود. دیواره به‌طور تناوبی نوسان می‌کند و سطح‌فاصل با این نوسانات هماهنگ است، اما نوسانات سطح‌فاصل نسبت به دیواره سینوسی محدود است. این محدودیت به‌دلیل نیروی کشش سطحی و نیروی لزجت در فاز مایع است که به‌ترتیب موجب صاف نگه‌داشتن سطح مایع و کاهش نوسانات حرکت درون آن می‌شود. تناوب در شار گرمایی دیواره ناشی از تغییرات سینوسی دیواره است که بر سرعت جریان و ضخامت فیلم مایع نیز تأثیر می‌گذارد. این تغییرات باعث تفاوت در انتقال گرما می‌شود، به طوری که نواحی با فیلم نازک‌تر بر اثر تماس بهتر با دیواره خنک‌کاری، جذب بخار آب بیشتری دارند. علاوه بر این، تغییرات سینوسی دیواره به تناوب در شار جرمی نیز منجر می‌شود، اما شدت و فاز این تناوب‌ها به دلیل تأخیر زمانی در پاسخ فیلم به تغییرات گرمایی می‌باشد.

در نواحی با ضخامت کمتر، جذب بخار آب افزایش می‌یابد زیرا شدت تغییرات دمایی در این مناطق شدیدتر است. در مقابل، در نواحی با ضخامت بیشتر به‌دلیل کاهش شدت تغییرات دما، جذب بخار آب کاهش می‌یابد. در مناطقی که دیواره خنک‌کاری به سمت داخل منحرف می‌شود (نواحی پایین موج)، ضخامت فیلم به دلیل تجمع بیشتر مایع افزایش می‌یابد. در مقابل، در نواحی‌ای که دیواره خنک‌کاری به سمت بیرون منحرف می‌شود (نواحی بالای موج)، ضخامت فیلم کاهش می‌یابد. هر چه ضخامت فیلم نازک‌تر باشد، انتقال گرما از دیواره خنک‌کاری به فیلم مؤثرتر خواهد بود زیرا شدت تغییرات دمایی بیشتری در فیلم ایجاد می‌شود. در نواحی که ضخامت فیلم نازک‌تر است، انتقال گرما بهبود می‌یابد. این نواحی معمولاً در بالای

این نتایج با نتایج مطالعه وکیلی‌پور و حکمت‌خواه [۲] هم‌خوانی دارد. در آن مطالعه نیز نشان داده شد که دیواره‌های خنک‌کاری سینوسی با افزایش سطح‌فاصل و ایجاد ناپایداری‌های هیدرودینامیکی، بهبود قابل توجهی در انتقال گرما دارند و در نتیجه شار گرمایی بیشتری نسبت به دیواره‌های صاف فراهم می‌کنند. این بهبود ناشی از افزایش ناحیه تبادل گرمایی و ایجاد جریان‌های ثانویه‌ای است که به افزایش انتقال گرما کمک می‌کنند. همچنین، کاهش دمای دیواره خنک‌کاری به‌طور طبیعی منجر به افزایش اختلاف دما بین دیواره و فیلم مایع شده و در نتیجه افزایش شار گرمایی در سطح‌فاصل را به همراه دارد. تغییر شکل دیواره خنک‌کاری به سینوسی و کاهش دمای آب خنک‌کن می‌تواند به طور موثری عملکرد سامانه‌های جذب را بهبود بخشد، که این موضوع در مرجع [۲] نیز به خوبی تشریح شده است. همچنین داده‌های شار گرمایی برای دیواره خنک‌کاری سینوسی (شکل ۸ (ب)) در دبی  $1$  کیلوگرم بر ثانیه و دماهای مختلف نشان می‌دهند که با افزایش دمای خنک‌کاری، شار گرمایی به‌طور کلی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در نزدیکی ابتدای مجرا ( $x = 0.333$  میلی‌متر)، شار گرمایی در دمای  $28$  درجه سلسیوس برابر با  $38.44$  کیلووات بر متر مربع است، در حالی که در دمای  $34$  درجه سلسیوس این مقدار به  $18.60$  کیلووات بر متر مربع کاهش می‌یابد. آهنگ کاهش شار گرمایی با افزایش دما نیز قابل توجه است. به عنوان مثال، در دمای  $28$  درجه سلسیوس در ابتدای مجرا، شار گرمایی تقریباً دو برابر مقدار مشابه در دمای  $34$  درجه سلسیوس است. این نشان‌دهنده حساسیت بالای انتقال گرما به دمای جریان آب خنک‌کن است.

به طور کلی، دیواره خنک‌کاری سینوسی در مقایسه با دیواره صاف شار گرمایی بیشتری را در تمامی دماها و دبی‌ها تبادل می‌کند. این افزایش در شار گرمایی به دلیل افزایش سطح‌فاصل و ایجاد ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در دیواره سینوسی است که بهبود انتقال گرما را تسهیل می‌کند. به عنوان مثال، در شرایط دبی و دمای مشابه، دیواره سینوسی به دلیل افزایش سطح تبادل گرمایی و تغییرات در

موج‌های سینوسی قرار دارند.



شکل ۹- تغییرات شار گرمایی روی دیواره خنک‌کاری و سطح فاصل، تغییرات شار جرمی و موقعیت سطح فاصل در بازه مکانی ۹۰ تا ۹۳ میلی‌متر

### ۳-۴- بررسی اثر هندسه‌ی مجرای آب خنک‌کن

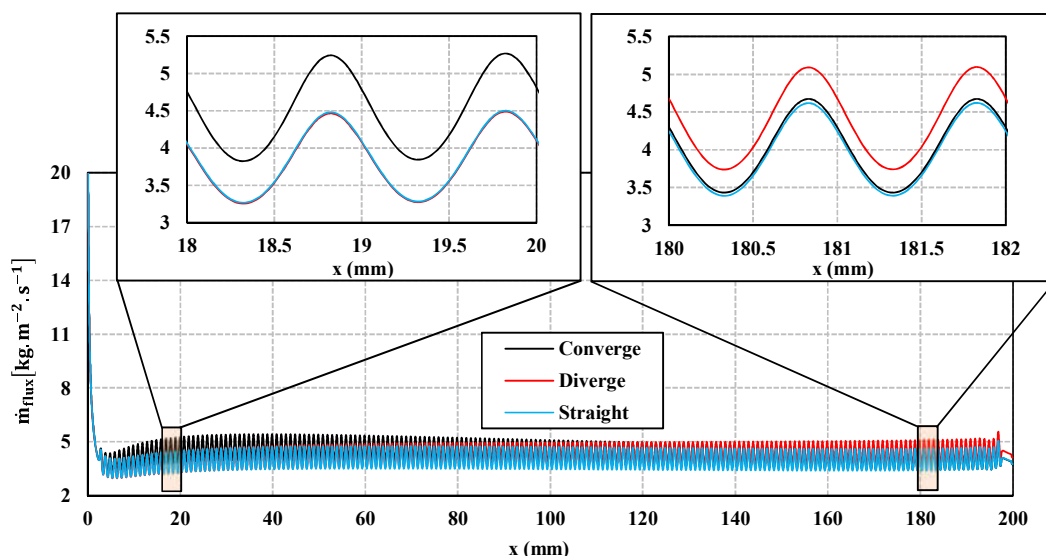
داده‌های شار جرمی روی سطح‌فاصل دو فاز در دبی ۱ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۲۸ درجه سلسیوس و برای دیواره خنک‌کاری سینوسی در سه حالت مجرای ثابت، همگرا و واگرا نشان می‌دهد که هر سه هندسه مجرا در ابتدا مقادیر شار جرمی مشابهی دارند، اما با پیشروی جریان، تفاوت‌های قابل توجهی در میزان جذب بخار مشاهده می‌شود. در مجرای همگرا، به دلیل کاهش سطح مقطع و افزایش سرعت جریان، شار جرمی به طور قابل توجهی بالاتر از دو حالت دیگر است. به عنوان مثال، در موقعیت ۲۰ میلی‌متری، شار جرمی در مجرای همگرا به  $4,662 \text{ [kg.m}^{-2}.s^{-1}]$  می‌رسد که در مقایسه با مجرای ثابت (با شار  $3,985 \text{ [kg.m}^{-2}.s^{-1}]$ ) و مجرای واگرا (با شار  $3,974 \text{ [kg.m}^{-2}.s^{-1}]$ ) بیشتر است. در این محدوده مکانی، مقدار شار بخار جذب‌شده در حالت مجرای ثابت و واگرا بسیار مشابه است. این روند در ادامه نیز مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه در مقطعی از جریان، شار بخار جذب‌شده در مجرای واگرا از مجراهای همگرا و ثابت بیشتر است. بطور کلی، آهنگ کاهش شار جرمی در این مجرا به دلیل افزایش سرعت کمتر است و بنابراین، مجرای همگرا تا پایان جریان بیشترین جذب شار جرمی را فراهم می‌کند. در حالت مجرای ثابت، شار جرمی بخار جذب‌شده تقریباً به طور یکنواخت کاهش می‌یابد. مجرای واگرا در مقایسه با مجرای همگرا، جذب شار کمتری دارد اما نسبت به مجرای ثابت

عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. برای مثال، تا موقعیت مکانی ۲۴ میلی‌متر، شار جرمی در مجرای ثابت کمی بیشتر از مجرای واگرا است، اما در موقعیت‌های طولی دیگر مجرای واگرا عملکرد بهتری ارائه می‌دهد.

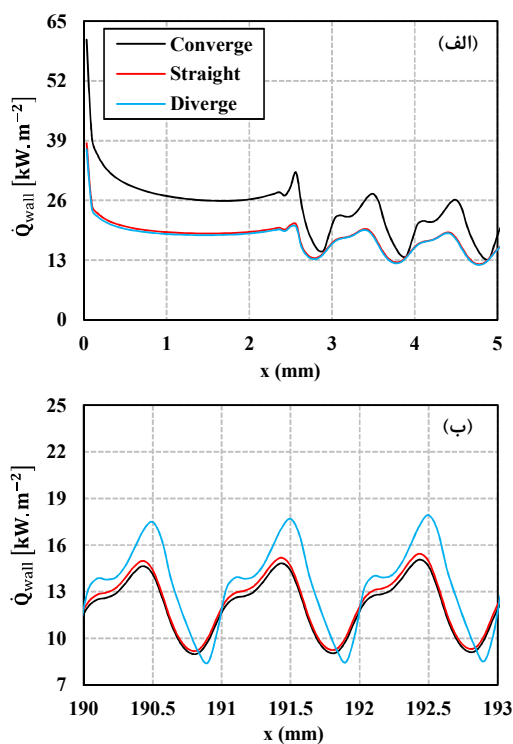
مجرای همگرا به دلیل افزایش سرعت، بالاترین میزان شار جرمی متوسط را فراهم می‌کند. مقدار شار جرمی متوسط جذب شده برای مجرای همگرا در دبی ۱ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۲۸ درجه سلسیوس برابر  $2,43 \text{ [kg.m}^{-2}.s^{-1}]$  است. مجرای واگرا که عملکردی بینابینی دارد، مقدار شار متوسط بخار جذب‌شده توسط آن برابر  $2,22 \text{ [kg.m}^{-2}.s^{-1}]$  است. مجرای ثابت، کمترین میزان جذب بخار را با مقدار  $2,13 \text{ [kg.m}^{-2}.s^{-1}]$  نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های ارائه شده در دبی ۱ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۲۸ درجه سلسیوس برای دیواره خنک‌کاری سینوسی در سه مجرای ثابت، همگرا و واگرا، نتایج زیر به دست آمده است. تحلیل در دو موقعیت مکانی از ورودی تا ۵ میلی‌متر ابتدای مجرا و از ۱۹۰ تا ۱۹۳ میلی‌متر انتهای مجرا انجام و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۱ (الف) مشاهده می‌شود، در ابتدای مجرای همگرا بیشترین میزان شار گرمایی محاسبه شده است. مجرای ثابت و مجرای واگرا مقادیر شار گرمایی نسبتاً نزدیک به هم دارند، اما مجرای ثابت، اندکی عملکرد بهتری نسبت به مجرای واگرا دارد. مجرای واگرا در شکل ۱۱ (ب)، انتقال بالاترین میزان شار گرمایی را نشان می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که علی‌رغم کاهش سرعت جریان به دلیل افزایش سطح مقطع، جریان خنک‌کاری زمان لازم برای جذب موثر گرما را می‌یابد.

در شکل ۱۲، مقادیر محاسبه‌شده برای شار جرمی بخار جذب‌شده و شار گرمایی دفع شده در دمای ۲۸ درجه سانتیگراد و در دبی‌های جرمی  $0,25$  تا  $1$  کیلوگرم بر ثانیه برای سه حالت مجرای ثابت، همگرا و واگرا نشان داده شده است. نمودارهای ارائه‌شده در این شکل نشان می‌دهد که چه میزان افزایش در دبی جرمی جریان آب خنک‌کن می‌تواند به طور موثر باعث افزایش شار جرمی بخار جذب‌شده شود. در مجرای همگرا، با افزایش دبی جرمی آب خنک‌کن، سرعت جریان آب و آهنگ انتقال گرما از دیواره خنک‌کاری به آب خنک‌کن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش شار گرمایی دیواره و بهبود خنک‌کاری فیلم ریزان می‌شود که در نتیجه، آهنگ جذب بخار و شار جرمی نیز به شدت افزایش می‌یابد. شدت افزایش  $\dot{m}_{flux}$  و  $\dot{Q}_{wall}$  در مجرای همگرا به ازای افزایش دبی جرمی جریان آب خنک‌کن از  $0,25$  به  $0,5$  (۵۰ درصد افزایش)، شاهد افزایش گرمای جذب‌شده به میزان  $17,5$  درصد و در نتیجه افزایش  $16$  درصدی در شار جرمی بخار جذب‌شده خواهیم بود. مقدار شار بخار جذب‌شده به ازای افزایش دبی جریان خنک‌کاری در مجرای همگرا نسبت به سایر مجراها بیشتر است، به‌ویژه با دبی جرمی‌های بالا، که تأثیر همگرایی مجرا بر سرعت و انتقال گرما را تقویت می‌کند. در مجرای ثابت، به دلیل عدم تغییر سطح مقطع، سرعت جریان سیال ثابت باقی می‌ماند که این ثبات منجر به آهنگ انتقال گرمای یکنواخت در طول مجرا می‌شود. به همین دلیل، با افزایش دبی جرمی جریان خنک‌کاری، مقدار افزایش  $\dot{Q}_{wall}$  و  $\dot{m}_{flux}$  نسبت به مجرای همگرا با مقدار کمتری صورت می‌گیرد.





شکل ۱۰- تغییرات شار جرمی در مجرای ثابت، همگرا و واگرا



شکل ۱۱- تغییرات شار گرمایی دیواره خنک‌کاری: (الف) بازه ۰ تا ۵ میلی‌متری؛ (ب) بازه ۱۹۰ تا ۱۹۳ میلی‌متری

اما درصد افزایش  $\dot{m}_{flux}$  و  $Q_{wall}$  نسبت به مجرای همگرا و واگرا بیشتر است. لذا، شدت افزایش  $\dot{m}_{flux}$  و  $Q_{wall}$  در مجرای ثابت بیشتر از مجرای همگرا است. به عنوان مثال، با افزایش ۵۰ درصدی دبی جرمی مجرای خنک‌کاری،  $Q_{wall}$  به میزان ۲۰ درصد و  $\dot{m}_{flux}$  به میزان ۱۸٫۵ درصد افزایش می‌یابند، اما این افزایش برای مجرای واگرا و برای  $Q_{wall}$  و  $\dot{m}_{flux}$  به ترتیب برابر با ۱۷ و ۱۶٫۵ درصد است. در مجرای واگرا، کاهش تدریجی سرعت جریان آب خنک‌کن در طول مجرا منجر به کاهش آهنگ انتقال گرما از دیواره به آب خنک‌کن می‌شود. با افزایش دبی جرمی  $Q_{wall}$  افزایش می‌یابد، اما شدت این افزایش کمتر از مجرای همگرا است. میزان افزایش  $\dot{m}_{flux}$  و  $Q_{wall}$  در مجرای واگرا بین مقادیر مشاهده‌شده در مجرای همگرا و مجرای ثابت قرار دارد.

با افزایش دبی جرمی، در ابتدا افزایش قابل توجهی در انتقال گرما مشاهده می‌شود، زیرا سرعت جریان و به دنبال آن آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد. اما با رسیدن به دبی‌های بالاتر، سامانه به تدریج به حالت اشباع نزدیک می‌شود. در این حالت، هرچه دبی بیشتر شود، تأثیر افزایشی آن بر آهنگ انتقال گرما کمتر می‌شود. در دبی‌های جرمی بالاتر، سرعت جریان آب خنک‌کن آنقدر زیاد می‌شود که زمان کافی برای تبادل گرمای موثر بین دیواره و آب خنک‌کن وجود ندارد. به عبارت دیگر، آب خنک‌کن ممکن است به اندازه کافی فرصت نداشته باشد تا به طور کامل از ظرفیت خود برای جذب گرما استفاده کند. این امر منجر به کاهش آهنگ افزایش در خنک‌کاری و به تبع آن کاهش آهنگ افزایش  $\dot{m}_{flux}$  می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

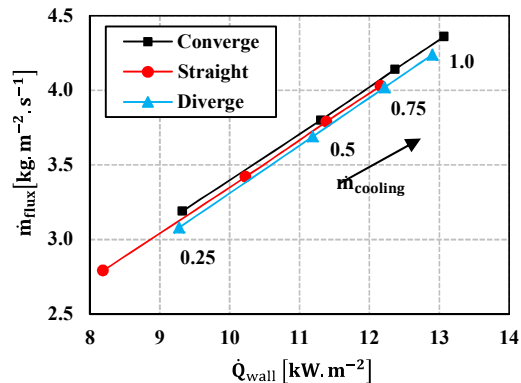
در این پژوهش، اثرات تغییرات دبی و دمای جریان آب خنک‌کن و همچنین هندسه دیواره‌ها و مجراهای خنک‌کاری بر روی شار گرمایی و شار جرمی بخار جذب‌شده در فیلم ریزان محلول لیتیم بروماید بررسی شد. نتایج نشان داد که دما و دبی جریان خنک‌کاری به طور قابل توجهی بر میزان جذب بخار آب و انتقال گرما در سامانه جذب بخار آب تأثیرگذار است.

به دلیل افزایش سطح‌فاصل و ایجاد ناپایداری‌های هیدرودینامیکی، شار گرمایی و شار جرمی بخار جذب‌شده در فیلم ریزان محلول لیتیم بروماید روی دیواره خنک‌کاری سینوسی نسبت به دیواره صاف افزایش یافت. این افزایش به ویژه در دماهای پایین‌تر و دبی‌های بالاتر خنک‌کاری مشهود است. به طور خاص، در مجراهای همگرا، به دلیل افزایش سرعت سیال و کاهش سطح مقطع، آهنگ جذب بالاتر از سایر هندسه‌ها مشاهده شد. از مجموع نتایج عددی بدست آمده می‌توان

parallel plate channel. *International Journal of Refrigeration*. 2018;95:108-121.

- [11] Havestini RA, Ormiston SJ. An elliptic numerical analysis of water vapour absorption into a falling film in vertical parallel plate channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;150:119266.
- [12] Li Y, Wei R, Zhang R, Shen W, Jin S. In silico modeling of a novel refrigeration process of the ammonia-water falling-film absorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019;59(3):1362-1373.
- [13] Chen S, Zhang T, Lv L, Chen Y, Tang S. Simulation of the hydrodynamics and mass transfer in a falling film wavy microchannel. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2021;34:97-105.
- [14] Lu H, Lu L, Gao X. Mass transfer enhancement of falling film liquid desiccant dehumidification by micro-baffle plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;169:120945.
- [15] Dietze GF. Effect of wall corrugations on scalar transfer to a wavy falling liquid film. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019;859:1098-1128.
- [16] Vakili-pour S, Mohammadi M, Ormiston S. A fully coupled ALE interface tracking method for a pressure-based finite volume solver. *Journal of Computational Physics*. 2021;427:110054.
- [17] Mohammadi M, Vakili-pour S, Ormiston S. Newton linearization of the Navier-Stokes equations for flow computations using a fully coupled finite volume method. *Applied Mathematics and Computation*. 2021;397:125916.
- [18] Siebe DA. Evaluation of air-conditioning systems utilizing liquid absorbents regenerated by solar energy. [PhD Dissertation]. Arizona State University; 1986.
- [19] Ferziger JH, Perić M, Street RL. *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin: Springer; 2019.
- [20] Vakili-pour S, Mohammadi M, Badrkhani V, Ormiston S. Developing a physical influence upwind scheme for pressure-based cell-centered finite volume methods. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2019;89(1-2):43-70.
- [21] Vakili-pour S, Ormiston SJ. A coupled pressure-based co-located finite-volume solution method for natural-convection flows. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. 2012;61(2):91-115.

نتیجه‌گیری کرد که برای بهبود عملکرد سامانه‌های جذب بخار آب، استفاده از دیواره‌های خنک‌کاری سینوسی شکل همراه با مجراهای همگرا توصیه می‌شود. این ترکیب بهینه‌سازی شده می‌تواند با افزایش سطح فاصل و تقویت انتقال گرما، میزان جذب بخار آب را به حداکثر رساند و در نتیجه بهره‌وری کلی سامانه را بهبود بخشد.



شکل ۱۲- تغییرات شار جرمی جذب شده به گرمای جذب شده توسط جریان آب خنک‌کن

## ۶- مراجع

- [1] Vakili-pour S, Hekmatkhan R. Investigation of water vapour absorption into wavy falling films by developing a fully coupled interface tracking finite volume method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022;185:122397.
- [۲] حکمت‌خواه ر، وکیلی‌پور ش. بررسی اثرات شکل دیواره بر روی پدیده جذب در فیلم مایع گرانشی با سطح آزاد. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۱;۴۵۲(۴):۳۵۷-۳۶۶
- [3] Wang G, Zhang Q, Zeng M, Xu R, Xie G, Chu W. Investigation on mass transfer characteristics of the falling film absorption of LiBr aqueous solution added with nanoparticles. *International Journal of Refrigeration*. 2018;89:149-158.
- [4] Gao H, Mao F, Song Y, Hong J, Yan Y. Effect of adding copper oxide nanoparticles on the mass/heat transfer in falling film absorption. *Applied Thermal Engineering*. 2020;181:115937.
- [5] Zhang H, Gao H, Gao X, Yan Y. Falling-film absorption model considering surface wave and vibration effects based on lattice Boltzmann method. *Energies*. 2022;15(21):7925.
- [6] Armou S, Mir R, El Hammami Y, Zine-Dine K, El Hattab M. Heat and mass transfer enhancement in absorption of vapor in laminar liquid film by adding nano-particles. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2017;10(6):1711-1720.
- [7] Wen T, Lu L, Luo Y. Review on the fundamentals and investigations of falling film dehumidification/absorption refrigeration based on CFD technology. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;171:121042.
- [8] Triché D, Bonnot S, Perier-Muzet M, Boudéhen F, Demasles H, Caney N. Modeling and experimental study of an ammonia-water falling film absorber. *Energy Procedia*. 2016;91:857-867
- [9] García-Rivera E, Castro J, Farnos J, Oliva A. Numerical and experimental investigation of a vertical LiBr falling film absorber considering wave regimes and in presence of mist flow. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;109:342-361.
- [10] Havestini RA, Ormiston SJ. Fully coupled two-phase numerical model for falling film absorption in a vertical