

تأثیرات پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در کانال متخلخل: با شرط عدم تعادل حرارتی

طاهر ارمغانی^{۱*}، محمد جواد مغربی^۲ و محسن نظری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
واژگان کلیدی: انتقال حرارت اجباری، نانوسیال، محیط متخلخل، عدم تعادل حرارتی.	در این پژوهش، انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در کانال متخلخل دو بعدی با شرط عدم تعادل حرارتی بین فازها به صورت عددی حل و بررسی شده است. در این پژوهش، جریان توسعه یافته فرض شده و عدم تعادل حرارتی بین سیال و نانو ذره و جامد برقرار است و برای هر یک از فازها معادله انرژی جداگانه ای نوشته می شود. کسر حجمی نانوذرات دارای توزیع غیریکنواخت می باشد و بنابراین معادلات سه گانه انرژی و پیوستگی نانوذرات کوپل هستند و با هم حل می شوند. تأثیرات تغییرات پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد بر روی توزیع دمای جامد و سیال و نانوذره بررسی می شوند. همچنین معادله ای برای محاسبه شار حرارتی جذب شده توسط سیال، نانوذره و جسم جامد ارائه شده است. نتایج، کاهش دمای متوسط سیال را با افزایش پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد نشان دادند. با افزایش پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد، گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره افزایش می یابد و در نتیجه شار حرارتی سیال افزایش می یابد. تأثیرات پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد، توزیع دمای جامد و شار حرارتی جامد و نانوذره مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

۱- مقدمه

حرارتی می باشند. تا کنون محققین بسیاری انتقال حرارت نانوسیالات را در هندسه های مختلف از طریق آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند [۲-۷] و به بررسی اثرات افزودن نانوذرات به سیال پایه پرداخته اند و بهبود انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات را نسبت به سیال پایه گزارش کرده اند.

برای حل عددی انتقال حرارت نانوسیالات یکی از روشهای متداول روش تکفازی است. در روش تکفازی برای کسر حجمی نانوذرات توزیع یکنواخت و ثابت فرض شده و خواص حرارتی و هیدرودینامیکی موثر نانوسیال بر اساس توزیع کسر حجمی ثابت در معادلات بقا جایگزین خواص سیال پایه می شوند. روش دیگری که مورد توجه محققین قرار دارد روش دوفازی است. در روش دوفازی کسر حجمی دارای توزیع غیر یکنواخت بوده و بنابراین

نانوسیالات، نامی که توسط چوی [۱] به دنیا معرفی شد، سوسپانسیون هستند که از دو بخش سیال پایه و نانوذرات تشکیل شده اند. سیالات پایه عموماً شامل آب، اتیلن گلیکول و روغن هستند. نانوذرات از جنسهای مختلف با ابعادی کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر می باشند. در مقایسه با سیال پایه، نانوسیالات دارای قابلیت انتقال حرارت بیشتری بوده و دارای کاربردهای فراوانی مانند خنک کاری وسایل الکترونیکی، میکرومکانیک و مبدلهای

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: armaghani.taher@yahoo.com

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهدیشهر، استادیار گروه مکانیک، مهدی شهر

ایران

۲. دانشگاه فردوسی مشهد، استاد گروه مکانیک، مشهد، ایران

۳. دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشیار گروه مکانیک، شاهرود، ایران

معادله توزیع کسر حجمی به معادلات بقا افزوده می‌شود. محققین بسیاری از روشهای تکفازی و دوفازی برای حل انتقال حرارت نانوسیالات بهره برده‌اند [۸-۱۰].

بونگیورنو [۱۱]، هفت مکانیزم حرکتی بین نانوذرات و سیال پایه را بیان کرد و نشان داد که حرکت براونی (حرکت نانوذرات از غلظت زیاد به کم) و اثر ترموفورز (حرکت نانوذرات از ناحیه دما بالا به دما پائین) مکانیزمهای غالب و مؤثر بر انتقال حرارت نانوسیالات در رژیم آرام می‌باشند. بر این اساس این دو جمله در معادلات بقا وارد شدند و به مدل بونگیورنو مشهور شدند.

هیپات و کوثری [۱۲] از مدل بونگیورنو^۱ برای بررسی عددی اثرات مهاجرت نانوسیالات بر روی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات جریان یافته درون لوله استفاده کردند. نتایج نشان داد که مهاجرت ذرات نقش بسیار مهمی در افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی دارند و ضریب انتقال حرارت حاصل از مدل بونگیورنو نسبت به ضریب انتقال حرارت حاصل از روش تکفازی مقدار بیشتری دارد. همچنین نتایج نشان دادند که نتایج حاصل از مدل بونگیورنو به نتایج تجربی و به واقعیت نزدیکتر است.

یکی دیگر از راهکارهای افزایش انتقال حرارت استفاده از محیط متخلخل می باشد برای مدلسازی انتقال حرارت در محیط متخلخل دو فرضیه قابل قبول است: تعادل حرارتی بین فازها (فازها دارای توزیع دمایی یکسان هستند) و عدم تعادل حرارتی بین فازها (فازها دارای توزیع دمایی متفاوت هستند). هر چند مدل تعادل حرارتی در بسیاری از مسائل مهندسی قابل قبول است اما در بسیاری از مسائل نظیر (خنک کاری وسایل الکترونیکی ، رآکتورهای هسته‌ای، انتقال حرارت در محیط متخلخل با چشمه حرارتی و...) معتبر نیست و فازها در عدم تعادل حرارتی قرار دارند و بایستی برای بررسی انتقال حرارت بایستی معادلات انرژی برای هر کدام از فازها حل شود.

و استفاده از نانوسیال در محیط متخلخل بصورت کاربردی در دو مورد گزارش شده است:

میکروکانال: از موارد استفاده میکروکانالها می توان به خنک کاری تجهیزات الکترونیکی اشاره کرد. با توجه به خواص نانوسیالات، استفاده از آن برای سیستمهای خنک کاری توسط محققین پیشنهاد شده است. محققین اخیراً

از معادلات محیط متخلخل و روابط مربوط به آن برای مدلسازی جریان نانوسیالات درون میکرو کانالها بهره برده‌اند، از جمله: کیم و همکاران [۱۳]، کیم و کوزنتسو [۱۴]، عباسی و آقاجفی [۱۵]، تسای و چین [۱۶]، قزوینی و همکاران [۱۷ و ۱۸].

بیوپزشکی: از نانوسیالات برای درمان تومورهای آسیب دیده که دارای دمای بالای ۴۳ درجه سلسیوس می‌باشند استفاده می‌شود. با توجه به اینکه بافتهای زنده نمونه‌ای از محیط متخلخل می‌باشند بنابراین درک مفاهیم انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات در محیط متخلخل بیش از پیش احساس می‌شود. در این زمینه نیز مقالاتی توسط سالوم و همکاران [۱۹-۲۱] به چاپ رسیده است.

بررسی عددی و مطالعه انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در کانال متخلخل توسط مغربی و همکاران [۲۲] انجام شد. بررسی اثرات مهاجرت نانوذرات در کانال متخلخل با شرط تعادل حرارتی بین فازها و حل معادله داری-بریگمن-فرچهمر در حالت توسعه یافته توسط نویسندگان انجام شد. نتایج، افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری را با مهاجرت نانوذرات نشان دادند.

برای بررسی انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل و با شرط عدم تعادل حرارتی بین فازها علاوه بر معادلات انرژی مربوط به سیال و جسم جامد معادله انرژی مربوط به نانوذره نیز اضافه می‌شود که به سه معادله انرژی معروف است. کوزنتسو و نیلد [۲۳] برای اولین بار روش سه معادله دمایی را برای شرط عدم تعادل حرارتی برای سیال پایه، نانوذرات و جسم جامد محیط متخلخل بیان کردند.

اثرات مهاجرت نانوذرات بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در کانال متخلخل و در حالت عدم تعادل حرارتی بین فازها توسط ارمغانی و همکاران [۲۴] انجام شد. نتایج، افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری را با مهاجرت نانوذرات نشان دادند. و مهاجرت نانوذرات به نقش مهمی در افزایش انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل دارد.

در مقالات گذشته انتقال حرارت جابجایی آزاد در محیط متخلخل با شرط تعادل و عدم تعادل حرارتی به صورت عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به موارد اشاره شده نیاز تحقیق و مطالعه بر روی

¹ Buongiorno's model

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} = \frac{1}{\text{RePr}} \left[\nabla^{*2} T_f^* + \frac{\tau}{Le} (\nabla^* \varphi^* \cdot \nabla^* T^*) + \frac{\tau}{Le N_{bt}} (\nabla^* T_f^* \cdot \nabla^* T_f^*) + N_{hp} (T_p^* - T_f^*) + N_{hs} (T_s^* - T_f^*) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_p^*}{\partial t^*} + \frac{1}{\varepsilon} u^* \cdot \nabla^* T_p^* = \frac{1}{\text{RePr}} \left[\varepsilon_p \nabla^{*2} T_p^* + \gamma_p N_{hp} (T_f^* - T_p^*) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_s^*}{\partial t^*} = \frac{1}{\text{RePr}} \left[\varepsilon_s \nabla^{*2} T_s^* + \gamma_s N_{hs} (T_f^* - T_s^*) \right] \quad (4)$$

در شرایط پایدار عدد پکلت هیچ نقشی در معادله انرژی جامد ندارد.

$$\frac{\partial \varphi^*}{\partial t^*} + \frac{1}{\varepsilon} u^* \cdot \frac{\partial \varphi^*}{\partial x^*} = \frac{1}{\text{ReSc}} \left[\nabla^{*2} \varphi^* + \frac{1}{N_{bt}} (\nabla^{*2} T_f^*) \right] \quad (5)$$

متغیرهای بی بعد بصورت زیر هستند:

$$u^* = \frac{u}{u_0}, (x^*, y^*) = \frac{(x, y)}{H}, \varphi^* = \frac{\varphi}{\varphi_0}, t^* = \frac{t u_0}{H}$$

$$T_f^* = \frac{T_f - T_0}{T_1 - T_0}, T_s^* = \frac{T_s - T_0}{T_1 - T_0}, T_p^* = \frac{T_p - T_0}{T_1 - T_0}$$

$$p^* = \frac{P \mu u_0}{KH}, \nabla^* = \frac{\partial}{\partial(x^*, y^*)} \quad (6)$$

که در آن u_0 سرعت متوسط درون کانال و φ_0 و T_0 کسر حجمی و دمای نانوسیال در ورودی کانال و H نیم عرض کانال است.

پارامترهای بی بعد بصورت زیر هستند:

انتقال حرارت اجباری نانوسیالات در محیط متخلخل احساس می شود. هدف از انجام این پژوهش، بررسی عددی انتقال حرارت اجباری نانو سیالات درون کانال متخلخل با شرط عدم تعادل حرارتی و دمای ثابت دیواره می باشد. در این تحقیق فرض بر این است که جسم جامد، نانوذرات و سیال پایه دارای توزیع دمای خاص خود هستند. از معادله دارسی بریکمن در حالت توسعه یافته هیدرولیکی برای شبیه سازی جریان استفاده می شود. از مدل بونگیورنو و سه معادله انرژی برای بررسی انتقال حرارت نانوسیال و جسم جامد استفاده شده است و با توجه به اهمیت مهاجرت نانوذرات اثرات براونی و ترموفورز (مدل بونگیورنو) در معادلات انرژی لحاظ شده است. در این مقاله مدلی برای محاسبه شار حرارتی جذب شده توسط سیال، نانوذره و جسم جامد ارائه شده است. اثرات پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد و نسبت پارامتر هدایت بر روی شار حرارتی و توزیع دمای سیال و نانوذره و جسم جامد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم

انتقال حرارت جابجایی اجباری در کانال متخلخل دو بعدی با دمای ثابت جداره بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل عددی، مدل بونگیورنو به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته است. معادله دارسی بریکمن بدون بعد در حالت توسعه یافته برای حل جریان استفاده شده است.

$$\nabla^{*2} u^* - \frac{u^*}{Da} - \frac{1}{Da} \frac{dP^*}{dx^*} = 0 \quad (1)$$

معادلات بدون بعد انرژی و توزیع کسر حجمی نانوذرات بصورت زیر است:

شار حرارتی بدون بعد به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q^* = \frac{q''}{k_f \frac{(T_1 - T_0)}{H}} \quad (9)$$

$$Q_f^* = \varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0) \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (10)$$

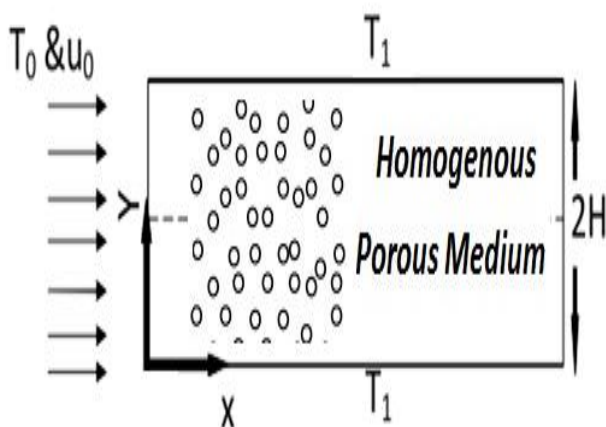
$$Q_p^* = \varepsilon(\varphi^* \varphi_0) \frac{k_p}{k_f} \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (11)$$

$$Q_s^* = (1 - \varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \left(\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (12)$$

از مقدار φ^* در مرکز کانال برای محاسبه شار حرارتی (معادلات (۱۰) و (۱۱)) استفاده می شود.

۳- تعریف هندسه و شرایط مرزی

همانطور که اشاره شد در این مقاله، انتقال حرارت جابجایی اجباری در کانال متخلخل دو بعدی با دمای ثابت دیواره بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ شماتیکی از هندسه مسأله را بیان می کند.



شکل ۱ کانال متخلخل دو بعدی مورد مطالعه

شرایط مرزی بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} y^* &= 0 \text{ and } 2 \\ T_f^* &= 1, T_p^* = 1, T_s^* = 1, \varphi^* = 0, u^* = 0 \\ x^* &= 0 \\ T_f^* &= 1, T_p^* = 1, T_s^* = 1, \varphi^* = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

$$Le = \frac{\alpha_f}{D_B \varphi_0}, Re = \frac{u_0 H}{\nu}, Sc = \frac{\mu}{\rho D_B}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_f}, \alpha_f = \frac{k_f}{(\rho c)_f}, \tau = \frac{\varepsilon(\rho c)_p}{(\rho c)_f},$$

$$\varepsilon_s = \frac{k_s (\rho c)_f}{k_f (\rho c)_s}, N_{hp} = \frac{H^2 h_{fp}}{\varepsilon(1 - \varphi_0) k_f}$$

$$\gamma_p = \frac{(1 - \varphi_0) (\rho c)_f}{\varphi_0 (\rho c)_p}, N_{hs} = \frac{H^2 h_{fs}}{\varepsilon(1 - \varphi_0) k_f}$$

$$\gamma_s = \frac{\varepsilon(1 - \varphi_0) (\rho c)_f}{(1 - \varepsilon) (\rho c)_s}, \varepsilon_p = \frac{k_p (\rho c)_f}{k_f (\rho c)_p},$$

$$N_{bt} = \frac{D_B \varphi_0 T_1}{D_T \Delta T}, Da = \frac{K}{H^2 \varepsilon} \quad (7)$$

در آن Da, Δ, Re, Sc, Pr به ترتیب عدد پراختل، عدد اشمیت، عدد رینولدز، پارامتر اینرسی و عدد دارسی هستند. Le ، عدد لوئیس و τ چگالی ذره اصلاح شده هستند. N_{bt} نسبت نفوذ اصلاح شده و بیانگر نفوذ براونی به نفوذ ترموفورز است. N_{hp} و N_{hs} به ترتیب اعداد انتقال حرارت مربوط به سیال-جامد و سیال-ذره است. این پارامترها در مقاله واداس [۲۵] اعداد نیلد نامگذاری شدند و ایشان به مقاله نیلد [۲۶] برای نامگذاری اشاره کرد. در این مقاله ما نیز با استناد به مقاله واداس [۲۵] این اعداد را اعداد نیلد می نامیم. γ_p و γ_s ظرفیت حرارتی اصلاح شده^۱، ε_p و ε_s نسبت نفوذ اصلاح شده^۲ هستند. مدل زیر برای محاسبه شار حرارتی جذب شده توسط سیال، نانوذره و جامد ارایه شده است.

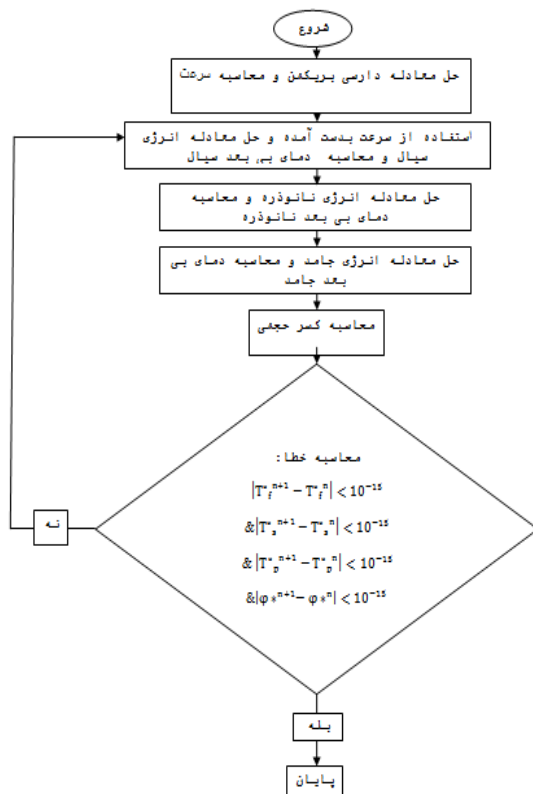
$$q'' = \varepsilon(1 - \varphi) k_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)_{wall} \quad (8)$$

$$+ \varepsilon(\varphi) k_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial y} \right)_{wall} + (1 - \varepsilon) k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{wall}$$

۱ Modified thermal capacity ratio

۲ Modified thermal diffusivity ratio

فلوچارت حل عددی به صورت زیر است:



۵- اعتبارسنجی برنامه عددی:

در سال اخیر در زمینه انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در محیط متخلخل مقاله‌ای توسط نیلد و کوزنتسو [۲۸] ارائه شده است، در این مقاله به اندک بودن منابع تحقیقاتی در زمینه فوق اشاره شده و از مقاله تحقیقاتی مغربی و همکاران [۲۲] به عنوان تنها مقاله موجود در این زمینه نام برده شده است. و علاوه بر آن در پژوهش حاضر و در تمام روش های تحلیلی و در اکثر روش های عددی برای مدل سازی جریان سیال در کانال حاوی ماده متخلخل از نسبت تخلخل ثابت و از ماده متخلخل هموزن استفاده می شود. به بیان دیگر، نسبت تخلخل در معادلات ثابت فرض می شود. ولی در کار تجربی ساخت محیط متخلخل کار دشواری بوده و ثابت نگه داشتن نسبت تخلخل محلی دشوار است. بنابراین جریان سیال و انتقال حرارت در مدل ساخته شده (تجربی) متفاوت از معادلات و مدل های حل شده است (به دلیل تفاوت ماده ساخته شده و مدل های ساده ریاضی موجود). در اکثر مدل های ریاضی و همچنین مدل

برای شرط مرزی خروجی، گرادیان طولی را که با توجه طولیل بودن کانال مقداری بسیار ناچیز است، صفر در نظر می گیریم:

$$x^* = 20$$

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial T_p^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial T_s^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial \phi^*}{\partial x^*} = 0 \quad (14)$$

شرایط اولیه بصورت زیر است:

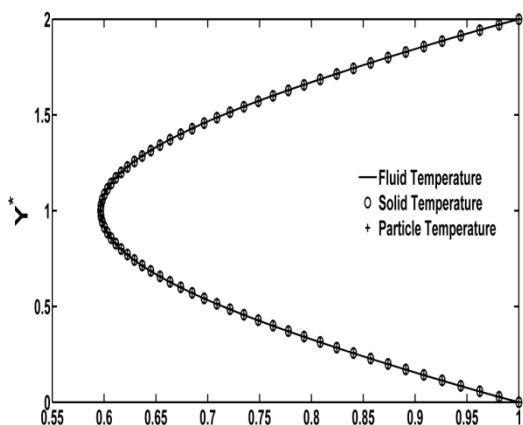
$$\phi^*(t^* = 0) = 1$$

$$T_f^*(t^* = 0), T_p^*(t^* = 0), T_s^*(t^* = 0) \quad (15)$$

۴- مدل سازی عددی:

برای حل معادلات حاکم (۵-۱) جمله های جابجایی از روش تفاضل مرکزی گسسته سازی شده است و برای جمله نفوذ حرارتی نیز از تفاضل مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است. گسسته سازی زمانی از روش کاملا ضمنی انجام شد. جمله ترموفورز که به صورت $\nabla T^* \cdot \nabla T^*$ در معادله انرژی ظاهر شده، به صورت تاخیری (به کمک روشی که در مرجع [۲۷] ذکر شده است) خطی سازی شده است. در این روش با محاسبه مشتق، عبارت غیر خطی به دو جمله تقسیم شده و یک جمله از تکرار حاضر و جمله دیگر از تکرار قبل جایگزین می شود. شبکه یکنواخت برای دامنه محاسباتی استفاده شده و تولید شبکه به روش جبری انجام شده است. برای دامنه محاسباتی یک شبکه 300×300 در نظر گرفته شد و معادلات در این شبکه حل شدند.

در مقاله قبلی نویسندگان [۲۲] از معادله داری بریکمن فرچهیمر برای بررسی جریان نانوسیال در محیط متخلخل استفاده و این معادله با روش نیوتن رافسون حل شد و نتایج حاصل از حل جریان اعتبارسنجی شد. در این مقاله از معادله داری بریکمن برای بررسی جریان نانو سیال در محیط متخلخل استفاده شده است. سرعت بدست آمده از حل معادله داری بریکمن به صورت مستقیم در معادلات انرژی قرار گرفته و معادلات وابسته انرژی و توزیع کسر حجمی بصورت خط به خط با ایجاد ماتریس پنج قطری در دامنه محاسباتی جاووب شده و حل شدند.



شکل ۲. توزیع دمای جامد، نانوذره و سیال در
($N_{hp} = N_{hs} = ۱۰^۶$)

۶- نتایج و بحث:

در این قسمت، نتایج عددی حاصل از حل معادلات حاکم (۵-۱) مربوط به مقادیر زیر مورد بحث و بررسی قرار می گیرد:

$$\varphi_0 = ۰.۳, N_{bt} = ۰/۱, Le = ۱۰۰, Sc = ۱۰۰,$$

$$\gamma_p = ۱۰, \gamma_s = ۱۰, Pr = ۱, Re = ۱۵۰, \tau = ۱$$

$$Da = ۰.۲, \frac{1}{Da} \frac{dP}{dx} = -۲.$$

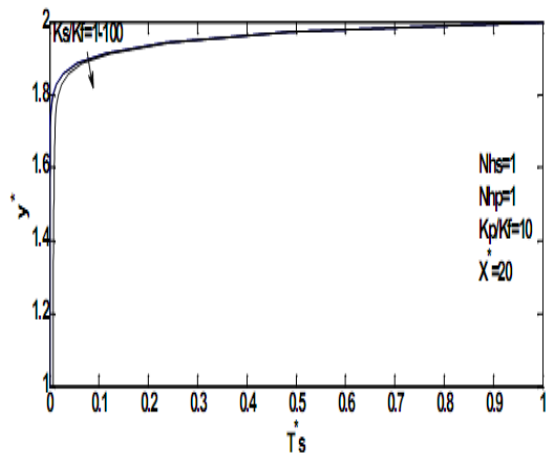
نتایج تاثیرات N_{hp} و N_{hs} را بر روی توزیع دما و شار حرارتی بدون بعد نشان می دهد. پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد (N_{hp} و N_{hs}) در بازه ۱-۱۰۰ تغییر می کند و $\varepsilon_s = ۱۰$, $\varepsilon_p = ۱۰$. شکل ۳ تاثیر N_{hs} را بر روی توزیع دمای سیال نشان می دهد. دمای متوسط سیال با افزایش N_{hs} کاهش می یابد ولی گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره با افزایش می یابد. معادلات انرژی برای فازهای جامد و نانوذرات به ازای $\gamma_p = \gamma_s = \varepsilon_p = \varepsilon_s$ و در شرایط پایدار مقادیر یکسانی را برای جامد و ذره به دست می دهد و بنابراین توزیع دمای سیال به ازای تغییرات N_{hp} مانند شکل ۳ است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است با افزایش N_{hs} دمای سیال به دمای جسم جامد نزدیک می شود و با میل نمودن N_{hs} به سمت بینهایت همانطور که اشاره شد شاهد شرایط تعادل حرارتی هستیم. به همین علت دمای سیال با افزایش N_{hs} کاهش می یابد.

مقاله حاضر اثری از تورتوسیتی نیست. ولی یک پارامتر مهم در مواد متخلخل ساخته شده تورتوسیتی، ارتباط حفره ها و مقدار PPI (Pore Per Inch) است. با توجه به مواردی که مختصرا ذکر شد، امکان مقایسه مدل های عددی با کارهای تجربی نیز دشوار است. فلذا اعتبارسنجی به کمک معادلات کلاسیک و دارای حل دقیق انجام شده است.

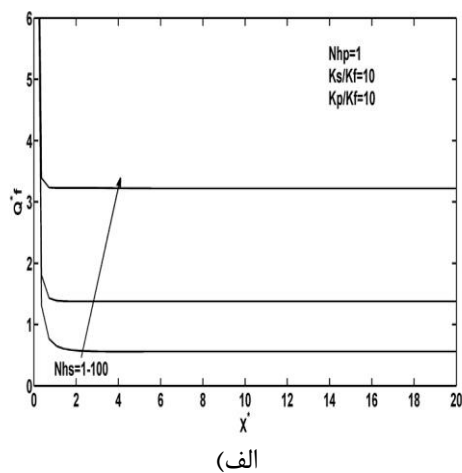
معادله انرژی سیال، برای پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد برابر با صفر، معادله انرژی با شرط تعادل دمایی است. برای بررسی صحت کد عددی نوشته شده، پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد برابر با صفر قرار داده شد و نتایج حاصله، همان نتایج گزارش و اعتبارسنجی شده در مقاله قبلی نویسندگان [۲۲] می باشد. زمانی که نسبت تخلخل برابر یک باشد کانال متخلخل همان کانال معمولی خواهد بود. برای بررسی صحت برنامه عددی، معادله انرژی با در نظر گرفتن جریان توسعه یافته در کانال و با صفر کردن ضریب نفوذ براونی و ترموفورز حل شد. برای عدد ناسلت در حالت کاملا توسعه یافته حرارتی (در روش حاضر) عدد $۷/۵۴۲$ بدست آمده است که در کتب انتقال حرارت (مرجع [۲۹]) نیز به آن اشاره شده است. همچنین وابستگی نتایج عدد ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته حرارتی به تعداد شبکه مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته کانال برای شبکه های ۱۰۰×۱۰۰ ، ۲۰۰×۲۰۰ ، ۳۰۰×۳۰۰ و ۴۰۰×۴۰۰ محاسبه شد و محاسبات، استقلال نتایج از تعداد شبکه را نشان دادند.

برای بررسی صحت حل عددی معادلات (۴۳)، توزیع دمای سیال در حالت تعادل دمایی گزارش شده در مقاله قبلی نویسندگان [۲۲] در معادلات (۴۳) قرار داده شد و به ازای مقادیر حدی بسیار بزرگ برای پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد ($N_{hp} = N_{hs} = ۱۰^۶$)، توزیع دمای جامد و نانوذره همپوشانی کاملی با توزیع دمای سیال مشاهده شد. شکل (۲) بیانگر همپوشانی توزیع دمای سیال، نانوذره و جامد می باشد.

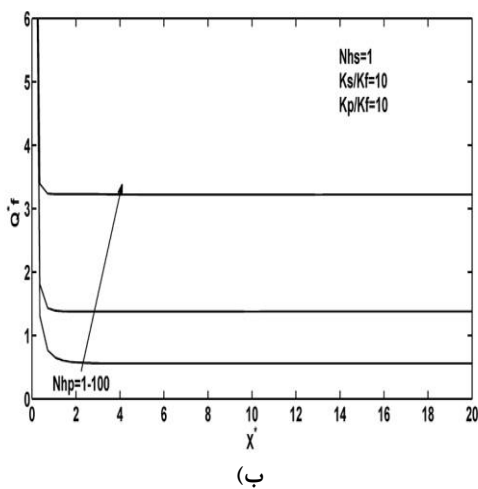
گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره با افزایش N_{hs} افزایش می‌یابد و این ترم، ترم غالب است شار حرارتی سیال نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵. توزیع دمای جامد به ازای مقادیر مختلف نسبت ضریب هدایت



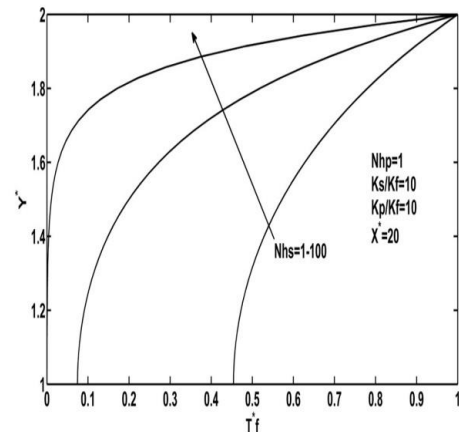
(الف)



(ب)

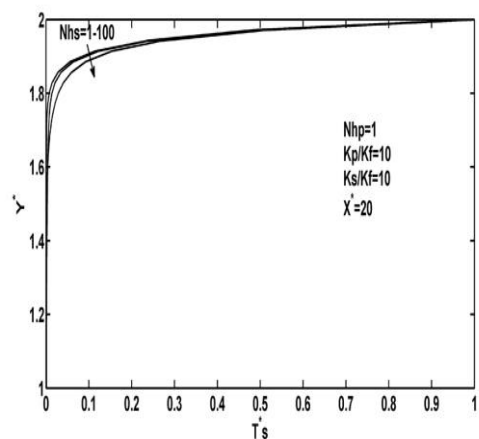
شکل ۶. شار حرارتی بدون بعد سیال به ازای مقادیر مختلف: (الف)

N_{hs} (ب) N_{hp}



شکل ۳. توزیع دمای سیال به ازای مقادیر مختلف N_{hs}

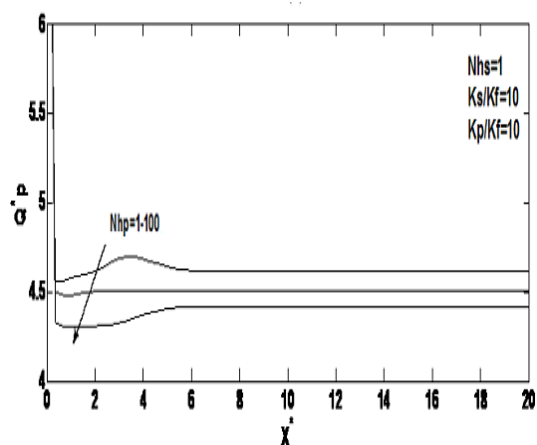
شکل ۴ تغییرات توزیع دمای جامد را با تغییرات N_{hs} نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است تغییرات N_{hs} تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی توزیع دمای جامد ندارد.



شکل ۴. توزیع دمای جامد به ازای مقادیر مختلف N_{hs}

شکل ۵ تاثیرات نسبت پارامتر هدایتی را بر روی توزیع دمای جامد در محیط متخلخل نشان می‌دهد. مقدار ε_s در بازه ۱-۱۰۰ تغییر می‌کند و نتایج به ازای $N_{hp}=1$ نشانگر N_{hs} و $\varepsilon_p = 10$ گزارش شده اند و شکل ۶ نشانگر افزایش دمای جامد به ازای افزایش ε_s است ولی تغییرات، به ازای تغییرات ε_s در بازه ۱-۱۰۰ اندک است.

شکل ۶ افزایش شار حرارتی بدون بعد جذب شده توسط سیال را با افزایش N_{hs} و N_{hp} نشان می‌دهد. طبق معادله (۱۰) شار حرارتی سیال، متاثر از گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره و مقدار کسر حجمی نانوسیال در مرکز کانال است و ترم اول، ترم غالب است و با توجه به اینکه



(ب)

شکل ۷. شار حرارتی بدون بعد جامد-نانوذره به ازای مقادیر مختلف:

(الف) N_{hs} (ب) N_{hp}

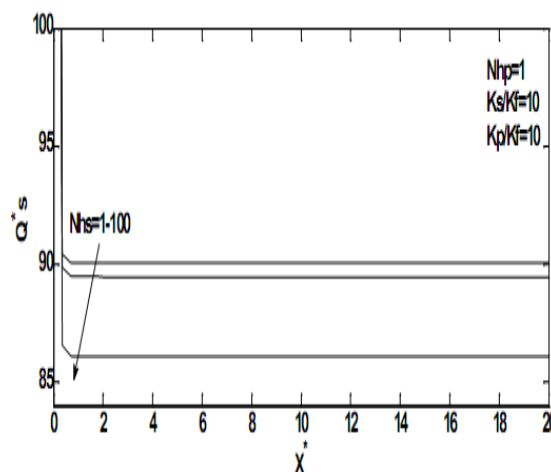
۷- نتیجه گیری:

در این مقاله، انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در کانال متخلخل دو بعدی با دمای ثابت و در شرایط عدم تعادل حرارتی بین فازها به صورت عددی حل و بررسی شده است. همچنین مدلی برای محاسبه شار حرارتی بی بعد جذب شده توسط سیال، جامد و نانوذره ارائه شده است.

نتایج، افزایش شار حرارتی سیال را به ازای افزایش پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد نشان می دهد. شار حرارتی جامد و نانوذره به ازای افزایش پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد کاهش می یابند.

دمای متوسط سیال به ازای افزایش پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد کاهش می یابد و این در حالی است که تغییر محسوسی برای دمای متوسط جامد و نانوذره مشاهده نمی شود.

شکل ۷-الف کاهش شار حرارتی جامد را با افزایش N_{hs} و بخاطر کاهش گرادیان دمای جامد نزدیک دیواره نشان می دهد. شکل ۷-ب نیز کاهش شار حرارتی جامد را با افزایش N_{hp} نشان می دهد. با افزایش N_{hp} ، گرادیان دمای ذره نزدیک دیواره و شار حرارتی ذره کاهش می یابد. شار حرارتی جذب شده توسط ذره نیز مانند شار حرارتی سیال طبق معادله (۱۱) متأثر از گرادیان دمای ذره نزدیک دیواره و کسر حجمی است. ترم اول ترم غالب برای محاسبه شار حرارتی ذره است. افزایش موضعی شار حرارتی ذره در ناحیه در حال توسعه دمایی درون کانال، به دلیل مقدار کسر حجمی در مرکز در این ناحیه می باشد.



(الف)

۸- مراجع

- [1] Choi S.U.S., (1995). "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles". Development and Applications of Non-Newtonian Flows, Vol. 66, pp. 99-105.
- [2] Maiga S.E.B., Nguyen C.T., Galanis N., Roy G., (2004). "Heat transfer behaviors of nanofluid in a uniformly heated tube: Super lattices and Microstructures, Vol. 35, pp. 453-462.
- [3] Zeinali Heris S., Etemad S. Gh., Nasr Esfahani M., (2006). "Experimental investigation of oxide nanofluid laminar forced flow convective heat transfer". Int. Comm. Heat Mass Trans., Vol. 33, pp. 529-535.

- [4] Santra A.K., Sen S., Chkroborty M., (2009). "Study of heat transfer due to laminar flow of copper –water nanofluid through two isothermally heated parallel plate". *Int. J. of Thermal Sci.*, Vol. 48, pp. 391-400.
- [5] Kayhani M.H., Nazari M., Soltanzadeh H., Heyhat M.M., Kowsary F., (2012). "Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al₂O₃/water nanofluid in horizontal tube". *Micro&Nano Letters*, Vol. 7, PP. 223-227.
- [6] Kayhani M.H., Soltanzadeh H., Heyhat M.M., Nazari M., Kowsary F., (2012). "Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid". *Int. Comm. Heat Mass Trans.*, Vol. 39, pp. 456-462.
- [7] Maghrebi M.J., Armaghani T., Talebi F., (2012). "Effects of nanoparticle volume fraction in hydrodynamic and thermal characteristics of forced plane jet". *Thermal Sci. J.*, Vol. 16, pp. 455-468.
- [8] Behzadmehr A., Saffar-Avval M., Galanis N., (2007). "Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in tube with uniform heat flux using a two phase approach", *int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 211-219.
- [9] Armaghani T., Maghrebi M.J., Talebi F., (2009). "Effect of nanofluid volume concentration at laminar jet". *nanospain, Zaragoza, Spain*.
- [10] Lee J., Mudawar I., (2007). "Assessment of the effectiveness of nanofluid for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels". *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 50, pp. 452-463.
- [11] Buongiorno J., (2006). "convection Transport in nanofluid". *ASME J. Heat Trans.* Vol. 128, pp. 240-250.
- [12] Heyhat M.M., kowsary F., (2010). "Effect of particle migration on flow and convective heat transfer of nanofluids flowing through a circular pipe". *ASME. J. Heat Trans.*, Vol. 132, pp. 062401-9.
- [13] Kim S.Y, Koo J.M, Kuznesov A.V., (2001). "effect of an isotropy in permeability and effective thermal conductivity on thermal performance of an aluminum foam heat sink". *Numerical Heat Trans. A*, Vol. 40, pp. 21-36.
- [14] Kim S.Y, Koo J.M, Kuznesov A.V., (2003). "optimization of ping-pong heat sinks using an isotropic local thermal non equilibrium porous model model in a jet impinging channel". *Numerical heat Trans. A*, Vol. 440, pp. 771-787.
- [15] Abbassi H., Aghanajafi C., (2006). "evaluation of heat transfer augmentation in a nanofluid- cooled microchannel heat sink". *J. Fusion Energy*, Vol. 25, pp. 187-197.
- [16] Tsai T., Chein R., (2006). "performance analysis of nanofluid-cooled micro channel heat sinks". *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1013-1026.
- [17] Ghazvini M., Akhavan-behabadi M.A., Esmaili M., (2009). "the effect of viscous dissipation on laminar nanofluid flow in a microchannel heat sink". *Ime. J. mech. eng. Sei* Vol. 223, pp. 2697-2706.
- [18] Ghazvini M., Shokouhmand H., (2009). "investigation of a nanofluid-cooled micro channel heat sink using fin and porous media approaches". *Energy Convers. Management*, Vol. 50, pp. 2373- 2380.
- [19] Salloum M., Mar H., Weeks D., Zhu L., (2008). "controlling nanoparticle delivery in magnetic nanoparticle hyper thermia for cancer treatment: experimental study in agarose gel" *Int. J. Hyperthermia*, Vol. 24, pp. 337-345.
- [20] Salloum M., Mar H., Zhu L., (2008). "aum-vivo experimental study of emperawe elevations in animal use Sue during managncue nanoparticle hyperthermia". *Int. J. Hyperthermia*, Vol. 24, pp. 589-597.
- [21] Salloum M., Mar H., Zhu L., (2009). "enhancement in treatment planning for magnetic nanoparticle hyperhemia optimization of the heat absorption pattern". *Int. J. Hyperthermia*, Vol. 25, pp. 309-321.
- [22] Maghrebi M.J., Nazari M., Armaghani T., (2012). "Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel, *Transp. Porous Media*" Vol. 93, pp. 401-4013.
- [23] kuznetsov, A.V., Niled D.A., (2010) "Effect of local thermal non-equilibrium on the onset of convection in a porous medium layer saturated by a nanofluid." *Transp. Porous Media.*, Vol. 83, pp. 425-436.

- [24] Armaghani, T., Maghrebi, M.J., Chamkha, A.J., Nazari, M., (2014) "Effects of nanoparticles migration on Forced Convection Heat Transfer in a Non-Thermal Equilibrium Porous Channel," J. Of Nanofluids, Vol. 3, pp. 51-59.
- [25] Vadasz, P., (2006) Heat conduction in nanofluid suspension. ASME J. Heat Trans. vol. 128, pp. 465-477.
- [26] Niled, D.A., (1998) Effects of local thermal nonequilibrium in steady convective processes in a saturated porous medium: Forced convection in a channel. J. Porous Media. Vol. 1, pp.181-189.
- [27] Patankar S.V., (1980). "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". Hemisphere, New York.
- [28] Nield, D.A., Kuznetsov, A.V., (2014). "Forced convection in a parallel-plate channel occupied by a nanofluid or a porous medium saturated by a nanofluid", Int. J. Heat Mass Trans., Vol. 70, pp. 430-433.
- [29] Bejan A., (2003). "Convective heat transfer", third ed. John Wiley & Sons, Hoboken.

		علامه و نشانه ها	
نفوذ حرارتی موثر	α		u
نفوذ اصلاح شده	τ	سرعت (ms^{-1})	K
نسبت نفوذ حرارتی اصلاح شده	ε_p	نفوذ پذیری (m^2)	P
نسبت نفوذ حرارتی اصلاح شده		فشار (Nm^{-2})	T
نسبت ظرفیت حرارتی اصلاح شده	ε_s	دما (k)	D_T
نسبت ظرفیت حرارتی اصلاح شده		نفوذ ترموفورز (m^2s^{-1})	D_B
	γ_p	نفوذ براونی (m^2s^{-1})	q''
	γ_s	شار حرارتی	t
		زمان (s)	Re
		عدد رینولدز	Pr
		عدد پرانتل	N_{BT}
	زیرنویس و بالانویسها	ضریب نفوذ اصلاح شده	k
		ضریب هدایت ($\text{wm}^{-1}\text{k}^{-1}$)	Le
سیال	f	عدد لوئیس	x, y
جامد	s	محورهای مختصات (m)	Sc
نانوذره	p	عدد اشمیت	Da
بی بعد	*	عدد دارسی	H
		نیم عرض کانال (m)	N_{HP}
		پارامتر مربوط به انتقال حرارت سیال/جسم جامد	N_{HS}
		پارامتر مربوط به انتقال حرارت سیال/نانوذره	h_{fp}
		ضریب انتقال حرارت سیال ذره ($\text{wm}^{-3}\text{k}^{-1}$)	h_{fs}
		ضریب انتقال حرارت سیال جامد ($\text{wm}^{-3}\text{k}^{-1}$)	
حروف یونانی			
		نسبت تخلخل	ε
		چگالی (kgm^{-3})	ρ
		کسر حجمی	φ
		نسبت ظرفیت حرارتی	σ
		پارامتر اینرسی	Δ