# تعیین مشخصههای حرارتی مشعلهای متخلخل تابشی در حالت گذرا با استفاده از مدل دو شار حرارتی

**خسرو لاری و سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب ٔ** بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید یاهنر کرمان

#### چکیدہ

پژوهش حاضر به منظور بررسی گونهای از مشعلهای احتراقی با بازده حرارتی زیاد و انتشار کم گازهای مضر که بر اساس شعله آزاد عمل نمی کند، انجام شده است. در این مشعل تمامی فرآیند احتراق در داخل یک ماتریس جامد متخلخل صورت می گیرد. برای حل معادلات جریان گاز و محیط متخلخل از یک مدل یک بعدی استفاده شده است. فرآیند احتراق در محیط متخلخل با جایگزینی یک منبع تولید حرارت با قدرت یکنواخت مدل شده است. برای آنالیز حرارتی مشعلهای متخلخل در حالت گذرا، معادلات انرژی برای جریان گاز و محیط متخلخل و معادلات انتقال حرارت تشعشعی بر پایه مدل دو شار حرارتی به صورت عددی حل شده و اثر براین گاز و محیط متخلخل و معادلات انتقال حرارت تشعشعی بر پایه مدل دو شار حرارتی به صورت عددی حل شده و اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. انطباق نتایج کار حاضر و نتایج معتبر دیگر محققین که از مدلهای تشعشعی متفاوتی استفاده نموده اند، بسیار رضایت خش است.

واژههای کلیدی: مشعلهای متخلخل تابشی، مدل دو شار حرارتی، شرایط گذرا، مشخصه های حرارتی

## **Transient Heat Transfer Characteristics of Porous Radiant Burners,** Using Two-flux Radiation Model

K. Lari and S.A. Gandjalikhan-Nassab Mech. Eng. Group, Shahid Bahonar Univ.

#### ABSTRACT

This work has been carried out towards low emission high heat efficiency burners which do not operate with free flames. In such burners, the entire combustion takes place in a porous matrix. A one-dimensional model is used to solve the governing equations for the porous medium and for the gas flow. The combustion in a porous medium is modeled as a spatially dependent heat generation zone. In this work, the coupled energy equations for the gas and for the porous medium, based on two-flux radiation model, are numerically solved in order to analyze the transient thermal characteristics of porous burners. This way, the effects of various factors on the performance of porous radiant burners are determined. Comparison between the present results and the benchmark data shows close agreements.

Key Words: Porous Radiant Burners, Two-flux Model, Transient Condition

khosro\_lari@yahoo.com : (نویسنده پاسخگو): ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد (نویسنده پاسخگو)

r - استادیار: ganj110@mail.uk.ac.ir

دمای گاز ورودی به کانال

فهرست علائم سطح مقطع بر واحد حجم جامد Ab ضريب پخش معكوس В شار تشعشعی تابیده به مشعل B'شار تشعشعی بدون بعد تابیده شده به مشعل،  $B/\sigma T_{g_0}^4$ ظرفيت حرارتي С قطر ذرات  $d_{p}$ Fضريب اينرسى h ضريب انتقال حرارت جابجايي k ضریب هدایت حرارتی نفوذپذيري K  $Ax_p^2/l$  طول بدون بعد،  $dx_p^2/l$ L طول مشخصه لايه متخلخل l  $k_{_g}\sigma_{_e}/\sigma T_{_{g_0}}^{_3}$  پارامتر بدون بعد، پار  $N_{g}$  $k_{_{p}}\sigma_{_{e}}/\sigma T_{g_{0}}^{^{3}}$  پارامتر بدون بعد، پار  $N_{p}$ پارامتر بدون بعد، Nu 2L  $N_{I}$  $hl/k_g$  عدد ناسلت،  $Nu_g$ فشار р Р  $h_w/
ho_g c_g u_g$  پارامتر بدون بعد، پارامتر  $\dot{Q}x_{p}^{2}/T_{g_{0}}k_{g}$  ،پارامتر بدون بعد، پارامتر بدون  $P_1$  $P_{e}$  $\rho_{g}c_{g}u_{g}x_{p}/k_{g}$  عدد پکلت،  $P_t$  $h_{_w} x_{_p} / k_{_g} \sigma_{_e} R_{_0}$  پارامتر بدون بعد، پار qشار تشعشعي Q  $q/\sigma T_{g_0}^4$  شار تشعشعی بدون بعد،  $q/\sigma T_{g_0}^4$ Ż شدت توليد حرارت بر واحد حجم  $\varepsilon \sigma x_{p}T_{g_{0}}^{3}/k_{p}$  پارامتر بدون بعد، پارامتر بدون R شعاع كانال  $R_0$ زمان t  $t^*$ Т

$$\sigma T_{g_0}^{\,3}t ig/ 
ho_p c_p x_p$$
 زمان بدون بعد،  $\sigma T_{g_0}^{\,3}t ig/ 
ho_p c_p x_p$  دما

دمای محیط  $T_\infty$ 

$$u$$
 سرعت  
 $x$  محور مختصات در جهت جریان  
 $x$  مخامت لایه متخلخل  
 $x_p$  مخامت لایه متخلخل  
 $x/x_p$  محور مختصات بدون بعد در جهت جریان،  $x/x_p$   
 $x/x_p$  محور مختصات بدون بعد در جهت جریان،  $r$   
 $r$   
 $x_p/R_0$  محور مختصات بدون بعد  $\delta$   
 $r_{p,g}/T_{g_0}$  محاى بدون بعد،  $\sigma_{g}$   
 $r - T_{\infty}/T_{\infty}$  محاى بدون بعد،  $\sigma_{g}$   
 $r - T_{\infty}/T_{\infty}$  محاى بدون بعد،  $\sigma_{max}$   
 $\rho$  دماى بدون بعد،  $\sigma_{\infty}/T_{\infty}$   
 $r - T_{\infty}/T_{\infty}$  محاى بدون بعد،  $\sigma_{\alpha}/T_{\infty}$   
 $r - r_{\alpha}/T_{\infty}$  محاى بدون بعد،  $\sigma_{\alpha}/T_{\infty}$   
 $r - r_{\alpha}/T_{\infty}$  محاى بولتزمن  
 $\sigma_{\alpha}$  مجموع ضرائب پخش و جذب ،  $\sigma_{\alpha}$   
 $\sigma_{\alpha}$  -  $\sigma_{\alpha}$   
 $\sigma_{\alpha}$   
 $\sigma_{\alpha}$  -  $\sigma_{\alpha}$   
 $\sigma_{$ 

زيرنويسها

 $T_{g_0}$ 

#### ۱\_ مقدمه

مشعل های متخلخل تابشی نوع پیشرفتهای از تکنولوژی مشعل های احتراقی است که در آن فرآیند احتراق مخلوط هوا و سوخت در داخل یک محیط متخلخل صورت می گیرد. این خصوصیت مشعل های متخلخل در تقابل با مشعل های متداول است که در آنها احتراق مخلوط سوخت و هوا با تولید شعله همراه است و در خروجی مشعل مشاهده می شود. اینگونه مشعل ها به میزان زیادی بهینه سازی شده اند تا مزایای متعددی نسبت به مشعل های معمولی داشته باشند. از آن جمله میتوان به کاهش انتشار گازهای آلوده کننده حاصل از احتراق همانند OD و xON، محدوده گسترده تر قابلیت اشتعال، افزایش بازده حرارتی، تابش حرارتی خروجی بالاتر و یکنواخت سازی فرآیند احتراق اشاره نمود.

شعلهها در محیط متخلخل دارای سرعت اشتعال بالاتر و محدوده قابلیت اشتعال گستردهتر نسبت به شعلههای آزاد هستند. این اثر اساس پدیدهای است که «احتراق آنتالپی اضافه<sup>(</sup>» نامیده میشود[۱]. براساس آن حرارت تولید شده در منطقه احتراق<sup>۲</sup> از طریق انتقال حرارت تشعشع و رسانایی در ماتریس جامد به گازهای سوخته نشده منتقل میشود.

اگرچه تکنولوژی مشعلهای متخلخل تابشی نسبتاً جدید است، اما کارهای تحقیقاتی بسیاری در این موضوع صورت گرفته است. اچیگو<sup>7</sup> در سال ۱۹۸۲ [۲]، مسأله بازیافت انرژی از گازهای خروجی دستگاههای با درجه حرارت بالا را مورد مطالعه قرار داد. نتایج محاسبات نشان دادند که با نصب یک لایه متخلخل در مسیر عبور جریان گاز داغ خروجی از اگزوز بسیاری از دستگاههای حرارتی، میتوان قسمت اعظمی از انرژی حرارتی گاز را به روش انتقال حرارت جابجایی به محیط متخلخل منتقل نمود و این انرژی دریافتی را به صورت متخلخل منتقل نمود و این انرژی دریافتی را به صورت پخش انرژی تشعشعی از محیط متخلخل صرف نظر شده بود. ونگ<sup>†</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۴ [۳]، مطالعات اچیگو را با در نظر گرفتن اثرات پخش انرژی تشعشعی توسعه دادند.

آنالیز حرارتی سیستمهای بازیافت انرژی با استفاده از محیط متخلخل در حالت گذرا توسط گنجعلیخان نسب در سال ۲۰۰۲ [۴]، مورد مطالعه قرار گرفت که در آن از روش دو

شار حرارتی برای محاسبه انتقال حرارت تشعشعی کمک گرفته شد. در سال ۱۹۸۶اچیگو و همکاران [۵]، کار پیشین خود را با در نظر گرفتن یک منبع تولید حرارت با شدت یکنواخت در داخل محیط متخلخل برای شبیهسازی پدیدهی احتراق گسترش دادند. در این تحقیق از روش انتگرالی برای تعیین توزیع شار تشعشعی در داخل مشعل استفاده شد. نتایج نشان داد که پیش گرم شدن مخلوط سوخت و هوا، باعث افزایش چشمگیر راندمان مشعل میشود.

تونگ<sup>6</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۰ [۶]، پدیده احتراق در مشعلهای متخلخل را در حالت واقعی بررسی نمودند و دریافتند که برای داشتن بیشترین تشعشع خروجی بایستی ضخامت اپتیکی بزرگ باشد و اشتعال در نزدیکی مرکز ماتریس جامد رخ دهد. در سال ۱۹۹۱ تونگ و همکاران [۷]، در کار دیگری برای مطالعه پدیدهٔ احتراق، به جای بررسی این پدیده در حالت واقعی از یک منبع تولید حرارت با شدت یکنواخت استفاده کردند. آنها با در نظر گرفتن تخمین یک بعدی و استفاده از روش هارمونیک کروی<sup>2</sup> در محاسبه شار که تشعشع خروجی از مشعل به ضخامت اپتیکی, ضریب پخش, انتقال حرارت بین فازهای جامد و سیال، و سرعت سیال بستگی دارد. آنها پی بردند که هدایت حرارتی جامد پخش, انتقال حرارت بین فازهای جامد و سیال، و سرعت

برنر<sup>۷</sup>و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۸], با در نظر گرفتن سیستم دو بعدی همراه با مدلسازی پدیده احتراق از طریق حل معادلات حاکم, مشخصههای حرارتی مشعلهای متخلخل را تعیین نمودند. در این کار، مدل خاصی برای تعیین توزیع شار تشعشعی استفاده نشد و صرفاً از نتایج آزمایش کمک گرفته شد.

در سال ۲۰۰۳ تالوگ دار<sup>^</sup> و همکاران [۹], برای آنالیز مشعلهای متخلخل از یک سیستم دو بعدی، با در نظر گرفتن اثرات پخش انرژی تشعشعی توسط محیط متخلخل استفاده کردند. برای مدلسازی پدیده احتراق, از یک منبع تولید حرارت با شدت یکنواخت استفاده شد و برای حل معادلات

8-Talukdar

<sup>1-</sup> Excess Enthalpy Combustion

<sup>2-</sup> Combustion Zone

<sup>3-</sup> Echigo

<sup>4-</sup>Wang

<sup>5-</sup> Tong

<sup>6-</sup> Spjherical Harmonic Method

<sup>7-</sup> Brenner

تشعشعی از روش دیمانسیون به هم ریخته<sup>۱</sup> [۱۰] کمک گرفته شد. قابل ذکر است که روش مذکور محاسبات بسیار پیچیدهای را جهت تعیین شار تشعشعی نیاز دارد.

از آنجا که پدیده انتقال حرارت تشعشعی نقش اساسی را در فرآیند احتراق داخل مشعلهای متخلخل تابشی دارد، داشتن مدل حرارتی مناسب برای آنالیز مشخصههای اینگونه مشعلها بسیار اهمیت دارد. در کار حاضر سعی شده است که برای آنالیز مشعلهای متخلخل از مدل دو شار حرارتی جهت تعیین توزیع شار تشعشعی استفاده شود. لازم به ذکر است که این مدل در عین سادگی از دقت قابل قبولی نیز برخوردار است [۳]. علاوه بر این، نتیجه بررسی مطالعات به عمل آمده در این زمینه نشان میدهد که تا بحال از این روش برای آنالیز مشعلهای متخلخل در حالت گذرا استفاده نشده است.

در مطالعه حاضر مشخصههای جرارتی مشعلهای متخلخل استوانهای شکل با در نظر گرفتن یک سیستم یک بعدی و از طریـق حـل معـادلات انـرژی بـرای گـاز و لایـهی متخلخل در حالت گذرا بـه همـراه معـادلات دو شـار حرارتـی مورد بررسی قرار گرفته است. در این معادلات, اثـرات هـدایت حرارتی و جابجایی هم برای گاز و هم برای محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. محیط متخلخل علاوه بر انتقال حرارت جابجایی با جریان گاز قادر است انرژی تشعشعی را پخش، جذب و صادر نماید. تنها از اثرات تشعشعی گاز در مقایسه با فاز جامد صرف نظر می شود. در این کار یدیده احتراق با در نظر گرفتن یک منبع تولید حرارت با قدرت یکنواخت مدلسازی شده است. برای بررسی اعتبار مدل به کار گرفته شده و روش حل معادلات، نتایج عددی حاصل، با نتایج دیگر محققین مقایسه شده که سازگاری بین این نتایج رضایت بخش بوده است. سرانجام با حل عددی معادلات حاکم سعی خواهد شد اثر یارامترهای مختلف از جمله خواص فیزیکی و تشعشعى محيط متخلخل بركاركرد اينكونه مشعلها بخصوص در شرایط راه اندازی مورد مطالعه قرار گیرد.

## ۲\_ تئوری

در شکل ۱, اجزای اصلی یک مشعل متخلخل نشان داده شده  $2R_{_0}$  است. لایه متخلخل به طول  $x_p$  در داخل کانالی با قطر

نصب شده است به طوری که ضخامت لایه، نسبت به شعاع کانال کوچک در نظر گرفته شده تا تخمین آنالیز یک بعدی صحت داشته باشد. کانال به طول  $x_i$  در سمت چپ و طول در سمت راست لایه متخلخل گسترش داده  $(x_e - x_p)$ شده است. کانال و لایه متخلخل در زمان صفر در دمای محیط،  $T_{\infty}$  قرار دارند. مخلوط سوخت و هوا از مقطع با دمای یکنواخت  $T_{g_0}$  وارد مجرا می شود. جریان  $x = -x_i$ گاز در داخل کانال از نوع اسلاگ<sup>۲</sup> با سرعت  $u_{\sigma}$  و به صورت آرام و دائمی در نظر گرفته میشود. از اثرات تشعشعی گـاز در مقایسه با فاز جامد صرف نظر شده به طوری که پدیده تشعشع فقط در داخل محيط متخلخل وبين ذرات تشكيل دهنده آن برقرار است. موقعیت منبع تولید حرارت که مدل کننده پدیده احتراق است طبق شکل ۱ در محدوده دیار دارد. گاز داخل کانال از طریق دیواره  $x_1 < x < x_2$ می تواند با محیط اطراف با دمای  $T_{\infty}$  انرژی حرارتی مبادله نمايد.



از آنجایی که دو فاز جامد و گاز در تعادل حرارتی قرار ندارند لازم است که معادله انرژی به صورت جداگانه برای هر کدام از این دو فاز نوشته شود. بنابراین معادلات حاکم شامل معادلات انرژی برای گاز و محیط متخلخل و معادلات انتقال حرارت تشعشعی براساس مدل دو شار حرارتی به صورت زیر خواهند بود:

<sup>1 -</sup> Collapsed Dimension

$$\begin{split} \phi \rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} (\pi R_0^{-2}) &= -\phi \rho_g c_g u_g \frac{\partial T_g}{\partial x} (\pi R_0^{-2}) + \phi \frac{\partial}{\partial x} (k_g \frac{\partial T_g}{\partial x}) (\pi R_0^{-2}) - h_w (T_g - T_w) (2\pi R_0) - \\ &- (1 - \phi) h A (T_g - T_p) (\pi R_0^{-2}) + \phi \dot{Q} \delta(x) (\pi R_0^{-2}) \quad , \end{split}$$
(1)  
$$(1 - \phi) \rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} &= -\frac{dq_n}{dx} - (1 - \phi) h A (T_p - T_g) + (1 - \phi) \frac{\partial}{\partial x} (k_p \frac{\partial T_p}{\partial x}), \qquad (\Upsilon)$$
  
$$\frac{dq^+}{dx} &= -2\sigma_a q^+ - 2b\sigma_s q^+ + 2\sigma_a \sigma T_p^{-4} + 2b\sigma_s q^- \quad , \qquad (\Upsilon)$$
  
$$-\frac{dq^-}{dx} &= -2\sigma_a q^- - 2b\sigma_s q^- + 2\sigma_a \sigma T_p^{-4} + 2b\sigma_s q^+ \quad , \qquad (\Upsilon)$$
  
$$q_n &= q^+ - q^- \quad . \qquad (\Delta)$$

$$\rho_{g}c_{g}u_{g}\frac{dT_{g}}{dx} + \frac{2h_{w}}{R_{0}}(T_{g} - T_{\infty}) = 0.$$
  
expression of the second state of

برای حل معادلات حاکم، در ابتدا فرم بدون بعد این معادلات با تعریف پارامترهای بدون بعد زیر به دست آمده است:

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_e x , & \tau_0 &= \sigma_e x_p , \\ \theta_{p,g} &= \frac{T_{p,g}}{T_{g_0}} , & X &= \frac{x}{x_p} , \\ \Theta &= \frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}} , \end{aligned}$$

برای در نظر گرفتن کامل اثرات هدایت حرارتی در گاز، ناحیه محاسباتی<sup>۱</sup> در ابتدا و انتهای لایـه، متخلخـل گسـترش داده میشود شکل ۲. نتـایج عـددی بـه دسـت آمـده از حـل معادلات به روش تکرار نشان میدهد که برای منظـور نمـودن کامل اثرات هـدایت حرارتی در جریـان گاز، بایسـتی رابطـه کامل اثرات هـدایت حرارتی در جریـان گاز، بایسـتی رابطـه باشد [۴]. لازم به ذکر است کـه در ناحیه محاسباتی وجود داشته باشد [۴]. لازم به ذکر است کـه در ناحیه مالـباتی بـین گاز و باشد ا



در ناحیهای که به اندازه کافی از لایه متخلخل دور باشد با توجه به کوچک بودن ضریب هدایت حرارتی گاز، همراه با کم بودن گرادیان درجه حرارت در آن ناحیه میتوان از ترم هدایت حرارتی در گاز، چشمپوشی نمود. بنابراین برای بدست آوردن دمای گاز، معادله زیر در حالت دائمی مورد استفاده قرار می گیرد که به صورت تحلیلی قابل حل است:

<sup>2-</sup> Delta Function

<sup>1-</sup> Computational Domain

که در پارامترهای فوق Pe و Nu عدد پکلت و ناسلت جریان،  $N_g$  و  $N_g$  پارامترهای هدایت حرارتی، l طول مشخصه لایه متخلخل،  $\Gamma$  نسبت ظرفیت حرارتی لایه متخلخل به ظرفیت حرارتی گاز،  $N_l$  نسبت انرژی انتقال یافته بین فاز جامد و گاز به روش جابجایی به انرژی منتقل شده از طریق هدایت حرارتی گاز و P نسبت انرژی حرارتی انتقال یافته از طریق دیواره کانال به انرژی جریان سیال است. با استفاده از این پارامترها، فرم بدون بعد معادلات حاکم به صورت زیر به دست میآید:

$$Q_{n} = \frac{q_{n}}{\sigma T_{g_{0}}^{4}} \qquad t^{*} = \frac{\sigma T_{g_{0}}^{3} t}{\rho_{p} c_{p} x_{p}} \qquad \omega = \frac{\sigma_{s}}{\sigma_{e}}$$

$$\delta = \frac{x_{p}}{R_{0}} \qquad Pe = \frac{\rho_{g} c_{g} u_{g} x_{p}}{k_{g}} \qquad N_{l} = N u_{g} L$$

$$L = \frac{A x_{p}^{2}}{l} \qquad N u_{g} = \frac{h l}{k_{g}} \qquad P_{t} = \frac{h_{w} x_{p}}{k_{g} \sigma_{e} R_{0}}$$

$$P = \frac{h_{w}}{\rho_{g} c_{g} u_{g}} \qquad N_{p} = \frac{k_{p} \sigma_{e}}{\sigma T_{g_{0}}^{3}} \qquad N_{g} = \frac{k_{g} \sigma_{e}}{\sigma T_{g_{0}}^{3}}$$

$$P_{1} = \frac{\dot{Q} x_{p}^{2}}{T k} \qquad \Gamma = \frac{\rho_{p} c_{p}}{\rho_{g} c_{g}} \qquad \xi_{f} = \frac{x_{1} + x_{2}}{2 x_{p}}$$

$$R = \frac{\varepsilon \sigma x_p T_{g_0}^3}{k_p} \qquad Nu_p = \frac{h x_p}{k_p} \qquad B'_{i,e} = \frac{B_{i,e}}{\sigma T_{g_0}^4}$$

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial t^*} = \frac{N_g \Gamma}{\tau_0} \left[ -P_e \frac{\partial \theta_g}{\partial X} + \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial X^2} - N_l \left( \frac{1-\phi}{\phi} \right) \left( \theta_g - \theta_p \right) - \frac{2P_t \tau_0}{\phi} \left( \theta_g - \theta_\infty \right) + P_l \delta(X) \right], \tag{Y}$$

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial t^*} = -\left(\frac{\tau_0}{1-\phi}\right)\frac{\partial Q_n}{\partial \tau} - \frac{N_g N_l}{\tau_0}\left(\theta_p - \theta_g\right) + \left(\frac{N_p}{\tau_0}\right)\frac{\partial^2 \theta_p}{\partial X^2},\tag{A}$$

$$\frac{dQ^{+}}{d\tau} = -2(1-\omega)Q^{+} - 2b\omega Q^{+} + 2(1-\omega)\theta_{p}^{-4} + 2b\omega Q^{-} \quad , \tag{9}$$

$$-\frac{dQ^{-}}{d\tau} = -2(1-\omega)Q^{-} - 2b\omega Q^{-} + 2(1-\omega)\theta_{p}^{-4} + 2b\omega Q^{+}, \qquad (1\cdot)$$

$$\frac{\partial Q_{n}}{\partial t} = 4(1-\omega)\theta_{p}^{-4} - 2(1-\omega)(Q^{+}+Q^{-}) \qquad (1\cdot)$$

$$\frac{\partial Q_n}{\partial \tau} = 4(1-\omega)\theta_p^4 - 2(1-\omega)(Q^+ + Q^-), \tag{11}$$

<sup>۳</sup> که در آن، 
$$K$$
 و  $F$  به ترتیب نفوذپذیری<sup>۲</sup> و ضریب اینرسی $K$  هستند و بر اساس روابط زیر محاسبه می شوند [۱۲]:

$$K = \frac{\phi^3 d_p^2}{150(1-\phi)^2}, \quad F = \frac{1.75}{\sqrt{150}\phi^{3/2}}.$$
 (14)

$$X = X_{-m} : \theta_g = \theta'_g, \qquad (1\Delta)$$

2- Permeability

3- Inertia Coefficient

و در نقاط مرزی ناحیه محاسباتی (  $X_{-m}$  و  $X_{n+m}$  ) معادله انرژی بدون بعد به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial X} + 2P\delta \left( \theta_g - \theta_\infty \right) = 0. \tag{17}$$

همچنین، برای محاسبه افت فشار در جریان گاز داخل محیط متخلخل، معادله فورچیمر<sup>۱</sup> بصورت زیراستفاده شده است [۱۱]:

$$\Delta p = \frac{\mu x_p}{K} u_g + \frac{\rho_g F x_p}{\sqrt{K}} u_g^2 \tag{17}$$

**1-** Forcheimer Equation

$$X = X_{n+m} : \quad \frac{\partial \theta_g}{\partial X} = -2P\delta \left( \theta_g - \theta_\infty \right) . \tag{19}$$

مقدار  $\theta_g'$  از حل تحلیلی معادله (۱۲) به دست آمـده و بـه صورت ذیل قابل محاسبه است:

$$\theta'_{g} = \theta_{\infty} + (1 - \theta_{\infty}) \exp(-2P \delta X_{-m}). \tag{1Y}$$

دو شرط مرزی زیر نیز در زمان  $0 < t^*$  برای حل معادله انرژی مربوط به فاز جامد معادله(۸) مورد استفاده قرار می گیرد:

$$X = X_1 : \frac{\partial \theta_p}{\partial X} = Nu_p (\theta_p - \theta_g) + R(\theta_p^4 - \theta_i^4),$$
(1A)

$$X = X_n : -\frac{\partial \theta_p}{\partial X} = Nu_p(\theta_p - \theta_g) + R(\theta_p^4 - \theta_e^4),$$
(19)

کـه در آن،  $\theta_e$  و  $\theta_e$  دمـای بـدون بعـد محـیط در ورودی و خروجی کانال است. شرایط مرزی زیـر نیـز در ابتـدا و انتهـای لایه متخلخل در زمان 0 < t برای محاسبه شار تشعشعی بـالا دست و پایین دست به کار میرود:

$$Q^{+}(X_{1}) = B'_{i}; \quad Q^{-}(X_{n}) = B'_{e}, \tag{(7.)}$$

و در نهایت شـرایط اولیـه بـرای حـل معـادلات (۲) و (۸) بـه صورت زیر اعمال می شوند:

$$t^* = 0: \theta_g = 1; \qquad \qquad \theta_p = \theta_\infty. \qquad (\Upsilon)$$

**۴** روش حل برای تعیین رفتار حرارتی مشعلهای متخلخل، داشتن توزیع درجه حرارت گاز و لایه متخلخل  $g_{g} \ e_{g} \ e$  و همچنین توزیع شار تشعشعی  $Q^{+}, Q^{-}$  در طول مشعل ضروری است که مقادیر این متغیرها در هر یک از نقاط محاسباتی از حل عددی معادلات (۲) تا (۱۰) به طور همزمان به دست میآید. برای حل عـددی معادلات (۲) و (۸) کـه بـه صورت معادلـه دیفرانسیل جزئی هستند از روش کرانک \_نیکلسون<sup>۲</sup> برای بـه

2- Runge-Kutta

دست آوردن فرم اختلاف محدود استفاده میشود. بـر ایـن اساس روش مجزاسازی برای هر یک از ترمهای ایـن معـادلات به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial t^*} = \frac{\theta_{g_i}^{n+1} - \theta_{g_i}^n}{\Delta t^*} , \qquad (\Upsilon\Upsilon)$$

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial X} = \frac{1}{4} \left[ \frac{\theta_{g_{i+1}}^n - \theta_{g_{i-1}}^n}{\Delta X} + \frac{\theta_{g_{i+1}}^{n+1} - \theta_{g_{i-1}}^{n+1}}{\Delta X} \right] , \quad (\Upsilon\Upsilon)$$

$$\frac{\partial^{2} \theta_{g}}{\partial X^{2}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\theta_{g_{i+1}}^{n} - 2\theta_{g_{i}}^{n} + \theta_{g_{i-1}}^{n}}{(\Delta X)^{2}} + \frac{\theta_{g_{i+1}}^{n+1} - 2\theta_{g_{i}}^{n+1} + \theta_{g_{i-1}}^{n+1}}{(\Delta X)^{2}} \right] (\Upsilon \Delta)$$

معادلات (۹) و (۱۰) نیز که از نوع معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه یک هستند به روش رانج کوتای مرتبه چهارم<sup>۲</sup> حل میشوند.

برای داشتن نتایجی که مستقل از تعداد گرههای ناحیه محاسباتی باشد، از ۱۴۰ نقطه گره با فاصله یکنواخت، مطابق با شکل۲ استفاده شده است که در آن n=100 برای لایه متخلخل و m=20 برای نواحی خارج لایه متخلخل در نظر گرفته شده است. مراحل انجام محاسبات را میتوان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱-در زمان اولیه 
$$0 = {}^{*}$$
، دمای لایه متخلخل در هر یک از  
نقاط گره طبق شرط مرزی (۱۹) برابر با دمای محیط  
است، بنابراین معادلات (۹) و (۱۰) به روش رانج کوتا به  
طور همزمان قابل حل هستند تا مقادیر  $Q^{-}$  و  $Q^{-}$  در هر  
یک از نقاط لایه متخلخل به دست آید.  
۲-با استفاده از فرم اختلاف محدود مربوط به معادله (۸)،  
مقادیر  $q^{-}$  در پله زمانی بعدی محاسبه می شود.  
۳-معادله (۲) با استفاده از مقادیر  $q^{-}$  په دست آمده از مرحله  
قبل حل شده تا مقادیر  $g^{-}$  در پله زمانی بعدی محاسبه

### ۵\_ بررسی صحت نتایج

در این قسمت برای بررسی صحت روش به کارگرفته شده در آنالیز حرارتی مشعلهای متخلخل، مقایسهای بین نتایج

<sup>1-</sup> Crank-Nicolson

عددی ناشی از محاسبات به عمل آمده با نتایج گزارش شده در مرجع شماره [۷] انجام شده است. پارامترهای بعددار و بدون بعد استفاده شده برای مشعل متخلخل مورد آزمایش در مطالعه Tong و همکاران [۷]، به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آمده است:

توزیع درجه حرارت گاز در طول مشعل در حالت دائم در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل دیده میشود که بیشترین دمای گاز در ناحیه احتراق واقع شده و پس از آن به واسطه تبدیل انتالپی گاز به انرژی تشعشعی افت درجه حرارت در جریان گاز صورت می پذیرد. ازدیاد درجه حرارت مخلوط سوخت و هوا قبل از رسیدن به محفظه احتراق بوضوح مشخص است. وقوع این پدیده باعث پیش گرم شدن گاز شده که یکی از مزایای مهم مشعلهای متخلخل محسوب میشود. به هرحال نتایج کار حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع [۷] نزدیک است. اگرچه از دو مدل تشعشعی متفاوت برای محاسبه شار تشعشعی استفاده شده است. لازم به ذکر رخ میدهد که با توجه به دمای ورودی گاز است که حداکثر خطا در این شکل در نزدیکی ورودی گاز رخ میدهد که با توجه به دمای ورودی گاز

### نتايج وبحث

در شکل ۴ رفتار گذرای دمای گاز در طول لایه متخلخل در پلههای زمانی مختلف نشان داده شده است. ناحیه احتراق با ضخامتی معادل ۰/۱ ضخامت کل لایه متخلخل و دقیقا در وسط لایه مستقر است ( $0.5 = \pi \xi$ ). بنابراین همان گونه که انتظار می رود، دمای نقاط میانی که در محدوده ناحیه احتراق قرار دارند در اثر آزاد شدن انرژی حاصل از فرآیند احتراق با گذشت زمان بتدریج افزایش یافته، تا به حالت دائمی برسد

دول۱ ــ پارامىرھاي بدون بعد مورد آرمايس	د مورد آزمایش	های بدون بع	_ پارامتر	عدول ۱
---	---------------	-------------	-----------	--------

پارامترها	واحد	مقادیر در مطالعه Tong و همکاران [۷]
$\rho_{g}c_{g}$	$kJ/m^3K$	0.2432
$\rho_p c_p$	$kJ/m^3\overline{K}$	72.960
ug	m / s	2.8
$T_{\infty}$	K	298
$T_{g_0}$	Κ	298
$\dot{Q}$	$W/m^3$	$1.5 \times 10^{9}$
$x_p$	т	0.01
$\hat{R_0}$	m	0.05
$x_2 - x_1$	m	0.001
hA	$W/m^3K$	$2 \times 10^{9}$
$h_w$	$W/m^2K$	0
kg	W / mK	0.125
k <sub>p</sub>	W / mK	10
$\phi$		0.95

مدول ۲\_ پارامترهای بعددار مورد آزمایش.

یار امتر ها	مقادیر در مطالعه
, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	Tong و همکاران [۷]
${ au}_0$	
ω	0.5
$\delta$	0.2
$N_{g}$	8.33
$N_p$	666
Γ	300
$N_l$	$2 \times 10^{6}$
$P_e$	54.5
$P_1$	4026.8
$P_t$	0
Р	0
$Nu_p$	5
R	$1.5 \times 10^{-3}$
$B'_{1,2}$	0



شکل ۴ ـ تغییرات زمانی دمای گاز در طول لایه متخلخل.



شکل ۵۔ تغییرات زمانی دما در نقاط مختلف لایه متخلخل

برای نمایش رفتار حرارتی مشعلهای متخلخل، تعیین توزیع درجه حرارت گاز، محیط متخلخل و همچنین توزیع شار تشعشعی ضروری است. در شکل  $\mathbf{r}$  نحوه تغییرات این متغیرهای وابسته در طول مشعل متخلخل و در حالت رسیدن به شرایط دائم ترسیم شده است. همان طور که در شکل  $\mathbf{r}$ -الف دیده میشود، انرژی آزاد شده از فرآیند احتراق باعث میشود که بیشترین درجه حرارت گاز و لایه متخلخل در ناحیه احتراق واقع شود به طوری که پس از آن درجه حرارت کاهش می یابد. به دلیل زیاد بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی، دمای گاز و لایه متخلخل به یکدیگر نزدیک می باشد.

در مورد شارهای تشعشعی  $Q^+$  و  $Q^-$  نیز همان طور که در شکل P- **ب** مشخص است، بیشترین مقدار در ناحیهای خارج از محدوده احتراق واقع شده و به دلیل آنکه هیچ منبع



حرارت تولید شده در ناحیه احتراق در اثر انتقال انرژی جابجایی بین گاز و محیط متخلخل، به فاز جامد منتقل میشود که باعث بالا رفتن دمای فاز جامد میشود. لایه متخلخل نیز این انرژی را به صورت انرژی تشعشعی به اطراف تابش می کند. دمای نقاط ابتدایی گاز در اثر انتقال انرژی هدایتی و همچنین انتقال انرژی جابجایی با فاز جامد و انرژی انبش شده از محیط متخلخل بتدریج افزایش مییابد که باعث فرآیند پیش گرم شدن مخلوط ورودی سوخت و هوا میشود. دمای نقاط انتهایی نیز به همان دلایلی که در مورد نقاط ابتدایی گفته شد و همچنین انرژی منتقل شده از طریق جریان گاز که از ناحیه احتراق عبور می کند به میزان بیشتری نسبت به نقاط ابتدایی افزایش مییابد.

رفتار گذرای دمای لایه متخلخل در سه نقطه ابتدا، وسط و انتهای لایه در شکل **۵** نشان داده شده است. همانطور که گفته شد دمای فاز جامد در اثر انتقال انرژی جابجایی بین گاز و محیط متخلخل افزایش مییابد. در نقاط میانی به علت قرار گرفتن در ناحیه احتراق، دما به سرعت با گذشت زمان افزایش مییابد تا به حالت دائمی برسد. در نقاط دیگر لایه که در فاصله دورتری از ناحیه احتراق قرار دارند، تغییرات دما در طول زمان کم است. در نقاط انتهایی نیز به دلیل انتقال انرژی نقاط ابتدایی و میانی افزایش مییابد. یکی از پدیدههای مهم انجام شده در مشعلهای متخلخل، مکانیزم انتقال حرارت جابجایی باین جریان گاز و محیط متخلخل است. برای بررسی بیشتر تأثیر این پدیده بار کارآیی مشعلهای متخلخل، در شکل ۷ توزیع دمای گاز در طول مشعل در حالت دائمی و به ازای سام مقادر مختلف پارامتر بدون بعد  $N_I$  رسم شده است. دیده می شود که در صورت داشتن ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشاتر، درجام حرارت ماکزیمم گاز پایین آمده، به طوری که در ایان حالت مشاعل متخلخل توانسته است مقادار بیشاتری انارژی حرارتای را با محیط متخلخل منتقل کند. بنابراین انرژی تشعشعی بیشاتری توسط این محیط تولید می شود. لازم به ذکر است که کاهش درجه حرارت ماکزیمم در مشعلها، یکی از راهکارهایی است که می تواند منجر به کاهش تولید آلایندهادر فرآیناد احتاراق



شکل ۷\_ اثر ضریب انتقال حرارت جابجایی بر توزیع دمای گاز در داخل مشعل

در شکل  $\land$  اثر شدت تولید حرارت  $(\dot{Q})$  از طریق مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد  $P_1$  بر مشعل متخلخل در حالت دائمی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل  $\land$  – الف توزیع درجه حرارت گاز در طول مشعل و به ازای سه مقدار مختلف پارامتر  $P_1$  را نشان میدهد. همانطور که دیده می شود با افزایش شدت تولید حرارت و در نتیجه افزایش  $P_1$ ، درجه حرارت ماکزیم گاز افزایش می یابد. دمای گاز در قسمت ابتدایی بیشتر شده و عمل پیش گرم شدن مخلوط ورودی سوخت و هوا با شدت بیشتری انجام می گیرد. پیش گرم شدن مخلوط، باعث بهبود فرآیند احتراق و افزایش راندمان فرآیند  $Q^{-}$  تشعشعی در خارج از لایه متخلخل وجود ندارد، مقادیر  $Q^{-}$  در انتهای لایه و  $Q^{+}$  در ابتدای لایه معادل با صفر هستند که به عنوان شرط مرزی در حل معادلات تشعشعی استفاده شدهاند. مقدار پارامتر  $Q^{+}$  در انتهای لایه  $(x = x_p)$  معرف شدهاند. مقدار پارامتر باشد مشعل بوده، به طوری که هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد مشعل متخلخل توانسته است مقدار این پارامتر بیشتر باشد مشعل متخلخل توانسته است مقدار این پارامتر بیشتر ماه در مقابل مقدار پارامتر  $Q^{-}$  در مقابل مقدار پارامتر تشعشع مقدار بیشتری از انرژی حاصل از احتراق را بصورت تشعشع مقدار بیشتری از انرژی حاصل از احتراق را بصورت تشعشع مقدار بیشتری از انرژی حاصل از احتراق را بصورت تشعشع مقدار بیشتری از انرژی حاصل از احتراق را بصورت تشعشع مقدار می موانه سیستم حرارتی نماید. در مقابل مقدار پارامتر  $Q^{-}$  در مقابل مقدار پارامتر و که منع مقدار بازی انرژی تابیده شده به ابتدای مشعل (x = 0) را میتوان در زمره انرژی تابلافی عمل نمی آید. به ویژه در حالاتی که اثرات تشعشعی گاز کم بوده و قدرت جذب انرژی تشعشعی توسط جریان گاز قابل صوف نظر کردن باشد.



<sup>1-</sup> Radiant Output



(ب) تابش خروجی به ازای دو ضخامت اپتیکی متفاوت (ب) تابش خروجی به ازای دو ضخامت اپتیکی متفاوت شکل ۸- اثر پارامتر بدون بعد P<sub>1</sub> بر توزیع دمای گاز و شار تابشی خروجی مشعل

قابل ذکر است که با توجه به این که در معادله انرژی مربوط به فاز گاز حرارت آزاد شده در اثر احتراق به صورت یک عبارت چشمه<sup>۱</sup> در نظر گرفته میشود. بنابراین فرض به عمل آمده برای جایگزینی فرآیند احتراق با منبع تولید حرارت با قدرت یکتواخت موجب تغییر در نتایج نمی شود. بر این با قدرتی یکتواخت موجب تغییر در نتایج نمی شود. فر این ساس نتایج حاصله در خصوص تعیین توزیع دما و شار حرارتی در طول مشعل با واقعیت فیزیکی پدیده مورد نظر سازگاری خواهد داشت.

در شکل  $\mathbf{A} - \mathbf{v}$  توزیع شار تابشی خروجی از مشعل بر حسب پارامتر  $P_1$  و به ازای دو مقدار مختلف ضخامت اپتیکی در حالت دائم رسم شده است. مشخص است که با افزایش پارامتر  $P_1$  که در پی افزایش قدرت احتراق صورت می گیرد شار تابشی خروجی از مشعل افزایش مییابد و در نتیجه

مشعل توان خروجی بیشتری خواهد داشت که البته در مورد مشعلهایی با ضخامت اپتیکی بیشتر، این افزایش چشمگیرتر است. یکی از پارامترهای مهم در مشعلهای متخلخل موقعیت

یلی آر پارآمارهای مهم در مسعلهای متعلقل معلقل موقعیت استقرار شعله،  $_{f}$ ، است. برای مطالعه اثر این پارآمتر، در شکل **۹** شار تابشی خروجی از مشعل بر حسب موقعیت شعله و به ازای مقادیر مختلف پارآمتر بدون بعد  $P_1$  در حالت دائمی رسم شده است. دیده میشود که در ابتدا با پیشروی موقعیت شعله به جهت پایین دست مقدار شار تابشی خروجی افزایش یافته به طوری که بیشترین مقدار آن در موقعیتی نزدیک مقطع خروجی اتفاق میافتد، ولی با پیشروی بیشتر در جهت پایین خروجی اتفاق میافتد، ولی با پیشروی بیشتر در جهت پایین دست شار تشعشعی خروجی از مشعل کاهش مییابد. زیـرا در این نواحی ضخامت کمتری از محیط متخلخل که دارای درجه حرارت بالایی است در امر صدور انرژی تشعشعی شرکت دارد. بنابراین بـرای داشـتن ( $T_0$ ) max وجود داشـته کـه البتـه دربندابراین بهینه جهت استقرار شعله وجود داشـته کـه البتـه درموقعیت بهینه جهت استقرار شعله وجود داشـته کـه البتـه درنزدیکی مقطع خروجی مشعل واقع شده است. در شکل**۹**این $موقعیت به ازای سه مقدار پارامتر <math>P_1$  در حدود  $0.7 \approx _{f}$ 



هنگام استفاده از محیط متخلخل به منظور بالا بردن انتقال حرارت، یکی دیگر از پارامترهای مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد کاهش بازده مشعل به دلیل افزایش افت فشار است. شکل ۱۰ افت فشار را بر حسب ضریب تخلخل (  $\phi$ ) و به ازای سه مقدار مختلف سرعت گاز (  $u_g$ ) در حالت دائمی نشان میدهد.

٢٣

<sup>1 -</sup>Source term

نتایج حاصله نشان میدهد که ضریب انتقال حرارت جابجایی و شدت تولید حرارت نقش بسزایی در چگونگی عملکرد مشعلهای متخلخل دارد، به طوری که استفاده از مشعلهای متخلخل با ضریب بالای انتقال حرارت جابجایی، شدت تولید حرارت زیاد و ضخامت اپتیکی بالا عملکرد مشعل را بهبود میبخشد. همچنین، در مورد هر مشعل موقعیت بهینه ای برای استقرار شعله وجود داشته تا این که بیشترین شار تشعشعی خروجی از مشعل تولید شود. در نهایت، به منظور کاهش افت فشار و در نتیجه افزایش انتقال حرارت، بایستی در طراحی مشعلهای متخلخل کمترین سرعت ممکن برای انطباق بین کار حاضر با نتایج به دست آمده توسط دیگر محققین که از مدلهای تشعشعی متفاوتی استفاده کردهاند رضایتبخش است.

## مراجع

- Takeno, T. and Sato, K. "An Excess Enthalpy Flame Theory", Combustion Science Tech., Vol. 20, pp. 73–84, 1979.
- 2- Echigo, R. "Effective Energy Conversion Method Between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application to Industrial Furnaces", The 7<sup>th</sup> Int. Heat Transfer Conf., München, Vol. 6, pp. 361-366, 1982.
- 3- Wang, K.Y. and Tien, C.L. "Thermal Insulation in Flow Ssystems: Combined Radiation and Convection Through a Porous Segment", J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 453–459, 1984.
- 4- Gandjalikhan-Nassab, S. "A Transient Heat Transfer Characteristics of an Energy Recovery System, Using a Porous Medium", The Instn. Mech. Engrs, J. Power and Energy, Vol. 216, part A, pp. 387–394, 2002.
- 5- Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hanamura, K., and Tomimura, T. "Analytical and Experimental Studies on Radiative Propagation in Porous Media with Internal Heat Generation", The 8<sup>th</sup> Int. Heat Transfer Conf., Vol. 2, pp. 827–832, 1986.
- 6- Sathe, S. and Tong, T. "A Nnumerical Analysis of Heat Transfer and Combustion in Porous Radiant Burners", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.33, pp.1331-1338, 1990.
- 7- Tong, T., and Sathe, S. "Heat Transfer Characteristics of Porous Radiant Burners", Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 113, pp. 423–428, 1991.
- 8- Brenner, G., pickenacker, K., Pickenacker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K., and Weber, T. "Numerical and Experimental Investigation of

همان طور که انتظار میرود، بیشترین افت فشار زمانی رخ می دهد که کمترین میزان تخلخل و بیشترین سرعت، وجود داشته باشد. در نتیجه طراحی بهینه بایستی بین افزایش انتقال حرارت و افت فشار، تعادل برقرار نماید. این افت فشار با افزایش سرعت افزایش مییابد. به این ترتیب برای بهینهسازی، بایستی کمترین سرعت ممکن برای جریان گاز را داشته باشیم. به همین صورت نیز محیط متخلخل بایستی بیشترین میزان تخلخل را داشته باشد زیرا افت فشار با کاهش ضریب تخلخل با شدت زیادی افزایش میابد.



شکل ۱۰\_افت فشار را بر حسب ضریب تخلخل و به ازای مقادیر مختلف سرعت گاز.

۷\_ نتیجه گیری

در کار حاضر، برای تعیین مشخصه های حرارتی مشعلهای متخلخل در حالت گذرا به روش عددی معادلات انرژی و شار تشعشعی در طول مشعل حل شده است. در این آنالیز، فرآیند احتراق با جایگزینی یک منبع تولید حرارت با قدرت یکنواخت مدل شده است. برای حل معادلات شار تشعشعی نیز از مدل دو شار حرارتی استفاده شده، چرا که این مدل در عین سادگی دارای دقت قابل قبولی بوده و در مقایسه با دیگر مدل های تشعشعی نیازمند محاسبات کمتری است. با حل این معادلات توزیع درجه حرارت و همچنین چگونگی تغییرات شار تشعشعی در داخل مشعل متخلخل بدست آمده است.

Matrix–Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media", Combust. Flame, Vol. 123, pp. 201–213, 2000.

- 9- Talukdar, P., Mishra, S., Trimis, D., and Durst, F. "Heat Transfer Characteristics of a Porous Radiant Burner under the Influence of a 2–D Radiation Field", J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, pp. 1-11, 2003.
- 10- Talukdar, P., and Mishra, S.C. "Analysis of Conduction–Radiation Problem in Absorbing– Emitting and Anisotropically Scattering Media Using the Collapsed Dimension Method", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp. 2159-2168, 2002.
- 11- Bogdan, I.P. and Abdulmajeed, A.M. "An Experimental and Numerical Study on Heat Transfer Enhancement for Gas Heat Exchangers Fitted with Porous Media", International J. Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 4939-4952, 2004.
- 12- Jiang, P.X., Ren, Z.P., and Wang, B.X. "Numerical Simulation of Forced Convection Heat Transfer in Porous Plate Channels Using Thermal Equilibrium and Non-thermal Equilibrium Models", Numerical Heat Transfer, Vol. 35, Part A, pp. 99-113, 1999.