

عملکرد حرارتی میکروچاه گرمایی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با مقطع بیضوی متخلخل

نگین رشیدی

دانشجوی کارشناسی ارشد

فرخ مبادرثانی*

استادیار،
مهندسی مکانیک، دانشگاه
صنعتی ارومیه، ارومیه

چکیده: در این مقاله به بررسی عملکرد حرارتی میکرو چاه گرمایی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با سطح مقطع بیضوی متخلخل پرداخته شده است. حل معادلات اساسی حاکم بر مسئله بر اساس روش المان محدود می باشد و شبیه سازی با استفاده از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس ۵/۶ انجام شده است. از معادله ی فورشهیمیر- بریکمن- دارسی برای توصیف جریان عبوری از محیط متخلخل بهره برده شده است. در کار حاضر، تجزیه و تحلیل آرایش تخلخل (ε) و ضخامت ناحیه ی متخلخل بر ویژگی های حرارتی و هیدرولیکی تحت سرعت های ورودی مختلف صورت گرفته است. افزایش قطر کوچک بیضی، موجب کاهش قطر مقطع متخلخل شده و با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار کاهش می یابد به طوری که در $b=0.275$ میلیمتر و $u_{in}=2$ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به $b=0.175$ میلیمتر، ۶۲/۳۴ درصد کاهش یافته و مقاومت حرارتی ۳۵/۵۰ درصد افزایش یافته است. در سرعت های ورودی پایین ضریب عملکرد کمتر از ۱ بوده و دلیل آن کاهش مومنتوم المان های سیال به دلیل وجود دیواره متخلخل بوده و با افزایش سرعت، ضریب عملکرد بیشتر از ۱ می شود زیرا افزایش مومنتوم و همچنین افزایش سطح تماس مابین سیال و ماتریس جامد موجب بهبود عملکرد حرارتی شده و این امر نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می باشد.

واژه های راهنما: میکروچاه گرمایی، سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده، تخلخل، عدد ناسلت، ضریب عملکرد

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

Negin Rashidi
Msc. StudentFarrokh
Mobadersani*
Assistant Professor,
Mechanical
Engineering
Department, Urmia
University of
Technology, Urmia

Thermal performance of microchannel heat sink containing a suspension of phase change materials with a porous oval cross section

Abstract: In this article, the thermal performance of microchannel heat sink containing a suspension of phase change materials with a porous elliptical cross-section has been investigated. Solving the basic equations governing the problem is based on the finite element method and the simulation is done using Comsol multiphysics software 5.6. Forschheimer-Brickman-Darcy equations are used to describe the flow through the porous medium. In the present work, the analysis of the arrangement of porosity (ε) and the thickness of the porous area has been done on the thermal and hydraulic characteristics under different inlet velocities. The increase in the small diameter of the ellipse causes a decrease in the diameter of the porous section and the pressure drop decreases with the increase of the fluid inlet speed, so that at $b = 0.275$ mm and $u_{in} = 2$ m/s, the pressure drop compared to $b = 0.175$ mm is 62.34 % decreased and the thermal resistance increased by 35.50 % At low inlet velocities, the coefficient of performance is less than 1, and the reason for this is the decrease in the momentum of the fluid elements due to the presence of the porous wall, and with the increase in speed, the coefficient of performance is greater than 1, because the increase in momentum and also the increase in the contact surface between the fluid and the solid matrix cause The thermal performance has been improved and this indicates the superiority of the porous microchannel heat sink compared to the microchannel heat sink without porous medium.

Keywords: Micro channel heat sink, Suspension of phase change materials, Porous, Nusselt number, Coefficient performance

۱- مقدمه

این شبیه سازی حاکی از آن بود که موقعیت گردابه‌ها در طول مسیر ممکن است تغییر یابد و منجر به اختلاط زیاد سیال شده و کارایی و نرخ انتقال حرارت بالایی نسبت به میکروکانال مستقیم نشان دهد. با توجه به اینکه ذخیره‌ی انرژی حرارتی نهفته توسط گرمای همجوشی هسته‌ی مواد تغییر فاز دهنده صورت می‌گیرد و این مواد با گرفتن گرما در طی فرایند تغییر فاز، دمای خود و محیط را ثابت نگه می‌دارند و مقدار بسیار زیادی گرما را جذب و آزاد می‌کنند. آراسو و مجومدار [۶] به تحلیل عددی ذوب موم پارافین با آلومینیا در یک محفظه‌ی مربعی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که ذخیره‌ی انرژی در دیواره‌های عمودی نسبت به دیواره‌های افقی بیشتر است. آخیش و همکاران [۷] عملکرد چاه گرمایی را با مواد تغییر فاز و پره‌های متصل عمودی مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که تغییر ضخامت پره‌ها و فاصله آن‌ها بر عملکرد چاه گرمایی تأثیر بسزایی دارد. افزودن نانوذرات به سیال پایه منجر به بهبود انتقال حرارت می‌شود. یکی از روش‌های افزایش نرخ ذخیره و آزادسازی، افزایش هدایت حرارتی ذرات تغییر فاز دهنده می‌باشد. افزودن نانوذرات به ذرات تغییر فاز دهنده موجب بهبود این خاصیت می‌شود. حسین زاده و خدادادی [۸] بهبود عملکرد مواد تغییر فاز دهنده را با افزودن نانو ذرات بررسی کردند. نتیجه‌ی حاصله افزایش نرخ انتقال حرارت با افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده بود. لیو و همکاران [۹] ویژگی جریان و عملکرد حرارتی میکرو چاه گرمایی را در یک لوله دایره‌ای افقی تحت شار حرارتی یکنواخت مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که ضریب انتقال حرارت با سرعت ورودی و ظرفیت گرمای نهان سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده مرتبط است. با توجه به اینکه استفاده از محیط متخلخل می‌تواند موجب افزایش سطح انتقال حرارت در مرز مشترک جامد-سیال گردد، اخیراً پژوهش‌های فراوانی بر روی اصول محیط‌های متخلخل صورت گرفته است. مبادرثانی و رضاوند [۱۰] تأثیر میدان مغناطیسی اعمالی توسط یک آهنربای دائمی بر عملکرد حرارتی و همینطور توزیع نانوذرات داخل یک حفره را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج گزارش شده، وجود ناحیه‌ی متخلخل در حفره منجر به افزایش چشمگیری در انتقال حرارت می‌گردد. فرهانی و همکاران [۱۱] تأثیر محیط متخلخل و سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده را برای میکروچاه‌های گرمایی با هندسه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش عدد داری و غلظت مواد تغییر فاز دهنده عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد.

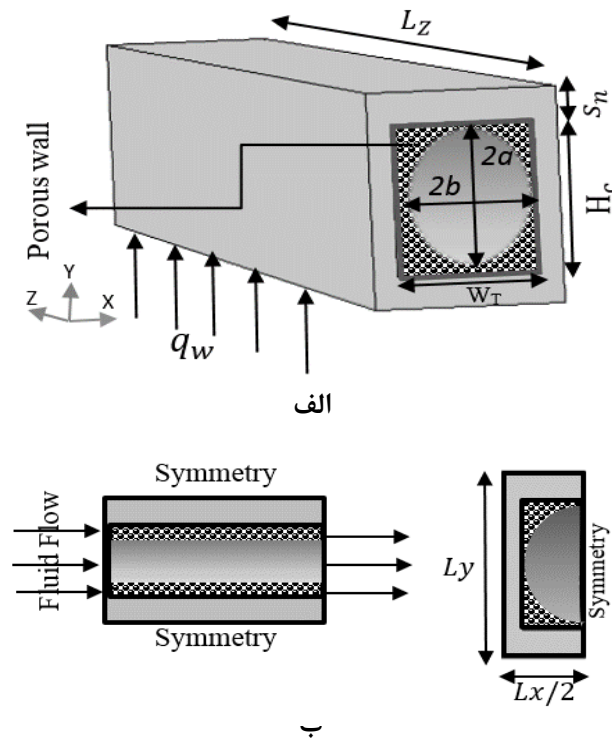
با توجه به مرور کارهای پیشین، تحلیل و مطالعه‌ی جریان سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در میکروکانال‌هایی با سطح

امروزه با پیشرفت علم و دستگاه‌های صنعتی، بررسی افزایش نرخ انتقال حرارت امری ضروری و مهم است زیرا افزایش سرعت و راندمان این دستگاه‌ها در گرو بالابردن راندمان حرارتی جهت خنک کاری می‌باشد که تحقیقات و پژوهش‌های محققین در دهه‌های اخیر، گویای اهمیت این موضوع می‌باشد. از طرفی افزایش تقاضای انرژی، افزایش و کارایی و تقاضای رو به رشد برای کوچک سازی محصولات در تمامی بخش‌های صنعتی بگونه‌ای که با اطمینان بیشتر، سرعت بالاتر و مقرون بصره تر همراه باشد، موجب شده است چالش‌های جدیدی برای طراحی و بهره برداری سیستم‌های مدیریت حرارتی پیش روی محققان قرار بگیرد. از این رو استفاده از میکروکانال‌ها برای تبادل انتقال حرارت و انتقال جرم، تکنیکی مطلوب بنظر می‌رسد.

قطر هیدرولیکی رابطه‌ی مستقیمی با عدد رینولدز و عاملی بسیار تأثیر گذار بر روی عملکرد انتقال حرارت می‌باشد. کاهش قطر هیدرولیکی میکروکانال‌ها در بیشتر مبدل‌های حرارتی فشرده باعث افزایش ضریب انتقال حرارت به واسطه‌ی سطح وسیع تر در واحد حجم می‌شود. از طرفی انتخاب سطح مقطع مناسب به منظور دستیابی به نرخ انتقال حرارت بالاتر از چالش‌های اصلی محققین می‌باشد. لی و همکاران [۱] تأثیر اشکال سطح مقطعی مختلف را برای میکرو چاه گرمایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ظرفیت خنک کنندگی میکرو چاه گرمایی مربعی ۷۰ درصد بیشتر از میکرو چاه گرمایی دایروی می‌باشد. تحقیقات بریندا و همکاران [۲] نشان داد که در یک میکرو چاه گرمایی با آرایش نردبانی، با کاهش نسبت ابعاد، ضریب انتقال حرارت بطور موثر افزایش می‌یابد. جادها و همکاران [۳] با هدف بررسی شکل و ارتفاع پره‌ها، افت فشار و مشخصات حرارتی میکرو چاه گرمایی را با پره‌های بیضوی، مربعی، دایروی و شش ضلعی شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش شعاع پره‌ها عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین پره با هندسه‌ی دایروی عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به سه نوع پره دیگر دارد.

برای افزایش عملکرد حرارتی میکروچاه گرمایی، قله و سونی [۴] انتقال حرارت میکرو چاه گرمایی موجدار را با فرض مقاطع مختلف، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش دامنه‌ی موجی به دلیل اختلاط سیال افزایش یافته و مقطع دایروی با دامنه‌ی موج ۲۰ میکرومتر بیشترین ضریب انتقال حرارت را ارائه می‌دهد. سو و همکاران [۵] جریان سیال و انتقال حرارت را در یک میکرو چاه حرارتی سه بعدی با کانال‌های سینوسی شبیه سازی کردند. نتایج

تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله مستقل از نرخ کرنش می‌باشد، لذا میتوان مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده را سیال نیوتنی معرفی کرد. کسر جرمی نیز برای اطمینان از این امر ۰.۱٪ $C_m =$ انتخاب شده است [۱۳]. خواص ترموفیزیکی سیال خنک کننده و بستر میکرو چاه گرمایی در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۱ الف - طرحواره‌ای از هندسه مورد مطالعه و حوزه‌ی محاسباتی. ب - شرایط مرزی و هندسه مورد مطالعه از دید بالا و روبرو

جدول ۱ معرفی پارامترهای هندسی و ابعاد هندسه مورد مطالعه

پارامتر	نماد	مقیاس (mm)
طول میکروکانال	L_z	۱۰
عرض میکروکانال	L_x	۱۶
ارتفاع میکروکانال	L_y	۱
ضخامت طولی بستر جامد	S_n	۰/۱
عرض میکروکانال	W_T	۰/۶
ارتفاع میکروکانال	H_c	۰/۸
قطر کوچک بیضی	b	(۰/۲۷۵ - ۰/۲۲۵ - ۰/۱۷۵)
قطر بزرگ بیضی	a	۰/۳۲۵

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی سیال خنک کننده و بستر جامد

سیلیکون	سوسپانسیون ۱۰٪	آب	
۲۳۲۹	۹۶۸/۶	۹۹۸/۲	$\rho(kg m^{-3})$
۷۰۲	۳۹۶۰	۴۱۸۹	$c_p(kJ kg^{-1} K^{-1})$
۱۲۴	۰/۵۷۴۴	۰/۴۶۳	$k(W m^{-1} K^{-1})$
-	۰/۰۰۰۸۳۷	۰/۰۰۰۵۹۸	$\mu(kg m^{-1} s^{-1})$

مقطع بیضوی و با دیواره‌های متخلخل تحت آرایش‌های مختلف متخلخل انجام نگرفته است. با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در امر خنک کاری ابزارآلات صنعتی، در مطالعه‌ی حاضر نسبت به ارائه تحلیل عددی این نوع جریان‌ها اقدام شده است.

۲- تعریف مسئله و مدل سازی ریاضی

در تحقیق حاضر میکرو چاه گرمایی سه بعدی با سطح مقطع بیضوی متخلخل شامل ۲۰ میکروکانال بوده که عرض و ارتفاع آن‌ها به ترتیب $L_x=16$ و $L_y=1$ میلی‌متر می‌باشد. به دلیل تقارن بین کانال‌ها، حوزه‌ی محاسباتی مطابق شکل (۱- الف) ساده شده و نتایج برای کل میکروکانال‌ها تعمیم داده می‌شود. شار گرمایی یکنواخت $q_w=2000 \frac{kW}{m^2}$ از دیواره‌ی پایینی چاه گرمایی اعمال می‌شود. شرایط مرزی و شرط تقارن در شکل (۱- ب) که زاویه‌ی دید از بالا و روبروی برش خورده میکروکانال می‌باشد ارائه شده است. ضخامت بستر عرضی جامد به صورت $\frac{L_x - W_T}{2}$ تعیین شده است. معرفی پارامترهای هندسی و ابعاد دقیق آنها در جدول (۱) آورده شده است. جنس مواد بستر جامد و محیط متخلخل سیلیکون [۱۲] می‌باشد. سیال عامل در میکروچاه حرارتی، سوسپانسیون تغییر فاز دهنده فرض شده است. جنس هسته و پوسته‌ی مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب ان-اکتا دکان و پلی متیل متاکریلات می‌باشد. سیال خنک کننده با دمای ۲۹۳ کلوین و سرعت ۱ متر برثانیه وارد میکروکانال می‌شود. جریان سیال تراکم ناپذیر و آرام فرض می‌شود. ذرات تغییر فاز دهنده بعد از تغییر فاز و سیال پایه، رفتار نیوتنی داشته و فرآیندهای حرارتی و جریانی، پایا در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به رابطه‌ی زیر:

$$Re = \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu} \quad (1)$$

در حداکثر سرعت یعنی ۲ متر برثانیه عدد رینولدز برابر ۱۲۶۸/۱ می‌باشد که این مقدار در حوزه جریان آرام بوده لذا جریان آرام فرض می‌شود.

۲-۱- معرفی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده

در کار حاضر مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده در سیال پایه (آب خالص) پراکنده شده‌اند. هسته، ان-اکتا دکان با قطر ۵ میکرومتر و پوسته از کپسول پلی متیل متاکریلات تشکیل شده است. با توجه به اینکه ویسکوزیته‌ی برشی مواد

با توجه به فرضیات ذکر شده، معادلات حاکم برای انتقال حرارت و جریان سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل به شرح زیر است [۱۶]:

معادله پیوستگی:

معادله پیوستگی برای سیال در ناحیه‌ی متخلخل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4)$$

معادله مومنتوم:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \\ = -\nabla p + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V} \\ - C \left(\frac{\mu_f}{K} \right. \\ \left. + \frac{\rho_f C_F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \right) \vec{V} \quad \begin{cases} C = 0 & \text{if } \varepsilon = 1 \\ C = 1 & \text{if } \varepsilon \neq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

ضریب C در معادله مومنتوم به گونه‌ای تعریف می‌شود که اگر $\varepsilon = 1$ به معنی محیط شفاف یا بدون تخلخل می‌باشد و اگر $\varepsilon \neq 1$ باشد به مفهوم محیط متخلخل می‌باشد. μ_f ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال، K ضریب نفوذپذیری و C_F ضریب فورشه‌ایمر می‌باشند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۷]:

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon)^2} \quad (6)$$

$$C_F = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}} \quad (7)$$

معادله انرژی:

$$\nabla \cdot (\varepsilon C_{v,i} \vec{V} (\rho_i C_{p,i} T + p)) = k_{eff} \nabla^2 T \quad (8)$$

$$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_p$$

در معادله بالا k_{eff} نشان دهنده‌ی هدایت حرارتی موثر برای ناحیه‌ی متخلخل است و k_p هدایت حرارتی ماتریس جامد در فین‌های متخلخل می‌باشد. در ناحیه‌ی جامد، فقط هدایت گرمایی رخ می‌دهد:

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (9)$$

۲-۲-۱- شرایط مرزی مسئله

ویسکوزیته‌ی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد.

$$\frac{\mu_{su}}{\mu_w} = (1 - c_v - B c_v^2)^{-2.5} \quad (2)$$

ضریب B مقدار ثابتی بوده و برابر ۱/۱۶ می‌باشد [۱۴].

گرمای ویژه سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده را به عنوان تابعی از دما با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان تعریف کرد [۱۵].

$$C_p(T) = \begin{cases} C_{p,s} & \text{if } T < T_{solidus} \\ C_{p,s} + \frac{LH}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{if } T_{solidus} \leq T < T_{liquidus} \\ C_{p,l} & \text{if } T \geq T_{liquidus} \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه‌ی فوق $T_{solidus}$ و $T_{liquidus}$ به ترتیب حد اعقل و حداکثر دمای ذرات تغییر فاز دهنده در حالت مایع و جامد می‌باشد. $C_{p,s}$ و $C_{p,l}$ نیز گرمای ویژه‌ی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در حالت مایع و جامد می‌باشد.

۲-۲-۲ معادلات حاکم و شرایط مرزی

فرضیات در نظر گرفته برای تحلیل جریان و انتقال حرارت در میکروچاه حرارتی با سطح مقطع بیضوی متخلخل با گذر سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده به شرح زیر است:

- جریان سیال عامل تراکم ناپذیر فرض شده و تمامی خواص ترموفیزیکی ثابت و مستقل از دما در نظر گرفته شده است.
- میکرو کپسول‌های تغییر فاز دهنده‌ی در سیال پایه به صورت همگن پخش شده و ناحیه‌ی متخلخل اشباع از سوسپانسیون می‌باشد.
- سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر بوده و جریان سیال آرام در نظر گرفته شده است.
- در ناحیه‌ی متخلخل تعادل حرارتی مابین ماتریس جامد و سیال عامل فرض شده است.
- با توجه به مومنتوم بالای سیال عامل، به منظور مدل‌سازی ناحیه‌ی متخلخل از معادله‌ی فورشه‌ایمر داریسی بریکمن برای تصحیح معادلات مومنتوم در محیط متخلخل بهره برده شده است.
- تغییرات حجم ذرات تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده و لغزش سرعت مابین میکرو کپسول و سیال پایه ناچیز فرض شده است.

عملکرد هیدرولیکی میکرو چاه گرمایی را می‌توان با استفاده از افت فشار (ΔP) و ضریب اصطکاک (f) ارزیابی کرد. این دو پارامتر با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۹]

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (20)$$

در رابطه‌ی بالا P_{in} و P_{out} به ترتیب فشار ورودی و خروجی در یک میکروکانال واحد می‌باشد.

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{L_x \rho_f u_{in}^2} \quad (21)$$

برای ارزیابی جامع عملکرد هیدرولیکی چاه حرارتی از ضریب عملکرد (PEF) که به صورت زیر محاسبه می‌شود، استفاده می‌شود: [۲۰]

$$PEF = \frac{(Nu_j / Nu_0)}{(f_j / f_0)^{1/3}} \quad (22)$$

در رابطه‌ی فوق زیرنویس‌هایی که با j مشخص شده‌اند، میکروچاه حرارتی با دیواره متخلخل را نشان می‌دهند و زیرنویس‌های 0 نشانگر میکروچاه حرارتی بدون دیواره متخلخل می‌باشد.

۳- حل عددی و شبکه بندی و اعتبار سنجی

۳-۱- حل عددی

حل عددی معادلات فوق به روش گالرکین با استفاده از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس ۵/۶ انجام گرفته است. شبکه بندی نیز توسط همین نرم افزار صورت گرفته است. به منظور حل معادلات اساسی حاکم بر مسئله از روش باقی مانده‌های وزنی گالرکین بر اساس المان محدود که یکی از رایج ترین روش عددی برای حل مسائل مهندسی و مدل‌های ریاضی است استفاده گردیده است. توابع وزنی به صورت زیر جهت حداقل نمودن باقی مانده‌ی متغیرهای میدانی بکار گرفته شده‌اند:

$$\int_C wf(x) Res. dx \quad (23)$$

که در آن C و wf , Res , ϵ به ترتیب متغیر مکانی، باقی مانده، تابع وزنی و کل دامنه می‌باشد. تبدیل مشتقات جزئی به معادلات انتگرالی با استفاده از روش باقی مانده انجام گرفته و روش تکراری نیوتن-رفسون جهت حل این معادلات استفاده شده است. برای

شرایط مرزی برای دامنه‌ی محاسباتی به صورت زیر تعریف می‌شود:
شرایط ورودی:

$$x = 0 \rightarrow \begin{cases} u = u_{in} \\ v = 0 \\ w = 0 \\ T_{in} = const \end{cases} \quad (10)$$

شرایط خروجی:

$$x = L_x \rightarrow p = 0 \quad (11)$$

شرایط بر روی دیواره به شرح زیر است:

$$\vec{V} = 0 \quad T_s = T_f \quad k_s \nabla T_s |n = k_f \nabla T_f |n \quad (12)$$

شرایط بر روی باله‌های متخلخل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} u_p = u_f \quad v_p = v_f \quad w_p = w_f \\ k_{eff} \nabla T_p |n \\ = k_f \nabla T_p |n \quad T_p = T_f \end{aligned} \quad (13)$$

بر روی دیواره‌ی پایینی چاه حرارتی شار حرارتی یکنواختی اعمال می‌شود:

$$q = const \quad (14)$$

شرط تقارن برای دیواره‌های خارجی اعمال می‌شود:

$$\nabla T_s |n = 0 \quad (15)$$

Π بردار نرمال واحد برای سطوح می‌باشد.

عملکرد حرارتی میکروچاه گرمایی با باله‌های متخلخل را با مقاومت حرارتی موضعی (R_L) مقاومت حرارتی کل (R_T) و عدد ناسلت (Nu) مشخص می‌شود [۱۸]

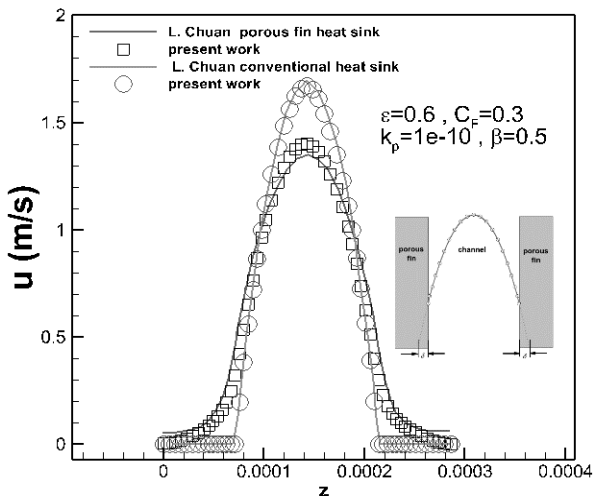
$$R_L = \frac{T_{avg.out} - T_{avg.in}}{qA} \quad (16)$$

$$R_T = \frac{T_{out.max} - T_{in}}{qA} \quad (17)$$

$$Nu = \frac{D_h}{k_f R_T} \quad (18)$$

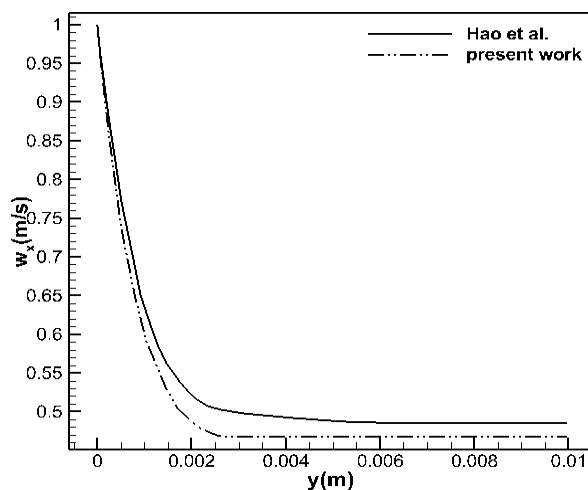
قطر هیدرولیکی میکروکانال با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$D_h = \frac{2H_c W_T}{H_c + W_T} \quad (19)$$



شکل ۲ مقایسه‌ی توزیع سرعت در کانال و پره‌های متخلخل را برای میکروچاه گرمایی ساده و میکروچاه گرمایی با پره‌های متخلخل برای کار حاضر و کار چوان و همکاران [۲۲]

شکل (۳) مقایسه‌ی توزیع سرعت در سطح مشترک بین محیط متخلخل و بستر جامد با سرعت ورودی ۱ متر بر ثانیه و $\varepsilon=0.8$ برای میکروچاه گرمایی با سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با کار هائودای و همکاران [۲۳] نشان داده شده است. حداکثر اختلاف عددی کد حاضر ۶ درصد بوده که نشان دهنده‌ی صحت کد عددی حاضر می‌باشد.



شکل ۳ مقایسه‌ی توزیع سرعت در سطح مشترک بین محیط متخلخل و بستر جامد با فرض $u_{in} = 1$ متر بر ثانیه و $\varepsilon=0.8$ الف) کار هائودای و همکاران [۲۳] ب) کار حاضر

۴- نتایج و بحث

در این بررسی تاثیر آرایش متخلخل بر مبنای افزایش تخلخل خطی در راستای طول کانال (ILPL)، کاهش تخلخل خطی در

تمامی شبیه سازی‌های انجام شده، خطای عددی برای هر متغیر میدانی بایستی شرط زیر را ارضاء نماید:

$$\left| \frac{\Gamma^{n+1} - \Gamma^n}{\Gamma^{n+1}} \right| < 10^{-5} \quad (24)$$

که در آن n نشان دهنده‌ی هر گام می‌باشد. گسسته سازی‌های متغیرهای سرعت و فشار با استفاده از المان محدود لاگرانژی به روش P_2-P_1 انجام گرفته است [۲۱].

۳-۲- شبکه بندی

استقلال عددی از شبکه در شرایط $u_{in} = 1$ متر بر ثانیه، $d_p = 0.1$ ، $\varepsilon = 0.8$ ، $b = 0.175$ میلی‌متر و $C_m = 10$ درصد بررسی شده است. مطابق جدول (۲) مقایسه‌ی ناسلت میانگین در تعداد شبکه‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد المان‌ها اگرچه خطای عددی کاهش می‌یابد، ولی برای کم کردن هزینه‌های محاسباتی تعداد شبکه‌ی ۶۴۳۲۵۳ در تمامی شبیه سازی ارائه شده، استفاده شده است.

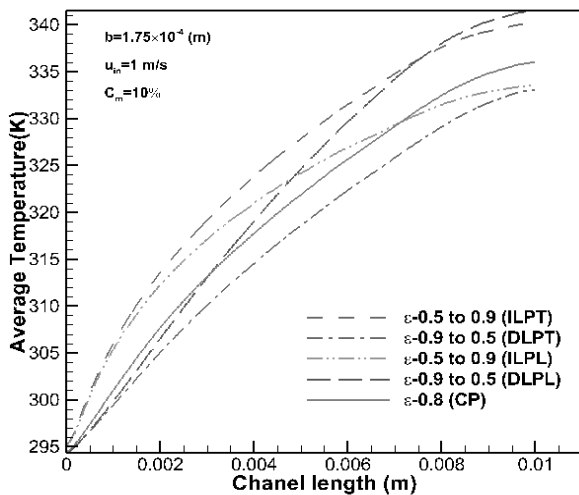
جدول ۲ بررسی استقلال از شبکه

تعداد شبکه	Nu	$\left \frac{Nu_n - Nu_{n-1}}{Nu_{n-1}} \right \%$
۳۵۲۶۹۱	۷۳/۳۱۵	-
۴۸۲۶۲۲	۷۳/۹۰۰	۰/۷۹
۵۲۸۳۶۵	۷۴/۲۱۲	۰/۴۲
۶۴۳۲۵۳	۷۴/۲۵۹	۰/۴۲
۷۷۳۲۵۶	۷۴/۲۵۳	۰/۰۱

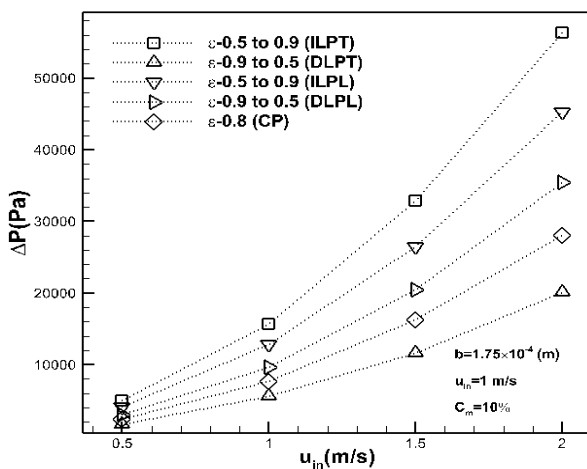
۳-۳- اعتبار سنجی

برای بررسی صحت کد شبیه سازی شده برای میکروچاه گرمایی مستقیم با بستر متخلخل مقایسه‌ای میان شبیه سازی ارائه شده توسط چوان و همکاران [۲۲] صورت گرفته است. شکل (۲) توزیع سرعت در کانال و پره‌های متخلخل را برای میکروچاه گرمایی ساده و میکروچاه گرمایی با پره‌های متخلخل برای کار حاضر و کار چوان و همکاران مورد مقایسه قرار گرفته است. همان گونه که مشاهده می‌شود حداکثر اختلاف ۷/۱۴ درصد می‌باشد که درصد خطای قابل قبولی برای کد حاضر و کد چوان و همکاران می‌باشد.

شکل (۵) تغییرات افت فشار بر حسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف را ارائه می‌دهد. به دلیل افزایش درگ اصطکاکی، با افزایش سرعت ورودی افت فشار افزایش می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌شود DLPT کمترین افت فشار و ILPT بیشترین افت فشار را نشان می‌دهد. در سرعت‌های کم اختلاف افت فشار میان حالت‌های مختلف کمتر بوده و با افزایش سرعت این اختلاف افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند به طوری که در سرعت ۲ متر بر ثانیه افت فشار در آرایش ILPT نسبت به آرایش DLPT، ۶۴/۴۱ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این امر ذوب مواد تغییر فاز دهنده بوده که در ILPT در فاصله‌ی کمتری از DLPT در طول مسیر شروع به تغییر فاز کرده و افت فشار را افزایش می‌دهد.



شکل ۴ تغییرات دمای موضعی در طول مسیر جریان میکروکانال با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف



شکل ۵ تغییرات افت فشار بر حسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف

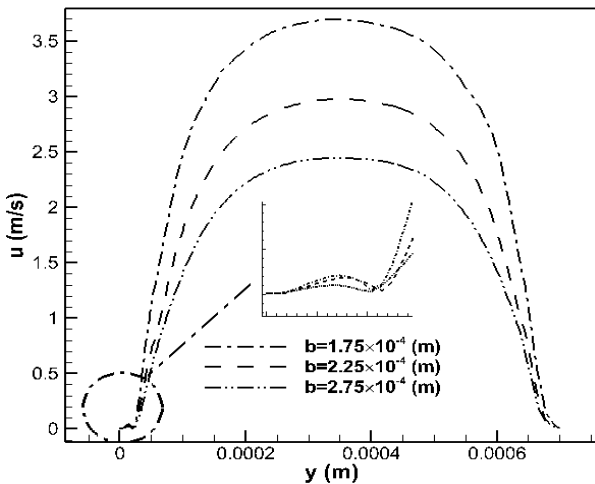
راستای طول کانال (DLPL)، افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (ILPT)، کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (DLPT) و تخلخل ثابت (CP) بروی خنک سازی میکروچاه گرمایی با سطح مقطع بیضوی و دیواره‌ی متخلخل حاوی سوسپانسون مواد تغییر فاز دهنده پرداخته می‌شود. تغییرات قطر کوچک بیضی در راستای بررسی تاثیر محیط متخلخل بر روی افت فشار و نرخ انتقال حرارت صورت گرفته است. همچنین عملکرد حرارتی کلی میکرو چاه گرمایی با استفاده از ضریب عملکرد جامع (PEF) سنجیده شده است. در تمامی شبیه سازی‌های انجام شده، کمیت‌های $Q=2000$ ، kW/m^2 ، $C_m=10\%$ و $T_{in}=293$ ثابت فرض شده‌اند.

شکل (۴) تغییرات دمای موضعی در طول مسیر جریان را با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف نشان می‌دهد. استفاده از محیط متخلخل می‌تواند موجب افزایش سطح انتقال حرارت در مرز مشترک جامد-سیال گردد. افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (ILPT) از ۰/۵-۰/۹ با توجه به اینکه در ابتدا تخلخل بسیار کم بوده و موجب کاهش مومنوم سیال خنک کننده و افزایش افت فشار می‌گردد، موجب می‌شود سیال در دمای بالاتری از میکرو کانال خارج شود. اما در کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (DLPT) از ۰/۵-۰/۹ مشاهده می‌شود سیال در دمای پایین تری نسبت به حالت‌های دیگر از میکروکانال خارج می‌شود. زیرا در ابتدا به دلیل تخلخل بالا المان‌های سیال مومنومم بالایی داشته و سیال خنک کننده در دمای پایین تری در طول مسیر جریان می‌یابد. از طرفی در ILPT ذرات تغییر فاز دهنده در فاصله‌ی کمتری نسبت به DLPT شروع به تغییر فاز می‌کنند. با توجه به رشد لایه‌ی مرزی حرارتی در راستای مسیر جریان، و اینکه افزایش تخلخل خطی در راستای طول کانال (ILPL) در امتداد مسیر جریان می‌باشد موجب می‌شود در انتهای کانال به دلیل بالا بودن نفوذپذیری، سیال نسبت به حالت (DLPL) دمای کمتری داشته باشد از طرفی به دلیل رشد لایه‌ی مرزی حرارتی در راستای کانال در تخلخل ثابت، در اواسط مسیر CP دمایی کمتر از آرایش‌های DLPL، ILPL و ILPT را نشان می‌دهد. با اینکه DLPL در ابتدای کانال دمای پایین تری دارد ولی به دلیل کاهش نفوذپذیری تبادل حرارتی میان سیال خنک کننده و بستر میکروکانال کم شده و دمای سیال خروجی افزایش می‌یابد.

³ Decreasing linear porosity in the transverse direction
⁴ constant porosity

¹ Decreasing linear porosity in the longitudinal direction
² Increasing linear porosity in the transverse direction

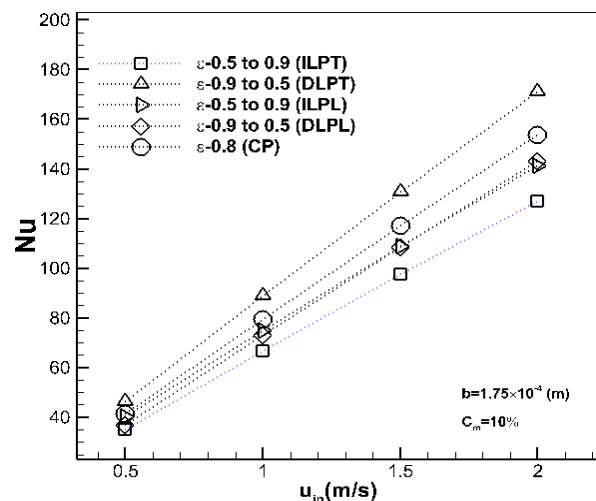
می‌باشد. این امر نیز به دلیل کاهش هرچه بیشتر تکانه‌های بزرگتر جریان در محیط متخلخل است که در مدلسازی غیرداریسی محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود (ترم منبع فورشه‌ایمر در معادله‌ی مومنتوم). این پدیده در دیواره‌ی بالایی میکروکانال نیز قابل مشاهده است، با این تفاوت که به دلیل کوچکتر بودن ضریب تخلخل در آن دیواره، میزان کاهش گرادیان سرعت در محیط متخلخل ضعیف‌تر است.



شکل ۷ پروفیل سرعت در راستای y با فرض اندازه‌های مختلف قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon = 0.9-0.5$ ، $C_m = 10\%$

شکل (۸) توزیع دما در راستای عرضی کانال (راستای X) را در فواصل مختلف از ورودی کانال نشان می‌دهد. این نتایج در فاصله‌ی $y = Ly/2$ رسم گردیده‌است. به منظور بررسی تغییرات دمایی در این شکل، $b = 0.175$ میلی‌متر (دارای بیشترین ضخامت محیط متخلخل) فرض شده‌است. در مقطع نزدیک ورودی کانال ($Z = 0.003$) سیال به دمای حدود 312 کلوین در نزدیکی دیواره‌ی گرم می‌رسد و با دور شدن از دیواره‌ی گرم، دمای سیال کاهش داشته بگونه‌ای که در مرکز کانال دما تقریباً برابر دمای ورودی (293 کلوین) خواهد بود. با افزایش Z (در فواصل دور از ورودی کانال)، دمای سیال در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد که دلیل آن گرم شدن میدان سیال و افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی می‌باشد. این امر موجب کاهش گرادیان دمایی بر روی دیواره‌ی گرم و بنابراین کاهش عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره نیز می‌شود. از طرفی با توجه به اینکه تا $X = 0.00125$ متر ناحیه‌ی متخلخل می‌باشد، به دلیل مقادیر بالای انتقال حرارت در این ناحیه، در هر مقطع با پیشروی به سمت مرکز میکروکانال و دور شدن از دیواره‌ها دما روندی نزولی را طی می‌کند. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که شیب توزیع دمای سیال در مجاورت

شکل (۶) تغییرات عدد ناسلت برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف را نشان می‌دهد. در آرایش DLPT با توجه به اینکه ناحیه‌ی متخلخل در طول مسیر جریان همواره $\varepsilon = 0.9$ بوده و در راستای عرضی به سمت دیواره‌ها روند کاهشی را طی می‌کند، نفوذپذیری بالا موجب می‌شود المان‌های سیال به راحتی از ناحیه‌ی متخلخل عبور کرده و سطح تماس بین ماتریس جامد و سیال خنک کننده افزایش یابد در نتیجه عدد ناسلت میانگین بالاتری نسبت به حالات دیگر را نشان بدهد. متقابلاً ILPT که منجر به کاهش خطی نفوذ پذیری می‌شود، موجب افت مومنتوم المان‌های سیال شده و این امر باعث می‌شود دارای کمترین مقدار ناسلت میانگین باشد. تخلخل ثابت $\varepsilon = 0.8$ به دلیل نفوذ پذیری بالا رتبه دوم ناسلت میانگین را دارد. از آنجایی که محاسبه‌ی ناسلت میانگین در طول کانال می‌باشد لذا ناسلت میانگین برای دو حالت ILPL و DLPL تقریباً یکسان می‌باشد.



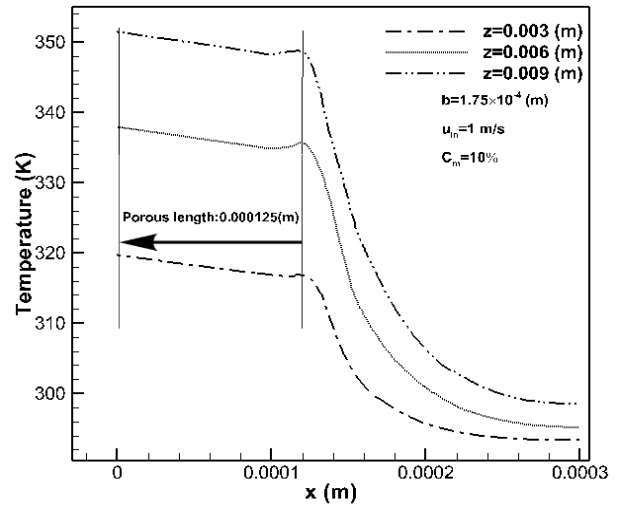
شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنه‌های تخلخل مختلف

شکل (۷) پروفیل سرعت در راستای y با فرض اندازه‌های مختلف قطر کوچک بیضی را نشان می‌دهد. این نتایج با فرض توزیع خطی تخلخل از 0.5 تا 0.9 رسم گردیده‌است. طبق نتایج ارائه شده با کاهش قطر کوچک مقطع میکروکانال، سرعت متوسط جریان داخل کانال به دلیل کاهش سطح مقطع عبوری افزایش می‌یابد. با این وجود به دلیل وجود لایه‌ی متخلخل در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال، گرادیان سرعت به ازاء قطرهای مختلف در نزدیکی دیواره تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل بالابودن مومنتوم در قطرهای کوچکتر، شیب توزیع سرعت در این قطرها کمتر از میکروکانال‌ها با قطرهای بزرگتر

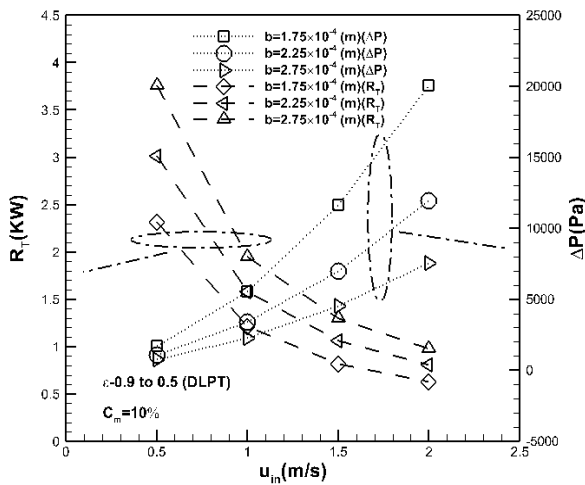
دیواره در فاصله‌ی نزدیک به ورودی میکروکانال، از سایر منحنی‌ها بزرگتر می‌باشد که ناشی از کاهش نرخ حرارت انتقالی به سیال عامل در فواصل دور از ورودی است. این امر به دلیل افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی در راستای طول میکروکانال و در نزدیکی سطوح گرم می‌باشد.

میکروکانال خارج شود. با افزایش قطر کوچک و متقابلاً کاهش ناحیه‌ی متخلخل، ضخامت لایه‌ی مرزی در طول کانال افزایش یافته و منجر به افزایش دمای سیال خروجی می‌شود. شکل (۱۰) مقایسه مقاومت حرارتی کل و افت فشار برحسب سرعت‌های ورودی مختلف با فرض طول‌های مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ و $C_m=10\%$ درصد را نمایش می‌دهد. اختلاف مقاومت حرارتی با افزایش قطر کوچک بیضی به دلیل کاهش ناحیه‌ی متخلخل افزایش می‌یابد و دامنه تغییرات مقاومت حرارتی با افزایش سرعت ورودی کاهش می‌یابد. حضور ناحیه‌ی متخلخل موجب افزایش افت فشار و کاهش مومنوم المان سیال می‌شود. از طرفی ذوب شدن ذرات تغییر فاز دهنده و افزایش غلظت سیال پایه موجب افت فشار و کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. با افزایش قطر کوچک بیضی، به دلیل کاهش محیط متخلخل با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار کاهش می‌یابد به صورتی که در $b=0.175$ میلی‌متر و $u_{in}=2$ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به $b=0.175$ میلی‌متر، $62/34$ درصد کاهش یافته و مقاومت حرارتی $35/50$ درصد افزایش یافته است.

شکل ۸ توزیع دما در راستای عرضی کانال با فرض مقطعی از طول کانال در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ ، $Ly/2$ ، $C_m=10\%$ درصد

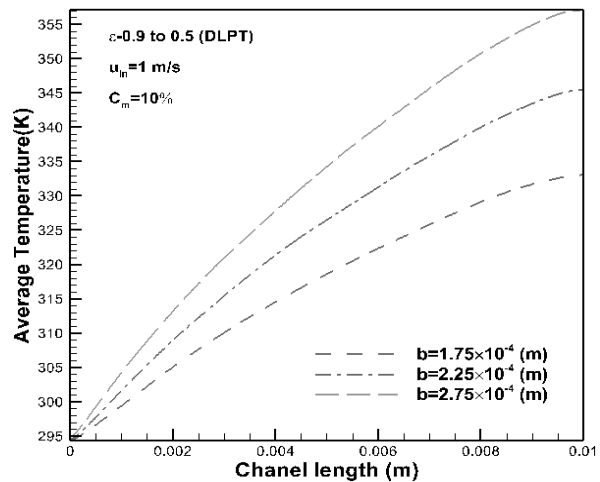


شکل ۸ توزیع دما در راستای عرضی کانال با فرض مقطعی از طول کانال در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ ، $Ly/2$ ، $C_m=10\%$ درصد



شکل ۱۰ مقایسه مقاومت حرارتی کل و افت فشار برحسب

سرعت‌های ورودی مختلف با فرض طول‌های مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ و $C_m=10\%$ درصد



شکل ۹ دمای موضعی در طول جریان کانال با فرض طول‌های

مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط $\varepsilon=0.9-0.5$ ، $C_m=10\%$ درصد و $u_{in}=1$ متر بر ثانیه

در ارتباط با شکل (۱۰)، می‌توان دریافت که انتقال حرارت بهتر و عملکرد جریان نسبتاً ضعیف در $b=0.175$ میلی‌متر رخ می‌دهد. به منظور در نظر گرفتن هر دو عملکرد حرارتی و هیدرولیکی، ضریب ارزیابی عملکرد که در معادله ۲۳ تعریف شده است، برای ارزیابی عملکرد کلی میکروچاه گرمایی بهره برده شده است. شکل (۱۱) ضریب عملکرد میکروچاه گرمایی برحسب سرعت‌های ورودی مختلف برای طول‌های مختلف قطر کوچک

شکل (۹) دمای موضعی در طول جریان کانال با فرض طول‌های مختلف برای قطر کوچک بیضی را برای آرایش متخلخل DLPT در $\varepsilon=0.9-0.5$ دامنه‌ی را نشان می‌دهد. در $b=0.175$ میلی‌متر به دلیل بالابودن قطر مقطع متخلخل نسبت به قطر مقطع‌های متخلخل دیگر، لایه‌ی مرزی حرارتی ضخامت کمتری داشته و سیال خنک کننده در دمای پایین تری از

ذکر شده بر دمای موضعی، افت فشار و ناسلت میانگین مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای هندسی میکرو چاه گرمایی بر روی خصوصیات حرارتی و هیدرولیکی تحت سرعت‌های ورودی مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج پیش بینی شده، نتایج زیر حاصل می‌شود:

(۱) افزایش و کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال به ترتیب دارای بیشترین و کمترین افت فشار می‌باشند. به طوری که در سرعت ۲ متر بر ثانیه افت فشار در آرایش افزایش تخلخل خطی نسبت به آرایش کاهش تخلخل خطی در عرض کانال، ۶۴/۴۱ درصد افزایش می‌یابد.

(۲) افزایش قطر کوچک بیضی، موجب کاهش قطر مقطع متخلخل شده و با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار کاهش می‌یابد به طوری که در $b=0/275$ میلیمتر و $u_{in}=2$ افت فشار نسبت به $b=0/175$ میلیمتر، ۶۲/۳۴ درصد کاهش یافته و مقاومت حرارتی ۳۵/۵۰ درصد افزایش یافته است.

(۳) کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال و تخلخل ثابت نسبت به آرایش‌های دیگر به ترتیب بیشترین عدد ناسلت میانگین را نسبت به آرایش‌های دیگر دارا می‌باشند.

(۴) در سرعت‌های ورودی پایین ضریب عملکرد کمتر از ۱ بوده و در $u_{in} \geq 1$ متر بر ثانیه ضریب عملکرد مقداری بیشتر از ۱ داشته که نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می‌باشد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

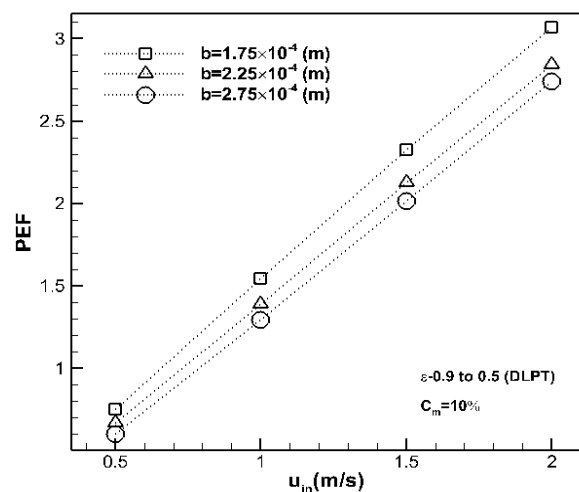
علائم انگلیسی

C_m	کسر جرمی، %
C_v	کسر حجمی، %
C_F	ضریب فورشهایمر
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($\frac{J}{kg \cdot K}$)
ΔP	افت فشار (Pa)
Nu	عدد ناسلت
R_L	مقاومت محلی موضعی (k/w)
b	قطر کوچک بیضی (mm)
a	قطر بزرگ بیضی (mm)

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
-------	------------------------------------

بیضی برای آرایش DLPT در دامنه $\epsilon=0/9-0/5$ نشان داده شده است، به دلیل مساحت سطح بزرگتر ماتریس سیلیکونی با هدایت حرارتی بالا با افزایش سرعت ورودی از $u_{in}=0/5$ متر بر ثانیه تا $u_{in}=2$ متر بر ثانیه، PEF افزایش می‌یابد زیرا مساحت انتقال حرارت بزرگتر از میکروچاه گرمایی غیر متخلخل می‌باشد. با اینکه سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده، فرایند تغییر فاز را با سرعت جریان کمتر تکمیل می‌کند، ولی تاثیر تغییر فاز بر انتقال حرارت در سرعت‌های کمتر از ۱ متر بر ثانیه برای تمامی حالت‌ها مقدار قابل توجهی نیست. با افزایش سرعت ورودی از $u_{in}=1$ به $u_{in}=2$ ، در تمامی حالت‌ها PEF مقداری بیشتر از ۱ داشته که نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می‌باشد. همانگونه که پیش تر ذکر شد در $b=0/175$ میلیمتر به دلیل افزایش سطح تماس سیال خنک کننده با بستر جامد توسط محیط متخلخل بیشترین ضریب عملکرد مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱ ضریب عملکرد میکروچاه گرمایی بر حسب سرعت‌های ورودی مختلف برای طول‌های مختلف قطر کوچک بیضی در شرایط $\epsilon=0/9-0/5$ و $C_m=10$ درصد

۵- نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر، میکرو چاه گرمایی سه بعدی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با سطح مقطع بیضی متخلخل با آرایش تخلخل افزایش تخلخل خطی در راستای طول کانال، کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال، افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال، کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال و تخلخل ثابت تحت شار حرارتی یکنواخت، بصورت عددی شبیه سازی شده است و تاثیر آرایش‌های تخلخل

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.01.032>, (2005).

ρ چگالی (kgm^{-3})
 ε تخلخل

- [8] Khodadadi, J. M., and Hosseinizadeh, S. F., Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34(5), pp. 534-543, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.02.005>, (2007).

زیرنویس‌ها

eff تاثیر

f سیال

in ورودی

out خروجی

- [9] Liu, L., Zhu, C., and Fang, G., Numerical evaluation on the flow and heat transfer characteristics of microencapsulated phase change slurry flowing in a circular tube, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 144, pp. 845-853, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.102>, (2018).

۷- مراجع

- [10] Mobadersani, F., and Rezavand Hesari, A., Investigation of FHD effects on heat transfer in a differentially heated cavity partially filled with porous medium utilizing Buongiorno's model, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136(7), pp. 707, DOI: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01679-3>, (2021).
- [11] Farahani, S. D., Farahani, A. D., and Hajian, E., Effect of PCM and porous media/nanofluid on the thermal efficiency of microchannel heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 105546, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.10.5546>, (2021).
- [12] Lu, G., Zhao, J., Lin, L., Wang, X. D., and Yan, W. M., A new scheme for reducing pressure drop and thermal resistance simultaneously in microchannel heat sinks with wavy porous fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, pp. 1071-107, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.086>, (2017).
- [13] Liu, L., Alva, G., Jia, Y., Huang, X., and Fang, G., Dynamic thermal characteristics analysis of microencapsulated phase change suspensions flowing through rectangular mini-channels for thermal energy storage, *Energy and Buildings*, Vol. 134, pp. 37-51., DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.021>, (2017).
- [14] Hasan, M. I., Numerical investigation of counter flow microchannel heat exchanger with MEPCM suspension, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31(6-7), pp. 1068-1075, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.032>, (2011).
- [15] Hu, X., and Zhang, Y., Novel insight and numerical analysis of convective heat transfer enhancement
- [1] Lee, J., and Kim, S. J., Effect of channel geometry on the operating limit of micro pulsating heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 204-212, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.036>, (2017).
- [2] Brinda, R., Daniel, R. J., and Sumangalaa, K., Effect of aspect ratio on the hydraulic and thermal performance of ladder shape micro channels employed micro cooling systems, *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 2022-2032, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.244>, (2012).
- [3] Jadhav, S. V., Pawar, P. M., and Ronge, B. P., Effect of pin-fin geometry on microchannel performance, *Chemical Product and Process Modeling*, 14(1), DOI: <https://doi.org/10.1515/cppm-2018-0016>, (2019).
- [4] Ghule, K., and Soni, M. S., Numerical heat transfer analysis of wavy micro channels with different cross sections, *Energy Procedia*, Vol. 109, pp. 471-478, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.071>, (2017).
- [5] Sui, Y., Teo, C. J., Lee, P. S., Chew, Y. T., and Shu, C., Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53(13-14), pp. 2760-2772, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.022>, (2010).
- [6] Arasu, A. V., and Mujumdar, A. S., Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39(1), pp. 8-16, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.09.013>, (2012).
- [7] Akhilesh, R., Narasimhan, A., and Balaji, C., Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48(13), pp. 2759-2770, DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.059>, (2012).
- [20] Wang, B., Hong, Y., Hou, X., Xu, Z., Wang, P., Fang, X., and Ruan, X., Numerical configuration design and investigation of heat transfer enhancement in pipes filled with gradient porous materials, *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 206-215, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.064>, (2015).
- [21] Elman, H. C., Silvester, D. J., and Wathen, A. J., Finite elements and fast iterative solvers: with applications in incompressible fluid dynamics, 2nd Edition, *Oxford University Press*, DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199678792.01.0001> (2014).
- [22] Chuan, L., Wang, X. D., Wang, T. H., and Yan, W. M., Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sink based on porous fin design concept, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 52-57, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.04.005> (2015).
- [23] Dai, H., Chen, W., Dong, X., Liu, Y., and Cheng, Q., Thermohydraulic performance analysis of graded porous media microchannel with microencapsulated phase change material suspension, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 176, pp. 121459, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121459> (2021).
- with microencapsulated phase change material slurries, laminar flow in a circular tube with constant heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45(15), pp. 3163-3172, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00034-0), (2002).
- [16] Ghahremannezhad, A., and Vafai, K., Thermal and hydraulic performance enhancement of microchannel heat sinks utilizing porous substrates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 1313-1326, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.024>, (2018).
- [17] Alazmi, B., and Vafai, K., Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44(9), pp. 1735-1749, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00217-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00217-9), (2001).
- [18] Dai, H., and Chen, W., Numerical investigation of heat transfer in the double-layered minichannel with microencapsulated phase change suspension, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 119, pp. 104918, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104918>, (2020).
- [19] Hung, T. C., Yan, W. M., Wang, X. D., and Huang, Y. X., Optimal design of geometric parameters of double-layered microchannel heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55(11-12), pp. 3262-3272, DOI: