

# بررسی تأثیر ساختار هندسی در انتقال حرارت جریان دوفازی در میکرو

## کانال‌ها

علی محمدیان، سینا<sup>۱</sup> مهدی هاشم‌آبادی<sup>۲</sup> سجاد قاسملوی<sup>۳\*</sup> حمید پرهیزکار<sup>۴</sup> جاماسب پیرکندی<sup>۵</sup>

دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۴، انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.2.6>

### چکیده

در این پژوهش به بررسی عددی ساختار جریان و انتقال حرارت دوفاز در میکرو کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر پرداخته شده است. برای این منظور از نرم‌افزار فلونت استفاده شده و برای مدل‌سازی تغییر فاز در این نرم‌افزار برنامه‌نویسی انجام شده است. جریان ورودی به صورت بخار فوق اشباع مبرد R134A در شار جرمی مختلف در ورودی میکرو کانال فرض شده و دیواره میکرو کانال به صورت شار ثابت در نظر گرفته شده است. اثر شکل هندسی سطح مقطع میکرو کانال در ۳ هندسه سطح مقطع دایروی، مربعی و دوزنقه در بازه شار جرمی ورودی  $100-600 \text{ kg}/(m^2s)$  بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط یکسان شار جرمی ورودی و سطح مقطع میکرو کانال، ضریب انتقال حرارت در میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر در حدود ۱۵٪ بیشتر است. همچنین در محدوده مشخصی از شار جرمی ورودی، افت فشار در قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر در حدود ۳ برابر افت فشار در قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر است. در هر دو قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر، میکرو کانال‌های مربعی، دایروی و دوزنقه به ترتیب بیشترین ضریب انتقال حرارت را داشتند.

**واژه‌های کلیدی:** جریان دوفازی؛ چگالش؛ میکرو کانال؛ ساختار هندسی؛ ضریب انتقال حرارت؛ افت فشار

## Investigation of Effect of Geometric Structure on Two Phase Flow Heat Transfer in Microchannels

Alimohammadian, S. Hashemabadi, M. Ghasemloo, S. Parhizkar, H. Pirkandi, J.

Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2022/09/21 ; revised: 2023/01/11 ; Accepted: 2023/02/03 ; published: 2023/03/02)

### ABSTRACT

In this research, the numerical analysis of the flow structure and two-phase heat transfer in micro-channels with hydraulic diameters of 0.55 and 0.7 mm has been investigated. For this purpose, Fluent software was used and programming was done to model the phase change in this software. The inlet flow is assumed to be supersaturated vapor of R134A refrigerant at different mass fluxes at the entrance of the microchannel and the wall of the microchannel is considered as a constant flux. The effect of the geometrical shape of the cross-section of the micro-channel in 3 geometries of circular, square and trapezoidal cross-section in the input mass flux range of  $[kg/(m^2 s)]$  100-600 on the heat transfer coefficient and pressure drop has been evaluated. The results show that under the same conditions of the inlet mass flux and the cross-sectional area of the microchannel, the heat transfer coefficient in the microchannel with a hydraulic diameter of 0.55 mm is about 15% higher. Also, in a certain range of the input mass flux, the pressure drop in the hydraulic diameter of 0.55 mm is about 3 times the pressure drop in the hydraulic diameter of 0.7 mm. In both hydraulic diameters of 0.55 and 0.7 mm, square, circular and trapezoidal microchannels had the highest heat transfer coefficient, respectively.

**Keywords :** Two Phase Flow, Condensation, Microchannel, Geometric Shape, Heat Transfer Coefficient, Pressure Drop.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: sinaalimohammadian@gmail.com

۲- استادیار: hashemabadi@mut.ac.ir

۳- استادیار(نویسنده پاسخگو): sghasemloo@mut.ac.ir

۴- استادیار: hparhiz@mut.ac.ir

۵- دانشیار: jpirkandi@mut.ac.ir



## ۱-مقدمه

میکرو کانال‌ها به علت راندمان بالاتر، وزن کمتر و ابعاد کوچک‌تر به طور گسترده در سیستم‌های تبرید، خنک‌کننده‌ها و زیرسیستم‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شوند. در مقایسه با جریان تک‌فاز، تاکنون مطالعات زیادی در مورد جریان دوفاز، مخصوصاً در فرایند چگالش و در کاربردهای تبرید و تهویه مطبوع، در میکرو کانال‌ها انجام نشده است. میکرو کانال‌ها در زمینه انتقال حرارت کاربردهای بسیاری دارند که می‌توان به خنک‌کاری پره توربین گاز، خنک‌کاری رآکتورهای هسته‌ای، خنک‌کاری زیرسیستم‌های الکترونیکی هواپیما و مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در سیکل تبرید اشاره کرد [۱]. در چند دهه اخیر مطالعه پیرامون جریان در مبدل‌های حرارتی میکرو کانال روند روبه‌رشدی داشته است. دلیل این امر مزیت‌هایی همچون وزن کمتر، میزان مواد مصرفی کمتر و ابعاد کوچک‌تر و درعین حال نسبت سطح به حجم بیشتر و در نتیجه ضریب انتقال حرارت بالاتر نسبت به مبدل‌های حرارتی مرسوم است [۲]. در چند سال اخیر میکرو کانال‌ها در سامانه‌های تهویه مطبوع کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند و تقاضا برای استفاده از کندانسورهای میکرو کانال در سیکل تبرید این سامانه‌ها روبه‌رشد است. جریان ورودی به کندانسور در سیکل تبرید، در فاز گاز و به صورت بخار فوق داغ و جریان خروجی از آن مایع است؛ بنابراین سیال با عبور از کندانسور، با کاهش دما، یک تغییر فاز چگالشی انجام می‌دهد. برای بهبود عملکرد حرارتی این مبدل‌های گرمایی، مطالعه عوامل مؤثر بر انتقال حرارت دوفاز در جریان داخل میکرو کانال‌های مبدل حرارتی ضروری است. به همین منظور در پژوهش حاضر به بررسی اثر هندسه سطح مقطع میکرو کانال بر ضریب انتقال حرارت دوفازی در فرایند چگالش در یک بازه از بی‌جرمی‌ها و قطرهای هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۱/۷ میلی‌متر، پرداخته شده است.

## ۲-پیشینه پژوهش

بررسی تاثیر سطح مقطع هندسی مینی و میکرو کانال‌ها بر انتقال حرارت دوفاز چگالش از موضوعات مورد علاقه محققین در سال‌های گذشته بوده است. شین و کین [۱] به بررسی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت در مینی کانال‌های دایروی و مستطیلی با مبرد R134a پرداختند. در تحقیق آن‌ها قطر هیدرولیکی را برای کانال

دایروی ۰/۴۹۳، ۰/۶۹۱ و ۱/۰۶۷ میلی‌متر و برای کانال مستطیلی قطر هیدرولیکی ۰/۴۹۴ و ۰/۶۵۸ و ۰/۹۷۲ میلی‌متر بوده است. شار جرمی‌های بخار فوق اشباع ورودی آزمایش شده  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ بودند. دیواره کانال‌ها به صورت شار ثابت و بین  $kW/m^2$  ۲۰-۵ متغیر بود. نتایج ارایه شده نشان داد هیچ رابطه معناداری بین شار گرمایی دیواره و ضریب انتقال حرارت چگالش وجود ندارد. همچنین ضریب انتقال حرارت چگالش با افزایش شار جرمی بخار ورودی و کاهش قطر هیدرولیکی افزایش می‌یابد. در شار جرمی‌های کم‌تر و قطر هیدرولیکی یکسان، میکرو کانال مستطیلی ضریب انتقال حرارت چگالش بالاتری را ثبت کرد اما در شار جرمی‌های بالاتر ضریب انتقال حرارت چگالش میکرو کانال دایروی بیشتر بود. آگاروال و همکاران [۲] به اندازه‌گیری آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت در میکرو کانال‌های غیردایروی در حالت افقی در محدوده قطر هیدرولیکی ۰/۴۲۴ تا ۰/۸۳۹ میلی‌متر با شکل‌های مقطع مختلف در حین چگالش سیال کاری R134a در محدوده دبی جرمی‌های  $kg/(m^2s)$  ۷۵۰-۱۵۰ پرداختند. شکل مقطع کانال‌ها شامل بشکه‌ای، N شکل، مستطیلی، مربعی و مثلثی هستند و کانالی با شکل مقطع W و میکرو دندانه‌های مثلثی نیز آزمایش شد. با توجه به نتایج، مشخص شد که افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت و شار جرمی در میکرو کانال‌های مثلثی، N و W شکل در مقایسه با میکرو کانال مستطیلی، مربعی و بشکه‌ای بیشتر است. دلیل این امر افزایش مساحت دیواره در سطح مقطع یکسان شکل‌های ذکر شده می‌باشد. دل کول و همکاران [۳] به بررسی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت چگالش یک مینی کانال مربعی با قطر هیدرولیکی ۱/۲۳ میلی‌متر و مقایسه نتایج آن با نتایج مینی کانال دایروی پرداختند. در این پژوهش از سیال کاری R134A در دمای اشباع ۴۰ درجه سانتی‌گراد در شار جرمی بخار ورودی  $kg/(m^2s)$  ۸۰۰-۲۰۰ استفاده شد. طبق نتایج منتشر شده در دبی جرمی‌های پایین‌تر در کانال مربعی ضریب انتقال حرارت نسبت به کانال دایروی مقادیر بالاتری دارد و در دبی جرمی‌های بالاتر ضریب انتقال حرارت در هر دو مقطع در یک محدوده بود. دربی و همکاران [۴] به بررسی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت

پردازند. نمونه‌ها در قطرهای هیدرولیکی متفاوتی تحلیل شدند. نتایج نشان دادند کاهش قطر هیدرولیکی از ۲۵۰ به ۸۰ میکرومتر، باعث کاهش ضخامت فیلم مایع و افزایش متوسط ضریب انتقال حرارت تا ۳۹٪ برای دبی جرمی یکسان می‌شود. همچنین مشاهده شد در مقطع مستطیلی ناسلت متوسط با افزایش نسبت منظری افزایش می‌یابد و کمترین متوسط عدد ناسلت برای میکرو کانال مربعی به دست آمد. گو و همکاران [۸] به مطالعه عددی تاثیر شکل لوله بر الگوی چگالش در مینی لوله‌های افقی پرداختند. آن‌ها نشان دادند در یک قطر هیدرولیکی مشخص، لوله مربعی ضریب انتقال حرارت بالاتری را نسبت به لوله دایروی نشان می‌دهد. از سویی، لوله مثلثی تقریباً ضریب انتقال حرارت یکسانی با لوله دایروی دارد.

بشارتی و جهانیان [۹] به بررسی عددی انتقال حرارت مزدوج در میکرو کانال دویعدی تحت‌تأثیر

میدان مغناطیسی عرضی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق تأثیر قطر نانوذره، عدد رینولدز و اتلاف لزجت را با روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد، در شرایط صرف‌نظر کردن از اتلاف لزجت، استفاده از میدان مغناطیسی در انتقال حرارت مزدوج، نه تنها تأثیر منفی بر عدد ناسلت میانگین ندارد، بلکه می‌تواند آن را به‌ویژه در اعداد رینولدز بالاتر افزایش دهد.

با بررسی کاتالوگ‌های سازنده‌های معتبر مبدل‌های حرارتی [۱۰] میکروکانال مورد استفاده در کندانسورهای سیکل تبرید سامانه‌های تهویه مطبوع، مشخص شد که قطر هیدرولیکی مورد استفاده در این کندانسورها حدود ۰/۵۵ تا ۰/۷ میلی‌متر است. به همین منظور در این تحقیق، انتقال حرارت دوفازی در میکرو کانال‌هایی با دو قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در این زمینه و بررسی نمونه‌های ساخته شده، شار جرمی بخار ورودی در محدوده  $kg/(m^2s)$  ۶۰۰-۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش‌های قبلی رابطه معناداری برای انتقال حرارت در هندسه‌های مختلف وجود ندارد که ناشی از تغییرات قطر هیدرولیکی در هر پژوهش است. باتوجه به اینکه در سال‌های اخیر استفاده از میکرو کانال‌ها در سیستم‌های تبرید بسیار مورد توجه قرار گرفته است، در این

چگالش در مینی‌کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی ۱ میلی‌متر و سطح مقطع مربع، مثلث و نیم‌دایره پرداختند. یک مطالعه پارامتری در محدوده‌ای از دبی‌های جرمی، کیفیت بخار، فشار اشباع و شار گرمایی انجام شد. مشخص شد دبی جرمی و کیفیت بخار، تاثیر قابل توجهی بر فرآیند چگالش دارند. نتایج نشان داد در دبی جرمی‌های کم شار گرمایی، شکل مقطع کانال و فشار اشباع تاثیر چندانی روی ضریب انتقال حرارت چگالش ندارند. در این مطالعه تست‌های آزمایشگاهی در شار جرمی‌های بخار ورودی  $kg/(m^2s)$  ۴۵۰، ۳۰۰، ۱۵۰ و ۷۵ در کانال‌های مربعی، مثلثی و نیم‌دایره انجام شد ولی تفاوت محسوسی بین شکل‌های مختلف کانال در ضریب انتقال حرارت مشاهده نشد. لیو و همکاران [۵] به بررسی ضریب انتقال حرارت و افت فشار چگالش سیال R152a در میکرو کانال دایروی و مربعی با قطر هیدرولیکی ۱/۱۵۲ و ۰/۹۵۲ میلی‌متر پرداختند. دمای اشباع ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۸۰۰-۲۰۰ و کیفیت بخار ۰/۱ تا ۰/۹ بوده است. تاثیر شار جرمی، کیفیت بخار و شکل مقطع کانال بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار بررسی شد. نتایج نشان داد ضریب انتقال حرارت و افت فشار با افزایش شار جرمی و کیفیت بخار افزایش می‌یابند در حالی که با افزایش دمای اشباع کاهش می‌یابند. شکل مقطع کانال در شارهای جرمی کمتر، تاثیر زیادی در انتقال حرارت و تاثیر کمی در افت فشار دارد. در همان سال بورتولین و همکاران [۶] به شبیه‌سازی عددی حالت پایا چگالش R134a در شارهای جرمی  $kg/(m^2s)$  ۸۰۰ و ۴۰۰ در مینی‌کانال با مقطع مربعی و دایروی به قطر هیدرولیکی ۱ میلی‌متر و مقایسه نتایج این دو مقطع پرداختند. آن‌ها از روش حجم سیال<sup>۱</sup> برای تشخیص مرز گاز و مایع استفاده کردند و از شرط مرزی دیواره دمای ثابت بهره بردند. مدل اغتشاشی مورد استفاده آن‌ها یک فرم رینولدز پایین مدل  $k - \omega SST$  بود. نتایج نشان دادند که تاثیر کشش سطحی بر مرز ناحیه بخار و مایع در میکرو کانال مربعی می‌تواند به بهبود انتقال حرارت کمک کند اما این امر در شارهای جرمی بالاتر موثر نیست. امقاری و همکاران [۷] به بررسی عددی چگالش بخار در میکرو کانال‌های غیر دایروی مثلثی، مربعی و مستطیلی

غیرقابل امتزاج و دارای فصل مشترک دقیق از مدل چند فازی حجم سیال<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. رابطه‌های (۱) تا (۳) مربوط به معادلات پیوستگی، مؤنتم و انرژی و رابطه‌های (۴) و (۵) نیز برای محاسبه کسر حجمی در مدل چند فاز حجم سیال است.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot ([\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v} (\rho E + P)) = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \alpha_f) = -\frac{s}{\rho_f} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \alpha_g) = -\frac{s}{\rho_g} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{n_{phase}} \alpha_i = 1 \quad (5)$$

در رابطه ۱ مقدار انتقال جرم از فاز  $q$  به فاز  $p$  می‌باشد.  $\dot{m}_{pq}$  مقدار انتقال جرم از فاز  $p$  به فاز  $q$  می‌باشد.  $S_{\alpha_q}$  ترم منبع است.  $\rho_q$  چگالی فاز  $q$  و  $\alpha_q$  کسر حجمی فاز  $q$  می‌باشد. در رابطه ۲،  $F$  نشان دهنده نیروهای خارجی وارده می‌باشد. در رابطه ۳  $S_h$  همان ترم منبع برای محاسبه گرمای نهان در تغییر فاز می‌باشد.  $\alpha_f$  و  $\alpha_g$  به ترتیب نشان دهنده کسر حجمی سیال و کسر حجمی گاز می‌باشند. همچنین  $K_{eff}$  ضریب هدایت حرارتی موثر می‌باشد. منظور از  $s$  در روابط ۴ و ۵ نیز همان ترم منبع در نظر گرفته شده برای انتقال جرم از فاز مایع به گاز و برعکس می‌باشد.

با بررسی‌های انجام شده مشخص شد مدل چند فاز حجم سیال در نرم‌افزار فلونت، فرایند تغییر فاز، میزان انتقال جرم بین دوفاز و گرمای نهان مبادله شده در حین تغییر فاز را تنها برای آب و در شرایط خاص به درستی محاسبه می‌کند و برای دیگر سیال‌ها این مقادیر به درستی محاسبه نمی‌شود. به همین دلیل برای محاسبه درست انتقال جرم و گرمای نهان در شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز به یک ترم منبع نیاز است تا به معادلات ناویراستوکس حاکم بر جریان اضافه شود و کار محاسبه این پارامترها را انجام

پژوهش سعی شده است که قطر هیدرولیکی میکرو کانال‌های مورد استفاده در سیستم تهویه مطبوع مورد توجه قرار گیرد. زیرا قطر هیدرولیکی تأثیر بسزایی در میزان انتقال حرارت، عدد رینولدز و ساختار جریان دارد. در مطالعات پیشین معمولاً سطح مقطع‌های دایروی، مربعی و مثلثی مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما در این تحقیق میکرو کانال‌هایی با سطح مقطع مربعی، دوزنقه و دایروی با قطر هیدرولیکی یکسان بررسی شده است. همچنین محدوده مناسب دبی جرمی برای بیشترین انتقال حرارت نیز تعیین شده است که نقش بسزایی در تعیین قدرت کمپرسور سیکل تبرید دارد.

### ۳- معادلات حاکم بر مسئله

می‌توان برای تمام مایعات و همچنین گازها در محدوده عدد نادسن کمتر از ۰/۰۰۱ در میکرو کانال‌ها فرض پیوستگی جریان را در نظر گرفت [۱۱]. در این حالت معادلات ناویراستوکس بر حرکت سیال در میکرو کانال حاکم می‌باشد. خواص فیزیکی R134a در فشار کاری ۱۳ بار در جدول ۱ ارائه شده است. این خواص در فشار کاری ذکر شده از نرم افزار Refprop استخراج شده است.

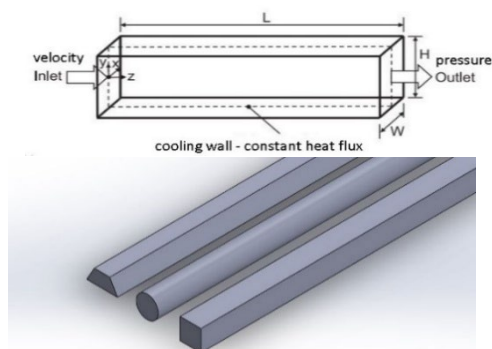
**جدول (۱): خواص فیزیکی مبرد R134a در فشار کاری**

۱۳ bar

دوفاز	فاز گاز	فاز مایع	خصوصیات
-	۶۶/۲۷۲	۱۱۰۲/۳	چگالی ( $kg/m^3$ )
-	۰/۰۰۰۰۱۲۹۱	۰/۰۰۰۰۱۴۱۷	لزجت دینامیکی (Pa s)
-	۱۲۴۶/۱	۱۵۶۶/۱	گرمای ویژه ( $\frac{J}{kg K}$ )
-	۰/۰۱۶۷۳۴	۰/۰۷۰۴۲۷	هدایت گرمایی ( $W/m K$ )
-	۴۲۳/۴۴	۲۷۱/۶۲	آنتالپی ( $kJ/kg K$ )
۵۰	-	-	دمای اشباع ( $^{\circ}C$ )
۱۰۰۴۸۹۰۶	-	-	تنش سطحی ( $N/m$ )

برای مدل‌سازی تغییر فاز چگالش باید از یک مدل چند فاز استفاده کرد. معمولاً برای شبیه‌سازی دو یا چند سیال

کاتالوگ‌های شرکت‌های معتبر سازنده [۹] تعیین شده است. شکل ۱ شماتیک شرایط مرزی و هندسه میکرو کانال‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): میکرو کانال با سطوح مقطع مربعی، دایروی و دوزنقه و شماتیک شرایط مرزی حاکم بر جریان درون میکرو کانال

#### ۴- روش حل عددی، استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی

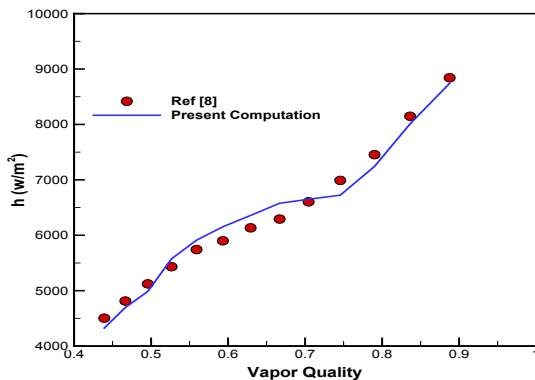
حل معادلات حاکم به کمک روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شده است. برای حل هم‌زمان میدان سرعت و فشار از الگوریتم کوپل استفاده شده است. با توجه به آشفتگی بودن جریان از مدل آشفتگی k- $\omega$  SST استفاده شده است. همچنین از مدل چند فاز حجم سیال با روش حل ضمنی برای مدل‌سازی تغییر فاز استفاده شده است. فاز اولیه به صورت گاز و فاز ثانویه به صورت مایع در نظر گرفته شده است. در ادامه به منظور اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی، نتایج تحلیل عددی را با نتایج ارائه شده برای میکرو کانال مربعی در کار عددی گو و همکاران [۸] مقایسه شده است. مبرد به کار رفته R1234ze در فشار کاری ۰/۷۷ مگاپاسکال می‌باشد. میکرو کانال با سطح مقطع مربعی و طول ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد، همچنین شرایط مرزی دیواره‌های میکرو کانال به صورت دما ثابت است. دمای بخار اشباع ورودی نیز ۱۰ درجه بیشتر از دمای ثابت دیواره در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی استقلال از شبکه، تغییرات دمای متوسط سیال در میکرو کانال، سرعت در خروجی و کسر حجمی بخار در خروجی میکرو کانال در چهار شبکه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج

دهد. این کار با نوشتن توابع تعریف شده توسط کاربر در نرم‌افزار فلونت انجام شد. مدل‌های مختلفی برای محاسبه این ترم منبع پیشنهاد شده است که معروف‌ترین آن‌ها مدل لی<sup>۱</sup> است. رابطه (۶) ترم منبع انتقال جرم و معادله (۷) ترم منبع گرمای نهان در تغییر فاز چگالشی بر اساس مدل لی هستند.

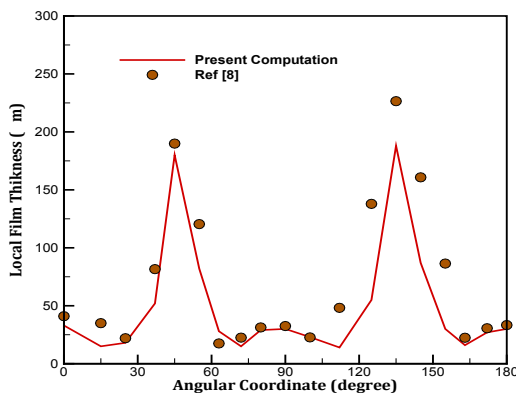
$If$	$T \geq T_s$	$S = -\gamma \alpha_L \rho_L \frac{T - T_s}{T}$	(۶)
$If$	$T \leq T_s$	$S = \gamma \alpha_g \rho_g \frac{T - T_s}{T}$	
$If$	$T \geq T_s$	$S_h = -\gamma \rho_l \alpha_l \frac{T - T_s}{T_s} LH$	(۷)
$If$	$T \leq T_s$	$S_h = \gamma \rho_l \alpha_l \frac{T_s - T}{T_s} LH$	

در روابط فوق  $T$  دمای سیال،  $T_s$  دمای اشباع سیال،  $\alpha_L$  و  $\rho_L$  به ترتیب نشان دهنده کسر حجمی و چگالی فاز مایع،  $\alpha_g$  و  $\rho_g$  به ترتیب نشان دهنده کسر حجمی و چگالی فاز گازی،  $LH$  گرمای نهان چگالش،  $S_h$  ترم منبع حرارتی،  $S$  ترم منبع انتقال جرم بین دو فاز و  $\gamma$  ضریبی است که به طور مستقیم در نرخ انتقال جرم در فرایند چگالش موثر و واحد آن  $\frac{1}{s}$  است. مقدار  $\gamma$  با توجه به خواص سیال به کارگیری شده و سایر پارامترهای شبیه‌سازی نظیر شکل هندسی کانال، شرایط مرزی و اندازه شبکه تعیین می‌شود. به طور کلی افزایش ضریب  $\gamma$  مساله را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند ولی مقادیر خیلی بزرگ  $\gamma$  نیز باعث مشکلات همگرایی در حل می‌شود. در این تحقیق مقدار مناسب  $\gamma$  با فرآیند سعی و خطا در حدود ۱۵۰۰۰۰ به دست آمد.

میکرو کانال‌هایی سه‌بعدی با سه سطح مقطع دایره، مربع و دوزنقه انتخاب شدند تا ضریب انتقال حرارت و افت فشار در شرایط مرزی یکسان در آن‌ها مقایسه شود. هر کدام از این میکرو کانال‌ها با سطح مقطع‌های یاد شده در دو قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند. ورودی به صورت بخار فوق اشباع مبرد R134a با دمای ۳۵۳/۲k است و فشار در خروجی ۱/۳ Mpa است. دیواره میکرو کانال‌ها به صورت شار ثابت با میزان شار  $\frac{kw}{m^2}$  ۸/۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه کاربرد مدنظر در کندانسور سیکل تبرید می‌باشد، متوسط شار حرارتی دیواره‌های میکرو کانال در این کاربرد با استفاده از



شکل (۳): مقایسه نتایج ضخامت فیلم مایع در کیفیت بخار ۰/۷ با نتایج مقاله مرجع [۸]



شکل (۴): مقایسه نتایج ضریب انتقال حرارت دوفاز در طول میکرو کانال با نتایج مقاله مرجع [۸]

بعد از اعتبارسنجی تنظیمات حل عددی و توابع تعریف شده توسط کاربر برای تغییر فاز، شبیه‌سازی برای سایر حالت‌ها یعنی میکرو کانال‌های دایروی، مربعی و دوزنقه با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر انجام شد. شار جرمی بخار R134a فوق اشباع ورودی در هر کدام از حالت‌ها  $100-600 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  می‌باشد. طول هر کدام از میکرو کانال‌ها ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

باید به این نکته توجه داشت که در این پژوهش، مبنای مقایسه قطر هیدرولیکی است. یعنی ابعاد شکل هندسی مقطع میکرو کانال به‌گونه‌ای تنظیم شده است که قطر هیدرولیکی آن میکرو کانال ۰/۵۵ یا ۰/۷ میلی‌متر شود.

### ۵- اثر شار جرمی ورودی

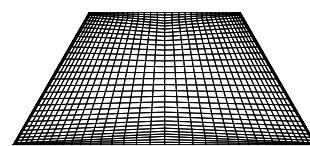
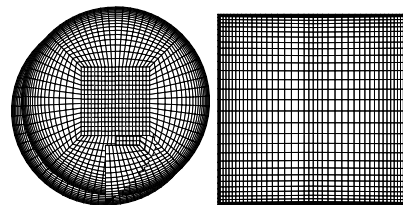
در این بخش به بررسی نتایج ضریب انتقال حرارت متوسط و افت فشار در میکرو کانال‌ها در محدوده مشخص از شار جرمی مبرد ورودی پرداخته و کانتورهای کسر

ارایه شده در جدول ۲، اگرچه اختلاف زیادی در نتایج دمای میانگین و کسر حجمی گاز در خروجی یافت نشد اما به دلیل دقت بالاتر شبکه ۲/۱ میلیون سلولی در سرعت خروجی، این شبکه به عنوان شبکه مناسب انتخاب شد. لازم به ذکر است در جدول زیر خطاها نسبت به ریزترین شبکه محاسبه شده است.

جدول (۲): نتایج استقلال از شبکه برای اعتبارسنجی

تعداد سلول (میلیون)	دمای میانگین سیال	خطا %	سرعت خروجی	خطا %	کسر حجمی گاز در خروجی	خطا %
۱/۲۵	۳۲۵/۵۷	۰/۵۸	۳/۳۹	۶	۰/۷۹۲	۸/۹
۱/۷	۳۲۴/۸۲	۰/۳۵	۳/۲۷	۲	۰/۷۶۵	۳/۹
۲/۱	۳۲۳/۷۵	۰/۲۱	۳/۲۳	۱	۰/۷۴۱	۱/۹۷
۲/۶	۳۲۳/۶۷	-	۳/۱۹	-	۰/۷۳۶	-

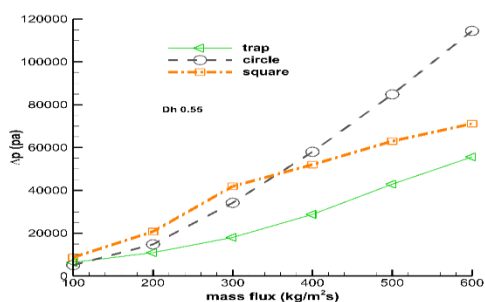
شبکه مستقل به‌صورت سازمان‌یافته با ارتفاع اولین لایه از دیواره ۵ میکرومتر است. در ادامه شبیه‌سازی با شبکه مستقل انجام شد. مطابق شکل ۳ نتایج ضخامت فیلم مایع در مقطع کانال با کیفیت بخار ۰/۷ مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین در شکل ۴ ضریب انتقال حرارت دوفاز در طول میکرو کانال با نتایج ضریب انتقال حرارت دوفاز در مقاله مرجع مقایسه شده است که باتوجه به شکل تطابق خوبی بین تحلیل حاضر و داده‌های مرجع [۸] وجود دارد. بنابراین روش تحلیل و توابع تعریف شده توسط کاربر که برای تعیین ترم‌های منبع در تغییر فاز نوشته شده‌اند به‌درستی لحاظ شده است. شکل ۲ نیز نمایی از سطح مقطع شبکه مستقل هر کدام از میکرو کانال‌ها مشاهده می‌شود. در این شکل هر سه میکرو کانال دایروی، مربعی و دوزنقه با شبکه سازمان یافته مشاهده می‌شوند.



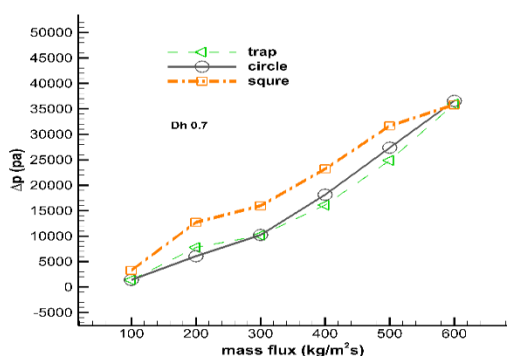
شکل (۲): شبکه مستقل ایجاد شده در مقطع سه میکرو کانال دوزنقه، مربعی و دایروی

ضریب انتقال حرارت را دارد اما بیشترین ضریب انتقال حرارت در میکرو کانال ذوزنقه در حدود شار گرمی  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  رخ می‌دهد. مطابق شکل ۷، در قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی‌متر، میکرو کانال‌های دایروی بیشترین ضریب انتقال حرارت متوسط را در محدوده تمامی شارهای گرمی نسبت به میکرو کانال مربعی و ذوزنقه دارد و بعد از آن میکرو کانال مربعی و ذوزنقه به ترتیب درای بیشترین ضریب انتقال حرارت متوسط هستند. در این قطر هیدرولیکی بیشترین ضریب انتقال حرارت متوسط در میکرو کانال دایروی در محدوده  $300-400 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ، در میکرو کانال مربعی در محدوده  $400-500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  و در میکرو کانال ذوزنقه در محدوده  $500-600 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  رخ می‌دهد.

شکل ۷ نمودار افت فشار بر حسب شار گرمی ورودی در میکرو کانال‌های با قطر هیدرولیکی  $0.55$  و شکل ۸ نمودار افت فشار بر حسب شار گرمی ورودی در قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل (۷): تغییرات افت فشار با شار گرمی در میکرو کانال‌های با قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی‌متر



شکل (۸): تغییرات افت فشار با شار گرمی در میکرو کانال‌های با قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی‌متر

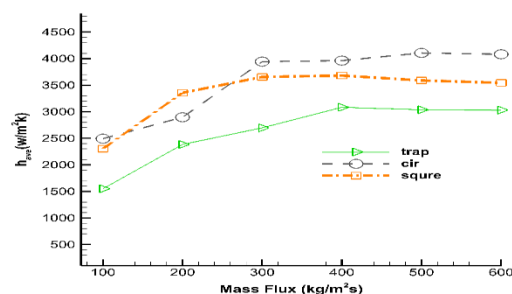
حجمی ارائه می‌شود. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت متوسط از رابطه (۸) و برای محاسبه افت فشار از رابطه (۹) استفاده شده است.

$$h = \frac{\dot{q}}{T_{avef} - T_{avewall}} \quad (8)$$

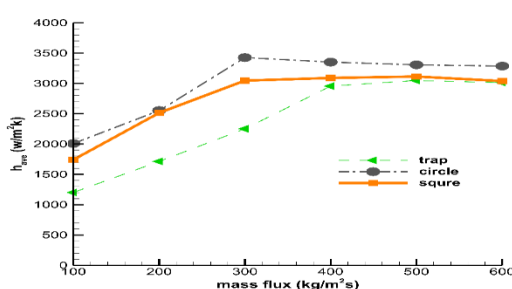
$$\Delta P = p_{outlet} - p_{inlet} \quad (9)$$

که  $T_{avef}$  دمای متوسط مبرد و  $T_{avewall}$  دمای متوسط دیواره می‌باشد.

شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب نمودار ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب شار گرمی ورودی را در میکرو کانال‌های با قطر هیدرولیکی  $0.55$  و  $0.7$  در میکرو کانال با سطح مقطع‌های مختلف نشان می‌دهد.

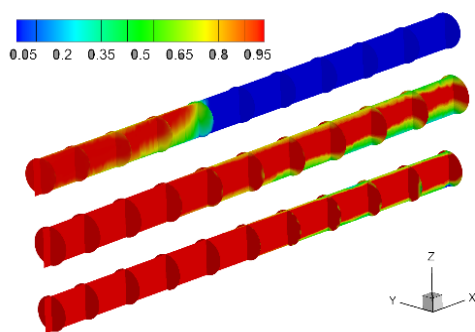


شکل (۵): تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به شار گرمی در میکرو کانال‌های با قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی‌متر



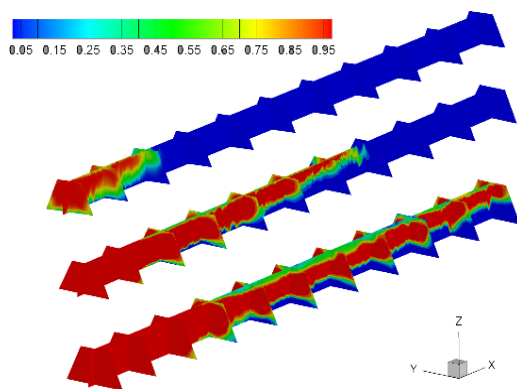
شکل (۶): تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به شار گرمی در میکرو کانال‌های با قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی‌متر

همان‌طور که شکل ۵ مشاهده می‌شود، در قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی‌متر، میکرو کانال مربعی و دایروی در بازه شار گرمی کمتر از  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  تقریباً ضریب انتقال حرارت یکسانی دارند ولی در بازه شار گرمی بزرگتر از  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ، میکرو کانال دایروی ضریب انتقال حرارت بزرگتری را ایجاد کرده است. میکرو کانال ذوزنقه‌ای در تمام بازه شار گرمی  $100-600 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  کمترین



شکل (۱۰): کانتور کسر حجمی در میکرو کانال دایروی در شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ در قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی متر

شکل ۱۱ کانتور کسر حجمی را در شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۳۰۰ و  $500$  و قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر در میکروکانال دوزنقه نشان می دهد. مطابق شکل در این میکرو کانال، در شار جرمی  $100$   $kg/(m^2s)$  و  $300$   $kg/(m^2s)$  بخار مبرد به طور کامل چگالش می یابد ولی در شار جرمی  $500$   $kg/(m^2s)$  فقط بخشی از مبرد بیشتر در گوشه های میکرو کانال چگالش می یابد.

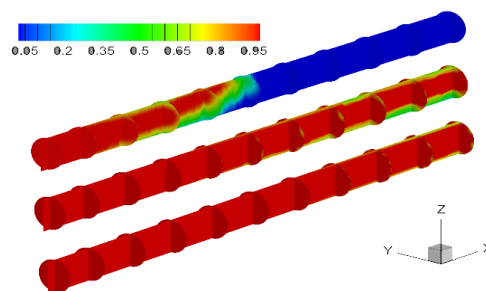


شکل (۱۱): کانتور کسر حجمی در میکرو کانال دوزنقه در شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ در قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر

شکل ۱۲ کانتور کسر حجمی را در شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۳۰۰ و  $500$  و قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی متر نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است، در این حالت در شار جرمی  $100$   $kg/(m^2s)$  و  $300$   $kg/(m^2s)$  مبرد چگالش می یابد اما در شار جرمی  $500$   $kg/(m^2s)$  به طور کامل چگالش نمی یابد. اما نسبت به میکرو کانال دوزنقه با قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر میزان بیشتری از بخار مبرد چگالش یافته است.

همان طور که در شکل ۸ و ۹ مشخص است، در قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر بیشترین افت فشار در بازه شار جرمی  $400-600$   $kg/(m^2s)$  مربوط به میکرو کانال های دایروی است اما در شار جرمی  $100-400$   $kg/(m^2s)$  افت فشار میکرو کانال مربعی بیشتر می شود. در قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی متر در تمام بازه های شار جرمی بیشترین افت فشار مربوط به میکرو کانال مربعی است. باید توجه کرد متوسط افت فشار در قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر در حدود سه برابر افت فشار در قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی متر است اما در کل افت فشار نسبت به فشار کاری کندانسوری که میکرو کانال ها در آن استفاده می شوند (۱۳ بار)، اندک است.

شکل ۹ کانتور کسر حجمی را در شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ و قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر در میکروکانال دایروی را نشان می دهد. همان طور که مشخص است، در شار جرمی  $100$   $kg/(m^2s)$ ، فرآیند تغییر فاز به طور کامل در نیمه میکرو کانال انجام شده و بخار مبرد به طور کامل چگالش می یابد. در شار جرمی  $300$   $kg/(m^2s)$  مقدار کمی از بخار مبرد چگالش می یابد و در شار جرمی  $500$   $kg/(m^2s)$  میزان بسیار اندکی از بخار مبرد، چگالش می یابد.

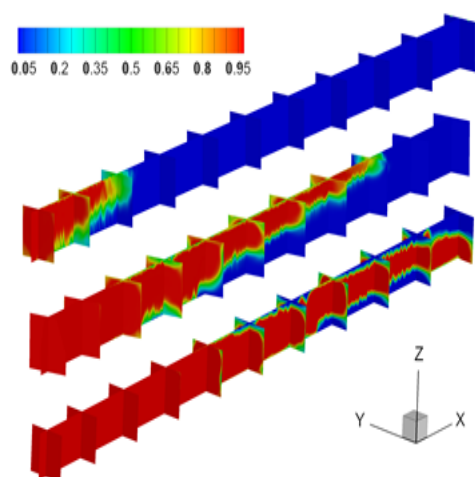


شکل (۹): کانتور کسر حجمی در میکرو کانال دایروی در شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ در قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر

شکل ۱۰ کانتور کسر حجمی را در شار جرمی  $kg/(m^2s)$  ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ و قطر هیدرولیکی  $0.7$  میلی متر در میکرو کانال دایروی نشان می دهد. همانند میکروکانال دایروی با قطر هیدرولیکی  $0.55$  میلی متر، در شار جرمی  $100$   $kg/(m^2s)$  مبرد به طور کامل چگالش می یابد و در شار جرمی  $300$   $kg/(m^2s)$  و  $500$   $kg/(m^2s)$  فقط بخشی از بخار مبرد مایع می شود.



مطابق شکل ۵ و ۶ همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش شار جرمی مبرد ورودی، ضریب انتقال حرارت نیز افزایش دارد. همچنین در میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر، میکرو کانال دایروی در شار جرمی بالای  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  ضریب انتقال حرارت بالاتر و افت فشار بالاتری را نسبت به سایر میکرو کانال‌ها ثبت کرده در حالی که میکرو کانال دایروی با قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر ضریب انتقال حرارتی در حدود ۲۰ درصد کمتر و افت فشاری در حدود یک سوم میزان میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر ثبت کرد.

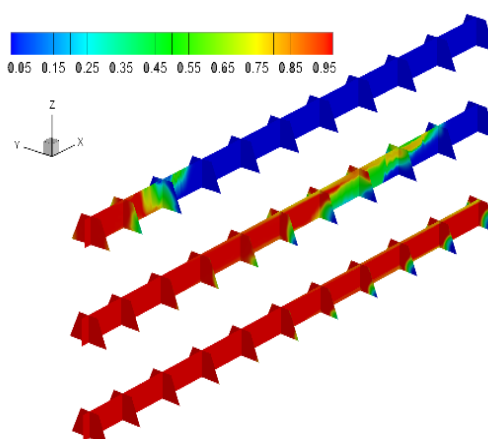


شکل (۱۴): کانتور کسر حجمی در میکرو کانال مربعی در شار جرمی  $100, 300, 500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  در قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر

شروع دیرتر تغییر فاز در میکرو کانال دایروی به دلیل بدون گوشه بودن این میکرو کانال است. در میکرو کانال‌های مربعی و دوزنقه که در شکل هندسی خود زاویه دارند، کشش سطحی مبرد عاملی می‌شود تا فیلم مایع زودتر در گوشه‌ها تشکیل شود و با پیشروی در طول کانال از کیفیت بخار کاسته شده و تغییر فاز سریع‌تر انجام می‌شود.

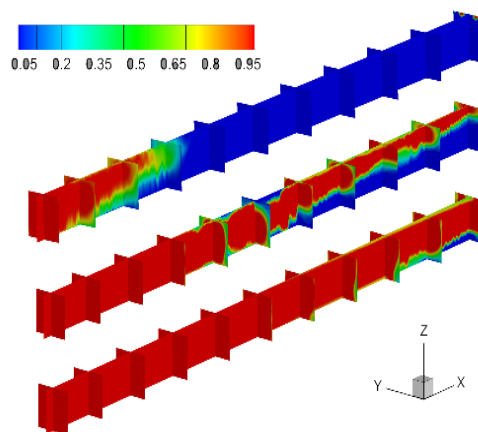
#### ۶- تأثیر قطر هیدرولیکی

در ادامه به بررسی اثر تغییر قطر هیدرولیکی در میکرو کانال‌ها بر ضریب انتقال حرارت متوسط پرداخته می‌شود. شکل ۱۴ مقایسه نتایج ضریب انتقال حرارت متوسط در این میکرو کانال‌ها را در دو قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): کانتور کسر حجمی در میکرو کانال دوزنقه در شار جرمی  $100, 300, 500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  در قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر

شکل ۱۳ کانتور کسر حجمی را در شار جرمی  $100, 300, 500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  و قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر در میکرو کانال مربعی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، تنها در شار جرمی  $100 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  چگالش به طور کامل رخ می‌دهد.

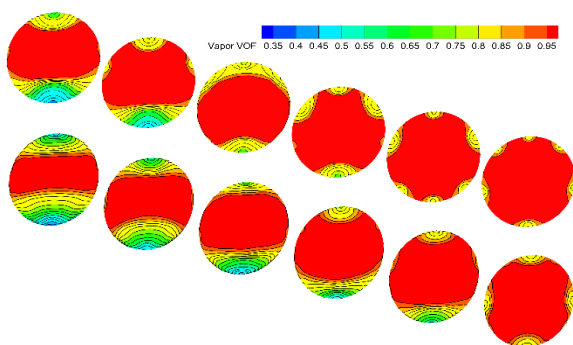


شکل (۱۳): کانتور کسر حجمی در میکرو کانال مربعی در شار جرمی  $100, 300, 500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  در قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر

شکل ۱۴ کانتور کسر حجمی را در شار جرمی  $100, 300, 500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  و قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر را در میکرو کانال دوزنقه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در شار جرمی  $100 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ، چگالش  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  قبل از خروج مبرد از میکرو کانال، چگالش به طور کامل رخ می‌دهد.

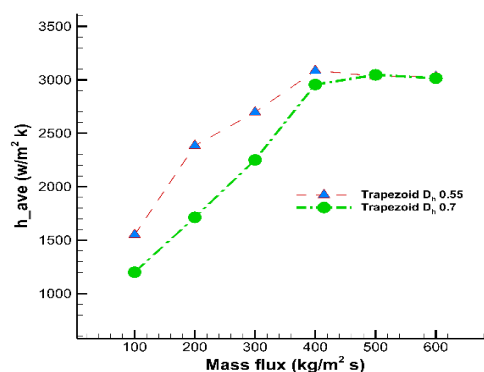
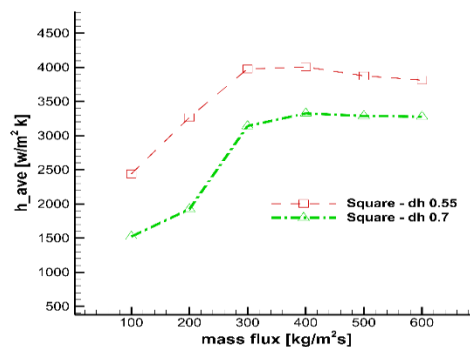
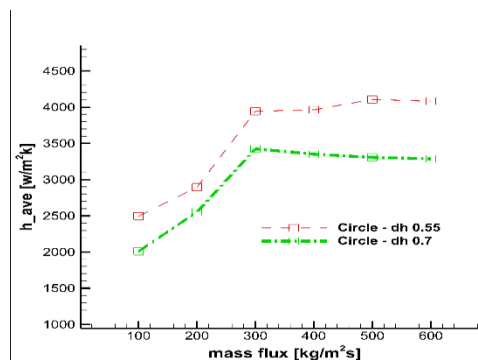
ذوزنقه با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر در شار جرمی  $500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  و بالاتر طول جریان دوفاز نسبت به میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر کم‌تر است. هرچه طول جریان دوفاز در امتداد میکرو کانال بیشتر باشد، گرمای نهان بیشتری مبادله می‌شود و گرمای مبادله شده کل نیز بالاتر می‌رود و ضریب انتقال حرارت بالاتری ثبت می‌شود. به همین دلیل در میکروکانال ذوزنقه، با وجود کمتر بودن ضخامت لایه مرزی حرارتی در قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر نسبت به قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر، مقادیر ضریب انتقال حرارت در این محدوده شار جرمی به هم نزدیک شده است.

به‌عنوان نمونه می‌توان به شکل ۱۶ که نحوه شروع چگالش در دیواره‌های میکرو کانال دایروی با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر را در مقاطعی در نیمه انتهایی میکرو کانال در شار جرمی  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  نشان می‌دهد، اشاره کرد.



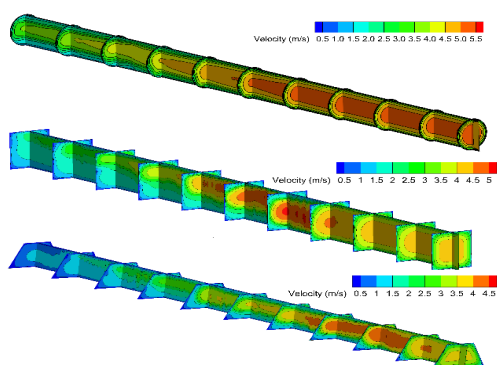
شکل (۱۶): کانتر کسر حجمی در نیمه انتهایی میکرو کانال دایروی در شار جرمی  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  در قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر (بالا) و ۰/۵۵ میلی‌متر (پایین)

چگالش بخار مبرد R134a شبیه لکه‌هایی از نقاط مختلف محیط دیواره میکرو کانال شروع می‌شود. به دلیل نیروی جاذبه بیشتر میزان مبرد چگالش شده در قسمت پایینی میکرو کانال جمع شده و به‌مرور با نزدیک شدن به انتهای میکرو کانال یک جریان دوفاز حلقوی تشکیل می‌شود که هسته آن بخار مبرد R134a و لایه اطراف مایع چگالش شده این مبرد است. در میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر، کسر جرمی ۰/۱۴۵ و در میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر، کسر جرمی ۰/۰۷۸ از کل جرم مبرد موجود، چگالش یافته است؛ بنابراین در میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر میزان میانگین جرمی چگالش مبرد بالاتر است و به دنبال آن



شکل (۱۵): تأثیر قطر هیدرولیکی بر ضریب انتقال حرارت متوسط در میکرو کانال‌های دایروی (بالا)، مربعی (وسط) و ذوزنقه (پایین)

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، در هر سه هندسه، میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر، به طور متوسط ۱۰ تا ۲۰ درصد ضریب انتقال حرارت بالاتری را ثبت کرده است. با کاهش قطر هیدرولیکی ضخامت لایه مرزی حرارتی کاهش می‌یابد. با کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی، اختلاف دمای سیال مجاور دیواره در لایه مرزی حرارتی با دمای دیواره کم‌تر می‌شود؛ بنابراین ضریب انتقال حرارت که به طور معکوس با گرادیان دمای سیال با دیواره رابطه دارد، افزایش می‌یابد. در میکرو کانال



شکل (۱۸): میدان سرعت در میکرو کانال‌های با مقطع دایروی، مربعی و دوزنقه با قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر و شار جرمی  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

### ۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی عددی انتقال حرارت دوفاز در حالت تغییر فاز چگالش با مبرد R134A در میکرو کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر پرداخته شده است. میکرو کانال‌های بررسی شده با سطح مقطع دایروی، مربعی و دوزنقه بودند. اثر تغییرات شار جرمی و قطر هیدرولیکی با مبرد وردی با دمای فوق اشباع و دیواره میکرو کانال با شار حرارتی ثابت بررسی و نتایج شبیه‌سازی-ها به صورت کانتورهای کسر حجمی و نمودارهای ضریب انتقال حرارت متوسط جابه‌جایی و افت فشار ارائه شد و نتیجه‌گیری‌های زیر از این تحقیق برداشت شد.

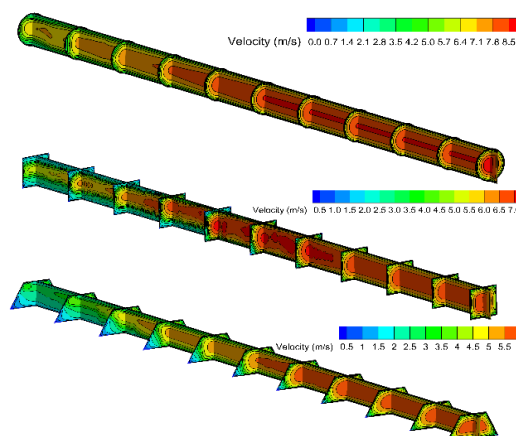
اول) در هر سه میکرو کانال دایروی، مربعی و دوزنقه با افزایش شار جرمی ورودی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های ۹ تا ۱۴ مشاهده شد، با افزایش شار جرمی ورودی در هر کدام از میکرو کانال‌ها طول ناحیه دوفاز افزایش می‌یابد. در ناحیه دوفاز، علاوه بر انتقال حرارت در قسمت گاز و مایع مبرد به صورت جداگانه، گرمای نهان چگالش نیز به واسطه تغییر فاز مبرد از گاز به مایع انجام می‌شود. به همین دلیل در حالت‌هایی که شار جرمی ورودی بیشتر است ضریب انتقال حرارت نیز مقادیر بیشتری ثبت می‌کند.

دوم) در شرایط یکسان شار جرمی و سطح مقطع یکسان، ضریب انتقال حرارت متوسط در میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر ۱۰ تا ۲۰ درصد بیشتر از میکرو کانال با قطر هیدرولیکی ۰/۷ است. البته در میکرو کانال دوزنقه و در شار جرمی بالای  $500 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$  ضریب انتقال حرارت متوسط در هر دو قطر هیدرولیکی تقریباً در یک

گرمای نهان بیشتری نیز منتقل شده و در نهایت منجر به ضریب انتقال حرارت بالاتر می‌شود.

### ۷- بررسی میدان سرعت در میکرو کانال‌ها

برای درک بهتر دلایل انتقال حرارت بالاتر در میکرو کانال‌های ذکر شده، میدان سرعت در سه میکرو کانال دایروی، مربعی و دوزنقه، در هر دو قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ و ۰/۷ میلی‌متر در شار جرمی منتخب  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  بررسی شده است. شکل ۱۷ میدان سرعت را در سه میکرو کانال دایروی، مربعی و دوزنقه با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. در میکرو کانال دوزنقه جریان مبرد نسبت به دو میکرو کانال دایروی و مربعی زودتر توسعه یافته می‌شود. در ضمن بیشینه سرعت در میکرو کانال دایروی  $8/5 \text{ m/s}$ ، در میکرو کانال مربعی  $7 \text{ m/s}$  و در میکرو کانال دوزنقه  $6 \text{ m/s}$  است.



شکل (۱۷): میدان سرعت در میکرو کانال‌های با مقطع دایروی، مربعی و دوزنقه با قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر

و شار جرمی  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  شکل ۱۸ میدان سرعت را در سه میکرو کانال دایروی، مربعی و دوزنقه با قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر نشان می‌دهد.

در این قطر هیدرولیکی نیز در میکرو کانال دوزنقه، جریان سریع‌تر توسعه یافته می‌شود. همچنین به دلیل تأثیر تغییر فاز، مشاهده می‌شود در میکرو کانال مربعی و دوزنقه بیشینه سرعت در میانه میکرو کانال رخ می‌دهد. در ضمن بیشینه سرعت در میکرو کانال دایروی  $5/5 \text{ m/s}$ ، در میکرو کانال مربعی  $5 \text{ m/s}$  و در میکرو کانال دوزنقه  $4/5 \text{ m/s}$  است.

5. Liu, N., Li, J. M., Sun, J. et al., "Heat Transfer and Pressure Drop During Condensation of R152a in Circular and Square Microchannels," Vol. 47, pp. 60-67, 2013.

Doi:10.1016/j.expthermflusci.2017.09.009

6. Bortolin, S., Da Riva, E., and Del Col, D. J. H. T. E. "Condensation in a Square Minichannel: Application of the VOF Method," Vol. 35, No. 2, pp. 193-203, 2014.

7. El Mghari, H., Asbik, M., Louahlia-Gualous, H. et al., "Condensation Heat Transfer Enhancement in a Horizontal Non-Circular Microchannel," Applied Thermal Engineering, Vol. 64, No. 1-2, pp. 358-370, 2014.

8. Gu, X., Wen, J., Zhang, X. et al., "Effect of Tube Shape on the Condensation Patterns of R1234ze (E) in Horizontal Mini-Channels," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 131, pp. 121-139, 2019. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.069

9. Besharati, F. and Jahanian, O. "Numerical Simulation of Nanofluid Conjugate Heat Transfer in 2D Microchannel under the Influence of a Transverse Magnetic Field: Nanoparticle Diameter, Reynolds Number and Viscous Dissipation Effects," Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics Imam Housein university, Vol 9, pp 79-100, 2020. (In Persian)

10. "danfus," Catalogue of Standard MCHE Condenser, Save Time and Money with MCHE Standard Products Micro-Channel Heat Exchanger, Danfoss Industries Pvt. Ltd., <https://www.danfoss.com/>.

11. Ramyar, M. "Investigation of Gas Fluid in Microchannels" Mechanical Engineering of shahrkord University, 2012. (In Persian)

محدوده است. همچنین باید در نظر داشت افت فشار در قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر در حدود ۲/۵ تا ۳ برابر افت فشار در قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر است.

سوم) در قطر هیدرولیکی ۰/۵۵ میلی‌متر، در تمام محدوده‌های شار جرمی به جز محدوده کمتر از  $kg/m^2s$  و  $200$  و همچنین در میکروکانال‌های با قطر هیدرولیکی ۰/۷ میلی‌متر در تمام محدوده‌های شار جرمی، به ترتیب میکرو کانال دایروی، مربعی و دوزنقه بیشترین ضریب انتقال حرارت متوسط را ثبت کردند.

چهارم) خاصیت کشش سطحی در مبرد باعث می‌شود در میکرو کانال‌هایی که هندسه سطح مقطع آن‌ها گوشه و زاویه دارد، فیلم مایع زودتر در گوشه‌ها تشکیل شود و با پیشروی در طول کانال از کیفیت بخار کاسته شده و تغییر فاز سریع‌تر انجام می‌شود. به همین دلیل فرایند چگالش در میکرو کانال‌های مربعی و دوزنقه سریع‌تر از میکرو کانال دایروی رخ می‌دهد.

پنجم) در میکرو کانال دایروی، نسبت به مربعی و در میکرو کانال مربعی نیز نسبت به دوزنقه، طول جریان در حال توسعه بیشتر است. در این ناحیه سرعت و دما به هر دو راستای شعاعی و محوری وابسته‌اند، بنابراین نرخ انتقال حرارت بالاتر است. به همین دلیل در شار جرمی یکسان و تقریباً در تمام محدوده‌های شار جرمی بخار مبرد ورودی، متوسط ضریب انتقال حرارت در میکرو کانال دایروی بیشتر از مربعی و در میکرو کانال مربعی بیشتر از دوزنقه است.

## ۸-مراجع

1. Shin, J. S., and Kim, M. H. "An Experimental Study of Flow Condensation Heat Transfer Inside Circular and Rectangular Mini-Channels." pp. 633-640 . doi:10.115/ICMM2004-2391
2. Agarwal, A., Bandhauer, T. M., and Garimella, S. J. I. j. o. r. "Measurement and Modeling of Condensation Heat Transfer in Non-Circular Microchannels," Vol. 33, No. 6, pp. 1169-1179, 2010.
3. Del Col, D., Bortolin, S., Cavallini, A. et al., "Effect of Cross Sectional Shape During Condensation in a Single Square Minichannel," vol. 54, No. 17-18, pp. 3909-3920, 2011. Doi:10.1016/j.expthermflusci.2017.09.009
4. Derby, M., Lee, H. J., Peles, Y. et al., "Condensation Heat Transfer in Square, Triangular, and Semi-Circular Mini-Channels," vol. 55, No. 1-3, pp. 187-197, 2012. Doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.09.002

