

## بررسی عددی اثر تشعشی گاز عملگر بر رفتار حرارتی مشعل متخلخل تابشی

محمد مهدی کشتکار<sup>۱</sup> و سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان (نویسنده مخاطب)، mkeshkar54@yahoo.com

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ganjali2000@yahoo.com

(دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۵، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۱۱/۲۰، پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۵)

در کار صورت گرفته به بررسی عملکرد یک مشعل متخلخل تحت اثر یک گاز عملگر تشعشی پرداخته می شود. مشعل های متخلخل براساس تبدیل انرژی بین آنتالپی گاز عبوری و تشعشع حرارتی عمل می کنند. در مطالعه حاضر فازهای گاز و جامد در حالت عدم تعادل حرارتی قرار دارند و احتراق در مشعل توسط یک ناحیه تولید حرارت با توزیع غیریکنواخت سهموی شبیه سازی می شود. از آنجا که محیط متخلخل یک جسم خاکستری در نظر گرفته می شود، علاوه بر تبادل حرارتی جابه جایی با گاز، قابلیت جذب، صدور و پخش تشعشع حرارتی را نیز دارد. به منظور تعیین دقیق تر رفتار حرارتی مشعل متخلخل، تشعشع گاز عبوری نیز در نظر گرفته شده و یک آنالیز تئوری در مختصات دوبعدی و با در نظر گرفتن هر سه نوع انتقال حرارت جابه جایی، هدایت و تشعشع در محیط متخلخل و جریان گاز صورت گرفته است. جهت یافتن توزیع شار حرارت تشعشی در محیط متخلخل از روش جهت های مجزا استفاده شده است و سپس معادلات به هم پیوسته انرژی فازهای گاز و جامد به صورت همزمان در شرایط پایدار حل می شوند. در نهایت اثر تشعشع گاز عملگر بر عملکرد مشعل متخلخل تابشی بررسی شده است. به منظور صحت روش عددی در کار حاضر، نتایج به دست آمده با نتایج تئوری و تجربی محققان دیگر مقایسه شده است و تطابق خوبی مشاهده شده است.

کلیدواژگان: گاز عملگر تشعشی، روش جهت های مجزا، مشعل متخلخل

### مقدمه

در سال های اخیر احتراق در محیط متخلخل به عنوان یک روش قابل قبول و تکنولوژی پیشرفته در احتراق شناخته شده است. زیرا این نوع احتراق نسبت به احتراق با شعله آزاد دارای دانسیته توان بالاتر، رنج دینامیکی توان بیشتر و آلاینده گی کمتر است. در این نوع مشعل ها از یک محیط متخلخل جهت تقویت احتراق استفاده می شود. استفاده از مشعل متخلخل دارای مزایای زیادی است که یکی از آنها پیش گرم شدن مخلوط سوخت و هوای ورودی به مشعل توسط هدایت و تشعشع ناشی از بالادست ناحیه احتراق در ماتریس متخلخل است [۱،۲].

از آنجا که جهت توسعه و بهینه سازی مشعل های متخلخل تابشی بایستی از مدل های فیزیکی و ریاضی دقیق تری استفاده شود، لذا شبیه سازی های متعددی به منظور دست یافتن به این هدف در سطوح مختلف و با فرضیات دقیق تر صورت گرفته است. به عنوان مثال تاکنو و سانه [۳] از مدلی یک بعدی جهت بررسی اثرات دبی جرمی مخلوط سوخت و هوا و ضریب انتقال حرارت بین فاز جامد و گاز عملگر بر رفتار حرارتی مشعل متخلخل استفاده کردند. آن ها با استفاده از مفهوم آنتالپی افزوده دریافتند که افزایش نرخ دبی جرمی باعث افزایش نرخ آزادسازی حرارت در ناحیه تشکیل شعله و همچنین پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوای ورودی می شود. تانگ و سانه [۴] با در نظر گرفتن هدایت، جابه جایی و تشعشع به بررسی یک مشعل متخلخل در مختصات یک بعدی پرداختند. آن ها جهت مدل کردن انتقال حرارت تابشی از روش همسازهای<sup>۱</sup> کروی استفاده کردند و پس

از بررسی نتایج دریافتند که تشعشع خروجی از یک مشعل متخلخل وابسته به خواص نوری، سرعت جریان و انتقال حرارت بین فازهای گاز و جامد است. در کار دیگری، آن‌ها کار قبلی خود را توسعه داده و نشان دادند که برای حداکثر کردن تشعشع خروجی از مشعل، عمق نوری باید حدود ۱۰ باشد و شعله در وسط محیط متخلخل تشکیل شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که ضریب هدایت حرارتی کم فاز جامد، نسبت پخش کم و ضریب انعکاس بالای محیط ورودی باعث افزایش راندمان در مشعل‌های متخلخل می‌شود [۵].

تحقیق دیگری با فرضیات ساده‌کننده در مختصات دوبعدی مستطیلی و بدون در نظر گرفتن اثرات تشعشع حجمی توسط هکرت و همکارانش [۶] صورت گرفت. آن‌ها از روش مونت کارلو جهت محاسبه تشعشع سطحی استفاده کردند. همچنین یک مطالعه عددی و آزمایشی در مختصات دوبعدی مستطیلی با فرض تعادل حرارتی بین فازهای گاز و جامد توسط برینر و همکارانش [۷] صورت گرفت. میسرا و همکارانش [۸] نیز با در نظر گرفتن یک سری فرضیات ساده‌کننده مطالعه‌ای در زمینه احتراق و انتقال حرارت در مشعل‌های متخلخل انجام دادند. آن‌ها دریافتند که حداکثر مقدار دما، با افزایش ضریب انحراف لایه، افزایش می‌یابد.

از آنجا که جهت بررسی دقیق‌تر مشعل‌های متخلخل نیاز به یافتن توزیع شار حرارتی تابشی در محیط متخلخل است، روش‌های متعددی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اولین شبیه‌سازی دوبعدی مشعل‌های متخلخل، با در نظر گرفتن تشعشع حجمی و همچنین اثرات پخش تشعشعی توسط تالکدار و همکارانش [۹] صورت گرفت. آن‌ها، در ادامه کار، حالت‌های پایا و گذرای سیستم را بررسی کردند. معادلات فازهای گاز و جامد همزمان حل شدند و جهت یافتن توزیع شار حرارتی تابشی از روش همسازهای کروی استفاده شد [۱۰]. شایان ذکر است که روش همسازهای کروی به محاسبات پیچیده و طولانی جهت یافتن توزیع شار تابشی در یک محیط صادرکننده، جذب‌کننده و پخش‌کننده نیاز دارد.

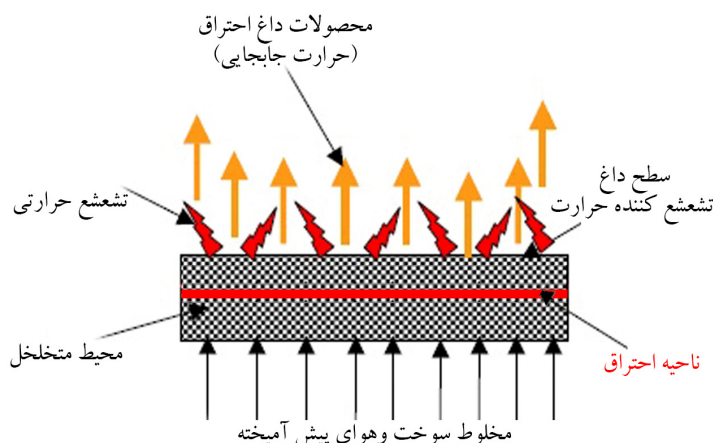
همچنین یک مطالعه دوبعدی در مختصات استوانه‌ای توسط مالیکو و پیرا [۱۱] جهت تحلیل مشعل‌های متخلخل صورت گرفت. آن‌ها خواص تشعشعی محیط متخلخل را بر عملکرد مشعل متخلخل مطالعه کردند و نشان دادند که توزیع دما بسیار به خواص تشعشعی وابسته است، به‌ویژه زمانی که نسبت پخش افزایش یابد، راندمان مشعل کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی حرارتی یک مشعل متخلخل توسط نویسندگان مقاله حاضر با استفاده از روش جهت‌های مجزا<sup>۲</sup> در مختصات دوبعدی مستطیلی نیز انجام شده است [۱۲]. در آن کار از اثر تشعشعی گاز در مقایسه با تشعشع فاز جامد صرف‌نظر شده و همچنین یک ناحیه تولید حرارت غیریکنواخت به‌عنوان چشمه حرارتی مشعل در نظر گرفته شده است. در بررسی نتایج مشخص شد که استفاده از لایه‌های متخلخل با نسبت ظرافت بالاتر و نسبت پخش کمتر راندمان مشعل متخلخل را افزایش می‌دهد.

در تمامی کارهای قبلی، از اثر تشعشعی گاز عملگر در مشعل متخلخل صرف‌نظر شده است و پدیده تشعشع تنها بین ذرات محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است، در کار حاضر، اثر تشعشعی گاز عملگر نیز در محاسبات منظور شده است و از روش جهت‌های مجزا جهت محاسبه توزیع شار تابشی در مشعل متخلخل تابشی استفاده شده است. گنجعلیخان نسب و فلاح [۱۳] اثر تشعشعی گاز عملگر را بر رفتار حرارتی یک لایه بازیافت متخلخل به‌صورت یک‌بعدی بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها مشخص شد که اگر گازهای تشعشعی از قبیل دی‌اکسید کربن یا بخار آب به‌همراه گاز ورودی وارد لایه شود، اثر تشعشع گاز عبوری بر عملکرد لایه ناچیز نخواهد بود، به‌ویژه در شرایطی که دما بالا باشد. در آن مطالعه معادلات انرژی کوپل برای فازهای گاز و جامد حل شدند و تاثیر مهم تشعشع گاز عملگر بر عملکرد سیستم بازیافت مشخص شد. همچنین، در کار دیگری، گنجعلیخان نسب و مرامی‌ساران [۱۴] مشخصات حرارتی یک مبدل حرارتی متخلخل چندلایه را با در نظر گرفتن اثرات تشعشعی گاز عبوری بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از روش دو شار حرارتی و در مختصات یک‌بعدی معادلات حاکم را در حالت گذرا حل کردند و دریافتند اثر تشعشعی گاز عبوری به‌ویژه در دماهای بالا محسوس است.

---

2. Discrete ordinates method

مطالعه کارهای صورت گرفته قبلی نشانگر این واقعیت است که رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل تحت اثر عبور یک گاز عملگر تشعشی تاکنون بررسی نشده است. لذا هدف از مطالعه حاضر، ادامه کار قبلی نویسندگان مقاله [۱۲] است که رفتار حرارتی مشعل متخلخل را با لحاظ کردن اثر تشعشی گاز عملگر مورد مطالعه قرار می‌دهد. اصول عملکرد یک مشعل متخلخل در شکل ۱ نشان داده شده است. مخلوط سوخت و هوای گازی وارد محیط متخلخل می‌شود و احتراق روی می‌دهد. در نتیجه، آنتالپی گاز عبوری بالا رفته و باعث ایجاد تشعشع حرارتی می‌شود.



شکل ۱- اصول عملکرد مشعل متخلخل تابشی

همان‌گونه که در قسمت‌های قبل ذکر شد، هدف اصلی مقاله حاضر بررسی اثر تشعشی گاز عملگر بر رفتار حرارتی مشعل متخلخل تابشی در میدان مستطیلی دوبعدی و با لحاظ کردن اثرات پخش تشعشی و همچنین در نظر گرفتن یک مدل سهموی جهت احتراق است. معادلات حاکم، شامل دو معادله انرژی فازهای گاز و جامد، به صورت عددی و به طور همزمان حل می‌شوند و جهت یافتن توزیع شار حرارت تابش از روش جهت‌های مجزا استفاده می‌شود. جهت بررسی صحت نتایج به دست آمده، نتایج حل عددی با نتایج به دست آمده توسط محققان قبلی به صورت تئوری و آزمایشی مقایسه شده است و تطابق مناسبی حاصل شده است.

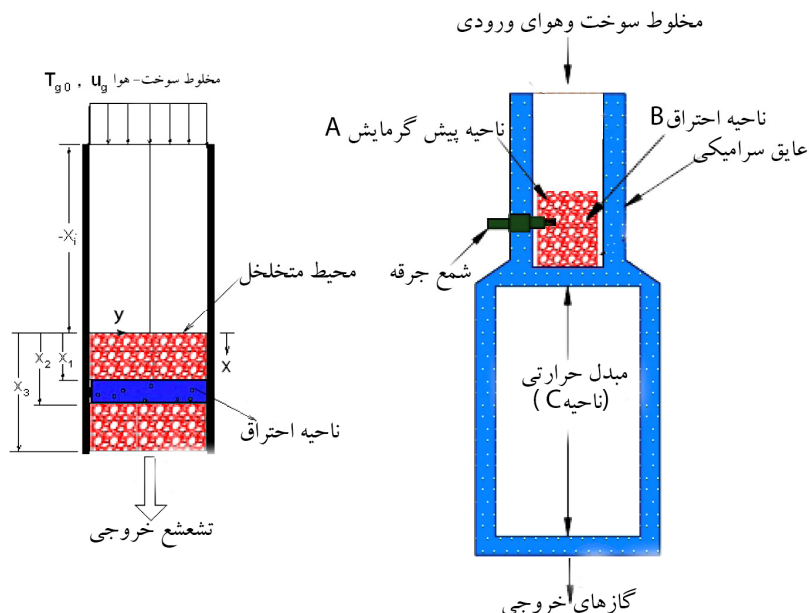
## توصیف مسئله

مسئله مورد بحث، بررسی رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل در مختصات دوبعدی مستطیلی و با در نظر گرفتن اثر تشعشی گاز عملگر است. مدل مورد استفاده به صورت طرحواره در شکل ۲ نشان داده شده است و مشابه مدلی است که قبلاً توسط نویسندگان مقاله در مرجع [۱۲] استفاده شده است.

المانی که به عنوان مشعل متخلخل عمل می‌کند دارای ضریب تخلخل برابر  $0.185$  و در فاصله  $0 < x < x_3$  قرار گرفته است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مشعل مورد نظر از سه ناحیه اصلی شامل ناحیه پیش‌گرمکن (ناحیه A)، ناحیه احتراق (ناحیه B) و یک مبدل حرارتی (ناحیه C) تشکیل شده است.

تمام خواص ترموفیزیکی فازهای گاز و جامد ثابت فرض شده‌اند و لایه از سمت بالادست و پایین‌دست تحت تابش تشعشعات خارجی  $B_1$  و  $B_2$ ، که به سیستم اعمال می‌شوند، قرار می‌گیرد. شایان ذکر است در مدل مورد نظر اثرات هدایت و تشعشع در فازهای گاز و جامد و انتقال حرارت جابه‌جایی بین ذرات جامد و گاز در نظر گرفته شده است. ناحیه تولید حرارت به صورت غیریکنواخت و به شکل تابعی سهموی (در جهت  $y$ ) در نظر گرفته شده و نشان‌دهنده شعله در مشعل است، به طوری

که مقدار حداکثر حرارت آزاد شده در خط مرکزی مشعل و مقدار حداقل آن نزدیک دیوارهای مشعل ایجاد می‌شود. دیواره مشعل عایق شده و از اثرات افت فشار لایه متخلخل در حل مسئله صرف نظر شده است. همچنین، از آنجا که در مورد گازهای حاصل از احتراق بسیاری از سوخت‌های معمول مثل متان در حضور ذرات جامد<sup>۳</sup> و بخار آب، ضریب جذب تا حدود  $10^{-1} \text{ m}^{-1}$  ازدیاد پیدا می‌کند، ضریب جذب و صدور گاز تشعشعی در محاسبات برابر با  $0/8$  منظور شده است [۱۸].



شکل ۲- طرحواره مشعل متخلخل تابشی

## فرمول‌بندی

به علت فرض عدم تعادل حرارتی بین فازهای گاز و جامد، معادلات انرژی جداگانه‌ای برای فازهای گاز و جامد در نظر گرفته شده است. این دو معادله به هم وابسته‌اند و به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۵]:

$$-\rho_g u_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial x} - (1-\phi) h_s A_s (T_g - T_p) + \phi \dot{Q}(y) \delta(x) + k_g \left[ \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} \right] + \alpha \nabla \cdot q - A_s \sigma (\varepsilon T_g^4 - \alpha T_p^4) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1-\alpha}{1-\phi} \nabla \cdot q + h_s A_s (T_p - T_g) - k_p \left( \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) - \frac{A_s \sigma}{1-\phi} (\varepsilon T_g^4 - \alpha T_p^4) = 0 \quad (2)$$

در معادلات بالا به ترتیب  $\rho$ ،  $u$ ،  $c$ ،  $h$ ،  $\dot{Q}$ ،  $k$ ،  $\alpha$  و  $\varepsilon$  نشانگر چگالی، سرعت، ظرفیت گرمای ویژه، ضریب جابه‌جایی، حرارت آزاد شده در چشمه حرارتی، ضریب هدایت، ضریب جذب و ضریب صدور و زیرنویس‌های  $g$ ،  $p$  و  $s$  به ترتیب نشانگر فازهای گاز، جامد و فصل مشترک فازهای گاز و جامدند. جهت حل معادلات بالا، بایستی ابتدا توزیع شار حرارتی تشعشعی مشخص شود. بنابراین جهت مشخص کردن عبارت  $\nabla \cdot q$ ، که به دلیل تشعشع در معادلات بالا ظاهر می‌شود، بایستی از معادله زیر استفاده کرد:

$$\nabla \cdot q = k_a(r) \left[ 4\pi I_b - \int_{4\pi} I(r, \Omega) d\Omega \right] \quad (3)$$

در معادله بالا،  $k_a$  ضریب جذب،  $I(r, \Omega)$  شدت تابش جهت‌دار،  $\Omega$  جهت تابش و  $I_b$  شدت تابش جسم سیاه است. جهت تعیین  $I(r, \Omega)$  معادله انتقال حرارت تابشی زیر برای یک محیط خاکستری بایستی حل شود:

$$(\Omega \cdot \nabla)I(r, \Omega) = K_a(r)I_b - \beta I + \frac{\sigma_s(r)}{4\pi} \int_{4\pi} I(r, \Omega') \phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' \quad (4)$$

که در این معادله  $\sigma_s$  و  $\phi(\Omega' \rightarrow \Omega)$  به ترتیب ضریب پخش و تابع فازند. همچنین، عبارت اول نشانگر تغییر شدت تابش  $I$  در جهت مشخص  $\hat{k}$  و معادل مجموع تشعشعات ناشی از صدور (عبارت اول در سمت راست)، جذب و پخش خروجی در جهت  $\hat{k}$  (عبارت دوم سمت راست) و پخش ورودی در جهت  $\hat{k}$  (عبارت سوم سمت راست) است. نسبت پخش به عنوان نسبت بین ضرایب پخش و انحراف تعریف می‌شود. شایان ذکر است هر ناحیه در محیط متخلخل، خاکستری، همگن و ایزوتروپیک ( $\phi = 1$ ) فرض می‌شود [۱۵].

در مختصات دوبعدی مستطیلی، معادله انتقال حرارت تابشی را برای هر جهت مجزای  $m$  می‌توان به صورت زیر بسط داد:

$$\mu^m \frac{\partial I^m}{\partial \xi_x} + \zeta^m \frac{\partial I^m}{\partial \xi_y} = k_a I_b - \beta I^m + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{m'} w_{m'} I^{m'} \quad (5)$$

که  $\beta$  ضریب انحراف و  $m, m'$  بیانگر جهت‌های خروجی و ورودی تابش‌اند.  $\mu^m, \zeta^m$  نیز کسینوس‌های هادی یک جهت مشخص‌اند. به این ترتیب در روش جهت‌های مجزا معادله (۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\nabla \cdot q = k_a(r)(4\pi I_b - 4\pi \sum_{m=1}^M I^m) \quad (6)$$

که  $M$  تعداد کل جهت‌های مجزا و وابسته به درجه تقریب  $N$  است که توسط رابطه  $M = N(N+2)/2$  به یکدیگر مرتبط می‌شوند. شایان ذکر است در مسئله مورد بحث از تقریب  $S_6$  ( $N = 6$ ) استفاده شده است.

جهت مطالعه پارامتریک مسئله، مقادیر گروه‌های بدون بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Pi_1 = \rho_g u_g c_g T_i / \dot{Q} L_x, \quad \Pi_2 = h A T_i / \dot{Q}, \quad \Pi_3 = k_g T_i / \dot{Q} L_x^2, \quad \Pi_4 = k_p T_i / \dot{Q} L_x^2, \quad \Pi_5 = h L_x / k_p$$

$$\Pi_6 = \varepsilon k_p / \sigma T_i^3 L_x, \quad \zeta_{fl} = (x_1 + x_2) / x_3, \quad p_a = A_s \sigma T_i^4 / \dot{Q}, \quad Q = q / \dot{Q} L_x$$

با به کار بردن این گروه‌های بدون بعد، شکل بی‌بعد معادلات انرژی فازهای گاز و جامد به صورت زیر در می‌آیند:

$$-\Pi_1 \frac{\partial \theta_g}{\partial \xi_x} - \frac{1-\phi}{\phi} \Pi_2 (\theta_g - \theta_p) + \delta(x) + \Pi_3 \left( \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial \xi_x^2} + \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial \xi_y^2} \right) \quad (7)$$

$$+ \alpha \nabla \cdot Q - p_a (\varepsilon \theta_g^4 - \alpha \theta_p^4) = 0$$

$$\left( \frac{1}{1-\phi} \right) \nabla \cdot Q + \Pi_2 (\theta_p - \theta_g) - \Pi_4 \left( \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial \xi_x^2} + \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial \xi_y^2} \right) - p_a (\varepsilon \theta_g^4 - \alpha \theta_p^4) = 0 \quad (8)$$

اکنون باید معادلات (۷) و (۸) و معادله انتقال حرارت تابشی (۵) به صورت همزمان توسط شرایط مرزی مناسب حل شوند. برای جریان گاز در خارج از محیط متخلخل، می‌توان از انتقال حرارت هدایتی، به علت کم بودن مقدار ضریب هدایت حرارتی گاز و همچنین کوچک بودن گرادیان دما، صرف نظر کرد. یک دمای معلوم برابر دمای محیط در ورودی و همچنین فرض عایق بودن دیواره‌های مشعل، شرایط مرزی جهت معادله انرژی گازند:

$$\left[ \theta_g \right]_{\xi_x=0} = \theta_{gi} \quad \left[ \frac{\partial \theta_g}{\partial \xi_y} \right]_{\xi_y=0} = 0$$

$$\left[ \frac{\partial \theta_g}{\partial \xi_x} \right]_{\xi_x=1} = 0 \quad \left[ \frac{\partial \theta_g}{\partial \xi_y} \right]_{\xi_y=1} = 0$$

برای معادله انرژی فاز جامد، دو موازنه انرژی در محل‌های ابتدایی و انتهایی لایه و همچنین فرض عایق بودن دیواره، شرایط مرزی مورد استفاده‌اند:

$$\left[ \frac{\partial \theta_p}{\partial \xi_x} = \Pi_6 (\theta_p^4 - \theta_i^4) + \Pi_5 (\theta_p - \theta_g) \right]_{\xi_x=0} \quad \left[ \frac{\partial \theta_p}{\partial \xi_y} \right]_{\xi_y=0} = 0$$

$$\left[ \frac{\partial \theta_p}{\partial \xi_x} = \Pi_6 (\theta_p^4 - \theta_e^4) + \Pi_5 (\theta_p - \theta_g) \right]_{\xi_x=1} \quad \left[ \frac{\partial \theta_p}{\partial \xi_y} \right]_{\xi_y=1} = 0$$

در نهایت، برای حل معادله انتقال حرارت تابشی، با فرض انعکاسی بودن دیواره های کانال ( $\rho = 1$ )، شرایط مرزی زیر در دیواره های بالا و پایین مشعل ( $\xi_y = 0, 1$ ) استفاده می‌شوند:

$$\left[ I(\xi_x, 0) = \frac{1}{\pi} \int_{\xi < 0} I(\xi_x, 0) \zeta w \right]_{for \xi > 0} \quad \left[ I(\xi_x, 1) = \frac{1}{\pi} \int_{\xi > 0} I(\xi_x, 1) \zeta w \right]_{for \xi < 0}$$

از طرفی، همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد، دو شدت تابش خارجی  $B_1$  و  $B_2$  به ترتیب از سمت بالادست و پایین‌دست به سیستم اعمال می‌شوند. بنابراین شرایط مرزی مناسب برای قسمت‌های  $\xi_x = 0, 1$  به صورت زیرند:

$$I(0, \xi_y) = B_1' / \pi \quad I(1, \xi_y) = B_2' / \pi$$

## مراحل حل عددی

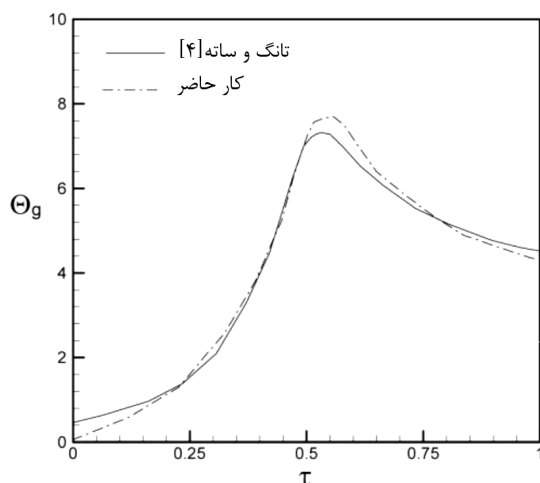
پس از آنکه معادلات حاکم توسط یک شبکه مش‌بندی با ساختار یکنواخت و به روش تفاضل محدود گسسته شدند، عدم وابستگی شبکه برای چندین شبکه مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت یک شبکه یکنواخت  $120 \times 40$  به عنوان دامنه حل در نظر گرفته شد. با استفاده از روش تفاضل مرکزی شکل تفاضل محدود معادلات انرژی گاز و جامد نوشته شده و معادله انتقال حرارت تابشی نیز براساس روش جهت‌های مجزا و به روش سعی و خطا حل می‌شود. به طور خلاصه، مراحل حل مسئله را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

- ۱- تقریب اولیه‌ای برای توزیع دمای گاز و محیط متخلخل فرض می‌شود.
  - ۲- در مرحله بعد، معادله انتقال حرارت تابشی، به روش سعی و خطا جهت محاسبه توزیع شار حرارتی و برای هر نقطه از میدان حل، با استفاده از تقریب  $S_6$  حل می‌شود.
  - ۳- با استفاده از مقادیر شدت تابش به دست آمده در مرحله ۲، معادله انرژی فاز جامد جهت تعیین توزیع دمای ماتریس متخلخل حل می‌شود.
  - ۴- شکل گسسته معادله انرژی فاز گاز جهت تعیین توزیع دمای گاز ( $\theta_g$ ) در هر گره حل می‌شود.
- در حل مسئله مورد نظر حداکثر اختلاف بین مقادیر قبلی و جدید جهت کلیه متغیرها  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است و مراحل ۲ تا ۴ تا رسیدن به همگرایی تکرار می‌شوند. جهت حل مسئله نیز از یک کد محاسباتی که به زبان متلب نوشته شده، استفاده شده است.

## بررسی صحت نتایج

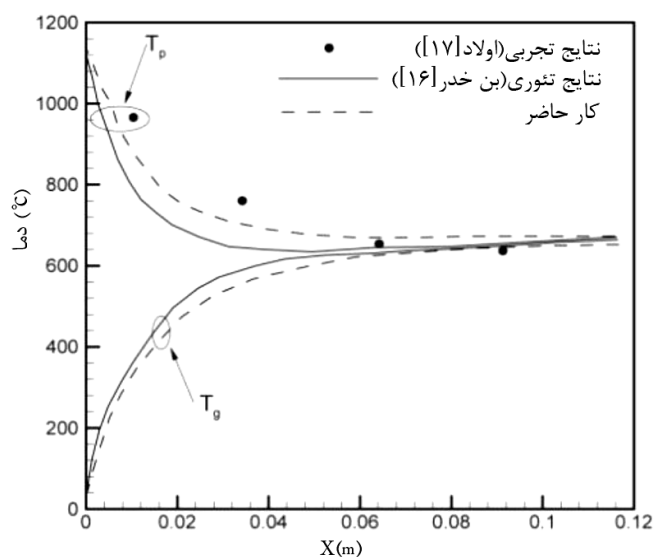
در کار حاضر، رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل، زمانی که گاز عملگر تشعشعی باشد، در شرایط مختلف بررسی شده است. در مرحله اول، نتایج عددی به دست آمده با نتایجی که توسط تانگ و ساته [۴] به دست آمده در شرایط یکسان مقایسه شده است. شکل ۳ نشانگر مقایسه توزیع دمای گاز مسئله مورد بحث، با نسبت ظرافت (نسبت پهنا به ارتفاع) کم، جهت نزدیک شدن به حالت یک‌بعدی و حل عددی یک‌بعدی توسط مرجع [۴] است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود حداکثر دمای گاز

در داخل ناحیه احتراق اتفاق می‌افتد و سپس، به دلیل تبدیل آنتالپی گاز به تشعشع حرارتی، دمای گاز کاهش می‌یابد. به هر صورت تطابق مناسبی بین نتایج عددی به دست آمده و آنچه که در این مرجع آمده است وجود دارد. البته باید توجه داشت که در محاسبات مربوط به شکل ۳ و آنچه که در محاسبات مرجع [۴] آمده است اثر تشعشع گاز لحاظ نشده است.



شکل ۳- توزیع دمای گاز در طول مشعل متخلخل تابشی با نسبت ظرافت کوچک

همچنین، به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از کار انجام شده با نتایج عددی و تجربی، با حذف عبارت چشمه حرارتی از معادلات، سیستم به صورت یک لایه باز یافت حرارت در نظر گرفته شده و نتایج، با در نظر گرفتن مقادیر یکسانی برای متغیرهای بدون بعد و با بهره‌گیری از مدل تشعشعی متفاوت، با نتایج عددی بن خدر [۱۶] و نتایج تجربی اولاد [۱۷] مقایسه شده است [۱۲]. نتیجه این مقایسه در شکل ۴ برای توزیع دمای گاز و لایه نشان داده شده است. همچنین، در این بررسی نیز از اثر تشعشع گاز عملگر صرف نظر شده است. تطابق قابل قبولی بین نتایج به دست آمده با آنچه که به صورت عددی توسط مرجع [۱۶] و آنچه که به صورت تجربی توسط مرجع [۱۷] به دست آمده است مشاهده می‌شود.



شکل ۴- توزیع دمای گاز و ماتریس متخلخل در طول یک لایه باز یافت

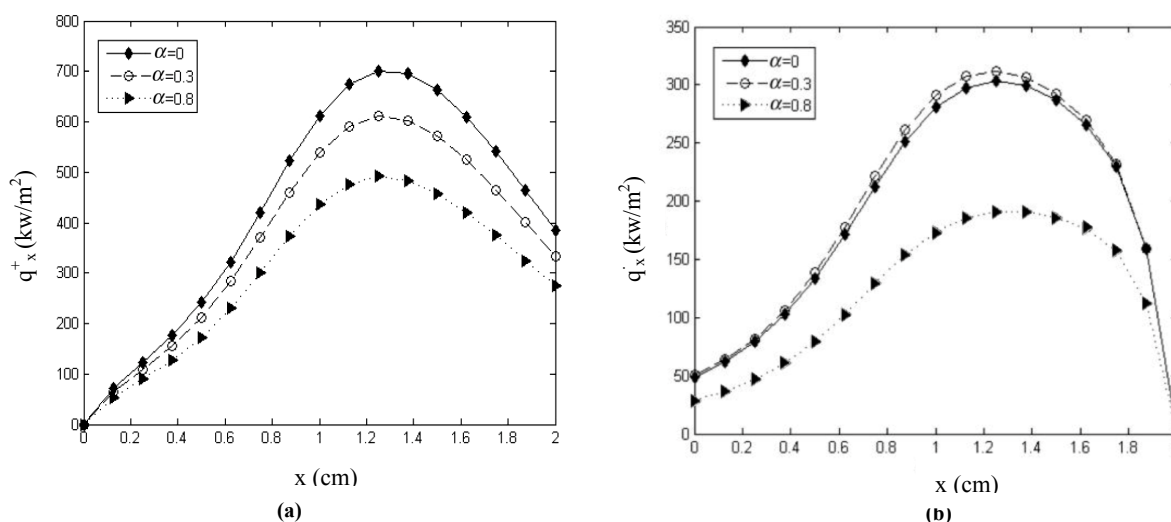
## نتایج

در کار حاضر، اثر تشعشعی بودن گاز عملگر بر رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل دوبعدی در شرایط مختلف مطالعه شده است. شکل ۲ نمایانگر طرحواره‌ای از مشعل مورد نظر است. شایان ذکر است در تمام حالت‌ها،  $L_x$  ثابت نگه داشته می‌شود و مقدار این متغیر تقریباً ۲ cm در نظر گرفته می‌شود. همچنین ارتفاع محیط متخلخل،  $L_y$  برابر ۴ cm فرض شده است. ناحیه احتراق با ضخامت  $0.1L_x$  نیز در وسط لایه متخلخل قرار گرفته است.

توزیع شار حرارتی تشعشعی در جهت پایین دست و بالادست جریان در خط میانی مشعل، با در نظر گرفتن اثر تشعشع گاز عملگر، در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار شار تشعشعی در جهت پایین دست،  $q_x^+$ ، در  $x = x_3$  تابش خروجی از مشعل است که متغیر مهمی در راندمان مشعل‌های متخلخل تابشی است. همان گونه که از شکل ۵(a) مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار  $q_x^+$  در خارج از ناحیه احتراق اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که وجود گاز عملگر تشعشعی باعث کاهش حداکثر مقدار شدت شار  $q_x^+$  در جهت پایین دست و کاهش مقدار شار خروجی از مشعل می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت زمانی که گاز عملگر در مشعل متخلخل تابشی غیر تشعشعی باشد، مشعل راندمان بیشتری نسبت به حالتی که گاز عملگر تشعشعی باشد، خواهد داشت.

از طرف دیگر، شار تشعشعی به سمت بالادست جریان  $q_x^-$  در  $x = 0$  انرژی تلف شده است که افزایش آن باعث کاهش راندمان مشعل می‌شود. شکل ۵(b) نشان می‌دهد در صورت افزایش ضریب تشعشعی گاز، مقدار تلفات حرارتی از مشعل متخلخل کاهش خواهد یافت.

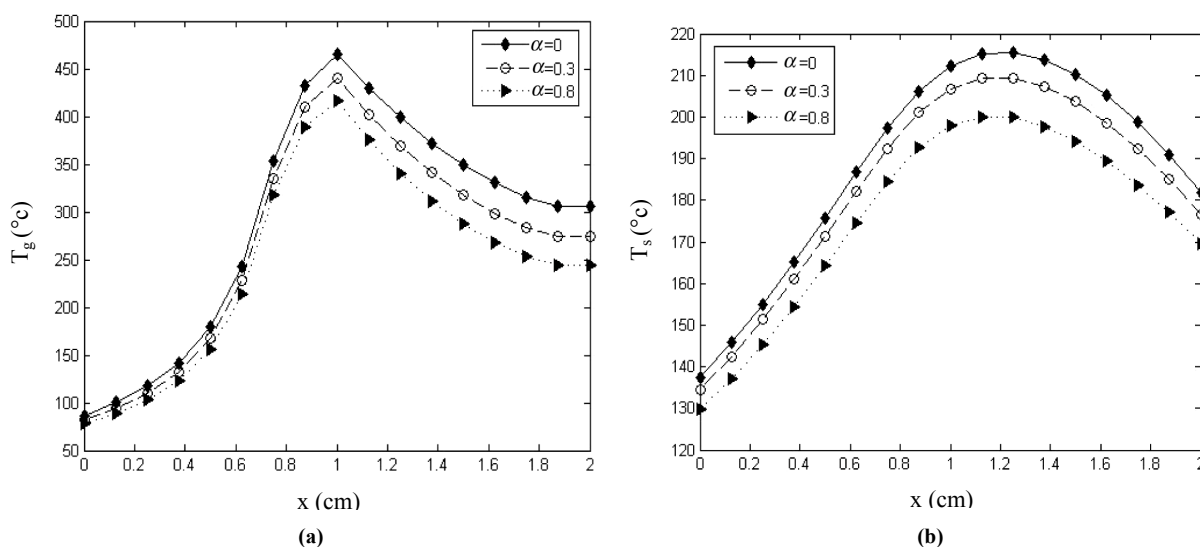
شکل ۶ نمایانگر مقایسه عددی دمای فازهای گاز و جامد برای ضرایب مختلف تشعشع گاز است. از آنجا که فرض عدم تعادل حرارتی برای فازهای گاز و جامد در نظر گرفته شده است، دماهای متفاوتی در نواحی پیش گرمایش و ناحیه احتراق خواهیم داشت. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه دمای گاز در ناحیه احتراق اتفاق می‌افتد و در ناحیه بالادست جریان نیز به دلیل جذب تشعشع از لایه مخلوط گازی پیش گرم می‌شود. همچنین از این شکل مشاهده می‌شود که توزیع دمای گاز در پایین دست ناحیه احتراقی بیشتر از ناحیه بالادست احتراق تحت تاثیر ضریب تشعشع گاز قرار می‌گیرد. به طوری که از شکل ۶(a) مشاهده می‌شود، افزایش در ضریب تشعشع گاز عملگر، در مقادیر بزرگ تر  $\alpha$ ، باعث کاهش دمای گاز در طول مشعل خواهد شد.



شکل ۵- توزیع شار حرارتی تابشی به سمت (a) پایین دست، (b) بالادست جریان در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف ضریب تشعشعی گاز

$$\Pi_1 = 0.014, \Pi_2 = 1, \Pi_3 = 2.5 \times 10^{-4}, \Pi_4 = 0.02, \Pi_5 = 5, \Pi_6 = 60, p_a = 0.1, \omega = 0.5$$





شکل ۶- توزیع دمای (a) گاز، (b) لایه در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف ضریب تشعشعی گاز

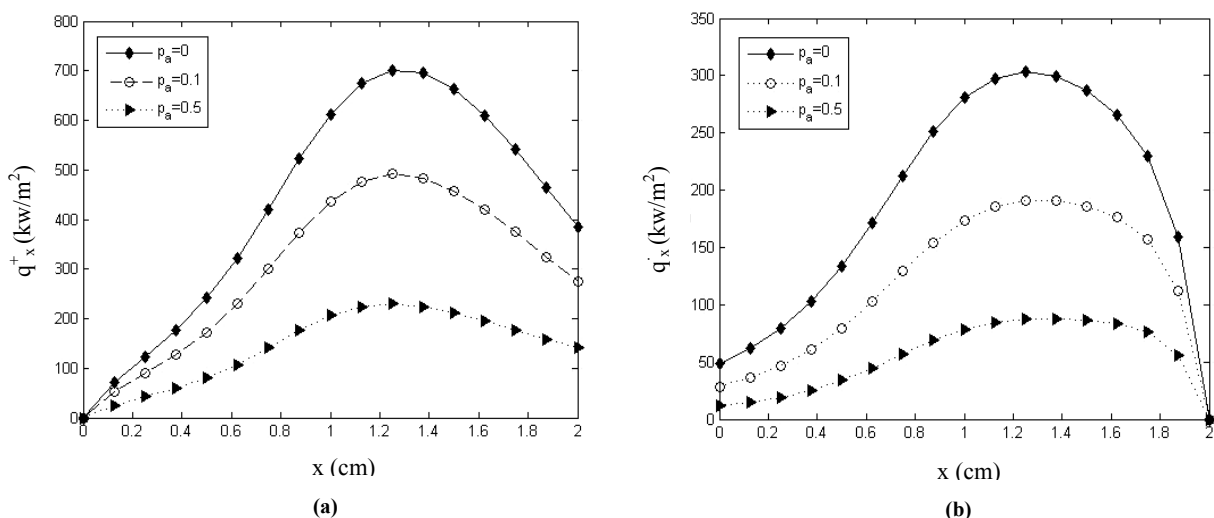
$$\Pi_1 = 0.014, \Pi_2 = 1, \Pi_3 = 2.5 \times 10^{-4}, \Pi_4 = 0.02, \Pi_5 = 5, \Pi_6 = 60, p_a = 0.1, \omega = 0.5$$

تغییر دمای لایه متخلخل نیز در طول لایه سه مقدار مختلف ضریب تشعشع گاز در شکل ۶(b) نشان داده شده است. در این شکل، کاملاً مشخص است که کاهش ضریب تشعشع گاز عملکرد باعث افزایش دمای لایه متخلخل خواهد شد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، در بسیاری از کارهای تحقیقی مشابه در زمینه تحلیل مشعل‌های متخلخل، فاز گاز به‌عنوان یک محیط غیرتشعشعی در نظر گرفته شده است. در صورتی که، همان‌گونه که شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند، کاملاً واضح است که تشعشع گاز متغیر مهم و اثرگذاری بر رفتار حرارتی مشعل‌های متخلخل است. با مراجعه به معادلات انرژی فازهای گاز و جامد (معادلات ۷ و ۸)، مشاهده می‌شود اثر تشعشع گاز عملکرد، که در آخرین عبارت این معادلات قرار گرفته است، ممکن است توسط متغیر  $p_a$  نیز تغییر کند. از لحاظ فیزیکی این متغیر نشانگر نسبت قدرت تابشی محیط با دمای  $T_i$  به حرارت تولیدشده در ناحیه احتراق است. کوچک‌بودن این متغیر موید در نظر گرفتن فرایند احتراق با انرژی آزادشده زیادتر در محفظه احتراق مشعل است؛ به عبارتی افزایش این متغیر معرف عملکرد سردتر مشعل است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای مقادیر بالاتر این متغیر، توزیع دمای گاز و لایه بیشتر تحت تاثیر تشعشع گاز قرار می‌گیرد. جهت مطالعه اثر متغیر  $p_a$  بر توزیع دمای گاز و لایه و همچنین توزیع شار حرارتی تابشی در طول مشعل، شکل‌های ۷ و ۸ ترسیم شده‌اند.

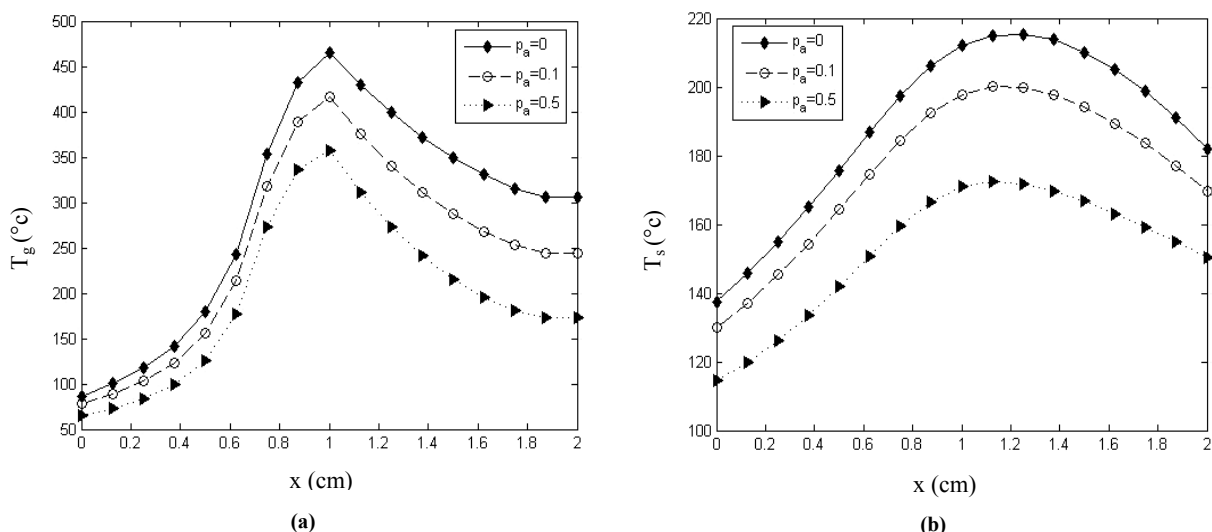
از شکل ۷ مشاهده می‌شود که مقادیر شار حرارتی تابشی هم در جهت پایین‌دست و هم بالادست، یعنی  $q_x^+$  و  $q_x^-$ ، با کاهش نرخ تولید حرارت و در نتیجه افزایش متغیر  $p_a$  کاهش می‌یابند. کاهش  $q_x^+$  به معنای کاهش راندمان تشعشعی مشعل است.

این رفتار با آنچه که قبلاً در شکل ۵ نشان داده شده است کاملاً در یک راستاست. همچنین شکل ۸ نشان می‌دهد که مشعل متخلخل با مقادیر بیشتر متغیر  $p_a$ ، دارای کارکرد سردتری، نسبت به زمانی که متغیر  $p_a$  کم باشد، خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شدت تولید حرارت و در نتیجه کاهش  $p_a$ ، دمای بیشینه گاز افزایش می‌یابد. دمای گاز در قسمت ابتدایی بیشتر شده و عمل پیش‌گرم شدن مخلوط ورودی سوخت و هوا با شدت بیشتری انجام می‌گیرد. پیش‌گرم شدن مخلوط، باعث بهبود فرایند احتراق و افزایش راندمان فرایند می‌شود. این مطلب با آنچه که در شکل ۶ به‌دست آمده نیز در توافق کامل است.



شکل ۷- توزیع شار حرارتی تابشی به سمت (a) پایین دست، (b) بالادست جریان در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف متغیر بی بعد  $p_a$

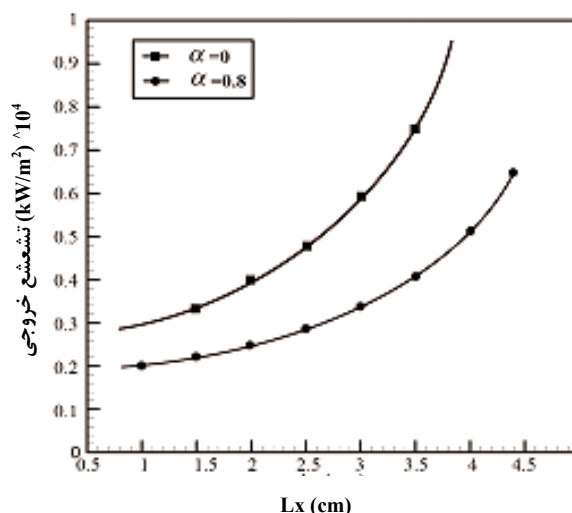
$$\Pi_1 = 0.014, \Pi_2 = 1, \Pi_3 = 2.5 \times 10^{-4}, \Pi_4 = 0.02, \Pi_5 = 5, \Pi_6 = 60, \alpha = \varepsilon = 0.8, \omega = 0.5$$



شکل ۸- توزیع دمای (a) گاز، (b) لایه در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف متغیر بی بعد  $p_a$

$$\Pi_1 = 0.014, \Pi_2 = 1, \Pi_3 = 2.5 \times 10^{-4}, \Pi_4 = 0.02, \Pi_5 = 5, \Pi_6 = 60, \alpha = \varepsilon = 0.8, \omega = 0.5$$

اثر ضخامت لایه متخلخل،  $L_x$ ، بر مقدار تابش خروجی از مشعل، برای دو مقدار مختلف ضریب تشعشع گاز عملگر، در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می شود تشعشع خروجی، با افزایش ضخامت لایه متخلخل، افزایش می یابد. این واقعیت به دلیل آن است که با افزایش سطح تماس بین فازهای گاز و جامد، فرایند تبدیل انرژی بین آنتالپی گاز و تشعشع حرارتی با نرخ بیشتری اتفاق می افتد. به طوری که مشعل های متخلخل با ضخامت لایه بیشتر، مقادیر تشعشع خروجی بیشتر و در نتیجه راندمان بالاتری خواهند داشت که این نتیجه در تحقیقات دیگری نیز مشاهده شده است [۱۲،۹]. البته این نتیجه با فرض عایق بودن جداره مشعل و همچنین صرف نظر از اثرات افت فشار لایه متخلخل صادق است. همچنین، از این شکل کاملاً مشخص است که برای داشتن مقادیر بیشتر تشعشع خروجی از مشعل متخلخل بایستی این نوع مشعل با جریان گاز غیر تشعشعی کار کند.



شکل ۹- اثر ضخامت لایه بر تشعشع خروجی از مشعل متخلخل

$$\Pi_1 = 0.014, \Pi_2 = 1, \Pi_3 = 2.5 \times 10^{-4}, \Pi_4 = 0.02, \Pi_5 = 5, \Pi_6 = 60, \omega = 0.5$$

## نتیجه گیری

یک مطالعه عددی انتقال حرارت در دامنه حل دوبعدی مستطیلی در یک مشعل متخلخل تابشی و با در نظر گرفتن اثر تشعشع گاز عملگر انجام شده است. با فرض عدم تعادل حرارتی بین فازهای گاز و جامد، معادلات انرژی جداگانه‌ای مشخص شده و روش جهت‌های مجزا جهت تعیین توزیع شار حرارتی تابشی به کار گرفته شده است. احتراق با در نظر گرفتن یک ناحیه تولید حرارت غیریکنواخت سهموی در وسط لایه متخلخل مدل شده و مشاهدات زیر به طور خلاصه از مطالعه حاضر حاصل شده است:

- ۱- مقادیر کوچک‌تر ضریب تشعشع گاز عملگر منجر به افزایش تابش خروجی از مشعل و افزایش راندمان می‌شود. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود شدت تابش خروجی مشعل به سمت پایین دست و بالادست جریان به ترتیب در حالت گاز غیرتشعشی برابر با ۳۹۰ و ۵۰ کیلووات بر مترمربع‌اند، در حالی که این مقادیر در حالت گاز تشعشی به ترتیب به ۲۸۰ و ۳۰ کیلووات بر مترمربع کاهش می‌یابند. همچنین، بررسی نتایج نشان‌دهنده کاهش دمای بیشینه گاز از ۴۸۰ به ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد از حالت گاز غیرتشعشی به گاز تشعشی است.
- ۲- مشاهده شد زمانی که مقدار متغیر بی‌بعد  $p_a$  افزایش می‌یابد، تشعشع خروجی و همچنین مقدار تلفات حرارتی از مشعل متخلخل تابشی کاهش می‌یابد. با تغییر  $p_a$  از صفر تا ۰/۵ شدت تابش خروجی مشعل به سمت پایین دست از ۳۸۰ به ۱۴۰ کیلووات بر مترمربع و دمای بیشینه گاز از ۴۶۰ به ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابند.
- ۳- نتایج محاسبات نشان می‌دهد که استفاده از لایه‌های متخلخل با ضخامت بیشتر و ضریب تشعشع گاز کمتر باعث افزایش تشعشع خروجی از مشعل و در نتیجه افزایش راندمان می‌شود.

## منابع

1. I. Malico, X. Y. Zhou and J. C. F. Pereira, "Two Dimensional Numerical Study of Combustion and Pollutants in Porous Burner," *Combust. Sci. and Tech*, 152, 2000, pp. 57-79.
2. T. C. Hayashi, I. Malico and J. C. F. Pereira, "Three-Dimensional Modeling of a Two-Layer Porous Burner for Household Applications," *J. Computers & Structures*, 82, 2004, pp. 1543-1550.
3. T. Takeno and K. Sato, "Heat Transfer Characteristics of Porous Radiant Burners," *Combust. Sci. Technol.*, 20, 1979, pp. 73-84.

4. S. B. Sathe and T. W. Tong, "A Numerical Analysis of Heat Transfer and Combustion in Porous Radiant Burners," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 33, 1990, pp. 1331-1338.
5. T. Tong and S. Sathe, "Heat Transfer Characteristics of Porous Radiant Burners," *Trans. of ASME, J. Heat Transfer*, 113, 1991, pp. 423-428.
6. C. L. Hackert and J. L. Ellzey, "Combustion and Heat Transfer in Model Two-Dimensional Porous Burners," *J. Combustion and Flame*, 116, 1999, pp. 177-185.
7. G. Brenner, "Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media," *J. Combust. Flame*, 123, 2000, pp. 201-213.
8. S. C. Mishra, "Heat Transfer Analysis of a Two Dimensional Rectangular Porous Radiant Burner," *J. Heat and Mass Transfer*, 33, 2006, pp. 467-474.
9. P. Talukdar, "Heat Transfer Characteristics of a Porous Radiant Burner under the Influence of a 2-D Radiation Field," *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2003, pp. 1-11.
10. P. Talukdar, "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.
11. I. Malico and J. C. F. Pereira, "Numerical Study on the Influence of Radiative Properties in Porous Media Combustion," *J. Heat Transfer*, 123, 2001, pp. 951-957.
12. M. M. Keshtkar and S. A. Gandjalikhan Nassab, "Theoretical Analysis of Porous Radiant Burners under 2-D Radiation Field using Discrete Ordinates Method," *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 32, 2009, pp.117-125.
13. S. A. Gandjalikhan Nassab and M. Fallah, "Study of Energy Recovery by Means of Porous Media Considering Gas Radiation Effect," *Proc. Instn. Mech. Engrs, part A: J. Power and Energy*, 220, 2006, pp. 509-513.
14. S. A. Gandjalikhan Nassab and M. Maramisaran, "Transient Numerical Analysis of a Multi-Layered Porous Heat Exchanger Including Gas Radiation Effect," *J. Thermal Sciences*, 48, 2009, pp. 1586-1595.
15. M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, USA, 1993.
16. C. Ben Kheder, B. Cherif and M. S. Sifaoui, "Numerical Study of Transient Heat Transfer in Semitransparent Porous Medium," *J. Renewable energy*, 27, 2002, pp. 543-560.
17. G. Oladed, Etude theorique et experimental du chaffage d' un gas s' eoulant a travers un materiau poreux soumis au rayonnement solaire concentre, PhD thesis, University of Perpignan, France, 1981.
18. S. A. Gandjalikhan Nassab and M. Fallah, "Study of Energy Recovery by Means of Porous Media Considering Gas Radiation Effect," *J. Power and Energt-Part A*, 220, 2006, pp. 509-513.

## English Abstract

# Gas Radiation Effect on Thermal Characteristics of Porous Radiant Burner

M. M. Keshtkar<sup>1</sup> and S. A. Gandjalikhan Nassab<sup>2</sup>

1- Assis. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad University, Kerman Branch, Iran (Correspondent author)

2- Prof., Mech. Eng., Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

(Received: 2012.5.15, Received in revised form: 2013.2.9, Accepted: 2013.3.16)

Thermal characteristics of a porous radiant burner (PRB) including gas radiation effects are identified in the present study. This system operates on the basis of effective energy conversion method between flowing gas enthalpy and thermal radiation. In the PRB, the gas and solid phases are considered in non-local thermal equilibrium and combustion is modeled by considering a non-uniform heat generation zone. The porous media as a gray body, in addition to its convective heat exchange with the gas, can absorb, emit and scatter thermal radiation. In order to accurately determine the thermal characteristics of PRB, the gas radiation is also taken into account and a theoretical analysis is conducted for a two dimensional model, where convection, conduction and radiation take place simultaneously in porous medium and gas flow. Discrete ordinates method is used to obtain the distribution of radiative heat flux in the porous media and the coupled energy equations for the gas and porous medium in steady condition are solved numerically. The crucial influence of gas radiation effect on the system's performance is thoroughly explored. A comparison has been made between the present numerical results and those reported by other investigators to validate the simulation for the gas radiative effect.

**Keywords:** Porous radiant burner, 2-D radiative field, Gas radiation