

بررسی اثرات شکل دیواره بر روی پدیده جذب در فیلم مایع گرانشی با سطح آزاد

رامتین حکمت‌خواه* کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ramtin.hekmatkhah@ut.ac.ir

شیدوش وکیلی‌پور* دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران، vakilipour@ut.ac.ir

چکیده

پدیده جذب گاز به داخل فاز مایع در یک فیلم مایع گرانشی در پدیده‌های گوناگون طبیعی رخ داده و استفاده از آن در صنایع مختلف به ویژه صنعت رطوبت‌زدایی و آب‌شیرین‌کن گسترش یافته است. پیچیدگی فیزیک جریان، انتقال جرم، گرما و ابعاد کوچک یک فیلم مایع باعث شده تا مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی آن نقش کلیدی در بررسی و مطالعه اثربخشی و بهبود فرآیند جذب در یک جاذب مایع شود. در کار حاضر، اثرات عدد رینولدز، دمای دیواره و شکل دیواره بر روی انتقال جرم و گرما عبوری از سطح تماس از فاز گاز داخل به یک جریان لایه‌ای فیلم مایع مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی عددی با استفاده از یک الگوریتم ناپایای تعقیب سطح تماس کاملاً همگیر و رهیافت روش لاگرانژی-اولبری اختیاری با زبان برنامه‌نویسی فرترن صورت پذیرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تغییر شکل سطح دیواره که فیلم مایع بر روی آن جاری است و سرد کردن دیواره اثر چشمگیری بر روی نرخ جذب بخار گاز به داخل فیلم مایع نسبت به دیواره تخت دارد.

واژه‌های کلیدی: فیلم ریزان، جذب، الگوریتم تعقیب سطح تماس، رهیافت لاگرانژی-اولبری، روش حجم محدود، الگوریتم فشار مینا.

The wall shape effects on the vapor absorption in falling liquid film with a free surface

R. Hekmatkhah
Sh. Vakilipour

Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.
Department of Aerospace Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies,
University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

The vapour absorption into the liquid falling film has occurred in various natural phenomena and its application has spread in various industries, such as the dehumidification and desalination industry. The complexity of flow dynamics, mass transfer, heat, and small dimensions of a liquid film has made its modeling and numerical simulation a key role in the investigation and studying of the effectiveness and improvement of the absorption process in a liquid film absorbent. In the present work, the effects of Reynolds number, wall temperature, and wall shape on the interfacial heat and mass transfer have been investigated. Numerical modeling has been performed using an unsteady Arbitrary Lagrangian-Eulerian interface tracking method by Fortran. The simulation results show that the deformation of the wall surface and the cooling of the wall temperature has a significant effect on the rate of gas vapor absorption into the laminar liquid film in comparison with the flat wall.

Keywords: Falling Film, Absorption, Interface Tracking Algorithm, Lagrangian-Eulerian Approach, Finite volume method, Pressure based algorithm.

پدیده جذب فرآیندی است فیزیکی که در آن فاز گازی بر اثر گرادیان غلظت و فشار زیاد در بین دو فاز، به صورت توده‌ای شروع به نفوذ به داخل فاز مایع می‌کند. از دیدگاه فیزیکی، به‌محض قرار گرفتن دو فاز در کنار یکدیگر پدیده جذب شروع می‌شود و فاز گاز به داخل فاز مایع رانده می‌شود. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که غلظت در بین هر دو فاز به حالت تعادلی برسد. با توجه به مطالعات صورت گرفته، نتیجه‌گیری شده است که انتقال گونه‌ها و گرما در فیلم‌های مایع متأثر از شکل دیواره است. فرآیندهای جذب کاربردهای فراوانی در سیستم‌های تبرید، تهویه مطبوع، خنک‌کاری محفظه راکتور هسته‌ای، و مبادله‌کن‌های گرمایی، صنایع شیمیایی و غذایی، صنایع پالایش نفت و سیستم‌های نمک‌زدایی گرمایی را دارد. افزایش ضریب انتقال جرم و گرما در کنار کاهش افت فشار یک فیلم مایع گرانشی

۱- مقدمه

جریان فیلم مایع کاربردهای متعددی در صنایع با هدف خنک‌کاری، چگالش، تبخیر و جذب را دارد. فیلم مایع می‌تواند شامل مجموعه‌ای از ساختارهای پیچیده جریان از جمله ساختارهای لایه‌ای منظم یا آشفته، امواج تکرار شونده، شوک‌ها، جبهه‌های پیشرونده و پدیده انگشتی شدن جریان باشد. تعیین موقعیت دقیق سطح تماس بین دو فاز موجود دارای اهمیت ویژه‌ای در تخمین میزان شار جرمی و گرمایی عبوری می‌باشد. کاربردهایی که در زمینه‌های نوظهور جریان سیال در ابعاد میکرو و نانو وجود دارد، از تکنیک‌های ایجاد لایه‌های فیلم مایع نازک استفاده می‌کنند [۱].

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: vakilipour@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۹

باعث بهبود بازده چرخه خنک‌سازی یا فرآیندهای جذب، تبخیر و چگالش در صنایع می‌شود [۲]. تریشه و همکاران [۳] مطالعات تجربی و عددی انتقال گرما و جرم را در یک جاذب فیلم مایع بر روی یک مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای ارائه دادند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که دبی جرمی خنک‌کننده در مقایسه با تغییرات پارامترهای ورودی، تأثیر قابل توجهی بر میزان بخار جذب شده دارد. ژانگ و همکاران [۴] به تأثیر جریان گاز غیر هم‌سو بر انتقال الگوی جریان و جذب CO₂ با محلول آبی مخلوط مایع یونی به عنوان جاذب پرداختند. در کار آنها مشاهده شده است که نرخ جذب با افزایش سرعت جریان مایع تحت الگوهای مختلف جریان افزایش می‌یابد.

لی و همکاران [۵] برای کشف عملکرد جذب فیلم در حال سقوط بر روی یک لوله عمودی با استفاده از محلول LiCl، یک مطالعه تجربی بر روی عملکرد انتقال گرما و جرم انجام دادند. آنها نشان دادند که میزان جذب با استفاده از محلول LiCl تا ۱۹/۷ درصد بیشتر از محلول LiBr است. هافمن و کوهلمن [۶] انتقال گرما و جرم در جریان فیلم مایع تخت جاذب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها به خوبی بیان می‌کند که صفحات بلندتر معمولاً در اعداد رینولدز بالاتر و صفحات کوتاه‌تر در اعداد رینولدز پایین، کارآمدتر هستند. ژانتی و همکاران [۸،۷] یک راه حل تحلیلی ساده از معادلات دیفرانسیل حاکم برای جریان جاذب فیلم در حال سقوط در اطراف یک لوله افقی صاف را توسعه دادند. نتایج آنها نشان داد که ضرایب انتقال گرما و جرم در یک دبی جرمی محلول خاص بر اساس گستردگی ناحیه تحت تأثیر خیس شدن جزئی به حداکثر می‌رسد. لی و لو [۹] خصوصیات انتقال جرم و گرما به صورت موضعی در جریان فیلم مایع را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج بیان شده، میانگین نرخ جذب در نواحی فیلم سقوط‌کننده در حالت جریان قطره‌ای و ورقه‌ای ممکن است تقریباً ۶ و ۱۰ برابر میانگین نرخ جذب در مناطق بین لوله‌ای باشد.

میترا و زینگلر [۱۰] مطالعه یک فیلم در حال سقوط را بر روی یک صفحه عمودی با انتقال گرما و جرم، توصیف. نتایج نشان می‌دهد که پس از شروع فرآیند، شار جرمی به شدت افزایش می‌یابد اما پس از یک فاصله کوتاه جریان تا حدودی کاهش می‌یابد. پاپاتیئیمو و همکاران [۱۱] یک مدل عددی دو بعدی برای توصیف پدیده‌های انتقال گرما و جرم برای بهبود جذب، که بر روی دسته‌ای از لوله‌های افقی صاف جریان دارد، توسعه دادند. افزایش دبی جرمی محلول منجر به کاهش دما و غلظت محلول در خروجی جزء دست‌آوردهای آنها می‌باشد. عباسی و اورمیستون [۱۲] یک مدل عددی برای مطالعه جذب جریان فیلم مایع در داخل یک کانال عمودی صفحه موازی را بیان کردند. نتایج، تأثیر فشار ورودی کانال بر روی ضخامت فیلم مایع روی دیوار سرد و انتقال گرما و جرم در سطح تماس را نشان می‌دهد.

چن و همکاران [۱۳] جذب گاز کربن دی‌اکسید به داخل فیلم مایع حاوی آب، اتانول و اتیلن گلیکول را در میکروکانال موجدار مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها به خوبی نشان می‌دهد که میزان جذب در میکرو کانال موجدار نسبت به صفحه تخت به میزان ۴۱٪ افزایش می‌یابد. داس و همکاران [۱۴] مطالعات خود را بر روی فیلم مایع در حال سقوط بر روی دیواره موجی را در یک رطوبت‌گیر نشان دادند. عملکرد خشک‌کن مورد مطالعه برای فیلم مایع لیتیم-کلراید و کلسیم کلراید به ترتیب ۳۳/۱۸ و ۱۸ درصد افزایش یافته است. لو و همکاران [۱۵] الگوهای فیلم مایع متلاطم را بر روی صفحه تخت و دندانه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. پنج الگوی مختلف برای شکل دیواره در نظر

گرفته شده است که منجر به افزایش عملکرد جذب ۷/۳٪ تا ۲۵/۱٪ شده است. داس و همکاران [۱۶] کارایی یک خشک‌کن جذبی را با جایگذاری صفحه مثلی به جای صفحه تخت مورد بررسی قرار دادند. استفاده از دیواره مثلی مساحت سطح تماس را به مقدار ۶/۴٪ نسبت به صفحه تخت افزایش می‌دهد که منجر به افزایش شار جرمی و گرمایی عبوری شده و کارایی خشک‌کن مذکور به میزان ۲۶٪ افزایش یافته است. دیتزه [۱۷] یک شبیه‌سازی عددی برای مطالعه اثر دیواره موج‌دار عمودی بر روی حرکت فیلم مایع گرانشی با وجود جریان گاز مخالف، انجام داده است نتایج حاصل نشان داد که دیواره با شکل سینوسی انتقال کمیت‌های جرم یا انرژی را تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد.

استفاده از نانو سیال‌ها و همچنین سطوح طراحی شده با اشکال و پوشش‌های مختلف از راهکارهای دیگر افزایش ضریب انتقال گرما در صنعت به خصوص استخرهای جوشن سیال می‌باشد. سرفراز و همکاران [۱۸] مطالعات خود را بر روی بر انتقال گرما استخر جوشن نانو سیالات آلومینا بر روی دو سطح دارای دایره متحدالمرکز و سطح ساده انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش ضریب انتقال گرما بر روی سطح میکروساختارها به دلیل سطح انتقال گرما بزرگتر در مقایسه با سطح ساده بیشتر است. سلیم‌پور و همکاران [۱۹] مطالعات خود را بر روی انتقال گرما اکسید آهن به عنوان نانو سیال در آب دی‌یونیزه شده جوشان بر روی یک سطح مسی مسطح ارائه دادند. نتایج نشان داد که بر روی سطح ناهموار، انتقال گرما جوش نانوسیال در شارهای گرمایی کم کاهش یافته است. مهرعلیزاده و همکاران [۲۰] روش‌های افزایش انتقال گرما در سه بخش، بافت‌های سطحی، ویژگی‌های سطحی و ساختارهای سطحی را ارائه دادند. تأثیر سطح بر پارامترهای فرآیند جوش، به‌ویژه دینامیک حباب‌ها، ضریب انتقال گرما و شار گرمایی بحرانی مورد بررسی قرار گرفت.

والون و ساتابهاما [۲۱] به بررسی تجربی افزایش انتقال گرما با استفاده از میکروکانال‌های مستطیلی، سهمی و پلکانی پرداختند آنها نشان دادند که تمامی هندسه‌های کانال منجر به افزایش انتقال گرما می‌شود. هالون و همکاران [۲۲] جوشش استخر آب در فشار زیر اتمسفر (محدوده ۰/۷۵ تا ۴ کیلو پاسکال) را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که این سازه‌های بهبود یافته انتقال گرما در فشارهای پایین را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. قادی کلایی و همکاران [۲۳] به صورت تحلیلی، اثر میدان مغناطیسی القایی بر جریان سکون نانوسیال هیبریدی را روی صفحات کششی ارائه دادند. نتایج پژوهش آنها، اثباتی بر این موضوع است که استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی در انتقال گرما بسیار موثرتر از نانوسیال‌های ساده می‌باشند. عملکرد انتقال گرما از سطوح دایره‌ای افقی با پیکربندی‌های ریزکانال‌های شبیدار به طور تجربی توسط قیطاقی و همکاران [۲۴] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی آنها نشان داد که انتقال گرما با افزایش شیب کانال، افزایش عمق کانال و کاهش گام موجود در کانال، افزایش می‌یابد.

هومنیک و هومنیک [۲۵] مروری بر روی خواص ترموفیزیکی و ویژگی‌های انتقال گرما و جریان نانوسیال‌های مختلف داشتند که می‌توانند به طور قابل توجهی انتقال گرما را در مبادله‌کن‌های گرمایی بهبود بخشند. پاستوزکو [۲۶] داده‌های تجربی را برای ریزپره‌های

$$\int_{\Omega} d\Omega - \int_S v_b \cdot n ds = 0 \quad (1)$$

$$\int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho(V - v_b) \cdot n ds = 0 \quad (2)$$

$$\int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_S \rho v(V - v_b) \cdot n ds = \int_S T \cdot n ds + \int_{\Omega} \rho g d\Omega \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} \rho C_p T d\Omega + \int_S \rho(C_p T + W(\bar{h}_{H_2O} - \bar{h}_{LiBr}))(V - v_b) \cdot n ds = \int_S k \nabla T \cdot n ds + \int_S \rho D(\bar{h}_{H_2O} - \bar{h}_{LiBr}) \nabla W \cdot n ds \quad (4)$$

$$\int_{\Omega} \rho W d\Omega + \int_S \rho W(V - v_b) \cdot n ds = \int_S \rho D \nabla W \cdot n ds \quad (5)$$

که در آن‌ها، ρ چگالی سیال، $u = ui + vj$ بردار سرعت، $u_b = u_{bi} + v_{bj}$ بردار سرعت کنترل سطح $n = n_x i + n_y j$ بردار یک عمود بر سطح کنترل و $g = g_x i + g_y j$ بردار شتاب گرانش، k رسانایی گرمایی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T دما، D ضریب نفوذ جرمی و \bar{h} آنتالپی گونه‌ها است. تانسور دوبعدی تنش T به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = \tau - pI = \begin{bmatrix} \tau_{xx} - p & \tau_{yx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} - p \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن، p و τ به ترتیب تانسور تنش برشی، فشار ترمودینامیکی و تانسور یک هستند. برای سیال نیوتنی و جریان تراکم‌ناپذیر، مؤلفه‌های تانسور تنش برشی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (7)$$

در روابط (۷)، μ ضریب لزجت سیال می‌باشد. برای یک جریان دوفازی با در نظر گرفتن انتقال گرما، معادلات سطح تماس شامل سه دسته معادلات شرط مرزی دینامیک، شرط پیوستگی میدان جریان و شرط مرزی سینماتیک می‌باشد. شرط مرزی دینامیک شامل دو معادله تعادل نیروی عمودی و مماسی به صورت زیر است:

$$n \cdot T_{iL} \cdot n - \sigma K = n \cdot T_{iG} \cdot n \quad (8)$$

$$n \cdot T_{iL} \cdot t = n \cdot T_{iG} \cdot t \quad (9)$$

در معادلات (۸) و (۹)، زیرنویس‌های i ، L و G به ترتیب به سطح تماس، فاز مایع و فاز گاز اشاره می‌کنند. همچنین σ و K به ترتیب کشش سطحی و انحنای سطح تماس [۳۲] و $t = t_x i + t_y j$ بردار یک مماس بر سطح کنترلی است. شروط پیوستگی میدان جریان شامل شرط برابری سرعت‌های مماسی، برابری شار جرمی، برابری دما و برابری شار گرمایی در دو طرف سطح تماس می‌شود که به ترتیب زیر نوشته می‌شوند:

$$V_{iL} \cdot t = V_{iG} \cdot t \quad (10)$$

$$\dot{m}_{iL} = \dot{m}_{iG} \quad (11)$$

$$T_{iL} = T_{iG} \quad (12)$$

$$T_{iL} = T_i(W_{iL}, P_i) \quad (13)$$

$$Q_{iL} = Q_{iG} - Q_{fg} \quad (14)$$

تقویت شده با پوشش مس را ارائه داد. نتایج نشان می‌دهد که سطوح تقویت شده ضریب انتقال گرمایی معادل با ۶/۵ برابر بیشتر از سطوح عادی دارد. عبدالهی و همکاران [۲۷] یک مطالعه تجربی به منظور بررسی انتقال گرما آهن اکسید - آب با حضور میدان مغناطیسی را انجام دادند. آنها به خوبی نشان دادند که، زبری سطح و گردیدان میدان مغناطیسی روی سطح جوش، عوامل اصلی هستند که ضریب انتقال گرما جوش را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهند.

ساجد و علی [۲۸] مطالعات گسترده‌ای بر روی عوامل مختلفی که بر رسانایی گرمایی تأثیر می‌گذارند را در قالب یک مقاله مروری ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما و غلظت باعث افزایش رسانایی گرمایی می‌شود. موری و همکاران [۲۹] یک تکنیک جدید افزایش شار گرمای بحرانی با استفاده از یک صفحه متخلخل را به صورت تجربی ارائه دادند. آنها نشان دادند که، برای افزایش شار گرمایی بحرانی، شکاف بین سطح گرم شده و صفحه متخلخل مهمی دارد. مهرعلیزاده و همکاران [۳۰] در مطالعه تجربی خود تأثیر نانو ذرات هیبریدی را بر ضریب انتقال گرما نانو سیال نشان دادند. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که تغییر سطح از حالت صاف به کانالی به شکل دایره‌ای و متقاطع برای تمامی نانوسیال‌ها منجر به افزایش ضریب انتقال گرما می‌شود. وکیلی‌پور و حکمت‌خواه [۳۱] یک الگوریتم کاملاً همگیر در روش تعقیب سطح تماس با انتقال شار گرمایی و جرمی در یک جریان موجی فیلم مایع را برای پدیده جذب بخار آب در یک جریان دو فازی ناپایا توسعه دادند. آنها نشان دادند که بر خلاف انتظار، به دلیل ایجاد گرادیان‌های بالای فشار در نواحی ریزموج‌ها، انتقال جرم و گرما در قالب پدیده جذب افزایش چشمگیری داشته و در مقابل آن، این پدیده به دلیل اشباع جاذب در امواج تکین کاهش می‌یابد.

آنچه از مطالعه مقالات و پژوهش‌های مرتبط برداشت می‌شود، آن است که مطالعات عددی در این حوزه که هر دو فاز مایع و گاز را به طور هم‌زمان و بدون فرضیات ساده‌سازی در معادلات حاکم حل کرده باشند، در مقایسه با روش‌های تحلیلی بسیار کم است. در کار حاضر، جذب بخار آب از حمام بخار موجود در فشار شبه خلاء به داخل جریان لایه‌ای فیلم مایع ریزشی حاوی لیتیم برماید و آب مایع با در نظر گرفتن تأثیرات شکل دیواره در سه حالت سینوسی، مثلثی و دندانه‌ای از سمت فیلم مایع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثرات عدد رینولدز فیلم مایع و دمای دیواره بر روی نرخ جذب گاز به داخل فاز مایع در مقادیر مختلف نشان داده شده است. مدل‌سازی عددی با استفاده از یک الگوریتم ناپایای تعقیب سطح تماس کاملاً همگیر و رهیافت روش لاگرانژی-اولبری اختیاری طبق مرجع [۳۱] با زبان برنامه‌نویسی فترن صورت پذیرفته است. اعتبار سنجی کد توسعه داده شده برای انتقال شار گرما و جرم به صورت نتایج عددی و تجربی همچنین شبکه مورد انتخاب و گام زمانی متناسب در مرجع مذکور بیان شده است.

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر، معادلات حاکم بر جریان دوفازی با فرض تراکم‌ناپذیری، شامل بقای فضا، بقای جرم، بقای مومنتوم، بقای انرژی و بقای گونه‌هاست که به ترتیب با معادلات (۱) تا (۵) بیان شده است.

که در آن، Q_i نرخ انتقال گرمای قابل سنجش در سطح تماس و Q_{fg} نرخ انتقال گرمای نهان جذب است که با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$Q_i = A_i \left(k \frac{\partial T}{\partial n} \right)_i \quad (15)$$

$$Q_{fg} = \dot{m}_{i,L} H_a = \dot{m}_{i,G} H_a \quad (16)$$

در روابط فوق، H_a گرمای نهان تغییر فاز و \dot{m}_i شار جرمی خالص عبوری از سطح تماس است. در معادله (۱۳) $T_{i,G}$ و $T_{i,L}$ دمای مایع و گاز است که دمای مایع در سطح تماس تابعی از غلظت مایع و فشار در سطح تماس است.

$$\dot{m}_i = [\rho(u - u_b) \cdot nds]_i \quad (17)$$

که شار به وجود آمده از حرکت سطح را می‌توان با حجم جاروب‌شده توسط سطح تماس ($\dot{\Omega}$) محاسبه کرد [۳۶].

$$\dot{m}_i = [\rho u \cdot nds - \rho \dot{\Omega}]_i \quad (18)$$

آخرین دسته از شرط‌های مرزی در سطح تماس، شرط مرزی سینماتیکی است که در آن، دبی جرمی عبوری از سطح تماس به خواص ترموفیزیکی سیال در هر یک از فازها مرتبط می‌شود.

$$\dot{m}_{i,L} = \dot{m}(\phi_L, \phi_G) \quad (19)$$

که در آن، ϕ_L و ϕ_G می‌تواند سرعت، فشار، دما یا سایر پارامترهای مرتبط با فاز سیال باشد. مدل ریاضیاتی مناسب برای تعیین جرم عبوری از سطح تماس بر اساس فیزیک مسئله (مثل چگالش، تبخیر، جذب، ...) تعیین می‌شود. شرایط مرزی مربوطه به گونه‌ها نیز شامل عدم نفوذ مایع در فاز گاز است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(\rho D)_{i,L} A_i \frac{\partial W}{\partial n} \Big|_{i,L} = \dot{m}_i (W_i - 1) \quad (20)$$

$$W_{i,G} = 0 \quad (21)$$

معادله شرط مرزی سینماتیکی نقش اساسی در تعیین موقعیت سطح تماس و نیز دستیابی به الگوریتم کاملاً کویل بر عهده دارد. با جایگزاری معادلات (۱۸) و (۱۶) در معادله سینماتیکی سطح تماس، یک همگیری مناسب بین میدان سرعت و هندسه سطح تماس، میدان دما در پس آن به میدان فشار و کسر جرمی ایجاد می‌گردد [۳۱]. جهت بسته‌شدن دستگاه معادلات و کالیبره کردن میدان فشار در هر دو فاز، شرط ثابت بودن گرادیان فشار در راستای عمود بر سطح بر روی سطح تماس اعمال می‌شود.

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial^2 n} \right)_i = 0 \quad (22)$$

۳- مدل‌سازی و الگوریتم عددی

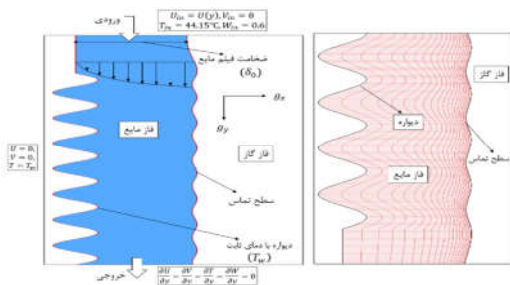
در پژوهش حاضر، با استفاده از روش حجم محدود مرکز-سلولی معادلات حاکم بر روی یک شبکه بی‌سازمان گسسته می‌شود. برای تخمین شارهای جابه‌جاشده در معادلات مومنتوم، انرژی و گونه‌ها از روش بالادست متأثر از فیزیک (PIS) استفاده شده است [۳۳]. بر روی سطوح کنترلی، مشتقات (فشار و عبارات نفوذ در معادلات بقاء) و میان-یابی‌ها به ترتیب به روش تفاضل مرکزی و با توابع توزیع وزنی تخمین زده می‌شود. همگیرسازی میدان‌های فشار و سرعت با روش PWIM ایجاد و معادلات حاکم بر جریان و انتقال گرما با یک روش ضمنی و تمام‌همگیر (Fully Coupled) گسسته و حل می‌شوند [۳۴].

تخمین انحنای ناشی از حرکت سیال بر روی شکل دیواره بر توازن نیروهای عمودی در سطح تماس و دینامیک جریان و در نتیجه، تخمین

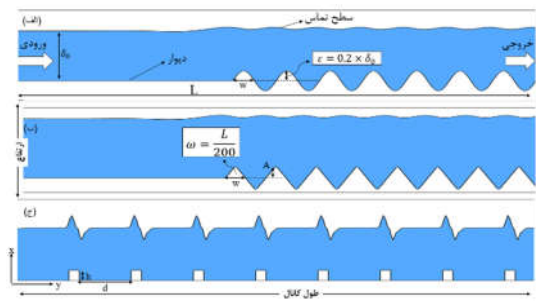
شار گرمایی و جرمی بین دیواره، فیلم مایع و سطح تماس نقش کلیدی دارد. از این رو، تعیین دقیق موقعیت سطح تماس در دقت نتایج عددی و هزینه محاسباتی بسیار کلیدی است [۳۲]. از این رو با بهره‌گیری از توسعه یک روش تعقیب سطح تماس لاگرانژی-اولری اختیاری در بستر یک الگوریتم تمام همگیر محل دقیق مرز دو فاز برای یک شبکه جابه‌جا شونده، مشخص می‌شود. جزئیات گسسته‌سازی و الگوریتم حل میدان جریان، انتقال گرما، جرم و تعقیب در مراجع [۳۱، ۳۲، ۳۳] ارائه شده است.

۴- بحث و نتایج

شکل ۱ نمایی از میدان حل جریان فیلم مایع گرانشی، همراه با شرایط مرزی و مش بی‌سازمان را در کانالی به طول $L=200$ میلی‌متر نشان می‌دهد. ضخامت فیلم ورودی طبق نظریه فیلم ناسلت متناسب با عدد رینولدز فیلم مایع [۳۵] انتخاب شده است. به منظور بررسی اثرات شکل دیواره طبق شکل ۲ بر روی انتقال جرم و گرما (جذب) از فاز گاز (بخار آب) به داخل فاز مایع، ریزش جریان فیلم مایع (محلول آب و لیتیوم-برماید) پس از گذر از صفحه تختی به طول $0.1L$ و تحت اثر نیروی گرانش، سیال در مجاورت دیواره سینوسی، مثلثی و دندانه‌ای قرار می‌گیرد. دامنه و دوره تناوب اشکال دیوار به ترتیب برابر با $\varepsilon = 0.2 \times \delta_0$ و $\omega = \frac{L}{200}$ می‌باشد.



شکل ۱- میدان جریان، شرایط مرزی و مش بی‌سازمان مورد استفاده.



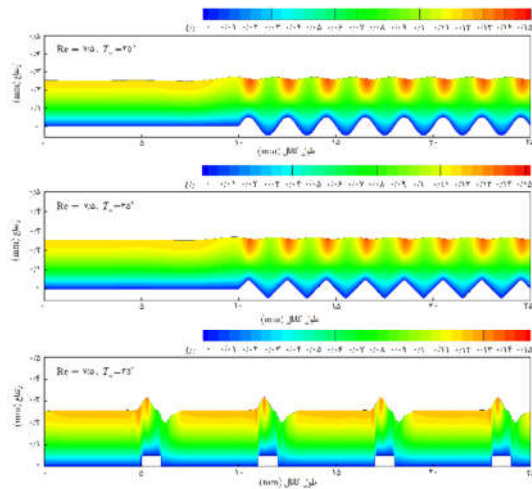
شکل ۲- نامگذاری و هندسه به کار گرفته شده برای مدل‌سازی عددی پدیده جذب در جریان فیلم مایع گرانشی در سه حالت مختلف دیواره.

در ورودی کانال، مقدار $v = 0$ و یک توزیع سهموی (شکل ۱) برای سرعت u به صورت زیر اعمال می‌شود [۲۵].

$$u = 6u_n \left(\frac{y}{L_0} - \frac{y^2}{L_0^2} \right) \quad (18)$$

تماس علاوه بر افزایش مساحت سطح تماس که باعث افزایش شار گرمی و گرمایی عبوری می‌شود منجر به تغییرات میدان سرعت (ایجاد گرادیان سرعت) در نواحی نزدیک به سطح تماس نیز شده است. طبق مراجع [۳۱ و ۳۲] گرادیان سرعت منجر به تغییر گرادیان فشار بر سطح تماس در فاز مایع می‌شود. در نواحی که انحنا سطح تماس به سمت فاز گاز باشد، گرادیان سرعت افزایش و گرادیان فشار کاهش می‌یابد. در نواحی که انحنا به سمت داخل فاز مایع می‌باشد این گرادیان‌ها برعکس خواهند بود. افزایش گرادیان فشار از سمت فاز گاز به سمت فاز مایع منجر به رانده شدن بیشتر بخار آب و به تبع آن افزایش دبی گرمی و گرمایی را دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تغییر انحنا سطح تماس عاملی موثر در انتقال جرم و گرما می‌باشد.

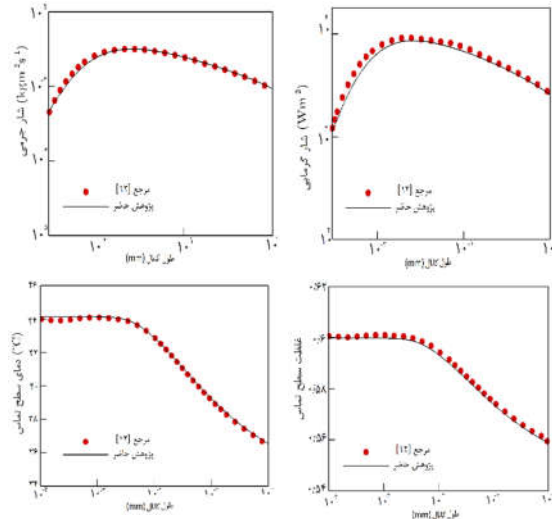
تغییرات میدان دمای جریان سیال در شکل ۵ نشان داده شده است. جریان فیلم مایع در طی تماس با دیواره شروع به سرد شدن کرده و یک گرادیان دما از دیواره تا سطح تماس ایجاد می‌گردد. طبق معادله (۱۴) هر چقدر گرادیان دمای عمودی بیشتر باشد، نرخ انتقال جرم از سطح تماس افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سرد کردن دیواره یکی از عوامل مهم در پدیده جذب می‌باشد. شکل ۶ تغییرات میدان غلظت لیتیم برماید را به واسطه جذب بخار آب از فاز گاز نشان می‌دهد. ناحیه قرمز رنگ غلظت ورودی سیال که برابر با ۶۰٪ است را نشان می‌دهد. در حالت سینوسی و مثلثی بدلیل هم اندازه بودن دامنه و عرض شکل دیواره، تغییرات میدان‌های سرعت، دما و غلظت بسیار متشابه می‌باشد. اما در حالت دندان‌های متفاوت است.



شکل ۴- کانتور سرعت افقی برای سه حالت دیواره در عدد رینولدز ۷/۵ و دمای دیواره ۳۵ درجه سلسیوس.

میزان انتقال جرم و گرما به صورت محلی در طول کانال بر روی سطح تماس توسط سه پارامتر شار گرمی، شار گرمایی و عدد شرود (Sh) بیان شده است. عدد شرود بیانگر گرادیان غلظت عمود بر سطح تماس می‌باشد که به صورت $Sh = \frac{\partial W}{\partial n} \frac{\delta_0}{W - W_0} \Big|_i$ تعریف می‌شود. شکل ۷ شار گرمایی عبوری از سطح تماس را در دمای ثابت ۳۵ درجه سلسیوس در مقابل عدد رینولدز برای شکل دیواره‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج شکل دیواره سینوسی، مثلثی و دندان‌های با دیواره تخت مقایسه شده است. در حالت صفحه تخت، در ورودی کانال میزان شار

که در آن L_0 طول مشخصه و دو برابر ضخامت فیلم مایع می‌باشد. u_n سرعت ناسلت بوده و به صورت $u_n = \frac{\rho g L_0^2}{3\mu}$ طبق مرجع [۳۱] بیان شده است. شکل ۳ اعتبارسنجی نتایج عددی در پژوهش حاضر را مطابق مرجع [۱۲] نشان می‌دهد. تغییرات شار گرمی، شار گرمایی، دما و غلظت محلول لیتیم برماید و آب را در سطح تماس نشان می‌دهد.



شکل ۳- اعتبارسنجی پژوهش حاضر برای متغیرهای حاکم بر پدیده جذب در جریان فیلم مایع

به منظور بررسی پدیده جذب از تغییر عدد رینولدز و دمای دیواره بر روی سه حالت مختلف شکل دیواره استفاده شده است. از این رو، عدد رینولدز برابر با ۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰ و دمای دیواره برابر با ۳۱، ۳۳، ۳۵ و ۳۷ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است. در حالت دندان‌های ارتفاع دندان‌ها برابر با $0.2\delta_0$ و فاصله هر دندان از هم برابر با ۵ میلی‌متر انتخاب شده است. تمامی نتایج طبق متغیرهای هیدروترمودینامیکی و شرایط مرزی مرجع [۱۲] انجام شده است. طبق مرجع [۳۱] شبکه به اندازه ۳۰۰۰ گره در راستای محور طولی و در راستای محور عرضی طبق جدول ۱ که با بهترین شبکه اختلافی در حدود ۰/۵ درصد را دارند، انتخاب شده است. فاصله اولین سلول تا سطح تماس برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شده است و هر چقدر به دیواره نزدیک می‌شویم اندازه سلول‌ها افزایش می‌یابد. در راستای محور طولی کانال فاصله سلول‌ها از یکدیگر ثابت می‌باشد.

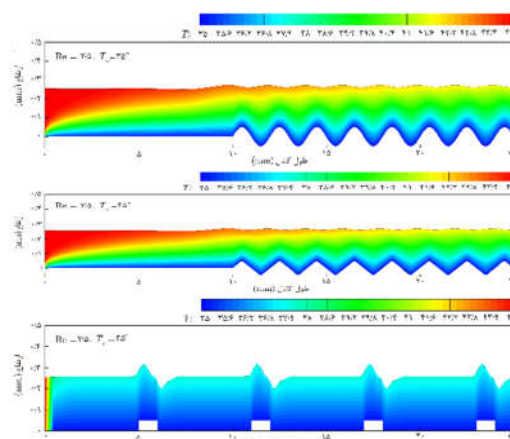
جدول ۱- شبکه مکانی انتخاب شده در پژوهش حاضر

عدد رینولدز (Re)	ضخامت فیلم ورودی (δ_0 (mm))	تعداد گره محور Y	تعداد گره محور X
۷/۵	۰/۲۵۴۵	۲۰	۳۰۰۰
۱۵	۰/۳۲۰۷	۲۵	۳۰۰۰
۲۲/۵	۰/۳۶۷۱	۲۸	۳۰۰۰
۳۰	۰/۴۰۴۰	۳۱	۳۰۰۰

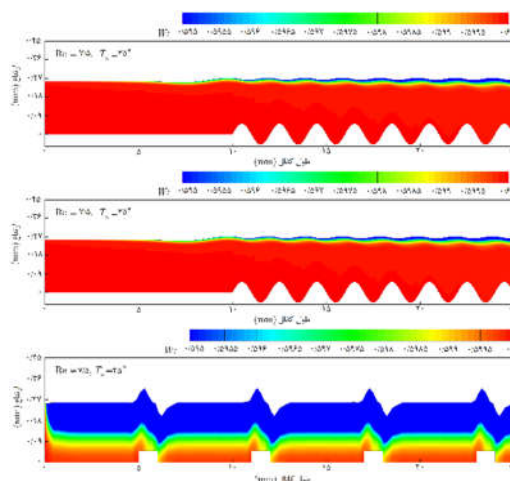
شکل ۴ کانتور سرعت را برای سه حالت دیواره در عدد رینولدز ۷/۵ و دمای دیواره ۳۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. انحنا سطح

گرمایی افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس در طول کانال به دلیل اشباع شدن، شار گرمایی کاهش پیدا میکند. همین روال برای حالت سینوسی و مثلثی نیز صادق است اما در حالت دندانه‌ای به دلیل ایجاد انحنای متناوب و نوسانی در سطح تماس شار گرمایی نیز دچار نوسان حول نمودار دیواره تخت می‌شود. در حالت دندانه‌ای نوسانات نیز دیده می‌شود اما نقطه بیشینه‌ای در حالت کلی ندارد. تغییرات شار گرمایی برای حالت سینوسی و مثلثی بسیار شبیه همدیگر بوده و به مقدار جزئی حالت مثلثی بیشتر است.

شکل ۸ شار جرمی عبوری از سطح تماس را به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای اعداد رینولدز و شکل دیواره‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاصله از نمودارها نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز بر روی الگوی نمودارها تاثیر جزئی دارد. در حالت صفحه تخت، سینوسی و مثلثی با افزایش سرعت جریان، میزان جذب بیشینه و نمودار شار جرمی به سمت جلوی کانال انتقال پیدا کرده و مقدار آن کاهش پیدا می‌کند. در حالت دندانه‌ای از رینولدز ۲۲/۵ به بعد تغییراتی در شکل نوسانات ایجاد شده دیده نمی‌شود.



شکل ۵- کانتور دما برای سه حالت دیواره در عدد رینولدز ۷/۵ و دمای دیواره ۳۵ درجه سلسیوس.

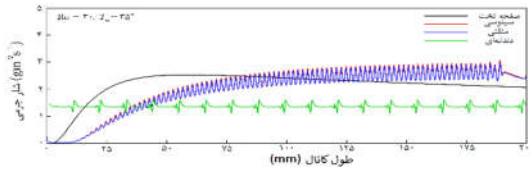


شکل ۶- کانتور غلظت برای سه حالت دیواره در عدد رینولدز ۷/۵ و دمای دیواره ۳۵ درجه سلسیوس.

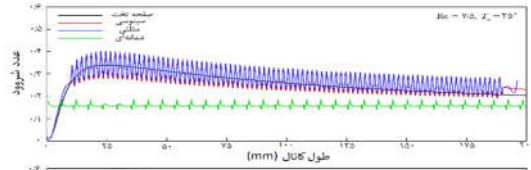
شکل ۹ عدد شروود محلی را که بیانگر نرخ جذب هست، در طول کانال نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۹ با شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان نتیجه گرفت که الگوی رفتاری شار جرمی، شار گرمایی و عدد شروود کاملاً مشابه همدیگر بوده که دلیل این امر ارتباط مستقیم معادلات حاکم بر سطح تماس و فیزیک حاکم بر انتقال جرم و گرما است. در شکل ۹ نیز دیده می‌شود که در عدد رینولدز ۷/۵ در ابتدای کانال میزان جذب به بیشترین مقدار خود برای حالت دیواره تخت، سینوسی و مثلثی می‌رسد و با حرکت در طول کانال عدد شروود کاهش می‌یابد. برای حالت دندانه‌ای در طول کانال مقدار تغییرات در هر تناوب تکرار شده و ثابت می‌باشد. از شکل‌های ۷ تا ۹ می‌توان نتیجه گرفت که در ابتدای کانال به صورت محلی دیواره دندانه‌ای نسبت به بقیه بیشترین مقدار جذب و انتقال گرما را ایجاد می‌کند.

جهت مقایسه کلی بین حالت‌های مختلف اشکال دیواره، به صورت میانگین در طول سطح تماس کانال پارامترهای دبی جرمی گذرنده از سطح تماس، عدد ناسلت ($Nu = \frac{h\delta_i}{k}$) و عدد شروود محاسبه شده است. شکل ۱۰ دبی جرمی عبوری از سطح تماس را به صورت میانگین در طول کل کانال بر حسب دمای دیواره در چهار عدد رینولدز موجود نشان می‌دهد. در هر عدد رینولدز ثابت، با افزایش دمای دیواره میزان دبی جرمی در هر حالت کاهش چشمگیری دارد. به صورت کلی تغییر در شکل دیواره منجر به افزایش انتقال جرم نسبت به حالت دیواره تخت می‌شود. با افزایش عدد رینولدز دبی جرمی کاهش. در دمای ثابت می‌توان نتیجه گرفت که شکل سینوسی و مثلثی دیواره منجر به انتقال جرم بیشتری نسبت به حالت دندانه‌ای و صفحه تخت در تمامی اعداد رینولدز می‌شود.

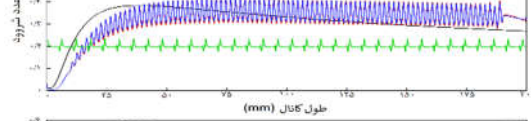
شکل ۱۱ عدد ناسلت میانگین سطح تماس را بر حسب دمای دیواره برای اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. در عدد رینولدز ۷/۵ بیشترین مقدار عدد ناسلت حاصل می‌گردد. در تمامی اعداد رینولدز شکل مثلثی و سینوسی نسبت به صفحه تخت و دندانه‌ای عدد ناسلت مقدار بیشتری را دارد. با افزایش دمای دیواره در عدد رینولدز ثابت مقدار ناسلت میانگین کاهش می‌یابد. طبق عدد ناسلت، کاهش دمای دیواره منجر به افزایش گرمای انتقال یافته از سطح تماس و به تبع آن افزایش جذب را داراست.



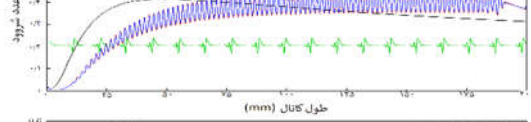
شکل ۸- شار جرمی عبوری از سطح تماس به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



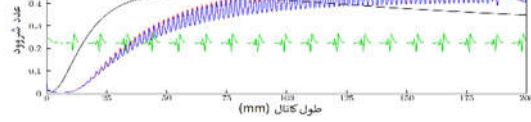
شکل ۹- عدد شروود محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



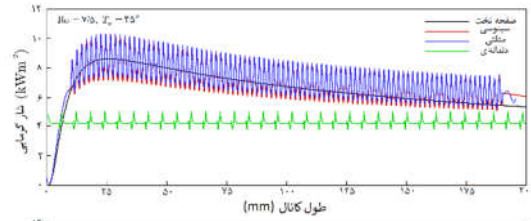
شکل ۱۰- عدد شروود محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



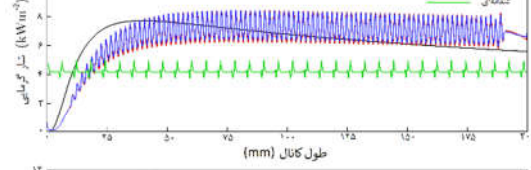
شکل ۱۱- عدد شروود محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



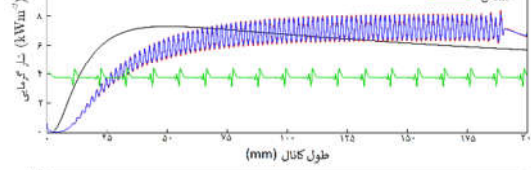
شکل ۱۲- عدد شروود محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



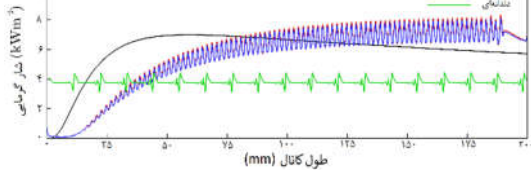
شکل ۱۳- شار گرمایی عبوری از سطح تماس به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



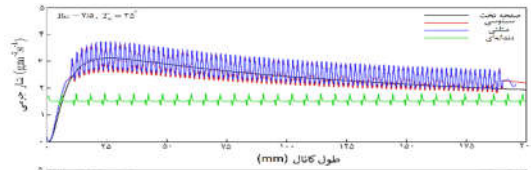
شکل ۱۴- شار گرمایی عبوری از سطح تماس به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



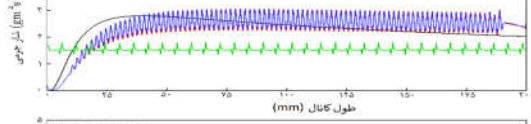
شکل ۱۵- شار گرمایی عبوری از سطح تماس به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.



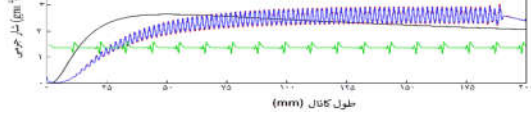
شکل ۱۶- شار گرمایی عبوری از سطح تماس به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.

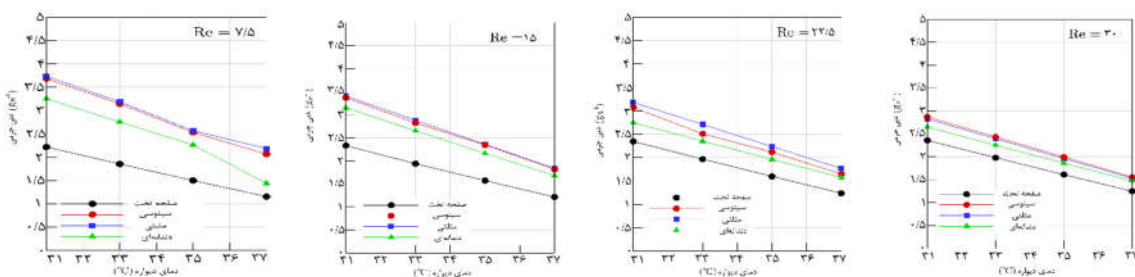


شکل ۱۷- شار جرمی عبوری از سطح تماس به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.

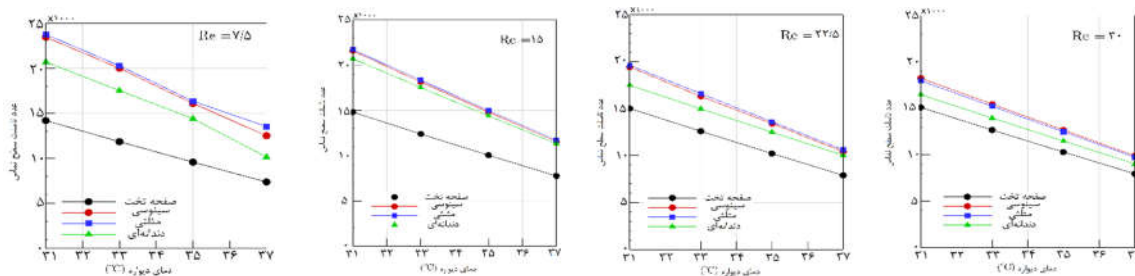


شکل ۱۸- شار جرمی عبوری از سطح تماس به صورت محلی در دمای ۳۵ درجه سلسیوس و اعداد رینولدز مختلف.





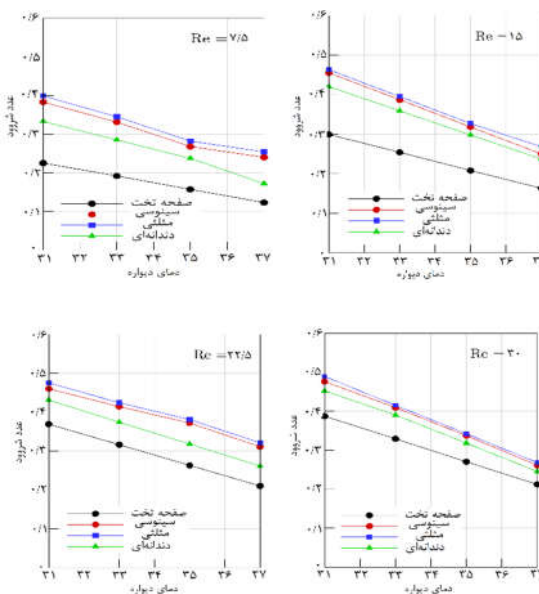
شکل ۱۰- دبی جرمی میانگین بر حسب دمای دیواره برای اعداد رینولدز مختلف.



شکل ۱۱- عدد ناسلت میانگین بر حسب دمای دیواره برای اعداد رینولدز مختلف.

۵- نتیجه‌گیری

فیلم مایع در حال سقوط گرانشی، کاربردهای صنعتی فراوانی دارد که شامل فرایندهای خنک‌کاری، چگالش، تبخیر و جذب می‌باشد. در پژوهش حاضر سعی شد با استفاده از یک کد عددی حجم محدود با زبان برنامه‌نویسی فرترن توسعه داده شده طبق مرجع [۳۱] به بررسی اثر شکل دیواره بر روی انتقال جرم و گرما از فاز گاز به داخل فاز مایع پرداخته شد. برای اینکار سه شکل مختلف دیواره به صورت مثلثی، سینوسی و دندانهای مورد بررسی و نتایج حاصل با صفحه تخت مورد مقایسه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های انجام شده در چهار عدد رینولدز و دمای دیواره انجام شد. عدد شروود، ناسلت و دبی جرمی به صورت میانگین جهت بررسی میزان انتقال جرم و گرما مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شار جرمی، گرمایی و عدد شروود به صورت محلی در طول کانال و در سطح تماس دقیق محاسبه شده است. طبق مراجع [۳۱،۳۲] نشان داده شد که موقعیت و انحناى سطح تماس نقش اصلی در میزان پدیده جذب دارد. تغییر در شکل دیواره تاثیر ویژه‌ای در الگو و شکل سطح تماس دارد و منجر به افزایش مساحت سطح تماس (تقریباً ۱۰٪) شده است. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار انتقال شار جرمی و گرمایی مربوط به دیواره مثلثی و سینوسی می‌باشد. سپس دیواره دندانهای نسبت به صفحه تخت جذب بیشتری را ایجاد می‌کند. در عدد رینولدز ثابت، افزایش دمای دیواره منجر به کاهش پدیده جذب می‌شود که می‌توان نتیجه گرفت خنک‌سازی دیواره عامل بسیار مهمی در افزایش نرخ جذب بخار آب است. با افزایش عدد رینولدز نیز میزان شروود میانگین افزایش یافته است که بیانگر افزایش انتقال جرم می‌باشد.



شکل ۱۲- عدد شروود میانگین بر حسب دمای دیواره برای اعداد رینولدز مختلف.

شکل ۱۲ عدد شروود میانگین را نشان می‌دهد. در عدد رینولدز ثابت با افزایش دمای دیواره میزان عدد شروود کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش میزان جذب می‌باشد. در دما و عدد رینولدز ثابت، عدد شروود مربوط به دیواره مثلثی و سینوسی بیشتر از حالت دندانهای و صفحه تخت می‌باشد. نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش عدد شروود و در نتیجه میزان جذب افزایش می‌یابد.

۶- سپاسگزاری

نویسندگان این اثر، کمال تشکر و سپاس‌گزاری خویش را از آقای دکتر مسعود محمدی جهت همکاری ابراز می‌دارند.

۸- مراجع

- [1] Craster R. V. and Matar O. K., Dynamics and stability of thin liquid films. *Reviews of modern physics*, Vol. 81, No.3, pp. 1131, 2009.
- [2] Alhousseini A. A., Tuzla K. and Chen J. C., Falling film evaporation of single component liquids. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 41, No.12, pp. 1623-1632, 1998.
- [3] Triché D., Bonnot S., Perier-Muzet M., Boudéhen F., Demasles H. and Caney N., Experimental and numerical study of a falling film absorber in an ammonia-water absorption chiller. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 111, pp. 374-385, 2017.
- [4] Zhang F., Guo L., Ding Y., Zhu, X. and Liao Q., Flow pattern and CO2 absorption in a falling film reactor with mixed aqueous solution of ionic liquid and MEA. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 138, pp. 583-590, 2017.
- [5] Li T., Yin Y., Liang Z. and Zhang X., Experimental study on heat and mass transfer performance of falling film absorption over a vertical tube using LiCl solution. *international journal of refrigeration*, Vol. 85, pp. 109-119, 2018.
- [6] Hofmann E. and Kuhlmann H. C., On the optimum mass transfer of flat absorbing falling films. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 55, No.25-26, pp. 7686-7697, 2012.
- [7] Giannetti N., Rocchetti A., Yamaguchi S. and Saito K., Heat and mass transfer coefficients of falling-film absorption on a partially wetted horizontal tube. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 126, pp. 56-66, 2018.
- [8] Giannetti N., Yamaguchi S. and Saito K., Simplified expressions of the transfer coefficients on a partially wet absorber tube. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 105, pp. 135-147, 2019.
- [9] Li M. and Lu Y., Numerical and experimental study of local heat mass transfer characteristics of horizontal falling films of CaCl2 solution absorbing vapor from humid air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 153, pp. 119574, 2020.
- [10] Mittermaier M. and Ziegler F., Impact of a developing velocity profile on heat and mass transfer in absorbing laminar falling films. *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 88, No.1-2, pp. 139-146, 2016.
- [11] Papaefthimiou V. D., Koronaki I. P., Karampinos D. C. and Rogdakis E. D., A novel approach for modelling LiBr-H2O falling film absorption on cooled horizontal bundle of tubes. *international journal of refrigeration*, Vol. 35, No.4, pp. 1115-1122, 2012.
- [12] Havestini R. A. and Ormiston S. J., An elliptic numerical analysis of water vapour absorption into a falling film in vertical parallel plate channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 150, pp. 119266, 2020.
- [13] Chen S., Zhang T., Lv L., Chen Y. and Tang S., Simulation of the hydrodynamics and mass transfer in a falling film wavy microchannel. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 34, pp. 97-105, 2021.
- [14] Das A., Das R. S. and Das K., Performance analysis of aqueous LiCl and CaCl2 based falling film dehumidifier with surface modification. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 200, pp. 117704, 2022.
- [15] Lu H., Lu L. and Gao X., Mass transfer enhancement of falling film liquid desiccant dehumidification by micro-baffle plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 169, pp. 120945, 2021.
- [16] Das A., Das R. S. and Das K., Performance enhancement of a liquid desiccant absorber with triangular corrugated structured packing. *Journal of Building Engineering*, Vol. 45, pp. 103677, 2022.
- [17] Dietze G. F., Effect of wall corrugations on scalar transfer to a wavy falling liquid film. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 859, pp. 1098-1128, 2019.

۷- نمادها

A	مساحت (m^2)
C_p	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
D	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
H_a	گرمای جذب (Jkg^{-1})
\bar{h}	آنتالپی جزئی جرمی (Jkg^{-1})
I	تانسور یکه
k	رسانندگی گرمایی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
L	طول کانال (mm)
L_0	طول مشخصه (mm)
\dot{m}	دبی جرمی (kgm^{-1})
n	بردار نرمال بر سطح
Nu	عدد ناسلت
p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Q	شار گرمایی (Wm^{-2})
Re	عدد رینولدز
s	بردار سطح
SCL	قانون بقاء فضا
Sh	عدد شروود
t	زمان (S)
t	بردار مماس
T	دما ($^{\circ}C$)
T	تانسور تنش
V	بردار سرعت
W_i	غلظت سطح تماس

علائم یونانی

δ_0	ضخامت فیلم ورودی (m)
ε	دامنه اشکال دیواره
Ω	حجم کنترل (m^3)
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})
τ	تنش برشی (Nm^{-2})
ϕ	متغیر
ω	دوره تناوب اشکال دیواره

زیرنویس‌ها

b	مرز
fg	تبدیل فاز از گاز به مایع
i	سطح تماس
in	ورودی
w	دیوار

- convection flows. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, Vol. 61, No.2, pp. 91-115, 2012.
- [35] Malamataris N. A. and Balakotaiah V., Flow structure underneath the large amplitude waves of a vertically falling film. *AIChE journal*, Vol. 54, No.7, pp. 1725-1740, 2008.
- [36] Ferziger J. H., Perić M. and Street R. L., *Computational methods for fluid dynamics*. Vol. 3, pp. 196-200. Springer, Berlin, 2002.
- [18] Sarafraz M. M., Hormozi F. and Peyghambarzadeh S. M., Pool boiling heat transfer to aqueous alumina nano-fluids on the plain and concentric circular micro-structured (CCM) surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 72, pp. 125-139, 2016.
- [19] Salimpour M. R., Abdollahi A. and Afrand, M., An experimental study on deposited surfaces due to nanofluid pool boiling: Comparison between rough and smooth surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 88, pp. 288-300, 2017.
- [20] Mehralizadeh A., Shabanian S. R. and Bakeri G., Effect of modified surfaces on bubble dynamics and pool boiling heat transfer enhancement: A review. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 15, pp. 100451, 2020.
- [21] Walunj A. and Sathyabhama A., Comparative study of pool boiling heat transfer from various microchannel geometries. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, pp. 672-683, 2018.
- [22] Halon T., Zajaczkowski B., Michaie S., Rulliere R. and Bonjour J., Experimental study of low pressure pool boiling of water from narrow tunnel surfaces. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 121, pp. 348-357, 2017.
- [23] Ghadikolaei S. S., Yassari M., Sadeghi H., Hosseinzadeh K. and Ganji D. D., Investigation on thermophysical properties of TiO₂-Cu/H₂O hybrid nanofluid transport dependent on shape factor in MHD stagnation point flow. *Powder technology*, Vol. 322, pp. 428-438, 2017.
- [24] Gheitaghy A. M., Samimi A. and Saffari H., Surface structuring with inclined minichannels for pool boiling improvement. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, pp. 892-902, 2017.
- [25] Humnic G. and Humnic A., Hybrid nanofluids for heat transfer applications—a state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 125, pp. 82-103, 2018.
- [26] Pastuszko R., Pool boiling heat transfer on micro-fins with wire mesh—Experiments and heat flux prediction. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 125, pp. 197-209, 2018.
- [27] Abdollahi A., Salimpour M. R. and Etesami N., Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 111, pp. 1101-1110, 2017.
- [28] Sajid M. U. and Ali H. M., Thermal conductivity of hybrid nanofluids: a critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 211-234, 2018.
- [29] Mori S., Maruoka N. and Okuyama K., Critical heat flux enhancement by a two-layer structured honeycomb porous plate in a saturated pool boiling of water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 118, pp. 429-438, 2018.
- [30] Mehralizadeh A., Shabanian S. R. and Bakeri G., Experimental and modeling study of heat transfer enhancement of TiO₂/SiO₂ hybrid nanofluids on modified surfaces in pool boiling process. *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135, No.10, pp. 796, 2020.
- [31] Vakili-pour S. and 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*, Vol. 185, pp. 122397, 2022.
- [32] Vakili-pour S., Mohammadi M. and Ormiston S., A fully coupled ALE interface tracking method for a pressure-based finite volume solver. *Journal of Computational Physics*, Vol. 427, pp. 110054, 2021.
- [33] Vakili-pour S., Mohammadi M., Badrkhani V. and Ormiston S., Developing a physical influence upwind scheme for pressure-based cell-centered finite volume methods. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 89, No.1-2, pp. 43-70, 2019.
- [34] Vakili-pour S. and Ormiston S. J., A coupled pressure-based co-located finite-volume solution method for natural-