

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

نگین رشیدی¹، فرخ مبادر ثانی²*

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه # ارومیه، ۲۱۹-۵۷۱۵۵ Gmail.com؛

چکیدہ

در این مقاله به بررسی عملکرد حرارتی میکرو چاه گرمایی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده (MPCM) با سطح مقطع بیضوی متخلخل پرداخته شده است. حل معادلات اساسی حاکم بر مسئله بر اساس روش المان محدود میباشد و شبیه سازی با استفاده از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس انجام شده است. از معادلهی فورشهایمر- بریکمن- دارسی برای توصیف جریان عبوری از محیط متخلخل بهره برده شده است. در طرح ارائه شده، تجزیه و تحلیل آرایش تخلخل (ع) و ضخامت ناحیهی متخلخل بر ویژگیهای حرارتی و هیدرولیکی تحت سرعتهای ورودی مختلف صورت گرفته است. در طرح ارائه شده، تجزیه و تحلیل آرایش تخلخل (ع) و ضخامت ناحیهی متخلخل بر ویژگیهای حرارتی و هیدرولیکی تحت سرعتهای ورودی مختلف صورت گرفته است. کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (DLPT) و تخلخل ثابت (CP) نسبت به آرایشهای دیگر به ترتیب بیشترین عدد ناسلت میانگین را نسبت به آرایشهای دیگر دارا میباشند. با افزایش قطر کوچک بیضی، به دلیل کاهش محیط متخلخل، با افزایش سرعت ورودی سیال، افت فشار کاهش می یابد به طوری که در 2015 است به این است افزایش قطر کوچک بیضی، به دلیل کاهش محیط متخلخل، با افزایش سرعت ورودی سیال، افت فشار کاهش می یابد به طوری که در 90–2015 و است است اول نسبت به 20.175m ها 20.75 درصد کاهش یافته ومقومت حرارتی متدخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می از ۱ بوده و در 1m/s ≤ 1m² می سریت عملکرد مقداری بیشتر از ۱ داشته که نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل میباشد.

كليدواژگان

میکروچاه گرمایی، سوسیانسیون مواد تغییر فاز دهنده، تخلخل، عدد ناسلت، ضریب عملکرد

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

Negin Rashidi¹, Farrokh Mobadersani^{2*}

 Master's student, Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia.
 Assistant Professor, Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia * Urmia, 57155-419, fmobadersani@gmail.com

Abstract

In this article, the thermal performance of microchannel heat sink containing a suspension of phase change materials (MPCM) 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. Forschheimer-Brickman-Darcy equations are used to describe the flow through the porous medium. In the presented design, 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. Decrease of linear porosity in transverse direction (DLPT) and constant porosity (CP) have the highest average Nusselt number compared to other arrangements, respectively. With the increase of the small diameter of the oval, due to the reduction of the porous medium, with the increase of the fluid inlet speed, the pressure drop decreases so that at b=0.275mm and $u_{in} = 2m/s$, the pressure drop is reduced by 62.34% compared to b=0.175mm and the thermal resistance has increased by 35.50%. At low inlet velocities, the PEF is less than 1, and at $u_{in} \ge 1m/s$, the performance evaluation factor is greater than 1, which indicates the superiority of the porous micro channel heat sink over the micro channel heat sink without porous media.

Keywords

Micro channel heat sink, suspension of phase change materials, porous, Nusselt number, Coefficient performance

۱-مقدمه

بیشتر، سرعت بالاتر و مقرون بصرفه 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 می رسد.

قطر هیدرولیکی رابطهی مستقیمی با عدد رینولدز و عاملی بسیار تاثیر گذار بر روی عملکرد انتقال حرارت میباشد. لی و همکاران [1] تاثیر اشکال سطح مقطعی مختلف را برای میکرو چاه گرمایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ظرفیت خنک کنندگی میکرو چاه گرمایی مربعی ۷۰درصد بیشتر 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



از میکرو چاه گرمایی دایروی می باشد. تحقیقات بریندا و همکاران [2] نشان داد که در یک میکرو چاه گرمایی با آرایش نردبانی، با کاهش نسبت ابعاد، ضریب انتقال حرارت بطور موثر افزایش می یابد. جادها و همکاران [3]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 می یابد. همچنین پره با هندسهی دایروی عملکرد نسبتا بهتری نسبت به سه نوع یره دیگر دارد.

برای افزایش عملکرد حرارتی میکروچاه گرمایی، قله و سونی [4] 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 ۲۰۰ میکرومتر بیشترین ضریب انتقال حرارت را ارائه میدهد. سو و همکاران [5]جریان سیال و انتقال حرارت را در یک میکرو چاه حرارتی سه بعدی با کانالهای سینوسی شبیه سازی کردند. نتایج 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 ذخیره انرژی حرارتی نهفته توسط گرمای همجوشی هسته مواد تغییر فاز دهنده صورت می گیرد واین مواد با گرفتن گرما در طی فرایند تغییر فاز، دمای خود ومحیط را ثابت نگه میدارند و مقدار بسیار زیادی گرما را جذب و آزاد می کنند. آراسو و مجومدار [6]به تحلیل عددی ذوب موم پارافین با آلومینیا در یک محفظه ی مربعی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که ذخیره ی انرژی در دیوارههای عمودی نسبت به دیوارههای افقی بیشتر است. آخیش و همکاران[7] عملکرد چاه گرمایی را با مواد تغییر فاز و پرههای متصل پرهها و فاصله آنها بر عملکرد چاه گرمایی را با مواد تغییر فاز و پرههای متصل پرهها و فاصله آنها بر عملکرد چاه گرمایی تأثیر بسزایی دارد. حسین زاده و خدادادی [8]بهبود عملکرد مواد تغییر فاز دهنده را با افزودن نانوذرات به مواد خدادادی [8]بهبود عملکرد مواد تغییر فاز دهنده را با افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده بود. لیو و همکاران [9]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

با توجه به اینکه استفاده از محیط متخلخل میتواند موجب افزایش سطح انتقال حرارت در مرز مشترک جامد-سیال گردد، اخیرا پژوهشهای فراوانی بر روی اصول محیطهای متخلخل صورت گرفته است. مبادرثانی و رضاوند[10] تاثیر میدان مغناطیسی اعمالی توسط یک آهنربای دائمی بر عملکرد حرارتی و همینطور توزیع نانوذرات داخل یک حفره را بررسی قرار دادند. طبق نتایج گزارش شده، وجود ناحیهی متخلخل در حفره منجر به افزایش چشمگیری در انتقال حرارت میگردد. فرهانی و همکاران[11] تاثیر 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 دارسی و غلظت مواد تغییر فاز دهنده عملکرد حرارتی افزایش می یابد.

با توجه به مرور کارهای پیشین، تحلیل و مطالعهی جریان سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در میکروکانالهایی با سطح مقطع بیضوی وبا دیوارههای متخلخل تحت آرایشهای مختلف متخلخل انجام نگرفته است. باتوجه 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 $L_x = L_x$ متخلخل شامل ۲۰ میکروکانال بوده که عرض و ارتفاع آنها به ترتیب و $L_{v} = 1mm$ و $L_{v} = 1mm$ مىباشد. به دليل تقارن بين كانالها، حوزهى 16mm محاسباتي مطابق شكل 1-الف ساده شده و نتايج براي كل ميكروكانالها تعميم داده میشود. شار گرمایی یکنواخت $q_w=2000\,rac{kW}{m^2}$ از دیوارهی پایینی چاه گرمایی اعمال میشود. شرایط مرزی و شرط تقارن در شکل 1-ب که زاویهی دید از بالا و روبروی برش خورده میکروکانال می باشد ارائه شده است. معرفی پارامترهای هندسی و ابعاد دقیق آنها در جدول 1 آورده شده است. جنس مواد بستر جامد و محيط متخلخل سيليكون [12] مىباشد. سيال عامل در ميكروچاه حرارتی، سوسیانسیون 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 می شوند. عدد رینولدز در بازهی جریان آرام بوده لذا جريان آرام فرض مي شود.



شکل **ا 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

الف



مقیاس(mm)	نماد	پارامتر
10	L_z	طول MCHS
16	L_x	عرض MCHS
1	L_y	ارتفاع MCHS
0.1	s _n	ضخامت بستر جامد
0.6	WT	عرض ميكروكانال
0.8	H_c	ارتفاع ميكروكانال
(0.275-0.225-0.175)	b	قطر کوچک بیضی
۵۲۳. •	а	قطر بزرگ بیضی

1-1 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 تغییر فاز دهندهی میکرو کپسوله مستقل ازنرخ کرنش میباشد، لذا میتوان مواد تغییر فاز دهندهی میکرو کپسوله شده را سیال نیوتنی معرفی کرد. کسر جرمی نیز برای اطمینان از این امر %10=Cm انتخاب شده است[13]. خواص ترموفیزیکی سیال خنک کننده و بستر میکرو چاه گرمایی در جدول 2 آورده شده است.

ىد	ننگ کننده و بستر جاه	موفیزیکی سیال خ	جدول 2 خواص تره
سيليكون	سوسپانسيون	آب	
	10%		
2329	968.6	998.2	$\rho(kgm^{-1})$
702	3960	4189	$c_p(kJ \ kg^{-1} \ K^{-1})$
124	0.5744	0.643	$K(Wm^{-1}K^{-1})$
-	0.000837	0.000598	$\mu(kg \ m^{-1}s^{-1})$

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

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

ضریب B مقدار ثابتی بوده و برابر 1.16 میباشد[14]. گرمای ویژه سوسپانسیون مواد تغییر فازدهنده را به عنوان تابعی از دما با استفاده از رابطهی زیر میتوان تعریف کرد[15].

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

$$(2)$$

در رابطهی فوق $T_{liquidus}$ و $T_{ssolidus}$ به ترتیب حداعقل و حداکثر دمای ذرات تغییر فازدهنده در حالت مایع و جامد می باشد. $C_{P.S}$ و $C_{p.l}$ نیز گرمای ویژهی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده در حالت مایع و جامد می باشد.

۲-۲-معادلات حاکم و شرایط مرزی ۲-۲-۱-معادلات حاکم:

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:

- سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده مخلوط تراکم ناپذیر بوده و ذرات تغییر فاز دهندهی میکرو کپسوله شده در سیال آب پراکنده شدهاند.
- جریان آرام بوده و ذرات تغییر فاز دهنده بصورت یکنواخت توزیع شده وهمسانگرد در نظر گرفته میشوند.
- محیط متخلخل همگن، همسانگرد و از مایع خنک کننده اشباع فرض شده است.
- فرض تعادل حرارتی مابین محیط متخلخل و سیال خنک
 کننده در نظر گرفته شده است.
- ۰ از معادلهی فورشهایمر دارسی بریکمن برای توصیف جریان عبوری از محیط متخلخل بهره برده شده است.
- تغییرات حجم ذرات تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده و لغزش سرعت مابین میکروکپسول و سیال پایه ناچیز فرض شده است.
- تلفات ویسکوزیته و انتقال حرارت تشعشعی برای جریان سیال در میکرو کانالها و همچنین اتلافات ویسکوزیته ناچیز در نظر گرفته شده است.

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[16]. معادلهی پیوستگی:

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

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{3}$$

معادلهی مومنتوم:

(4)

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

ضریبC در معادلهی مومنتوم به گونهای تعریف می شود که اگر f=3 به معنی محیط شفاف یا بدون تخلخل می باشد واگر $f\pm3$ باشد به مفهوم محیط متخلخل می باشد. μ_f ویسکوزیتهی دینامیکی سیال، K ضریب نفوذپذیری و

:[17] ضريب فورشهايمر مىباشند و به صورت زير محاسبه مىشوند[17]:

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2}$$
(5)



$$C_F = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}} \tag{6}$$

معادلەي انرژى:

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

$$, \quad k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_p$$
(7)

در معادلهی بالا k_{eff} نشان دهندهی هدایت حرارتی موثر برای ناحیهی متخلخل است و $oldsymbol{k}_p$ هدایت حرارتی ماتریس جامد در فینهای متخلخل مىباشد. در ناحیهی جامد، فقط هدایت گرمایی رخ میدهد: $k_s \nabla^2 T =$

۲-۲-۲-شرایط مرزی مسئله:

شرایط مرزی برای دامنهی محاسباتی به صورت زیر تعریف میشود: شرايط ورودى: (1) - 1

$$x = 0 \rightarrow \begin{cases} u = u_{in} \\ v = 0 \\ w = 0 \\ T_{in} = constat \end{cases}$$
(9)

شرايط خروجي: (10)

شرایط بر روی دیواره به شرح زیر است:
$$\vec{V} = 0, \qquad T_s = T_f, \qquad k_s \nabla T_s |_n = k_f \nabla T_f |_n$$
(11)

 $x = L_x \rightarrow p = 0$

شرايط بر روى بالەھاى متخلخل بە صورت زير تعريف مىشود:
$$u_p = u_f, \quad v_p = v_f, \quad w_p = w_f,$$
 (12)
 $k_{eff} \nabla T_p |_n = k_f \nabla T_p |_n, \quad T_p = T_f$

شرط تقارن برای دیوارههای خارجی اعمال میشود:

$$abla T_s|_n = 0$$
(14)

n بردار نرمال واحد برای سطوح میباشد.

$$R_L = \frac{T_{avg,out} - T_{avg,in}}{qA} \tag{15}$$

$$R_T = \frac{T_{out,max} - T_{in}}{qA} \tag{16}$$

$$Nu = \frac{D_h}{k_f R_T} \tag{17}$$

قطر هیدرولیکی میکروکانال با استفاده از رابطهی زیر محاسبه میشود: $D_h = \frac{2H_cW_c}{H_c + W_c}$ (19)

عملکرد هیدرولیکی میکرو چاه گرمایی میتوان با افت فشار(ΔP) و ضریب اصطکاک(f) ارزیابی کرد. این دو پارامتر با استفاده از روابط زیر محاسبه مىشوند [19] $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ (20)

در رابطهی بالا Pout و Pin و Pin به ترتیب فشار ورودی و خروجی در یک میکروکانال واحد مىباشد. 2400

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

برای ارزیابی جامع عملکرد هیدرولکی چاه حرارتی از ضریب عملکرد(PEF) که به صورت زیر محاسبه می شود، استفاده می شود [20]:

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

۳- حل عددی و شبکه بندی و اعتبار سنجی

۳-۱-حل عددی:

حل عددي معادلات فوق به روش گالركين با استفاده از نرم افزار كامسول مولتي 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 مدل های ریاضی است استفاده گردیده است.



توابع وزنی به صورت زیر جهت حداقل نمودن باقی ماندهی متغیرهای میدانی بکار گرفته شدهاند:

(23) $\int_{C} wf(x) Res. d\epsilon$ که در آن wf, Res, ϵ وf به ترتیب متغیر مکانی، باقیمانده، تابع وزنی و کل دامنه میباشد. تبدیل مشتقات جزئی به معادلات انتگرالی با استفاده از

روش باقیمانده انجام گرفته و روش تکراری نیوتن-رفسون جهت حل این

معادلات استفاده شده است. برای تمامی شبیه سازیهای انجام شده، خطای

عددی برای هر متغیر میدانی بایستی شرط زیر را ارضاء نماید:

مشاهده می شود حداکثر اختلاف 7.14 درصد می باشد که درصد خطای قابل قبولی برای کد حاضر و کد چوان و همکاران می باشد.



شکل2 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[22]

شکل 3 مقایسه ی توزیع سرعت در سطح مشترک بین محیط متخلخل و بستر جامد با سرعت ورودی ۱ متر برثانیه و ۲۰۰-۶ برای میکروچاه گرمایی با سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با کار هائودای و همکاران[۲۳] نشان داده شده است. نتایج حاکی از صحت کد عددی حاضر می باشد.



شکل 3 مقایسهی توزیع سرعت در سطح مشترک بین محیط متخلخل و بستر u_{in} جامد با فرض $u_{in} = 1m/s$ و e = 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(ILPL²)، کاهش تخلخل خطی در راستای طول کانال(ILPL²)، کاهش تخلخل خطی افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (ILPT³)، کاهش تخلخل خطی

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

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[21].

۳-۲- شبکه بندی:

استقلال عددی از شبکه در شرایط $u_{in}=1$ متر بر ثانیه، $d_p=0.1$ ، $d_p=0.8$ متر بر ثانیه، $u_{in}=1$ و2 Cm =100 b=1.75 $\times 10^{-4}$ m مقایسهی ناسلت میانگین و افت فشار 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 کاهش 643253 در تمامی شبیه سازی ارائه شده، استفاده شده است.

	ل از شبکه	ول2: بررسي استقلال	جد	
$\left \frac{\Delta P_n - \Delta P_{n-1}}{\Delta P_{n-1}}\right \%$	$\Delta P(Pa)$	$\left \frac{Nu_n - Nu_{n-1}}{Nu_{n-1}}\right \%$	Nu	تعداد شبكه
-	7080.251	_	73.315	352691
0.03	7082.356	0.79	73.900	482622
0.02	7083.906	0.42	74.212	528365
0.02	7085.174	0.42	74.259	643253
0.01	7085.878	0.01	74.253	773256
			سنجى:	۳-۳-اعتبار

برای بررسی صحت کد شبیه سازی شده برای میکروچاه گرمایی مستقیم با بستر متخلخل مقایسهای میان شبیه سازی ارائه شده توسط چوان و همکاران[22] صورت گرفته است. شکل2 توزیع سرعت در کانال و پرههای متخلخل را برای میکروچاه گرمایی ساده و میکروچاه گرمایی با پرههای متخلخل در شرایط $\beta=0.5$ و $c_f=0.3$ ، $k_p=10^{-10}$ و $\beta=0.5$ و $\beta=0.5$ رای کار حاضر و کار چوان و همکاران مورد مقایسه قرار گرفته است. همان گونه که

³ Increasing linear porosity in the transverse direction

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



> در راستای عرض کانال ($DLPT^{1}$) و تخلخل ثابت (CP^{2}) 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 %PEP و $T_{in} = q = 2000 \ kW/m^{2}$ ، $C_m = 10$ و $q = 2000 \ kW/m^{2}$

شکل۴ تغییرات دمای موضعی در طول مسیر جریان را با فرض آرایش و دامنههای تخلخل مختلف نشان میدهد. استفاده از محیط متخلخل می تواند موجب افزایش سطح انتقال حرارت در مرز مشترک جامد-سیال گردد. افزایش تخلخل خطی در راستای عرض کانال(ILPT) از ۱.۹–۵.۰۰ با توجه به اینکه در ابتدا تخلخل بسيار كم بوده و موجب كاهش مومنتوم سيال خنك كننده و افزایش افت فشار می گردد، موجب می شود سیال در دمای بالاتری از میکرو کانال خارج شود. اما در کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال(DLPT) از ۵.۰-۹.۰ مشاهده می شود سیال در دمای پایین تری نسبت به حالتهای دیگر از میکروکانال خارج می شود زیرا در ابتدا به دلیل تخلخل بالا المان های سیال مومنتوم بالایی داشته و سیال خنک کننده در دمای پایین تری در طول مسیر جریان می یابد. از طرفی در ILPT ذرات تغییر فاز دهنده در فاصله ی 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 CPدمایی کمتر از آرایشهای ILPL ،DLPL و ILPT را نشان میدهد. با اینکه DLPL در ابتدای کانال دماي پايين تري دارد ولي به دليل كاهش نفوذ پذيري تبادل حرارتي ميان سيال خنک کننده و بستر میکروکانال کم شده و دمای سیال خروجی افزایش می یابد.



شکل4 تغییرات دمای موضعی در طول مسیر جریان میکروکانال با فرض آرایش و دامنههای تخلخل مختلف

شکل ۵ تغییرات افت فشار برحسب سرعتهای ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنههای تخلخل مختلف را ارائه می دهد. به دلیل افزایش درگ اصطکاکی، با افزایش سرعت ورودی افت فشار افزایش می یابد. همانگونه که مشاهده می شود DLPT کمترین افت فشار و ILPT بیشترین افت فشار را نشان می دهد. در سرعتهای کم اختلاف افت فشار میان حالتهای مختلف کمتر بوده و با افزایش سرعت این اختلاف افزایش چشم گیری پیدا می کند به طوری که در سرعت *Sml* افت فشار درآرایش TLPT نسبت به آرایش DLPT که در سرعت افزایش می یابد. دلیل این امر ذوب مواد تغییر فاز دهنده بوده که در TLPT در فاصلهی کمتری از TLPT در طول مسیرشروع به تغییر فاز کرده و افت فشار را افزایش می دهد.



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

¹ Decreasing linear porosity in the transverse direction



> شكل ۶ تغییرات عدد ناسلت برحسب سرعتهای ورودی مختلف با فرض آرایش و دامنههای تخلخل مختلف را نشان می دهد. در آرایش DLPT با توجه به اینكه ناحیهی متخلخل درطول مسیرجریان همواره 0.9 = 3 بوده و در راستای عرضی به سمت دیوارهها روند كاهشی را طی می كند, نفوذپذیری موجب می شود سیال خنک كننده به راحتی عبور كند در نتیجه عدد ناسلت میانگین بالاتری نسبت به حالات دیگر را نشان بدهد. متقابلا ILPT دارای کمترین مقدار ناسلت میانگین می باشد. تخلخل ثابت 0.8 = 3 به دلیل نفوذ پذیری بالا رتبه دوم ناسلت میانگین را دارد. از انجایی که محاسبهی ناسلت میانگین در طول کانال می باشد لذا ناسالت میانگین برای دوحالت ILPL وLPL تقریبا یکسان می باشد.



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

شکل ۷ توزیع سرعت در امتداد طول کانال با فرض طولهای مختلف برای قطر کوچک بیضی را نشان میدهد. حضور دیوارهی متخلخل باعث کاهش مومنتوم المانهای سیال در ورودی کانال می گردد. در همین راستا در شکل ۷-الف در ورودی کانال نزدیک دیوارهها، شاهد رشد لایهی مرزی هیدرولیکی میباشیم که با پیشروی در طول کانال این ضخامت افزایش مییابد. از ظرفی با توجه به اینکه در اواسط کانال، نزدیکی دیوارهها به دلیل افزایش ضخامت لایهی مرزی هیدرولیکی مومنتوم المانهای سیال کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (DLPT) از 5.0-0.9 منجر به عبور راحت تر المانهای سیال میشود. در شکل ۷-ب و چ با افزایش قطر کوچک بیضی با توجه به اینکه ناحیهی متخلخل کانال کاهش مییابد، میزان افت فشار کاهش یافته در نتیجه منجربه افزایش مومنتوم المانهای سیال شده و ضخامت لایهی مرزی منجربه افزایش مییابد. شایان به ذکر است که در داخل ناحیهی متخلخل در نزدیکی دیوارههای جامد، سرعت المانهای سیال دارای مقادیر مینار کمی میباشد.

شکل۸ توزیع دما در امتداد طول کانال با فرض طولهای مختلف برای قطر کوچک بیضی را نشان میدهد. استفاده از محیط متخلخل میتواند موجب

افزایش سطح انتقال حرارت در مرز مشترک جامد-سیال گردد. شکل ۸-الف سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با دمای ۲۹۳K وارد میکروکانال می شود گسترش لایهی مرزی حرارتی در امتداد کانال منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت شده اما حضور ناحیهی متخلخل منجر به افزایش سطح تماس میان سیال خنک کننده و بستر جامد شده و اختلاف دمای سیال و دیواره را کاهش می دهد. درشکل 8-ب وج با افزایش قطر کوچک بیضی و افزایش ضخامت لایهی مرزی حرارتی در طول کانال و همچنین کاهش ناحیهی متخلخل، نرخ انتقال حرارت میان سیال خنک کننده و بستر میکروکانال کاهش می یابد در نتیجه سیال با دمای بالاتری از میکروکانال خارج می شود.



b=0.175mm(شكل الم توزيع سرعت در امتداد طول كانال با فرض الف $u_{in} = 1m/s$ و. به b=0.275mm (ج $u_{in} = 1m/s$ و

ε =0.9-0.5(DLPT)





$$\varepsilon = 0.9 - 0.5(DLPT)$$



> شكل ۹ دماى موضعى در طول جريان كانال با فرض طولهاى مختلف براى قطر كوچك بيضى را براى آرايش متخلخل DLPT در دامنهى – 0.9 = ٤ ما به دليل افزايش سطح انتقال 0.5 را نشان مىدهد. در اسوسپانسيون مواد تغيير فاز دهنده، ضخامت لايهى حرارت محيط متخلخل با سوسپانسيون مواد تغيير فاز دهنده، ضخامت لايهى مرزى حرارتى كاهش يافته و سيال خنك كننده در دماى پايين ترى از ميكروكانال خارج شود. با افزايش قطر كوچك و متقابلا كاهش ناحيهى متخلخل، ضخامت لايهى مرزى در طول كانال افزايش يافته ومنجر به افزايش دماى سيال خروجى مىشود.



شکل ^۹ دمای موضعی در طول جریان کانال با فرض طولهای مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط 0.5 - 0.9 = ٤

$C_m = 10\%$, $u_{in} = 1m/s$

شكل ۱۰ مقایسه مقاومت حرارتی كل و افت فشار برحسب سرعتهای ورودی مختلف با فرض طولهای مختلف برای قطر كوچک بیضی در شرایط = 3ما مختلف با فرض طولهای مختلف برای قطر كوچک بیضی در شرایط = 0.5 - 0.5 و 0.9 - 0.5 اس افزایش قطر كوچک بیضی به دلیل كاهش ناحیهی متخلخل افزایش مییابد. حضور دامنه تغییرات مقاومت حرارتی با افزایش سرعت ورودی كاهش مییابد. حضور ناحیهی متخلخل موجب افزایش افت فشار و كاهش مومنتوم المان سیال میشود. از طرفی ذوب شدن ذرات تغییر فاز دهنده و افزایش غلظت سیال پایه موجب افت فشار و كاهش مقاومت حرارتی میشود. با افزایش قطر كوچک موجب افت فشار و كاهش محیط متخلخل با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار كاهش مییابد به صورتی كه در 9.275mm و افزایش سرعت ومودی سیال افت فشار نسبت به 20.175mm می ماند ماند است.



شکل۱۰ مقایسه مقاومت حرارتی کل و افت فشار برحسب سرعتهای ورودی مختلف با فرض طولهای مختلف برای قطر کوچک بیضی در شرایط ۵۰ 0.9 0.5 و Cm=10%

در ارتباط با شکل ۱۰، می توان دریافت که انتقال حرارت بهتر و عملکرد جریان نسبتا ضعیف در b=0.175mm رخ میدهد. به منظور در نظر گرفتن هر دو عملکرد حرارتی و هیدرولیکی، ضریب ارزیابی عملکرد که در معادله۲۲ 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 بیضی برای آرایشDLPT در دامنهی نشان داده شده است، به دلیل مساحت سطح بزرگتر arepsilon = 0.5 $\mathbf{u}_{in} = \mathbf{u}_{in}$ ماتریس سیلیکونی با هدایت حرارتی بالا با افزایش سرعت ورودی از افزایش می یابد زیرا مساحت انتقال PEF ، $u_{in} = 2m/s$ تا $0.5 \mathrm{m/s}$ حرارت بزرگتر از میکروچاه گرمایی غیر متخلخل میباشد. با اینکه سوسپانسيون مواد تغيير فاز دهنده، فرايند تغيير فاز را با سرعت جريان كمتر تکمیل می کند، ولی تاثیر تغییرفاز بر انتقال حرارت در سرعتهای کمتر از 1m/s برای تمامی حالتها مقدار قابل توجهی نیست. با افزایش سرعت ورودی از u_{in}=1m/s به u_{in}=2m/s، در تمامی حالتها PEF مقداری بیشتر از ۱ داشته که نشانگر برتری میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل می باشد. همانگونه که پیش تر ذکر شد در b=0.175mm به دلیل افزایش سطح تماس سیال خنک کننده با بسترجامد توسط محيط متخلخل بيشترين ضريب عملكرد مشاهده مىشود.





شکل ۱۱ ضریب عملکرد میکروچاه گرمایی برحسب سرعتهای ورودی مختلف برای طولهای مختلف قطر کوچک بیضی در شرایط 0.5 to 0.5 e=3 و Cm-10%

۵- نتیجه گیری

در مطالعهی حاضر، میکرو چاه گرمایی سه بعدی حاوی سوسپانسیون مواد تغییر فاز دهنده با سطح مقطع بیضوی متخلخل با آرایشهای تخلخل ILPL. DLPT و DLPT تحت شار حرارتی یکنواخت، بصورت عددی شبیه سازی شده است و تاثیر آرایشهای تخلخل ذکر شده بر دمای موضوعی، 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. ILPT وDLPT به ترتیب دارای بیشترین و کمترین افت فشار میباشند. به طوری که در سرعت ۲ متر بر ثانیه افت فشار درآرایش ILPT نسبت به آرایش DLPT ، CPC درصد افزایش مییابد.
- ۲. با افزایش قطر کوچک بیضی، به دلیل کاهش محیط متخلخل، با افزایش سرعت ورودی سیال افت فشار کاهش مییابد به طوری که در b=0.275mm و *u_{in} = 2m/s* افت فشار نسبت به b=0.175mm درصد کاهش یافته ومقاومت حرارتی ۳۵.۵۰ درصد افزایش یافته است.
- ۳. کاهش تخلخل خطی در راستای عرض کانال (DLPT) و تخلخل ثابت (CP) نسبت به آرایشهای دیگر به ترتیب بیشترین عدد ناسلت میانگین را نسبت به آرایشهای دیگر دارا میباشند.
- $u_{in} \geq 0$ در سرعتهای ورودی پایین PEF کمتر از ۱ بوده و در $1 \leq 1$. در سرعتهای ورودی پایین PEF کمتر از ۱ داشته که نشانگر برتری 1m/s میکروچاه گرمایی متخلخل نسبت به میکروچاه گرمایی بدون محیط متخلخل میباشد.



5th National Conference on Computational and Experimental Mechanics, SRTTU, Tehran 16 February 2023

کسر جرمی، ٪	C_m
کسر جرمی، ٪	C_{v}
ضريب فورشهايمر	C_F
ظرفیت گرمایی ویژه(<u>غر</u>)	C_p
افت فشار (Pa)	ΔP
عدد ناسلت	Nu
مقاومت محلي موضعي(k/w)	R_L
قطر کوچک بیضی(mm)	b
قطر بزرگ بیضی(mm)	а
	علايم يونانى
لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹)	علایم یونانی µ
لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹) چگالی (kgm ⁻³)	علايم يونانی µ م
لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹) چگالی (kgm ⁻³) تخلخل	علایم یونانی μ ε
لزجت دینامیکی (¹ -s ⁻¹ s) چگالی (kgm ⁻³) تخلخل	علایم یونانی μ ۶ زیرنویسها
لزجت دینامیکی (¹ s ⁻¹ s) چگالی (kgm ⁻³) تخلخل تاثیر	علایم یونانی μ ε زیرنویسها eff
لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹) چگالی (kgm ⁻³) تخلخل تاثیر سیال	علایم یونانی µ ٤ زیرنویسها <i>eff</i> f
لزجت دینامیکی (¹ s ⁻¹ s) چگالی (kgm ⁻³) تخلخل تاثیر سیال ورو ^د ی	علایم یونانی µ ٤ زیرنویسها eff f in

۷- مراجع

[1] J. Lee and S. J. Kim, "Effect of channel geometry on the operating limit of micro pulsating heat pipes," Int J Heat Mass Transf, vol. 107, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.036.

- [2] R. Brinda, R. Joseph Daniel, and K. Sumangala, "Effect of aspect ratio on the hydraulic and thermal performance of ladder shape micro channels employed micro cooling systems," in Procedia Engineering, 2012, vol. 38. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.244.
- [3] S. v. Jadhav, P. M. Pawar, and B. P. Ronge, "Effect of pin-fin geometry on microchannel performance," Chemical Product and Process Modeling, vol. 14, no. 1, 2019, doi: 10.1515/cppm-2018-0016.
- [4] K. Ghule and M. S. Soni, "Numerical Heat Transfer Analysis of Wavy Micro Channels with Different Cross Sections," in Energy Procedia, 2017, vol. 109. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.071.
- [5] Y. Sui, C. J. Teo, P. S. Lee, Y. T. Chew, and C. Shu, "Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels," Int J Heat Mass Transf, vol. 53, no. 13–14, 2010, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.022.
- [6] A. V. Arasu and A. S. Mujumdar, "Numerical study on melting of paraffin wax with Al 2O 3 in a square enclosure," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 39, no. 1, 2012, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.09.013.
- [7] R. Akhilesh, A. Narasimhan, and C. Balaji, "Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks," Int J Heat Mass Transf, vol. 48, no. 13, 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.01.032.
- [8] J. M. Khodadadi and S. F. Hosseinizadeh, "Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 34, no. 5, 2007, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.02.005.
- [9] L. Liu, C. Zhu, and G. Fang, "Numerical evaluation on the flow and heat transfer characteristics of microencapsulated phase change slurry flowing in a circular tube," Appl Therm Eng, vol. 144, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.102.
- [10] F. Mobadersani and A. Rezavand Hesari, "Investigation of FHD effects on heat transfer in a differentially heated cavity partially



filled with porous medium utilizing Buongiorno's model," Eur Phys J Plus, vol. 136, no. 7, 2021, doi: 10.1140/epjp/s13360-021-01679-3.

- [11] S. D. Farahani, A. D. Farahani, and E. Hajian, "Effect of PCM and porous media/nanofluid on the thermal efficiency of microchannel heat sinks," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 127, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105546.
- [12] G. Lu, J. Zhao, L. Lin, X. D. Wang, and W. M. Yan, "A new scheme for reducing pressure drop and thermal resistance simultaneously in microchannel heat sinks with wavy porous fins," Int J Heat Mass Transf, vol. 111, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.086.
- [13] L. Liu, G. Alva, Y. Jia, X. Huang, and G. Fang, "Dynamic thermal characteristics analysis of microencapsulated phase change suspensions flowing through rectangular mini-channels for thermal energy storage," Energy Build, vol. 134, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.021.
- [14] M. I. Hasan, "Numerical investigation of counter flow microchannel heat exchanger with MEPCM suspension," Appl Therm Eng, vol. 31, no. 6–7, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.11.032.
- [15] X. Hu and Y. Zhang, "Novel insight and numerical analysis of convective heat transfer enhancement with microencapsulated phase change material slurries: Laminar flow in a circular tube with constant heat flux," Int J Heat Mass Transf, vol. 45, no. 15, 2002, doi: 10.1016/S0017-9310(02)00034-0.
- [16] A. Ghahremannezhad and K. Vafai, "Thermal and hydraulic performance enhancement of microchannel heat sinks utilizing porous substrates," Int J Heat Mass Transf, vol. 122, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.024.
- [17]B. Alazmi and K. Vafai, "Constant wall heat flux boundary conditions in porous media under local thermal non-equilibrium conditions," Int J Heat Mass Transf, vol. 45, no. 15, 2002, doi: 10.1016/S0017-9310(02)00044-3.
- [18] H. Dai and W. Chen, "Numerical investigation of heat transfer in the double-layered minichannel with microencapsulated phase change suspension," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 119, 2020, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104918.
- [19]T. C. Hung, W. M. Yan, X. D. Wang, and Y. X. Huang, "Optimal design of geometric parameters of double-layered microchannel heat sinks," Int J Heat Mass Transf, vol. 55, no. 11–12, 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.059.
- [20] B. Wang et al., "Numerical configuration design and investigation of heat transfer enhancement in pipes filled with gradient porous materials," Energy Convers Manag, vol. 105, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.064.
- [21] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and P. Nithiarasu, "Introduction to the Equations of Fluid Dynamics and the Finite Element Approximation," in The Finite Element Method for Fluid Dynamics, 2014. doi: 10.1016/b978-1-85617-635-4.00001-7.
- [22] L. Chuan, X. D. Wang, T. H. Wang, and W. M. Yan, "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, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.04.005.
- [23] H. Dai, W. Chen, X. Dong, Y. Liu, and Q. Cheng, "Thermohydraulic performance analysis of graded porous media microchannel with microencapsulated phase change material suspension," Int J Heat Mass Transf, vol. 176, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121459.